

Τεχνολογίες απορρύπανσης και προστασίας

8.1 Γενικά

Η απορρύπανση εδαφών και υπόγειων υδροφορέων αλλά και η προστασία τους από τη ρύπανση αποτελούν αντικείμενα με ιδιαίτερο ενδιαφέρον από γεωτεχνική άποψη. Τα θέματα απορρύπανσης αφορούν την ανάληψη ενεργειών για την περιβαλλοντική αποκατάσταση εδαφών και υδροφορέων που έχουν ήδη ρυπανθεί, ενώ τα θέματα προστασίας αφορούν τη λήψη μέτρων για να αποφευχθεί η περαιτέρω επέκταση της ρύπανσης από περιοχές που έχουν ρυπανθεί προς άλλες περιοχές (π.χ. μέσω της κίνησης του υπόγειου νερού). Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμένες κατηγορίες θεμάτων απορρύπανσης και προστασίας εδαφών και υπόγειων υδροφορέων:

1. Καθαρισμός εδαφών που έχουν ρυπανθεί από την ανεξέλεγκτη ταφή χημικών αποβλήτων, όπως παραπροϊόντων της διύλισης πετρελαιοειδών (νάφθα, φαινόλες, χλωριωμένοι διαλύτες, κρεόζοτο, ΒΤΕΧ¹ κλπ), τοξικών αποβλήτων (διοξίνη, τετραχλωράνθρακας, PCB²), γεωργικών φαρμάκων (π.χ. DDT, Aldrin, μαλαθείο, PCP³), βαρέων μετάλλων (υδράργυρος, μόλυβδος, κάδμιο) κλπ.
2. Καθαρισμός εδαφών που έχουν ρυπανθεί από τυχαίες διαρροές υδρογονανθράκων (π.χ. σε διυλιστήρια πετρελαιοειδών, δεξαμενές καυσίμων βιομηχανιών αλλά και κατοικιών), τυχαίες διαρροές επικίνδυνων και τοξικών ουσιών από τους ταμειυτήρες αποθήκευσής τους ή σε ατυχήματα κατά τη μεταφορά τους κλπ.
3. Καθαρισμός εδαφών που έχουν ρυπανθεί από την απόθεση αστικών ή βιομηχανικών αποβλήτων σε παλαιότερες εποχές χωρίς να ληφθούν ειδικά μέτρα προστασίας έναντι διαρροής του υγρού στραγγίσματος (leachate) στο υπέδαφος.
4. Προστασία από τη ρύπανση υδροφορέων που γειτνιάζουν με περιοχές που έχουν ρυπανθεί μέσω κάποιας από τις παραπάνω αιτίες.
5. Προστασία υδροφορέων από την υφαλμύρυνση (δηλαδή την αύξηση της περιεκτικότητας σε άλατα) λόγω υπερεκμετάλλευσης, ανάμειξης με το θαλάσσιο νερό, έντονης εξάτμισης, κλπ.

Οι λόγοι που συνήθως επιβάλλουν τη λήψη μέτρων απορρύπανσης και προστασίας εδαφών και υδροφορέων είναι:

1. Η διαπίστωση ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι τέτοιος που προκαλεί σημαντικούς κινδύνους στη δημόσια υγεία ή γενικότερα “μή-αποδεκτή υποβάθμιση του περιβάλλοντος”. Τα τελευταία χρόνια, τα μέγιστα όρια της αποδεκτής υποβάθμισης

¹ Μίγμα των υδρογονανθράκων βενζολίου (Benzene), τολουολίου (ΤΕ) και ξυλολίου (Xylene) που συχνά εμφανίζεται σε περιοχές που έχουν ρυπανθεί από πετρελαιοειδή.

² Poly-Chlorinated Biphenyls. Οι ουσίες αυτές, που είναι καρκινογόνες, χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία μετασχηματιστών ηλεκτρικού ρεύματος και έχουν προκαλέσει πολυάριθμες ρυπάνσεις λόγω της ανεξέλεγκτης απόρριψής τους στο περιβάλλον.

³ Penta-Chloro-Phenol

του περιβάλλοντος έχουν μειωθεί σημαντικά (κυρίως λόγω της ευαισθητοποίησης των κοινωνικών φορέων) με συνέπεια τη μεγάλη αύξηση των περιοχών στις οποίες υπάρχει ανάγκη απορρύπανσης ή/και προστασίας.

2. Η ανάγκη βελτίωσης της ποιότητας του περιβάλλοντος σε μια περιοχή, έστω και εάν ο βαθμός ρύπανσης δεν προκαλεί σημαντικά προβλήματα δημόσιας υγείας.
3. Η ανάγκη αύξησης της εμπορικής αξίας των ακινήτων σε μια περιοχή.
4. Η ανάγκη ανάπτυξης μιας περιοχής σε συνδυασμό με την έλλειψη “καθαρών” χώρων για τη δημιουργία βιομηχανιών, οικισμών κλπ. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται και περιπτώσεις όπου διατίθενται μεν “καθαροί” χώροι για ανάπτυξη αλλά το κόστος τους υπερβαίνει το μικτό κόστος ανάπτυξης (αγορά συν απορρύπανση) άλλων χώρων στους οποίους επιβάλλεται απορρύπανση.

Η απλούστερη και λιγότερο δαπανηρή μέθοδος περιβαλλοντικής αποκατάστασης είναι η λεγόμενη “μηδενική λύση”, κατά την οποία δεν λαμβάνονται ειδικά μέτρα απορρύπανσης, αλλά η εξασθένηση του ρυπαντικού φορτίου επαφίεται στους φυσικούς μηχανισμούς υποβάθμισης, όπως η βιολογική αποδόμηση των ρύπων, η προσρόφησή τους στην επιφάνεια των αργιλικών ορυκτών, η μείωση της συγκέντρωσης των ρύπων μέσω αραίωσης ή εξάτμισης κλπ. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στις συνθήκες του περιβάλλοντος (pH, θερμοκρασία, υγρασία, παρουσία ουσιών που είναι τοξικές για τους μικρο-οργανισμούς κλπ) και συνεπώς η αποτελεσματική λειτουργία τους δεν είναι πάντοτε αξιόπιστη. Επιπλέον, η δράση των μηχανισμών φυσικής εξασθένησης είναι πολύ βραδεία. Για τους λόγους αυτούς, στις περισσότερες περιπτώσεις έντονης ρύπανσης δεν συνιστάται η εφαρμογή της “μηδενικής λύσης”.

Μια δεύτερη μέθοδος αντιμετώπισης της ρύπανσης είναι η επιβολή περιορισμών στην πρόσβαση και χρήση της περιοχής που έχει ρυπανθεί μέσω περίφραξης, προειδοποιητικών πινακίδων κλπ. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνον ως προσωρινό μέτρο και δεν αποτελεί οριστική λύση του προβλήματος.

Μια τρίτη μέθοδος αντιμετώπισης είναι η αφαίρεση (με εκσκαφή) του εδάφους που έχει ρυπανθεί και η μεταφορά και απόρριψή του σε ελεγχόμενους αποδέκτες με σύγχρονα συστήματα προστασίας από την επέκταση της ρύπανσης (συστήματα στεγάνωσης του πυθμένα, συστήματα συλλογής και απομάκρυνσης του υγρού στραγγίσματος, συστήματα κάλυψης κλπ). Αν και η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε ορισμένες περιπτώσεις (κυρίως σε περιπτώσεις εντοπισμένης ρύπανσης) παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα όπως:

1. Η πιθανή διαφυγή ρύπων κατά την εκσκαφή και μεταφορά των εδαφικών υλικών προς τους χώρους απόρριψης (κυρίως με τη μορφή σκόνης και υγρού στραγγίσματος).
2. Νομικοί περιορισμοί ως προς τη δυνατότητα μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων από ορισμένους δρόμους.
3. Πολύ μεγάλο κόστος, ιδίως στις περιπτώσεις που οι ποσότητες των εδαφικών υλικών που πρέπει να αφαιρεθούν είναι μεγάλες.
4. Δεν αποτελεί λύση του προβλήματος, αλλά απλή μεταφορά του σε άλλη θέση.
5. Η έλλειψη κατάλληλων χώρων επαρκούς χωρητικότητας για την απόρριψη των ρυπανθέντων υλικών αλλά και το υψηλό κόστος κατασκευής των μέτρων προστασίας από την επέκταση της ρύπανσης στους χώρους αυτούς.

Για τους ανωτέρω λόγους η μέθοδος αυτή δεν χρησιμοποιείται παρά μόνον σε περιπτώσεις ρύπανσης με πολύ περιορισμένη έκταση.

Εκτός από τις ανωτέρω μεθόδους υπάρχουν και οι λεγόμενες *μέθοδοι ενεργητικής απορρύπανσης* που περιλαμβάνουν:

1. Μεθόδους απορρύπανσης εδαφών, που είναι:
 - 1.1 Η βιολογική αποκατάσταση (bio-remediation) μέσω της αποδόμησης των οργανικών ρύπων, είτε επιτόπου είτε μετά από εκσκαφή και αναμόχλευση.
 - 1.2 Η έκπλυση του εδάφους με χημικές ουσίες (soil washing, chemical extraction, leaching).
 - 1.3 Η θερμική επεξεργασία είτε επιτόπου είτε μετά από μεταφορά σε ειδικούς κλιβάνους όπου επιβάλλεται απλή θέρμανση (heating), καύση (incineration) ή επεξεργασία με ατμό (steam stripping).
 - 1.4 Η απορρύπανση με εφαρμογή υποπίεσης (vacuum extraction) ή απλού αερισμού (soil venting).
2. Μεθόδους απορρύπανσης υπογείων υδάτων, που είναι:
 - 2.1 Η βιολογική αποκατάσταση (bio-remediation) μέσω της αποδόμησης των οργανικών ρύπων.
 - 2.2 Η μέθοδος άντλησης και απορρύπανσης (pump and treat) διαλελυμένων και αιωρούμενων ρύπων.
 - 2.3 Η μέθοδος άντλησης επιπλεόντων ρύπων (free product recovery), όπως ελαφρών πετρελαιοειδών.
 - 2.4 Η αφαίρεση πτητικών ρύπων με εφαρμογή υποπίεσης (vacuum extraction).
 - 2.5 Η αφαίρεση βαρέων μετάλλων με εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος (electro-reclamation).

Η επιλογή μιας συγκεκριμένης από τις παραπάνω μεθόδους εξαρτάται από το είδος, τη συγκέντρωση και την ποσότητα του ρύπου, το είδος του εδάφους, το κόστος και τη διαθέσιμη τεχνολογία και τεχνογνωσία. Οι μέθοδοι αυτές εξετάζονται αναλυτικά σε επόμενα εδάφια.

Οι μέθοδοι προστασίας εδαφών και υπόγειων υδροφορέων από την επέκταση της ρύπανσης υπάγονται στις εξής κατηγορίες:

1. Μέθοδοι εγκιβωτισμού (containment) του εδάφους, που είναι:
 - 1.1 Τα συστήματα κάλυψης της επιφάνειας.
 - 1.2 Τα περιμετρικά κατακόρυφα διαφράγματα.
 - 1.3 Τα οριζόντια διαφράγματα βάσης.
 - 1.4 Τα συστήματα σταθεροποίησης του εδάφους που έχει ρυπανθεί με χημικές μεθόδους (τσιμέντο, άσβεστο, πολυμερή, ασφατικά κλπ) ή με θερμικές μεθόδους (vitrification).

2. Υδραυλικές μέθοδοι αναστροφής της κίνησης του υπόγειου νερού.

Οι μέθοδοι αυτές εξετάζονται αναλυτικά στα επόμενα εδάφια.

Τέλος, στις τεχνολογίες απορρύπανσης και προστασίας από τη ρύπανση υπάγονται και οι μέθοδοι διάθεσης των επεξεργασμένων λυμάτων (sewage sludge) στο έδαφος με τις μεθόδους άρδευσης και ταχείας διήθησης. Οι μέθοδοι αυτές εξετάζονται σε επόμενο εδάφιο.

8.2 Τεχνολογίες απορρύπανσης εδαφών

8.2.1 Μέθοδος της βιολογικής αποκατάστασης

8.2.1.1 Περιγραφή της μεθόδου

Η μέθοδος της βιολογικής αποκατάστασης (bio-remediation) αποτελεί μια από τις σημαντικότερες μεθόδους απορρύπανσης των εδαφών και των υπόγειων υδροφορέων και βασίζεται στην αποδόμηση των οργανικών ουσιών και την τελική

μετατροπή τους σε αβλαβείς⁴ ουσίες μέσω της δράσης μικρο-οργανισμών. Η μέθοδος χρησιμοποιείται επί αρκετές δεκαετίες κατά την επεξεργασία των αστικών λυμάτων με συστήματα βιολογικής επεξεργασίας, ενώ η εφαρμογή της στην ελεγχόμενη αποδόμηση των οργανικών ρύπων του εδάφους και των υπόγειων υδάτων είναι πολύ πρόσφατη. Κατά την τελευταία δεκαπενταετία, η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί για την απορρύπανση εδαφών από πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες (poly-aromatic hydrocarbons, PAH), πτητικές οργανικές ουσίες (όπως το γνωστό BTEX⁵) χλωριούχους οργανικούς ρύπους (όπως ο τετραχλωράνθρακας, οι πενταχλωροφαινόλες-PCP και τα επίσης γνωστά PCBs⁶) και άλλες οργανικές ενώσεις.

Η βιολογική αποδόμηση των οργανικών ενώσεων γίνεται μέσω της δράσης μικρο-οργανισμών (βακτηριδίων, μυκήτων, κλπ) οι οποίοι αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας τον άνθρακα ή/και την ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τον μεταβολισμό (αποσύνθεση) των οργανικών ουσιών. Οι μικρο-οργανισμοί αποσυνθέτουν τις οργανικές ενώσεις χρησιμοποιώντας ως καταλύτες κατάλληλα ένζυμα (πρωτεΐνες) τα οποία παράγουν οι ίδιοι. Το τελικό προϊόν της αποσύνθεσης των οργανικών ουσιών μέσω των μικρο-οργανισμών είναι ανόργανες ουσίες (διοξείδιο του άνθρακα και νερό) που συνήθως θεωρούνται λιγότερο επιβλαβείς από τις αρχικές ενώσεις, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις ατελούς αποσύνθεσης⁷ παράγονται και άλλες απλές ενώσεις όπως μεθάνιο, υδροθείο, νιτρικά και θειικά άλατα.

Για να συντελεσθεί η αποσύνθεση των οργανικών ουσιών μέσω μικρο-οργανισμών απαιτούνται οι εξής προϋποθέσεις:

1. Η παρουσία κατάλληλων μικρο-οργανισμών, δηλαδή μικρο-οργανισμών που παράγουν ένζυμα κατάλληλα για τον μεταβολισμό της συγκεκριμένης οργανικής ουσίας.
2. Η παρουσία οργανικών ουσιών οι οποίες με την αποσύνθεσή τους θα παράσχουν την απαιτούμενη ενέργεια στους μικρο-οργανισμούς για να αναπτυχθούν.
3. Η παρουσία θρεπτικών ουσιών (nutrients), όπως το άζωτο, ο φωσφόρος, το κάλιο, το θείο κλπ. που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των μικρο-οργανισμών.
4. Η παρουσία δεκτών ηλεκτρονίων (electron acceptors), δηλαδή ατόμων ή ριζών τα οποία δέχονται τα ηλεκτρόνια που προκύπτουν κατά την οξείδωση των οργανικών ουσιών.
5. Η παρουσία κατάλληλων συνθηκών για την ανάπτυξη των μικρο-οργανισμών και συγκεκριμένα: κατάλληλη υγρασία, θερμοκρασία και pH και η απουσία ορισμένων χημικών ουσιών σε συγκεντρώσεις που είναι τοξικές για τους μικρο-οργανισμούς (και τους καταστρέφουν).

Συνεπώς, οι τεχνολογίες βιολογικής αποκατάστασης έχουν σκοπό να εξασφαλίσουν και να ενισχύσουν με ελεγχόμενο τρόπο τις ανωτέρω απαιτήσεις ώστε να συντελεσθεί η αποσύνθεση των οργανικών ουσιών που αποτελούν το ρυπαντικό φορτίο του εδάφους ή του υπόγειου νερού. Ως εκ τούτου είναι απαραίτητη αφενός μεν η κατανόηση της λειτουργίας των μηχανισμών βιολογικής αποσύνθεσης των οργανικών ουσιών, αφετέρου δε η ανάπτυξη της σχετικής τεχνολογίας ώστε με

⁴ Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις τα ενδιάμεσα προϊόντα της αποδόμησης των οργανικών ουσιών είναι εξίσου ή και περισσότερο επιβλαβή από τα αρχικά. Συνεπώς, κατά την εφαρμογή των μεθόδων βιολογικής αποκατάστασης, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επίτευξη πλήρους αποδόμησης των ρύπων ώστε να αδρανοποιηθεί πλήρως το ρυπαντικό φορτίο.

⁵ μίγμα βενζολίου (Benzene), τολουολίου (Toluene) και ξυλλοίου (Xylene)

⁶ Poly-Chlorinated Biphenyls, που χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία των ηλεκτρικών μετασχηματιστών

⁷ όπως π.χ. κατά την αναερόβια αποσύνθεση των οργανικών ουσιών

τεχνικές επεμβάσεις να διατηρούνται οι βέλτιστες συνθήκες δράσης των μικρο-οργανισμών. Οι μηχανισμοί βιολογικής αποσύνθεσης των οργανικών ενώσεων περιγράφονται αναλυτικότερα στα επόμενα.

1. Μικρο-οργανισμοί και οργανικές ενώσεις

Εφόσον πληρούνται οι προϋποθέσεις που περιγράφηκαν παραπάνω, αναπτύσσονται μικρο-οργανισμοί οι οποίοι μπορούν να διασπάσουν τις περισσότερες οργανικές ενώσεις που υπάρχουν στη φύση ή κατασκευάζονται από τον άνθρωπο. Η διάσπαση των οργανικών ουσιών από τους μικρο-οργανισμούς γίνεται με βάση τις εξής αρχές:

- (α) Σε περίπτωση παρουσίας πολλών οργανικών ενώσεων, αρχικώς διασπώνται οι απλούστερες ενώσεις επειδή είναι ευχερέστερη η ανάπτυξη μικρο-οργανισμών που παράγουν ένζυμα για τη διάσπαση των απλών ενώσεων.
- (β) Για τη διάσπαση των σύνθετων οργανικών ουσιών που κατασκευάζονται από τον άνθρωπο, απλώς απαιτείται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ώστε αφενός μεν να διασπασθούν προηγουμένως οι απλούστερες ενώσεις, αφετέρου δε να συμβεί προσαρμογή (acclimation) των μικρο-οργανισμών, δηλαδή να παραγάγουν τα κατάλληλα ένζυμα που διασπούν τις πλέον σύνθετες ενώσεις.
- (γ) Η αποσύνθεση των οργανικών ουσιών γίνεται σε διαδοχικές φάσεις με τη δράση διάφορων μικρο-οργανισμών. Έτσι, μια ομάδα μικρο-οργανισμών διασπά την αρχική οργανική ένωση σε κάποια απλούστερη, η οποία στη συνέχεια διασπάται εκ νέου από άλλους μικρο-οργανισμούς και η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου τελικώς παραχθούν πολύ απλές ενώσεις (CO₂, H₂O, CH₄ κλπ).

Ο ρυθμός της βιολογικής διάσπασης των οργανικών ουσιών εξαρτάται από το είδος των βακτηριδίων που προκαλούν την αποδόμηση και τις συνθήκες του περιβάλλοντος (π.χ. θερμοκρασία, pH) που συχνά αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την δράση των μικρο-οργανισμών. Αρκετές συνήθεις βιολογικές διασπάσεις ακολουθούν⁸ τον γνωστό εκθετικό νόμο των πυρηνικών διασπάσεων (κινητική πρώτης τάξεως - Monod kinetics), κατά τον οποίο ο ρυθμός της διάσπασης είναι ανάλογος του διαθέσιμου για διάσπαση αριθμού μορίων. Κατά τον νόμο αυτό, η συγκέντρωση (c) της οργανικής ουσίας τη χρονική στιγμή (t) είναι:

$$c = c_0 e^{-kt}$$

όπου (c_0) είναι η αρχική συγκέντρωση (για $t = 0$) και (k) είναι η σταθερά της διάσπασης που δίνεται από τη σχέση:

$$k = \frac{0.693}{t_{1/2}}$$

όπου ($t_{1/2}$) είναι ο λεγόμενος χρόνος ημιζωής, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για τη διάσπαση του ημίσεως των μορίων της οργανικής ένωσης. Σύμφωνα με τα ανωτέρω, δοθέντος αρκετού χρόνου (και προφανώς με τις κατάλληλες λοιπές συνθήκες) θα αναπτυχθούν μικρο-οργανισμοί που μπορούν να διασπάσουν και τις πλέον σταθερές συνθετικές οργανικές ενώσεις. Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει τυπικές τιμές του χρόνου ημιζωής ορισμένων από τις οργανικές ενώσεις που συνήθως υπάρχουν στα βιομηχανικά απόβλητα. Λόγω της εξάρτησης του ρυθμού των βιολογικών διασπάσεων από τις συνθήκες του περιβάλλοντος (θερμοκρασία, υγρασία, pH κλπ), οι παρακάτω χρόνοι ημιζωής είναι ενδεικτικοί και αναφέρονται σε μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο κάτω από "συνήθεις" συνθήκες περιβάλλοντος, ενώ στην πραγματικότητα μπορεί να διαφέρουν σημαντικά. Πάντως από τις τιμές του πίνακα

⁸ υπάρχουν όμως και πολλοί τύποι βιολογικής αποδόμησης που δεν ακολουθούν τον εκθετικό νόμο, όπως π.χ. οι περισσότερες διασπάσεις που προκαλούνται από μικρόβια (microbial kinetics)

καθίσταται σαφές ότι ορισμένες οργανικές ενώσεις είναι πολύ πιο εύκολα διασπάσιμες από άλλες.

ΤΥΠΙΚΟΙ ΧΡΟΝΟΙ ΗΜΙΖΩΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΑΠΟΔΟΜΗΣΗ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΠΡΩΤΗΣ ΤΑΞΕΩΣ

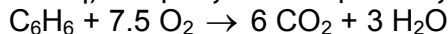
Οργανική Ένωση	Χρόνος ημιζωής ⁹ (ημέρες)
Βενζόλιο	1
Τολουόλιο	6.4
Ανθρακένιο	30
Ξυλόλιο	40
Πυρένιο	40
Ναφθαλένιο	95
Βενζο-φθορο-ανθένιο	1290
Βενζο-πυριλένιο	360
Ιδενο-πυρένιο	600

2. Θρεπτικές ουσίες (nutrients)

Η ανάπτυξη των μικρο-οργανισμών απαιτεί την παρουσία θρεπτικών ουσιών (τροφών) οι οποίες αποτελούν συστατικά του κυττάρου των, όπως το άζωτο (N), ο φωσφόρος (P), το κάλιο (K) το θείο (S) και διάφορα ιχνοστοιχεία. Τα στοιχεία αυτά συνήθως υπάρχουν στα εδαφικά υλικά. Σε περίπτωση έλλειψης, θα πρέπει να προστίθενται κατάλληλες ουσίες ώστε να μη διακόπτεται η ανάπτυξη των μικρο-οργανισμών. Μια ικανοποιητική αναλογία άνθρακα : άζωτο : φωσφόρο (C/N/P) στο έδαφος για την ανάπτυξη μικρο-οργανισμών είναι 100:10:1. Σε περίπτωση έλλειψης (π.χ. αζώτου) θα πρέπει να προστίθενται κατάλληλα χημικά λιπάσματα (π.χ. θειική αμμωνία).

3. Δέκτες ηλεκτρονίων

Κατά τον βιολογικό μεταβολισμό, οι διασπώμενες οργανικές ενώσεις χάνουν ηλεκτρόνια τα οποία μεταφέρονται σε κάποιον δέκτη ηλεκτρονίων. Κατά την αερόβια διάσπαση, ο τελικός αποδέκτης των ηλεκτρονίων είναι το οξυγόνο. Έτσι, π.χ. η αερόβια αποσύνθεση (οξειδωση) του βενζολίου παρουσιάζεται από τη σχέση:



Εάν δεν υπάρχει διαθέσιμο οξυγόνο (δηλαδή υπό αναερόβιες συνθήκες), η νιτρική ρίζα (NO_3^-), ιόντα σιδήρου (Fe^{+3}), ιόντα μαγγανίου (Mn^{+2}) και η θειική ρίζα (SO_4^{-2}) μπορούν να δράσουν ως δέκτες ηλεκτρονίων, εάν βεβαίως στο σύστημα έχουν αναπτυχθεί μικρο-οργανισμοί που δύνανται να παράγουν τα κατάλληλα ένζυμα.

Όπως φαίνεται από την ανωτέρω χημική αντίδραση, η αερόβια οξειδωση των οργανικών ενώσεων αφαιρεί οξυγόνο από το σύστημα. Εάν το οξυγόνο δεν αναπληρωθεί (π.χ. με μηχανική ανάμειξη και αερισμό των υλικών, τεχνητή κυκλοφορία αέρα κλπ), τελικώς το σύστημα θα μετατραπεί σε αναερόβιο, θα αναπτυχθούν αναερόβιοι μικρο-οργανισμοί και η αποσύνθεση θα δώσει και μεθάνιο (CH_4) αντί του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Η αερόβια οξειδωση δίνει τα πλέον αβλαβή προϊόντα και συνεπώς είναι προτιμητέα. Έτσι, στα συστήματα απορρύπανσης μέσω της βιολογικής αποσύνθεσης θα πρέπει να γίνεται κατάλληλος μηχανικός αερισμός (με αναμόχλευση, ανάδευση κλπ), ώστε η συγκέντρωση του οξυγόνου να διατηρείται σε ικανοποιητικό επίπεδο.

⁹ χρόνος ημιζωής είναι ο χρόνος που απαιτείται για τη διάσπαση του ημίσεως των μορίων της οργανικής ένωσης

4. Υγρασία

Η παρουσία υγρασίας είναι απαραίτητη για τη δράση των μικρο-οργανισμών. Το ιδανικό ποσοστό υγρασίας στο έδαφος είναι 15-30%. Εάν η υγρασία μειωθεί κάτω από το 15%, η δράση των μικρο-οργανισμών αναστέλλεται. Επίσης, αν η υγρασία αυξηθεί πάνω από το 30% (όπου ο βαθμός κορεσμού του εδάφους είναι σχεδόν 100%) δεν γίνεται ικανοποιητικός αερισμός του εδάφους και το διαθέσιμο οξυγόνο μειώνεται. Κατά συνέπεια, για τη βέλτιστη δράση των μικρο-οργανισμών, η υγρασία του εδάφους θα πρέπει να ρυθμίζεται στα ανωτέρω όρια. Είναι προφανές από τα παραπάνω ότι δεν είναι ευχερής η βιολογική αποσύνθεση των οργανικών ρύπων του υπόγειου νερού κάτω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα λόγω έλλειψης οξυγόνου, εκτός εάν γίνεται κυκλοφορία αέρα με τεχνητά μέσα (π.χ εισπίαση αέρα μέσω γεωτρήσεων). Κατά συνέπεια, η βιολογική αποσύνθεση των οργανικών ρύπων στο υπόγειο νερό γίνεται συνήθως υπό αναερόβιες συνθήκες και καταλήγει στην παραγωγή μεθανίου, υδροθείου (το οποίο δίνει άσχημη οσμή στο νερό), κλπ.

5. Θερμοκρασία

Ο ρυθμός ανάπτυξης και δράσης των μικρο-οργανισμών επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Σε χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω των 5-10° C) οι μικρο-οργανισμοί αδρανοποιούνται (χωρίς όμως να καταστρέφονται), ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 60° C) οι μικρο-οργανισμοί καταστρέφονται.

6. pH

Οι βέλτιστες τιμές του pH για τη δράση των μικρο-οργανισμών είναι 5.5-8.5 (περί το ουδέτερο pH). Συνεπώς, η ρύθμιση του pH του εδάφους είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της βιολογικής αποσύνθεσης των οργανικών ρύπων.

7. Τοξικότητα

Ορισμένες χημικές ενώσεις σε υψηλές συγκεντρώσεις είναι τοξικές για τους μικρο-οργανισμούς, δηλαδή τους καταστρέφουν. Παρά ταύτα, η αντίληψη που συνήθως υπάρχει ότι δηλαδή οι ουσίες που είναι επικίνδυνες ή τοξικές για τον άνθρωπο είναι τοξικές και για τους μικρο-οργανισμούς είναι εσφαλμένη. Αντίθετα, πολλές επικίνδυνες ή τοξικές ουσίες (για τον άνθρωπο) διασπώνται από μικρο-οργανισμούς. Στην περίπτωση που πρόκειται να εφαρμοσθεί η μέθοδος της βιολογικής απορρύπανσης σε ένα συγκεκριμένο έδαφος, θα πρέπει να ελέγχεται η τοξικότητα των χημικών ουσιών που περιέχονται στο έδαφος για διάφορους τύπους μικρο-οργανισμών. Τούτο γίνεται με ειδικές δοκιμές (toxicity assays), κατά τις οποίες ένα πρότυπο σύστημα μικρο-οργανισμών εκτίθεται σε δείγμα του εδάφους και παρακολουθούνται οι πληθυσμοί των μικρο-οργανισμών για ενδείξεις τοξικότητας. Στις περιπτώσεις αυξημένης τοξικότητας μπορεί να γίνει ανάμειξη του εδάφους με άλλα “καθαρά” εδαφικά υλικά ή να γίνει έκπλυση του εδάφους, ώστε να μειωθούν οι συγκεντρώσεις των τοξικών για τους μικρο-οργανισμούς ουσιών.

8.2.1.2 Συστήματα βιολογικής απορρύπανσης εδαφών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η βιολογική απορρύπανση των εδαφών είναι μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος για την εξουδετέρωση των οργανικών ρύπων. Βεβαίως, τονίζεται και πάλι ότι η δράση των μικρο-οργανισμών που διασπών τους οργανικούς ρύπους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι σημαντικότεροι των οποίων αναφέρθηκαν παραπάνω. Αν και η βιολογική αποσύνθεση των οργανικών ενώσεων υπό αναερόβιες συνθήκες είναι δυνατή, θα πρέπει να προτιμάται η αερόβια αποσύνθεση 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 εφαρμοσθεί με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα στην αποσύνθεση πολυ-αρωματικών υδρογονανθράκων, πετρελαιοειδών και άλλων οργανικών ενώσεων. Η μέθοδος είναι αποτελεσματική για την απορρύπανση εδαφών πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα (δηλαδή στη μερικώς κορεσμένη ζώνη), επειδή στα κορεσμένα εδάφη δεν είναι ευχερής ο αερισμός και συνεπώς ευνοούνται συνθήκες αναερόβιας αποσύνθεσης που γενικώς δεν είναι επιθυμητή. Επίσης, η μέθοδος είναι αποτελεσματική σε σχετικώς χονδρόκοκκα εδάφη επειδή και πάλι σε αυτά είναι ευχερής ο αερισμός (συνήθως χρησιμοποιείται σε εδάφη με διαπερατότητα $k > 10^{-3}$ cm/sec). Τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

1. Η βιολογική απορρύπανση απαιτεί γενικώς μακροχρόνια επεξεργασία που μπορεί να φθάσει σε ορισμένες περιπτώσεις σταθερών ρύπων και τα 15-20 έτη. Επιπλέον, υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα ως προς τον απαιτούμενο χρόνο λόγω της εξάρτησης της δράσης των μικρο-οργανισμών από πολλούς παράγοντες.
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 ευχερέστερης διάσπασης των άλλων οργανικών ουσιών (οι οποίες όμως έχουν μικρότερο ενδιαφέρον από πλευράς ρυπαντικού φορτίου).
3. Η μέθοδος είναι ευαίσθητη σε πολλούς παράγοντες (παρουσία δεκτών ηλεκτρονίων, θρεπτικών ουσιών, υγρασία, θερμοκρασία, pH κλπ), οι οποίοι θα πρέπει να ελέγχονται και να ρυθμίζονται διαρκώς ώστε να επιτυγχάνονται βέλτιστοι ρυθμοί δράσης των μικρο-οργανισμών και συνεπώς βέλτιστη απόδοση της βιολογικής αποδόμησης των ρύπων.
4. Η μέθοδος είναι πρόσφορη για την αποδόμηση οργανικών κυρίως ρύπων, αν και ενίοτε χρησιμοποιείται και για την διάσπαση ανόργανων ουσιών (π.χ. την μετατροπή θειικών ριζών σε θειούχες με την επίδραση μικρο-οργανισμών).

8.2.2 Έκπλυση του εδάφους με χημικές ουσίες

Η έκπλυση του εδάφους (soil washing, chemical extraction, leaching) γίνεται με νερό υπό πίεση το οποίο συχνά περιέχει οξέα, βάσεις ή απορρυπαντικά για να διαλύσει ή να διασπάσει τους ρύπους. Κατά την επεξεργασία απαιτείται έντονη αναμόχλευση του εδάφους, ώστε οι ρύποι να εκπλυθούν. Το κυριότερο πρόβλημα της μεθόδου είναι οι μεγάλες ποσότητες νερού που προκύπτουν ως παραπροϊόντα της έκπλυσης και περιέχουν σημαντικό ρυπαντικό φορτίο. Το νερό αυτό πρέπει να υποστεί ειδική επεξεργασία για την αφαίρεση των ρύπων και στη συνέχεια να ανακυκλωθεί. Επίσης υπάρχει κίνδυνος διήθησης του νερού στο υπέδαφος και επέκτασης της ρύπανσης. Συχνά αντί για νερό χρησιμοποιούνται οργανικοί διαλύτες, οι οποίοι όμως γενικώς είναι τοξικοί, εύφλεκτοι κλπ. και συνεπώς απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στη χρήση τους.

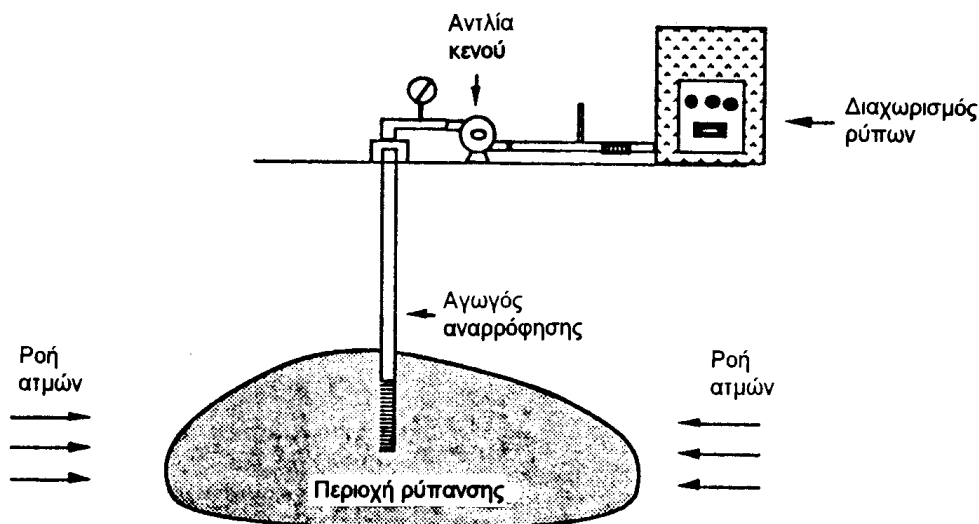
8.2.3 Θερμική επεξεργασία

Η θερμική επεξεργασία του εδάφους συνήθως γίνεται σε κλιβάνους και έχει σκοπό την αφαίρεση των πτητικών ρύπων σε αυξημένη θερμοκρασία (π.χ. πετρελαιοειδή, κυανιούχα, πολυ-κυκλικές αρωματικές ενώσεις, αμίαντος κλπ). Εάν η θερμοκρασία αυξηθεί σημαντικά προκαλείται καύση (incineration) των περισσότερων οργανικών ουσιών. Η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί για την απορρύπανση εδαφών ρυπανθέντων με PCBs. Ο τρόπος θέρμανσης θα πρέπει να ελέγχεται απόλυτα επειδή υπό ορισμένες συνθήκες είναι δυνατόν να παραχθούν δηλητηριώδη αέρια (π.χ. αέρια που περιέχουν διοξίνες) και να διαφύγουν στην ατμόσφαιρα. Μια άλλη μέθοδος θερμικής επεξεργασίας του εδάφους επιτόπου είναι η παροχή υπέρθερμου ατμού στο έδαφος (steamstripping) μέσω γεωτρήσεων. Με τον τρόπο αυτό: (α) εξατμίζονται οι πτητικοί ρύποι και συλλέγονται με άλλες γεωτρήσεις, στις οποίες ασκείται αναρρόφηση, (β) οι ρύποι διαλύονται στο νερό του ατμού και αφαιρούνται μαζί με το νερό με σύστημα αποστράγγισης.

8.2.4 Απορρύπανση με εφαρμογή υποπίεσης

Η απορρύπανση με εφαρμογή υποπίεσης (vacuum extraction) είναι μια πρόσφατη μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απορρύπανση της μερικώς κορεσμένης ζώνης εδαφών¹⁰ από πτητικούς υδρογονάνθρακες (π.χ. ελαφρά πετρελαιοειδή). Η μέθοδος συνίσταται στη διάνοιξη γεωτρήσεων εντός της μερικώς κορεσμένης ζώνης και στην εφαρμογή αναρρόφησης (υποπίεσης), με την οποία εξατμίζονται οι πτητικοί υδρογονάνθρακες και συλλέγονται μαζί με τον αναρροφούμενο αέρα (Σχήμα 8.1). Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί σε χονδρόκοκκα εδάφη ($k > 10^{-4}$ cm/sec), επειδή τα λεπτόκοκκα έχουν μικρή αγωγιμότητα και δεν είναι ευχερής η εφαρμογή της υποπίεσης σε μεγάλη ζώνη γύρω από τη γεώτρηση. Η μέθοδος αυτή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την απορρύπανση υπόγειων υδροφορέων από επιπλέοντα ελαφρά πετρελαιοειδή. Με την εφαρμογή της υποπίεσης, τα πτητικά πετρελαιοειδή που επιπλέουν στην επιφάνεια του υπόγειου νερού εξατμίζονται και συλλέγονται μαζί με τον αναρροφούμενο αέρα.

Σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτής της μεθόδου με αποτελέσματα της μεθόδου της διπλής άντλησης (βλέπε παρακάτω) για την ανάκτηση ελαφρών πετρελαιοειδών από την επιφάνεια υπόγειων υδροφορέων δείχνει ότι συχνά η



Σχήμα 8.1 Σύστημα κατά τη διαδικασία απορρύπανσης εδαφών με εφαρμογή υποπίεσης

μέθοδος της υποπίεσης είναι ταχύτερη και έχει μικρότερο κόστος. Επιπλέον, η μέθοδος της υποπίεσης πλεονεκτεί στο ότι μπορεί να απορρυπάνει ταυτοχρόνως τόσο τη μερικώς κορεσμένη ζώνη όσο και τους επιπλέοντες υδρογονάνθρακες, ενώ η μέθοδος της διπλής άντλησης περιορίζεται στην ανάκτηση των υδρογονανθράκων που επιπλέουν στο υπόγειο νερό. Το κυριότερο μειονέκτημα της μεθόδου εφαρμογής υποπίεσης είναι η ανάγκη απομόνωσης της μερικώς κορεσμένης ζώνης του εδάφους από τον ατμοσφαιρικό αέρα, ώστε να είναι αποδοτική η εφαρμογή της υποπίεσης. Τούτο συνήθως γίνεται με προσωρινή κάλυψη της επιφάνειας του εδάφους με συνθετική μεμβράνη, αν και συχνά οι χώροι είναι ήδη καλυμμένοι επιφανειακά με ασφαλτοτάπητα ή κτίρια οπότε η απαίτηση αυτή δεν ισχύει.

Εφαρμογή:

Λόγω ανατροπής βυτιοφόρου μεταφοράς βενζίνης απελευθερώθηκαν 2 m³ καυσίμου στο έδαφος. Μετρήσεις που έγιναν στην περιοχή έδειξαν ότι το καύσιμο έχει διαχυθεί σε μια έκταση 450 m² (15m x 30m) μέχρι βάθους 10 m από την επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή έχει επηρεασθεί όγκος 4500 m³ εδάφους. Η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα είναι σε βάθος 15 m και δεν έχει επηρεασθεί από το καύσιμο (το οποίο συγκρατήθηκε στους πόρους του εδάφους). Το πορώδες του εδαφικού σχηματισμού είναι $\eta = 30\%$, οπότε ο μέσος βαθμός κορεσμού του εδάφους με το καύσιμο είναι:

$$S_r = \frac{V_\beta}{V_v} = \frac{V_\beta}{\eta V} = \frac{2}{0.30 \times 4500} = 0.148\%$$

Για την απορρύπανση του εδάφους αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος με εφαρμογή υποπίεσης. Συγκεκριμένα, διανοίχθηκαν τρεις γεωτρήσεις βάθους 13 μέτρων σε αποστάσεις μεταξύ τους 12 μέτρων. Από τις γεωτρήσεις γίνεται άντληση αέρα με εφαρμογή μικρής υποπίεσης (κατά 0.1 bar μικρότερη από την ατμοσφαιρική). Η συνολική παροχή του αντλούμενου αέρα είναι 900 lt/min (δηλαδή 300 lt/min από κάθε γεωτρήση). Ζητείται να υπολογισθεί ο χρόνος που θα απαιτηθεί για την ανάκτηση του καυσίμου.

Δίνονται:

- Το μοριακό βάρος του καυσίμου: $m = 190 \text{ gr/mole}$
- Η πυκνότητα του καυσίμου: $\rho = 0.8 \text{ Mg/m}^3$
- Θερμοκρασία του αέρα των πόρων: 14° C
- Μερική πίεση των ατμών του καυσίμου (υπό συνθήκες κορεσμού) στη θερμοκρασία των 14° C και για πίεση ελαφρά μικρότερη της ατμοσφαιρικής (0.9 bar): $p_i = 0.15 \text{ bar}$
- Παγκόσμιος σταθερά αερίων: $R = 0.0821 \text{ lt}\cdot\text{atm/mole}\cdot\text{grad}$
- Λόγω πλημμελούς αερισμού των εδαφικών πόρων κατά την εφαρμογή της μεθόδου, ο αντλούμενος αέρας είναι μερικώς κορεσμένος με καύσιμο και συγκεκριμένα είναι στο 75% του πλήρους κορεσμού. Τούτο οφείλεται στον τρόπο κυκλοφορίας του αέρα διαμέσου των εδαφικών πόρων κατά την οποία δεν αερίζεται πλήρως το σύνολο των εδαφικών πόρων.

Λύση:

Σύμφωνα με το νόμο των ιδανικών αερίων:

$$pV = nRT$$

όπου: $p = \eta$ μερική πίεση του καυσίμου στο αντλούμενο αέριο που είναι ίση με

$$\xi p_i = 0.75 \times 0.15 = 0.1125 \text{ bar}$$

$V =$ ο αντλούμενος όγκος αέρα που είναι ίσος με 900 lt/min

$T =$ η θερμοκρασία του αέρα σε βαθμούς Κελβίν που είναι $273 + 14 = 287 \text{ grad}$

$n =$ ο αριθμός των moles του καυσίμου που περιέχεται στον αντλούμενο αέρα

Οπότε:

$$n = \frac{0.1125 \times 900}{0.0821 \times 287} = 4.297 \text{ moles}$$

δηλαδή η μάζα του είναι:

$$M = n \cdot m = 4.297 \times 190 = 816.4 \text{ gr}$$

και ο όγκος του είναι:

$$V = \frac{M}{\rho} = \frac{816.4}{0.8} = 1020.5 \text{ cm}^3 = 1.020 \text{ lt}$$

Ο όγκος αυτός του καυσίμου αντλείται σε μια ώρα, και συνεπώς για την άντληση του συνόλου (2000 lt καυσίμου) θα απαιτηθούν:

$$t = 2000 / 1.020 = 1961 \text{ ώρες} = 82 \text{ ημέρες}$$

Από το ανωτέρω χαρακτηριστικό παράδειγμα προκύπτει ότι οι διαδικασίες απορρύπανσης είναι ιδιαίτερα χρονοβόρες και συνεπώς έχουν μεγάλο κόστος. Σημειώνεται επίσης ότι η βενζίνη είναι πολύ πτητική ουσία. Συνεπώς αν η ρύπανση είχε προέλθει από πετρέλαιο diesel αντί βενζίνης, ο απαιτούμενος χρόνος θα ήταν πολύ μεγαλύτερος (4-6 μήνες).

Εναλλακτικά, θα μπορούσε να εξετασθεί η εκσκαφή και μεταφορά του εδάφους (4500 m³) σε ειδικούς κλιβάνους, όπου με θέρμανση (thermal treatment) εξατμίζεται ευκολότερα η βενζίνη¹¹ και ανακτάται ευκολότερα. Βεβαίως, στην περίπτωση αυτή πρέπει να συνυπολογισθεί και το κόστος εκσκαφής και μεταφοράς του εδάφους στη μονάδα επεξεργασίας. Τέλος, θα μπορούσε να εξετασθεί και η περίπτωση εκσκαφής και αερισμού του εδάφους επιτόπου με συνεχή αναμόχλευση, οπότε όμως οι ατμοί της βενζίνης απελευθερώνονται στον αέρα.

8.3 Τεχνολογίες απορρύπανσης υδροφορέων

8.3.1 Βιολογική αποκατάσταση

Η μέθοδος της βιολογικής αποκατάστασης (bio-remediation) για την απορρύπανση υπόγειων υδροφορέων βασίζεται στις ίδιες αρχές με την ανάλογη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την απορρύπανση των εδαφών πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα (βλέπε εδάφιο 8.2.1). Η κύρια διαφορά οφείλεται στο ότι κάτω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα είναι δυσχερής ο αερισμός (δηλαδή η παρουσία οξυγόνου), και συνεπώς υπάρχει κίνδυνος να συμβεί αναερόβια αποσύνθεση, η οποία καταλήγει στην παραγωγή μεθανίου και υδροθείου, που προσδίδουν άσχημη οσμή στο νερό. Για το λόγο αυτό, στις περιπτώσεις που προβλέπεται να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της βιολογικής αποκατάστασης υπόγειων υδροφορέων, χρησιμοποιείται τεχνητός αερισμός με την εισπύση αέρα μέσω βαθειών γεωτρήσεων. Επιπλέον, κατά την εφαρμογή της μεθόδου στους υδροφορείς είναι δυσχερής ο έλεγχος των λοιπών συνθηκών που απαιτούνται για τη δράση των μικρο-οργανισμών (θερμοκρασία, pH, παροχή θρεπτικών ουσιών κλπ), με συνέπεια η αποτελεσματικότητα της μεθόδου να είναι μικρή. Έτσι, η μέθοδος αυτή σπανίως χρησιμοποιείται για την απορρύπανση υδροφορέων ή χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με κάποια άλλη μέθοδο απορρύπανσης.

8.3.2 Απορρύπανση με άντληση διαλυμένων ρύπων

Κατά τη μέθοδο της άντλησης και απορρύπανσης (pump and treat) υδροφορέων από διαλυμένους ρύπους που αναμειγνύονται με το νερό του υδροφορέα, το υπόγειο νερό αντλείται με σύστημα γεωτρήσεων, οδηγείται σε μονάδα επεξεργασίας για την απορρύπανσή του¹² και τέλος επανατροφοδοτείται στον υδροφόρο ορίζοντα από άλλες γεωτρήσεις. Ο υπολογισμός του απαιτούμενου αριθμού γεωτρήσεων για την άντληση, οι αντλούμενες ποσότητες κλπ. γίνονται με τις μεθόδους που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3.

Η απορρύπανση των υπόγειων υδροφορέων από υγρούς ρύπους που είναι βαρύτεροι από το νερό και συνεπώς βυθίζονται χωρίς να αναμειγνύονται είναι δυσχερής. Τέτοιοι ρύποι είναι τα πυκνά πετρελαιοειδή (Dense Non-Aqueous Phase Liquids, DNAPLs), όπως οι χλωριωμένοι διαλύτες (τριχλωροαιθέριο-TCE, τετραχλωροαιθέριο-PERC κλπ), τα απόβλητα από τις ξυλουργικές βιομηχανίες (κρεόζοτο, πενταχλωροφαινόλη κλπ) τα εντομοκτόνα (DDT, Aldrin, Endrin κλπ) και άλλα. Η ρύπανση από ρύπους που δεν αναμειγνύονται με το νερό αλλά επιπλέουν

¹¹ λόγω αύξησης της μερικής πίεσης των ατμών της βενζίνης σε υψηλή θερμοκρασία

¹² με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται και για την απορρύπανση των επιφανειακών υδάτων

(ως ελαφρύτεροι από το νερό), όπως είναι η ρύπανση από ελαφρά πετρελαιοειδή (Light Non-Aqueous Phase Liquids, LNAPLs) εξετάζονται στο επόμενο εδάφιο.

8.3.3 Απορρύπανση με άντληση επιπλεόντων ρύπων

Μια από τις πλέον συνήθεις ρυπάνσεις είναι η ρύπανση του εδάφους με ελαφρά πετρελαιοειδή¹³ λόγω τυχαίων διαφυγών από δεξαμενές αποθήκευσης σε διυλιστήρια, βιομηχανίες αλλά και κατοικίες. Τα πετρελαιοειδή που διαφεύγουν στο έδαφος συνήθως κατακρατούνται στους πόρους του εδάφους εντός της μερικώς κορεσμένης ζώνης (λόγω τριχοειδών κυρίως δυνάμεων). Εάν τα πετρελαιοειδή είναι σε μεγάλες ποσότητες, τελικώς υπερβαίνουν τη δυνατότητα συγκράτησης των εδαφικών πόρων, φθάνουν στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα και συγκεντρώνονται στην επιφάνειά του¹⁴ δημιουργώντας μια κηλίδα (plume). Με την πάροδο του χρόνου, η κηλίδα διαχέεται στην οριζόντια διεύθυνση και μπορεί να καταλάβει μεγάλη έκταση φθάνοντας σε μεγάλη απόσταση από το σημείο της διαρροής. Εάν η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα υπόκειται σε εποχιακές διακυμάνσεις, η επιπλέοντα κηλίδα παρακολουθεί τη διακύμανση της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα και ρυπαίνει τη μερικώς κορεσμένη ζώνη του εδάφους καθ' ύψος σε μεγάλη απόσταση από την πηγή της ρύπανσης. Η ρύπανση αυτού του τύπου είναι πολύ συνήθης σε περιοχές διυλιστηρίων αλλά παρουσιάζεται και σε βιομηχανικές ακόμη και σε αστικές περιοχές.

Η διαπίστωση της έκτασης της ρύπανσης από επιπλέοντα πετρελαιοειδή μπορεί να γίνει με ερευνητικές γεωτρήσεις που φθάνουν μέχρι τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της γεώτρησης λαμβάνονται εδαφικά δείγματα από τη μερικώς κορεσμένη ζώνη στα οποία προσδιορίζεται η περιεκτικότητα σε πετρελαιοειδή με χημικές μεθόδους (π.χ. με πύρωση). Με την πάροδο επαρκούς χρόνου, εντός της γεώτρησης συγκεντρώνονται επιπλέοντα πετρελαιοειδή και τελικώς αποκαθίστανται συνθήκες υδροστατικής ισορροπίας, οπότε το πάχος της στρώσης των υδρογονανθράκων στην επιφάνεια του νερού ισούται πρακτικά με το πάχος της πλήρως κορεσμένης με πετρελαιοειδή στοιβάδας εντός του εδάφους (Σχήμα 8.2). Πάνω από τη ζώνη του εδάφους που είναι κορεσμένη με πετρελαιοειδή, υπάρχει μια μερικώς κορεσμένη ζώνη, όπου στους πόρους του εδάφους συγκρατείται πετρέλαιο (λόγω τριχοειδών δυνάμεων και πρόσφυσης των υδρογονανθράκων στην επιφάνεια των εδαφικών κόκκων). Ο υπολογισμός του όγκου της κηλίδας των πετρελαιοειδών γίνεται με πολλαπλασιασμό του πάχους της (που μετράται στο εσωτερικό της γεώτρησης) επί την επιφάνεια της κηλίδας (που εκτιμάται με τη διάνοιξη πολλών γεωτρήσεων στην περιοχή που έχει ρυπανθεί).

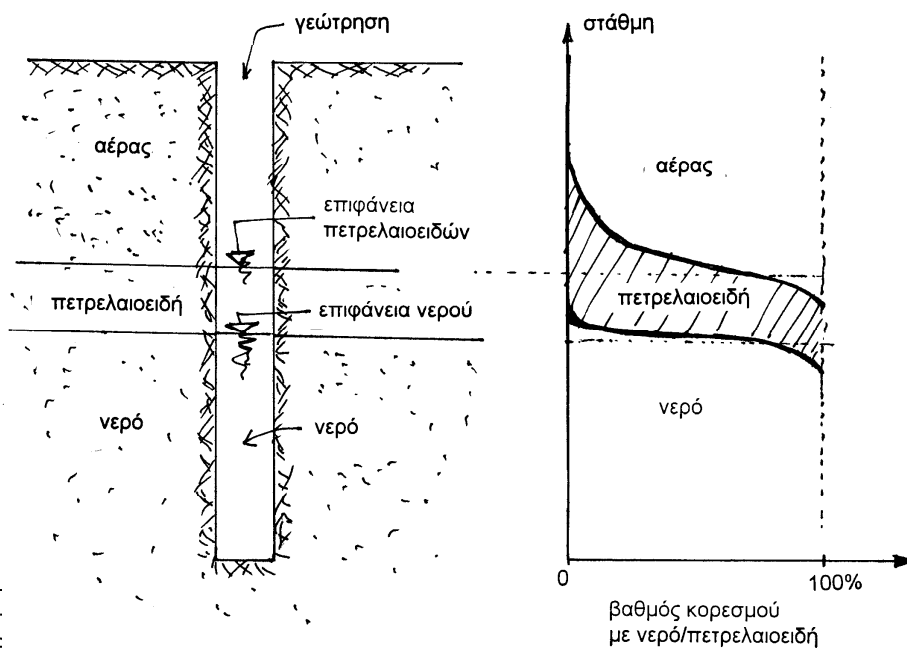
¹³ όπως πετρέλαιο, βενζίνη, κηροζίνη κλπ, τα οποία γενικώς ονομάζονται LNAPLs (Light Non-Aqueous Phase Liquids)

¹⁴ ως ελαφρότερα από το νερό

Η απορρύπανση των υπόγειων υδροφορέων από επιπλέοντες ρύπους (συνήθως ελαφρά πετρελαιοειδή) γίνεται με το σύστημα της διπλής άντλησης του επιπλέοντος πετρελαιοειδούς (dual pump free product recovery). Μια τυπική διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 8.3. Η μέθοδος συνίσταται στην άντληση νερού από τον υδροφορέα μέσω γεώτρησης, ώστε να δημιουργηθεί ένας κώνος ταπείνωσης της στάθμης του υδροφορέα. Ο επιπλέον ρύπος παρακολουθεί την επιφάνεια του κώνου ταπείνωσης και, λόγω της υδραυλικής κλίσης που δημιουργείται, κινείται προς τη γεώτρηση, απ' όπου αντλείται με μια δεύτερη αντλία (skimmer pump). Είναι προφανές ότι λόγω της παρουσίας δυο αντλιών, η απόδοση της μεθόδου εξαρτάται από τη ρύθμιση των παροχών τους (και ιδίως από την παροχή της αντλίας νερού), δηλαδή από την επιτυγχανόμενη ταπείνωση της στάθμης του υδροφορέα. Εκ πρώτης όψεως φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ταπείνωση της στάθμης του υδροφορέα, τόσο αυξάνει η παροχή άντλησης του επιπλέοντος ρύπου και συνεπώς αυξάνει η απόδοση της μεθόδου. Όμως, θα πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι αυξάνοντας την ταπείνωση της στάθμης του υδροφορέα, τα επιπλέοντα πετρελαιοειδή ρυπαίνουν τον υδροφορέα καθ' ύψος σε όλη την έκταση του κώνου ταπείνωσης και αυξάνεται η ποσότητα του ρύπου που συγκρατείται στους πόρους του υδροφορέα, χωρίς να μπορεί να ανακτηθεί με τη μέθοδο της άντλησης και να απαιτεί τη χρήση άλλων μεθόδων (όπως η εφαρμογή υποπίεσης, η θέρμανση κλπ). Για το λόγο αυτό, η ρύθμιση της ταπείνωσης της στάθμης θα πρέπει να γίνεται με προσοχή¹⁵.

Επιπλέον, για μια συγκεκριμένη ταπείνωση της στάθμης του υδροφορέα, η αντλούμενη παροχή του επιπλέοντος ρύπου απαιτεί προσεκτική ρύθμιση. Αν η αντλούμενη παροχή του ρύπου είναι πολύ μικρή, τότε η απόδοση της μεθόδου μειώνεται. Αντίθετα, αν η αντλούμενη παροχή του ρύπου είναι πολύ μεγάλη, τότε η ανώτερη αντλία θα αρχίσει να παράγει μίγμα πετρελαίου με νερό, τα οποία θα πρέπει να διαχωρισθούν αυξάνοντας το κόστος λειτουργίας της μεθόδου.

Στα επόμενα παρουσιάζεται μια μέθοδος υπολογισμού των βέλτιστων παροχών άντλησης και της επιτυγχανόμενης ταπείνωσης της στάθμης του



¹⁵ κατά και οι τιμές οφείλονται στη μεταβολή των ενεργών τάσεων και μπορεί να εκτιμηθεί με τις συνήθεις μεθόδους της Εξίσωσης 8.10. Η ρύθμιση του υπόγειου οριζοντα με επιπλέοντα πετρελαιοειδή (LNAPLs) αι υπόψη ηση αυτή

υδροφορέα. Γίνεται χρήση των σχέσεων που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3 και αφορούν θέματα αντλήσεων από υδροφορείς.

Η ταπείνωση (s) της στάθμης του υδροφορέα¹⁶ στο εσωτερικό της γεώτρησης, που αντιστοιχεί σε μια παροχή άντλησης νερού (Q_w), είναι:

$$s = H - \sqrt{H^2 - \frac{Q_w}{\pi k_w} \ln\left(\frac{R}{r_w}\right)} \quad (8.1)$$

όπου: H είναι το πάχος του υδροφορέα που επηρεάζεται από την άντληση

k_w είναι ο συντελεστής αγωγιμότητας του υδροφορέα για διήθηση νερού

r_w είναι η ακτίνα της γεώτρησης άντλησης και

$R = 1.5 \sqrt{\frac{T_w t}{S_w}}$ είναι η ακτίνα επιρροής της άντλησης, η οποία ως γνωστόν

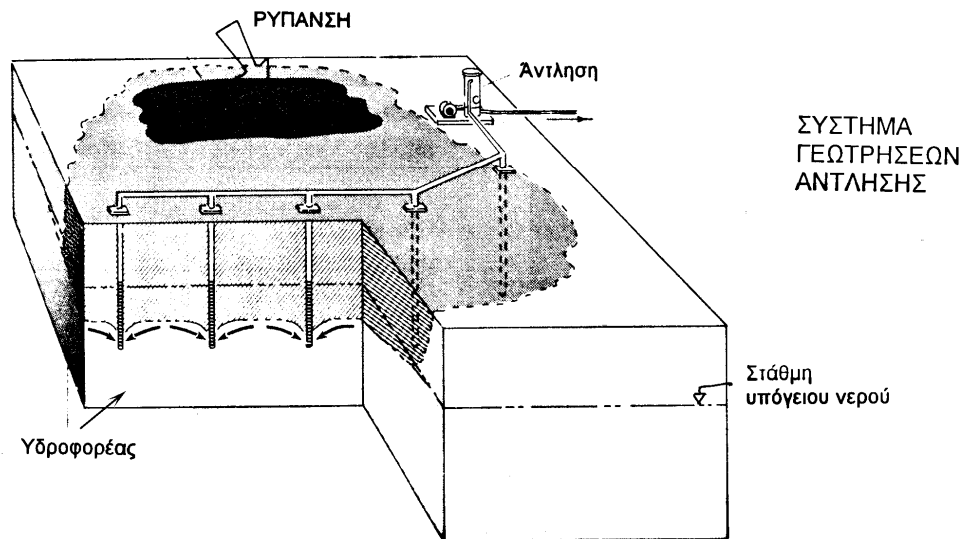
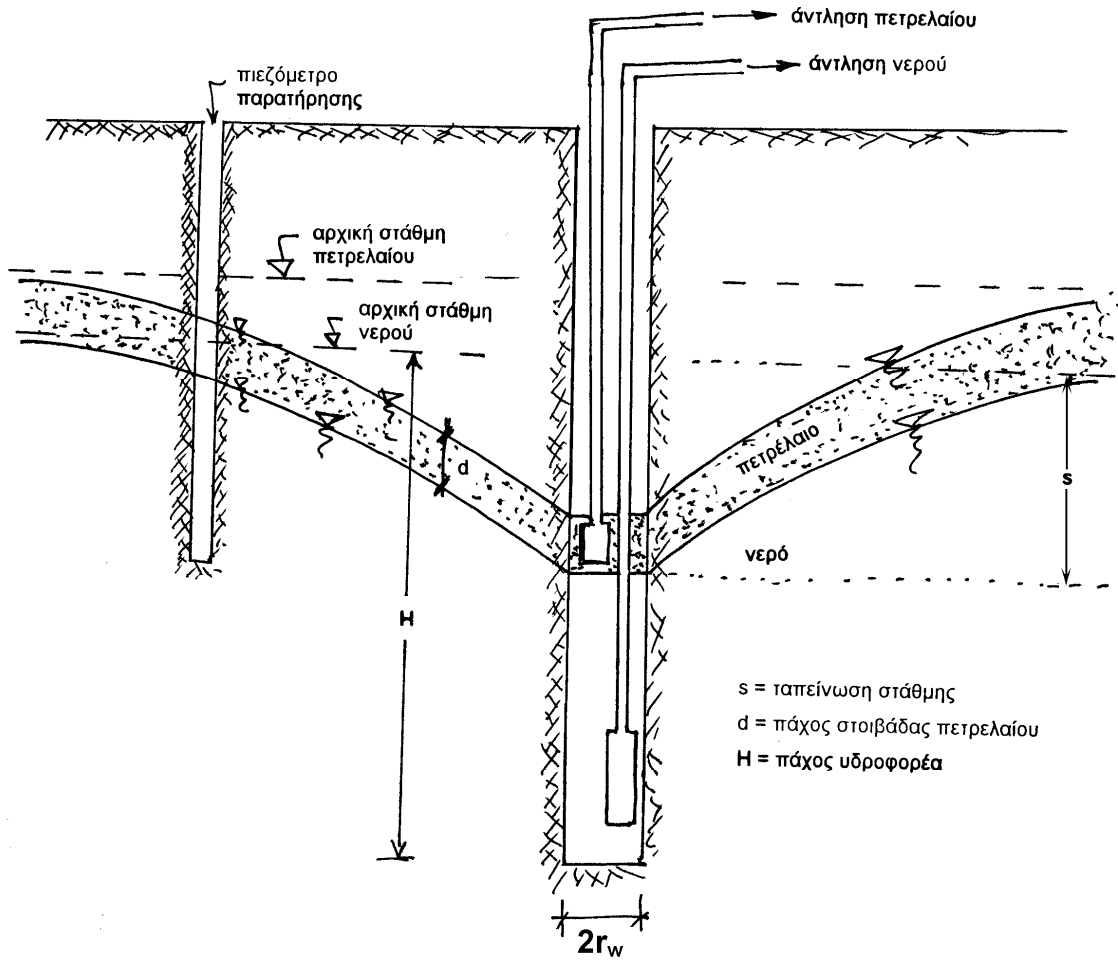
εξαρτάται από το χρόνο (t) που μεσολαβεί από την έναρξη της άντλησης, τη διαβιβαστικότητα $T_w = k_w H$ του υδροφορέα και το συντελεστή εναποθήκευσης (S_w) του υδροφορέα.

Η παραπάνω σχέση αφορά υδροφορείς με ελεύθερη επιφάνεια, παραδοχή που συνήθως ισχύει στην περίπτωση των υδροφορέων που έχουν ρυπανθεί με επιπλέοντες ρύπους.

Η παροχή του πετρελαίου που κινείται προς την οπή της γεώτρησης άντλησης μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$Q_o = \frac{2\pi k_o ds}{\ln(R/r_w)} \quad (8.2)$$

¹⁶ τόσο της στάθμης του νερού όσο και της στάθμης του επιπλέοντος πετρελαιοειδούς



Σχήμα 8.3: Μέθοδος διπλής άντλησης για απορρύπανση από επιπλέοντες ρύπους (π.χ. πετρελαιοειδή)

όπου: d είναι το πάχος της στοιβάδας του πετρελαίου που επιπλέει στην επιφάνεια του υδροφορέα και

k_o είναι ο συντελεστής αγωγιμότητας του υδροφορέα για διήθηση με πετρέλαιο.

Ως γνωστόν (βλέπε Κεφάλαιο 3), ισχύει:

$$k_o = k_w \left(\frac{\rho_o / \rho_w}{\mu_o / \mu_w} \right)$$

όπου (ρ_o , ρ_w) είναι οι πυκνότητες του πετρελαίου και του νερού και (μ_o , μ_w) οι συντελεστές ιξώδους (viscosity) του πετρελαίου και του νερού.

Η σχέση 8.2 έχει προκύψει με την παραδοχή σταθερού πάχους (d) της στοιβάδας του πετρελαίου και είναι αντίστοιχη με τη σχέση της παροχής προς αντλούμενη γεώτρηση για υδροφορείς υπό πίεση (βλέπε Κεφάλαιο 3), επειδή και στις δυο περιπτώσεις το πάχος της εδαφικής στρώσης διαμέσου της οποίας γίνεται η διήθηση είναι σταθερό.

Εφαρμογή:

Ένας αλλουβιακός υδροφορέας έχει πάχος $H = 25$ m, υδαταγωγιμότητα για νερό $k_w = 5 \times 10^{-5}$ m/sec και συντελεστή εναποθήκευσης¹⁷ $S_w = 0.15$. Στην επιφάνεια του υδροφορέα έχει εντοπισθεί κηλίδα από επιπλέοντα ρύπο (πετρέλαιο diesel κατηγορίας API 40), ο οποίος έχει πυκνότητα $\rho_o = 0.8$ Mg/m³ και ιξώδες δεκαπλάσιο από το νερό ($\mu_o / \mu_w = 10$). Το πάχος της στοιβάδας του πετρελαίου είναι $d = 0.60$ m. Αποφασίσθηκε η άντληση να γίνει με μια γεώτρηση διαμέτρου 50 cm (δηλαδή $r_w = 0.25$ m) και να χρησιμοποιηθεί άντληση του νερού με παροχή $Q_w = 5$ lt/sec = 18 m³/ώρα. Ζητείται να προσδιορισθεί η παροχή άντλησης του πετρελαίου ένα μήνα (30 ημέρες) μετά την έναρξη εφαρμογής της μεθόδου.

Λύση:

Η διαβιβατικότητα του υδροφορέα είναι:

$$T_w = 5 \times 10^{-5} \times 25 = 1.25 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$$

Η ακτίνα επιρροής της άντλησης, μετά από 30 ημέρες θα είναι:

$$R = 1.5 \sqrt{\frac{1.25 \times 10^{-3} \times 30 \times 86400}{0.15}} = 220.5 \text{ m}$$

Η ταπείνωση της στάθμης του υδροφορέα στο εσωτερικό της γεώτρησης μετά από 30 ημέρες θα είναι:

$$s = 25 - \sqrt{25^2 - \frac{0.005}{3.14 \times 5 \times 10^{-5}} \ln\left(\frac{220.5}{0.25}\right)} = 4.78 \text{ m}$$

Ο συντελεστής αγωγιμότητας (διαπερατότητας) του υδροφορέα για διήθηση πετρελαίου θα είναι:

$$k_o = 5 \times 10^{-5} \times 0.8 / 10 = 4 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$$

Οπότε, η βέλτιστη παροχή άντλησης του πετρελαίου θα είναι:

$$Q_o = \frac{2 \times 3.14 \times 4 \times 10^{-6} \times 0.60 \times 4.78}{\ln\left(\frac{220.5}{0.25}\right)} = 1.06 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec} = 38.2 \text{ lt/ώρα}$$

Από τα ανωτέρω είναι προφανές ότι ο ρυθμός άντλησης του πετρελαίου είναι πολύ βραδύς (38.2 λίτρα ανά ώρα), ενώ στο ίδιο χρονικό διάστημα θα αντληθούν 18 κυβικά μέτρα νερού. Για να γίνει κατανοητός ο βραδύς ρυθμός της απορρύπανσης (και συνεπώς το μεγάλο κόστος των μεθόδων απορρύπανσης), υπολογίζεται παρακάτω ο όγκος του πετρελαίου που βρίσκεται εντός της ζώνης επιρροής της γεώτρησης, θεωρώντας ότι η κηλίδα του πετρελαίου έχει διάμετρο 40 m ($R_o = 20$ m) και ότι το ενεργό πορώδες του αλλουβιακού σχηματισμού για το πετρέλαιο είναι $\eta = 15\%$. Ο όγκος του πετρελαίου θα είναι:

$$V_o = \pi R_o^2 d \eta = 3.14 \times 20^2 \times 0.60 \times 0.15 = 113 \text{ m}^3$$

Συνεπώς, εάν ο ρυθμός άντλησης του πετρελαίου και η απόδοση της μεθόδου διατηρηθούν σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια της άντλησης ($Q_o = 38.2$ lt/ώρα), η άντληση θα πρέπει να διαρκέσει:

$$t = 113000 / 38.2 = 2958 \text{ ώρες} = 123 \text{ ημέρες}$$

¹⁷ για λειτουργία με ελεύθερη επιφάνεια

Είναι προφανές ότι με το πέρας της άντλησης θα έχει ανακτηθεί ένα μέρος μόνον του πετρελαίου και συγκεκριμένα η ποσότητα που δεν συγκρατείται στους πόρους του εδάφους μέσω τριχοειδών δυνάμεων κλπ. Η υπόλοιπη ποσότητα (που συχνά είναι σημαντική) θα πρέπει να ανακτηθεί με άλλη μέθοδο. Από τα ανωτέρω χαρακτηριστικά αποτελέσματα προκύπτει σαφώς ότι το κόστος της απορρύπανσης είναι πολύ υψηλό και οι σχετικές εργασίες είναι χρονοβόρες.

8.3.4 Απορρύπανση με εφαρμογή υποπίεσης

Η μέθοδος αυτή (vacuum extraction) είναι ανάλογη της μεθόδου για την απορρύπανση της μερικώς κορεσμένης ζώνης των εδαφών από πτητικούς ρύπους (βλέπε ανωτέρω). Στην περίπτωση υδροφορέων, είναι προφανές ότι η εφαρμογή της υποπίεσης δεν μπορεί να γίνει κάτω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα αλλά μόνον εντός της μερικώς κορεσμένης ζώνης¹⁸, με συνέπεια να επηρεάζεται μόνον η επιφάνεια του υδροφορέα. Έτσι, η μέθοδος είναι αποδοτική για την απορρύπανση από επιπλέοντες πτητικούς ρύπους (όπως είναι τα ελαφρά κλάσματα της απόσταξης των πετρελαιοειδών: βενζίνη κλπ). Η εφαρμογή της στις ΗΠΑ κατά την τελευταία δεκαετία δείχνει ότι συχνά η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί σε σχέση με τη μέθοδο της διπλής άντλησης των επιπλεόντων ρύπων (βλέπε παραπάνω) ως προς το κόστος, τον απαιτούμενο χρόνο και ότι ταυτοχρόνως γίνεται ανάκτηση τόσο των επιπλεόντων υδρογονανθράκων όσο και των υδρογονανθράκων που συγκρατούνται στους πόρους του εδάφους (εντός της μερικώς κορεσμένης ζώνης). Το κυριότερο μειονέκτημα της μεθόδου εφαρμογής υποπίεσης είναι η ανάγκη απομόνωσης της μερικώς κορεσμένης ζώνης του εδάφους από τον ατμοσφαιρικό αέρα, ώστε να είναι αποδοτική η εφαρμογή της υποπίεσης. Τούτο συνήθως γίνεται με προσωρινή κάλυψη της επιφάνειας του εδάφους με συνθετική μεμβράνη, αν και συχνά οι χώροι είναι ήδη καλυμμένοι επιφανειακά με ασφαλτοτάπητα ή κτίρια, οπότε η απαίτηση αυτή δεν ισχύει.

Στο εδάφιο 8.2.4 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου άντλησης μέσω υποπίεσης για την ανάκτηση πτητικών υδρογονανθράκων από τη μερικώς κορεσμένη ζώνη του εδάφους. Ανάλογη μέθοδος υπολογισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την ανάκτηση επιπλεόντων ρύπων, με τη διαφορά ότι η απόδοση της μεθόδου είναι μικρότερη επειδή είναι δυσχερέστερος ο αερισμός της επιφάνειας του υδροφορέα.

8.3.5 Απορρύπανση υδροφορέων από βαρέα μέταλλα

Η απορρύπανση υδροφορέων από βαρέα μέταλλα (υδράργυρος, μόλυβδος κλπ) συνήθως γίνεται μέσω των μεθόδων φυσικής εξασθένισης, με την προσρόφηση των ιόντων των βαρέων μετάλλων στην επιφάνεια των αργιλικών ορυκτών και την ακινητοποίησή τους. Η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική και κυρίως δεν έχει κόστος. Μια άλλη μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η απορρύπανση με εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος (electro-reclamation). Κατά τη μέθοδο αυτή, στον υδροφορέα εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού μέσω ηλεκτροδίων και τα βαρέα μέταλλα συλλέγονται στην άνοδο.

8.4 Προστασία από την επέκταση της ρύπανσης

8.4.1 Γενικά

Οι τεχνολογίες προστασίας από την επέκταση της ρύπανσης εδαφών και υδροφορέων αποτελούν ένα πολύ σημαντικό αντικείμενο της Περιβαλλοντικής

¹⁸ μέσω εφαρμογής υποπίεσης σε σύστημα γεωτρήσεων

Γεωτεχνικής επειδή συμβάλλουν στην πρόληψη των δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την επέκταση της ρύπανσης. Επιπλέον, το κόστος των συστημάτων προστασίας είναι σημαντικά μικρότερο (τουλάχιστον κατά μια τάξη μεγέθους) από το κόστος της αντίστοιχης απορρύπανσης. Οι μέθοδοι προστασίας από την επέκταση της ρύπανσης εδαφών και υδροφορέων περιλαμβάνουν:

1. Συστήματα κάλυψης της επιφάνειας περιοχών που έχουν ρυπανθεί με σκοπό τον εγκιβωτισμό των ρύπων, ώστε αφενός μεν να μη διασπείρονται στο περιβάλλον με τη μορφή σκόνης, αφετέρου δε να περιορίζεται η κατείδυση των επιφανειακών υδάτων (γεγονός που μπορεί να καταλήξει στη ρύπανση των υπόγειων υδροφορέων της περιοχής).
2. Κατακόρυφα περιμετρικά διαφράγματα με σκοπό τον περιορισμό της επέκτασης της ρύπανσης μέσω της κυκλοφορίας του υπόγειου νερού στην οριζόντια διεύθυνση.
3. Οριζόντια διαφράγματα βάσης, με σκοπό τον περιορισμό της επέκτασης της ρύπανσης μέσω της κίνησης των ρύπων στην κατακόρυφη διεύθυνση.
4. Συστήματα σταθεροποίησης (στερεοποίησης) του εδάφους που έχει ρυπανθεί μέσω ανάμειξής του με υδραυλικά κονιάματα (τσιμέντο, άσβεστο), πολυμερή, ασφαλτικά υλικά ή με έντονη θερμότητα (vitrification).
5. Υδραυλικά συστήματα, όπως συστήματα αναστροφής της διεύθυνσης κίνησης του υπόγειου νερού (κυρίως μέσω εκτεταμένων αντλήσεων), με σκοπό να αποφευχθεί η επέκταση της ρύπανσης προς περιοχές που πρέπει να προστατευθούν.

Οι ανωτέρω μέθοδοι εξετάζονται αναλυτικά στα επόμενα εδάφια. Οι μέθοδοι αυτές δεν αφορούν τα μέτρα προστασίας που λαμβάνονται για τον εγκιβωτισμό του ρυπαντικού φορτίου των αποβλήτων πριν από την απόθεσή τους σε “χωματερές” (όπως στεγανωτικές στρώσεις πυθμένα, συστήματα τελικής κάλυψης κλπ). Τα θέματα αυτά εξετάζονται στο Κεφάλαιο 7.

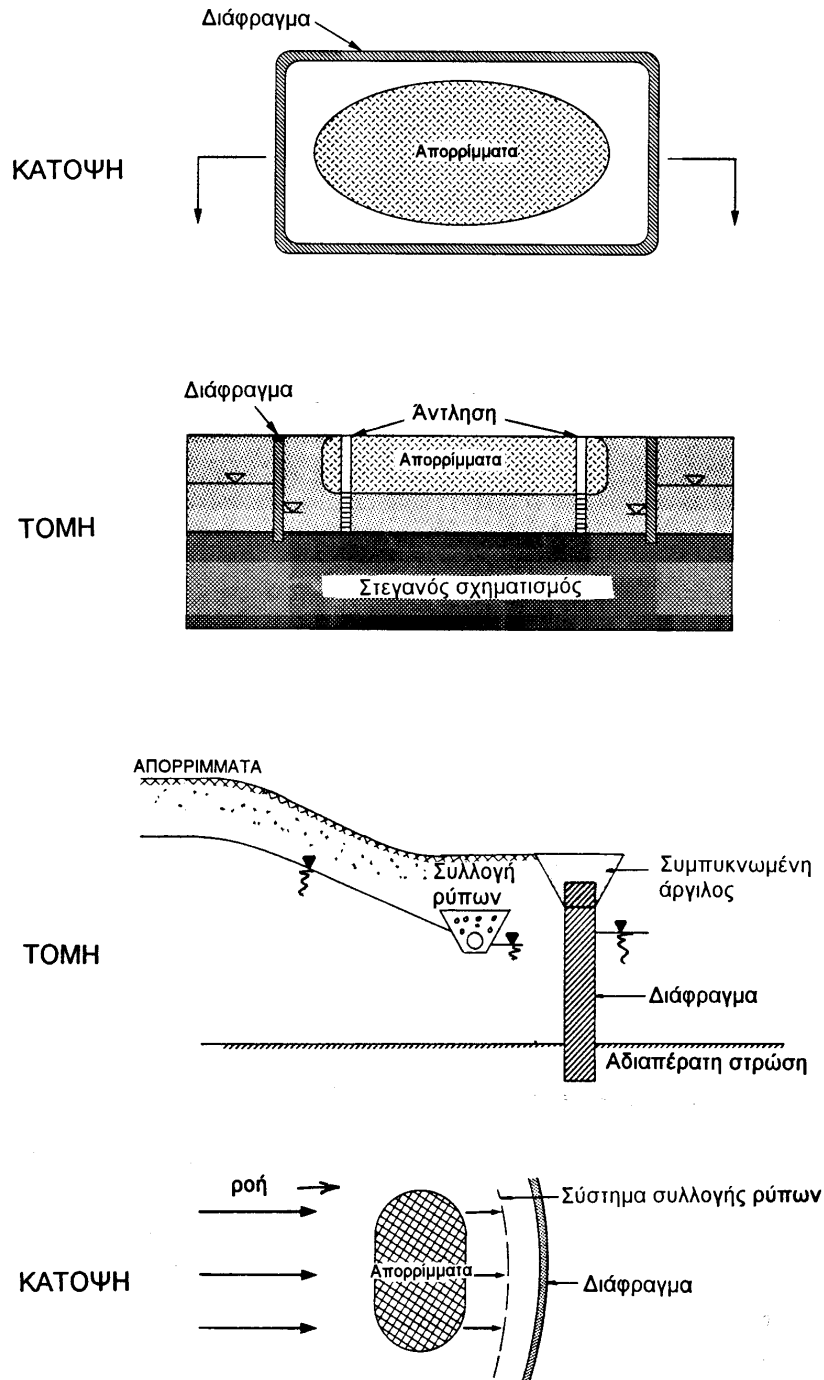
8.4.2 Συστήματα κάλυψης

Η κάλυψη της επιφάνειας εδαφών που έχουν ρυπανθεί είναι ίσως η απλούστερη και φθηνότερη μέθοδος περιβαλλοντικής “αποκατάστασης” περιοχών που έχουν ρυπανθεί, αν και είναι προφανές ότι αποτελεί προσωρινό μέτρο κάλυψης (“κουκουλώματος”) του προβλήματος, παρά τρόπο αποτελεσματικής αντιμετώπισής του. Η περιοχή καλύπτεται συνήθως με ασφαλτικά υλικά, σκυρόδεμα ή ακόμη και “καθαρό” έδαφος. Συχνά κάτω από τις στρώσεις αυτές τοποθετείται συνθετική γεωμεμβράνη για τον περιορισμό της κατείδυσης επιφανειακών υδάτων και της ανάβλυσης αερίων από το έδαφος. Το είδος και το πάχος της σφραγιστικής στρώσης κάλυψης θα πρέπει να είναι αρκετό ώστε οι ρίζες των δένδρων να μην εισέρχονται στο έδαφος που έχει ρυπανθεί¹⁹ και επιπλέον να μην υπάρχει κίνδυνος να αποκαλυφθεί το έδαφος που έχει ρυπανθεί σε περίπτωση εκσκαφών για την τοποθέτηση δικτύων κοινής ωφέλειας, θεμελίωσης έργων κλπ. Τέλος, κατά το σχεδιασμό των συστημάτων κάλυψης, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη 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 οι πιθανές υποχωρήσεις της επιφάνειας λόγω πλημμελούς συμπίκνωσης του υποκείμενου εδάφους.

¹⁹ Ιδιαίτερα στην περίπτωση που εκτιμάται ότι η βλάστηση αυτή μπορεί να εισέλθει στην τροφική αλυσίδα των ανθρώπων

8.4.3 Κατακόρυφα περιμετρικά διαφράγματα

Σε περίπτωση διαφυγής επικίνδυνων ή τοξικών ρύπων από κάποιο χώρο χρήσης ή αποθήκευσης προς το έδαφος, υπάρχει κίνδυνος ρύπανσης του υπόγειου νερού, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να μεταφέρει τους ρύπους προς τα κατάντη και να προκληθεί επέκταση της ρύπανσης. Τυπική περίπτωση ρύπανσης αυτού του τύπου ήταν η διαφυγή ραδιενεργών ουσιών στο υπέδαφος (εκτός όλων των άλλων) κατά το γνωστό πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl το Μάιο 1986. Σε τέτοιες



Σχήμα 8.4: Τυπική διάταξη περιμετρικών διαφραγμάτων για την απομόνωση του εδάφους που έχει ρυπανθεί από επικίνδυνα ή τοξικά απόβλητα

περιπτώσεις, είναι συνήθης η κατασκευή βαθειών περιμετρικών διαφραγμάτων για την απομόνωση του εδάφους κάτω από τη θέση της διαρροής (Σχήμα 8.4). Τα διαφράγματα πρέπει να φθάνουν μέχρι κάποιο αδιαπέρατο υπόστρωμα και συνήθως κατασκευάζονται με τους ακόλουθους τρόπους:

1. Ως συμβατικά διαφράγματα (πάχους 60-100 cm) με τμηματική εκσκαφή και αφαίρεση του εδαφικού υλικού. Η συγκράτηση των τοιχωμάτων της εκσκαφής και η αποφυγή καταπτώσεων συνήθως γίνεται με χρήση υδατικού αιωρήματος μπεντονίτη εντός της εκσκαφής. Το υλικό αυτό, που έχει ειδικό βάρος²⁰ $\gamma = 11.3 \text{ kN/m}^3$, συγκρατεί τα τοιχώματα της εκσκαφής μέσω των εξής μηχανισμών:

(α) Ασκώντας υδροστατικές πιέσεις και συνεπώς αυξάνοντας την ελάχιστη κύρια τάση (σ_3), οπότε αυξάνει και η μέγιστη κύρια τάση (σ_1) που αντιστοιχεί στην αστοχία εφόσον, κατά το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) + 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$

(β) Δημιουργώντας μια αδιαπέρατη στρώση από μπεντονίτη στα τοιχώματα της εκσκαφής, ώστε να μην υπάρχει υδραυλική επικοινωνία μεταξύ του αιωρήματος εντός της εκσκαφής και του υπόγειου νερού στο έδαφος εκτός της εκσκαφής. Με τον τρόπο αυτό, οι υδατικές πιέσεις πόρων εκτός της εκσκαφής παραμένουν χαμηλές²¹ και συνεπώς η αντοχή του υλικού αυξάνει.

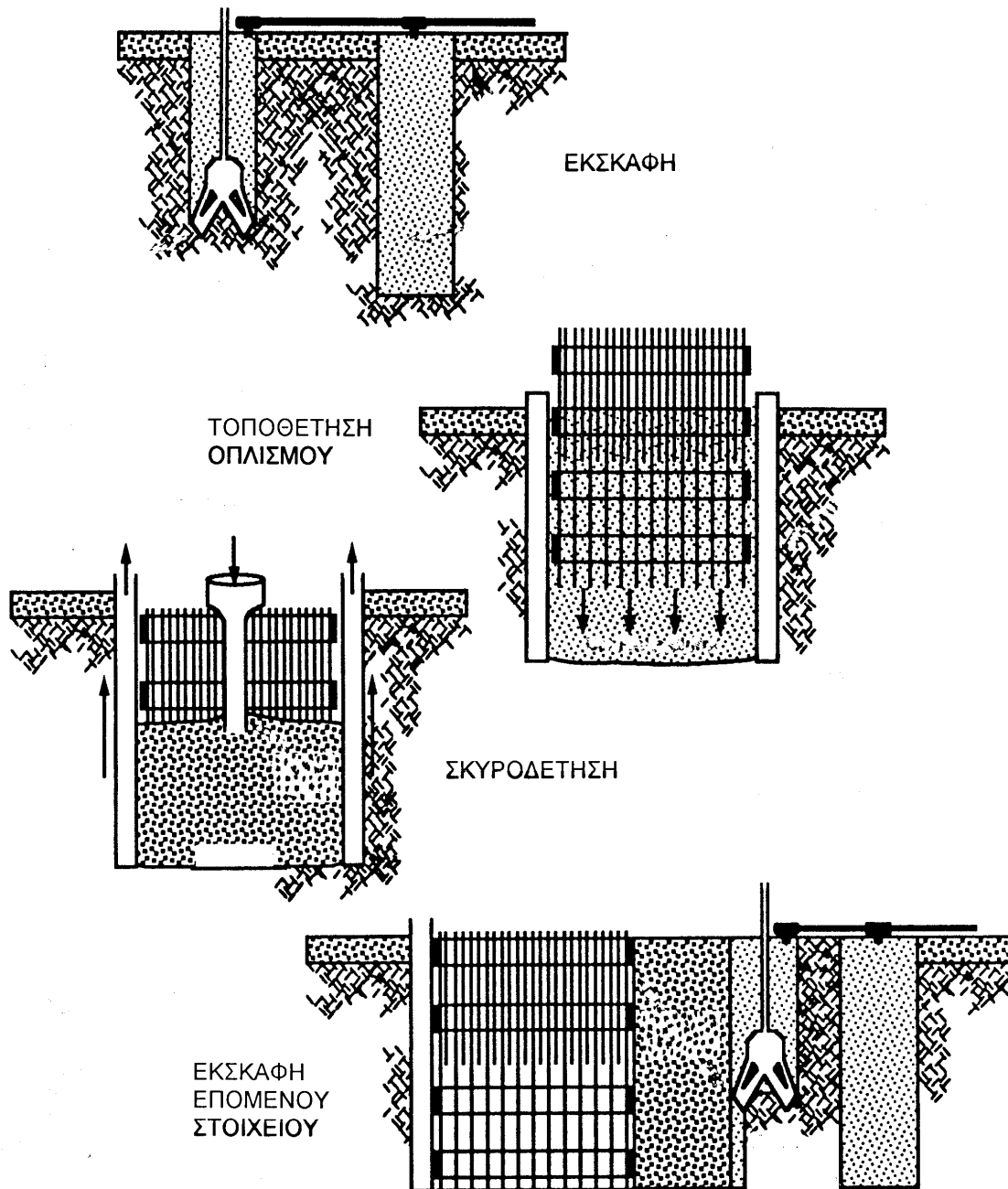
Μετά το πέρας της εκσκαφής, η πλήρωση της οπής συνήθως γίνεται με μίγμα μπεντονίτη-τσιμέντου σε αναλογία 20-60 kg μπεντονίτη, 100-400 kg τσιμέντου και 1000 kg νερού. Συχνά, ένα μέρος του τσιμέντου (10-20%) αντικαθίσταται με ιπτάμενη τέφρα (pulverized fly ash-PFA). Σε περίπτωση παρουσίας θειικών ιόντων με υψηλή συγκέντρωση στο έδαφος, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ειδικά τσιμέντα που είναι ανθεκτικά στην επίδραση των θειικών (sulphate-resisting cement). Το διάφραγμα που δημιουργείται με τον τρόπο αυτό έχει μικρή διαπερατότητα ($< 10^{-9} \text{ m/sec}$) και είναι σχετικώς εύκαμπτο, οπότε μπορεί να αναλάβει κάποιες παραμορφώσεις χωρίς να ρηγματωθεί. Το διάφραγμα που κατασκευάζεται με μίγμα τσιμέντου-μπεντονίτη έχει μικρή διατμητική αντοχή (300-1000 kPa), αλλά αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα επειδή η κύρια λειτουργία του είναι ως στεγανωτική μεμβράνη. Συχνά, για την περαιτέρω μείωση της διαπερατότητας, στο διάφραγμα ενσωματώνεται και συνθετική γεω-μεμβράνη. Επίσης συχνά, αντί του μπεντονίτη, χρησιμοποιούνται ασφαλτικά υλικά για την περαιτέρω μείωση της διαπερατότητας. Η εκσκαφή και σκυροδέτηση του διαφράγματος γίνεται με τα διαδοχικά στάδια που φαίνονται στο Σχήμα 8.5.

2. Ως σύστημα αλληλοτεμνόμενων πασσάλων από σκυρόδεμα. Το σύστημα αυτό αποτελείται από έγχυτους φρεατοπασσάλους που εφάπτονται μεταξύ τους²².

²⁰ και συνεπώς είναι ελαφρά βαρύτερο από το νερό (10 kN/m³)

²¹ η στάθμη του αιωρήματος εντός της εκσκαφής διατηρείται πάντοτε υψηλότερα από τη στάθμη του υπόγειου νερού στο έδαφος

²² συχνά υπάρχει και μικρή επικάλυψη των διατομών των πασσάλων για την εξασφάλιση της στεγανότητας



Σχήμα 8.5: Διαδοχικά στάδια κατασκευής περιμετρικού διαφράγματος

3. Ως διάφραγμα από προκατασκευασμένες μεταλλικές πασσαλοσανίδες, η στεγανότητα του οποίου βελτιώνεται με συστοιχία τσιμεντενέσεων ακριβώς ανάντη του διαφράγματος.
4. Ως διάφραγμα από τσιμεντενέσεις με εισπίεση ενέματος υπό υψηλή πίεση (high pressure jet grouting) ή με ανάμιξη του εδαφικού υλικού με τσιμεντένεμα (deep mixing method).
5. Ως διάφραγμα που δημιουργείται μέσω της πήξης του υπόγειου νερού δια ψύξεως (ground freezing). Είναι προφανές ότι ο τύπος αυτός του διαφράγματος

χρησιμοποιείται μόνον ως προσωρινό μέτρο απομόνωσης (λόγω του κόστους διάτρησης της ψύξεως).

8.4.4 Οριζόντια διαφράγματα βάσης

Η κατασκευή κατακόρυφων περιμετρικών διαφραγμάτων σε μια περιοχή που έχει ρυπανθεί περιορίζει τη δυνατότητα επέκτασης της ρύπανσης στην οριζόντια διεύθυνση. Τα διαφράγματα αυτά συνήθως φθάνουν μέχρι το βάθος κάποιας οριζόντιας εδαφικής στρώσης με μικρή διαπερατότητα, η οποία εξασφαλίζει τη στεγανότητα του συστήματος έναντι επέκτασης της ρύπανσης με κίνηση των ρύπων στην κατακόρυφη διεύθυνση. Εάν δεν υπάρχει κάποια πρακτικώς αδιαπέρατη εδαφική στρώση σε λογικό βάθος, μια λύση είναι η στεγάνωση της βάσης με τεχνητά μέσα. Οι μέθοδοι κατασκευής οριζόντιων στεγανωτικών διαφραγμάτων χωρίς αφαίρεση των υπερκείμενων εδαφικών υλικών είναι περιορισμένες, η στεγάνωση που προσφέρουν δεν είναι αξιόπιστη και επιπλέον έχουν υψηλό κόστος. Η μέθοδος που κυρίως εφαρμόζεται στις περιπτώσεις αυτές είναι η κατασκευή ενός διαφράγματος από οριζόντιες τσιμεντενέσεις με εισπίεση ενέματος υπό υψηλή πίεση (high pressure jet grouting).

8.4.5 Μέθοδοι σταθεροποίησης του εδάφους

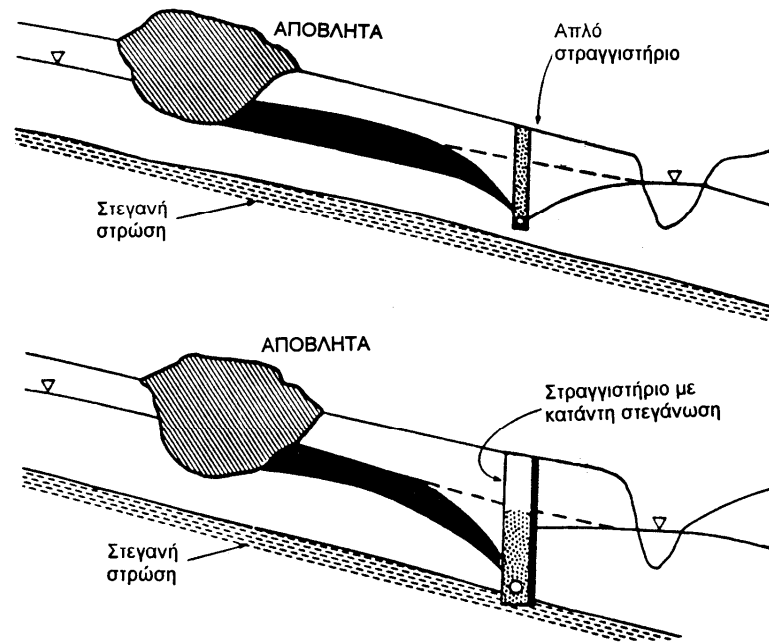
Οι μέθοδοι σταθεροποίησης του εδάφους (soil stabilization, solidification) χρησιμοποιούνται ευρέως για τον περιορισμό επέκτασης της ρύπανσης. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ανάμειξη του εδάφους που έχει ρυπανθεί με κάποιο υλικό, ώστε το μίγμα που δημιουργείται (κονίαμα) να αποκτά μηχανική αντοχή, δηλαδή να στερεοποιείται. Με τον τρόπο αυτό ακινητοποιείται το ρυπαντικό φορτίο εντός της στερεοποιημένης εδαφικής μάζας και η ρύπανση εγκιβωτίζεται. Το σταθεροποιημένο εδαφικό υλικό έχει επίσης μικρή διαπερατότητα και δεν επιτρέπει την κίνηση του υπόγειου νερού διαμέσου της μάζας του, οπότε περιορίζεται και ο κίνδυνος επέκτασης της ρύπανσης λόγω μεταγωγής των ρύπων. Τέλος, ακόμη και στην περίπτωση που η σταθεροποίηση του εδάφους δεν είναι πλήρης, το σταθεροποιημένο υλικό εγκιβωτίζει τυχόν μή σταθεροποιημένες εδαφικές μάζες και περιορίζει την επέκταση της ρύπανσης.

Τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται για τη σταθεροποίηση εδαφών που έχουν ρυπανθεί είναι:

1. Το τσιμέντο. Η ανάμειξη του εδαφικού υλικού με τσιμέντο δημιουργεί ένα υλικό του οποίου η αντοχή εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε τσιμέντο.
2. Οι πουζολάνες και η άσβεστος (CaO). Η ανάμειξη των εδαφικών υλικών με τα ανωτέρω δημιουργεί υδραυλικά κονιάματα που αποκτούν αυξημένη μηχανική αντοχή.
3. Διάφορα ασφαλικά υλικά καθώς και συνθετικές ουσίες (πολυμερή).

8.4.6 Υδραυλικά συστήματα

Τα συστήματα αυτά 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 γένεσης της ρύπανσης και του σημείου εκμετάλλευσης του υπόγειου νερού (πηγή, λίμνη κλπ) κατασκευάζεται επίμηκες στραγγιστήριο στο οποίο συγκεντρώνεται το υπόγειο νερό που προέρχεται



Σχήμα 8.6: Σύστημα προστασίας από τη ρύπανση με αντιστροφή της κίνησης του υπόγειου νερού

από την πηγή της ρύπανσης (Σχήμα 8.6). Ουσιαστικά, η περίπτωση αυτή βασίζεται επίσης στην αντιστροφή της κίνησης του υπόγειου νερού. Πράγματι, στο Σχήμα 8.6, πριν από την κατασκευή του στραγγιστηρίου, η κατεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού μεταξύ της θέσης του στραγγιστηρίου και της λίμνης ήταν από αριστερά προς τα δεξιά και ευνοούσε την επέκταση της ρύπανσης προς τη λίμνη, ενώ μετά την κατασκευή του στραγγιστηρίου η κατεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού αναστράφηκε, με αποτέλεσμα τον περιορισμό επέκτασης της ρύπανσης προς τη λίμνη.

8.5 Διάθεση αποβλήτων στο έδαφος

Η τεχνολογία της ελεγχόμενης διάθεσης αποβλήτων στην επιφάνεια του εδάφους²³ (ή της ανάμειξης των αποβλήτων με τις ανώτερες εδαφικές στρώσεις) βασίζεται στις φυσικές, χημικές και βιολογικές αντιδράσεις των ρύπων με τις οποίες το ρυπαντικό φορτίο των αποβλήτων σταδιακά ακινητοποιείται, υποβαθμίζεται και τελικώς μετατρέπεται σε ουσίες χωρίς δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι αντιδράσεις αυτές περιγράφηκαν αναλυτικά σε προηγούμενα εδάφια και είναι:

1. Η εξασθένιση των ανόργανων (κυρίως) ρύπων μέσω των φυσικών και χημικών μηχανισμών προσρόφησης στην επιφάνεια των αργιλικών ορυκτών και ανταλλαγής ιόντων (Κεφάλαιο 4).
2. Η βιολογική υποβάθμιση των οργανικών ρύπων μέσω μικρο-οργανισμών (Εδάφιο 8.2.1).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ελεγχόμενη διάθεση αποβλήτων στο έδαφος είναι τελείως διαφορετική από την τυχαία απόρριψη των αποβλήτων σε “χωματερές”, δεδομένου ότι στις “χωματερές” η εξασθένιση του ρυπαντικού φορτίου των αποβλήτων γίνεται με ανεξέλεγκτο τρόπο, ενώ ταυτόχρονα παράγεται υγρό

²³ land treatment of wastes

στράγγισμα το οποίο έχει αξιόλογο ρυπαντικό φορτίο. Αντίθετα, η ελεγχόμενη διάθεση των αποβλήτων στο έδαφος αξιοποιεί τη διαθέσιμη τεχνολογία με σκοπό:

1. Να μεγιστοποιήσει το ρυθμό αδρανοποίησης του ρυπαντικού φορτίου των αποβλήτων, ενισχύοντας τους παράγοντες εκείνους που ευνοούν τη βιολογική αποσύνθεση των οργανικών ουσιών, π.χ. με αερισμό, έλεγχο της θερμοκρασίας, της υγρασίας, του pH και της τοξικότητας, με την παροχή θρεπτικών ουσιών, ακόμη και με την εισαγωγή γενετικώς τροποποιημένων μικρο-οργανισμών²⁴, οι οποίοι μπορούν να παράγουν τα κατάλληλα ένζυμα για τη διάσπαση των πολύ ανθεκτικών οργανικών ενώσεων.
2. Να ελαχιστοποιήσει τη ρύπανση της ατμόσφαιρας από σκόνη ή πτητικούς ρύπους.
3. Να ελαχιστοποιήσει τη ρύπανση του υπεδάφους περιορίζοντας την εισροή των επιφανειακών υδάτων μέσω συστημάτων περιμετρικής αποστράγγισης.

Η τεχνολογία της ελεγχόμενης διάθεσης αποβλήτων στην επιφάνεια του εδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάθεση διάφορων τύπων αποβλήτων (ακόμη και επικίνδυνων αποβλήτων), συνήθως όμως χρησιμοποιείται για την τελική διάθεση των επεξεργασμένων αστικών λυμάτων. Είναι προφανές ότι κατά την εφαρμογή της μεθόδου, ο τρόπος ελέγχου των συνθηκών που ευνοούν την ανάπτυξη των μικρο-οργανισμών οι οποίοι αποσυνθέτουν τις διάφορες οργανικές ενώσεις ποικίλει αναλόγως του ρυπαντικού φορτίου των αποβλήτων. Έτσι, στην περίπτωση επικίνδυνων αποβλήτων, συνήθως απαιτείται η επεξεργασία των αποβλήτων μέσα σε στεγανούς αποδέκτες με ειδικό σύστημα αποστράγγισης του στραγγίσματος, στεγανωτική μεμβράνη στον πυθμένα κλπ. Αντίθετα, στην περίπτωση διάθεσης βιολογικώς επεξεργασμένων αστικών λυμάτων, οι περιορισμοί είναι πολύ λιγότεροι και γενικώς εξαρτώνται από τις κλιματικές συνθήκες (θερμοκρασία, εξάτμιση, βροχόπτωση), τις καλλιέργειες που εφαρμόζονται στην περιοχή (π.χ. το ρυθμό πρόσληψης του αζώτου από τα φυτά), τη φύση του εδάφους (όξινα ή αλκαλικά εδάφη, περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο κλπ).

Η διάθεση των επεξεργασμένων αστικών λυμάτων στο έδαφος γίνεται συνήθως με δυο τρόπους:

1. Με τη μέθοδο της άρδευσης, κατά την οποία τα επεξεργασμένα λύματα διατίθενται στην επιφάνεια του εδάφους σε μεγάλη έκταση με καταιονισμό ή ακόμη και με κατάκλυση. Οι μέγιστες παροχές διάθεσης των λυμάτων εξαρτώνται από τις κλιματικές συνθήκες και τη χλωρίδα της περιοχής και μπορούν να φθάσουν μέχρι 10 cm την εβδομάδα (σε ξηρές περιόδους και με καλλιέργειες υψηλής ταχύτητας πρόσληψης αζώτου).
2. Με τη μέθοδο της ταχείας διήθησης, κατά την οποία τα επεξεργασμένα λύματα διατίθενται εντός αβαθών λεκανών του εδάφους με κατάκλυση και παροχές που μπορούν να φθάσουν τα 2 μέτρα την εβδομάδα. Η μέθοδος βασίζεται αφενός μεν στην προσρόφηση των ανόργανων ρύπων κατά τη διήθηση των λυμάτων εντός της μερικώς κορεσμένης ζώνης του εδάφους, αφετέρου δε στην αερόβια αποσύνθεση των οργανικών ρύπων. Για την αποκατάσταση αερόβιων συνθηκών, η εφαρμογή των λυμάτων στο έδαφος γίνεται ασυνεχώς με περίοδο επανάληψης της τάξεως των δυο εβδομάδων. Στο διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δυο διαδοχικών εφαρμογών, αποκαθίστανται αερόβιες συνθήκες στο έδαφος και το ρυπαντικό φορτίο των λυμάτων βαθμιαία αποσυντίθεται.

Σύμφωνα με πρόσφατες Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (86/278/EEC και 91/271/EEC) δεν επιτρέπεται η ανεξέλεγκτη διάθεση αστικών λυμάτων στο έδαφος

²⁴ Genetically Modified Organisms (GMO)

χωρίς προηγούμενη βιολογική επεξεργασία. Επίσης, για την αποφυγή του κορεσμού του εδάφους και την αδυναμία περαιτέρω προσρόφησης μεταλλικών ιόντων, η Ευρωπαϊκή Οδηγία 86/278/EEC επιβάλλει τους ακόλουθους περιορισμούς ως προς το ρυθμό εφαρμογής μεταλλικών ιόντων στο έδαφος μέσω των επεξεργασμένων λυμάτων.

Μέταλλο	Μέγιστος ετήσιος ρυθμός εφαρμογής* (gr/στρέμμα)
Κάδμιο	15
Χαλκός	1200
Νικέλιο	300
Μόλυβδος	1500
Ψευδάργυρος	3000
Υδράργυρος	10

* με μέγιστη διάρκεια εφαρμογής τα δέκα έτη

8.6 Βιβλιογραφικές αναφορές

- API (American Petroleum Institute) (1985) "Detection of Hydrocarbons in Groundwater by Analysis of Shallow Soil Gas Vapor", API, Washington, DC, USA.
- Attewell P.W. (1993) "Ground Pollution", E.F.N. Spon, London.
- Charbeneau R.J., Bedient P.B. and Loehr R.C. (1992) "Groundwater Remediation", Technomic Publishing Co, Lancaster, PA, USA.
- European Economic Community 86/278/EEC "Council Directive of 12 June 1986 on the protection of the Environment, and particularly the soil, when sewage sludge is used in agriculture", OJ L 181, 4.7.86.
- European Economic Community 91/271/EEC "Council Directive of 21 May 1991 concerning urban waste-water treatment", OJ L 135, 30.5.91.
- Proceedings "Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater: Prevention, Detection and Restoration" (1987), National Water Well Association, Dublin, OH, USA.
- Proceedings "Soil Vapor Extraction Technology Workshop" (1989), U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Edison, NJ, USA.
- Russel D.L. (1991) "Remediation Manual for Petroleum Contaminated Sites", Technomic Publishing Co, Lancaster, PA, USA.
- Schwille F. (1967) "Petroleum Contamination of the Subsoil - A Hydrological Problem", in the Joint Problems of the Oil and Water Industries, P. Hepple editor, Institute of Petroleum, London.
- U.S. Environmental Protection Agency (1989) "Evaluation of Groundwater Extraction Remedies", Volume 1, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC.
- Woodward-Clyde Consultants (1985) "Performance evaluation, pilot scale installation and operation, soil-gas vapor extraction system - Time Oil Company site", USEPA Work Assignment No 74-ON 14.1.
- Χριστούλας Δ. (1991) "Ρύπανση των υδάτων και αντιρρυπαντική τεχνολογία", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.