

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ
ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ (Α.Μ. 5757)
ΕΥΣΤΑΘΙΟΥ ΙΩΑΝΝΗΣ (Α.Μ. 4715)**

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΘΕΟΔΩΡΟΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΙΑ

ΠΑΤΡΑ 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την πτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και έχει ως αντικείμενο τις τεχνολογίες απορρύπανσης του υπεδάφους και των υπόγειων νερών.

Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η μελέτη του φαινομένου της ρύπανσης του υπεδάφους και των υπόγειων υδάτων καθώς και η παρουσίαση και η σύγκριση των τεχνικών αποκατάστασης που είναι διαθέσιμες σήμερα.

Θέλουμε να ευχαριστήσουμε θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μας κ. Θεοδοροπούλου Μαρία για την υπόδειξη του θέματος καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μας προσέφερε κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Αλεξανδρόπουλος Παναγιώτης
Ευσταθίου Ιωάννης
Μάιος 2016

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε 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.

Οι σπουδαστές

Αλεξανδρόπουλος Παναγιώτης

Ευσταθίου Ιωάννης

.....
(Υπογραφή)

.....
(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει σαν θέμα τις τεχνολογίες απορρύπανσης του υπεδάφους και των υπόγειων νερών.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του εδάφους καθώς και οι κυριότερες αιτίες ρύπανσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι διάφοροι μηχανισμοί διάδοσης της ρύπανσης στο έδαφος και στα υπόγεια νερά καθώς και οι επιπτώσεις της ρύπανσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι μέθοδοι παρακολούθησης και καταγραφής της ρύπανσης και επίσης οι γενικές κατηγορίες μεθόδων αντιμετώπισης της ρύπανσης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται λεπτομερώς οι τεχνολογίες απορρύπανσης των ακόρεστων εδαφών, ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται το ίδιο για τα κορεσμένα εδάφη και τα υπόγεια νερά.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται σύγκριση των διαθέσιμων τεχνικών απορρύπανσης και δίνονται βασικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται στην πράξη για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου απορρύπανσης ενός ρυπασμένου πεδίου.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εξίσου σημαντικές τεχνικές προστασίας από την επέκταση της ρύπανσης.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή.

Στο παράρτημα που ακολουθεί είναι συγκεντρωμένη η σχετική νομοθεσία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. ΡΥΠΑΝΣΗ ΥΠΕΛΑΦΟΥΣ	
1.1 Γενικά.....	3
1.2 Σχηματισμός του Εδάφους.....	4
1.3 Εδαφικοί Ορίζοντες.....	6
1.4 Ακόρεστη και Κορεσμένη Ζώνη Εδάφους-Υδροφόρος Ορίζοντας.....	8
1.5 Γενικά Χαρακτηριστικά της Ρύπανσης του Εδάφους και των Υπόγειων Υδάτων.....	10
1.6 Πηγές της Ρύπανσης.....	12
1.7 Οι Κυριότερες Αιτίες της Ρύπανσης.....	17
2. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΜΕ ΤΟ ΕΛΑΦΟΣ	
2.1 Γενικά.....	20
2.2 Επιπτώσεις της Ρύπανσης του Εδάφους.....	21
2.3 Ρύπανση των Υπόγειων Νερών.....	22
2.4 Διάδοση των Ρύπων στο Έδαφος.....	25
2.5 Μηχανισμοί Φυσικής Υποβάθμισης των Ρύπων.....	28
2.6 Μηχανισμοί Μεταφοράς των Ρύπων.....	29
3. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ	

3.1 Γενικά.....	33
3.2 Εντοπισμός και Παρακολούθηση της Ρύπανσης στο Υπέδαφος.....	34
3.3 Περιβαλλοντική διερεύνηση Υπεδάφους.....	35
3.4 Δειγματοληψία Υπόγειων Υδάτων.....	37
3.4.1 Γενικά.....	37
3.4.2 Μετρήσεις στην Ακόρεστη Ζώνη.....	37
3.4.3 Μετρήσεις σε Φρεάτια Υπόγειων Υδροφορέων.....	39
3.5 Κατηγορίες Τεχνικών Αποκατάστασης Ρυπασμένων Εδαφών	43
3.5.1 Γενικά.....	43
3.5.2 Ολική Εκσκαφή.....	44
3.5.3 Επεξεργασία με Φυτικοχημικές και Βιολογικές Μεθόδους.....	45
3.5.4 Εγκλωβισμός της Ρύπανσης.....	46
3.5.5 Απλή Παρακολούθηση της Διαδικασίας Εξασθένησης...	48
4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	
4.1 Γενικά.....	50
4.2 Βιοεξυγίανση.....	50
4.2.1 Γενικά.....	50
4.2.2 Βιοαερισμός.....	52
4.2.3 Φυτοεξυγίανση.....	54
4.2.4 Τεχνική Αγροκαλλιέργειας.....	56
4.2.5 Επεξεργασία σε Σωρούς.....	57
4.2.6 Βιοαντιδραστήρες.....	59
4.3 Φυτικοχημικές Μέθοδοι.....	59
4.3.1 Γενικά.....	59
4.3.2 Άντληση Εδαφικού Αέρα.....	60
4.3.3 Έκπλυση Εδάφους.....	61
4.3.4 Ηλεκτροκινητική Απορρύπανση.....	63
4.3.5 Φυσική Εξασθένηση.....	64
4.3.6 Πλύση Εδάφους.....	65
4.3.7 Σταθεροποίηση-Στερεοποίηση.....	67
4.4 Θερμικές Μέθοδοι.....	69
4.4.1 Γενικά.....	69
4.4.2 Θέρμανση με Ηλεκτρική Αντίσταση.....	70
4.4.3 Αποτέφρωση.....	71

4.4.4 Πυρόλυση.....	72
4.4.5 Θερμική Εκρόφηση.....	73
5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΛΑΦΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	
5.1 Γενικά.....	75
5.2 Βιοαναρρόφηση.....	75
5.3 Αεροδιασπορά.....	78
5.4 Διαπερατά Ενεργά Φράγματα.....	79
5.5 Αεροδιαχωρισμός.....	81
5.6 Άντληση και Επεξεργασία.....	82
5.7 Χημική Οξείδωση/Αναγωγή.....	84
6. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ	
6.1 Γενικά.....	86
6.2 Διάγραμμα Ροής για την Επιλογή των Κατάλληλων Τεχνολογιών Απορρύπανσης.....	87
6.3 Σύγκριση των Τεχνικών Απορρύπανσης.....	90
7. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	
7.1 Γενικά.....	94
7.2 Συστήματα Κάλυψης.....	94
7.3 Κατακόρυφα Περιμετρικά Διαφράγματα.....	96
7.4 Υδραυλικά Συστήματα.....	96
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	98
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	100
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	102

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το έδαφος αποτελεί προϊόν αποσάθρωσης διαφόρων πετρωμάτων και ορυκτών και αποτελείται από ανόργανα και/ή οργανικά στερεά συστατικά, καθώς και χώρους που καταλαμβάνονται από αέρια και νερό.

Σε κάθε αστική ή βιομηχανική δραστηριότητα είναι φυσικό να δημιουργούνται οι προϋποθέσεις δημιουργίας ρύπανσης του εδάφους. Στόχος μας θα πρέπει να είναι να ελαχιστοποιήσουμε τις πιθανότητες αυτές και να είμαστε σε θέση να αντιμετωπίσουμε την ρύπανση εφαρμόζοντας οργανωμένα εργαλεία διαχείρισης ρυπασμένης γης

Το έδαφος δέχεται ένα πλήθος από τοξικές και επικίνδυνες χημικές ουσίες και παρασκευάσματα ή απόβλητα, τα οποία ανάλογα με τη γεωμορφολογία του εδάφους και άλλες εξωγενείς συνθήκες ρυπαίνουν τοπικά το έδαφος ή διασκορπίζονται σε άλλα περιβαλλοντικά διαμερίσματα (π.χ. υπόγεια νερά) ή εκπλένονται στα διάφορα υδάτινα συστήματα. Η ρύπανση του χερσαίου περιβάλλοντος οδηγεί στην υποβάθμιση της ποιότητας των επιφανειακών εδαφών.

Το τελικό αποτέλεσμα της επιβάρυνσης του εδάφους με ρυπογόνες ουσίες είναι η υποβάθμιση της τελικής του εικόνας, που καθιστά αδύνατη τη χρησιμοποίησή του από τους οργανισμούς, λόγω έλλειψης θρεπτικών πόρων και ύπαρξης τοξικών παραγόντων, η διάβρωση και η ερημοποίηση.

Τα απόβλητα και η διαχείριση τους αποτελεί μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα σε πολλές αναπτυγμένες χώρες, ιδιαίτερα για την ποιότητα των εδαφών και τις τοξικές δράσεις σε ζωντανούς οργανισμούς.

Για την αντιμετώπιση της ρύπανσης του εδάφους και των υπόγειων υδάτων έχουν αναπτυχθεί πάρα πολλές τεχνικές. Οι τεχνικές αυτές παρουσιάζουν εξειδίκευση ανάλογα με το είδος του ρύπου και τις ιδιαίτερες περιβαλλοντικές συνθήκες του ρυπασμένου πεδίου.

Πριν την εξέταση και ανάλυση των εναλλακτικών λύσεων απορρύπανσης είναι απαραίτητο να προηγηθούν κατάλληλοι περιβαλλοντικοί έλεγχοι. Η τελική επιλογή της μεθόδου απορρύπανσης που θα εφαρμοστεί στηρίζεται στα δεδομένα που συγκεντρώνονται κατά τη διάρκεια των περιβαλλοντικών ελέγχων καθώς επίσης και σε διάφορες

περιβαλλοντικές και οικονομοτεχνικές παραμέτρους. Ο σκοπός της αξιολόγησης των διαφόρων τεχνολογιών είναι να προσδιοριστούν αυτές οι οποίες ανταποκρίνονται στους στόχους απορρύπανσης των πεδίων.

1. ΡΥΠΑΝΣΗ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το έδαφος (soil) είναι το πιο γνωστό πορώδες μέσο που συναντάται στο φυσικό κόσμο και καλύπτει τις ανώτατες στρώσεις του φλοιού της γης. Το έδαφος διαχωρίζει τη λιθόσφαιρα από την ατμόσφαιρα και εκτείνεται σε βάθος μέχρι 0.5 m από την επιφάνειά της γης. Τα στρώματα κάτω από το έδαφος ονομάζονται υπέδαφος. Το υπέδαφος εκτείνεται από 0.5 έως 5 m κάτω από την επιφάνεια, δηλαδή ως εκεί που φτάνουν οι ρίζες των φυτών και αρχίζει ο υδροφόρος ορίζοντας. Το έδαφος είναι ένα ανοικτό σύστημα που βρίσκεται σε συνεχή αλληλεπίδραση με την ατμόσφαιρα, την υδρόσφαιρα και τη βιόσφαιρα.

Το έδαφος αποτελεί το μέσο στήριξης και θρέψης των φυτών, συνιστά τη βάση της αγροτικής και δασικής παραγωγής, το φυσικό φίλτρο και το προστατευτικό στρώμα των αποθεμάτων του υπόγειου νερού καθώς επίσης και το χώρο όπου ζουν πολυάριθμοι μικροοργανισμοί που συμμετέχουν στην διαδικασία ανακύκλωσης στοιχείων όπως του αζώτου και του άνθρακα.

Δυστυχώς, λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, το έδαφος γίνεται καθημερινά αποδέκτης πολύ μεγάλων ποσοτήτων τοξικών και επιβλαβών ουσιών με αποτέλεσμα την υποβάθμιση ή ακόμα και τη ρύπανσή του. Ο όρος «ρύπανση» του εδάφους περιγράφει τη μείωση της ικανότητας του εδαφικού οικοσυστήματος να επιτελέσει τις βασικές του λειτουργίες λόγω της εναπόθεσης σε αυτό οργανικών ή ανόργανων ουσιών. Η ρύπανση του εδάφους αποτελεί μια ειδική περίπτωση της ευρύτερης έννοιας του όρου υποβάθμιση της ποιότητας του εδάφους και αναφέρεται στην χημική του υποβάθμιση. Οι διάφορες χημικές ουσίες που προκαλούν τη ρύπανση του εδάφους μπορεί να προέρχονται είτε από διάφορες φυσικές διεργασίες (φυσικοί ρύποι), είτε να είναι αποτέλεσμα ανθρωπογενών δραστηριοτήτων (ανθρωπογενείς ρύποι). Η είσοδος ρύπων στο έδαφος έχει ως αποτέλεσμα να πληγούν ή να χαθούν πολλές από τις λειτουργίες του εδάφους και πιθανότατα να προκληθεί έμμεσα ρύπανση των υπόγειων υδάτων.

Η απλή ύπαρξη διάφορων χημικών ουσιών στο έδαφος δεν αποτελεί ρύπανση. Οι χημικές αυτές ενώσεις, είτε είναι οργανικές είτε ανόργανες, για να χαρακτηρισθούν ως ρύποι και να προκαλέσουν ρύπανση στο οικοσύστημα του εδάφους, πρέπει να παρεμποδίζουν μία ή περισσότερες από τις εδαφικές λειτουργίες.

Η ρύπανση του εδάφους έχει ιδιαίτερα αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων, στους υπόλοιπους ζωντανούς οργανισμούς αλλά και γενικότερα στην οικολογική ισορροπία.

1.2 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ

Το έδαφος σχηματίζεται με φυσικό τρόπο από τη διάβρωση των επιφανειακών πετρωμάτων της γης. Η διάβρωση αυτή πραγματοποιείται κάτω από τη συνεχή επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως οι συνεχείς μεταβολές της θερμοκρασίας, ο άνεμος, η βροχή, ο παγετός, οι μικροοργανισμοί, τα ανώτερα φυτά και οι ζωικοί οργανισμοί. Για το σχηματισμό ενός στρώματος από χώμα μέσω φυσικών διαδικασιών αποσάθρωσης μητρικών πετρωμάτων απαιτείται ένα χρονικό διάστημα που κυμαίνεται από 100 έως 1000 χρόνια ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Επειδή το χρονικό διάστημα αυτό είναι αρκετά μεγάλο, το έδαφος δεν θεωρείται ανανεώσιμος φυσικός πόρος.

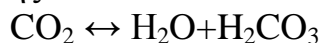
Με τον όρο διάβρωση περιγράφονται οι διεργασίες της ατμόσφαιρας που μετακινούν από την επιφάνεια της Γης, έδαφος ή τμήματα πετρωμάτων και στη συνέχεια τα αποθέτουν κάπου αλλού. Πιο συγκεκριμένα η διάβρωση αναφέρεται σε όλες τις φυσικές διαδικασίες που προκαλούν την αργή και σταθερή αποσύνθεση και στη συνέχεια μεταφορά των πετρωμάτων που είναι εκτεθειμένα στην επιφάνεια της Γης. Η αποσάθρωση αποτελεί μία υποπερίπτωση της διάβρωσης και αφορά τη διάλυση των πετρωμάτων με διάφορες φυσικές ή/και χημικές διεργασίες, με την προϋπόθεση ότι τα προϊόντα αυτής της διαδικασίας παραμένουν στη θέση τους. Ο βασικότερος παράγοντας που επηρεάζει τις παραπάνω διαδικασίες είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες.

Κατά τη μηχανική αποσάθρωση τα πετρώματα παθαίνουν μηχανική καταστροφή, δηλαδή καταστρέφεται μόνο η συνοχή των ορυκτολογικών συστατικών των πετρωμάτων, χωρίς να μεταβάλλεται η ορυκτολογική τους δομή και η χημική τους σύσταση. Οι αιτίες της μηχανικής αποσάθρωσης είναι οι μεγάλες ημερήσιες θερμοκρασιακές μεταβολές (για παράδειγμα στις ερήμους), η επίδραση του πάγου, η δράση του ανέμου αλλά και ο τεκτονισμός των πετρωμάτων. Ο κατακερματισμός των πετρωμάτων, για παράδειγμα λόγω των μεγάλων θερμοκρασιακών μεταβολών, οφείλεται στον διαφορετικό συντελεστή

θερμικής διαστολής των ορυκτών που αποτελούν το πέτρωμα. Επίσης το νερό της βροχής ή ακόμη και το θαλασσινό, όταν εισχωρήσει στο πέτρωμα και παγώσει, προκαλεί το θρυμματισμό του. Φυσική αποσάθρωση προκαλεί και ο οργανικός κόσμος, όπως οι ρίζες των φυτών, τα τρωκτικά, τα σκουλήκια κ.ά.

Κατά τη χημική αποσάθρωση το πέτρωμα καταστρέφεται, εν μέρει ή στο σύνολό του, λόγω χημικών αντιδράσεων ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και το πέτρωμα. Οι αιτίες της χημικής αποσάθρωσης είναι η δράση του βρόχινου ή θαλασσινού νερού ή ακόμη και η όξινη βροχή. Επίσης το ριζικό σύστημα των φυτών εκκρίνει υγρά, τα οποία προσβάλλουν και αποσαθρώνουν κυρίως τα ανθρακικά πετρώματα. Οι κατηγορίες της χημικής αποσάθρωσης είναι οι εξής:

- Υδρόλυση: αφορά τη διάσπαση των χημικών δεσμών ενός ορυκτού με την επίδραση του H_2O στα ορυκτά των πετρωμάτων και κυρίως τα πυριτικά που είναι τα πιο διαδεδομένα.
- Διάλυση: είναι η χημική διαδικασία που σχετίζεται με τη δράση του νερού στα πετρώματα σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία και την παρουσία CO_2 . Ένα πολύ διαδεδομένο είδος διάλυσης στην επιφάνεια της Γης είναι αυτή των ασβεστόλιθων, που διεθνώς ονομάζεται καρστική. Ο ασβεστόλιθος διαλύεται ελάχιστα στο καθαρό νερό. Όταν όμως το βρόχινο νερό εμπλουτιστεί με CO_2 απευθείας από την ατμόσφαιρα ή κατά τη διήθησή του στο έδαφος, τότε έχουμε δημιουργία ανθρακικού οξέος που είναι ένα ασθενές οξύ μέσω της αντίδρασης:



Στη συνέχεια το H_2CO_3 που μεταφέρει το νερό προσβάλλει τα ανθρακικά πετρώματα μετατρέποντας το $CaCO_3$ στο ένυδρο δισανθρακικό άλας του ασβεστίου, το οποίο είναι διαλυτό στο νερό. Όσο μεγαλύτερη η ποσότητα του CO_2 στο νερό, τόσο περισσότερη η διάλυση που συμβαίνει.

- Ενυδάτωση: αφορά την πρόσληψη νερού από ορισμένα ορυκτά. Για παράδειγμα, το θεικό ασβέστιο ($CaSO_4$), όταν προσλάβει νερό, μετατρέπεται σε γύψο.
- Οξείδωση: αφορά την πρόσληψη οξυγόνου από τα ορυκτά και τη μετατροπή τους σε οξείδια και υδροξείδια.
- Αναγωγή: αφορά την απομάκρυνση οξυγόνου από τις ενώσεις με αποτέλεσμα την καταστροφή τους.

Τα είδη των εδαφών χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο της δημιουργίας τους. Διακρίνουμε τα βραχώδη εδάφη τα οποία προέρχονται είτε από στερεοποίηση μάγματος (οπότε και έχουμε τα

πυριγενή πετρώματα) είτε από ιζηματογένεση στο βυθό θαλασσών και λιμνών (οπότε και έχουμε τα ιζηματογενή πετρώματα) είτε από μεταμόρφωση πυριγενών και ιζηματογενών και μεταμορφωμένων εδαφών (οπότε και έχουμε τα μεταμορφωσιγενή πετρώματα). Από αποσάθρωση των βραχωδών εδαφών προκύπτουν τα μαλακά εδάφη που αποτελούν και τον εξωτερικό φλοιό της γης. Άλλο ένα είδος εδαφών είναι τα αλλούβια ιζήματα, τα οποία προέρχονται από απόθεση φερτών υλικών από τρεχούμενο νερό σε πεδιάδες λόγω μείωσης ταχύτητας ροής (αλλουβιακά ριπίδια), σε πεδιάδες λόγω πλημμύρας χειμάρρων (πλημμυρικές ζώνες), σε ποτάμια δέλτα και σε παράκτιες ζώνες στον πυθμένα της θάλασσας. Τέλος έχουμε και τα οργανικά εδάφη που προέρχονται από οργανικές αποθέσεις στο έδαφος. Αυτές μπορεί να είναι ημιτελώς αποσυντεθειμένες ή πλήρως αποσυντεθειμένες. Η σύσταση των εδαφών σε επίπεδο κοκκομετρίας αλλά και ορυκτολογίας προσδιορίζει τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες οι οποίες με τη σειρά τους καθορίζουν τη συμπεριφορά του εδάφους σε ότι αφορά τις αλληλεπιδράσεις με το νερό και άλλα στερεά και υγρά.

1.3 ΕΔΑΦΙΚΟΙ ΟΡΙΖΟΝΤΕΣ

Η διαδικασία σχηματισμού του εδάφους δημιουργεί διαφορετικές οριζόντιες στιβάδες που ονομάζονται εδαφικοί ορίζοντες (soil horizons) και έχουν διαφορετική υφή και σύσταση. Οι εδαφικοί ορίζοντες είναι χαρακτηριστικοί για το κάθε έδαφος και διαφέρουν ως προς το μέγεθος, το χρώμα και τη σύσταση. Οι κυριότεροι εδαφικοί ορίζοντες απεικονίζονται στο σχήμα 1.1 και είναι οι εξής [3]:

(1) Ο-ορίζοντας: το ανώτατο στρώμα του εδάφους με φυτά, οργανικά υπολείμματα, πεσμένα φύλλα δένδρων και οργανική ύλη που έχει αποσυντεθεί μερικώς.

(2) Α-ορίζοντας: τα πρώτα 30-50 cm εδάφους (topsoil) με χουμικά οξέα, μερικά ανόργανα ορυκτά, οργανική ύλη και ζωντανούς οργανισμούς. Παρουσιάζει τη μεγαλύτερη βιολογική δραστηριότητα από όλες τις άλλες στιβάδες.

(3) Ε-ορίζοντας: είναι η ζώνη που διαχωρίζει το επιφανειακό έδαφος από το υπέδαφος. Η διαλυμένη ή αιωρούμενη ύλη κινείται προς τη στιβάδα αυτή και γι' αυτό καλείται ζώνη έκπλυσης (leaching zone).

O Horizon

An organic horizon composed primarily of recognizable organic material in various stages of decomposition.

A Horizon

The surface horizon: Composed of various proportions of mineral materials and organic components decomposed beyond recognition.

E Horizon

Zone of eluviation: Mineral horizon resulting from intense leaching and characterized by a gray or grayish brown color.

B Horizon

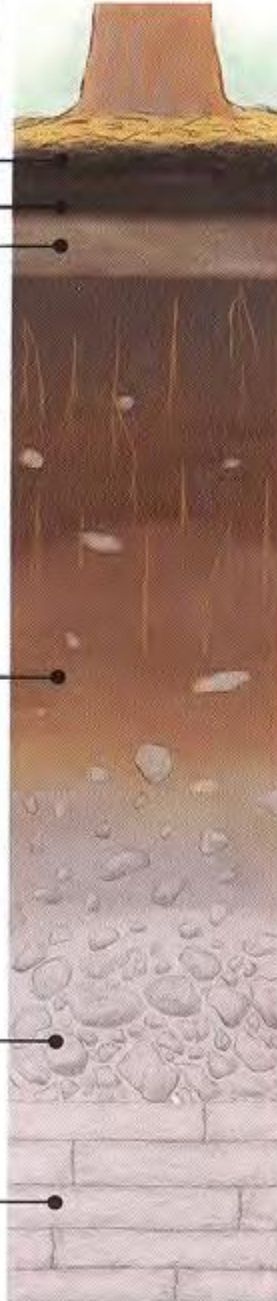
Zone of illuviation: Horizon enriched with minerals, e.g., clay, organic materials, or carbonates, leached from the A or E horizons.

C Horizon

Horizon characterized by unweathered minerals that are the parent material from which the soil was formed.

R Horizon

Bedrock.



Σχήμα 1.1 Οι κυριότεροι εδαφικοί ορίζοντες [3].

(4) **B-ορίζοντας ή υπέδαφος:** είναι ορίζοντας εμπλουτισμού όπου συγκεντρώνονται τα χουμικά οξέα, αργιλικά υλικά, οξειδία του σιδήρου, του μαγνησίου και του αλουμινίου, μετά το στράγγισμα από τις υπερκείμενες στιβάδες.

(5) **C-ορίζοντας:** ελαφρά διαβρωμένο βραχώδες έδαφος που περιέχει τα ορυκτά συστατικά του κύριου εδάφους.

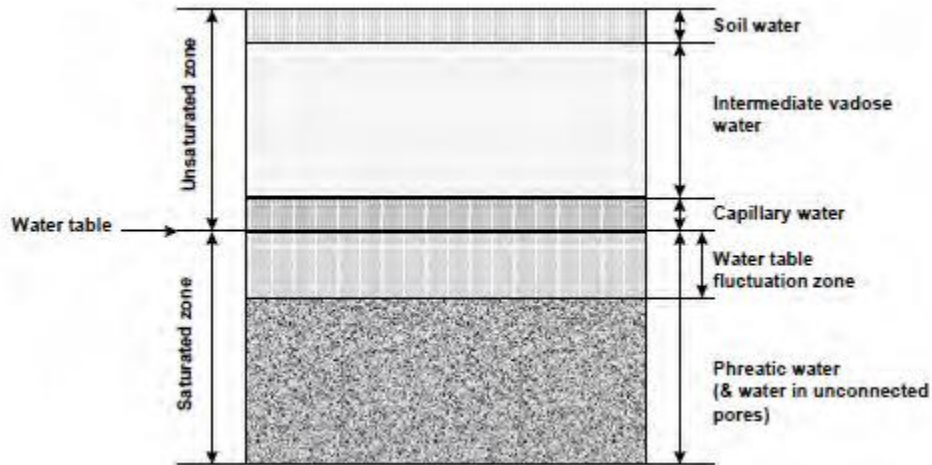
(6) **R:** πέτρωμα (bedrock) το οποίο δεν επηρεάζεται από τη διάβρωση.

1.4 ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΚΑΙ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΕΛΑΦΟΥΣ-ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΑΣ

Ο όρος «υπόγειο νερό» χρησιμοποιείται για να περιγράψει το ποσοστό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχοπτώσεων) που διηθείται στο έδαφος και αποθηκεύεται στα κενά των γεωλογικών σχηματισμών με πίεση ίση ή μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Η κατακόρυφη κατανομή νερού και αέρα στο έδαφος αναφέρεται συνήθως σαν κατανομή νερού και είναι σημαντική στην κατανόηση της μετακίνησης υγρών ρύπων και ατμών. Η κατανομή αυτή απεικονίζεται σχηματικά στο σχήμα 1.2.

Η συνύπαρξη νερού και αέρα ορίζει την ακόρεστη ζώνη (unsaturated ή vadose zone), ενώ η απουσία αέρα ορίζει την κορεσμένη ζώνη (saturated ή phreatic zone). Το όριο μεταξύ αυτών των δύο ζωνών είναι ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας, ο οποίος ορίζεται ως η επιφάνεια νερού στο υπέδαφος στην οποία η πίεση είναι ακριβώς ίση με την ατμοσφαιρική πίεση και είναι το επίπεδο εκείνο όπου θα ανυψωθεί το νερό σε ένα φρεάτιο που έχει ανοιχθεί με γεώτρηση στην κορεσμένη ζώνη. Η ανύψωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα έχει φυσικές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του χρόνου με αλλαγές στα πρότυπα φόρτισης/αποφόρτισης λόγω βροχοπτώσεων και προσρόφησης νερού.

Η ακόρεστη ζώνη είναι η ζώνη πάνω από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα όπου η πίεση του νερού στους πόρους του εδάφους είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική. Στο μεγαλύτερο τμήμα της ακόρεστης ζώνης, οι πόροι δεν είναι πλήρως γεμάτοι με νερό αλλά περιέχουν και αέρα. Το νερό μετακινείται προς τα κάτω λόγω βαρύτητας (gravity flow) και προς τα επάνω λόγω τριχοειδούς εισρόφησης (capillary imbibition). Τα εδαφικά αέρια μπορούν να μετακινηθούν προς όλες τις διευθύνσεις.



Σχήμα 1.2 Σχηματική απεικόνιση της ακόρεστης και της κορεσμένης ζώνης του υπεδάφους [3].

Κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα βρίσκεται η κορεσμένη ζώνη του εδάφους όπου οι πόροι είναι πλήρως κορεσμένοι με νερό και η πίεση του νερού στους πόρους είναι μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική. Η ταχύτητα με την οποία το νερό θα μετακινείται στην κορεσμένη ζώνη του εδάφους εξαρτάται από τις ιδιότητες του γεωλογικού υλικού, όπως η υδραυλική αγωγιμότητα και το πορώδες, και από την υδραυλική βαθμίδα (πτώση πίεσης). Οι κύριες πηγές υπόγειου νερού σε μια περιοχή είναι η τοπική βροχόπτωση και η διήθηση, ή η υπόγεια ροή από μια φορτισμένη περιοχή. Η φορτισμένη περιοχή μπορεί να είναι μια υψηλού ρυθμού βροχόπτωση ή μέρος από σύστημα ποταμού που αυτοτροφοδοτείται με νερό από μια απομακρυσμένη περιοχή βροχοπτώσεων.

Η μεταβατική ζώνη (capillary fringe) είναι μια ζώνη εδάφους κορεσμένη με νερό που βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Το πάχος της καθορίζεται από το μέγιστο ύψος διείσδυσης νερού μέσω των πόρων του εδάφους λόγω αυθόρμητης εισρόφησης. Εδάφη με μικρό μέγεθος πόρων έχουν παχύτερες μεταβατικές ζώνες συγκριτικά με αυτά που έχουν πιο μεγάλο μέγεθος πόρων. Σε ένα πηλώδες ή αργιλώδες έδαφος, η μεταβατική ζώνη μπορεί να έχει πάχος πάνω από 1 m, ενώ σε ένα χονδρόκοκκο αμμώδες έδαφος θα έχει πάχος λιγότερο από 1 mm.

Η περιεκτικότητα σε νερό γενικά μειώνεται με αύξηση του ύψους και παράλληλα αυξάνεται ο αέρας που γεμίζει τους πόρους. Η ακριβής σχέση που δίνει τη μείωση της περιεκτικότητας σε νερό εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους.

Οι εδαφικές στρώσεις που παρεμβάλλονται μεταξύ ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης μπορεί να είναι αδιαπέραστες (aquiclude), αδιαπέραστες στεγανές (aquifluge), υδροφορείς (aquifer) ή ημιδιαπερατές στρώσεις (aquitard).

Ανάλογα με το είδος των στρώσεων διακρίνουμε δύο είδη υδροφορέων στην κορεσμένη ζώνη:

➤ *Περιορισμένοι ή υπό πίεση υδροφορείς:*

Είναι υδροφορείς περιορισμένοι και από πάνω και από κάτω από αδιαπέραστους σχηματισμούς. Η ροή σε αυτούς τους υδροφορείς είναι ανάλογη της ροής σε κλειστούς αγωγούς. Στην περίπτωση που το πιεζομετρικό ύψος βρίσκεται υψηλότερα της επιφάνειας του εδάφους τότε πρόκειται για αρτεσιανό υδροφορέα.

➤ *Φρεάτιοι ή μη περιορισμένοι υδροφορείς:*

Είναι υδροφορείς περιορισμένοι από κάτω από αδιαπέραστους σχηματισμούς και με ελεύθερη επιφάνεια προς τα πάνω. Η ροή του υπόγειου νερού σε αυτούς τους υδροφορείς είναι ανάλογη της ροής σε ανοιχτούς αγωγούς.

1.5 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Το έδαφος είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τη ρύπανση των υπογείων νερών και την ποιοτική υποβάθμισή τους. Η έκταση και το μέγεθος της υδατικής ρύπανσης αποτελεί άμεση συνάρτηση της εδαφικής ρύπανσης μιας και συνήθως από εκεί προέρχεται. Επομένως η αντιμετώπιση της εδαφικής ρύπανσης συντείνει όχι μόνο στην αντιμετώπιση, αλλά και στην πρόληψη της ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων. Από τη στιγμή που η έκθεση των υποδοχέων (χλωρίδα, πανίδα, άνθρωπος) στους ρύπους γίνεται κυρίως μέσω του νερού, αυτό συνεπάγεται ότι και η αντιμετώπιση της ρύπανσης στην πηγή (έδαφος) συντείνει στην ελαχιστοποίηση του κινδύνου έκθεσης ευαίσθητων υποδοχέων. Σε αυτό το πνεύμα, η Οδηγία 2000/60/ΕΚ, εντάσσει στα πλαίσια της προστασίας της ποιότητας των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων και την παρακολούθηση της ρύπανσης του εδάφους και της ατμόσφαιρας ως πηγών επιβλαβών ουσιών.

Εδαφικά χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν στον τομέα της ρύπανσης του γεωπεριβάλλοντος είναι το πορώδες (porosity), που ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών σε ένα εδαφικό δείγμα προς το συνολικό όγκο του δείγματος και η διαπερατότητα (permeability) που

αναφέρεται στη δομή των κενών στο έδαφος και την ικανότητα για ροή μέσω αυτού. Και τα δύο παραπάνω εδαφικά χαρακτηριστικά είναι συνάρτηση της κοκκομετρίας και της ορυκτολογίας του εδάφους. Γενικότερα, η ικανότητα των φυσικών γεωλογικών υλικών, όπως το έδαφος, να ακινητοποιούν πιθανούς ρύπους του υπόγειου νερού και να εμποδίζουν την κίνησή τους είναι ευρέως γνωστή. Η κίνηση των εν δυνάμει ρύπων, που μπορούν να φτάσουν στο υπόγειο νερό στο υπέδαφος, ελέγχεται από γεωχημικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα όταν χημικά συστατικά του υπόγειου νερού αντιδρούν και αλληλεπιδρούν με τα εδάφη. Κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες η κινητικότητα των συστατικών καθυστερεί από αυτές τις αντιδράσεις και αλληλεπιδράσεις με αποτέλεσμα οι ρύποι να σταθεροποιούνται σε γεωχημικές 'παγίδες' κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να περιγραφεί από ένα σχετικά απλό γεωχημικό/υδρογεωλογικό μοντέλο και αποκαλείται γεωχημική εξασθένηση (geochemical attenuation).

Η γεωχημική εξασθένηση είναι ένας προβλέψιμος, εξαρτημένος και ποσοτικοποιήσιμος μηχανισμός που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό μίας εγκατάστασης διαχείρισης αποβλήτων και στις λειτουργίες ενός συστήματος παρακολούθησης. Παραδείγματα γεωχημικής νέων χημικών ουσιών και οι ποσότητες αυτές συνεχώς αυξάνουν. Οι ουσίες αυτές αναφέρονται ως ξενοβιοτικές (Xenobiotics), δηλώνοντας με τον όρο αυτό ότι δεν υπάρχουν και δε συντίθενται στο φυσικό περιβάλλον. Παρά το γεγονός ότι πολλές από τις ουσίες αυτές, όταν είναι οργανικές, καταναλώνονται ή καταστρέφονται, ένα ορισμένο ποσοστό τους ελευθερώνεται στο έδαφος και το υπόγειο νερό. Αρκετές από τις ουσίες αυτές είναι τοξικές για τον άνθρωπο ακόμα και σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις και ορισμένες από αυτές είναι δυνατόν να διατηρηθούν στο έδαφος και το υπόγειο νερό για πολλά χρόνια αποτελώντας σημαντικό περιβαλλοντικό κίνδυνο.

Η όλο και πιο έντονη παρουσία αυτών των ουσιών στο γεωπεριβάλλον και η τοξικότητά τους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την εφαρμογή τεχνολογιών εξυγίανσης (Remediation Technologies) του εδάφους και των υπόγειων νερών. Στόχος των τεχνολογιών αυτών είναι είτε η εξ ολοκλήρου απομάκρυνση, είτε η ακινητοποίηση (immobilization), είτε η μείωση σε αποδεκτά επίπεδα των τοξικών ουσιών.

1.6 ΠΗΓΕΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Πιο συγκεκριμένα, η γεωπεριβαλλοντική ρύπανση μπορεί να οφείλεται σε ποικίλους παράγοντες. Οι κυριότεροι παράγοντες αναφέρονται παρακάτω και μια γενική κατάταξη των πηγών ρύπανσης εδαφών και υπόγειων νερών παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Φυσικές Διεργασίες

Η ρύπανση που οφείλεται σε φυσικές διεργασίες στο υπέδαφος, πραγματοποιείται είτε λόγω της διάλυσης αλάτων κατά τη διήθηση υπόγειων υδάτων διαμέσου των πετρωμάτων, είτε λόγω της εξατμισοδιαπνοής που συμβαίνει σε αβαθείς υδροφορείς και οδηγεί στην αύξηση των αλάτων στο υπόγειο νερό.

Τέτοιοι τύποι ρύπανσης συνήθως οδηγούν στην αύξηση της συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων (πχ. αρσενικού), χλωριόντων, θεικών, νιτρικών, ιόντων σιδήρου, ασβεστίου κ.τ.λ.

Διάθεση αποβλήτων από τον άνθρωπο

Η ρύπανση που προκαλείται από τα απόβλητα ανθρώπινων δραστηριοτήτων αναφέρεται στην απευθείας, είτε μετά από κατάλληλη επεξεργασία, διάθεση στο έδαφος αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων, παραπροϊόντων εκμετάλλευσης ορυκτών πόρων (πχ. μεταλλεία) καθώς και σε διάθεση αποβλήτων κτηνοτροφικών μονάδων, κλπ.

Λοιπές ανθρώπινες δραστηριότητες

Ως άλλες πηγές ρύπανσης του εδάφους μπορεί να είναι ανθρώπινες δραστηριότητες που συνδέονται με γεωργικές εκμεταλλεύσεις, ατυχήματα κατά τη μεταφορά ή αποθήκευση ρυπογόνων υλικών, αστοχία τεχνικών έργων, ανεξέλεγκτη απόρριψη αποβλήτων στο έδαφος λόγω άγνοιας της επικινδυνότητας ή έλλειψης παιδείας και ενδεχόμενες διαφυγές ρύπων από αποθηκευτικούς χώρους ρυπογόνων υλικών και αποβλήτων.

Οι πηγές ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων διαχωρίζονται σε σημειακές και μη σημειακές. Στην κατηγορία των σημειακών πηγών εντάσσονται οι ανεξέλεγκτες χωματερές, σταθμοί επεξεργασίας λυμάτων, βιομηχανίες, βιοτεχνίες, κτηνοτροφικές μονάδες, αστικά λύματα, φρεάτια κλπ. Οι μη σημειακές πηγές προέρχονται κυρίως από τη γεωργία, τη διάβρωση πετρωμάτων και την εισροή θαλασσινού νερού από υπεράντληση των παράκτιων υδροφορέων και είναι πιο δύσκολο να αντιμετωπιστούν οι επιπτώσεις τους.

Ένας κύριος διαχωρισμός και κατηγοριοποίηση των ρύπων είναι εάν αυτοί είναι οργανικής ή ανόργανης φύσης. Οι οργανικοί ρύποι κατηγοριοποιούνται περισσότερο με βάση τις αντίστοιχες αναλυτικές μεθόδους σε πτητικούς, ημιπτητικούς, μη πτητικούς και ζιζανιοκτόνα και είναι ευκολότερο να εξεταστούν σε ομάδες ανάλογα με τη χημική τους σύσταση.

Αν επιπλέον έχουν μικρή διαλυτότητα, δηλαδή δεν αναμειγνύονται με το νερό, διακρίνονται οι δύο ακόλουθες περιπτώσεις:

- (α) του διαλυμένου ρύπου και
- (β) του ρύπου σε μη υδατική φάση.

Επιπλέον, οι οργανικοί μη-υδατοδιαλυτοί ρύποι διακρίνονται σε ελαφρύτερους του νερού (LNAPL, Lighter-Non Aqueous Phase Liquids) που επιπλέουν στην επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα και σε βαρύτερους του νερού (DNAPL, Denser-Non Aqueous Phase Liquids) που βυθίζονται και εξαπλώνονται με τη μορφή παχύρρευστων υγρών. Ειδικές περιπτώσεις αποτελούν οι πλέον ανθεκτικοί οργανικοί ρύποι που περιέχουν χλώριο στη χημική τους σύσταση, όπως οι οργανικοί διαλύτες, λόγω της τοξικότητας του χλωρίου στους μικροοργανισμούς που εμποδίζει τη βιοδιάσπασή τους.

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικά των κυριότερων ρυπαντικών ουσιών [2].

Κατηγορία ενώσεων	Τυπικές τοποθεσίες	Κινητικότητα	Αρνητική δράση
Αγροχημικά	Βιομηχανίες, Αγροτικές εκμεταλλεύσεις	Χαμηλή	Καρκίνος, ασθένειες του νευρικού συστήματος
Βενζίνη και Πετρέλαιο	Διωλιστήρια, Πρατήρια, Στρατιωτικές βάσεις	Μέτρια ως Χαμηλή	Καρκινογενέσεις
Διαλύτες	Βαφεία αυτοκινήτων, Στρατ. Βάσεις	Υψηλή ως Μέτρια	Καρκινογενέσεις

PAHs	Εργοστάσια	Μέτρια ως Χαμηλή	Καρκινογενέσεις
PCBs	Εργοστάσια	Χαμηλή	Καρκίνος
Διοξίνες	Χημική βιομηχανία, Καύση αστικών απορριμμάτων	Χαμηλή	Καρκίνος
Βαρέα μέταλλα	Εργοστάσια, Βιομηχανίες, Ηλεκτρονικά απόβλητα, Στρατιωτικές βάσεις	Υψηλή ως Χαμηλή	Καρκίνος, προσβολή μυελού οστών και ερυθρών αιμοσφαιρίων, ασθένειες του νευρικού συστήματος, δερματικές παθήσεις
Αντιβιοτικά και άλλα φαρμακευτικά προϊόντα	Αστικά λύματα	Υψηλή	Διαταραχές του ανοσοποιητικού συστήματος, υπό ερεύνα
Μικροβιακή ρύπανση	Αστικά λύματα, Χωματερές	Υψηλή ως Χαμηλή	Διαταραχές του ανοσοποιητικού συστήματος, ασθένειες του νευρικού συστήματος, υπό εξερεύνηση
Πτώση της στάθμης των υδροφορέων	Υπεράντληση των υδροφορέων	Υψηλή ως Χαμηλή	Έμμεση

Από την άλλη μεριά, οι ανόργανοι ρύποι συμπεριφέρονται διαφορετικά, ανάλογα με τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υπόγειων νερών και του εδάφους, όπως για παράδειγμα την ορυκτολογία και το pH του εδάφους ή την περιεκτικότητα σε άλατα του νερού και το pH. Επίσης η τοξικότητα και η κινητικότητά τους είναι σε άμεση εξάρτηση από τη γεωχημική μορφολογία του εκάστοτε ανόργανου ρύπου (contaminant speciation). Για παράδειγμα, σε τιμές pH μεγαλύτερες του

5-6, ενώ το εξασθενές χρώμιο είναι ευδιάλυτο στο νερό, το τρισθενές χρώμιο είναι δυσδιάλυτο. Αντίθετα, σε τιμές pH μικρότερες του 3-4, η διαλυτότητα του χρωμίου αντιστρέφεται. Μεταξύ των ανόργανων ρύπων που απαντώνται στο γεωπεριβάλλον που είναι συγχρόνως οι πιο τοξικοί και οι πλέον δύσκολο να αντιμετωπιστούν, συμπεριλαμβάνονται ο υδράργυρος, τα οξυανιόντα του αρσενικού και του χρωμίου, το κάδμιο, το σελήνιο, ο μόλυβδος και το μαγγάνιο.

Συνολικά, η μεταφορά και η εν γένει συμπεριφορά των ρύπων στο γεωπεριβάλλον καθορίζεται από πολύπλοκες διεργασίες. Οι κυριότερες διεργασίες αφορούν στη συναγωγή (advection), τη μοριακή διάχυση (diffusion), τη μηχανική διασπορά (mechanical dispersion), την προσρόφηση (sorption) και τέλος τις χημικές και βιολογικές αντιδράσεις.

Συναγωγή είναι η μεταφορά μάζας ενός ρύπου, που οφείλεται καθαρά στη ροή του υπόγειου νερού, χωρίς να συμπεριλαμβάνει τις όποιες αλληλεπιδράσεις του ρύπου με το νερό και το έδαφος. Η ποσότητα της μάζας που μεταφέρεται λόγω συναγωγής είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του ρύπου στο υπόγειο νερό και της γραμμικής ταχύτητας της ροής. Λόγω της ετερογένειας των γεωλογικών υλικών, η μεταφορά μάζας με συναγωγή μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά μέτωπα μεταφοράς ενός ρύπου στα διάφορα γεωλογικά στρώματα. Για την παρακολούθηση της εξέλιξης της ρύπανσης ενός υδροφορέα, θα πρέπει να συλλεχθούν δείγματα υπόγειου νερού από φρεάτια γεωτρήσεων, που ενδέχεται να διαπερνούν διάφορα γεωλογικά στρώματα. Επειδή η συναγωγή μεταφέρει ρύπους με διαφορετική ταχύτητα σε κάθε γεωλογικό στρώμα, το δείγμα που συλλέγεται σε κάθε φρεάτιο θα είναι μείγμα επιμέρους δειγμάτων, που αντιστοιχούν στα διάφορα γεωλογικά στρώματα, τα οποία διαπερνώνται από τις γεωτρήσεις, και ενδέχεται να έχουν διαφορετική συγκέντρωση, αν και βρίσκονται στην ίδια απόσταση από την πηγή.

Η μοριακή διάχυση αφορά το φαινόμενο μεταφοράς μάζας το οποίο οφείλεται στην κινητική ενέργεια των μορίων και συμβαίνει από σημεία υψηλής συγκέντρωσης σε σημεία χαμηλής συγκέντρωσης. Αποτέλεσμα της διάχυσης είναι η εξάπλωση ενός ρύπου από το σημείο εισαγωγής του σε ένα πορώδες μέσο, ακόμη και στην περίπτωση που δεν υπάρχει ροή υπογείου ύδατος. Σε σύγκριση με τη συναγωγή και τη διασπορά, η διάχυση αποτελεί μία σχετικά βραδεία διεργασία μεταφοράς μάζας. Όμως, σε εδάφη με πολύ χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα, πχ. αργιλικά στρώματα, η διάχυση είναι ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς μάζας ρυπαντικών ουσιών.

Η μηχανική διασπορά είναι μία διεργασία αναμίξεως η οποία οφείλεται στους εξής τρεις μηχανισμούς:

1. Διαφορά στην ταχύτητα του ρευστού, όπως κατανέμεται στη διατομή των πόρων: η ταχύτητα στο μέσον του πόρου είναι μεγαλύτερη από αυτήν πλησίον των τοιχωμάτων.
2. Μερικά τμήματα του ρευστού διανύουν μεγαλύτερη απόσταση σε μερικές γραμμές ροής από ότι άλλα τμήματα σε άλλες γραμμές ροής, για να διανύσουν την ίδια ευθεία απόσταση. Αυτή η “ζικ-ζακ” διαδρομή οφείλεται στην πολυπλοκότητα του πορώδους μέσου (tortuosity).
3. Μερικοί πόροι έχουν μεγαλύτερη διάμετρο από άλλους, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται μεγαλύτερες ταχύτητες στους μεγαλύτερους πόρους.

Η ανάμιξη και η εξάπλωση των ρύπων στη διεύθυνση της ροής λέγεται εγκάρσια διασπορά. Ο συνδυασμός της μοριακής διαχύσεως και μηχανικής διασποράς λέγεται υδροδυναμική διασπορά (hydrodynamic dispersion). Το αποτέλεσμα της υδροδυναμικής διασποράς είναι ότι μερικά μόρια των ρύπων και του νερού θα κινούνται ταχύτερα από τη μέση ταχύτητα του ρευστού και μερικά άλλα θα κινούνται βραδύτερα. Έτσι, το αποτέλεσμα είναι η εξάπλωση των ρύπων και η ελάττωση της συγκεντρώσεώς τους, με συνέπεια την άφιξή τους σε κάποιο σημείο αναφοράς (π.χ. υδροληψία) ταχύτερα από ό,τι υπολογίζεται με βάση τη μέση ταχύτητα ροής.

Η προσρόφηση (adsorption) είναι μία φυσική ή/και χημική διεργασία, με την οποία μία ουσία συσσωρεύεται σε μία διεπιφάνεια (interphase). Οι διεπιφάνειες που ενδιαφέρουν σε προβλήματα ρύπανσης υπόγειων εδαφών και νερών είναι η διεπιφάνεια στερεού-υγρού, στερεού-αερίου, υγρού-αερίου και υγρού-υγρού. Η ουσία που συσσωρεύεται λέγεται προσρόφημα (adsorbate). Η στερεά φάση, στην επιφάνεια της οποίας λαμβάνει χώρα η προσρόφηση, λέγεται προσροφητής (adsorbent). Στα προβλήματα ρύπανσης υπογείων εδαφών και υδάτων ο κατ' εξοχήν προσροφητής είναι το έδαφος και τα γεωλογικά υλικά των υδροφορέων. Ενώ η προσρόφηση είναι ένα επιφανειακό φαινόμενο, η απορρόφηση (absorption) είναι η διεργασία κατά την οποίαν μία ουσία συσσωρεύεται μέσα σε μία άλλη φάση και συνεπώς δεν αποτελεί μόνο επιφανειακό φαινόμενο. Η προσρόφηση επηρεάζει σημαντικά διάφορες διεργασίες, όπως τη βιολογική ή μη βιολογική αποδόμηση, την κίνηση, την εξαέρωση και επομένως είναι καθοριστικής σημασίας για την τύχη των ρυπαντικών ουσιών στο έδαφος.

Τέλος, πολλοί ρύποι υφίστανται χημικούς ή/και βιολογικούς μετασχηματισμούς και αντιδράσεις στο υπόγειο περιβάλλον, με αποτέλεσμα την ελάττωση της συγκεντρώσεώς τους. Για παράδειγμα οργανικοί ρύποι μπορεί να αποδομηθούν βιολογικά σε λιγότερο τοξικούς

ρύπους από μικροοργανισμούς του υπεδάφους, εάν συντρέχουν ευνοϊκές περιβαλλοντικές συνθήκες και προϋποθέσεις πχ. αερισμός του υπεδάφους, κατάλληλη τιμή pH και θερμοκρασίας.

1.7 ΟΙ ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΑΙΤΙΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Το έδαφος, μαζί με τα υδάτινα συστήματα, είναι ο κυριότερος αποδέκτης της ανθρωπογενούς ρύπανσης. Οι βιομηχανικές, βιοτεχνικές και εμπορικές δραστηριότητες ρυπαίνουν σε μεγάλο βαθμό το έδαφος. Τα υγρά και στερεά απόβλητα αρχικά εναποτίθενται και επεξεργάζονται σε χερσαίες εγκαταστάσεις. Γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα, λιπάσματα και φυτοφάρμακα ρυπαίνουν καλλιεργημένες εκτάσεις.

Ατυχήματα και διαρροές πετρελαίου, απόβλητα ορυχείων και λατομείων είναι μερικές άλλες αιτίες ρύπανσης εδαφών. Το έδαφος απορροφά και ατμοσφαιρικούς ρύπους που κατακρημνίζονται με αργούς ρυθμούς ανάλογα με τις συνθήκες και τη γεωμορφολογία των περιοχών κυρίως μέσω της βροχής και του χιονιού.

Το έδαφος δέχεται όλες αυτές τις τοξικές και επικίνδυνες χημικές ουσίες και παρασκευάσματα ή απόβλητα, τα οποία ανάλογα με τη γεωμορφολογία του εδάφους και άλλες εξωγενείς συνθήκες ρυπαίνουν τοπικά το έδαφος ή διασκορπίζονται σε άλλα περιβαλλοντικά διαμερίσματα (π.χ. υπόγεια νερά) ή εκπλένονται στα διάφορα υδάτινα συστήματα.

Στην περίπτωση των λιπασμάτων βασικά συστατικά των οποίων είναι το νιτρικό και θειικό αμμώνιο, η ουρία, φωσφορικά άλατα και άλατα του καλίου, το έδαφος εμπλουτίζεται με θρεπτικά συστατικά για τα φυτά, αλλά η αλόγιστη χρήση τους δημιουργεί προβλήματα. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της οργανικής ύλης, η πορώδης υφή του εδάφους αλλοιώνεται και η συγκράτηση του νερού στο έδαφος μειώνεται. Με τη μείωση του νερού αυξάνεται η απώλεια θρεπτικών συστατικών και μειώνεται η γονιμότητα του εδάφους.

Η προσπάθεια των γεωργών να αυξήσουν την απόδοση οδηγεί στην αύξηση της τοξικότητας στο έδαφος και στα νερά, εφόσον βέβαια δεν γίνει σωστή διαχείριση του προβλήματος.

Παρόμοια προβλήματα ρύπανσης δημιουργούν ορισμένα από τα φυτοφάρμακα και οι μεταβολίτες τους στο έδαφος. Η συσσώρευση των υπολειμμάτων φυτοφαρμάκων σε γεωργικές εκτάσεις έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση τοξικών φαινομένων στους χερσαίους οργανισμούς, στους γαιοσκώληκες, και στους μικροοργανισμούς, ενώ σιγά σιγά υποβαθμίζεται η υφή και η ποιότητα των εδαφών. Ιδιαίτερα

προβλήματα προκαλούν τα φυτοφάρμακα που βιοαποικοδομούνται με αργούς ρυθμούς (μη βιοδιασπάσιμα) ή κατά τη διάσπασή τους παράγουν τοξικούς μεταβολίτες.

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

Σημαντικό πρόβλημα ρύπανσης εδαφών αποτελούν το πετρέλαιο, τα προϊόντα διύλισης, τα λιπαντικά και οι διάφοροι διαλύτες που είναι προϊόντα της χημικής βιομηχανίας πετρελαίου. Η ρύπανση από πετρέλαιο και τα προϊόντα του προκύπτει κατά τις χερσαίες μεταφορές, τις διαρροές από εργοστάσια, τις βιοτεχνίες και τις αποθήκες τους, τις παλαιές εγκαταστάσεις διυλιστηρίων, τα πρατήρια υγρών καυσίμων και τα διάφορα ατυχήματα σε εγκαταστάσεις άντλησης πετρελαίου.

Η τοξικότητα του πετρελαίου λόγω της ύπαρξης αδιάλυτων υδρογονανθράκων, πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (ΠΑΥ) και πτητικών αρωματικών ενώσεων καθιστά τη ρύπανση επικίνδυνη για τους χερσαίους οργανισμούς, τη χλωρίδα και τους μικροοργανισμούς του εδάφους.

Σε πολλές χώρες υπάρχουν αυστηρές προδιαγραφές για τις εγκαταστάσεις διύλισης πετρελαίου και προγράμματα καθαρισμού εδαφών που έχουν ρυπανθεί από παλαιές εγκαταστάσεις. Τα σοβαρά προβλήματα περιβαλλοντικής ρύπανσης και οι επιπτώσεις σε ευαίσθητα οικοσυστήματα που προκαλεί το πετρέλαιο αποτελούν θέματα περιβαλλοντικής τοξικολογίας και στον τομέα αυτό έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες. Λόγω των προβλημάτων ρύπανσης, ο καθαρισμός των ρυπασμένων εδαφών από πετρέλαιο με διάφορες τεχνικές έχουν αποτελέσει ειδικό κλάδο της περιβαλλοντικής επιστήμης και διαχείρισης αποβλήτων.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι οι βασικότερες αιτίες ρύπανσης των εδαφών είναι:

- τα λιπάσματα και φυτοφάρμακα των γεωργικών εκμεταλλεύσεων
- τα υγρά και στερεά απόβλητα των κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων
- τα υγρά και στερεά απόβλητα των χημικών βιομηχανιών
- τα αστικά και νοσοκομειακά απόβλητα που διατίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής και αποτέφρωσης σε υψηλές θερμοκρασίες
- η ρύπανση από την εκμετάλλευση του πετρελαίου, λιπαντικών υλών και ελαστικών τροχοφόρων
- η ρύπανση από απόβλητα μεταλλευτικών και λατομικών επιχειρήσεων

- η ρύπανση από βαρέα μέταλλα που προέρχονται από χημικές βιομηχανίες, καύση στερεών και υγρών ορυκτών καυσίμων και άλλες διεργασίες εμπλουτισμού ή καθαρισμού μεταλλευμάτων

2. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΜΕ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το έδαφος δέχεται όλες αυτές τις τοξικές και επικίνδυνες χημικές ουσίες και παρασκευάσματα ή απόβλητα, τα οποία ανάλογα με τη γεωμορφολογία του εδάφους και άλλες εξωγενείς συνθήκες ρυπαίνουν τοπικά το έδαφος ή διασκορπίζονται σε άλλα περιβαλλοντικά διαμερίσματα (π.χ. υπόγεια νερά) ή εκπλένονται στα διάφορα υδάτινα συστήματα. Η ρύπανση του χερσαίου περιβάλλοντος οδηγεί στην υποβάθμιση της ποιότητας των επιφανειακών εδαφών.

Το σύνολο της αλληλεπίδρασης των ρύπων με το έδαφος περιγράφεται με την έννοια της γεωχημικής υποβάθμισης. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στη γεωχημική υποβάθμιση μπορούν να χωριστούν σε φυσικές, χημικές και βιολογικές. Οι κυριότερες είναι:

- Προσρόφηση – απελευθέρωση ρύπων (Φυσική διεργασία)
- Διάλυση – Καθίζηση (Φυσική διεργασία)
- Αντιδράσεις οξέος – βάσης (Χημική διεργασία)
- Οξείδωση – Αναγωγή (Χημική διεργασία)
- Ζεύξη ιόντων (Χημική διεργασία)
- Ραδιενεργός απομείωση (Χημική διεργασία)
- Μικροβιακή κυτταρική σύνθεση (Βιολογική διεργασία)

Οι ρύποι, από μια γενικότερη προσέγγιση, διακρίνονται σε συντηρητικούς και μη συντηρητικούς. Συντηρητικοί θεωρούνται οι ρύποι που γενικά δεν προσροφώνται στην επιφάνεια των εδαφικών κόκκων και δεν αντιδρούν με το υπόγειο νερό, ούτε υποβαθμίζονται με άλλο τρόπο, για παράδειγμα μέσω χημικών, βιολογικών ή ραδιενεργών αντιδράσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο ρύπος να ακολουθεί την κίνηση του υπόγειου νερού και να μεταφέρεται προς τα κατόντη, με αποτέλεσμα να επεκτείνεται η ρύπανση. Οι συντηρητικοί ρύποι είναι γενικά υδρόφοβοι (NAPL). Το χλώριο αποτελεί ένα παράδειγμα συντηρητικού ιόντος. Τα βαρέα μέταλλα, κάποια τοξικά στοιχεία και οι χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες αποτελούν χαρακτηριστικούς μη συντηρητικούς

επικίνδυνους ρύπους, που αναμειγνύονται με το υπόγειο νερό και συσσωρεύονται στα ιζήματα και στους θαλάσσιους οργανισμούς. Ειδικά οι χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες, που είναι ανθρωπογενούς προέλευσης, προκαλούν καρκινογενέσεις και μεταλλάξεις. Τα βαρέα μέταλλα (π.χ. υδράργυρος, κάδμιο, μόλυβδος, χρώμιο, βανάδιο, νικέλιο, χαλκός κ.ά.) και τα τοξικά στοιχεία αρσενικό, σελήνιο και τελλούριο γενικά δεν αποδομούνται στο περιβάλλον και μάλιστα βιοσυσσωρεύονται. Σε μικρές συγκεντρώσεις δεν προκαλούν προβλήματα και μάλιστα θεωρούνται απαραίτητα για την κανονική ανάπτυξη των οργανισμών. Σε μεγάλες συγκεντρώσεις όμως αποτελούν πολύ επικίνδυνους ρύπους για το περιβάλλον.

Οι μη συντηρητικοί ρύποι υποβαθμίζονται κατά την είσοδό τους στο έδαφος, με αποτέλεσμα η συνολική μάζα τους να ελαττώνεται, και εφόσον μπουν στην κίνηση του υπόγειου νερού, ελαττώνεται η ταχύτητα μεταγωγής του νερού, γεγονός που καθυστερεί τη διάδοση της ρύπανσης.

2.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η ρύπανση του υπεδάφους έχει τις εξής αρνητικές επιπτώσεις:

- Στην ποιότητα των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων
- Στη χλωρίδα και το ευρύτερο οικοσύστημα
- Στην ανθρώπινη υγεία
- Στην κατάσταση των κτιρίων και υλικών στην περιοχή
- Στην ασφάλεια των εργαζομένων και των κατοίκων
- Στην αισθητική της περιοχής
- Στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη της περιοχής

Οι επιπτώσεις από τη ρύπανση του εδάφους συνήθως εμφανίζονται αργότερα από τη στιγμή της ρύπανσης αφού κάθε ουσία που διασκορπίζεται στο έδαφος καταλήγει στα τροφικά δίκτυα των οικοσυστημάτων. Προχωρώντας στις τροφικές αλυσίδες οι ρύποι δημιουργούν το φαινόμενο της βιολογικής συσσώρευσης. Με άλλα λόγια, οι οργανισμοί που έχουν απορροφήσει κάποιο ρύπο από το έδαφος, ας πούμε ένα φυτό, θα χρησιμεύσουν ως τροφή για άλλους οργανισμούς, όπως ένα φυτοφάγο ζώο. Αυτό στη συνέχεια θα φαγωθεί από ένα σαρκοφάγο ζώο, το οποίο θα συσσωρεύσει το ρύπο στους ιστούς του σε μεγαλύτερες ποσότητες. Τελικά η ουσία-ρύπος θα συγκεντρωθεί σε ακόμα μεγαλύτερες ποσότητες σε οργανισμούς παμφάγους που τρέφονται συγχρόνως και με φυτά και με ζώα, όπως ο άνθρωπος. Έτσι, μέσω της τροφικής αλυσίδας, οι ρύποι μεταφέρονται από τα κατώτερα

τροφικά επίπεδα στα ανώτερα και η σταδιακή συσσώρευση τους είναι τόσο μεγαλύτερη όσο το τροφικό επίπεδο είναι υψηλότερο.

2.3 ΡΥΠΑΝΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ

Η διαμόρφωση της ποιότητας του νερού στο έδαφος και τους υπόγειους υδροφορείς εξαρτάται από τη μεταφορά μάζας των διαφόρων ουσιών και στοιχείων που την καθορίζουν. Η ποιότητα του υπόγειου και εδαφικού νερού αναφέρεται στη χημική του σύνθεση, με τα διαλυμένα και αιωρούμενα υλικά, στην ενεργειακή του κατάσταση, και στους μικροοργανισμούς. Η διαμόρφωση της σύστασης του νερού είναι αποτέλεσμα φυσικών, χημικών, βιολογικών διαδικασιών και ανθρώπινης επέμβασης, είτε με την απευθείας εισαγωγή χημικών και βιολογικών ουσιών στα υπόγεια νερά, είτε έμμεσα επεμβαίνοντας στις φυσικές διαδικασίες που επηρεάζουν το σύστημα των υπόγειων νερών (π.χ. η εισροή θαλασσινού νερού).

Η χημική σύσταση του φυσικού υπόγειου νερού εξαρτάται μόνο από τις φυσικές διαδικασίες και είναι αποτέλεσμα της υδρογεωλογικής και γεωχημικής ιστορίας του. Η ανθρώπινη επέμβαση προσδιορίζεται σε περιοχές με σημαντική χρήση της γης, όπως στις αστικοποιημένες περιοχές, μεταλλεία και αγροτικές περιοχές.

Το νερό, είτε προέρχεται από τις βροχοπτώσεις ή από τα υγρά απόβλητα που εφαρμόζονται στο έδαφος είναι ο κύριος παράγοντας μεταφοράς ουσιών μέσα στο έδαφος. Το επιφανειακό νερό διηθείται στο έδαφος και διαμέσου της ακόρεστης ζώνης κινείται προς τους υπόγειους υδροφορείς, όπου διακλαδίζεται προς διάφορες διευθύνσεις ανάλογα με τις συνθήκες ροής που επικρατούν στον υδροφορέα. Το ρυπασμένο νερό ακολουθεί τις καθορισμένες διαδικασίες κίνησης του υπόγειου νερού.

Με την παρέλευση του χρόνου η ένταση της ρύπανσης του νερού είτε μειώνεται μέσα στο υδροφορέα ή το ρυπασμένο νερό οδηγείται προς ένα φρεάτιο ή ευκαιριακά εξέρχεται στα επιφανειακά υδάτινα συστήματα (ποτάμια, λίμνες, θάλασσα).

Η ταφή των στερεών αποβλήτων (χωματερές από σκουπίδια οικισμών και στερεών αποβλήτων βιομηχανιών) μπορεί να αποτελέσει αιτία υποβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων νερών λόγω της έκπλυσης που προκαλεί το νερό που διέρχεται από τη μάζα των αποβλήτων. Τα εκπλύματα (leachates) αποτελούνται από το νερό που κατά την κίνησή του δια μέσου της μάζας των στερεών αποβλήτων εμπλουτίζεται με ρύπους και τα παράγωγα της αποικοδόμησης των αποβλήτων με τις χημικές και βιοχημικές αντιδράσεις.

Η άρδευση σε ξηρά και ημίξηρα κλίματα είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά και εναπόθεση των ανόργανων ενώσεων και αλάτων στην ακόρεστη ζώνη. Λόγω της εξατμισοδιαπνοής, αυξάνει η συγκέντρωση των αλάτων στο εδαφικό νερό με αποτέλεσμα το νερό που διηθείται βαθιά να περιέχει διαλυμένα άλατα σε συγκεντρώσεις δύο και τρεις φορές μεγαλύτερες από αυτές του εφαρμοζόμενου νερού.

Στα διαπερατά εδάφη, η περίσσεια νερού που περνά τη ζώνη παρασέρνει τα διαλυμένα υλικά (ιδιαίτερα τα ιόντα χλωρίου, θεικών, νιτρικών και νατρίου) στα υπόγεια νερά. Η επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση του νερού για άρδευση είναι μία σοβαρή διαδικασία συσσώρευσης των αλάτων στα επιφανειακά και τα υπόγεια νερά. Με την εφαρμογή των λιπασμάτων στο έδαφος, που συνήθως περιέχουν ανόργανα στοιχεία, προκαλείται αύξηση των λιπασματικών στοιχείων στο εδαφικό διάλυμα.

Ποιοτικά οι πιο επιβλαβείς ρύποι για την υγεία του ανθρώπου, από τη γεωργία, είναι τα νιτρικά ιόντα, τα οποία με μεγάλη ευκολία μεταφέρονται με το νερό που διηθείται βαθιά δια μέσου της ακόρεστης ζώνης του εδάφους και της υπόγειας ροής στους υπόγειους υδροφορείς. Η άρδευση και η εφαρμογή των λιπασμάτων ανόργανου αζώτου φαίνεται ότι συντελούν στην ταχύτερη αύξηση των νιτρικών σε πολλές αγροτικές περιοχές.

Αλλά αύξησή τους μπορεί να παρατηρηθεί και σε μη αρδευόμενες περιοχές με οργανικά εδάφη. Σε αυτήν την περίπτωση τα νιτρικά απελευθερώνονται κατά την ανοργανοποίηση των φυτικών υπολειμμάτων και των ζωικών αποβλήτων που ενσωματώνονται στο έδαφος. Τα στερεά απόβλητα (κοπριές) των ζώων είναι επίσης σημαντικές πηγές νιτρικών και διαλυμένων αλάτων.

Τα φυτοφάρμακα που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα στη γεωργία για την προστασία των καλλιεργειών από τα έντομα (εντομοκτόνα), μύκητες (μυκητοκτόνα) και βακτήρια (βακτηριοκτόνα) και την καταπολέμηση των ζιζανίων (ζιζανιοκτόνα) αποτελούν σημαντικό κίνδυνο ρύπανσης των υπογείων νερών. Παρότι οι οργανικές ουσίες που χρησιμοποιούνται σαν φυτοφάρμακα είναι ταχείας αποικοδόμησης, σημαντικές ποσότητες αυτών και των προϊόντων της διάσπασής τους έχουν καταγραφεί στα υπόγεια νερά. Σημαντικό ρόλο για τη σοβαρότητα της ρύπανσης από τα αγροχημικά αποτελεί η τοξικότητα, η ποσότητα και ο χρόνος παραμονής της ουσίας στο έδαφος καθώς και ο τρόπος εφαρμογής τους στο έδαφος.

Οι πιο σπουδαίοι μικροοργανισμοί στα υπόγεια νερά είναι τα παθογόνα βακτήρια, οι μύκητες και διάφορα άλλα παράσιτα. Τα σοβαρότερα προβλήματα υγείας που προκαλούνται από τους μικροοργανισμούς του υπόγειου νερού είναι ο τύφος, η χολέρα και η ηπατίτιδα. Οι πηγές των μικροοργανισμών είναι τα ανθρώπινα και ζωικά

λύματα και απόβλητα. Η ρύπανση των υπόγειων νερών προκαλείται από την εδάφια διάθεση των λυμάτων των σταθμών επεξεργασίας αστικών λυμάτων και σηπτικών δεξαμενών, τις εκπλύσεις από τους σκουπιδότοπους, και τις ποικίλες γεωργικές πρακτικές, όπως η διάθεση στο έδαφος της ζωικής κόπρου για οργανική λίπανση.

Τα μη αναμίξιμα με το νερό υγρά (non-aqueous phase liquids NAPLs), είναι ρύποι, που η παρουσία τους στην ακόρεστη ζώνη παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Τα υγρά αυτά εμφανίζουν μία χωριστή υγρά φάση στο υδάτινο περιβάλλον.

Γενικά τα NAPLs είναι υγρά τα οποία έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη ή μικρότερη από του νερού. Διακρίνονται σε LNAPLs που είναι τα μη αναμίξιμα με το νερό υγρά με πυκνότητα μικρότερη από το νερό και σε DNAPLs που έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη από το νερό. Παράδειγμα ελαφρότερων από το νερό είναι τα υγρά καύσιμα των υδρογονανθράκων, όπως η βενζίνη, το πετρέλαιο θέρμανσης, η κηροζίνη.

Στα DNAPLs περιλαμβάνονται οι χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες όπως οι τετραχλωράνθρακες, το 1,1,1 τριχλωροαιθάνιο, οι χλωροφαινόλες, τα χλωροβενζόλια, τα τετραχλωροαιθυλένια και τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs). Η σημασία των NAPLs στα υπόγεια νερά οφείλεται στην εμμονή τους κάτω από το έδαφος και την ικανότητα που έχουν να ρυπαίνουν μεγάλους όγκους νερού λόγω της μικρής δυνατότητας απομάκρυνσής του. Η μετακίνηση των ουσιών αυτών στο έδαφος εξαρτάται από την ποσότητα που ελευθερώνεται στο έδαφος, τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους και τη δομή του εδάφους δια μέσου του οποίου μετακινούνται.

Η μεταβολή της υδραυλικής ισορροπίας λόγω της άντλησης και υπεράντλησης των υπόγειων νερών είναι η αιτία για την εισροή νερών χαμηλής ποιότητας, υφάλμυρων ή εμπλουτισμένων με ιχνοστοιχεία και βαριά μέταλλα από διπλανούς, επάλληλους υδροφορείς και από τη θάλασσα. Είναι η αιτία της υφαλμύρωσης των παραθαλάσσιων υδροφορέων.

Η εκτίμηση της ρύπανσης των υπόγειων νερών και της επικυδυνότητας γίνεται με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων που περιγράφουν τη μεταφορά μάζας, τους μετασχηματισμούς και τις αλληλεπιδράσεις με τα στερεά του εδάφους στην κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη. Λόγω της πληθώρας δεδομένων που απαιτούνται για την εφαρμογή των μοντέλων αυτών, την τελευταία δεκαετία, αναπτύσσονται απλοποιημένες διαδικασίες εκτίμησης της πιθανότητας ρύπανσης των υπόγειων νερών που μπορούν να εφαρμοστούν σε μεγάλη χωρική κλίμακα και για διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Απλά μοντέλα δείκτες που χρησιμοποιούνται την τελευταία δεκαετία για τον προσδιορισμό των ευπρόσβλητων περιοχών των υπόγειων νερών είναι το DRASTIC, οι παράγοντες εξασθένισης και επιβράδυνσης (AF, Rf) και ο

δείκτης έκπλυσης (LI). Με τους δείκτες αυτούς μπορούν να παραχθούν χάρτες ευπροσβλητικότητας των υπόγειων νερών που αποτελούν τη βάση για τη διαχείριση χρήσεων γης και εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων ώστε να μειωθούν οι κίνδυνοι επέκτασης της υποβάθμισης των υπόγειων νερών.

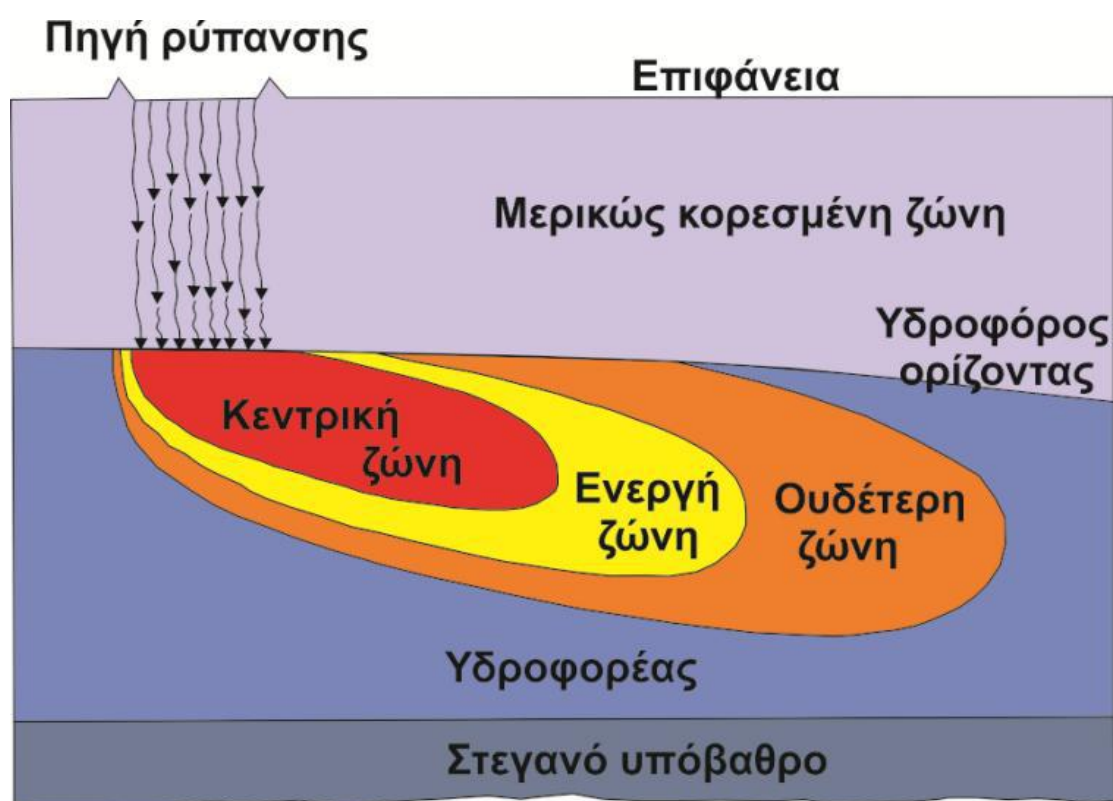
2.4 ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Ο κύριος παράγοντας μεταφοράς των ρύπων στο έδαφος και υπέδαφος είναι το νερό που προέρχεται από τις βροχοπτώσεις ή από τα υγρά απόβλητα. Το επιφανειακό νερό διηθείται στο έδαφος, εισέρχεται στην ακόρεστη ζώνη και στη συνέχεια κινείται προς τον υδροφορέα, όπου ακολουθεί την κίνηση του υπόγειου νερού. Οι ρύποι εισέρχονται στο έδαφος μέσω των στραγγισμάτων που παράγονται κατά την αποσύνθεσή τους στον χώρο υγειονομικής ταφής, λόγω ατυχημάτων που μπορεί να συμβούν στις δεξαμενές αποθήκευσης των υγρών αποβλήτων και λόγω της καλλιέργειας του εδάφους (λιπάσματα, φυτοφάρμακα).

Η κίνησή τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8, στη μερικώς κορεσμένη ζώνη είναι σχεδόν κατακόρυφη και ένα τμήμα τους συγκρατείται στην επιφάνεια των εδαφικών κόκκων, λόγω της γεωχημικής προσρόφησης ή με μηχανική συγκράτηση μέσω τριχοειδών δυνάμεων. Η υπόλοιπη ποσότητα φθάνει στον υδροφόρο ορίζοντα. Γενικά οι διαλυμένοι στο νερό ρύποι, με την είσοδό τους στον υδροφορέα, παρασύρονται από το υπόγειο νερό (σχήμα 2.8) του οποίου η κίνηση ελέγχεται από την υδραυλική κλίση. Έτσι μεταφέρονται προς τα κατάντη. Κατά τη μεταφορά των ρύπων από το υπόγειο νερό συμβαίνουν μηχανικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες, με αποτέλεσμα τη βαθμιαία υποβάθμιση (εξασθένηση) του ρυπαντικού φορτίου, την αραίωση των ρύπων και την επέκταση της ρύπανσης.

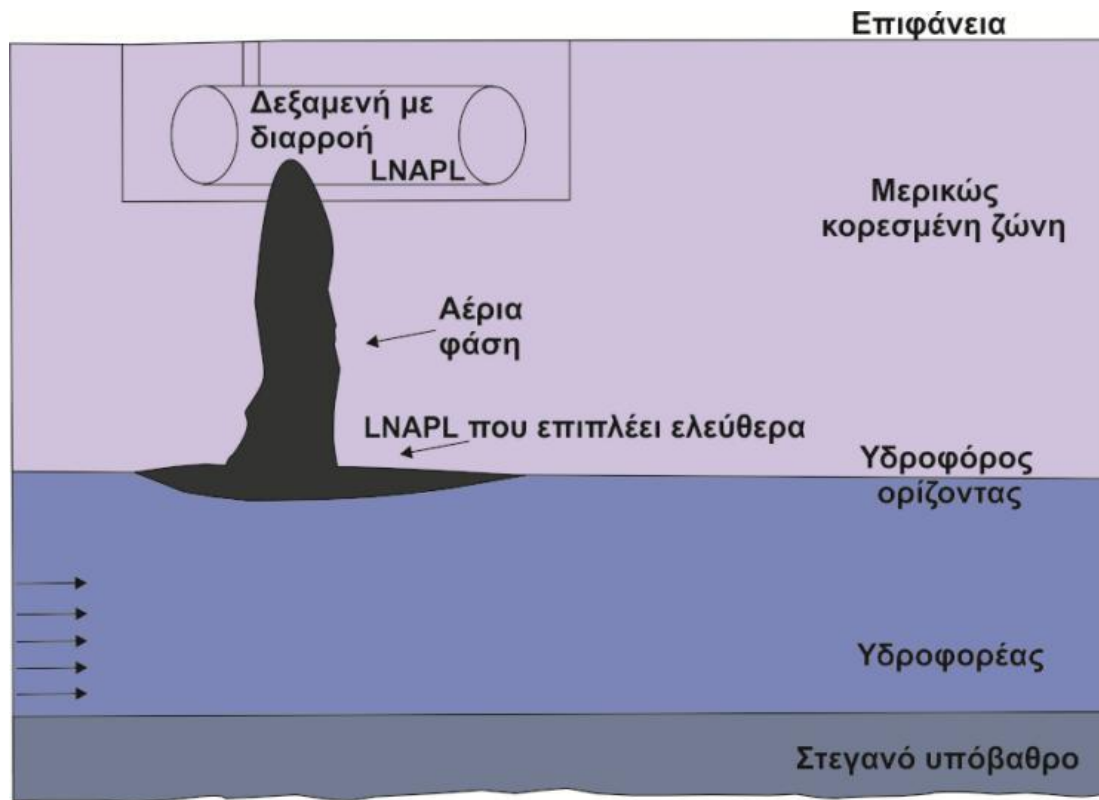
Οι μη συντηρητικοί ρύποι, δηλαδή αυτοί που αναμιγνύονται με το νερό, υφίστανται μείωση της μάζας τους (υποβάθμιση) και η ταχύτητά τους είναι μικρότερη από την ταχύτητα του υπόγειου νερού, γεγονός που επιβραδύνει τη διάδοση της ρύπανσης.

Οι συντηρητικοί ρύποι, δηλαδή αυτοί που δεν αναμιγνύονται με το νερό, διακρίνονται στους LNAPL με μικρότερη πυκνότητα από το νερό (πετρέλαιο, βενζίνη, κηροζίνη) και στους DNAPL (π.χ. οι χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες), με μεγαλύτερη πυκνότητα από αυτό. Οι συντηρητικοί ρύποι παραμένουν και ρυπαίνουν μεγάλους όγκους νερού.

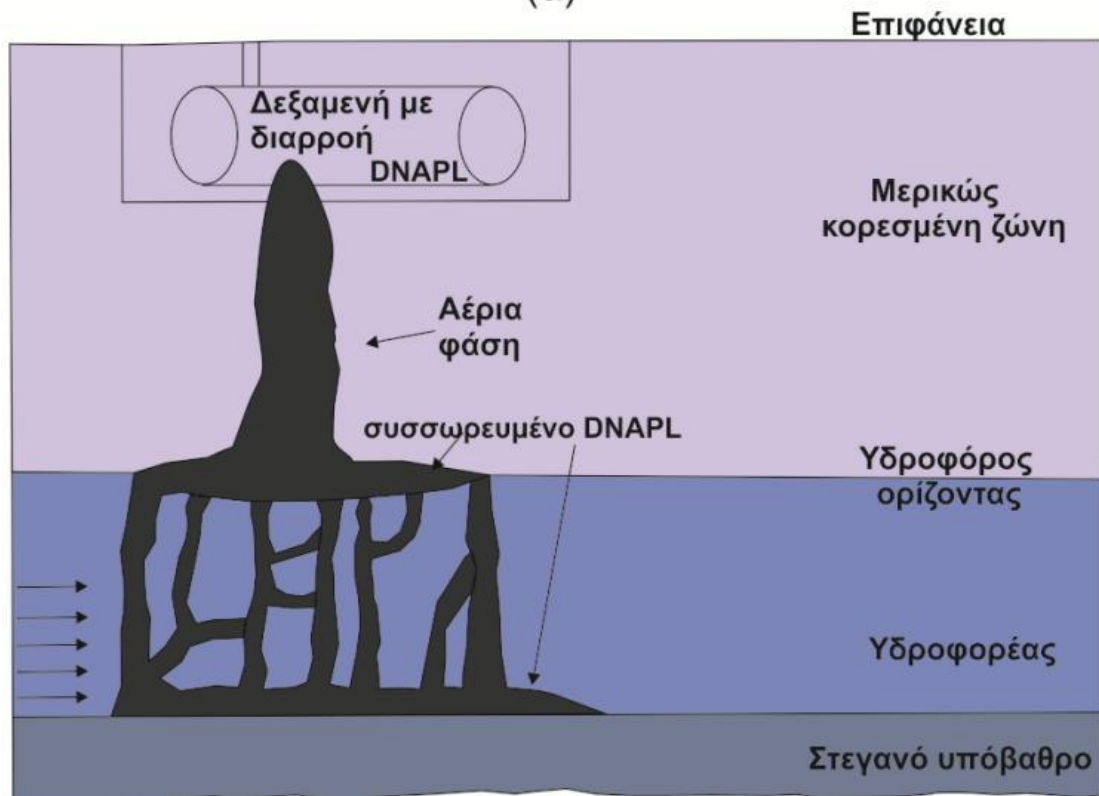


Σχήμα 2.8 Γενικό μοντέλο διάδοσης της ρύπανσης [5]

Οι LNAPL κινούνται (σχήμα 2.9α) κατακόρυφα στη μερικώς κορεσμένη ζώνη και συγκεντρώνονται στην οροφή του υδροφόρου ορίζοντα, όπου εξαπλώνονται πλευρικά, μέχρι να επέλθει κορεσμός στο εδαφικό υλικό. Εισέρχονται στην οροφή του υδροφορέα όταν το βάρος τους υπερβεί την τριχοειδή πίεση. Οι DNAPL κινούνται κατακόρυφα μέσα στον υδροφορέα μέχρι το στεγανό υπόβαθρο, όπου επεκτείνονται πλευρικά με μοριακή διάχυση (σχήμα 2.9β).



(α)



(β)

Σχήμα 2.9 Είσοδος και διάδοση των LNAPL (α) και DNAPL (β) στο υπέδαφος [5]

2.5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΦΥΣΙΚΗΣ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ

Η συγκεκριμένη παράγραφος εξετάζει τους φυσικούς μηχανισμούς υποβάθμισης των ρύπων σε πορώδη υλικά, δηλαδή της βαθμιαίας εξασθένησης του ρυπαντικού φορτίου. Αυτό σημαίνει ότι το έδαφος αλληλεπιδρά με τους ρύπους, με αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση της συγκέντρωσής τους. Η ικανότητα αυτή βέβαια δεν είναι απεριόριστη και επηρεάζεται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος (pH, υγρασία, θερμοκρασία κλπ). Οι φυσικοί μηχανισμοί που υποβαθμίζουν τους ρύπους στο έδαφος, τόσο στη μερικώς κορεσμένη ζώνη όσο και στην κορεσμένη, έχουν ως εξής:

1. **Προσρόφηση** ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο ιόντα ή μόρια του ρύπου συγκεντρώνονται στην επιφάνεια των εδαφικών σωματιδίων. Κυρίως τα αργιλικά υλικά έχουν την ικανότητα να αλληλεπιδρούν με τους ρύπους, καθώς το υπόγειο νερό διηθείται διαμέσου των εδαφικών πόρων. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια την πλήρη ή μερική αδρανοποίηση του ρυπαντικού φορτίου του υπόγειου νερού. Ο ρύπος που προσροφάται ονομάζεται προσροφούμενη ουσία και το εδαφικό υλικό, πάνω στο οποίο συγκεντρώνεται ο ρύπος ονομάζεται προσροφητής. Μέταλλα, βαρέα μέταλλα, ενώσεις μετάλλων, οργανικές ουσίες-διαλύτες ιχνοστοιχεία δεσμεύονται με αυτό τον τρόπο. Η προσρόφηση των μετάλλων γίνεται είτε μέσω ηλεκτρικής έλξης των κατιόντων στην επιφάνεια των αρνητικώς φορτισμένων αργιλικών πλακιδίων είτε μέσω ακινητοποίησης των ιόντων λόγω καθίζησης με τη μορφή αδιάλυτων αλάτων.

2. **Απορρόφηση** ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία ο ρύπος διεισδύει στο εσωτερικό των στερεών σωμάτων. Η προσρόφηση και η απορρόφηση είναι δύο μορφές της ρόφησης (sorption).

3. **Ιοντοανταλλαγή** είναι η διαδικασία κατά την οποία ανταλλάσσονται ιόντα μεταξύ των ρύπων και του εδαφικού υλικού. Έτσι, ιχνοστοιχεία όπως π.χ. το As μπορεί να δεσμευτεί στην επιφάνεια του ιλλίτη ή του μοντμοριλονίτη, αντικαθιστώντας ιόντα Ca^{2+} . Οι βάσεις ως πρωτονιοδέκτες (H^+) μπορούν να μετατραπούν σε θετικά φορτισμένα ιόντα (NH_4^+) και να αντικαταστήσουν άλλα ι-όντα στην επιφάνεια των αργιλικών φύλλων. Τα οξέα μπορούν να ανταλλάξουν πρωτόνια (H^+) με τα κατιόντα της επιφάνειας των διπλών στρώσεων ή το Al^{3+} , Mg^{2+} και Si^{4+} του αργιλικού πλέγματος και να αδρανοποιηθούν. Η ικανότητα των αργιλικών ορυκτών να δεσμεύουν κατιόντα ονομάζεται **ικανότητα κατιοντικής ανταλλαγής** (Cation Exchange Capacity, CEC) και ισούται με:

$$\text{CEC (meq/100 g)} = 0,7 (\% \text{ \u03b1ργιλος}) + 3,5 (\% \text{ C})$$

\u03c9\u03c0\u03c5: C= \u03b7 \u03c0\u03b5\u03c1\u03b9\u03b5\u03ba\u03c4\u03b9\u03ba\u03cc\u03c4\u03b7\u03c4\u03b1 (%) \u03c3\u03b5 \u03cc\u03c1\u03b3\u03b1\u03bd\u03b9\u03ba\u03cc \u03b1\u03bd\u03b8\u03c1\u03b1\u03ba\u03b1.

\u0397 \u03b9\u03ba\u03b1\u03bd\u03cc\u03c4\u03b7\u03c4\u03b1 \u03b5\u03ba\u03c6\u03c1\u03ac\u03b6\u03b5\u03c4\u03b1\u03b9 \u03bc\u03b5 \u03c4\u03cc\u03bd \u03b1\u03c1\u03b9\u03b8\u03bc\u03cc \u03c4\u03c9\u03bd \u03c7\u03b9\u03bb\u03b9\u03c3\u03c4\u03cc\u03b9\u03c3\u03cc\u03b4\u03c5\u03bd\u03ac\u03bc\u03c9\u03bd (meq) \u03c4\u03c9\u03bd \u03ba\u03c4\u03b9\u03cc\u03bd\u03c4\u03c9\u03bd \u03c0\u03c5 \u03bc\u03c0\u03cc\u03c1\u03cc\u03bd \u03bd\u03b1 \u03b1\u03bd\u03c4\u03b1\u03bb\u03bb\u03b1\u03b3\u03cc\u03bd \u03c3\u03b5 \u03b4\u03b5\u03b9\u03b3\u03bc\u03b1 \u03be\u03c1\u03b7\u03c3 \u03bc\u03ac\u03b6\u03b1\u03c3 100 g \u03ba\u03b1\u03b9 \u03c0\u03c1\u03cc\u03c3\u03b4\u03b9\u03cc\u03c1\u03b9\u03b6\u03b5\u03c4\u03b1\u03b9 \u03b5\u03c1\u03b3\u03b1\u03c3\u03c4\u03b7\u03c1\u03b9\u03b1\u03ba\u03ac. \u039c\u03c0\u03cc\u03c1\u03b5\u03b9 \u03bd\u03b1 \u03b5\u03ba\u03c6\u03c1\u03b1\u03c3\u03c4\u03b5\u03b9 \u03c3\u03b5 \u03bc\u03cc\u03bd\u03ac\u03b4\u03b5\u03c3 \u03c3\u03c5\u03b3\u03ba\u03b5\u03bd\u03c4\u03c1\u03c9\u03c3\u03b7\u03c3 (meq/L \u03bd\u03b5\u03c1\u03cc\u03c5 \u03c0\u03cc\u03c1\u03c9\u03bd) \u03c7\u03c1\u03b7\u03c3\u03b9\u03bc\u03cc\u03c0\u03cc\u03b9\u03cc\u03bd\u03c4\u03b1\u03c3 \u03c4\u03b7\u03bd \u03c0\u03b1\u03c1\u03b1\u03ba\u03ac\u03c4\u03c9 \u03b5\u03be\u03b9\u03c3\u03c9\u03c3\u03b7:

$$\text{CEC (meq/L)} = \text{CEC (mg/100g)} \times 10 \times \text{ws/n}$$

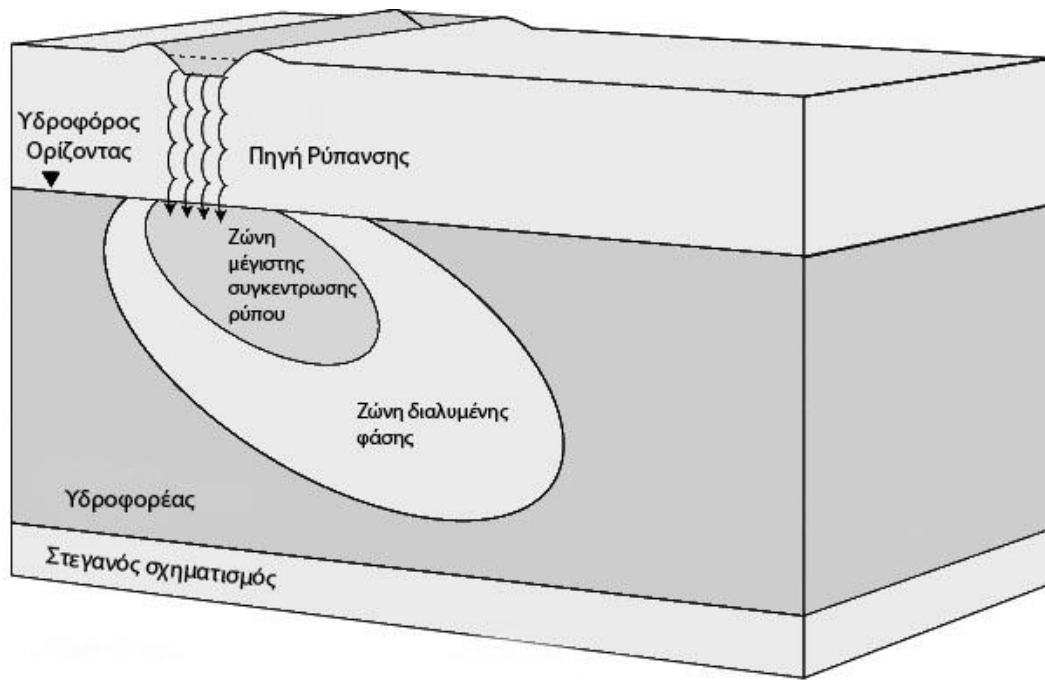
\u03c9\u03c0\u03c5 \u03b5\u03b9\u03bd\u03b1\u03b9 \u03c4\u03cc \u03b5\u03b9\u03b4\u03b9\u03ba\u03cc \u03b2\u03ac\u03c1\u03cc\u03c3 \u03ba\u03b1\u03b9 n \u03c4\u03cc \u03c0\u03cc\u03c1\u03c9\u03b4\u03b5\u03c3 \u03c4\u03cc\u03c5 \u03b9\u03b6\u03b7\u03bc\u03b1\u03c4\u03cc\u03c3.

\u039f\u03b9 \u03bc\u03b7\u03c7\u03b1\u03bd\u03b9\u03c3\u03bc\u03cc\u03b9 \u03c4\u03b7\u03c3 \u03c0\u03c1\u03cc\u03c3\u03c1\u03cc\u03c6\u03b7\u03c3\u03b7\u03c3 \u03ba\u03b1\u03b9 \u03c4\u03b7\u03c3 \u03b9\u03cc\u03bd\u03c4\u03cc\u03b1\u03bd\u03c4\u03b1\u03bb\u03bb\u03b1\u03b3\u03b7\u03c3 \u03b4\u03b5\u03bd \u03b5\u03b9\u03bd\u03b9\u03b1\u03ba\u03c1\u03b9\u03c4\u03cc\u03b9 \u03ba\u03b1\u03b9 \u03c0\u03cc\u03bb\u03bb\u03b5\u03c3 \u03c6\u03cc\u03c1\u03b5\u03c3 \u03c3\u03c5\u03bc\u03b2\u03b1\u03b9\u03bd\u03cc\u03bd \u03c4\u03b1\u03c5\u03c4\u03cc\u03c7\u03c1\u03cc\u03bd\u03b1. \u0393\u03b5\u03bd\u03b9\u03ba\u03ac \u03c3\u03c4\u03cc\u03c5\u03c3 \u03b5\u03b4\u03b1\u03c6\u03b9\u03ba\u03cc\u03c5 \u03cc\u03c1\u03b9\u03b6\u03cc\u03bd\u03c4\u03b5\u03c3 \u03bb\u03b1\u03bc\u03b2\u03b1\u03bd\u03b5\u03b9 \u03c7\u03c9\u03c1\u03b1 \u03b7 \u03b9\u03cc\u03bd\u03c4\u03cc\u03b1\u03bd\u03c4\u03b1\u03bb\u03bb\u03b1\u03b3\u03b7, \u03b5\u03bd\u03cc \u03c3\u03c4\u03b1 \u03b2\u03b1\u03b8\u03cd\u03c4\u03b5\u03c1\u03b1 \u03b3\u03b5\u03c9\u03bb\u03cc\u03b3\u03b9\u03ba\u03ac \u03c3\u03c4\u03c1\u03c9\u03bc\u03b1\u03c4\u03b1 \u03c5\u03c0\u03b5\u03c1\u03b9\u03c3\u03c7\u03cd\u03b5\u03b9 \u03b7 \u03c0\u03c1\u03cc\u03c3\u03c1\u03cc\u03c6\u03b7\u03c3\u03b7. \u0397 \u03c0\u03c1\u03cc\u03c3\u03c1\u03cc\u03c6\u03b7\u03c3\u03b7 \u03b3\u03b9\u03bd\u03b5\u03c4\u03b1\u03b9 \u03bb\u03cc\u03b3\u03c9 \u03c4\u03b7\u03c3 \u03c5\u03c0\u03b1\u03c1\u03be\u03b9\u03c3 \u03bc\u03b5\u03c4\u03b1\u03b2\u03bb\u03b7\u03c4\u03c9\u03bd \u03b5\u03c0\u03b9\u03c6\u03b1\u03bd\u03b5\u03b9\u03b1\u03ba\u03c9\u03bd \u03c6\u03cc\u03c1\u03c4\u03b9\u03c9\u03bd, \u03b5\u03bd\u03cc \u03b7 \u03b9\u03cc\u03bd\u03c4\u03cc\u03b1\u03bd\u03c4\u03b1\u03bb\u03bb\u03b1\u03b3\u03b7 \u03bb\u03cc\u03b3\u03c9 \u03c4\u03b7\u03c3 \u03c5\u03c0\u03b1\u03c1\u03be\u03b9\u03c3 \u03bc\u03cc\u03bd\u03b9\u03bc\u03c9\u03bd \u03b5\u03c0\u03b9\u03c6\u03b1\u03bd\u03b5\u03b9\u03b1\u03ba\u03c9\u03bd \u03c6\u03cc\u03c1\u03c4\u03b9\u03c9\u03bd. \u039a\u03b1\u03c4\u03ac \u03c4\u03b7\u03bd \u03c0\u03c1\u03cc\u03c3\u03c1\u03cc\u03c6\u03b7\u03c3\u03b7 \u03c0\u03c1\u03cc\u03ba\u03b1\u03bb\u03b5\u03b9\u03c4\u03b1\u03b9 \u03bc\u03b5\u03b9\u03c9\u03c3\u03b7 \u03c4\u03c9\u03bd \u03c3\u03cc\u03bd\u03cc\u03bb\u03b9\u03ba\u03c9\u03bd \u03b4\u03b9\u03b1\u03bb\u03c5\u03bc\u03b5\u03bd\u03c9\u03bd \u03c3\u03c4\u03b5\u03c1\u03b5\u03c9\u03bd (T.D.S.), \u03b5\u03bd\u03cc \u03b1\u03c5\u03c4\u03cc \u03b4\u03b5\u03bd \u03c3\u03c5\u03bc\u03b2\u03b1\u03b9\u03bd\u03b5\u03b9 \u03ba\u03c4\u03ac \u03c4\u03b7\u03bd \u03b9\u03cc\u03bd\u03c4\u03cc\u03b1\u03bd\u03c4\u03b1\u03bb\u03bb\u03b1\u03b3\u03b7.

\u0395\u03ba\u03c4\u03cc\u03c3 \u03b1\u03c0\u03cc \u03c4\u03cc\u03c5\u03c3 \u03bc\u03b7\u03c7\u03b1\u03bd\u03b9\u03c3\u03bc\u03cc\u03c5\u03c3 \u03c5\u03c0\u03cc\u03b2\u03ac\u03b8\u03bc\u03b9\u03c3\u03b7\u03c3 \u03c0\u03c5 \u03b1\u03bd\u03b1\u03c6\u03b5\u03c1\u03b8\u03b7\u03ba\u03b1\u03bd \u03c0\u03b1\u03c1\u03b1\u03c0\u03b1\u03bd\u03c9, \u03b5\u03b9\u03bd\u03b1\u03b9 \u03b4\u03c5\u03bd\u03b1\u03c4\u03cc\u03bd \u03bd\u03b1 \u03c3\u03c5\u03bc\u03b2\u03cc\u03bd \u03b2\u03b9\u03cc\u03bb\u03cc\u03b3\u03b9\u03ba\u03b5\u03c3 \u03ba\u03b1\u03b9 \u03b2\u03b9\u03cc\u03c7\u03b7\u03bc\u03b9\u03ba\u03b5\u03c3 \u03b4\u03b9\u03b5\u03c1\u03b3\u03b1\u03c3\u03b9\u03b5\u03c3 \u03b1\u03c0\u03cc\u03b4\u03cc\u03bc\u03b7\u03c3\u03b7\u03c3, \u03cc\u03c0\u03c9\u03c3 \u03b7 \u03b1\u03c0\u03cc\u03c3\u03cd\u03bd\u03b8\u03b5\u03c3\u03b7 \u03c4\u03c9\u03bd \u03cc\u03c1\u03b3\u03b1\u03bd\u03b9\u03ba\u03c9\u03bd \u03c1\u03cd\u03c0\u03c9\u03bd \u03ba\u03b1\u03b9 \u03b7 \u03b1\u03c0\u03cc\u03b4\u03cc\u03bc\u03b7\u03c3 \u03c0\u03cc\u03b9\u03ba\u03b9\u03bb\u03c9\u03bd \u03c1\u03cd\u03c0\u03c9\u03bd \u03bc\u03b5\u03c3\u03c9 \u03bc\u03b9\u03ba\u03c1\u03cc\u03cc\u03c1\u03b3\u03b1\u03bd\u03b9\u03c3\u03bc\u03cc\u03bd (u03b1\u03b5\u03c1\u03cc\u03b2\u03b9\u03c9\u03bd \u03b1\u03bb\u03bb\u03ac \u03ba\u03b1\u03b9 \u03b1\u03bd\u03b1\u03b5\u03c1\u03cc\u03b2\u03b9\u03c9\u03bd) \u03b7 \u03b1\u03ba\u03cc\u03bc\u03b7 \u03ba\u03b1\u03b9 \u03c0\u03c5\u03c1\u03b7\u03bd\u03b9\u03ba\u03b5\u03c3 \u03b4\u03b9\u03b5\u03c1\u03b3\u03b1\u03c3\u03b9\u03b5\u03c3, \u03cc\u03c0\u03c9\u03c3 \u03b7 \u03b4\u03b9\u03ac\u03c3\u03c0\u03b1\u03c3\u03b7 \u03c4\u03c9\u03bd \u03c1\u03b1\u03b4\u03b9\u03b5\u03bd\u03b5\u03c1\u03b3\u03c9\u03bd \u03b9\u03c3\u03cc\u03c4\u03cc\u03c0\u03c9\u03bd \u03bc\u03b5 \u03c4\u03b7\u03bd \u03c0\u03ac\u03c1\u03cc\u03b4\u03cc \u03c4\u03cc\u03c5 \u03c7\u03c1\u03cc\u03bd\u03cc.

2.6 \u039c\u0397\u039c\u0391\u039d\u0399\u03a3\u039c\u039e\u039e\u0399 \u039c\u0395\u03a4\u0391\u03a6\u039e\u0391\u03a3 \u03a4\u039c\u039c\u039c\u039c\u039c\u039c

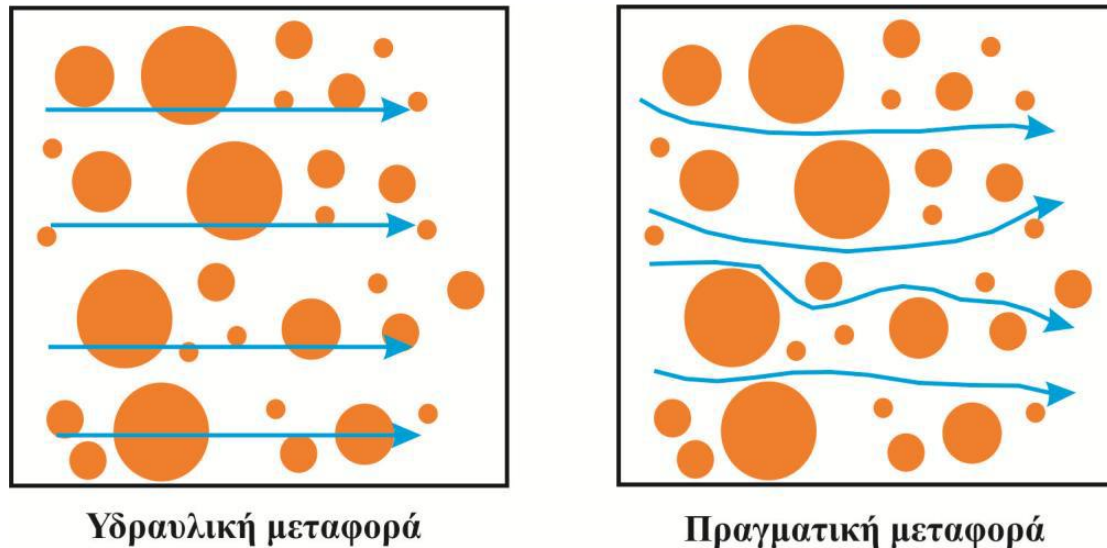
\u039c\u03b5\u03c4\u03ac \u03c4\u03b7 \u03b4\u03b9\u03b1\u03c6\u03c5\u03b3\u03b7 \u03c4\u03cc\u03c5\u03c3 \u03c3\u03c4\u03cc \u03b5\u03b4\u03b1\u03c6\u03cc\u03c3 \u03cc\u03b9 \u03c1\u03cd\u03c0\u03cc\u03b9 \u03ba\u03b9\u03bd\u03cc\u03bd\u03c4\u03b1\u03b9 \u03b1\u03c1\u03c7\u03b9\u03ba\u03ac \u03c3\u03c4\u03b7 \u03bc\u03b5\u03c1\u03b9\u03ba\u03c9\u03c3 \u03ba\u03cc\u03c1\u03b5\u03c3\u03bc\u03b5\u03bd\u03b7 \u03b6\u03c9\u03bd\u03b7. \u038c\u03bd\u03b1 \u03bc\u03b5\u03c1\u03cc\u03c3 \u03c4\u03cc\u03c5\u03c3 \u03c3\u03c5\u03b3\u03ba\u03c1\u03b1\u03c4\u03b5\u03b9\u03c4\u03b1\u03b9 \u03b1\u03c0\u03cc \u03c4\u03cc\u03c5\u03c3 \u03b5\u03b4\u03b1\u03c6\u03b9\u03ba\u03cc\u03c5 \u03ba\u03cc\u03ba\u03ba\u03cc\u03c5. \u039f\u03b9 \u03b4\u03b9\u03b1\u03bb\u03c5\u03bc\u03b5\u03bd\u03cc\u03b9 \u03c1\u03cd\u03c0\u03cc\u03b9 \u03cc\u03c4\u03b1\u03bd \u03c6\u03c4\u03ac\u03c3\u03c9\u03bd \u03c3\u03c4\u03b7\u03bd \u03ba\u03cc\u03c1\u03b5\u03c3\u03bc\u03b5\u03bd\u03b7 \u03b6\u03c9\u03bd\u03b7, \u03c0\u03b1\u03c1\u03b1\u03c3\u03cd\u03c1\u03cc\u03bd\u03c4\u03b1\u03b9 \u03b1\u03c0\u03cc \u03c4\u03b7\u03bd \u03c5\u03c0\u03cc\u03b3\u03b5\u03b9\u03b1 \u03c1\u03cc\u03b7 \u03b2\u03b1\u03c1\u03c5\u03c4\u03b9\u03ba\u03ac \u03ba\u03b1\u03b9 \u03ba\u03c4\u03b5\u03b9\u03c3\u03b4\u03cc\u03c5\u03bd \u03c0\u03c1\u03cc\u03c3 \u03c4\u03b1 \u03ba\u03c4\u03ac\u03bd\u03c4\u03b7. \u0397 \u03b4\u03b9\u03b1\u03b4\u03b9\u03ba\u03b1\u03c3\u03b9\u03b1 \u03b1\u03c5\u03c4\u03b7 \u03b1\u03c0\u03b5\u03b9\u03ba\u03cc\u03bd\u03b9\u03b6\u03b5\u03c4\u03b1\u03b9 \u03c3\u03c4\u03cc \u03c3\u03c7\u03b7\u03bc\u03b1 2.10.



Σχήμα 2.10 Κίνηση ρύπων στο έδαφος και το υπόγειο νερό [11].

Στη συνέχεια αναλύονται οι μηχανισμοί μεταφοράς των ρύπων σε κορεσμένα και μερικώς κορεσμένα εδαφικά υλικά. Η ανάλυση αυτή αφορά μη συντηρητικούς ρύπους, που αναμειγνύονται με το υπόγειο νερό. Οι ρύποι μεταφέρονται είτε διαλυμένοι είτε σε αιώρηση μέσα στο νερό των εδαφικών πόρων μέσω τριών μηχανισμών, οι οποίοι συνήθως δρουν ταυτόχρονα και συχνά ανταγωνιστικά. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι:

1. **Μεταγωγή (advection) ή υδραυλική μεταφορά**, κατά την οποία ο ρύπος παρασύρεται από το υπόγειο νερό και κινείται μέσω των εδαφικών κόκκων λόγω υδραυλικής κλίσης. Η κίνηση γίνεται από τις περιοχές υψηλού υδραυλικού φορτίου στις περιοχές χαμηλού υδραυλικού φορτίου και σύμφωνα με το νόμο του Darcy. Στην περίπτωση που ο ρύπος έχει μεγάλο ειδικό βάρος, παρατηρείται απόκλιση στη ροή του υπόγειου νερού από εκείνη του ρυπαντή. Τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα μπορούν να κινούνται ταχύτερα από το νερό στο οποίο βρίσκονται διαλυμένα. Προφανώς, αν η υδραυλική κλίση είναι πολύ μικρή, ο μηχανισμός της υδραυλικής μεταφοράς δεν υφίσταται. Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζεται σχηματικά ο τρόπος με τον οποίο κινούνται οι ρύποι λόγω του μηχανισμού της μεταγωγής καθώς και η πραγματική κίνηση του διαλυμένου στο νερό ρύπου.



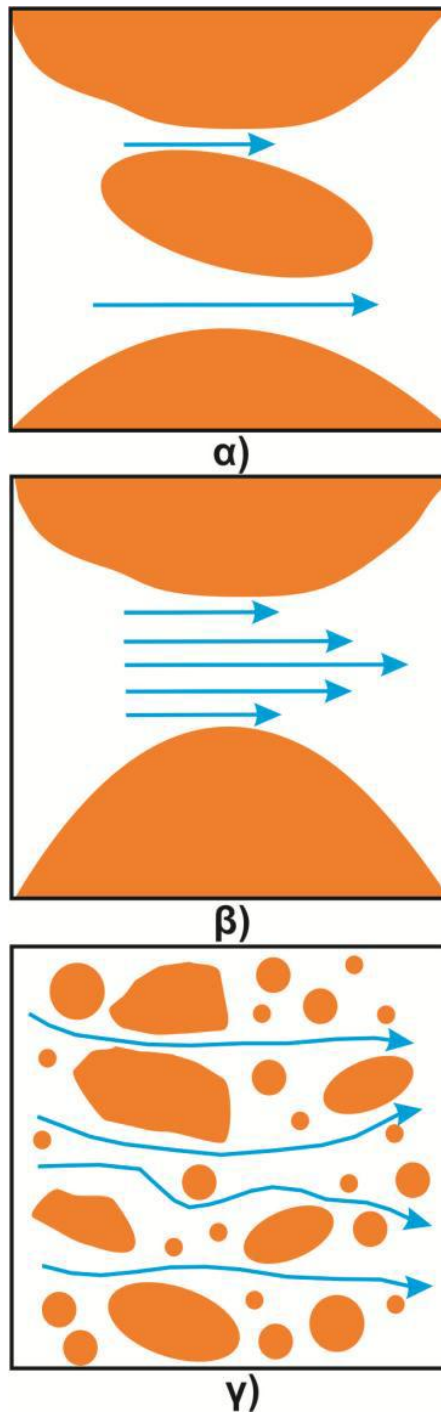
Σχήμα 2.10 Υδραυλική μεταφορά ρύπου [5]

2. **Μοριακή διάχυση (molecular diffusion)** ονομάζεται ο μηχανισμός μεταφοράς κατά τον οποίο ο ρύπος διαχέεται λόγω διαφοράς συγκέντρωσης από θέση σε θέση. Προφανώς η φορά της κίνησης είναι από τις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης προς τις περιοχές χαμηλής συγκέντρωσης. Η διάχυση σταματά όταν η συγκέντρωση του ρύπου είναι παντού η ίδια. Η διάχυση είναι ανεξάρτητη από την κίνηση του νερού, δηλαδή πραγματοποιείται ακόμη και όταν η υδραυλική κλίση είναι μηδενική, με άλλα λόγια όταν το νερό στους πόρους ηρεμεί.

3. **Μηχανική διασπορά (mechanical dispersion)** ή τυρβώδης διάχυση, κατά την οποία η κίνηση του ρύπου οφείλεται στην παρουσία αλληλοσυνδεδεμένων πόρων του εδαφικού σκελετού με τυχαίες διευθύνσεις και σχήματα. Έτσι η κίνηση του νερού είναι μη ομοιόμορφη και εμφανίζονται διαφορετικές ταχύτητες ροής. Η μηχανική διασπορά του ρύπου εξαρτάται από την κλίση της συγκέντρωσης, όπως και η διάχυση.

Η μηχανική διασπορά διακρίνεται στην:

- Επιμήκη μηχανική διασπορά (σχήμα 2.11) που οφείλεται στο διαφορετικό μέγεθος των πόρων, οπότε προκύπτουν διαφορές ταχύτητας, που οφείλονται στο γεγονός ότι μέσα σε έναν πόρο η ταχύτητα ροής είναι μεγαλύτερη στο κέντρο του και μικρότερη στα άκρα και στις διαφορετικές διαδρομές που ακολουθεί το νερό κατά την κίνησή του μέσα στον εδαφικό σκελετό.
- Εγκάρσια (πλευρική) μηχανική διασπορά, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι, καθώς κινείται το υγρό σε ένα πορώδες μέσο, η ροή του διακόπτεται από την παρουσία των κόκκων και διακλαδίζεται.



Σχήμα 2.11 Μηχανική διασπορά ρύπου

α) με διαφορετικό μέγεθος πόρων,

β) με διαφορετικές ταχύτητες σε ένα πόρο,

γ) με διαφορετικές διαδρομές γύρω από τους εδαφικούς κόκκους [5].

3. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στην πράξη χρησιμοποιούνται ευρύτατα μαθηματικά μοντέλα για τον περιβαλλοντικό έλεγχο των εν δυνάμει ρυπασμένων εδαφών. Με τη χρήση των μοντέλων αυτών είναι δυνατή η εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης ρύπανσης του εδάφους σε μια περιοχή, χωρίς να είναι απαραίτητη σε αυτό το στάδιο ελέγχου, η πραγματοποίηση γεωτρήσεων και δειγματοληψίας, με αποτέλεσμα να έχουμε σημαντική εξοικονόμηση χρόνου, χρημάτων και γενικά των διαθέσιμων πόρων.

Ειδικότερα, σε περίπτωση εξέτασης μεγάλου αριθμού περιοχών για πιθανή ρύπανση του εδάφους, η χρήση θεωρητικού μοντέλου κρίνεται απαραίτητη, καθώς επιτυγχάνεται γρήγορα και με ελάχιστο κόστος, η ιεράρχηση των χώρων, σύμφωνα με τη θεωρητικά εκτιμώμενη ρύπανσή τους. Έτσι χώροι, οι οποίοι κρίνεται ότι δεν έχουν σημαντική ρύπανση, ή ότι η ρύπανση δεν αλληλεπιδρά με τον τελικό αποδέκτη, κατατάσσονται σε ζώνη πολύ χαμηλής επικινδυνότητας, δίνοντας βάρος για άμεση διερεύνηση σε βάθος και πιθανή αποκατάσταση, σε περιοχές που ανήκουν σε ζώνες υψηλής επικινδυνότητας.

Ο προσδιορισμός του περιβαλλοντικού κινδύνου του μοντέλου στηρίζεται συνήθως στην ακολουθία: «Πηγή-Μονοπάτι διαφυγής-Αποδέκτης», (Source-Pathway-Receptor). Σε αυτήν την προσέγγιση, «Πηγή» είναι κάθε παράμετρος που θα μπορούσε να έχει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, «Αποδέκτης» είναι κάθε παράγοντας του περιβάλλοντος που θα μπορούσε να υποστεί επιπτώσεις από την «Πηγή» και «Μονοπάτι» είναι η διαδρομή μέσω της οποίας η «Πηγή» μπορεί να επιδράσει στον «Αποδέκτη» .

Από τους υπολογισμούς που εκτελεί το μοντέλο εξάγεται ένας Δείκτη Περιβαλλοντικής Επικινδυνότητας (ΔΠΕ, Environmental Risk Indicator , ERI). Για τον υπολογισμό του ΔΠΕ απαιτείται προηγουμένως να υπολογιστούν ο Δείκτης Πηγής (ΔΠ, Source Indicator, SI) και ο Δρόμος Διαφυγής-Αποδέκτης (ΔΔΑ, Pathway and Receptor Indicator, PRI). Ο Δείκτης Πηγής αναφέρεται στα χαρακτηριστικά της πηγής της ρύπανσης, ενώ ο Δρόμος Διαφυγής-Αποδέκτης στα γεωλογικά,

υδρολογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής υπό έλεγχο και στη χρήση γης στην ευρύτερη περιοχή. Με βάση τους δείκτες αυτούς προκύπτει το διάγραμμα κατάταξης και λήψης απόφασης για πιθανά ρυπασμένα πεδία, στο οποίο τα εξεταζόμενα πεδία κατατάσσονται σε κατηγορίες επικινδυνότητας

3.2 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ

Ο εντοπισμός και η παρακολούθηση της ρύπανσης στο υπέδαφος αποτελεί ένα πολύ σημαντικό τμήμα των γεωτεχνικών ερευνών, οι οποίες διενεργούνται [8]:

- Κατά τον σχεδιασμό συστημάτων παρακολούθησης τεχνικών έργων που υπάρχει περίπτωση να προκαλέσουν ρύπανση (π.χ. για την παρακολούθηση διαφυγής στραγγισμάτων σε ΧΥΤΑ/ΧΥΤΥ).
- Όταν υπάρχει ένδειξη ρύπανσης του εδάφους ή του υδροφορέα, με στόχο να προσδιοριστεί η έκταση και το μέγεθος της ρύπανσης.
- Εφόσον έχει εντοπιστεί η ρύπανση, για τον περιορισμό της ρύπανσης και την αποκατάσταση των ρυπασμένων περιοχών.

Οι γεωτεχνικές έρευνες για εντοπισμό και παρακολούθηση ρύπανσης είναι:

1. Οι γεωφυσικές έρευνες, προκειμένου να ελεγχθούν μεγάλες εκτάσεις, γρήγορα, με μικρό κόστος και με μη καταστροφικές για το περιβάλλον μεθόδους. Στόχος των γεωφυσικών μεθόδων είναι ο εντοπισμός μεταβολών σε φυσικές ιδιότητες του εδάφους και του υπεδάφους, όπως η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, η ειδική αντίσταση, η αγωγιμότητα, η μαγνητική επιδεκτικότητα, η πυκνότητα κ.ά. Πρέπει όμως να αναφερθεί ότι υπάρχουν και περιορισμοί στην εφαρμογή τους. Για παράδειγμα, δεν είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα των μεθόδων αυτών αν ο επιφανειακός αποσαθρωμένος μανδύας έχει μεγάλο πάχος ή αν υπάρχουν εναλλαγές αποσαθρωμένου και υγιούς υλικού. Οι πιο διαδεδομένες γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ρύπανσης είναι η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης, οι ηλεκτρικές μέθοδοι, οι μαγνητικές και οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι.
2. Γεωτρήσεις ή ερευνητικά φρεάτια. Οι γεωτρήσεις χρησιμοποιούνται για εντοπισμό της ρύπανσης σε βάθη μεγαλύτερα από 4-5 m που φθάνουν τα ερευνητικά φρεάτια.
3. Χημικές αναλύσεις δειγμάτων του εδάφους και του υπόγειου νερού.

3.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ

Αν από την εφαρμογή του θεωρητικού μοντέλου προκύψει υψηλή πιθανότητα για κάποιο πεδίο να παρουσιάζει σημαντική επιβάρυνση του εδάφους, τότε πρέπει να διεξαχθεί επιτόπια περιβαλλοντική διερεύνηση του εδάφους. Ο στόχος κάθε περιβαλλοντικού ελέγχου ρύπανσης πεδίου, είναι να προσδιορίσει τη σχέση μεταξύ πηγής-μονοπατιού-τελικού αποδέκτη, ώστε να πραγματοποιηθεί ανάλυση επικινδυνότητας και να προταθούν τα κατάλληλα μέτρα για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

Για να είναι πλήρης ο περιβαλλοντικός έλεγχος ρύπανσης θα πρέπει να παρέχει πληροφορίες για [8]:

- Την τοποθεσία, το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά των πρωτογενών και δευτερογενών πηγών ρύπανσης
- Την έκταση κατά την οποία μονοπάτια έκθεσης της ρύπανσης ενός πεδίου είναι ενεργά.
- Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους, τα οποία επηρεάζουν τη διαφυγή της ρύπανσης και την επιλογή της μεθόδου απορρύπανσης.
- Δυνητικά επηρεασμένους αποδέκτες.

Οι πληροφορίες αυτές επηρεάζονται από παραμέτρους όπως, το νομοθετικό πλαίσιο, η μελλοντική χρήση του πεδίου και πάνω απ' όλα το κατά πόσον απειλείται η ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.

Η περιβαλλοντική διερεύνηση του υπεδάφους αποτελείται από 2 στάδια. Το πρώτο στάδιο αποτελεί την προκαταρκτική εξέταση και ονομάζεται εν συντομία περιβαλλοντική διερεύνηση υπεδάφους Φάσης I και το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την αναλυτική καταγραφή της κατάστασης του υπεδάφους σε όλη την έκταση της περιοχής ελέγχου και αποτελεί την περιβαλλοντική διερεύνηση υπεδάφους Φάσης II.

Στόχος της περιβαλλοντικής διερεύνησης υπεδάφους Φάσης I είναι η αποκόμιση μιας γενικής περιβαλλοντικής εικόνας του εξεταζόμενου πεδίου, καθώς και η ανίχνευση πιθανών σημείων ρύπανσης, τα οποία θα διερευνηθούν περαιτέρω στην περιβαλλοντική διερεύνηση Φάσης II. Περιλαμβάνει οπωσδήποτε μία προκαταρκτική επίσκεψη στο πεδίο και στη συνέχεια επεξεργασία των δεδομένων.

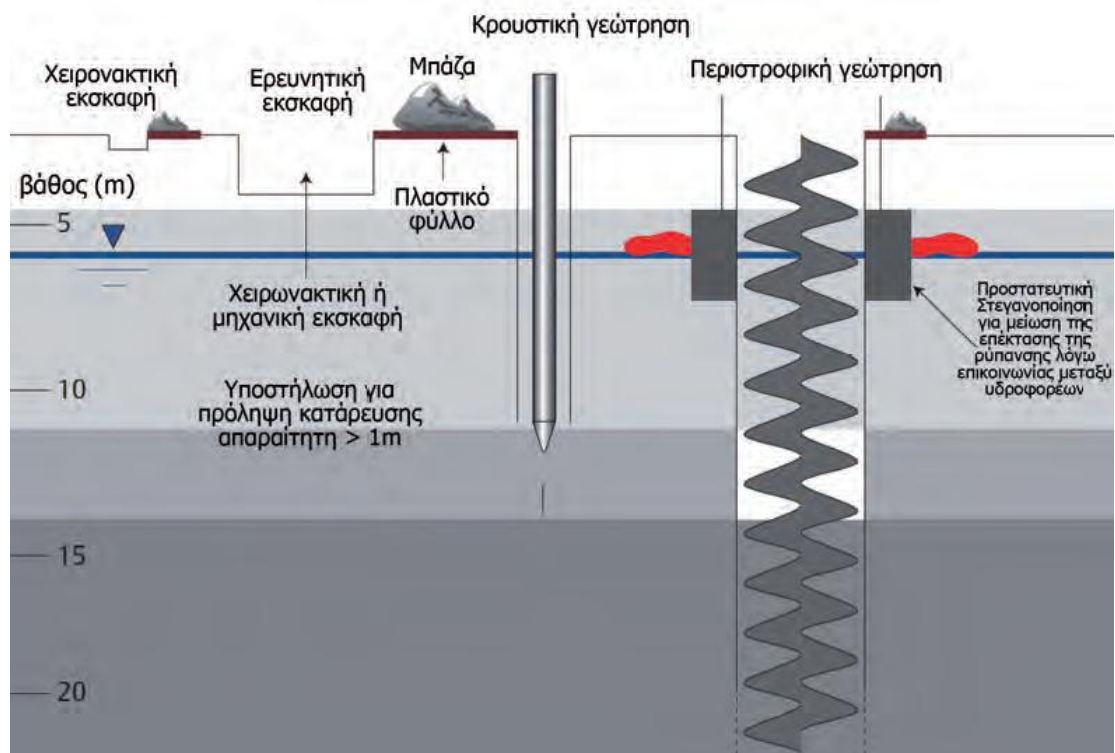
Η περιβαλλοντική διερεύνηση φάσης II περιλαμβάνει διατρητικές εργασίες μικρής διαμέτρου και δειγματοληψίες εδάφους και υπόγειου νερού. Το βάθος των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και το εύρος των παραμέτρων που αναλύονται στο έδαφος, υπόγειο αέρα και υπόγειο νερό

διαφέρουν ανάλογα με την περίπτωση και βασίζονται στα αποτελέσματα της περιβαλλοντικής διερεύνησης Φάσης I.

Επίσης υπάρχει και η δυνατότητα επιτόπιων μετρήσεων και αναλύσεων στο πεδίο, έτσι ώστε να περιοριστεί το πλήθος των εργαστηριακών αναλύσεων και να μειωθεί ο χρόνος εξαγωγής των αποτελεσμάτων.

Στην συνέχεια πραγματοποιείται προσδιορισμός του περιβαλλοντικού κινδύνου με βάση τα αποτελέσματα και γίνεται εκτίμηση του κόστους των απαραίτητων μέτρων εξυγίανσης του υπεδάφους και του υπόγειου νερού, σε περίπτωση που κριθούν απαραίτητα.

Η διατρητική διερεύνηση περιλαμβάνει την εκτέλεση γεωτρήσεων για τη συλλογή φυσικών και χημικών δεδομένων για το έδαφος και το υπόγειο νερό που απαιτούνται για την αποτίμηση συνδέσμων μεταξύ πηγής-μονοπατιού-αποδεκτών, ποσοτική εκτίμηση κινδύνων και το σχεδιασμό των εργασιών αποκατάστασης. Ένα βασικό ζητούμενο σε κάθε σχεδιασμό είναι η αποφυγή της επέκτασης της ρύπανσης λόγω επικοινωνίας μεταξύ υδροφόρων οριζώντων.



Σχήμα 3.1 Μέθοδοι διατρητικής διερεύνησης και βάθος σε μέτρα [8].

Ο τύπος της μεθόδου διάτρησης μεθόδου που θα επιλεγεί εξαρτάται από το απαιτούμενο βάθος, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα και τη γεωλογία της περιοχής, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1. Για παράδειγμα, έρευνες εδάφους σε μικρό βάθος και πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα μπορούν να διενεργηθούν με απλή εκσκαφή.

3.4 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

3.4.1 Γενικά

Η μέτρηση και η καταγραφή των υπόγειων νερών αποτελεί τα τελευταία χρόνια ένα ιδιαίτερο κλάδο στην επιστήμη των υπόγειων νερών. Η χρήση των υπόγειων νερών για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών, είτε υδρευτικών είτε αρδευτικών, σε συνδυασμό με την προκαλούμενη ρύπανσή τους, οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης μεθόδων και προγραμμάτων συνεχούς ελέγχου τους.

Σκοπός των ελέγχων αυτών είναι ο προσδιορισμός της ποιότητας και της χημικής σύνθεσης των υπόγειων υδάτων. Μπορεί επίσης να απαιτείται ο προσδιορισμός της έκτασης της ρύπανσης των υπόγειων νερών από κάποια γνωστή πηγή ρύπανσης, η καταγραφή της δυναμικής της πηγής ρύπανσης και η εκτίμηση του κινδύνου ή της πιθανότητας ρύπανσης των υπόγειων νερών.

Το νερό στο πορώδες του εδάφους βρίσκεται είτε υπό κορεσμένες είτε υπό ακόρεστες συνθήκες. Η συγκράτηση και η απομάκρυνση του νερού στις δύο αυτές καταστάσεις είναι τελείως διαφορετικές. Το νερό στα κορεσμένα πορώδη μέσα βρίσκεται υπό πίεση και μπορεί εύκολα να απομακρυνθεί, άρα και η δειγματοληψία του είναι πιο εύκολη. Αντίθετα στις ακόρεστες συνθήκες, το νερό συγκρατείται με μεγάλη μύζηση και η απομάκρυνσή του απαιτεί την εφαρμογή πίεσης ή μύζησης.

3.4.2 Μετρήσεις στην Ακόρεστη Ζώνη

Η καταγραφή και ο προσδιορισμός των ρύπων στην ακόρεστη ζώνη γίνεται σε δείγματα εδαφικής υγρασίας. Τα δείγματα αυτά είναι

δυνατόν να συλλεχθούν είτε απευθείας με τις *in situ* μεθόδους, δηλαδή με τους στραγγιστικούς αγωγούς, τα λυσιμέτρα και τα φρεάτια για τις κορεσμένες περιοχές και με δειγματολήπτες κενού για τις ακόρεστες περιοχές, είτε με έμμεσες μεθόδους, όπως παίρνοντας δείγματα εδάφους. Η μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο αυτών μεθόδων είναι ότι με τη μέθοδο των δειγμάτων εδάφους καταστρέφεται η φυσική κατάσταση του εδάφους και δεν μπορούν να επαναληφθούν οι διαδικασίες δειγματοληψίας στην ίδια περιοχή.

Επειδή το νερό στην ακόρεστη ζώνη βρίσκεται υπό πίεση μικρότερη της ατμοσφαιρικής οι συσκευές δειγματοληψίας που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν μια μεμβράνη (π.χ. κεραμική κάψα) και το υγρό των πόρων λαμβάνεται με την εφαρμογή μύζησης. Για την επιλογή της κατάλληλης συσκευής δειγματοληψίας λαμβάνονται υπόψη [9]: το βάθος και ο όγκος δειγματοληψίας, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, η χημική και βιολογική σύνθεση του υγρού, η κατάσταση κίνησης της υγρασίας, οι απαιτήσεις διάρκειας και καταλληλότητας του δειγματολήπτη, οι κλιματικές συνθήκες, οι απαιτήσεις εγκατάστασης και χειρισμού, η διαθεσιμότητα και το κόστος της συσκευής.

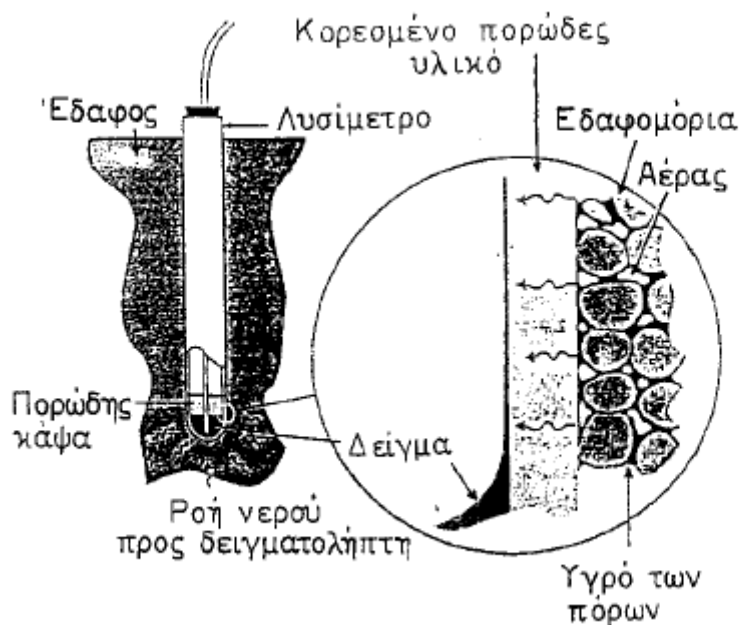
Υπάρχουν τρεις τύποι δειγματοληπτών:

1. οι δειγματολήπτες κενού (suction cup), γνωστοί και ως λυσιμέτρα, που είναι και οι πιο διαδεδομένοι
2. οι δειγματολήπτες φίλτρου (filter tip) και
3. οι δειγματολήπτες δίσκου με εφαρμογή κενού (vacuum-plate).

Τα μικρολυσιμέτρα ή δειγματολήπτες μύζησης, είναι οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την *in situ* δειγματοληψία του εδαφικού νερού. Οι βασικές αρχές στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία τους είναι η δημιουργία συνεχούς πορώδους μέσου μεταξύ εδάφους και πορώδους κάψας του λυσιμέτρου και η δημιουργία διαφοράς φορτίου μεταξύ του εδάφους και του εσωτερικού του λυσιμέτρου, έτσι που να δημιουργείται ροή του εδαφικού νερού προς το εσωτερικό του λυσιμέτρου. Η υδραυλική επαφή εδάφους και πορώδους υλικού του λυσιμέτρου και υδραυλικής κλίσης φαίνεται στο διάγραμμα της συσκευής που δίνεται στο Σχήμα 3.2.

Το υλικό της πορώδους κάψας είναι το πιο σημαντικό μέρος της συσκευής. Οι κάψες είναι συνήθως κεραμικές, μπορεί όμως να και κατασκευασμένες από οξείδια του αργιλίου ή από πλαστικό υλικό με βάση το πολυτετραφθοροεθυλένιο (PTFE). Τα δύο πρώτα υλικά είναι υδρόφιλα, ενώ το τρίτο υδρόφοβο.

Το πορώδες του υλικού της κάψας καθορίζει και τη μέγιστη μύζηση που μπορεί να εφαρμοστεί στο εσωτερικό του λυσιμέτρου. Σε ακόρεστες συνθήκες το νερό κινείται δια μέσου των μικρών πόρων του εδάφους και της κάψας. Αν η μέση διάμετρος των πόρων είναι μεγάλη, η συνέχεια του υγρού δεν μπορεί να αντέξει στην εφαρμοζόμενη πίεση με αποτέλεσμα να διακοπεί η συνέχεια και να μπει αέρας στον δειγματολήπτη.



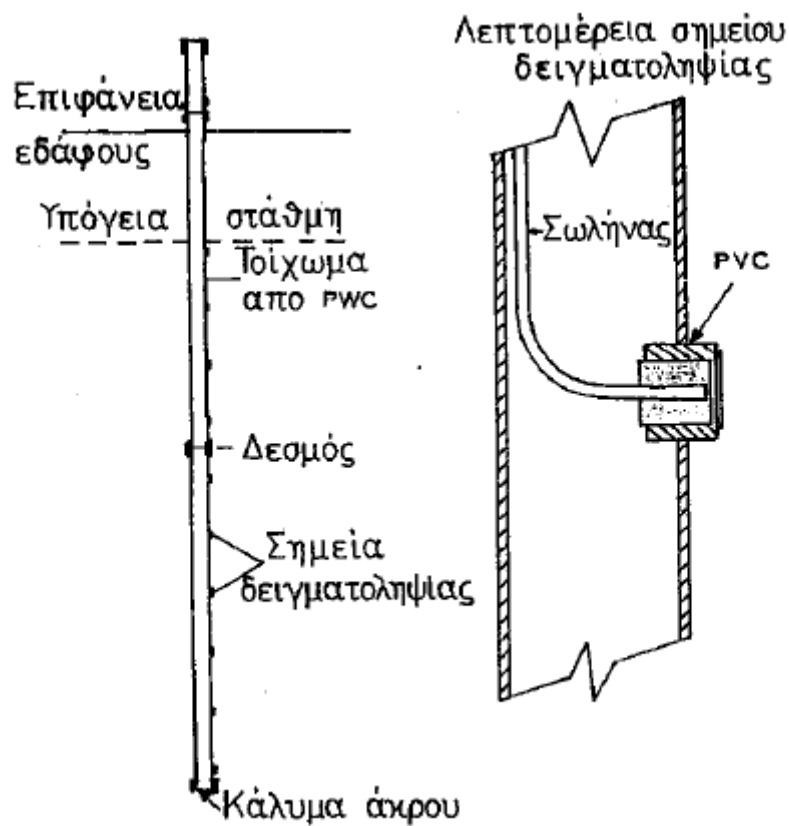
Σχήμα 3.2 Διαγραμματική παρουσίαση της συσκευής δειγματοληψίας κενού και της υδραυλικής συνέχειας μεταξύ εδάφους-κάψας-εσωτερικού συσκευής [1].

3.4.3 Μετρήσεις σε Φρεάτια Υπόγειων Υδροφορέων

Η καταγραφή των υπόγειων νερών είναι απαραίτητη σε σημεία που γίνεται διάθεση επικίνδυνων αποβλήτων (σκουπιδότοποι, ορυχεία κ.ά.) και σε περιοχές όπου θάβονται απόβλητα μέσα σε κλειστά δοχεία. Η καταγραφή έχει σκοπό τον έλεγχο για την πιθανή διαρροή και διασπορά τοξικών ή όχι ρύπων προς τον υδροφόρα, με τη συνεχή δειγματοληψία και ανάλυση της χημικής σύνθεσης των υδάτων. Η καταγραφή γίνεται επίσης και στα ειδικά φρεάτια καταγραφής και

παρατηρήσεων για να προσδιοριστεί η ποιότητα των υπόγειων νερών και οι μεταβολές της ποιότητας αυτών με το χρόνο.

Στα νέα φρεάτια που κατασκευάζονται με σκοπό την δειγματοληψία των υπόγειων νερών πρέπει να γίνεται συνεχής και εντατική άντληση έως ότου το νερό που συλλέγεται να μην περιέχει αιωρούμενα στερεά. Η άντληση σε πολλές περιπτώσεις διακόπτεται για αρκετές ημέρες και στη συνέχεια επαναλαμβάνεται. Μόνο όταν το νερό που αντλείται είναι καθαρό μπορεί να αρχίσει η διαδικασία δειγματοληψίας.



Σχήμα 3.3 Σχηματική απεικόνιση της συσκευής δειγματοληψίας πολλαπλών επιπέδων [1].

Σε κάθε δείγμα από φρεάτιο πρέπει να προσδιορίζονται απαραίτητα η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η θερμοκρασία και το διαλυμένο οξυγόνο. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα δίνει σημαντικές πληροφορίες για την σχετική συνεισφορά των διαφόρων στρωμάτων. Το διαλυμένο

οξυγόνο καθορίζει την παρουσία ή όχι υδροξειδίων του σιδήρου. Επίσης, προσδιορίζεται ένα μεγάλο πλήθος άλλων παραμέτρων όπως για παράδειγμα βαρέα μέταλλα, αλκαλικότητα, ολικός οργανικός άνθρακας, νάτριο, κάλιο κ.ά.

Υπάρχουν κατάλληλες δειγματοληπτικές συσκευές που μπορούν να εγκατασταθούν σε απλά φρεάτια. Οι συσκευές αυτές έχουν τη δυνατότητα δειγματοληψίας νερού από διαφορετικά βάθη. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η καταγραφή της ποιότητας σε συνάρτηση με το βάθος. Στο Σχήμα 3.3 δίνεται η σχηματική απεικόνιση ενός πλήρους δειγματολήπτη πολλαπλών επιπέδων.

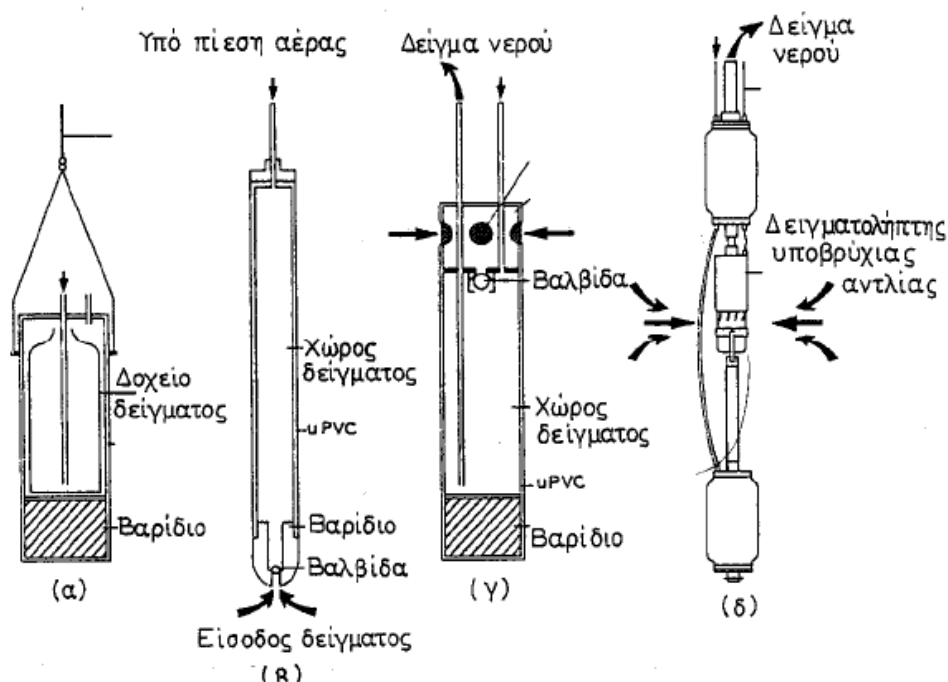
Πίνακας 3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ων δειγματοληπτικών συσκευών [1]

Συσκευή	Ελάχιστη διάμετρος φρεατίου	Μέγιστο βάθος δειγματοληψίας	Τυπικό δείγμα	Υλικό κατασκευής	Πιθανότητα χημικής αλλαγής	Ευκολία χρήσης, συντήρησης
Bailers	1/2"	Απεριόριστο	Μεταβλητό	Οτιδήποτε	Μικρή-μέση	Εύκολη
Σύριγγα	1 1/2"	Απεριόριστο			Ελάχιστη-μικρή	Εύκολη
Αντλίες ανύψωσης κενού	1/2"	8.5 m	Μεταβλητό	Χωρίς περιορισμό	Υψηλή-μέση	Εύκολη
Δειγματολήπτες με αέρια	1"	100m	0.2gpm	Teflon, PNC, πολυαιθυλένιο	Μέση-υψηλή	Εύκολη
Αντλίες με ελαστικούς θύλακες	1 1/2"	125 m	0.5 gpm	Ανοξειδωτο304, Teflon, PNC, Niton	Ελάχιστη-μικρή	Εύκολη
Αντλίες Βυθισμένες	2"	70m	0.5 gpm	Ανοξειδωτο304, Teflon, Niton	Ελάχιστη-μικρή	Εύκολη
Αντλίες με έλικα	2"	40m	0.3 gpm	Ανοξειδωτο 304, Teflon	Μικρή-μέση	Μέσης δυσκολίας
Αντλίες με εμβολο	1 1/2"	175 m	0.25 gpm	Ανοξειδωτο304, Teflon	Μικρή - μέση	Εύκολη - μέσης δυσκολίας

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία συσκευών δειγματοληψίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μικρής διαμέτρου φρεάτια καταγραφής. Οι συσκευές αυτές διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Οι συσκευές με μηχανισμό αρπάγης (grab mechanism), όπως οι συσκευές bailers και με σύριγγα,
2. οι συσκευές με μηχανισμό ανύψωσης με κενό (suction-lift), όπως οι κεντρόφυγες και περισταλτικές αντλίες και
3. οι συσκευές με μηχανισμό ώθησης και αντικατάστασης (positive-displacement), όπως οι συσκευές με αέρα, αντλίες που λειτουργούν με αέρα, ηλεκτρικές βυθισμένες αντλίες και αντλίες εμβόλου.

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των συσκευών αυτών και στο σχήμα 3.4 φαίνονται τέσσερις από τις συσκευές δειγματοληψίας των υπόγειων νερών.



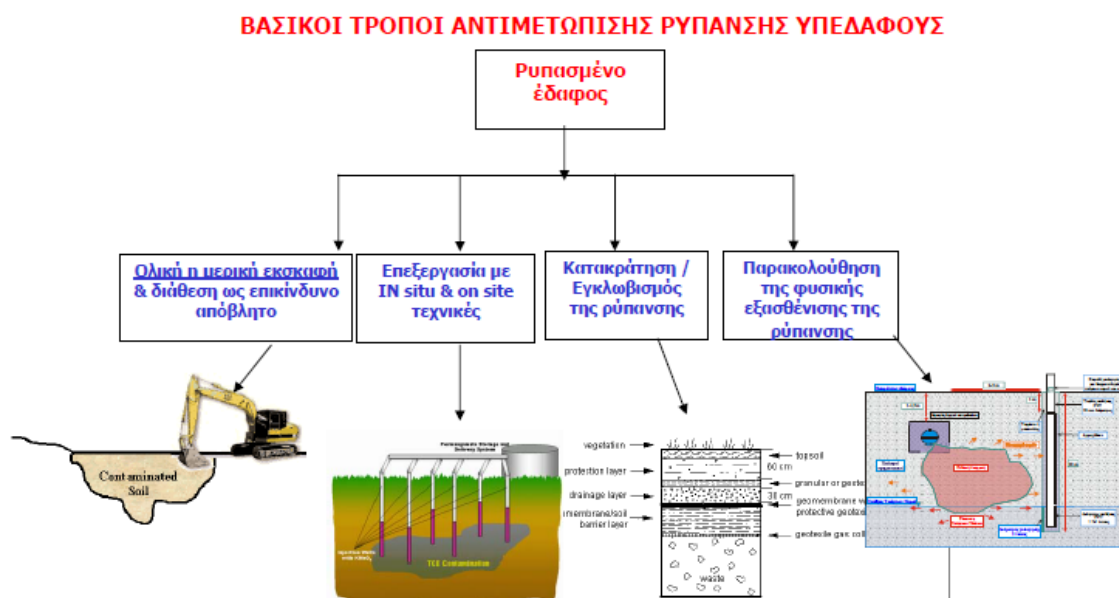
Σχήμα 3.4 Συσκευές δειγματοληψίας υπόγειων υδάτων [1].

- (α) συσκευή τύπου bailer,
- (β) συσκευή με αέριο υπό πίεση,
- (γ) συσκευή εισαγωγής αερίου, και
- (δ) συσκευή με βυθισμένη αντλία.

3.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

3.5.1 Γενικά

Στη διεθνή βιβλιογραφία και στην καθημερινή πρακτική παγκοσμίως αναφέρονται γενικά τέσσερις μεγάλες κατηγορίες μεθόδων αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 3.5 που ακολουθεί.



Σχήμα 3.5 Σχηματική απεικόνιση των μεθόδων αντιμετώπισης της ρύπανσης του υπεδάφους και των υπόγειων νερών [6].

Οι κατηγορίες αυτές είναι:

1. Η ολική εκσκαφή (total excavation) και απομάκρυνση (removal) προς τελική διάθεση και καταστροφή σε ειδικούς χώρους διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων (hazardous waste treatment).
2. Η επεξεργασία με φυσικοχημικές και βιολογικές μεθόδους είτε επιτόπου χωρίς εκσκαφή (in situ) ή στο πεδίο μετά από εκσκαφή (on site)

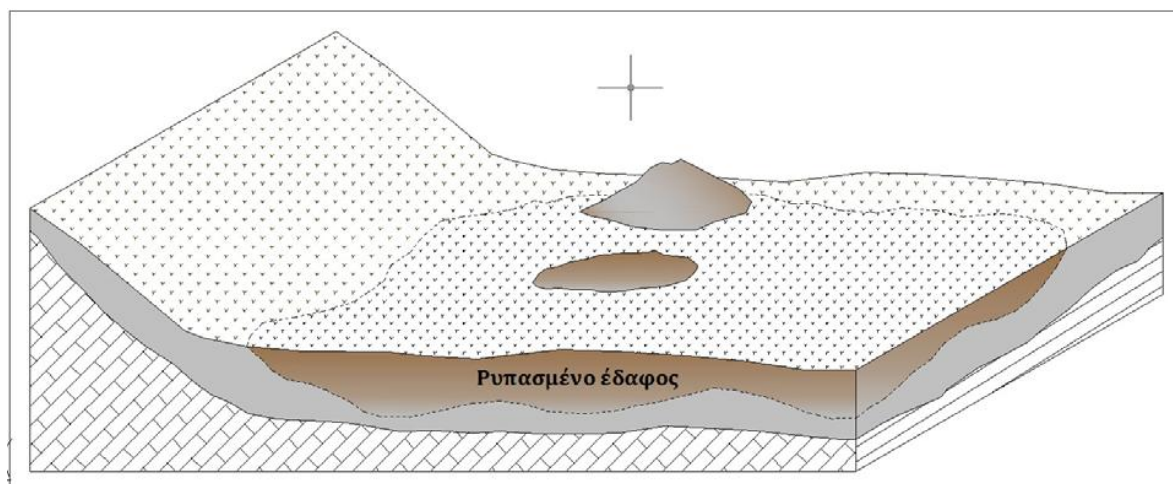
και επανατοποθέτηση του επεξεργασμένου εδαφικού υλικού στην αρχική του θέση.

3. Ο επιτόπου εγκλωβισμός (in situ containment) της ρύπανσης με διάφορους τρόπους, όπως κάλυψη με αδιαπέραστα φυσικά ή τεχνητά καλύμματα, κατασκευή αδιαπέραστων πλευρικών φραγμάτων (impermeable boundaries) ή υδραυλικών φραγμάτων (hydraulic barriers) για το υπόγειο νερό κ.ά.

4. Η απλή παρακολούθηση (natural attenuation) της διαδικασίας εξασθένησης των ρύπων με ταυτόχρονο περιορισμό ή εξάλειψη των ρυπογόνων δραστηριοτήτων.

3.5.2 Ολική εκσκαφή

Η ολική εκσκαφή (total excavation) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6 περιλαμβάνει την απομάκρυνση του ρυπασμένου εδάφους και την τελική διάθεση και καταστροφή του σε ειδικούς χώρους διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων. Εφαρμόζεται κυρίως είτε σε περιπτώσεις όπου ο βαθμός και ο τύπος της ρύπανσης απαιτούν πολύπλοκες και χρονοβόρες διαδικασίες επεξεργασίας, είτε όπου λόγω χρονικών περιορισμών απαιτείται άμεση αποκατάσταση του πεδίου.



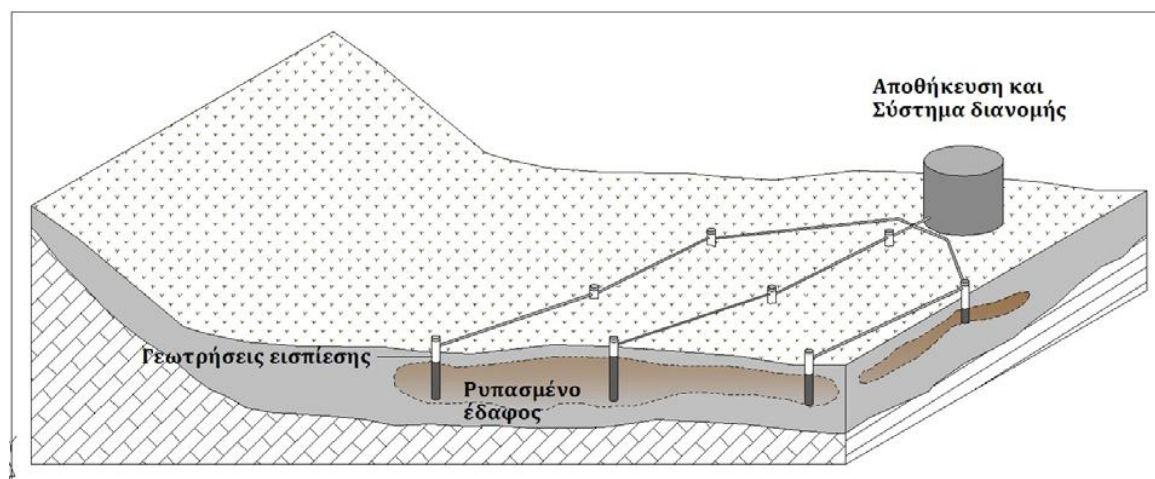
Σχήμα 3.6 Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου της ολικής εκσκαφής [6].

Προφανώς, απαραίτητη προϋπόθεση για να εκτελεστεί η ολική εκσκαφή είναι η ύπαρξη της δυνατότητας τελικής διάθεσης του ρυπασμένου εδάφους σε ειδικό χώρο διάθεσης. Επιπρόσθετα, η ολική εκσκαφή είναι συνήθως πραγματοποιήσιμη και οικονομικά συμφέρουσα μόνο όταν ο όγκος του ρυπασμένου εδάφους είναι σχετικά μικρός και βρίσκεται σε μικρό βάθος.

3.5.3 Επεξεργασία των ρύπων με φυσικοχημικές και βιολογικές μεθόδους

Η επεξεργασία του ρυπασμένου εδάφους με φυσικοχημικές και βιολογικές μεθόδους έχει σαν στόχο είτε την πλήρη εξάλειψη του ρύπου, είτε τη μείωση της συγκέντρωσής του σε επίπεδα που δεν αποτελούν κίνδυνο για τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

Οι τεχνικές φυσικοχημικής και βιολογικής επεξεργασίας, ανάλογα με τις οικονομοτεχνικές συνθήκες που εκάστοτε ισχύουν, μπορούν να εφαρμοσθούν είτε στο πεδίο μετά από εκσκαφή (on site), είτε επιτόπου χωρίς εκσκαφή (in situ) (σχήμα 3.7). Το επεξεργασμένο εδαφικό υλικό, μετά την εξυγίανσή του μπορεί να επανατοποθετηθεί στην αρχική του θέση.



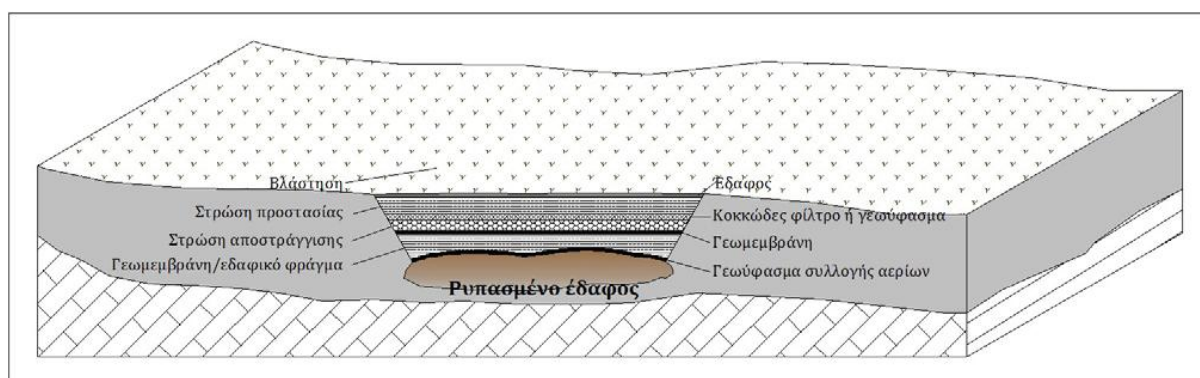
Σχήμα 3.7 Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου απορρύπανσης με επεξεργασία επιτόπου χωρίς εκσκαφή (in situ) [6].

Οι τεχνικές αυτές αποτελούν συνήθως την πλέον ολοκληρωμένη λύση για την εξυγίανση ενός ρυπασμένου πεδίου και στις περισσότερες περιπτώσεις το κόστος είναι αρκετά μικρότερο από αυτό της ολικής εκσκαφής. Τέλος, η επεξεργασία με in situ ή on site τεχνικές αποτελεί και τη μόνη λύση πλήρους εξυγίανσης και αποκατάστασης των υπογείων νερών.

3.5.4 Εγκλωβισμός της ρύπανσης

Ο επιτόπου εγκλωβισμός (in situ containment) της ρύπανσης, περιλαμβάνει συνδυασμό δράσεων με σκοπό τον πλήρη εγκιβωτισμό του ρυπασμένου εδάφους (σχήμα 3.8), έτσι ώστε κατά την διάρκεια των μέτρων αυτών να διασφαλίζεται η μη περαιτέρω διασπορά ρύπων προς ευαίσθητους αποδέκτες πχ μέσω του αέρα ή μέσω της κίνησης του υπόγειου νερού.

Οι τεχνικές αυτές συνήθως περιλαμβάνουν πρόσθετα μέτρα υδραυλικής κατακράτησης των υπόγειων νερών η στραγγισμάτων του εγκιβωτισμένου χώρου. Παρόμοια μέτρα απομόνωσης της ρύπανσης εφαρμόζονται γενικά σε ρυπασμένα πεδία μεγάλης επιφάνειας και μεγάλων ρυπασμένων ποσοτήτων εδάφους ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες περιοχές (εγκαταλειμμένα λατομεία, ανεξέλεγκτες χωματερές ή πρώην βιομηχανικές περιοχές) όπου δεν υπάρχει άμεση γειτονία είτε με κατοικήσιμους οικισμούς είτε με πιθανά ή ενεργά αξιοποιήσιμα υπόγεια ή επιφανειακά αποθέματα.

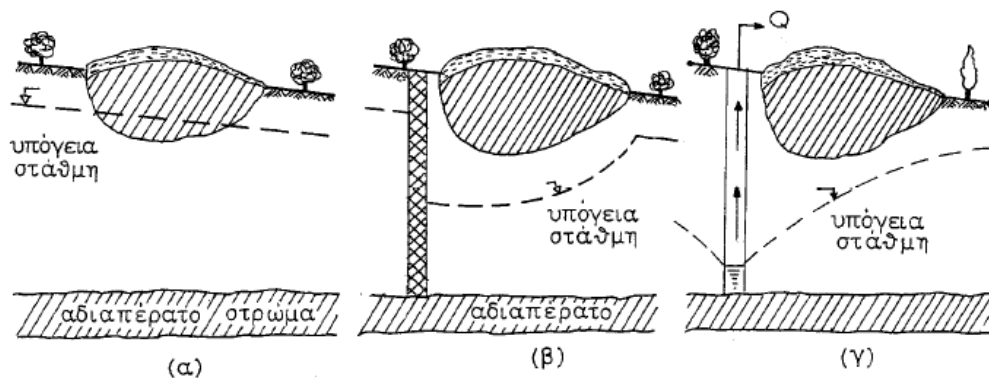


Σχήμα 3.8 Σχηματική απεικόνιση επιφανειακού εγκιβωτισμού της ρύπανσης [6].

Ακόμη ο εγκλιβωτισμός ρυπασμένων πεδίων εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν οι απαιτούμενοι οικονομικοί πόροι για την πλήρη εξυγίανση με επεξεργασία λόγω των μεγάλων ρυπασμένων ποσοτήτων, οπότε και τα μέτρα εγκλωβισμού-απομόνωσης της ρύπανσης αποτελούν την προτιμώμενη λύση αποκατάστασης.

Στο Σχήμα 3.9α παρουσιάζεται η περίπτωση που τα στερεά απόβλητα βρίσκονται θαμμένα κάτω από την υπόγεια στάθμη. Στην περίπτωση αυτή οι ρύποι των στερεών αποβλήτων μεταφέρονται στον υδροφορέα λόγω της κίνησης του υπόγειου νερού. Στα σχήματα 3.9β και 3.9γ παρουσιάζονται οι τεχνικές επεμβάσεις που μπορούν να γίνουν ώστε να επηρεαστεί η υδροδυναμική κατάσταση του υπόγειου νερού και αυτό να κινηθεί έξω από την περιοχή που καταλαμβάνουν τα στερεά απόβλητα.

Στην περίπτωση που απεικονίζεται στο σχήμα 3.9β έχει κατασκευαστεί ένα τοίχωμα με υλικά μικρής διαπερατότητας για την καταβύθιση της υπόγειας στάθμης και την εκτροπή της ροής του υπογείου νερού από την πηγή των αποβλήτων. Στην περίπτωση που φαίνεται στο σχήμα 3.9γ προκαλείται πτώση στάθμης κάτω από τα θαμμένα στερεά απόβλητα με την εγκατάσταση ενός φρεατίου άντλησης. Η πτώση της στάθμης γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε αυτή να μη βρίσκεται πλέον σε επαφή με τα απόβλητα.



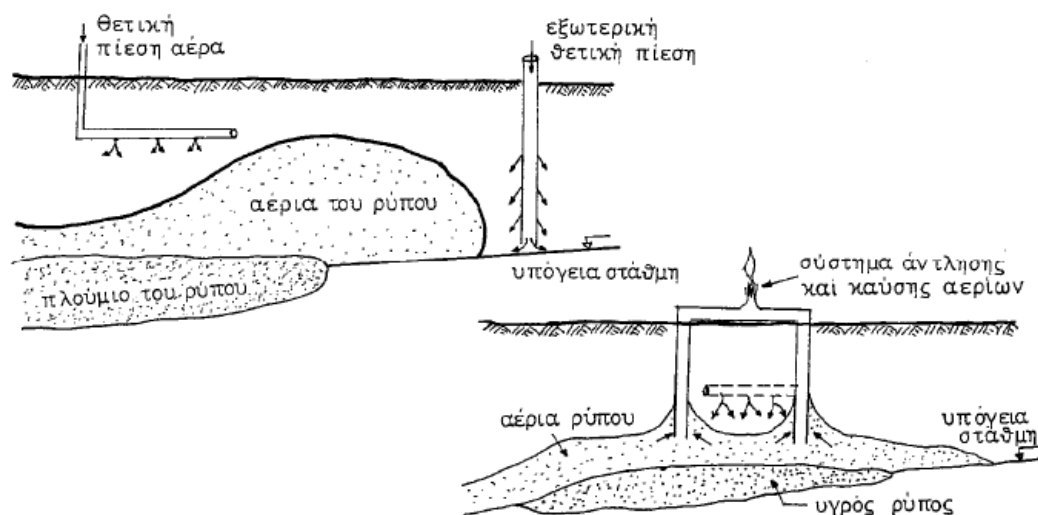
Σχήμα 3.9 Επεμβάσεις στην υδροδυναμική κατάσταση του υδροφορέα με σκοπό την αποφυγή αποβλήτων μέσω πτώσης της υπόγειας στάθμης

(α) στερεά απόβλητα θαμμένα κάτω από την υπόγεια στάθμη

(β) κατασκευή ενός αδιαπέρατου διαφράγματος

(γ) κατασκευή ενός φρεατίου υποβιβασμού της υπόγειας στάθμης [1].

Ο έλεγχος των πτητικών μορφών των ρύπων μπορεί να επιτευχθεί με τα συστήματα θετικής και αρνητικής πίεσης. Κατά την έκχυση των υδρογονανθράκων στο έδαφος το πιο άμεσο πρόβλημα είναι η ταχύτατη εξάπλωση των ατμών. Ακόμα και όταν το υγρό έχει απομακρυνθεί οι ατμοί συνεχίζουν να παραμένουν και το πρόβλημα να παραμένει. Το πρόβλημα των ατμών μπορεί να αντιμετωπιστεί με την εισαγωγή αέρα υπό πίεση στο έδαφος και εν συνεχεία την άντλησή του. Στο σχήμα 3.10 φαίνονται διατάξεις εγκιβωτισμού αερίων πετρελαιοειδών με σκοπό την αποφυγή της εξάπλωσής τους στον υδροφορέα και την απομάκρυνση των ατμών με την εισαγωγή αέρα υπό πίεση στο έδαφος και άντλησης των αερίων.



Σχήμα 3.10 Διάταξη ελέγχου αερίων πετρελαιοειδών [1]

(α) εγκιβωτισμός των ατμών με την εφαρμογή αέρα υπό πίεση στο έδαφος και

(β) απομάκρυνση των αερίων με το συνδυασμό πίεσης και άντλησης.

3.5.5 Απλή Παρακολούθηση της Διαδικασίας Εξασθένησης

Η απλή παρακολούθηση της διαδικασίας εξασθένησης (natural attenuation) μέσω αραίωσης, διάσπασης, αλλοίωσης και βιοαποικοδόμησης των ρύπων σε ένα πεδίο, αποτελεί την τελευταία δυνατότητα παρέμβασης. Φυσικά πρέπει πρώτα να έχουν περιοριστεί στο ελάχιστο ή ακόμη καλύτερα να έχουν εξαλειφθεί οι πηγές ρύπανσης. Προφανώς, είναι η πιο παθητική λύση σε σχέση με τις υπόλοιπες, αφού στηρίζεται αποκλειστικά και μόνο στις φυσικές διαδικασίες εξασθένησης

των οργανικών κυρίως ρύπων συντηρώντας κατ' αυτόν τον τρόπο τον περιβαλλοντικό κίνδυνο για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Για να αποφευχθούν τυχόν επιπτώσεις στη δημόσια υγεία διακόπτεται ή περιορίζεται η χρήση του μολυσμένου υδροφορέα, ώστε να μειωθεί η έκθεση των πολιτών στο ρυπασμένο νερό. Φυσικά αναπτύσσονται εναλλακτικές πηγές νερού και εισάγεται νερό από άλλες περιοχές. Εγκαθίσταται ένα σύστημα συνεχούς καταγραφής και μετρήσεων για τη μείωση την απομάκρυνση και τη διακοπή όλων των παρόμοιων δραστηριοτήτων. Επίσης γίνεται ενημέρωση των χρηστών για τους κινδύνους που μπορεί να προκύψουν από τη χρήση του νερού.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε πεδία όπου η ρύπανση είναι σχετικά μικρή, οι ρύποι είναι βιοαποικοδομήσιμοι, και δεν υπάρχει άμεσος κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Επίσης είναι το ελάχιστο μέτρο που πρέπει να εφαρμόζεται σε ρυπασμένες περιοχές όταν οι διαθέσιμοι οικονομικοί πόροι είναι ιδιαίτερα περιορισμένοι.

Σε πολλές περιπτώσεις τα μέτρα εξυγίανσης που σχεδιάζονται για ένα συγκεκριμένο πεδίο είναι δυνατό να εμπλέκουν και τις τέσσερις κατηγορίες δημιουργώντας ένα βέλτιστο συνδυασμό. Φυσικά λαμβάνονται υπόψη τόσο οι εκάστοτε οικονομοτεχνικές συνθήκες όσο και ο βαθμός της υφιστάμενης περιβαλλοντικής επικινδυνότητας. Στις περιπτώσεις αυτές περισσότερες από μία τεχνικές συνδυάζονται και εφαρμόζονται είτε σταδιακά είτε ταυτόχρονα έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια ακολουθία μέτρων απορρύπανσης.

4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Για την αποκατάσταση των ρυπασμένων εδαφών, όπως είναι φυσικό, απαιτείται πρώτα η απομάκρυνση της πηγής ρύπανσης και στη συνέχεια ακολουθεί η επεξεργασία του εδάφους που έχει ρυπανθεί. Η τεχνική που θα χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία του εδάφους είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, όπως του είδους και της συγκέντρωσης του ρύπου, του είδους του εδάφους, των οικονομικών πόρων και της διαθέσιμης τεχνολογίας και τεχνογνωσίας.

Ειδικά για την αποκατάσταση των ακόρεστων ρυπασμένων εδαφών, δηλαδή εδαφών στα οποία δεν υπάρχει υδροφορία, υπάρχουν βασικά τρεις οικογένειες μεθόδων αποκατάστασης. Αυτές είναι:

- Βιοεξυγίανση
- Φυσικοχημικές μέθοδοι
- Θερμικές μέθοδοι

4.2 ΒΙΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗ

4.2.1 Γενικά

Η μέθοδος της βιοεξυγίανσης (bioremediation) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες μεθόδους απορρύπανσης των εδαφών καθώς επίσης και των υπόγειων υδροφορέων. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην αποδόμηση των οργανικών ρύπων και την τελική μετατροπή τους σε αβλαβείς ουσίες μέσω της δράσης κατάλληλων μικροοργανισμών. Την τελευταία δεκαετία, η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα για την απορρύπανση εδαφών από πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες (poly-aromatic hydrocarbons, PAH), πτητικές οργανικές ουσίες,

χλωριούχους οργανικούς ρύπους όπως ο τετραχλωράνθρακας (PCP) και οι πενταχλωροφαινόλες (PCBs) καθώς και άλλες οργανικές ενώσεις.

Η βιολογική αποδόμηση των οργανικών ενώσεων γίνεται μέσω της δράσης διαφόρων μικροοργανισμών, όπως βακτήρια, μύκητες κ.τ.λ., οι οποίοι αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας τον άνθρακα των οργανικών ουσιών ή/και την ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τον μεταβολισμό (αποσύνθεση) των οργανικών ουσιών. Το τελικό προϊόν της αποσύνθεσης των οργανικών ουσιών μέσω των μικροοργανισμών είναι ανόργανες ουσίες (διοξείδιο του άνθρακα και νερό), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις που η αποσύνθεση δεν είναι πλήρης, παράγονται και άλλες απλές ενώσεις όπως μεθάνιο, υδρόθειο και νιτρικά και θειικά άλατα.

Για να πραγματοποιηθεί η αποσύνθεση των οργανικών ουσιών μέσω μικροοργανισμών απαιτούνται οι εξής προϋποθέσεις:

- Η παρουσία κατάλληλων μικροοργανισμών, δηλαδή μικροοργανισμών που παράγουν ένζυμα τα οποία είναι κατάλληλα για την αποδόμηση της συγκεκριμένης οργανικής ουσίας.
- Η παρουσία οργανικών ουσιών οι οποίες με την αποσύνθεσή τους θα παράσχουν την απαιτούμενη ενέργεια στους μικροοργανισμούς για να αναπτυχθούν.
- Η παρουσία θρεπτικών ουσιών (nutrients), όπως το άζωτο, ο φώσφορος, το κάλιο, το θείο κ.τ.λ. που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών.
- Η παρουσία δεκτών ηλεκτρονίων (electron acceptors), δηλαδή ατόμων ή ριζών τα οποία δέχονται τα ηλεκτρόνια που προκύπτουν κατά την οξείδωση των οργανικών ουσιών.
- Η ύπαρξη κατάλληλων συνθηκών για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, δηλαδή, κατάλληλη υγρασία, θερμοκρασία και pH.
- Η απουσία χημικών ουσιών που σε μεγάλες συγκεντρώσεις είναι τοξικές για τους μικροοργανισμούς.

Αν και η βιολογική αποσύνθεση των οργανικών ενώσεων υπό αναερόβιες συνθήκες είναι δυνατή, η αερόβια αποσύνθεση προτιμάται επειδή καταλήγει σε περισσότερο αβλαβή προϊόντα (π.χ. διοξείδιο του άνθρακα αντί μεθανίου). Συνεπώς, ο καλός αερισμός του εδάφους (soil venting) με έντονη μηχανική αναμόχλευση ή με τεχνητή κυκλοφορία αέρα είναι απαραίτητος ώστε να δημιουργηθούν κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη αερόβιων βακτηριδίων.

Η βιολογική απορρύπανση εδαφών έχει εφαρμοστεί στην αποσύνθεση πολυαρωματικών υδρογονανθράκων, πετρελαιοειδών και άλλων οργανικών ενώσεων. Η μέθοδος είναι αποτελεσματική για την απορρύπανση εδαφών πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα, δηλαδή στην ακόρεστη ζώνη, επειδή στα κορεσμένα εδάφη δεν είναι

εύκολο να επιτευχθεί ο αερισμός και συνεπώς ευνοείται η αναερόβια αποσύνθεση. Επίσης, η μέθοδος είναι περισσότερο αποτελεσματική σε χονδρόκοκκα εδάφη γιατί αυτά αερίζονται ευκολότερα.

Παρά τα πλεονεκτήματά της η βιολογική απορρύπανση συγκεντρώνει και κάποια μειονεκτήματα. Τα σημαντικότερα είναι:

1. Η μέθοδος αυτή απαιτεί κάποιο χρονικό διάστημα που μπορεί να κυμαίνεται από μερικές εβδομάδες έως λίγα χρόνια, ανάλογα φυσικά με το είδος και την έκταση της ρύπανσης.

2. Όταν το έδαφος περιέχει πολλούς οργανικούς ρύπους, είναι πιθανόν οι πλέον τοξικοί για τον άνθρωπο να διασπώνται δυσκολότερα, και συνεπώς η απορρύπανση του εδάφους από τους ρύπους αυτούς να καθυστερήσει, λόγω ταχύτερης διάσπασης των υπόλοιπων οργανικών ουσιών, οι οποίες όμως έχουν μικρότερο ενδιαφέρον από πλευράς περιβαλλοντικού κινδύνου.

3. Η επιτυχία της μεθόδου αυτής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (παρουσία δεκτών ηλεκτρονίων, θρεπτικών ουσιών, υγρασία, θερμοκρασία, pH κ.τ.λ.). Οι παράγοντες αυτοί θα πρέπει να ελέγχονται και να ρυθμίζονται διαρκώς ώστε να επιτυγχάνονται βέλτιστοι ρυθμοί δράσης των μικροοργανισμών και συνεπώς βέλτιστη απόδοση και ταχύτητα της αποδόμησης των ρύπων.

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

In situ:

- Βιοαερισμός
- Φυτοεξυγίανση

Ex situ:

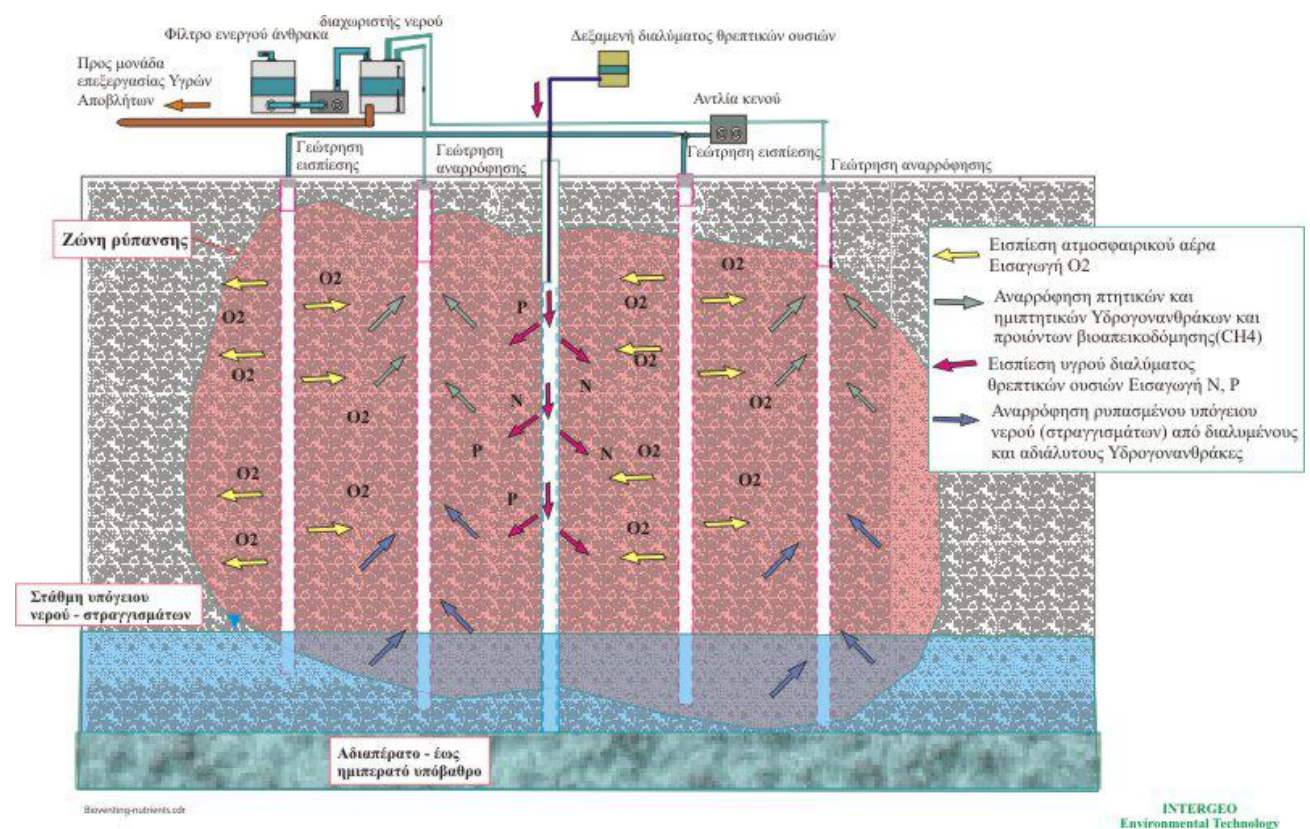
- Τεχνική αγροκαλλιέργειας
- Επεξεργασία σε σωρούς
- Βιοαντιδραστήρες

4.2.2 Βιοαερισμός

Ο βιοαερισμός (*Bioventing*) περιλαμβάνει τη διοχέτευση αέρα στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους με στόχο την ενεργοποίηση της μικροβιακής δράσης και τη βιοαποδόμηση των υφιστάμενων ρύπων (σχήμα 4.1). Κύριος στόχος της διεργασίας του βιοαερισμού ρυπασμένων εδαφών είναι η αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου στο υπέδαφος με απευθείας εισαγωγή αέρα σε αυτό, μέσω κατάλληλων γεωτρήσεων. Με την αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου στο έδαφος,

ενισχύονται οι υπάρχοντες μικροοργανισμοί, που έχουν την ικανότητα να αποικοδομούν αερόβια τους υφιστάμενους οργανικούς ρύπους.

Ανάλογα με την περίπτωση, εκτός από την παροχή οξυγόνου μπορεί να κριθεί αναγκαία και η παροχή θρεπτικών συστατικών (π.χ. φωσφόρου και αζώτου), ενισχύοντας περαιτέρω την ανάπτυξη και τη δράση των μικροοργανισμών. Επίσης μπορεί να δημιουργηθεί η ανάγκη άντλησης του εδαφικού αέρα κατά την εφαρμογή του βιοαερισμού, για την αποφυγή συσσώρευσης πτητικών ρύπων. Σε αυτήν την περίπτωση, συνήθως πραγματοποιείται συνδυασμός της τεχνικής άντλησης εδαφικού αέρα με το βιοαερισμό.



Σχήμα 4.1 Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου του βιοαερισμού με σκοπό τη βιολογική αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών [11].

Οι ρύποι οι οποίοι μπορούν να αντιμετωπιστούν αποδοτικά με χρήση της τεχνικής του βιοαερισμού είναι κυρίως βιοαποικοδομήσιμα οργανικά συστατικά όπως για παράδειγμα οι πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες. Ιδιαίτερα σημαντικό για την εξασφάλιση σημαντικής απόδοσης της τεχνικής αυτής είναι οι προς απομάκρυνση ρύποι να έχουν

χαμηλή πτητικότητα και υψηλή διαλυτότητα στο νερό, ώστε να αποτρέπεται η εξάτμισή τους εις βάρος της βιοαποικοδόμησής τους.

Ο βιοαερισμός έχει εφαρμοστεί επιτυχώς για την αντιμετώπιση διαφόρων διαρροών ρύπων, όπως βενζίνης, diesel, jet fuel, πετρελαίου, μη χλωριωμένων διαλυτών, ζιζανιοκτόνων κ.ά.

4.2.3 Φυτοεξυγίανση

Η μέθοδος της φυτοεξυγίανσης (Phytoremediation) εκμεταλλεύεται τις φυσικές διαδικασίες που συμβαίνουν στα φυτά. Στις διεργασίες αυτές περιλαμβάνονται: η απορρόφηση νερού και χημικών ενώσεων, η διαπνοή και η έκκριση ουσιών από το ριζικό σύστημα. Για να κατανοήσουμε πλήρως τους μηχανισμούς που εκμεταλλεύεται η φυτοεξυγίανση είναι απαραίτητη η γνώση της ανατομίας και φυσιολογίας των φυτών. Επίσης πρέπει να έχουμε λεπτομερή γνώση των διαδικασιών με τις οποίες τα φυτά απορροφούν μέταλλα και διάφορα άλλα θρεπτικά συστατικά είτε από το έδαφος μέσω των ριζών είτε από την ατμόσφαιρα μέσω των φύλλων.

Τα φυτά που είναι κατάλληλα για να χρησιμοποιηθούν στη μέθοδο της φυτοεξυγίανσης πρέπει να συγκεντρώνουν κάποια χαρακτηριστικά. Έτσι, χρησιμοποιούνται φυτά που είτε:

- έχουν μεγάλη ικανότητα απορρόφησης και ανθεκτικότητας σε υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (οπότε λέγονται υπερ-συσσωρευτές), ή
- έχουν μειωμένη ικανότητα απορρόφησης βαρέων μετάλλων αλλά εκκρίνουν ουσίες από το ριζικό τους σύστημα μετατρέποντας τα ευδιάλυτα μέταλλα του εδάφους σε αδιάλυτες σύμπλοκες ενώσεις, (οπότε λέγονται μεταλλο-αποκλιστές).

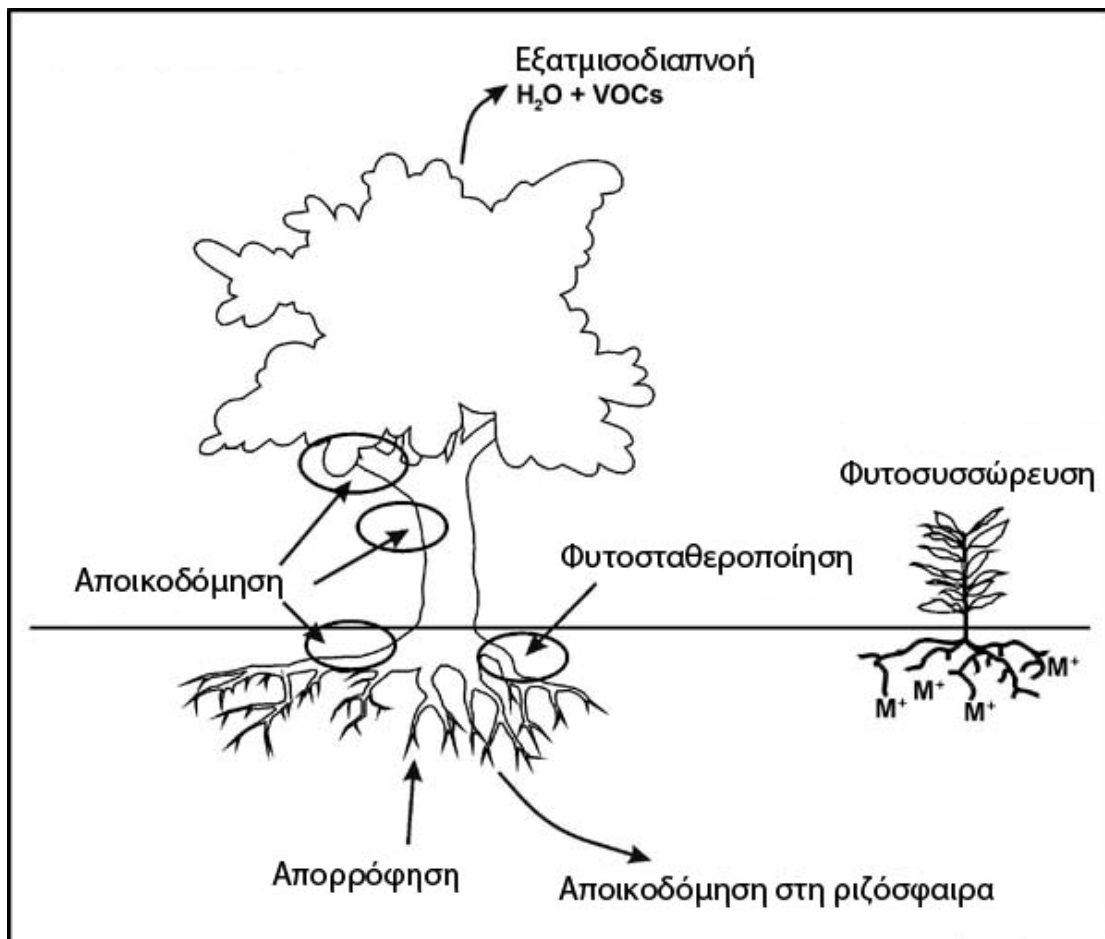
Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της φυτοαποκατάστασης είναι το γεγονός ότι μπορεί πολύ εύκολα να εφαρμοστεί συμπληρωματικά, είτε με κάποια άλλη συμβατική και εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία αποκατάστασης είτε με κάποια άλλη φυσική τεχνολογία απομάκρυνσης ρύπων όπως η βιοεξυγίανση.

Οι μηχανισμοί με τους οποίους επιτυγχάνεται η φυτοεξυγίανση μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής [11]:

1. Μηχανισμοί αποδόμησης (για την καταστροφή ή τον μετασχηματισμό οργανικών ρύπων)

- Φυτοαποδόμηση (Phytodegradation) ή Φυτομετατροπή (Phytotransformation): πρόσληψη των ρύπων από το υπέδαφος και μεταβολισμός αυτών στο εσωτερικό του φυτού, στις ρίζες, στον κορμό ή στα φύλλα.

- Ριζοαποικοδόμηση (Rhizodegradation) ή Φυτοδιέγερση (Phytostimulation) ή Φυτοβοηθητική βιοεξυγίανση (Plant-Assisted Bioremediation): ενίσχυση της βιοαποδόμησης των ρύπων του υπεδάφους στην περιοχή του ριζικού συστήματος του φυτού από τους μικροοργανισμούς που ήδη υπάρχουν εκεί.
2. Μηχανισμοί συσσώρευσης (για τον περιορισμό ή την απομάκρυνση οργανικών ή/ και ανόργανων ρύπων).
- Φυτοεκχύλιση (Phytoextraction) ή Φυτοσυσσώρευση (Phytoaccumulation) ή Φυτοαπορρόφηση (Phytoabsorption): πρόσληψη των ρύπων από το υπέδαφος και συσσώρευση τους μέσα στο φυτό, στις ρίζες, στον κορμό ή στα φύλλα.
 - Ριζοδιήθηση (Rhizofiltration): προσρόφηση των ρύπων αποκλειστικά στις ρίζες του φυτού.



Σχήμα 4.2 Σχηματική αναπαράσταση των μηχανισμών της φυτοεξυγίανσης [11].

3. Μηχανισμοί απομάκρυνσης (μεταφορά οργανικών ή ανόργανων ρύπων στην ατμόσφαιρα)

- Φυτοεξάτμιση (Phytovolatilization): πρόσληψη των ρύπων από το υπέδαφος, εξάτμιση αυτών και στη συνέχεια μεταφορά τους στην ατμόσφαιρα μέσω των φύλλων.

4. Μηχανισμοί ακινητοποίησης (για τη σταθεροποίηση οργανικών ή/ και ανόργανων ρύπων)

- Φυτοσταθεροποίηση (Phytostabilization): ακινητοποίηση-σταθεροποίηση των ρύπων μέσα στο υπέδαφος.
- Υδραυλικός έλεγχος (Hydraulic Control) ή Φυτοϋδραυλική (Phytohydraulics): έλεγχος της ροής των υπογείων νερών μέσω πρόσληψης νερού από το φυτό. Η πρόσληψη γίνεται με ρυθμό που μπορεί να φτάσει ακόμη και τα 1350 λίτρα την ημέρα, ανάλογα πάντα με το είδος, το μέγεθος και την ηλικία του φυτού ή του δέντρου. Ο μηχανισμός αυτός έχει τον περιορισμό ότι μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε σχετικά ρηχούς υδροφορείς.

Στο σχήμα 4.2 απεικονίζονται οι κυριότεροι μηχανισμοί της φυτοεξυγίανσης.

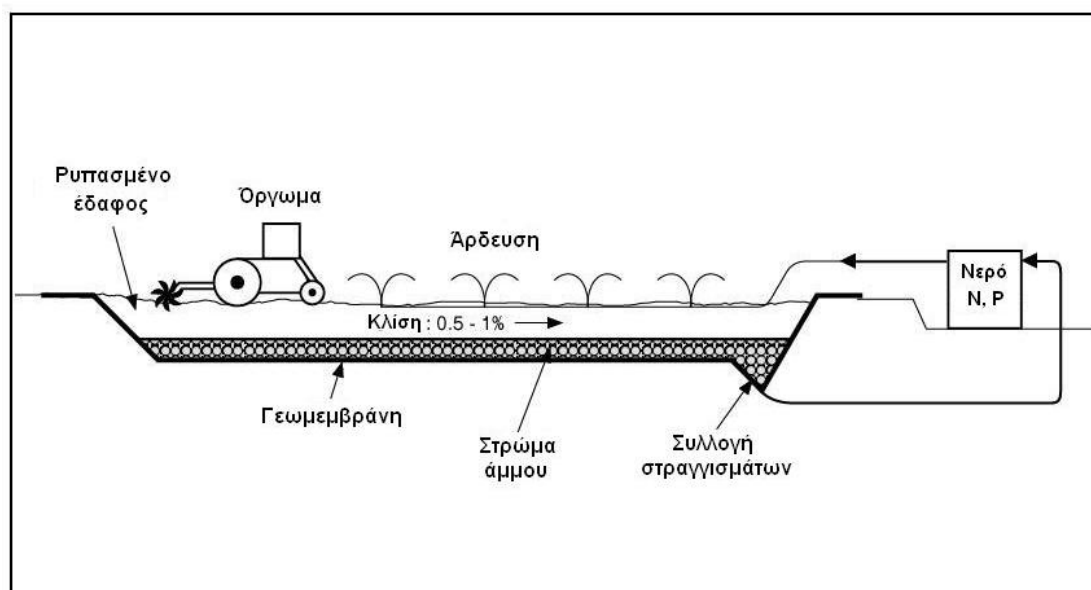
4.2.4 Τεχνική αγροκαλλιέργειας

Η τεχνική αγροκαλλιέργειας (Landfarming) είναι μια *ex situ* μέθοδος βιοεξυγίανσης. Κατά την τεχνική αυτή, το έδαφος απλώνεται σε μια μεγάλη επιφάνεια, δημιουργώντας ένα στρώμα πάχους 45-60 cm. Σε τακτά χρονικά διαστήματα το έδαφος οργώνεται με αγροτικά μηχανήματα, ώστε να εμπλουτίζεται με οξυγόνο που είναι απαραίτητο για τις αερόβιες βιολογικές δράσεις και παράλληλα προστίθεται υγρασία και θρεπτικά συστατικά.

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα μιας εγκατάστασης επεξεργασίας στην οποία εφαρμόζεται η τεχνική της αγροκαλλιέργειας. Η κάτω επιφάνεια διαμορφώνεται με κλίση 1% προς ένα σημείο συλλογής των στραγγισμάτων και στρώνεται με μία αδιαπέραστη γεωμεμβράνη με σκοπό τον έλεγχο της διαρροής των στραγγισμάτων προς το υπέδαφος.

Πάνω από τη γεωμεμβράνη τοποθετείται ένα διαπερατό στρώμα άμμου ενώ πάνω στο στρώμα αυτό απλώνεται το ρυπασμένο έδαφος. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι είναι πολύ εύκολη στην εφαρμογή της και δεν παρουσιάζει σημαντικές τεχνικές δυσκολίες. Από την άλλη μεριά όμως προϋποθέτει την ύπαρξη μιας μεγάλης έκτασης, γιατί το πάχος του εδαφικού στρώματος δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 60cm, που

είναι το μέγιστο βάθος στο οποίο μπορούν να οργώσουν τα διαθέσιμα αγροτικά μηχανήματα.

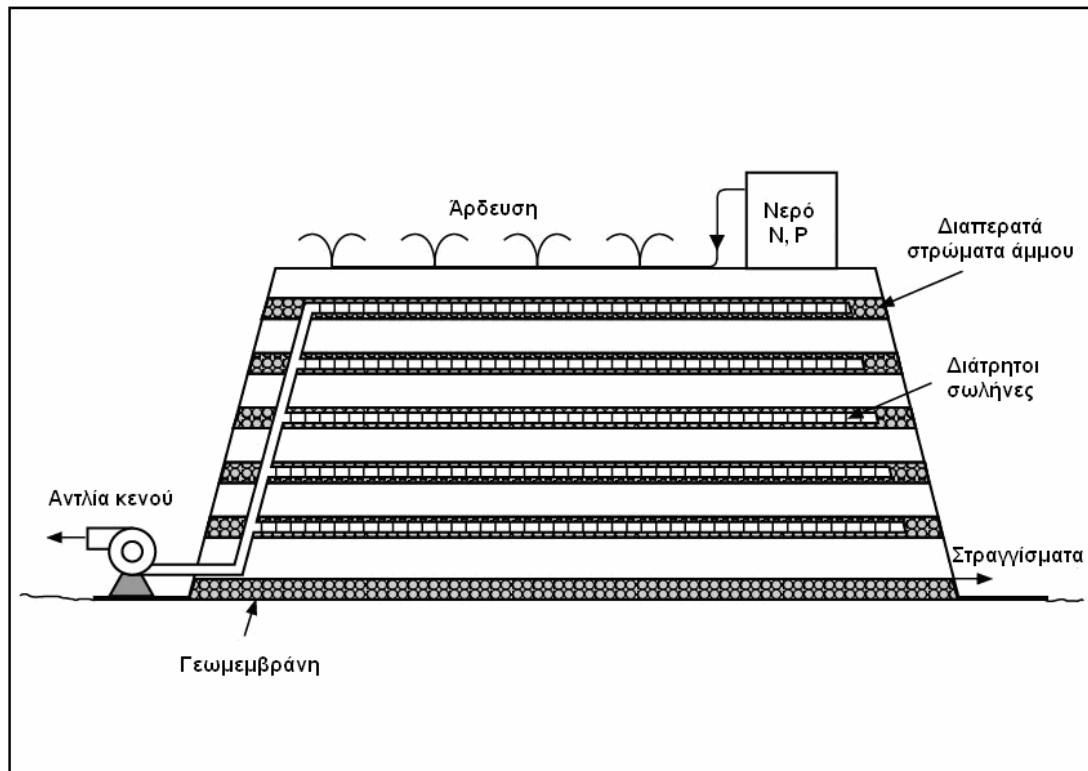


Σχήμα 4.3 Αναπαράσταση εγκατάσταση επεξεργασίας που εκμεταλλεύεται την τεχνική της αγροκαλλιέργειας [11].

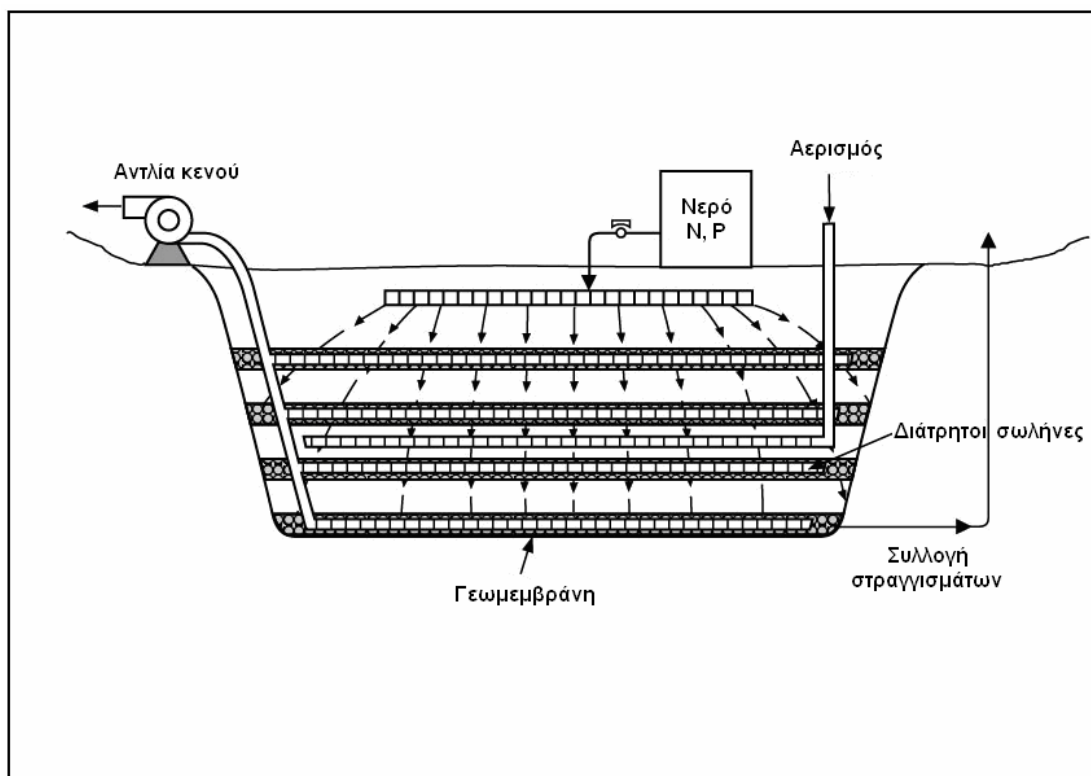
4.2.5 Επεξεργασία σε σωρούς

Όπως είδαμε ένα μειονέκτημα της αγροκαλλιέργειας είναι η απαίτηση μιας μεγάλης επιφάνειας. Αν όμως δεν είναι διαθέσιμη μία τόσο μεγάλη επιφάνεια, η επεξεργασία του εδάφους μπορεί να γίνει σε σωρούς ή λάκκους (Biopiles). Εγκαταστάσεις επεξεργασίας αυτού του είδους φαίνονται στα σχήματα 4.4 και 4.5 αντίστοιχα. Όταν το έδαφος έχει σχετικά χαμηλή διαπερατότητα, ο σωρός κατασκευάζεται σε διαδοχικά στρώματα πάχους περίπου 60 cm, τα οποία χωρίζονται μεταξύ τους με ένα λεπτό στρώμα διαπερατής άμμου. Τα διαπερατά στρώματα συνδέονται με μια αντλία, με την οποία γίνεται η διοχέτευση αέρα στον σωρό. Συνήθως ο σωρός καλύπτεται πλήρως με αδιαπέραστη γεωμεμβράνη για να μειωθεί ο κίνδυνος διαφυγής των πτητικών ενώσεων.

Η επεξεργασία σε λάκκο μπορεί να πραγματοποιηθεί στην ίδια περιοχή στην οποία έγινε η εκσκαφή του εδάφους, μετά από την κατάλληλη στεγανοποίηση του πυθμένα.



Σχήμα 4.4 Επεξεργασία εδάφους σε σωρό [11].



Σχήμα 4.5 Επεξεργασία εδάφους σε λάκκο [11].

4.2.6 Βιοαντιδραστήρες

Οι βιοαντιδραστήρες (Bioreactors) είναι δεξαμενές στις οποίες πραγματοποιούνται βιολογικές διεργασίες σε ελεγχόμενες συνθήκες, με σκοπό την κατά το δυνατόν βέλτιστη δράση των μικροοργανισμών. Στους βιοαντιδραστήρες, το έδαφος αναμιγνύεται με νερό και στη συνέχεια το μείγμα που προκύπτει προωθείται στον αντιδραστήρα όπου κατάλληλοι μικροοργανισμοί προσροφούν ή αποδομούν τους ρύπους. Οι οργανικοί ρύποι αποδομούνται ολικά ή μερικά ενώ οι ανόργανοι απομακρύνονται με τη διαδικασία της ιζηματοποίησης. Στη συνέχεια γίνεται ξήρανση του εδάφους και το τελικό προϊόν είναι πλήρως λειτουργικό έδαφος. Η μέθοδος αυτή όπως άλλωστε και όλες οι μέθοδοι απορρύπανσης εδαφών έχει πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Είναι αποτελεσματική και σχετικά γρήγορη μέθοδος. Είναι η πιο άμεση από τις βιολογικές μεθόδους.
- Απομακρύνει και οργανικούς και ανόργανους ρύπους.
- Εφαρμόζεται σε πάρα πολλές περιπτώσεις
- Το έδαφος διατηρεί τα χαρακτηριστικά του και μπορεί να επανέλθει στην αρχική του θέση.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Απαιτούνται ειδικές εγκαταστάσεις.
- Παράγονται μεγάλες ποσότητες στερεών και υγρών αποβλήτων.
- Η απόδοση εξαρτάται ισχυρά από τις ιδιότητες του εδάφους.
- Έχει σχετικά υψηλό κόστος, το οποίο επιπλέον εξαρτάται πάρα πολύ από τις ιδιότητες του εδάφους και του ρύπου.

4.3 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

4.3.1 Γενικά

Οι φυσικοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας ρυπασμένων εδαφών είναι οι παρακάτω:

In situ

- Αντληση εδαφικού αέρα
- Έκπλυση εδάφους
- Ηλεκτροκινητική απορρύπανση
- Φυσική εξασθένηση

Ex situ

- Πλύση εδάφους

In situ / Ex situ

- Σταθεροποίηση - Στερεοποίηση

Στις επόμενες ενότητες οι τεχνικές αυτές θα παρουσιαστούν αναλυτικά.

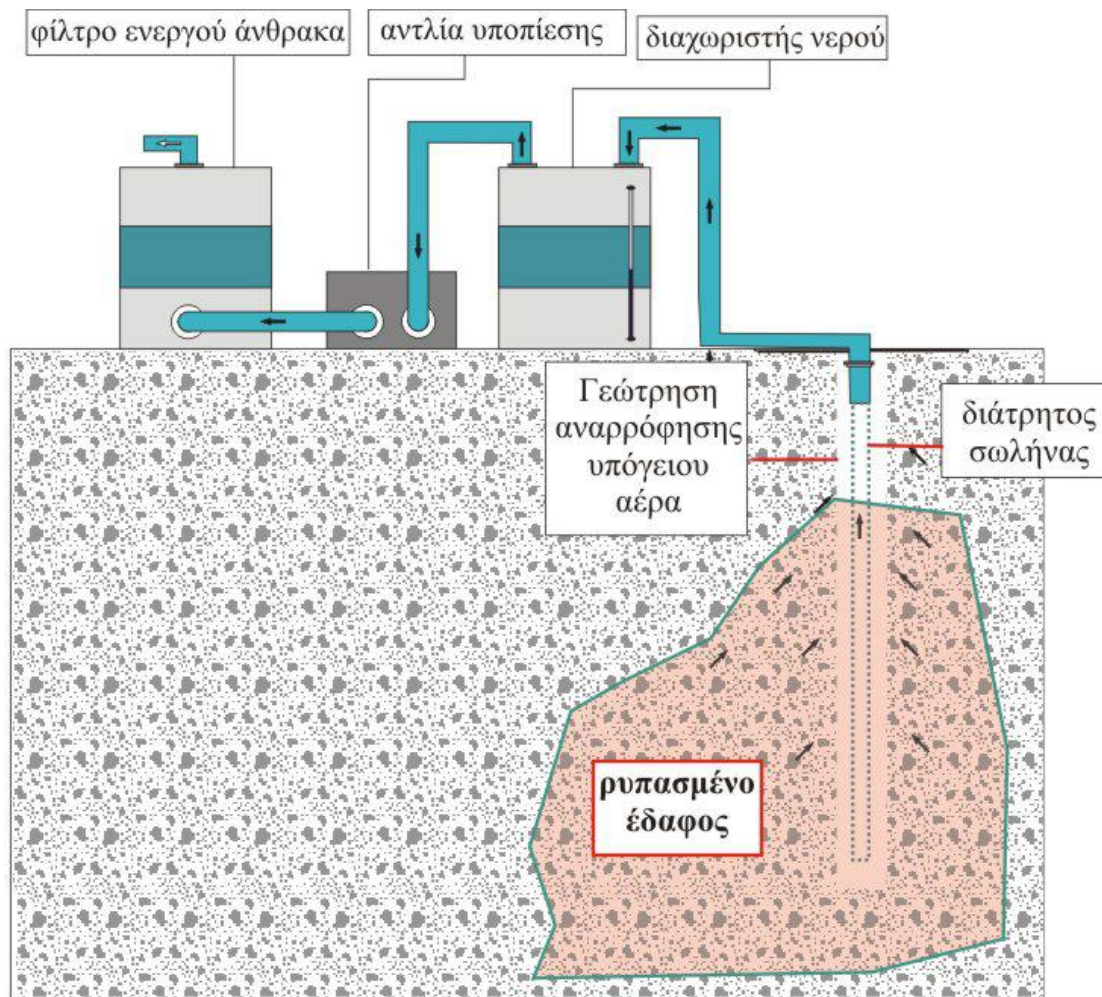
4.3.2 Αντληση Εδαφικού Αέρα

Η τεχνολογία άντλησης εδαφικού αέρα (soil vapour extraction) από την ακόρεστη ζώνη του εδάφους έχει στόχο το φυσικό διαχωρισμό των αέριων ρύπων από το έδαφος, με την εφαρμογή υποπίεσης (σχήμα 4.6). Όταν ο εδαφικός αέρας παραμένει ακίνητος μετά από μια διαρροή και διήθηση ρύπου στο έδαφος, γίνεται κορεσμένος σε ατμούς του υφιστάμενου ρύπου, που προέρχονται από την υγρή φάση.

Αυτοί οι κορεσμένοι σε ρύπο ατμοί είναι δυνατόν να απομακρυνθούν με άντληση του εδαφικού αέρα, μέσω κατάλληλων γεωτρήσεων. Καθώς ο εδαφικός αέρας ανανεώνεται, η συγκέντρωση του ρύπου στην αέρια φάση αρχίζει να μειώνεται, διαταράσσοντας την κατάσταση ισορροπίας μεταξύ της υγρής και της αέριας φάσης του ρύπου και ενισχύοντας παράλληλα την εξάτμιση μεγαλύτερων ποσοτήτων του. Επομένως, η ανάπτυξη ροής και η απομάκρυνση του αέρα ρυπασμένων εδαφών ενισχύει την εξάτμιση των υφιστάμενων ρύπων και γενικότερα ενεργοποιεί βασικούς μηχανισμούς μεταφοράς μάζας.

Οι ρύποι που η τεχνολογία άντλησης εδαφικού αέρα μπορεί να αντιμετωπίσει με επιτυχία είναι κυρίως πτητικά καθώς επίσης και ορισμένα ημι-πτητικά οργανικά συστατικά. Για να καταστεί αποδοτική η εφαρμογή της τεχνικής, οι προς απομάκρυνση ρύποι θα πρέπει να παρουσιάζουν ελάχιστη διαλυτότητα στο νερό και αμελητέα τάση προσρόφησης στα εδαφικά σωματίδια, ώστε να είναι δυνατή και σχετικά εύκολη η μεταφορά τους στην αέρια φάση.

Ενώσεις που παρουσιάζουν τέτοιου είδους χαρακτηριστικά είναι οι ελαφριοί υδρογονάνθρακες και για το λόγο αυτό η τεχνολογία άντλησης εδαφικού αέρα έχει βρει ευρεία εφαρμογή στην αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών από οργανικούς και κυρίως πετρελαϊκούς ρύπους.



d:\corel50\intergeo\sve-gr.cdr

INTERGEO
Environmental Technology

Σχήμα 4.6 Σύστημα απορρύπανσης του εδάφους με την μέθοδο της αναρρόφησης υπόγειου αέρα [11].

4.3.3 Έκπλυση εδάφους

Κατά την έκπλυση του εδάφους (soil flushing) εγχέεται ή διηθείται ένα υδατικό διάλυμα στη ρυπασμένη ζώνη του εδάφους, ακολουθούμενη από άντληση του υπόγειου νερού και του διαλύματος που περιέχει τους απομακρυνόμενους ρύπους, επεξεργασία του στην επιφάνεια του εδάφους και απόρριψη ή επανέγχυσή του.

Μία σχηματική αναπαράσταση της επί τόπου έκπλυσης του εδάφους δίνεται στο σχήμα 4.7. Η εισαγωγή του διαλύματος έκπλυσης μπορεί να πραγματοποιηθεί στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους, στην

κορεσμένη ζώνη ή και στις δύο. Τα διαλύματα έκπλυσης αποτελούνται μόνο από νερό, ή νερό με προσθήκη συνδιαλυτικών μέσων, οξέων, βάσεων, οξειδωτικών μέσων και διαλυτών. Το εισαγόμενο διάλυμα έκπλυσης διηθείται από το έδαφος και οι διαλυτές ενώσεις που είναι παρούσες στο έδαφος διαλύονται. Το διάλυμα που προκύπτει μετά την προσθήκη αυτών των ενώσεων αντλείται από τον πυθμένα της ρυπασμένης ζώνης. Στη συνέχεια το διάλυμα αυτό οδηγείται σε μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων όπου υποβάλλεται σε κατάλληλη επεξεργασία με σκοπό την απομάκρυνση των ρύπων.

Για την επαφή του διαλύματος έκπλυσης με τη ρυπασμένη ζώνη και τη συλλογή του διαλύματος εξαγωγής μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία ποικιλία διατάξεων, όπως πηγάδια έγχυσης, οριζόντια πηγάδια, τάφροι, κανάλια διήθησης, επιφανειακά συστήματα διαβροχής, πηγάδια εξαγωγής, ανοικτά χαντάκια ή υπόγεια συστήματα συλλογής απορροών.

Η τεχνική της έκπλυσης του εδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση πολλών οργανικών και ανόργανων ρύπων. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται από το είδος του ρύπου καθώς επίσης και από το είδος του εδάφους.

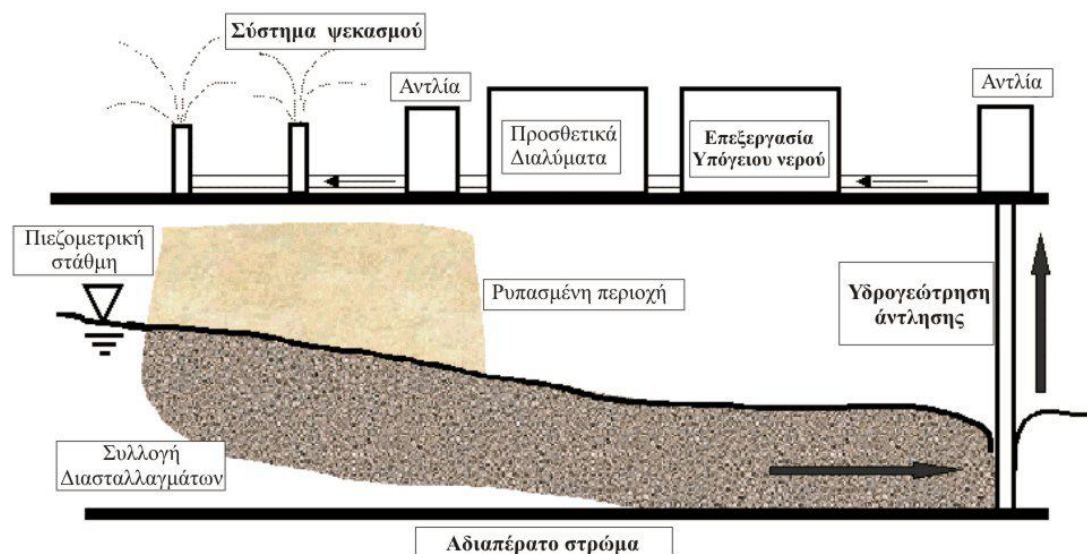


Fig 08 Soil Flushing GR.cdr

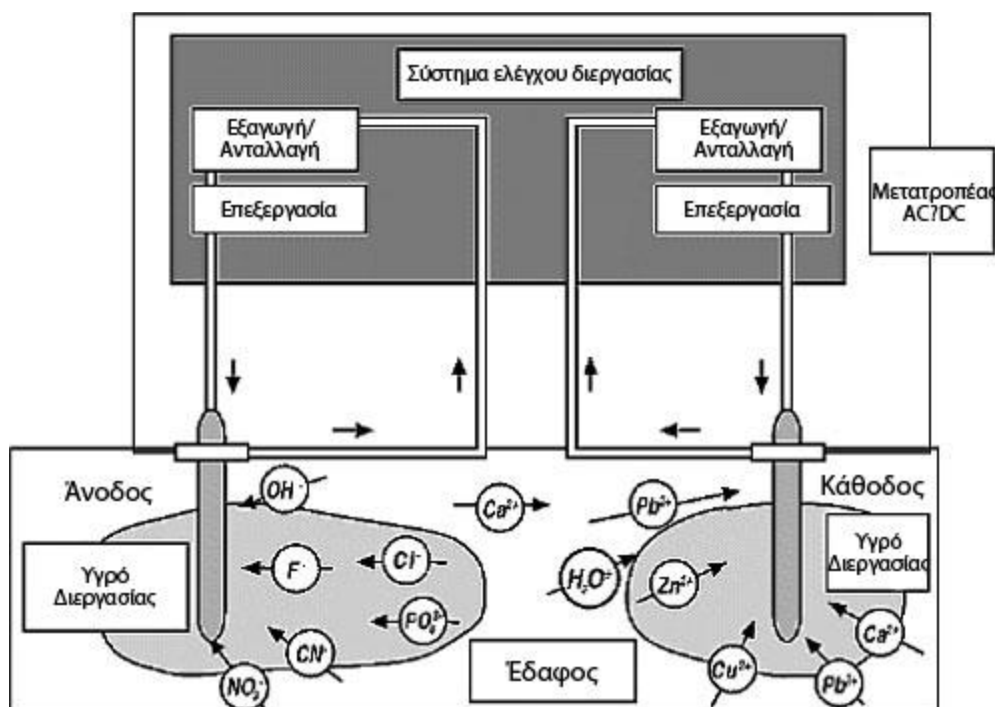
Σχήμα 4.7 Αρχή λειτουργίας της μεθόδου της έκπλυσης του εδάφους [11].

4.3.4 Ηλεκτροκινητική απορρύπανση

Η αρχή λειτουργίας της ηλεκτροκινητικής (Electrokinetics) απορρύπανσης βασίζεται στο γεγονός ότι ρεύμα χαμηλής πυκνότητας θα κινητοποιήσει τις προσμείξεις με τη μορφή φορτισμένων σωματιδίων. Ένα ρεύμα που διέρχεται μεταξύ ηλεκτροδίων μπορεί να προκαλέσει υδατικά μέσα, ιόντα και σωματίδια να κινηθούν μέσω εδάφους, αποβλήτων και νερού.

Κατά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής τοποθετούνται στο έδαφος είτε στο ρυπασμένο μέσο μια σειρά από ηλεκτρόδια σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια, στα οποία εφαρμόζεται χαμηλή τάση (συνήθως 50 έως 150 volts). Στο σχήμα 4.8 απεικονίζεται η αρχή λειτουργίας της τεχνικής της ηλεκτροκινητικής απορρύπανσης εδάφους.

Με το ηλεκτρικό φορτίο στο νερό και τον ρύπο συμβαίνει διαχωρισμός, κίνηση και συσσώρευση των ρύπων προς τα αντίθετα φορτισμένα ηλεκτρόδια. Οι ρύποι στη συνέχεια συλλέγονται μέσω ενός υγρού επεξεργασίας που βρίσκεται στα ηλεκτρόδια. Η συνεχής απομάκρυνση και ανανέωση του υγρού αυτού έχει σαν αποτέλεσμα την απομάκρυνση των ρύπων.



Σχήμα 4.8 Ηλεκτροκινητική απορρύπανση εδάφους [11].

4.3.5 Φυσική εξασθένηση

Στη φυσική εξασθένηση (Natural Attenuation) συμπεριλαμβάνονται διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες, που λαμβάνουν χώρα με φυσικό τρόπο στο υπέδαφος. Οι διεργασίες αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα την εξυγίανση του υπεδάφους (της κορεσμένης, αλλά και της ακόρεστης ζώνης), χωρίς να πραγματοποιείται εγκατάσταση ειδικών συστημάτων από τον άνθρωπο. Το μόνο που χρειάζεται είναι η εγκατάσταση ενός δικτύου παρακολούθησης.

Αυτό το δίκτυο παρακολούθησης, καθώς επίσης και η διεξαγωγή δειγματοληψιών και αναλύσεων σε τακτά χρονικά διαστήματα, είναι ουσιαστικά τα στοιχεία που καθιστούν την φυσική εξασθένηση τεχνολογία εξυγίανσης.

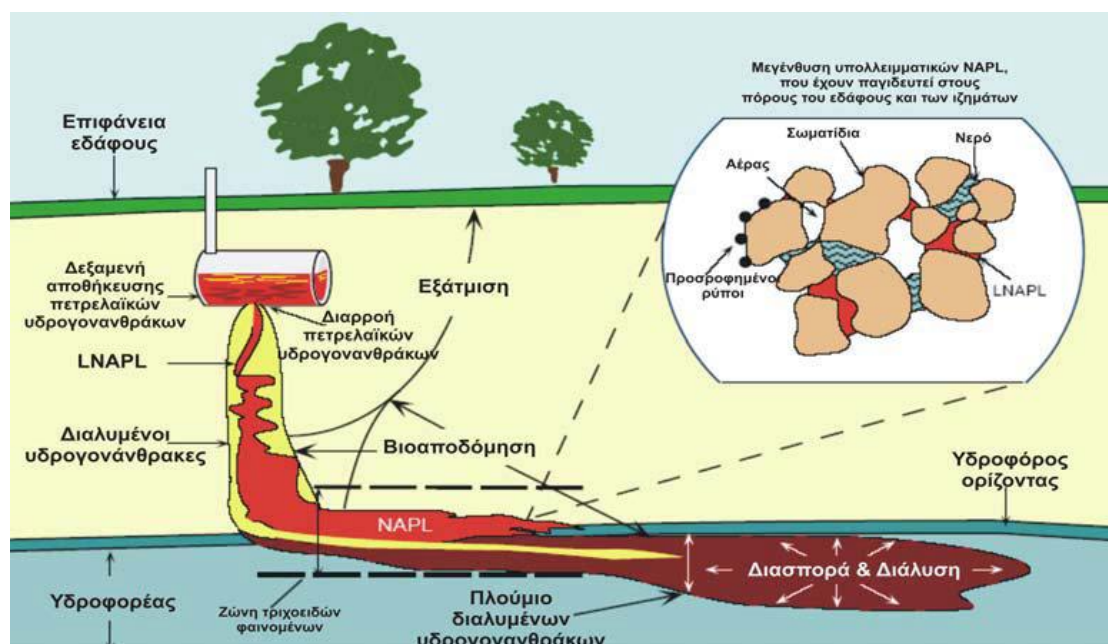
Η συγκεκριμένη «τεχνική» έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος τα τελευταία χρόνια, καθώς γίνεται όλο και καλύτερα αντιληπτό ότι η φύση, σε πολλές περιπτώσεις, μπορεί από μόνη της να εξουδετερώσει, ή πιο σωστά να αφομοιώσει, πολλούς ρύπους, χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης επέμβασης. Είναι άλλωστε προφανές ότι η εφαρμογή οποιασδήποτε τεχνικής απορρύπανσης αποτελεί αφενός επέμβαση φυσικό πεδίο και αφετέρου απαιτεί την κατανάλωση σημαντικών οικονομικών πόρων.

Η φυσική εξασθένηση βασίζεται στην ικανότητα του ίδιου του πεδίου να εξουδετερώσει τους υφιστάμενους ρύπους, μέσω κάποιων φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών, που λαμβάνουν χώρα σε αυτό και είναι δυνατόν να περιλαμβάνουν τις εξής

- βιοαποδόμηση,
- προσρόφηση,
- διασπορά,
- διάχυση,
- διάλυση,
- εξάτμιση,
- υδρόλυση,
- διάφορες χημικές αντιδράσεις,
- χημική ή βιολογική σταθεροποίηση,

Κατά τη φυσική εξασθένηση, οι παραπάνω διεργασίες πραγματοποιούνται υπό ευνοϊκές συνθήκες και έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της μάζας, της τοξικότητας, της κινητικότητας, του όγκου και της συγκέντρωσης των υφιστάμενων ρύπων στο έδαφος ή τα υπόγεια ύδατα.

Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζεται μια κάπως απλοποιημένη αναπαράσταση των διεργασιών που περιλαμβάνει η τεχνική αυτή.



Σχήμα 4.9 Διεργασίες της φυσικής εξασθένισης [11].

4.3.6 Πλύση εδάφους

Η πλύση του εδάφους (soil washing) είναι μία τεχνική φυσικού η/και χημικού διαχωρισμού κατά την οποία γίνεται εκσκαφή και πλύση του εδάφους έτσι ώστε να απομακρυνθούν οι περιεχόμενοι ρύποι. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για την κατεργασία ενός μεγάλου εύρους ανόργανων και οργανικών ρύπων όπως βαρέα μέταλλα, ραδιονουκλίδια, κυανιούχα, αρωματικές ενώσεις, φυτοφάρμακα και πολυχλωριωμένες φαινόλες (PCBs).

Με την τεχνική της πλύσης του εδάφους οι ρύποι απομακρύνονται με τους παρακάτω δύο μηχανισμούς:

1. Συγκεντρώνονται σε μικρότερο όγκο εδάφους, με εφαρμογή τεχνικών επεξεργασίας μεταλλευμάτων.
2. Διαλύονται στο διάλυμα πλύσης.

Στον πρώτο μηχανισμό, τα σωματίδια του καθαρού και του ρυπασμένου εδάφους διαχωρίζονται εξαιτίας των διαφορετικών φυσικών τους ιδιοτήτων, όπως η επιλεκτική τους ρόφηση στα λεπτομερή τεμάχια αργίλου του εδάφους, διαφοροποιήσεις στο ειδικό βάρος, διαφορετικές

μαγνητικές και επιφανειακές ιδιότητές. Έχει αποδειχθεί ότι ένα μεγάλο ποσοστό της ρύπανσης του εδάφους, ιδιαίτερα από οργανικές ενώσεις, σχετίζεται ή συγκρατείται από τα πολύ μικρά (άργιλος και ιλύς) σωματίδια του εδάφους. Έτσι ένας φυσικός διαχωρισμός των μεγάλων σωματιδίων (άμμος και χαλίκια) από την ιλύ, την άργιλο και τα χουμικά υλικά, συγκεντρώνει κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό τους ρύπους.

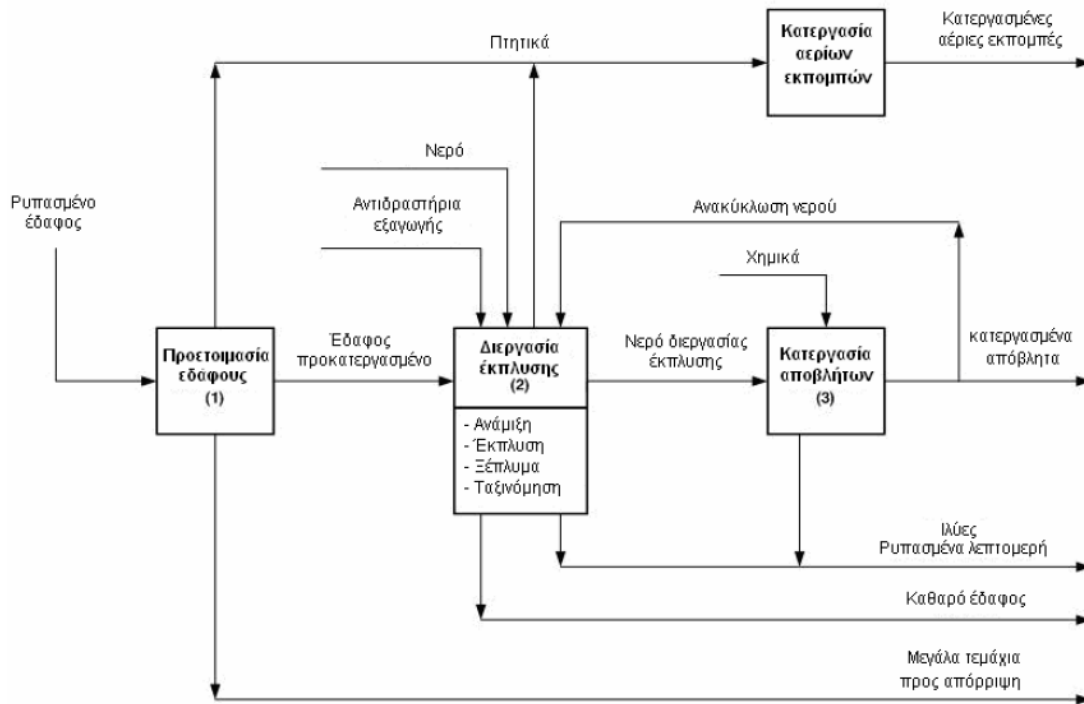
Ο δεύτερος μηχανισμός περιλαμβάνει τη χημική επεξεργασία με τη χρήση νερού ή κατάλληλων χημικών αντιδραστηρίων και στοχεύει στην επιλεκτική εκχύλιση των ρύπων από τα σωματίδια του εδάφους, ή την ολική διαλυτοποίηση των ρυπασμένων σωματιδίων. Η χημική επεξεργασία εφαρμόζεται κυρίως για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων με τη χρήση διαφορετικών αντιδραστηρίων εκχύλισης, όπως ανόργανα οξέα (υδροχλωρικό οξύ, θειϊκό οξύ), οργανικά οξέα (οξικό, γαλακτικό, κιτρικό οξύ), αντιδραστήρια συμπλοκοποίησης όπως EDTA, και Νιτριλο-τριοξικό οξύ (NTA), καθώς επίσης και συνδυασμό αυτών των αντιδραστηρίων.

Στην περίπτωση των οργανικών ρύπων η χρήση αντιδραστηρίων πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή αφού τα αντιδραστήρια αυτά αυξάνουν τη διαλυτότητα των οργανικών ρύπων στα υδατικά διαλύματα.

Η μέθοδος της πλύσης του εδάφους περιλαμβάνει τα παρακάτω κύρια στάδια:

1. Εκσκαφή του εδάφους
2. Κοσκίνισμα για να απομακρυνθούν μεγάλα κομμάτια ξύλου, ρίζες, πέτρες, κ.τ.λ.
3. Εντατική ανάμιξη του ρυπασμένου εδάφους με το υγρό έκπλυσης
4. Διαχωρισμό των καθαρών σωματιδίων εδάφους
5. Επεξεργασία της υδατικής φάσης που περιέχει τους διαλυμένους ή εν αιωρήσει ρύπους.

Ένα τυπικό διάγραμμα ροής της μεθόδου πλύσης του εδάφους παρουσιάζεται στο σχήμα 4.10 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.10 Τυπικό διάγραμμα ροής κυκλώματος πλύσης ρυπασμένων εδαφών [11].

4.3.7 Σταθεροποίηση-Στερεοποίηση

Η στερεοποίηση και η σταθεροποίηση (Solidification, Stabilization) είναι τεχνικές κατεργασίας των ρύπων που έχουν ως στόχο τη μείωση της κινητικότητάς τους. Με τις μεθόδους αυτές οι ρύποι εγκλωβίζονται ή στην καλύτερη περίπτωση ακινητοποιούνται με χημικό ή φυσικό τρόπο μέσα στο έδαφος. Στη σταθεροποίηση-στερεοποίηση χρησιμοποιούνται κατάλληλες ουσίες που ονομάζονται σταθεροποιητικά μέσα. Αυτά εισάγονται στο ρυπασμένο έδαφος και αλληλεπιδρούν με τους ρύπους. Στα αναμενόμενα αποτελέσματα αυτής της αλληλεπίδρασης περιλαμβάνονται:

1. Η μείωση της διαλυτότητας των επικίνδυνων ρύπων μέσω της προσρόφησής τους στο έδαφος ή του σχηματισμού χημικών ενώσεων που είναι δυσδιάλυτες (π.χ. υδροξείδια, ανθρακικά άλατα, πυριτικά άλατα, φωσφορικά άλατα, θειούχες ενώσεις).
2. Ο περιορισμός της επαφής μεταξύ υγρών φάσεων και ρύπων με τη μείωση της διαπερατότητας του υλικού, ή το σχηματισμό ενός κρυστάλλινου, υαλώδους, ή πολυμερούς πλαισίου που περιβάλλει τα σωματίδια του υλικού.
3. Η βελτίωση των φυσικών χαρακτηριστικών των ρυπασμένων πεδίων.

Η στερεοποίηση είναι η διεργασία εκείνη κατά την οποία προστίθενται επαρκείς ποσότητες μέσω στερεοποίησης για να εγκλωβίσουν τα ρυπασμένα εδάφη σε ένα στερεό σώμα υψηλής αντοχής. Ο εγκλωβισμός μπορεί να αφορά μεμονωμένα λεπτομερή ρυπασμένα τεμαχίδια (microencapsulation) είτε μεγάλα μπλοκ ρυπασμένου υλικού (macroencapsulation).

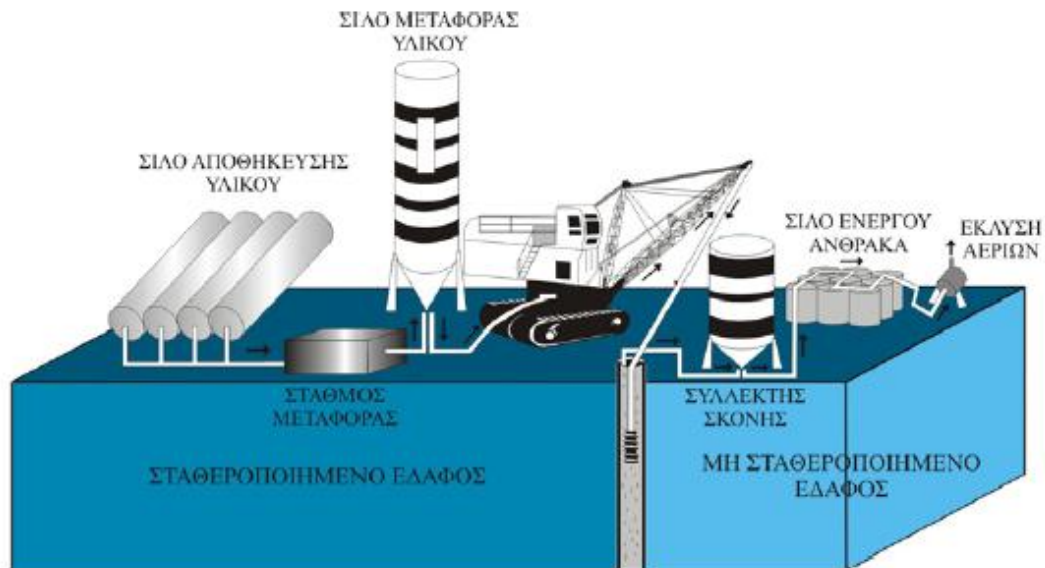
Το στερεό υλικό που προκύπτει ονομάζεται συνήθως 'μονόλιθος' και παρουσιάζει αυξημένη αντοχή και μειωμένη διαπερατότητα. Η στερεοποίηση δεν περιλαμβάνει απαραίτητα και τη χημική αντίδραση μεταξύ των ρύπων και των αντιδραστηρίων στερεοποίησης. Η μετανάστευση ρύπων περιορίζεται με τη μείωση της επιφάνειας που εκτίθεται σε εκχύλιση ή και την απομόνωση του υλικού μέσα σε μια αδιαπέραστη μάζα.

Στη σταθεροποίηση χρησιμοποιούνται πρόσθετες ουσίες για να μειώσουν τον ενδεχόμενο κίνδυνο από ρυπασμένα εδάφη με τη μετατροπή των ρύπων στην ελάχιστα διαλυτή, διαθέσιμη, ή τοξική μορφή τους. Η σταθεροποίηση πρέπει να θεωρηθεί ως η τεχνική εκείνη κατεργασίας που μειώνει το ρυθμό μετανάστευσης των ρύπων στο περιβάλλον σε αποδεκτές τιμές.

Ο όρος στερεοποίηση-σταθεροποίηση χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει και τις δύο τεχνικές. Η ανάμιξη των ρυπασμένων εδαφών με τα σταθεροποιητικά-στερεοποιητικά μέσα μπορεί να γίνει *ex situ*, ή *in-situ* με τη χρήση του κατάλληλου εξοπλισμού.

Για τα ρυπασμένα με μέταλλα ή μεταλλοειδή εδάφη, η σταθεροποίηση αναφέρεται επίσης ως χημική ακινητοποίηση ή επί τόπου αδρανοποίηση και θεωρείται ως πολύ αποτελεσματική εναλλακτική λύση αποκατάστασης χαμηλού κόστους.

Στο σχήμα 4.11 απεικονίζεται ο τρόπος εφαρμογής της *in situ* στερεοποίησης-σταθεροποίησης ρυπασμένων εδαφών.



Σχήμα 4.11 In-situ εφαρμογή της τεχνικής της σταθεροποίησης-στερεοποίησης ρυπασμένων εδαφών [11].

4.4 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

4.4.1 Γενικά

Η θερμική επεξεργασία ρυπασμένων εδαφών έχει ως στόχο την καταστροφή οργανικών κυρίως ρύπων και τη μετατροπή τους σε διοξείδιο του άνθρακα, υδρατμούς και ανόργανα τελικά προϊόντα. Ανάλογα με την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία, επιτυγχάνεται διαφορετικό ποσοστό καταστροφής των υφιστάμενων ρύπων και έκλυση απαερίων διαφορετικής σύστασης. Πολλές φορές είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί θερμότητα όχι για την καταστροφή των εδαφικών ρύπων, αλλά για την εξάτμισή τους και τον φυσικό διαχωρισμό τους από το έδαφος.

Η θερμική επεξεργασία ρυπασμένων εδαφών μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε in-situ είτε ex-situ. Πιο συνηθισμένες όμως στην πράξη είναι οι ex-situ τεχνικές, από τις οποίες οι σημαντικότερες είναι η αποτέφρωση, η πυρόλυση και η θερμική εκρόφηση. Η πιο σημαντική in-situ τεχνική είναι η θέρμανση με ηλεκτρική αντίσταση.

In situ

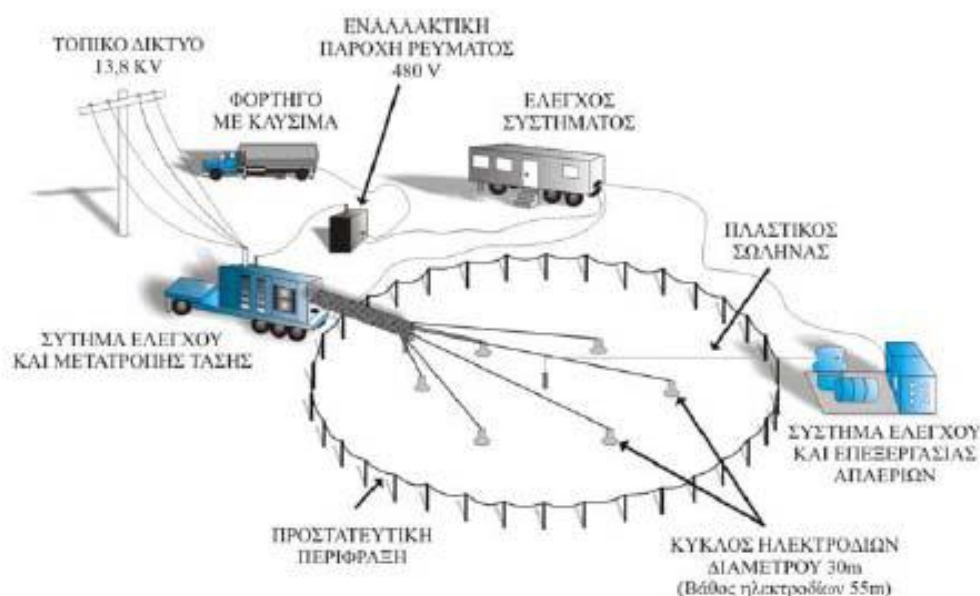
- Θέρμανση με ηλεκτρική αντίσταση (Electrical Resistance Heating)

Ex situ

- Αποτέφρωση (Incineration)
- Πυρόλυση (Pyrolysis)
- Θερμική Εκρόφηση (Thermal Desorption)

4.4.2 Θέρμανση με Ηλεκτρική Αντίσταση

Ο πιο κοινός τρόπος θέρμανσης των εδαφών είναι η διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος. Έτσι λόγω φαινομένου Joule προκαλείται αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους (Electrical Resistance Heating). Η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία αφενός ξηραίνει το έδαφος, δημιουργώντας ρωγμές και αυξάνοντας το πορώδες και τη διαπερατότητά του και αφετέρου προκαλεί την εξάτμιση των ρύπων. Οι ατμοί που προκύπτουν μπορούν να συλλεχθούν από κατάλληλα πηγάδια άντλησης.



Σχήμα 4.12 Τυπική διάταξη ενός συστήματος θέρμανσης με ηλεκτρική αντίσταση [11].

Κατά την εφαρμογή της θέρμανσης με ηλεκτρική αντίσταση, ρεύμα χαμηλής έντασης διοχετεύεται σε έξι ηλεκτρόδια στο ρυπασμένο έδαφος σε κυκλική διάταξη, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12. Η αύξηση της θερμοκρασίας ενισχύει την εξάτμιση των ρύπων, αλλά παράλληλα προκαλεί τη δημιουργία ενός ρεύματος υδρατμών, το οποίο συμβάλει στην απομάκρυνσή τους λόγω του φαινομένου της εκφύσησης (stripping).

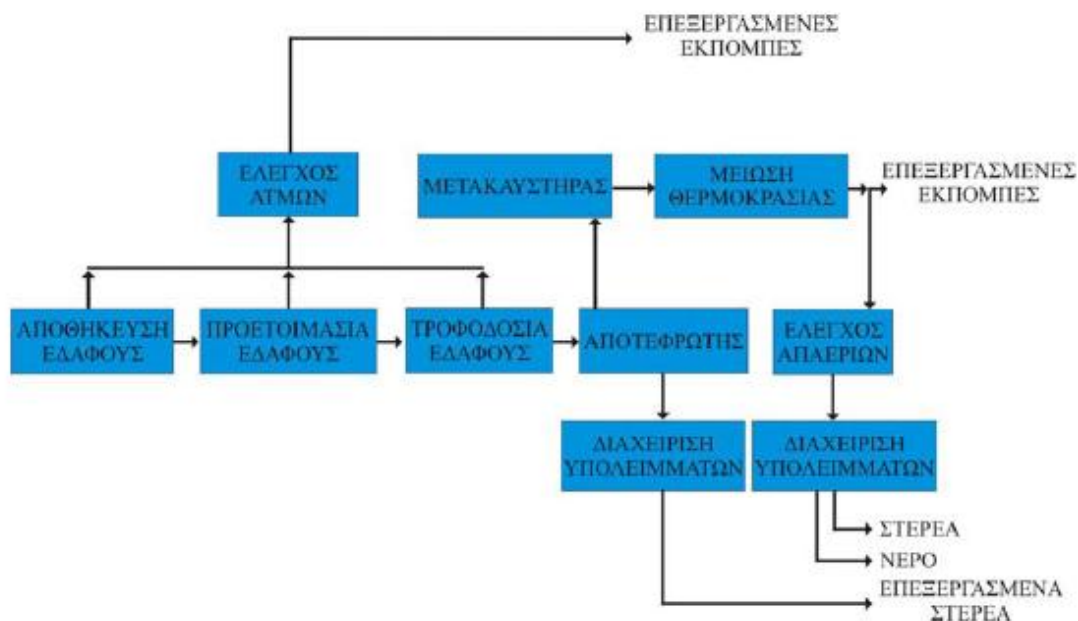
4.4.3 Αποτέφρωση

Η αποτέφρωση (Incineration) διενεργείται σε υψηλές θερμοκρασίες (870 έως 1200 °C) για να εξατμίσει και να κάψει, παρουσία οξυγόνου, οργανικές ενώσεις που περιέχονται σε επικίνδυνα απόβλητα. Συνήθως χρησιμοποιούνται βοηθητικά καύσιμα είτε για την έναρξη είτε για τη διατήρηση της καύσης.

Η διεργασία της αποτέφρωσης, της οποίας το διάγραμμα ροής φαίνεται στο σχήμα 4.13, περιλαμβάνει την κατάλληλη προετοιμασία (π.χ. απομάκρυνση ογκωδών αντικειμένων) και την καύση του προς επεξεργασία εδάφους σε υψηλές θερμοκρασίες, παρουσία επαρκούς οξυγόνου, με στόχο την θερμική αποσύνθεση των οργανικών ρύπων που περιέχει, μέσω πυροδιάσπασης ή οξειδωσης. Οι οργανικοί ρύποι μετατρέπονται κυρίως σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό, ενώ παράλληλα παράγονται ως παραπροϊόντα και άλλες ενώσεις, όπως οξείδια του αζώτου και του θείου, αμμωνία, υδροχλώριο κ.ά.

Τα αέρια, που παράγονται από την αποτέφρωση ρυπασμένων εδαφών, απαιτούν ειδική επεξεργασία για την απομάκρυνση των στερεών σωματιδίων, καθώς επίσης και την εξουδετέρωση των περιεχόμενων επικίνδυνων ρύπων. Για την απομάκρυνση των στερεών σωματιδίων συνήθως χρησιμοποιούνται σακκόφιλτρα και ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές, ενώ για την απομάκρυνση των όξινων αερίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλυντηρίδες.

Ανάλογη επεξεργασία απαιτείται συνήθως και για την παραγόμενη στάχτη, η οποία μπορεί να περιέχει ανόργανους ρύπους, όπως π.χ. βαρέα μέταλλα, που δεν μπορούν να απομακρυνθούν ή να καταστραφούν με την αποτέφρωση.



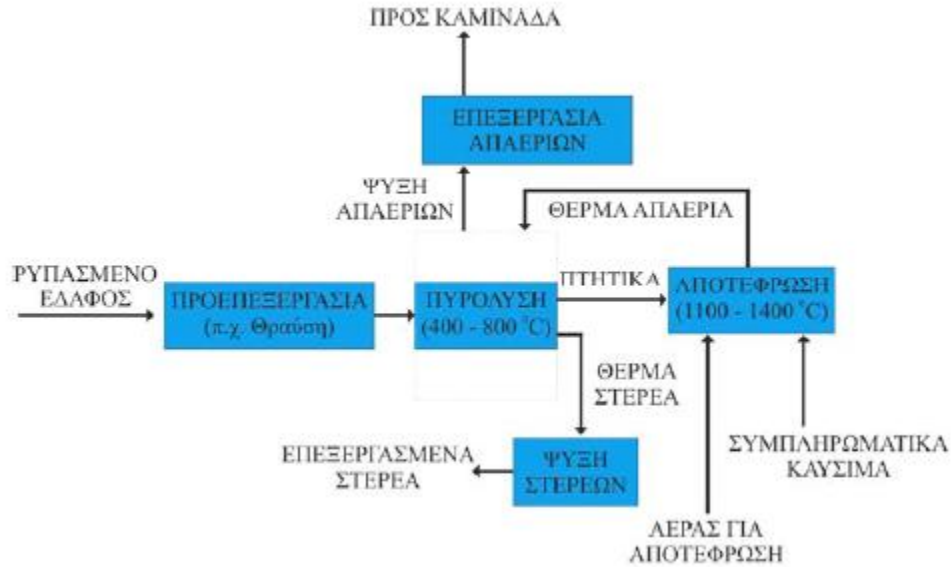
Σχήμα 4.13 Διάγραμμα ροής τυπικής διεργασίας αποτέφρωσης ρυπασμένων εδαφών [11].

4.4.4 Πυρόλυση

Η πυρόλυση (Pyrolysis) είναι η θερμική αποδόμηση οργανικών ρύπων, απουσία οξυγόνου. Στην πράξη, κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης δεν απουσιάζει τελείως το οξυγόνο, αλλά μπορεί να υπάρχει σε ποσότητα μικρότερη από την απαιτούμενη από τη στοιχειομετρία.

Η πυρόλυση συμβαίνει υπό πίεση και σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 430°C, ενώ τα τελικά προϊόντα περιλαμβάνουν καύσιμα αέρια συστατικά (π.χ. CO, CH₄, H₂, κ.ά.), μικρές ποσότητες υγρών και ένα στερεό υπόλειμμα, που αποτελείται από άνθρακα και τέφρα.

Στο σχήμα 4.14 απεικονίζεται ένα διάγραμμα ροής τυπικής διεργασίας πυρόλυσης ρυπασμένων εδαφών.



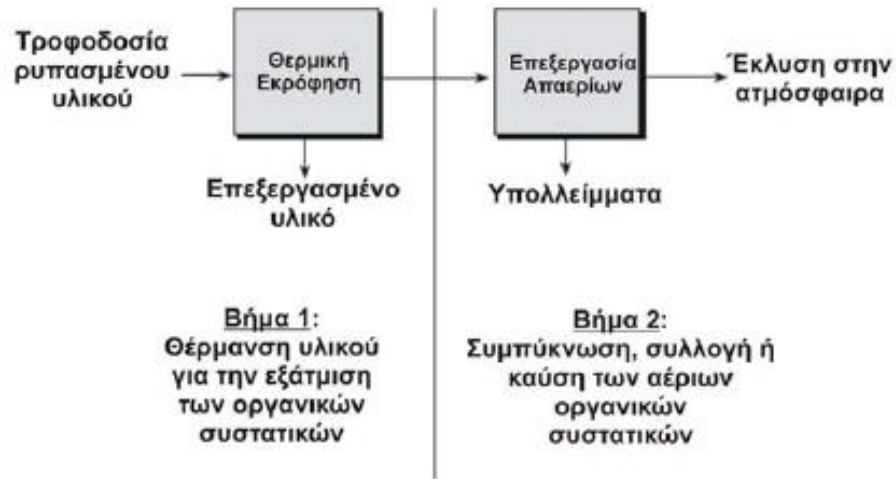
Σχήμα 4.14 Διάγραμμα ροής τυπικής διεργασίας πυρόλυσης ρυπασμένων εδαφών.

4.4.5 Θερμική Εκρόφηση

Στη μέθοδο της θερμικής εκρόφησης (Thermal desorption), που είναι μια *ex situ* τεχνολογία απορρύπανσης, τα απόβλητα θερμαίνονται, μέχρι να εξατμιστούν οι οργανικοί ρύποι και το νερό. Με βάση την θερμοκρασία λειτουργίας οι διεργασίες αυτές διαχωρίζονται σε δύο ομάδες:

- υψηλή θερμοκρασία θερμικής εκρόφησης (320 - 560° C)
- χαμηλή θερμοκρασία θερμικής εκρόφησης (90 έως 320 °C).

Στόχος της τεχνικής αυτής είναι η εξάτμιση του περιεχόμενου νερού και των οργανικών ρύπων, οι οποίοι στη συνέχεια οδηγούνται σε ειδικό σύστημα επεξεργασίας αερίων (σχήμα 4.15). Η θερμοκρασία και ο χρόνος παραμονής σε συστήματα θερμικής εκρόφησης επιλέγονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται εξάτμιση και όχι οξείδωση των οργανικών ρύπων.



Σχήμα 4.15 Διάγραμμα ροής τυπικής διεργασίας θερμικής εκρόφησης ρυπασμένων εδαφών [11].

5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στις περιπτώσεις ρύπανσης κορεσμένων εδαφών η αποκατάστασή του εδάφους και η αποκατάσταση των υπόγειων υδάτων είναι αλληλένδετες μεταξύ τους. Όπως και στην περίπτωση των ακόρεστων εδαφών οι τεχνικές αποκατάστασης διακρίνονται σε *in situ* και *ex situ* τεχνικές. Οι μέθοδοι αποκατάστασης κορεσμένων εδαφών και υπόγειων υδάτων είναι οι εξής:

In situ

- Βιοαναρρόφηση (Bioslurping)
- Αεροδιασπορά (Air Sparging)
- Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα (Permeable Reactive Barriers)

Ex situ

- Αεροδιαχωρισμός (Air Stripping)
- Άντληση και επεξεργασία (Pump and Treat)

In situ / Ex situ

- Χημική οξείδωση / αναγωγή (Chemical Oxidation / Reduction)

Στις επόμενες ενότητες θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τις μεθόδους αυτές.

5.2 ΒΙΟΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗ

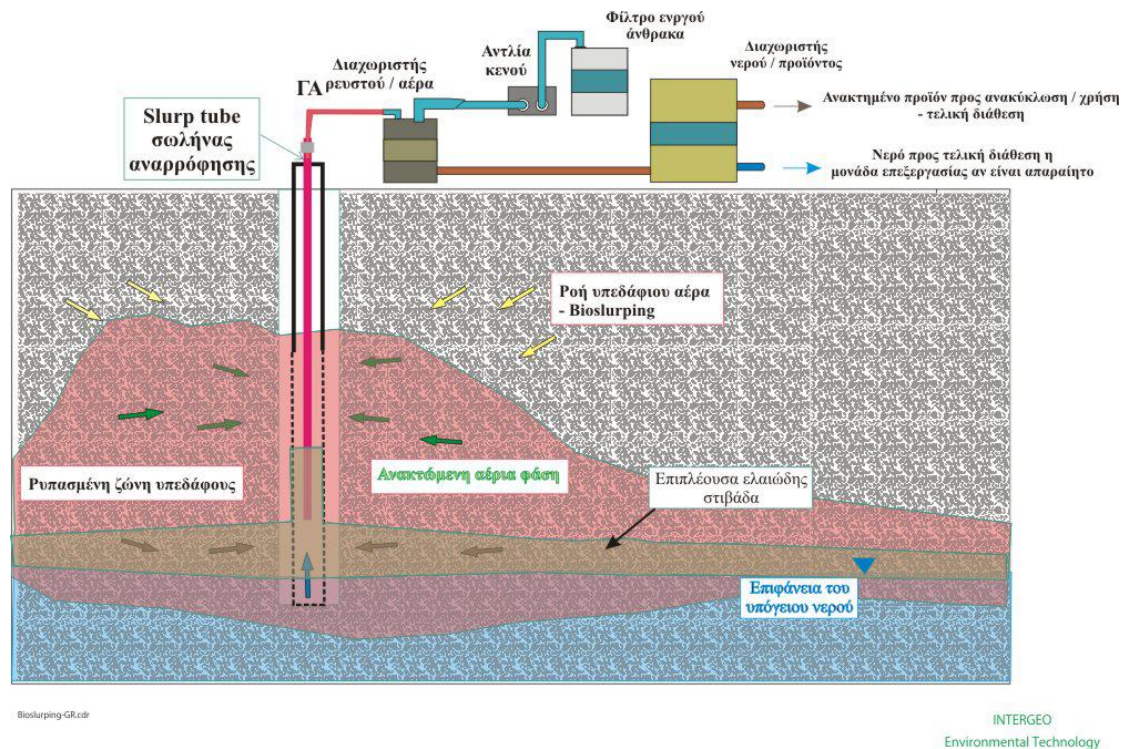
Η διεργασία της βιοαναρρόφησης (Bioslurping) χρησιμοποιείται για τη ανάκτηση ποσοτήτων ελαιωδών ουσιών που επιπλέουν στον υπόγειο υδροφόρο. Ο σκοπός αυτός επιτυγχάνεται με την κατά το δυνατόν μικρότερη άντληση υπόγειου νερού (σχήμα 5.1), ενώ παράλληλα με τις τεχνολογίες της άντλησης του εδαφικού αέρα και του βιοαερισμού της ακόρεστης ζώνης ενισχύεται η βιοαποδόμηση πτητικών οργανικών ρύπων.

Η βασική εφαρμογή της τεχνικής της βιοαναρρόφησης είναι η απομάκρυνση ελαφρών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (LNAPL), οι οποίοι είναι συσσωρευμένοι στην επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα υπό τη μορφή ελεύθερης ελαιώδους φάσης. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ειδικές γεωτρήσεις, οι οποίες διαθέτουν διάτρητο περίβλημα στο ύψος του υδροφόρου ορίζοντα, δηλαδή εκεί που συσσωρεύεται η ελεύθερη ελαιώδης φάση.

Τα συστήματα της βιοαναρρόφησης χρησιμοποιούν εναλλασσόμενους κύκλους άντλησης της ελαιώδους φάσης και του εδαφικού αέρα, διατηρώντας με αυτόν τον τρόπο σταθερή την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Αρχικά πραγματοποιείται αναρρόφηση ελαιώδους φάσης και νερού. Καθώς οι υφιστάμενες ποσότητες των ελαιωδών ουσιών μειώνονται, πραγματοποιείται άντληση του εδαφικού αέρα. Η ασκούμενη υποπίεση επηρεάζει πλέον την ακόρεστη ζώνη του υπεδάφους, προκαλώντας τον εμπλουτισμό της με ατμοσφαιρικό αέρα, ο οποίος παρέχει επαρκείς ποσότητες οξυγόνου για την ενίσχυση της βιοαποδόμησης των πτητικών ρύπων.

Μετά από κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το πάχος της ελεύθερης ελαιώδους φάσης αυξάνεται ξανά, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται άντληση της και ορισμένων ποσοτήτων υπόγειου νερού. Η ασκούμενη υποπίεση αναπτύσσει μεγαλύτερη δύναμη για την άντληση της ελαιώδους φάσης, από ότι οι συνηθισμένες τεχνολογίες άντλησης χωρίς κενό. Ως αποτέλεσμα, η ελεύθερη φάση συσσωρεύεται γύρω από το πηγάδι βιοαναρρόφησης, εξασφαλίζοντας μέγιστη απόδοση ανάκτησης. Η κίνηση της ελαιώδους φάσης πραγματοποιείται κυρίως οριζόντια, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερους ρυθμούς άντλησης και αποτρέποντας την εμφάνιση προβλημάτων εξάπλωσής τους στο έδαφος.

Ένα πρόβλημα βέβαια που παρουσιάζεται είναι ότι υπάρχει ανάμιξη του ρύπου με το νερό και γι αυτό στην επιφάνεια πρέπει να υπάρχει ειδική διάταξη για το διαχωρισμό τους.

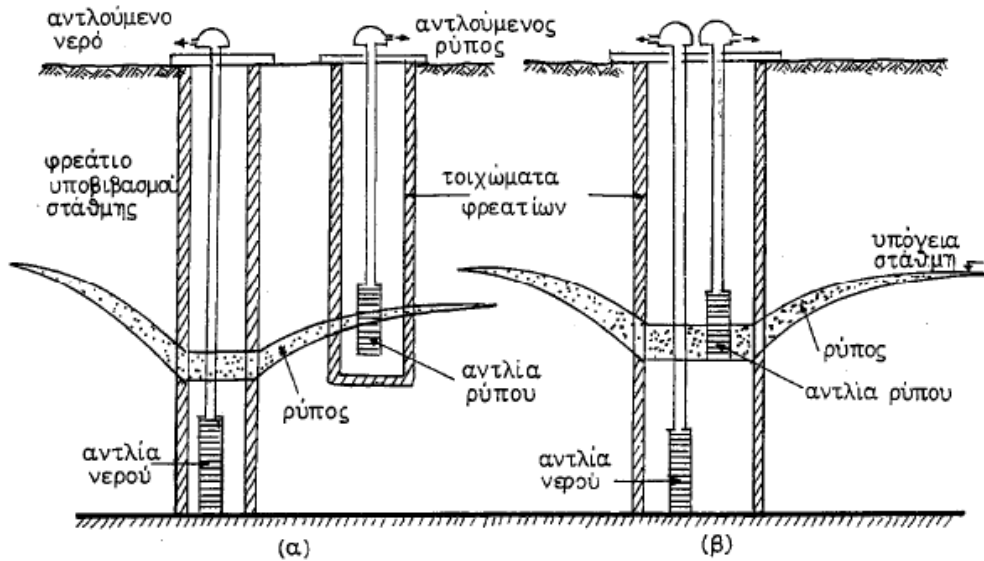


Σχήμα 5.1 Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής της βιοαναρρόφησης για την ανάκτηση της ελαιώδους στιβάδας [11].

Ένα άλλο σύστημα άντλησης μπορεί να αποτελείται από δύο φρεάτια που έχουν ανοιχτεί σε πολύ κοντινή απόσταση. Με τη μία αντλία που βρίσκεται βαθύτερα από την υπόγεια στάθμη, όπου επιπλέον ο οργανικός ρύπος επιτυγχάνεται υποβιβασμός της υπόγειας στάθμης και δημιουργία του απαραίτητου κώνου για την κίνηση του υγρού ρύπου προς το φρεάτιο. Στο άλλο φρεάτιο με την άλλη αντλία που βρίσκεται στην περιοχή της υπόγεια στάθμης αντλείται ο υγρός ρύπος.

Το ίδιο αποτέλεσμα μπορεί να επιτευχθεί αν στο ίδιο φρεάτιο υπάρχουν δύο αντλίες η μία για την άντληση του νερού από βαθύτερα και τον υποβιβασμό της υπόγειας στάθμης και η άλλη για την άντληση του ρύπου. Οι δύο αυτές τεχνικές απεικονίζονται στα σχήματα 5.2α και 5.2β.

Η λειτουργία των συστημάτων άντλησης απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή για αυτό πρέπει να γίνεται συνεχής καταγραφή του βάθους της υπόγειας στάθμης και να ελέγχεται το βάθος της αντλίας του ρύπου, με ένα πλωτήρα.



Σχήμα 5.2 Εναλλακτικές διατάξεις άντλησης
 (α) με δύο φρεάτια και δύο αντλίες του επιπλέοντος ρύπου στην υπόγεια
 στάθμη και
 (β) με ένα φρεάτιο και δύο αντλίες [1].

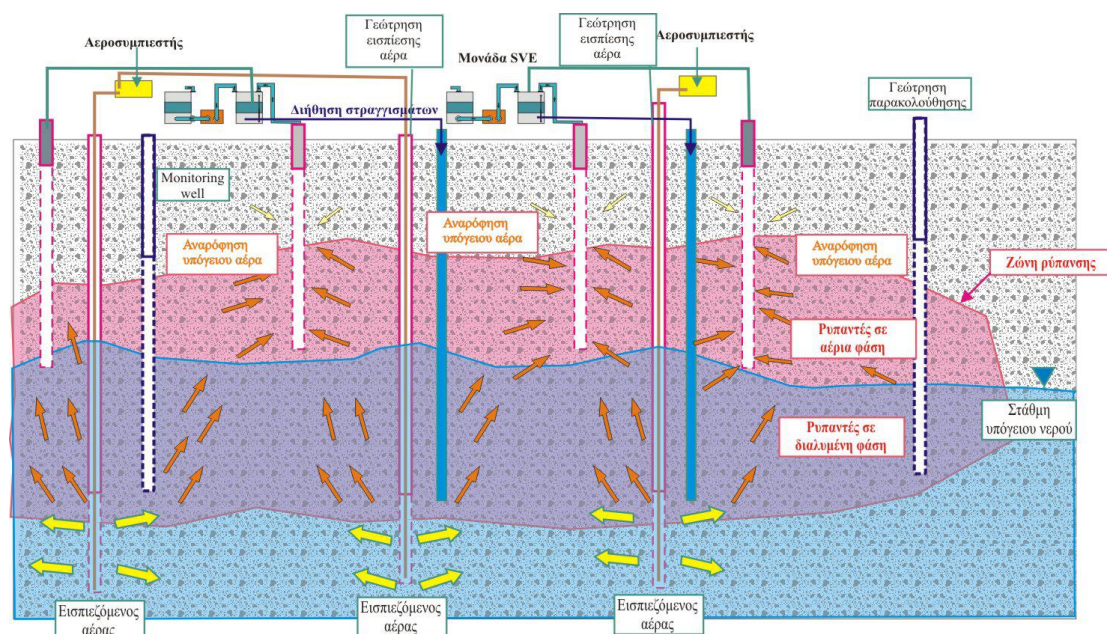
5.3 ΑΕΡΟΔΙΑΣΠΟΡΑ

Η τεχνική της αεροδιασποράς (Air Sparging) αφορά στη διοχέτευση αέρα μέσα στην κορεσμένη ζώνη του υπεδάφους, με στόχο την εξάτμιση των υφιστάμενων ρύπων και την ενίσχυση της βιοαποικοδόμησής τους (σχήμα 5.3). Λόγω της εισαγωγής αέρα στο υπέδαφος και της εξάτμισης των ρύπων, στις περισσότερες εφαρμογές κρίνεται αναγκαία η απομάκρυνσή τους από την ακόρεστη ζώνη, με εφαρμογή της τεχνολογίας άντλησης εδαφικού αέρα.

Η βασική αρχή στην οποία στηρίζεται η λειτουργία ενός συστήματος αεροδιασποράς είναι η εξής: ο συμπιεσμένος αέρας ωθείται μέσα από μια κατάλληλα διαμορφωμένη γεώτρηση και ρέει ακτινικά προς τα έξω και προς τα πάνω, μέσα στην κορεσμένη ζώνη του εδάφους. Καθώς οι φυσαλίδες αέρα κινούνται μέσα στο υπέδαφος, τα πτητικά συστατικά που είναι διαλυμένα στο υπόγειο νερό ή προσροφημένα στην επιφάνεια των κόκκων του εδάφους, εξατμίζονται και παρασύρονται στην ακόρεστη ζώνη μαζί με τις φυσαλίδες του αέρα. Η εισαγωγή αέρα αυξάνει παράλληλα τις συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου στο υπέδαφος, γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του ρυθμού οξειδωσης των βιοαποικοδομήσιμων ουσιών, σε διατάραξη των κόκκων

του εδάφους, καθώς και σε αύξηση της πιθανότητας διάλυσης και εξάτμισης των DNAPL.

Ο πρωτεύοντας στόχος της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η εξάτμιση και ο δευτερεύων στοχος είναι η βιοαποδόμηση των υφιστάμενων ρύπων. Επομένως, απευθύνεται κατά κύριο λόγο σε πτητικούς ρύπους. Αν γίνει αντιστροφή της προτεραιότητας αυτών των στόχων, τότε ουσιαστικά γίνεται λόγος για την τεχνολογία βιοδιασποράς (biosparging), η οποία έχει τα ίδια βασικά χαρακτηριστικά με την αεροδιασπορά, αλλά η εισαγωγή του αέρα στο υπέδαφος γίνεται σε παροχή και πίεση, σχετικά μικρή, κατάλληλη για την ενίσχυση της βιοαποδόμησης των ρύπων και όχι την εξάτμισή τους. Επομένως, απευθύνεται κατά κύριο λόγο σε βιοαποικοδομήσιμους ρύπους. Οι ουσιαστικές διαφορές μεταξύ των δυο τεχνολογιών είναι ελάχιστες, καθώς μόνο παράμετροι μεγέθους (π.χ. παροχή αέρα, άρα και μέγεθος αεροσυμπιεστή) είναι τα στοιχεία που κυρίως αλλάζουν στα αντίστοιχα συστήματά τους.

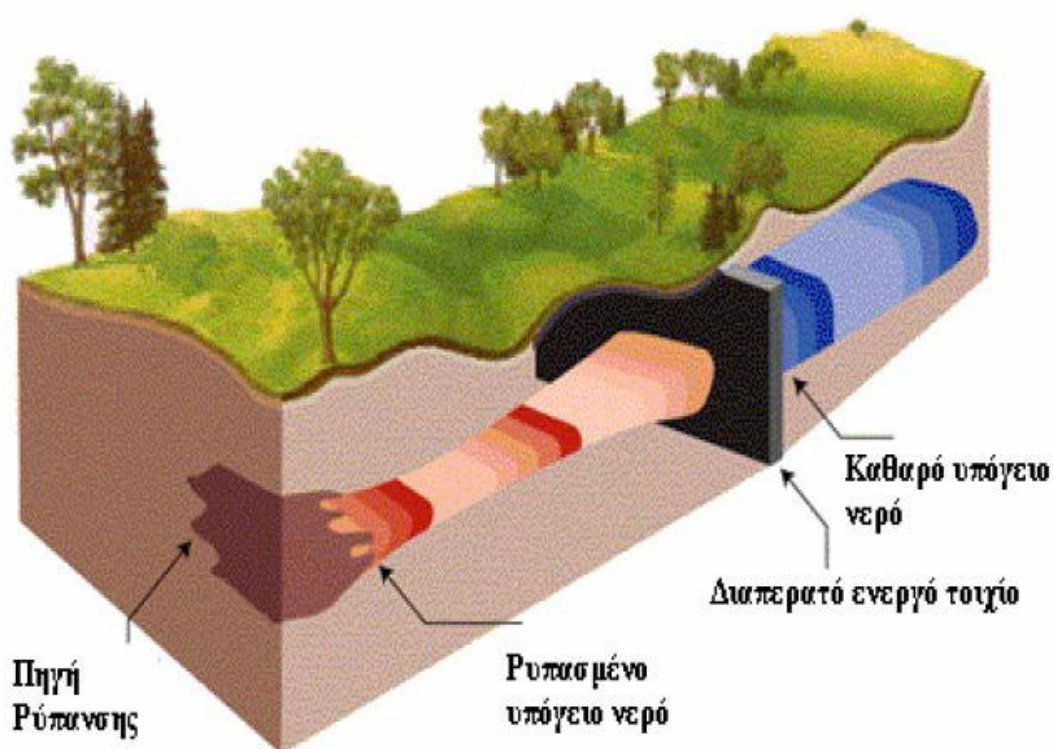


Σχήμα 5.3 Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής της αεροδιασποράς [11].

5.4 ΔΙΑΠΕΡΑΤΑ ΕΝΕΡΓΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ

Ένα διαπερατό ενεργό φράγμα (Permeable Reactive Barrier) περιλαμβάνει μια ζώνη επεξεργασίας η οποία κατασκευάζεται και τοποθετείται στο υπέδαφος με στόχο τον καθαρισμό εκχυλισμάτων και

ρυπασμένων υδάτων όταν διέρχονται μέσα από αυτή. Οι διαπερατοί ενεργοί φραγμοί πρέπει να έχουν ελάχιστη επίδραση στον ρυθμό ροής του ρυπασμένου ύδατος και αυτό επιτυγχάνεται με την κατασκευή μιας διαπερατής ενεργής ζώνης ή ενός διαπερατού ενεργού κελιού το οποίο περιβάλλεται από χαμηλής διαπερατότητας φραγμούς με στόχο την ώθηση των ρυπαντών προς την ενεργή ζώνη επεξεργασίας. Είναι παθητικά συστήματα επεξεργασίας τα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την διαχείριση της επικινδυνότητας ακόμη και σε ακραίες καταστάσεις ρύπανσης. Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται σχηματικά η λειτουργία ενός διαπερατού ενεργού φράγματος.



Σχήμα 5.4 Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας ενός διαπερατού ενεργού φράγματος [11].

Τα κυριότερα συστήματα διαπερατών ενεργών φραγμάτων ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους είναι τα συστήματα χοάνης-πύλης (που μπορεί να περιλαμβάνουν και περισσότερες από μια πύλες) και συνεχούς διαπερατού φραγμού. Ανάλογα με τα ενεργά υλικά που χρησιμοποιούνται ενεργοποιούνται διάφοροι γεωχημικοί μηχανισμοί οι οποίοι συμβάλλουν στον καθαρισμό των εκχυλισμάτων και των ρυπασμένων υδάτων. Τέτοιοι μηχανισμοί είναι η διάβρωση του σιδήρου,

οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, η ρόφηση (όταν τα πληρωτικά υλικά είναι ενεργός άνθρακας, ζεόλιθοι ή τροποποιημένες άργιλοι) και η καταβύθιση.

Οι φάσεις που καταβυθίζονται γεμίζουν σταδιακά τους πόρους του συστήματος μειώνοντας έτσι την αντιδραστικότητα των ενεργών υλικών, τη διαπερατότητα του μέσου και τελικά την ενεργή διάρκεια ζωής των συστημάτων αυτών.

Το πρώτο σύστημα επιτρέπει σε αρκετές περιπτώσεις αποτελεσματικότερο εγκλωβισμό των ρύπων. Στην περίπτωση κατά την οποία η ροή του υπογείου ύδατος είναι ετερογενής, το σύστημα χοάνης-πύλης μπορεί να εγκατασταθεί σε περισσότερο διαπερατές περιοχές. Οι διαπερατοί ενεργοί φραγμοί θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο όταν θεωρούνται ως η βέλτιστη τεχνολογία ως προς τους συγκεκριμένους ρύπους. Ο σχεδιασμός, η λειτουργία, η παρακολούθηση και η αντικατάστασή τους θα πρέπει να γίνονται με βάση συγκεκριμένες προδιαγραφές. Ο προσδιορισμός των διαστάσεων προκύπτει με βάση εργαστηριακές δοκιμές λαμβάνοντας φυσικά υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς κάθε περίπτωσης ρύπανσης εδάφους.

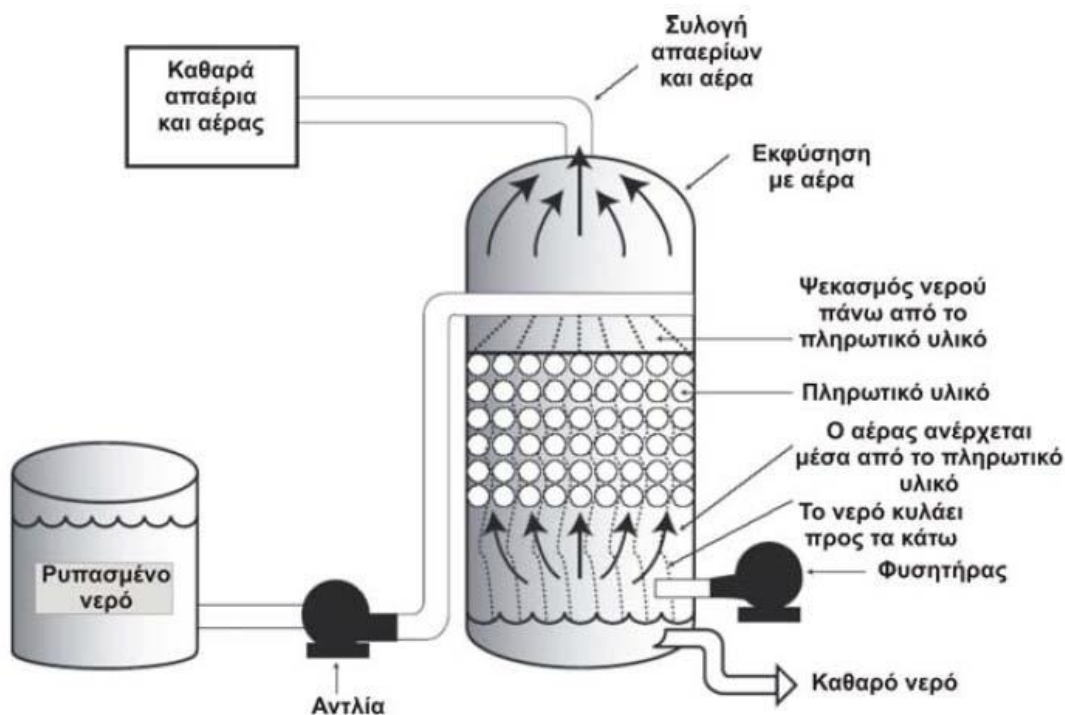
5.5 ΑΕΡΟΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ

Ο αεροδιαχωρισμός (air stripping) είναι μια διεργασία, η οποία ενισχύει την εξάτμιση διαφόρων συστατικών από την υγρή φάση (υπόγειο νερό) στην αέρια (αέρα), μέσω διέλευσης αέρα μέσα από το υπό επεξεργασία νερό (σχήμα 5.5). Η συγκεκριμένη τεχνολογία εφαρμόζεται για την επεξεργασία υπογείου νερού, που έχει ήδη απομακρυνθεί από το υπέδαφος μέσω άντλησης και έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική και οικονομική στην απομάκρυνση πτητικών οργανικών ρύπων από υπόγεια ύδατα με σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις (κάτω από 200mg/L).

Η τεχνική του αεροδιαχωρισμού βασίζεται στην πτητικότητα διαφόρων ρύπων, οι οποίοι όταν βρίσκονται μέσα σε μια υδατική φάση με κατάλληλη υποβοήθηση (π.χ. παροχή αέρα) είναι δυνατόν να εξατμιστούν και έτσι να διαχωριστούν από αυτήν (π.χ. το υπόγειο νερό). Στη συνέχεια, οι αέριοι πλέον ρύποι συλλέγονται και επεξεργάζονται κατάλληλα με μια από τις διαθέσιμες τεχνολογίες επεξεργασίας απαερίων (π.χ. προσρόφηση σε άνθρακα, καύση, κ.ά.).

Γενικά, η εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι σχετικά απλή, εφαρμόζεται σε ειδικές μονάδες *ex situ*, υπό πλήρως ελεγχόμενες συνθήκες και βασίζεται σε μια πολύ απλή διεργασία, όπως είναι αυτή της εξάτμισης.

Οι ρύποι, που μπορούν να αντιμετωπιστούν με επιτυχία από την τεχνική του αεροδιαχωρισμού είναι κυρίως πτητικά και ημι-πτητικά οργανικά συστατικά όπως για παράδειγμα: ΒΤΕΧ, τριχλωροαιθυλένιο, βινυλοχλωρίδιο, χλωροβενζόλιο, ναφθαλένιο, τετραχλωράνθρακας, κ.ά. Από την άλλη μεριά η τεχνολογία αυτή δεν μπορεί να αντιμετωπίσει ρύπους που δεν παρουσιάζουν σημαντική πτητικότητα, όπως μέταλλα και PCB.



Σχήμα 5.5 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου του αεροδιαχωρισμού [11].

5.6 ΑΝΤΛΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Η αποκατάσταση ρυπασμένων υδροφορέων με άντληση και υπέργεια επεξεργασία του υπόγειου νερού (Pump and Treat) αποτέλεσε για πολλά χρόνια τη μοναδική εφαρμοζόμενη τεχνολογία εξυγίανσης. Βάσει αυτής, το ρυπασμένο υπόγειο νερό μεταφέρεται στην επιφάνεια του εδάφους (μέσω κατάλληλων γεωτρήσεων άντλησης), όπου επεξεργάζεται και στη συνέχεια επανατοποθετείται στο υπέδαφος (σχήμα 5.6) ή καταλήγει σε επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες, επιτυγχάνοντας ικανοποιητικό βαθμό εξυγίανσης και ταυτόχρονο περιορισμό της εξάπλωσης της ήδη υπάρχουσας ρύπανσης.

Η τεχνολογία άντλησης και επεξεργασίας μπορεί να σχεδιαστεί και να εφαρμοστεί με δύο στόχους:

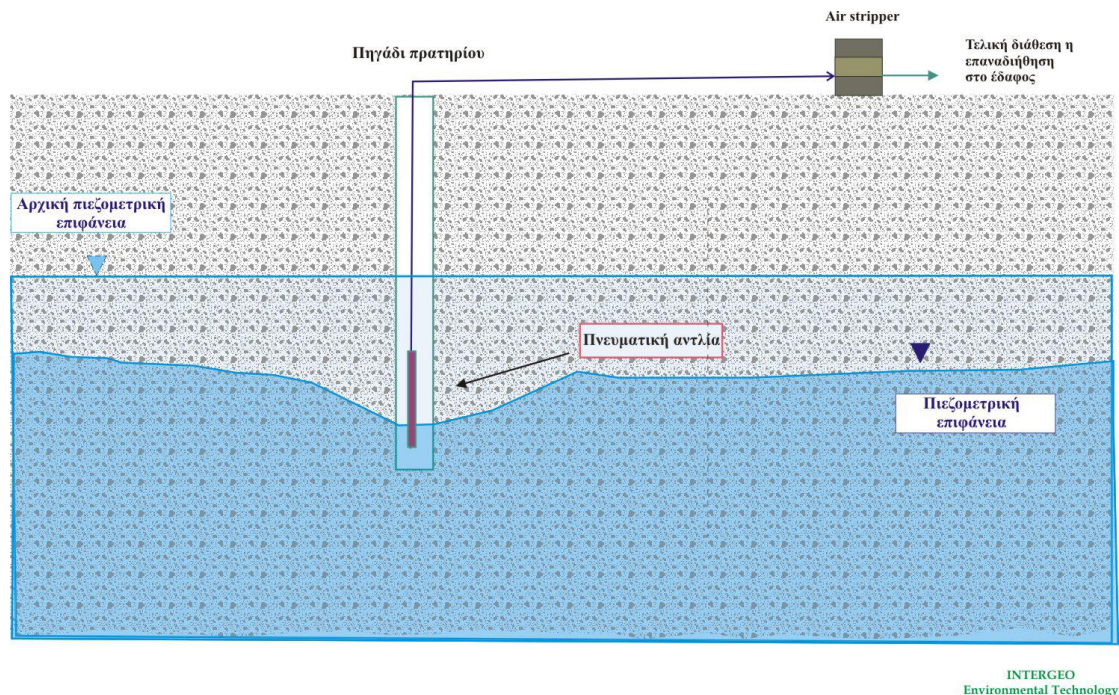
- Περιορισμό του υφιστάμενου πλούμιου ρύπανσης (για την αποτροπή της εξάπλωσής του ή της μεταφοράς του σε κάποιον ευαίσθητο κοντινό αποδέκτη).
- Εξυγίανση του υπόγειου υδροφορέα (απομάκρυνση των υφιστάμενων ρύπων και επίτευξη των μέγιστων τουλάχιστον επιτρεπτών νομοθετικά συγκεντρώσεων).

Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούνται γεωτρήσεις άντλησης και διοχέτευσης νερού στον υπόγειο υδροφορέα, με στόχο τον έλεγχο και την αλλαγή της κατεύθυνσης της υπόγειας ροής, έτσι ώστε να αποτραπεί η εξάπλωση του υπάρχοντος πλουμίου ρύπανσης. Οι ρυθμοί άντλησης του υπόγειου νερού είναι γενικά χαμηλοί και συχνά χρησιμοποιούνται φράγματα, ανάντη ή κατάντη της πηγής ρύπανσης, για ακόμη μεγαλύτερο περιορισμό του υπάρχοντος πλουμίου.

Η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμογής της τεχνολογίας άντλησης και επεξεργασίας εφαρμόζεται κυρίως σε περιπτώσεις, που η αρχική πηγή ρύπανσης δεν μπορεί να απομακρυνθεί (π.χ. ΧΥΤΑ) και η εξάπλωση των υφιστάμενων ρύπων μέσα στο υπέδαφος είναι γενικά αργή, λόγω των επικρατούντων υδρογεωλογικών και γεωχημικών συνθηκών.

Στη δεύτερη περίπτωση, στόχος των χρησιμοποιούμενων γεωτρήσεων άντλησης είναι η απομάκρυνση όσο το δυνατόν μεγαλύτερων ποσοτήτων νερού, προκειμένου να επεξεργαστούν και να διοχετευτούν ξανά στον υδροφορέα. Οι ρυθμοί άντλησης είναι μεγάλοι και απαιτείται η εγκατάσταση ειδικής μονάδας επεξεργασίας του αντλούμενου νερού.

Ο σχεδιασμός τέτοιου είδους συστημάτων άντλησης και επεξεργασίας είναι αρκετά πολύπλοκος, καθώς προϋποθέτει πολύ καλή γνώση των επικρατούντων υδρογεωλογικών συνθηκών του προς εξυγίανση πεδίου. Η ροή του υπόγειου νερού και η έκταση της ρύπανσης είναι μόνο μερικές από τις βασικές παραμέτρους, που πρέπει να προσδιοριστούν με λεπτομέρεια πριν προχωρήσουμε στο σχεδιασμό και στην εφαρμογή της τεχνικής.

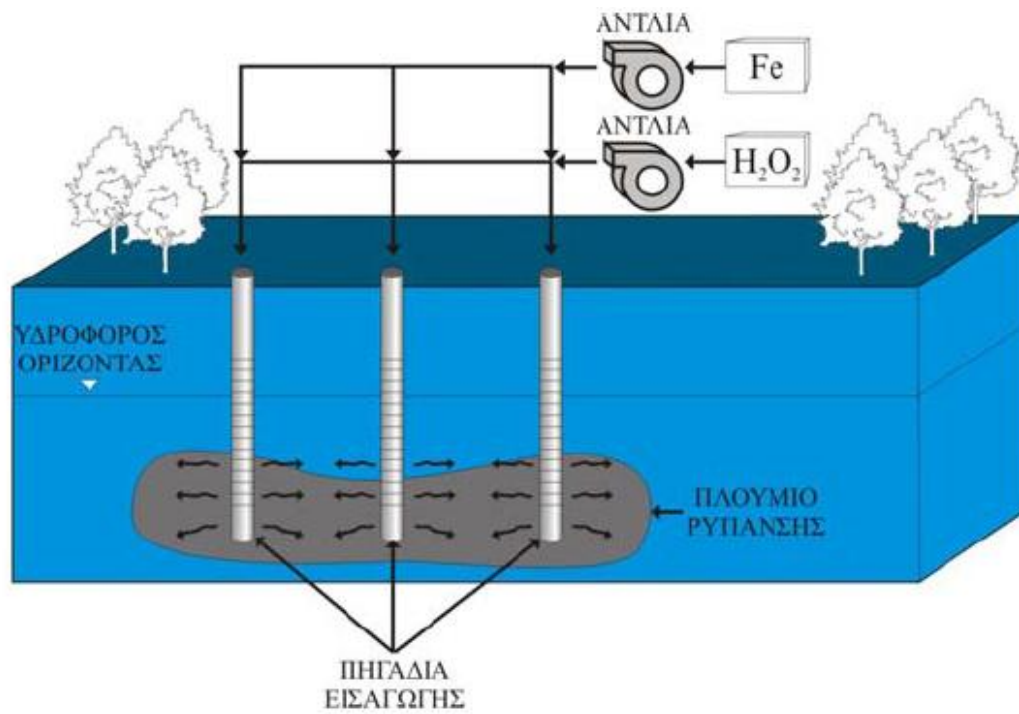


Σχήμα 5.6 Σύστημα απορρύπανσης του υπόγειου νερού με την τεχνική άντλησης και επεξεργασίας [11].

5.7 ΧΗΜΙΚΗ ΟΞΕΙΔΩΣΗ / ΑΝΑΓΩΓΗ

Η χημική οξείδωση / αναγωγή αφορά συνήθως σε αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, οι οποίες μετατρέπουν τους επικίνδυνους ρύπους σε ενώσεις ακίνδυνες, λιγότερο τοξικές, περισσότερο σταθερές, με μικρότερη κινητικότητα, ή αδρανείς. Κατά τις αντιδράσεις οξειδοαναγωγής ηλεκτρόνια μιας ουσίας μεταφέρονται σε άλλη. Πιο συγκεκριμένα η μια αντιδρούσα ουσία οξειδώνεται (χάνει ηλεκτρόνια) και η άλλη αντιδρούσα ουσία ανάγεται (κερδίζει ηλεκτρόνια).

Οι οξειδωτικοί παράγοντες που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των ρύπων στο έδαφος περιλαμβάνουν όζον, υπεροξείδιο του υδρογόνου, υποχλωριώδη, υπερμαγγανικό κάλιο, το αντιδραστήριο Fenton (υπεροξείδιο του υδρογόνου και σίδηρος) (σχήμα 5.7), χλώριο και διοξείδιο του χλωρίου. Αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί *in situ* ή *ex situ* σε εδάφη, λάσπες, ιζήματα, και σε άλλα στερεά, όπως επίσης και στα υπόγεια νερά. Η χημική επεξεργασία μπορεί επίσης να περιλαμβάνει και τη χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας (UV).



Σχήμα 5.7 In-Situ εφαρμογή των AOPs για την εξυγίανση υπογείων υδάτων με χρήση αντιδραστηρίου Fenton [11].

6. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ανάλυση και η αξιολόγηση των εναλλακτικών τρόπων αντιμετώπισης ενός προβλήματος εδαφικής ρύπανσης βασίζεται στα δεδομένα που συγκεντρώνονται κατά τον περιβαλλοντικό έλεγχο που όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Ο σκοπός της αξιολόγησης των διαφόρων λύσεων είναι να προσδιοριστούν αυτές, οι οποίες ανταποκρίνονται καλύτερα στους στόχους απορρύπανσης ενός συγκεκριμένου ρυπασμένου πεδίου. Θα πρέπει να εξεταστεί ποιες τεχνολογίες είναι εφαρμόσιμες και αποδοτικές για το συγκεκριμένο πεδίο. Επίσης θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί που τίθενται από τον οικονομικό προϋπολογισμό και ακόμη να διατηρηθεί ένα πρόγραμμα εργασίας, ώστε το έργο της αποκατάστασης να καταστεί οικονομικά βιώσιμο.

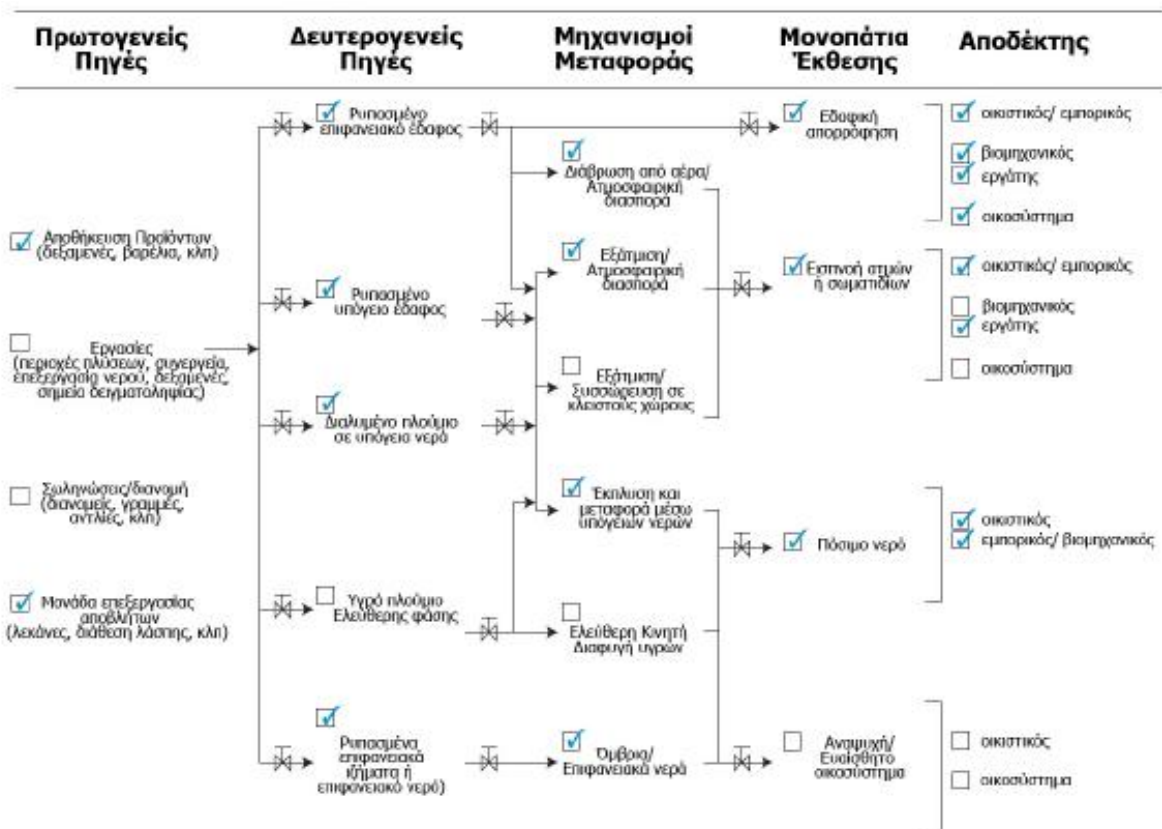
Η επιλογή της προτεινόμενης λύσης θα πρέπει να γίνει αφού πρώτα ληφθούν υπόψη οι παρακάτω παράμετροι του προβλήματος [6, 11]:

1. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του ρύπου.
2. Έκταση της υφιστάμενης ρύπανσης.
3. Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της κορεσμένης και ακόρεστης ζώνης καθώς και υδραυλική επικοινωνία με το δυνητικό αποδέκτη.
4. Διεύθυνση και ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού.
5. Διεθνείς πρακτικές για την εφαρμογή τεχνολογιών απορρύπανσης σε αντίστοιχες περιπτώσεις.
6. Εμπειρίες από εφαρμογή τεχνολογιών απορρύπανσης και ιδιαίτερα σε παρεμφερείς ή όμοιες υδρογεωλογικές συνθήκες στην Ελλάδα.
7. Τον υφιστάμενο περιβαλλοντικό κίνδυνο της ρύπανσης σε συνδυασμό με την πιθανή επαφή του χώρου με ευαίσθητο αποδέκτη.
8. Οικονομικοτεχνικές συνθήκες.

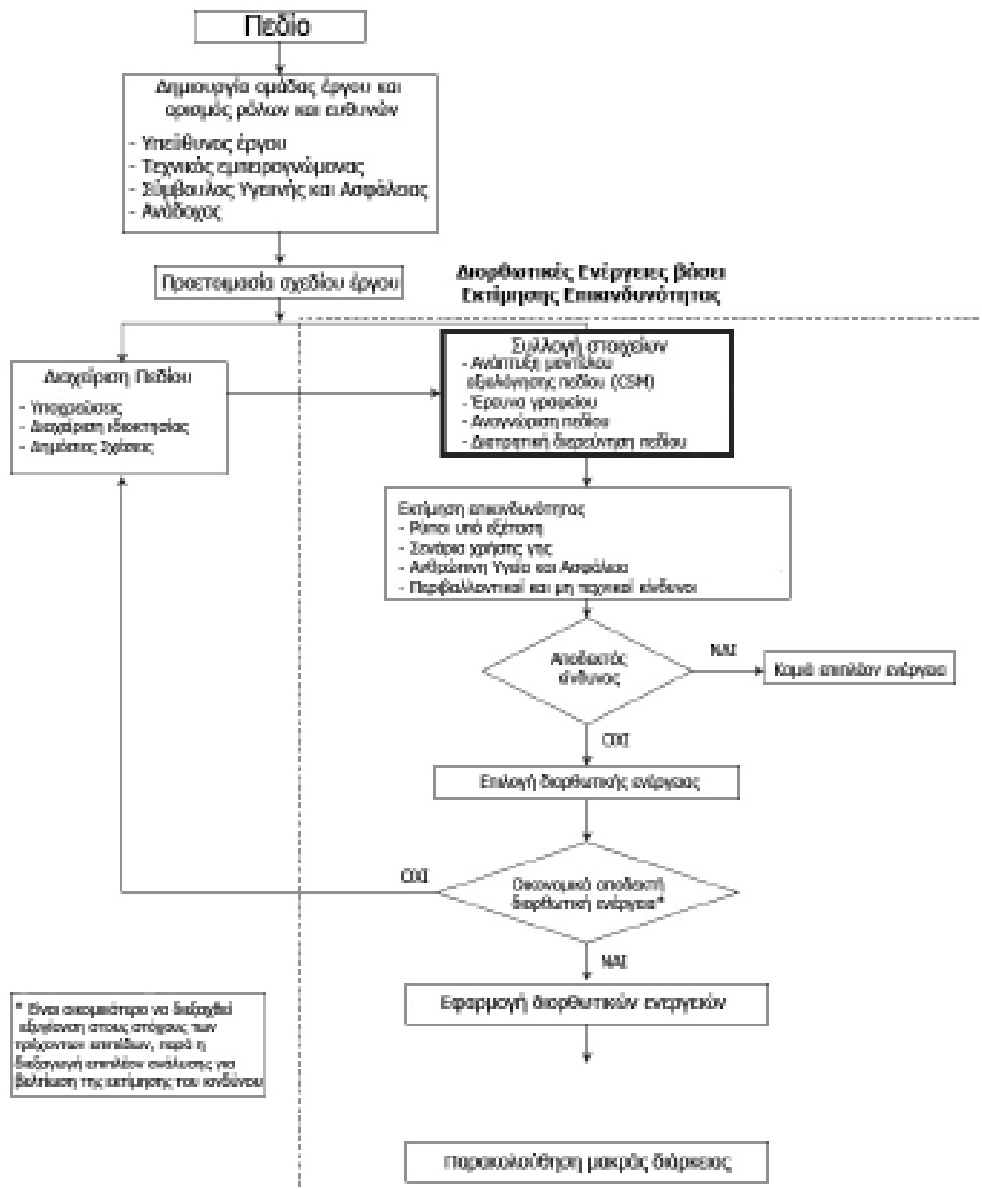
9. Τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εφαρμογή των συγκεκριμένων τεχνολογιών και τρόπους αντιμετώπισής τους.
10. Την εφαρμογή τεχνολογίας με όσο το δυνατόν λιγότερες τεχνικές και κατασκευαστικές παρεμβάσεις και έργα σε περίπτωση ύπαρξης υπόγειων εγκαταστάσεων που συνιστούν ιδιαίτερη προσοχή και περιορισμό των κινήσεων.
11. Την απλότητα της μεθόδου και τη διαθεσιμότητα της αντίστοιχης τεχνολογίας.
12. Το κόστος επένδυσης και την ευκολία συντήρησης.
13. Την ασφάλεια κατά τη λειτουργία της μεθόδου απορρύπανσης.

6.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ

Στο σχήμα 6.1 δίνεται ένα τυπικό διάγραμμα ροής βάσει του οποίου γίνεται η αξιολόγηση ενός ρυπασμένου πεδίου. Στο σχήμα 6.2 παρατίθεται ένα διάγραμμα ροής το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της επικινδυνότητας του πεδίου.

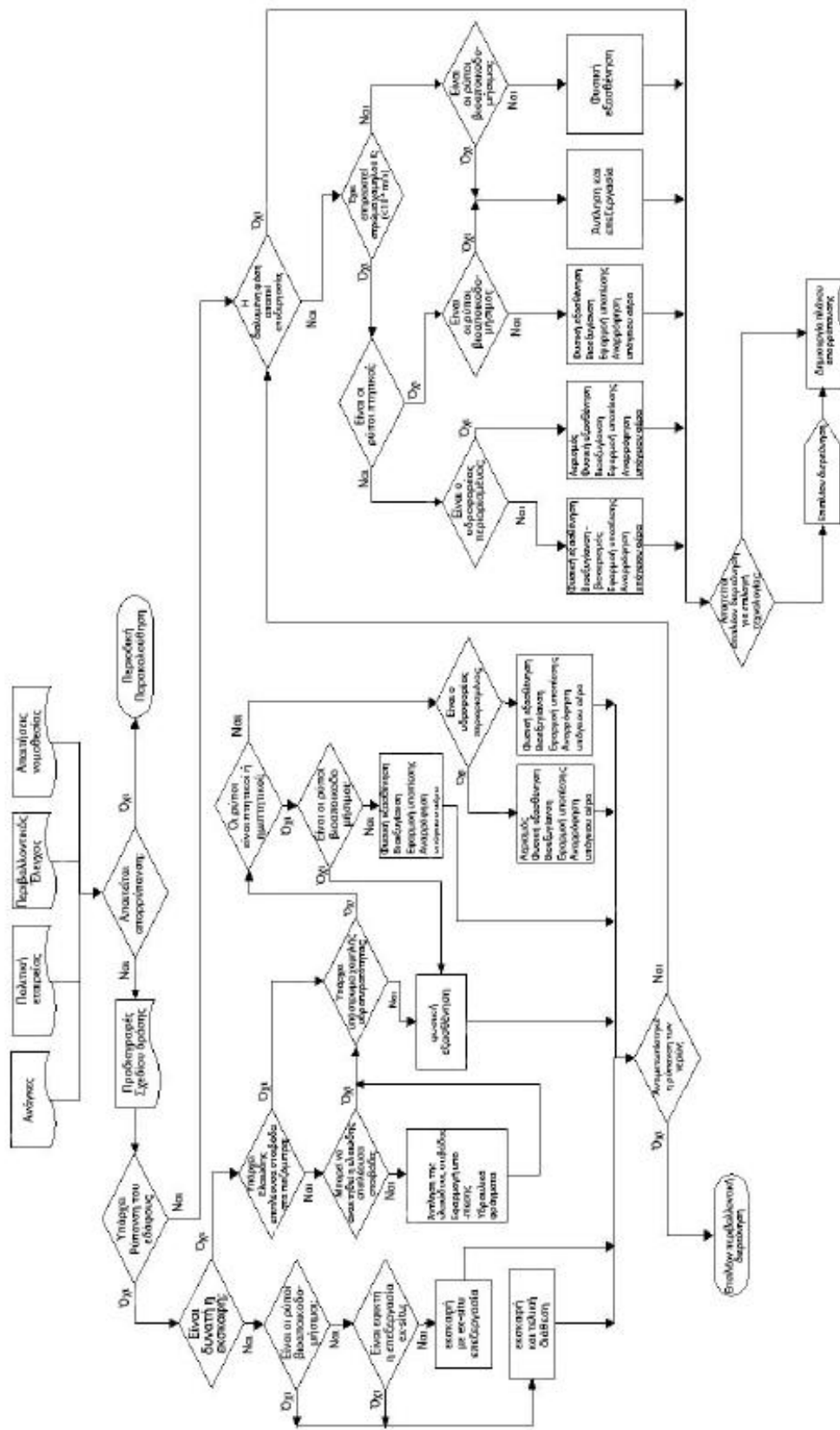


Σχήμα 6.1 Διάγραμμα ροής για την αξιολόγηση ενός ρυπασμένου πεδίου [6].



Σχήμα 6.2 Διάγραμμα ροής για την εκτίμηση της επικινδυνότητας ενός πεδίου [6].

Στο διάγραμμα του σχήματος 6.3 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα ροής, σαν αυτά που συνήθως χρησιμοποιούνται στην πράξη, το οποίο ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του ρυπασμένου πεδίου, έχει ως στόχο να δώσει κατευθυντήριες γραμμές για την επιλογή των κατάλληλων τεχνολογιών απορρύπανσης. Το διάγραμμα ροής χρησιμοποιείται για την επιλογή λύσης τόσο για το έδαφος (το οποίο αναφέρεται ως δευτερογενής πηγή ρύπανσης) όσο και για τα υπόγεια νερά ειδικά για την περίπτωση απορρύπανσης από οργανικούς ρύπους.



Σχήμα 6.3 Διάγραμμα ροής για την επιλογή των κατάλληλων τεχνικών απορρύπανσης [11].

6.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ

Η σύγκριση των τεχνικών απορρύπανσης δεν είναι μία εύκολη υπόθεση. Προφανώς δεν υπάρχει καλύτερη και χειρότερη μέθοδος. Για την τελική επιλογή της κατάλληλης μεθόδου σε μια συγκεκριμένη περίπτωση πρέπει να ληφθούν υπόψη πάρα πολλές παράμετροι όπως αναφέρθηκε ήδη.

Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι, γενικά, σε καμία περίπτωση ρύπανσης υπεδάφους μια και μόνο τεχνική απορρύπανσης δεν μπορεί να εξυγιάνει εξολοκλήρου ένα ρυπασμένο πεδίο. Συνήθως συνδυάζονται περισσότερες από μία τεχνικές οι οποίες ανάλογα με την περίπτωση εφαρμόζονται διαδοχικά ή ταυτόχρονα σε μια ρυπασμένη περιοχή. Γι' αυτό το λόγο πολύ συχνά αναφερόμαστε σε μια ακολουθία μέτρων απορρύπανσης (treatment train).

Γενικά οι in situ και οι ex situ τεχνικές έχουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα [10]:

In situ τεχνικές

Πλεονεκτήματα:

1. Προκαλούν την μικρότερη δυνατή διαταραχή του περιβάλλοντος επί του οποίου εφαρμόζεται
2. Η εφαρμογή τους μπορεί να είναι άμεση χωρίς καθυστερήσεις για εκσκαφή και μεταφορά του εδάφους
3. Δεν δημιουργούν επιπρόσθετο κόστος και κίνδυνο για τον εργαζόμενο από την μεταφορά του ρυπασμένου υποστρώματος

Μειονεκτήματα:

1. Απαιτούν αναλυτικό χαρακτηρισμό της περιοχής στην οποία εφαρμόζεται
2. Απαιτούν σημαντικό εργατικό δυναμικό
3. Δυσκολίες στον έλεγχο των περιβαλλοντικών συνθηκών που επηρεάζουν την μικροβιακή δραστηριότητα

Ex situ τεχνικές

Πλεονεκτήματα:

1. Ο έλεγχος των περιβαλλοντικών συνθηκών και της αποτελεσματικότητας της μεθόδου είναι εύκολος και άμεσος
2. Η προσθήκη εξωγενών μικροοργανισμών είναι πιο εύκολη και ασφαλής

3. Ταχύτερες διεργασίες από τις *in situ* μεθόδους

Μειονεκτήματα:

1. Αυξημένο κόστος λόγω κόστους μεταφοράς και υψηλότερων απαιτήσεων για χρήση γης
2. Αυξημένος κίνδυνος δευτερογενούς ρύπανσης κατά την διάρκεια μεταφοράς των ρυπασμένων εδαφών ή άλλων περιβαλλοντικών υποστρωμάτων

Στον πίνακα 6.1 περιέχονται πληροφορίες σχετικά με τις διαθέσιμες τεχνολογίες απορρύπανσης αναφορικά με το είδος της ρύπανσης.

Πίνακας 6.1 Τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών ανάλογα με το είδος των ρύπων και αποτελεσματικότητα αποκατάστασης ανά κατηγορία ρύπου (για όποιες τεχνολογίες υπάρχουν δεδομένα) (USEPA, 2005, Federal Remediation Technologies Roundtable, 2011) [11]

	Αλογομένοι VOCs	Μη Αλογομένοι VOCs	Αλογομένοι SVOCs	Μη Αλογομένοι SVOCs	Καύσιμα	Μέταλλα
Στερεοποίηση/Σταθεροποίηση (solidification/stabilization)	Κάτω του μετρίου	Κάτω του μετρίου	Μέτρια	Μέτρια	Κάτω του μετρίου	Άνω του μετρίου
Θέρμανση με ηλεκτρική αντίσταση (Electrical Resistance Heating)	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Κάτω του μετρίου
Αποτέφρωση (incineration)	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Κάτω του μετρίου
Πυρόλυση (Pyrolysis)	Μέτρια	Μέτρια	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Μέτρια	Κάτω του μετρίου
Θερμική εκρόφηση (thermal desorption)	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Κάτω του μετρίου
Βιοαναρρόφηση (Bioslurping)	Μέτρια	Μέτρια	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Μέτρια
Αεροδιασπορά (Air Sparging)	Μέτρια	Άνω του μετρίου	Μέτρια	Μέτρια	Άνω του μετρίου	Κάτω του μετρίου
Διαπερατά Ενεργά Φράγματα (Permeable Reactive Barriers)	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Μέτρια	Εξαρτάται από την περίπτωση
Αεροδιαχωρισμός (Air Stripping)	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Κάτω του μετρίου	Κάτω του μετρίου	Κάτω του μετρίου	Κάτω του μετρίου
Άντληση και επεξεργασία (Pump and Treat)	Μέτρια	Μέτρια	Εξαρτάται από την περίπτωση	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια
Χημική οξείδωση / αναγωγή (chemical oxidation / reduction)	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Κάτω του μετρίου	Κάτω του μετρίου	Εξαρτάται από την περίπτωση

	Αλογομένοι VOCs	Μη Αλογομένοι VOCs	Αλογομένοι SVOCs	Μη Αλογομένοι SVOCs	Καύσιμα	Μέταλλα
Βιοαερισμός (bioventing)	Εξαρτάται από την περίπτωση	Άνω του μετρίου	Κάτω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Κάτω του μετρίου
Φυτοεξυγίανση (phytoremediation)	Μέτρια	Μέτρια	Εξαρτάται από την περίπτωση	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια
Τεχνική αγροκαλλιέργειας (Landfarming)	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Κάτω του μετρίου
Επεξεργασία σε σωρούς (Biopiles)	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Εξαρτάται από την περίπτωση	Μέτρια	Άνω του μετρίου	Εξαρτάται από την περίπτωση
Βιοαντιδραστήρες (Bioreactors)	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Εξαρτάται από την περίπτωση	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Κάτω του μετρίου
Άντληση εδαφικού αέρα (soil vapor extraction)	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Κάτω του μετρίου	Κάτω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Κάτω του μετρίου
Έκπλυση εδάφους (soil flushing)	Άνω του μετρίου	Άνω του μετρίου	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Άνω του μετρίου
Ηλεκτροκινητική απορρύπανση (electrokinetics)	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Κάτω του μετρίου	Άνω του μετρίου
Πλύση εδάφους (soil washing)	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια

Υπόμνημα

Άνω του μετρίου: Η αποτελεσματικότητα αποδείχθηκε πιλοτικά ή σε ευρεία κλίμακα

Μέτρια: Περιορισμένη αποτελεσματικότητα σε πιλοτικό επίπεδο ή ευρεία κλίμακα

Κάτω του μετρίου: Δεν αποδείχθηκε αποτελεσματικότητα σε πιλοτικό επίπεδο ή ευρεία κλίμακα

VOCs: Volatile Organic Compounds, Πτητικές Οργανικές Ενώσεις

SVOCs: Semi Volatile Organic Compounds, Ημιπτητικές Οργανικές Ενώσεις

Στον πίνακα 6.2 που ακολουθεί παρατίθενται δεδομένα για το κόστος, τον απαιτούμενο χρόνο της διεργασίας και την πολυπλοκότητα εφαρμογής τους.

Πίνακας 6.2 Αναλογικό κόστος και απαιτούμενος χρόνος διεργασίας για τις τεχνολογίες απορρύπανσης εδαφών (Federal Remediation Technologies Roundtable, 2011) [11]

	Λειτουργία και συντήρηση*	Κόστος υποδομών*	Αξιοπιστία συστήματος	Πιθανή χρονική διάρκεια
Βιοαερισμός (bioventing)	Χαμηλό κόστος	Χαμηλό κόστος	Υψηλή	1-3 χρόνια
Φυτοεξυγίανση (phytoremediation)	Χαμηλό κόστος	Χαμηλό κόστος	Χαμηλή	Περισσότερο από 3 χρόνια
Τεχνική αγροκαλλιέργειας (Landfarming)	Χαμηλό κόστος	Χαμηλό κόστος	Υψηλή	0,5-1 χρόνο
Επεξεργασία σε σωρούς (Biopiles)	Χαμηλό κόστος	Χαμηλό κόστος	Υψηλή	0,5-1 χρόνο
Βιοαντιδραστήρες (Bioreactors)	Μέτριο κόστος	Υψηλό κόστος	Μέτρια	0,5-1 χρόνο
Άντληση εδαφικού αέρα (soil vapor extraction)	Υψηλό κόστος	Μέτριο κόστος	Υψηλή	1-3 χρόνια
Έκπλυση εδάφους (soil flushing)	Υψηλό κόστος	Μέτριο κόστος	Μέτρια	1-3 χρόνια
Ηλεκτροκινητική απορρύπανση (electrokinetics)	Υψηλό κόστος	Μέτριο κόστος	Μέτρια	1-3 χρόνια
Πλύση εδάφους (soil washing)	Υψηλό κόστος	Υψηλό κόστος	Υψηλή	Λιγότερο από 0,5 χρόνο
Στερεοποίηση/Σταθεροποίηση (solidification/stabilization)	Μέτριο κόστος	Υψηλό κόστος	Υψηλή	Λιγότερο από 1 χρόνο
Θέρμανση με ηλεκτρική αντίσταση (Electrical Resistance Heating)	Υψηλό κόστος	Υψηλό κόστος	Υψηλή	Λιγότερο από 1 χρόνο
Αποτέφρωση (incineration)	Υψηλό κόστος	Υψηλό κόστος	Μέτρια	Άμεσα
Πυρόλυση (Pyrolysis)	Υψηλό κόστος	Υψηλό κόστος	Χαμηλή	Άμεσα
Θερμική εκρόφηση (thermal desorption)	Υψηλό κόστος	Υψηλό κόστος	Μέτρια	Άμεσα
Βιοαναρρόφηση (Bioslurping)	Χαμηλό κόστος	Χαμηλό κόστος	Μέτρια	Λιγότερο από 1 χρόνο
Αεροδιασπορά (Air Sparging)	Χαμηλό κόστος	Χαμηλό κόστος	Υψηλή	Λιγότερο από 1 χρόνο
Διαπερατά Ενεργά Φράγματα (Permeable Reactive Barriers)	Μέτριο κόστος	Υψηλό κόστος	Υψηλή	Για μεγάλο χρονικό διάστημα
Αεροδιαχωρισμός (Air Stripping)	Υψηλό κόστος	Μέτριο κόστος	Υψηλή	Περισσότερο από 1 χρόνο
Άντληση και επεξεργασία (Pump and Treat)	Υψηλό κόστος	Υψηλό κόστος	Υψηλή	Περισσότερο από 1 χρόνο
Χημική οξειδωση / αναγωγή (chemical oxidation / reduction)	Μέτριο κόστος	Υψηλό κόστος	Υψηλή	Λιγότερο από 0,5 χρόνο

* Το αναγραφόμενο κόστος αποτελεί ένα σχετικό μέγεθος και βασίζεται στη σύγκριση με άλλες εναλλακτικές τεχνολογίες απορρύπανσης εδαφών

7. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι τεχνολογίες προστασίας από την επέκταση της ρύπανσης εδαφών και υδάτων είναι ιδιαίτερα σημαντικές γιατί συμβάλλουν στον περιορισμό των δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε μία συγκεκριμένη περιοχή και την προστασία από τις επιπτώσεις που θα είχε η επέκταση της ρύπανσης. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι γενικά το κόστος των τεχνολογιών αυτών είναι πολύ μικρότερο από το κόστος των τεχνολογιών απορρύπανσης. Οι κυριότερες τεχνικές προστασίας από την επέκταση της ρύπανσης εδαφών και υδροφορέων είναι:

1. Συστήματα κάλυψης της επιφάνειας των ρυπασμένων περιοχών με σκοπό τον εγκιβωτισμό των ρύπων. Με τα συστήματα αυτά εμποδίζεται η διασπορά των ρύπων αλλά και η κατείδυση των επιφανειακών υδάτων στο υπέδαφος που θα οδηγούσε στη ρύπανση των υπόγειων υδροφορέων της περιοχής.
2. Κατακόρυφα περιμετρικά διαφράγματα για τον περιορισμό της οριζόντιας επέκτασης της ρύπανσης μέσω της κυκλοφορίας του υπόγειου νερού.
3. Υδραυλικά συστήματα, όπως συστήματα που επιτυγχάνουν την αναστροφή της κατεύθυνσης κίνησης του υπόγειου νερού. Συνήθως ο σκοπός αυτός επιτυγχάνεται μέσω εκτεταμένων αντλήσεων.

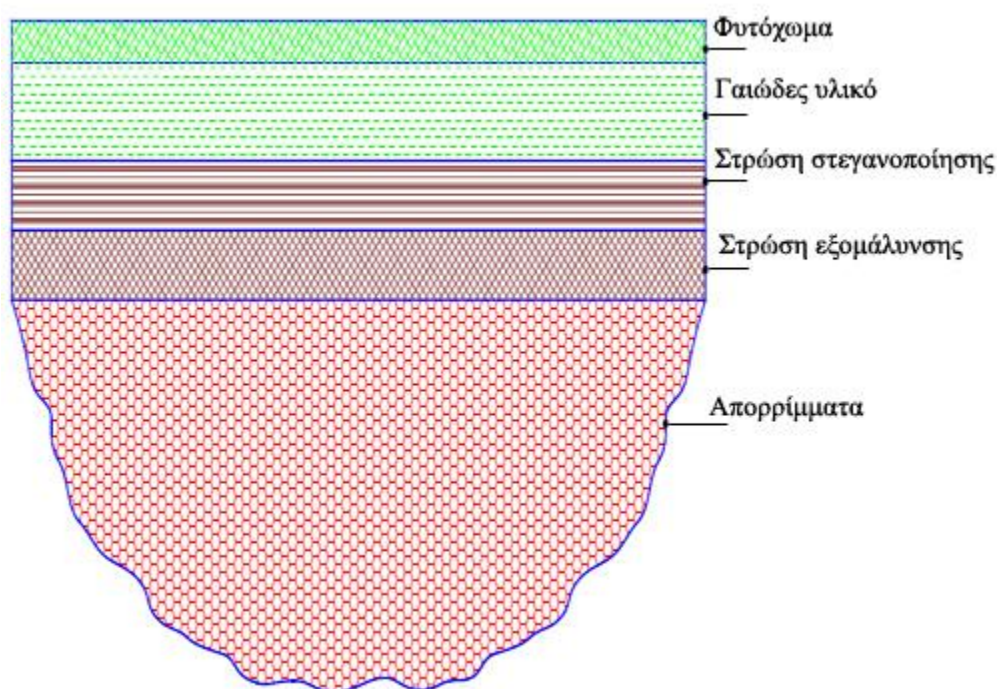
7.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΛΥΨΗΣ

Τα συστήματα κάλυψης των ρυπασμένων εδαφών είναι η απλούστερη και φθηνότερη μέθοδο περιβαλλοντικής αποκατάστασης ρυπασμένων περιοχών. Φυσικά είναι ένα προσωρινό μόνο μέτρο κάλυψης του προβλήματος ρύπανσης και δεν αποτελεί αποτελεσματική αντιμετώπιση του προβλήματος. Για την κάλυψη της ρυπασμένης περιοχής χρησιμοποιούνται συνήθως ασφαλτικά υλικά, σκυρόδεμα ή καθαρό έδαφος (σχήμα 7.1). Κάτω από τις στρώσεις αυτές τοποθετείται πολλές φορές και συνθετική γεωμεμβράνη για να εμποδιστεί η κατείδυση των επιφανειακών υδάτων καθώς επίσης και η ανάβλυση

αερίων από το έδαφος. Το είδος και το πάχος της στρώσης με την οποία θα καλυφθεί μια ρυπασμένη περιοχή καθορίζεται από τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Πρέπει να είναι αρκετό ώστε οι ρίζες των δένδρων να μην εισέρχονται στο ρυπασμένο έδαφος
- Πρέπει να μην υπάρχει κίνδυνος να αποκαλυφθεί το έδαφος που έχει ρυπανθεί σε περιπτώσεις που εκτελεστούν έργα εκσκαφών για την τοποθέτηση δικτύων κοινής ωφέλειας, θεμελίωσης έργων κ.τ.λ.

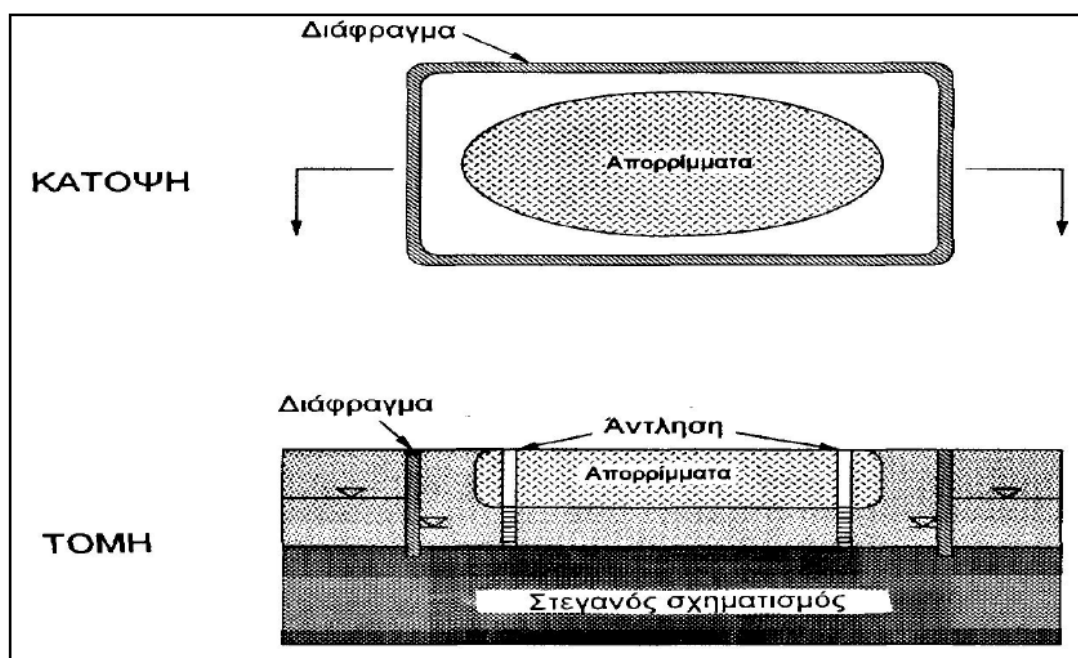
Στο σχεδιασμό των συστημάτων κάλυψης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η πιθανή ανύψωση του υπόγειου ορίζοντα (και συνεπώς η μεταφορά ρύπων μέσω του υπόγειου νερού), το ύψος της τριχοειδούς ανύψωσης του υπόγειου νερού αλλά και πιθανές υποχωρήσεις της επιφάνειας λόγω πλημμελούς συμπύκνωσης του εδάφους.



Σχήμα 7.1 Σχηματική απεικόνιση ενός αποκατεστημένου χώρου διάθεσης αποβλήτων με κατάλληλο σύστημα κάλυψης [11].

7.3 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΑ

Αν λόγω κάποιου ατυχήματος συμβεί διαφυγή τοξικών ή γενικά ρυπογόνων ουσιών από κάποιο χώρο χρήσης ή αποθήκευσης, στο έδαφος, τότε προφανώς υπάρχει κίνδυνος να ρυπανθούν τα υπόγεια ύδατα. Στη συνέχεια οι ρύποι είναι δυνατόν να μεταφερθούν μέσω των υπόγειων υδάτων σε γειτονικές περιοχές, δηλαδή υπάρχει κίνδυνος επέκτασης της ρύπανσης. Για την αντιμετώπιση τέτοιων καταστάσεων κατασκευάζονται περιμετρικά διαφράγματα μεγάλου βάθους για την απομόνωση του εδάφους κάτω από τη θέση της διαρροής, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.2. Τα διαφράγματα για να είναι αποτελεσματικά πρέπει να φθάνουν μέχρι κάποιο αδιαπέραστο υπόστρωμα.



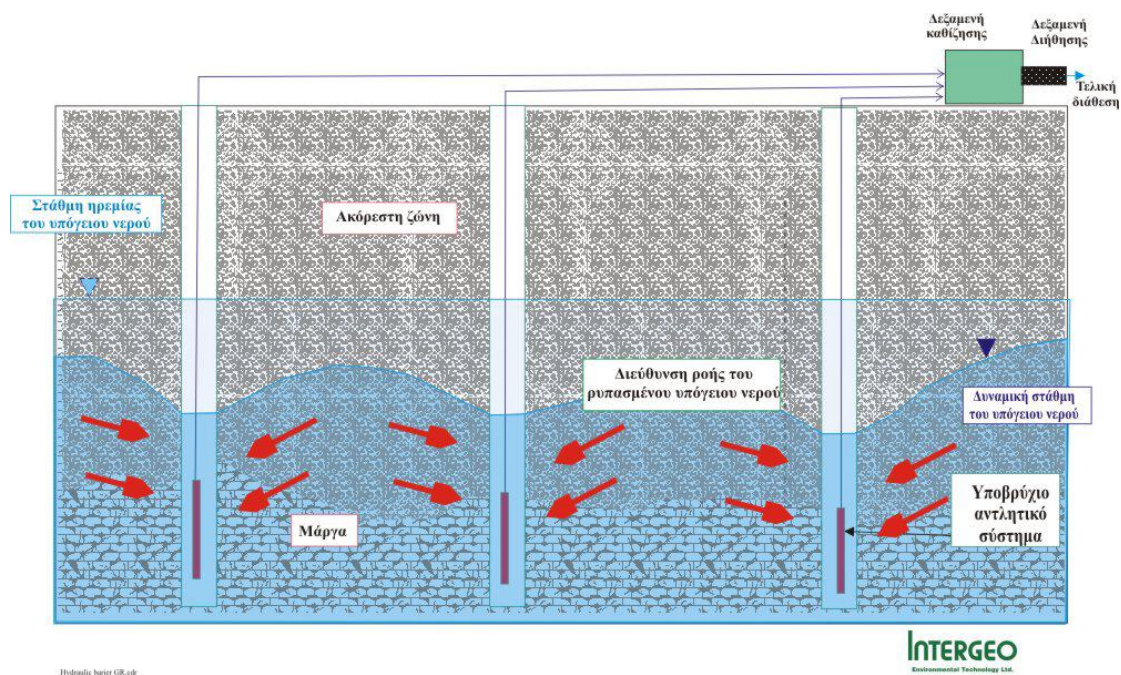
Σχήμα 7.2 Σχηματική απεικόνιση κατακόρυφων περιμετρικών διαφραγμάτων για την απομόνωση του ρυπασμένου εδάφους [11].

7.4 ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα υδραυλικά συστήματα βασίζονται στην τροποποίηση της πιεζομετρίας του υπόγειου νερού με σκοπό τη μεταβολή της κατεύθυνσης κίνησής του. Έτσι, π.χ. συχνά γίνονται εκτεταμένες αντλήσεις σε κάποια περιοχή, ώστε να τροποποιηθεί το καθεστώς

κίνησης του υπόγειου νερού και να μεταβληθεί η κατεύθυνση μετάδοσης της ρύπανσης.

Επίσης συχνά, μεταξύ της πηγής της ρύπανσης και του σημείου εκμετάλλευσης του υπόγειου νερού (π.χ. πηγή, λίμνη κ.τ.λ.) κατασκευάζεται επίμηκες στραγγιστήριο στο οποίο συγκεντρώνεται το υπόγειο νερό που προέρχεται από την πηγή της ρύπανσης. Ουσιαστικά, η περίπτωση αυτή βασίζεται επίσης στην αντιστροφή της κίνησης του υπόγειου νερού, με αποτέλεσμα τον περιορισμό της επέκτασης της ρύπανσης (σχήμα 7.3).



Σχήμα 7.3 Αρχή λειτουργίας του υδραυλικού φράγματος κατακράτησης του ρυπασμένου υπόγειου νερού [11].

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε κάθε αστική η βιομηχανική δραστηριότητα είναι φυσικό να δημιουργούνται οι προϋποθέσεις δημιουργίας ρύπανσης του εδάφους. Στόχος μας θα πρέπει να είναι αφενός να ελαχιστοποιήσουμε τις πιθανότητες αυτές και αφετέρου να είμαστε σε θέση να αντιμετωπίσουμε την ρύπανση εφαρμόζοντας οργανωμένα εργαλεία διαχείρισης ρυπασμένου εδάφους.

Σήμερα είναι διαθέσιμα πάρα πολλά και αξιόπιστα εργαλεία για την καταγραφή, ιεράρχηση, διερεύνηση, αξιολόγηση και απορρύπανση των εδαφών. Η πολιτεία οφείλει καταρχήν να καταγράφει τα πιθανώς ρυπασμένα πεδία και στην συνέχεια ανάλογα και με τους διαθέσιμους πόρους να προχωρά σταδιακά στην αποκατάσταση αυτών που αξιολογούνται ως πιο επικίνδυνα για το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν οι κυριότερες τεχνικές απορρύπανσης, ταξινομήθηκαν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους και τους ρύπους στους οποίους εφαρμόζονται. Επίσης για να καταστούν κατανοητές οι περιπτώσεις στις οποίες είναι εφαρμόσιμη συνήθως η κάθε τεχνική, έγινε προσπάθεια να συγκριθούν οι τεχνικές αυτές μεταξύ τους. Επίσης, δόθηκαν κατευθυντήριες γραμμές για την επιλογή των κατάλληλων τεχνολογιών απορρύπανσης σε σχέση με τα υφιστάμενα δεδομένα του πεδίου.

Εκτός όμως από την απορρύπανση ενός πεδίου υπάρχει και η δυνατότητα της προστασίας από την επέκταση της ρύπανσης. Οι τεχνολογίες προστασίας από την επέκταση της ρύπανσης εδαφών και υδροφορέων αποτελούν ένα σημαντικό αντικείμενο επειδή συμβάλλουν σημαντικά στην πρόληψη των δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την επέκταση της ρύπανσης.

Παρόλα αυτά η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας απορρύπανσης ενός πεδίου εξαρτάται από πλήθος παραμέτρων όπως ενδεικτικά είναι τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των ρύπων, η έκταση της υφιστάμενης ρύπανσης, τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του πεδίου, η διεύθυνση και ταχύτητα ροής του υπόγειου

νερού, οι οικονομικοτεχνικές συνθήκες, οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εφαρμογή των συγκεκριμένων τεχνολογιών κ.ά.

Συνεπώς είναι αδύνατον να υποδείξει κανείς την κατάλληλη τεχνική απορρύπανσης χωρίς να είναι εκ των προτέρων γνωστές όλες οι απαιτούμενες παράμετροι, οι οποίες θα προκύψουν από τη διενέργεια του κατάλληλου περιβαλλοντικού ελέγχου.

Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι τεχνολογία των μεθόδων απορρύπανσης του εδάφους είναι δυναμική και υφίσταται συνεχώς μεταβολές και εξελίξεις. Έτσι είναι απαραίτητη η συνεχής ενημέρωση σχετικά με τις εξελίξεις στον τομέα αυτό, ώστε να είναι κανείς σε θέση να επιλέξει την κατάλληλη τεχνική απορρύπανσης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Νομοθεσία

Βασική προϋπόθεση για μια πολιτική πρόληψης και απορρύπανσης είναι η πλήρης γνώση και η εφαρμογή της Ευρωπαϊκής και εθνικής νομοθεσίας. Η νομοθεσία σχετικά με τη ρύπανση του υπεδάφους είναι πιο ανεπτυγμένη στη Β. Αμερική και στη Δ. Ευρώπη. Αρχικά διαμορφώθηκε ως απάντηση στις ανησυχίες και την αυξανόμενη περιβαλλοντική συνειδητοποίηση των πολιτών και όχι με βάση υπάρχουσες τεχνικές γνώσεις. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση μία σειρά από οδηγίες ρυθμίζουν νομοθετικά θέματα σχετικά με τη ρύπανση υπόγειων υδάτων και εδαφών. Από το 2004 ισχύει η Οδηγία για την Περιβαλλοντική Ευθύνη 2004/35/EK με την προθεσμία για τη μεταφορά στο εθνικό δίκαιο των κρατών μελών την 30/04/2007, η οποία έχει προφανώς παρέλθει προ πολλού για την Ελλάδα χωρίς αυτή να έχει ενσωματωθεί. Η πιο πρόσφατη οδηγία για την προστασία του υπόγειου νερού είναι η 2006/118/EK έχει σαν στόχο την προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και, κυρίως αυτή που προέρχεται από ορισμένες επικίνδυνες ουσίες οι οποίες μπορεί να είναι τοξικές, ανθεκτικές ή βιοσυσσωρεύσιμες. Καθορίζει ποιοτικά πρότυπα και αναπτύσει μεθοδολογίες με βάση μια κοινή προσέγγιση, ώστε να θεσπιστούν κριτήρια για την αξιολόγηση της χημικής κατάστασης των συστημάτων υπογείων νερών. Η Οδηγία, η οποία έπρεπε να ενσωματωθεί στο εθνικό Δίκαιο των κρατών - μελών έως τις 16 Ιανουαρίου 2009, προβλέπει τη λήψη σειράς μέτρων προληπτικού κυρίως χαρακτήρα αλλά και κατασταλτικού ή περιορισμού της εισαγωγής ρύπων στα υπόγεια ύδατα, ενώ ορίζονται ανώτερες αποδεκτές τιμές και ποιοτικά πρότυπα προκειμένου να επιτυγχάνονται αξιόπιστα επίπεδα προστασίας. Δυστυχώς, όπως και με την 2004/35/EK, η 2006/118/EK εν έχει ακόμα ενσωματωθεί στο Εθνικό μας δίκαιο.

Μέσω της 2006/118/EK, προβλέπεται επίσης η διαδικασία για τον εντοπισμό από τα κράτη - μέλη των σημαντικών και διατηρουμένων ανοδικών τάσεων σε όλα τα συστήματα ή ομάδες συστημάτων υπόγειων υδάτων που χαρακτηρίζονται ως απειλούμενα. Τα κράτη μέλη θα πρέπει να ορίσουν για πρώτη φορά ανώτερες αποδεκτές τιμές για όλους του ρύπους και δείκτες ρύπανσης οι οποίοι, σύμφωνα με το χαρακτηρισμό

που καθορίζεται δυνάμει του άρθρου 5 της οδηγίας 2000/60/ΕΚ, χαρακτηρίζουν συστήματα ή ομάδες συστημάτων υπόγειων νερών ως διατρέχοντα τον κίνδυνο να μην επιτύχουν καλή χημική κατάσταση των υπογείων νερών το αργότερο μέχρι τις 22 Δεκεμβρίου 2008. Για να επιτευχθεί ο στόχος πρόληψης ή περιορισμού της εισαγωγής ρύπων στα υπόγεια ύδατα, ο οποίος θεσπίζεται σύμφωνα με το άρθρο 4, παράγραφος 1, σημείο β), στοιχείο ι), της 2000/60/ΕΚ, τα κράτη μέλη διασφαλίζουν ότι το πρόγραμμα μέτρων που καταρτίζεται σύμφωνα με το άρθρο 11 της εν λόγω οδηγίας περιλαμβάνει: (α) Όλα τα μέτρα που απαιτούνται με σκοπό την πρόληψη της εισαγωγής οποιασδήποτε επικίνδυνης ή δυνητικά επικίνδυνης ουσίας στα υπόγεια νερά, κάνοντας την εξυγίανση ρυπασμένων εδαφών πια υποχρεωτική. Τα μέτρα αυτά λαμβάνουν υπόψη, τουλάχιστον, την καθιερωμένη βέλτιστη πρακτική, συμπεριλαμβανομένων της Βέλτιστης Περιβαλλοντικής Πρακτικής και των Βέλτιστων Διαθέσιμων Τεχνικών που ορίζονται στη σχετική νομοθεσία. Με τις διατάξεις του νόμου 3199/2003, Προστασία και Διαχείριση των υδάτων και των κανονιστικών πράξεων που προβλέπεται να εκδοθούν κατ' εξουσιοδότηση του, εναρμονίστηκε το εθνικό δίκαιο προς τις διατάξεις της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ. Αντίστοιχα, η οδηγία για την προστασία του εδάφους είναι υπό επεξεργασία, αλλά αναμένεται να εκδοθεί άμεσα.

Η Ελλάδα απέκτησε σχετική νομοθεσία μόλις το 2006 (Αρ. 13588/725, ΦΕΚ 383Β, 28-03-2006, Μέτρα όροι και περιορισμοί για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων) η οποία αντικαθιστά την Υπουργική Απόφαση 19396/1546/1997 στο πλαίσιο του εθνικού σχεδιασμού για τα επικίνδυνα απόβλητα. Τέλος, και άλλες οδηγίες συμμετέχουν στο πολύπλοκο θεσμικό πλαίσιο που διέπει τη ρύπανση του υπεδάφους, όπως για παράδειγμα η οδηγία 2006/21/ΕΚ σχετικά με τη διαχείριση των αποβλήτων της εξορυκτικής βιομηχανίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1] Αντωνόπουλος Β., *Ποιότητα και Ρύπανση Υπόγειων Νερών*, εκδόσεις Ζήτη 2001.
- 2] Δερματάς Δ., *Ρύπανση του Εδάφους και των Υπόγειων Υδροφορέων*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ.
- 3] Τζοβόλου Δ., *Συγκριτική αξιολόγηση Μεθόδων Απορρύπανσης της Ακόρεστης Ζώνης Εδάφους Μολυσμένου με Κηροζίνη*, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Χημείας, Πανεπιστήμιο Πατρών 2011.
- 4] Βουδούρης Κ., *Θέματα Υδρογεωλογίας Περιβάλλοντος*, Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ 2006.
- 5] Κόκκινου Ε., *Περιβαλλοντική Γεωλογία και Γεωτεχνολογία*, Τμήμα Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος Τ.Ε., ΤΕΙ Κρήτης 2015.
- 6] Βατσέρης Χ., *Ολοκληρωμένο Εργαλείο Διαχείρισης Ρυπασμένου Εδάφους*, Ημερίδα: «ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΔΑΦΟΥΣ», Τετάρτη 4 Απριλίου 2012.
- 7] Αντωνόπουλος Β., *Ποιότητα Νερού και Ρύπανση Υδατικών Πόρων*, Τμήμα Γεωπονίας, ΑΠΘ.
- 8] Μελετητική ομάδα εταιρείας INTERGEO, *Οδηγός για τη Ρύπανση του Εδάφους*, Θεσσαλονίκη 2012.
- 9] Θεοχάρης Μ., *Ρύπανση Υδάτινων Πόρων*, ΤΕΙ Ηπείρου 2013.
- 10] Καρπούζας Δ., *Τεχνολογία Επεξεργασίας Αποβλήτων*, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας 2014.
- 11] Βατσέρης Χ., Τσατσαρέλης Θ. και Παπαδόπουλος Σ., *Αειφορική διαχείριση εδάφους στην υδρολογική λεκάνη του Ανθεμούντα με βάση την Ευρωπαϊκή θεματική στρατηγική για το έδαφος*, Ιούνιος 2012.
- 12] Νταιλιάνης Σ., *Βιολογικές Επιπτώσεις Ρυπογόνων Ουσιών – Οικοτοξικολογία – Προσέγγιση του Προβλήματος*, Τμήμα Βιολογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών 214.
- 13] Χανιώτης Ι. και Ποντικός Μ., *Καινοτόμες Μέθοδοι Απορρύπανσης Εδαφών Μολυσμένων από Διάχυση Πετρελαίου*, Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ Καβάλας 2012.