

Όπως αποδεικνύουν τα μεγάλα σύγχρονα περιβαλλοντικά προβλήματα που αντιμετωπίζει σήμερα σχεδόν ολόκληρος ο πλανήτης, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες έχουν προκαλέσει σημαντική επιβάρυνση του ατμοσφαιρικού αέρα, του εδάφους, καθώς επίσης και των επιφανειακών και υπόγειων αποθεμάτων νερού. Φυσικά, κάθε ένα από αυτά τα τμήματα της βιόσφαιρας έχει το δικό του ρόλο στην προστασία του περιβάλλοντος και τη διατήρηση της ζωής σε αυτό, καθιστώντας αναγκαία την παραμονή του σε «αγνή» και αρρύπαντη κατάσταση.

Το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα ανέκαθεν αποτελούσαν πηγή ζωής για τον άνθρωπο και τα ζώα, καθώς χρησιμοποιούνταν για καλλιέργειες και προμήθεια πόσιμου νερού, αντίστοιχα. Παρόλα αυτά, η ακατάλληλη διαχείρισή τους οδήγησε στην ρύπανσή τους και κατ' επέκταση στην υποβάθμιση της ποιότητάς τους.

Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 1-1) οι πηγές ρύπανσης του εδάφους και κατ' επέκταση των υπογείων υδάτων είναι πολλές και σχετίζονται με διαφορετικές κατηγορίες ρύπων, που απαιτούν αντίστοιχα διαφορετικό χειρισμό.

Ενδεικτικά αναφέρονται οι ακόλουθες κύριες πηγές ρύπανσης του υπεδάφους:

- *Υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης*

Οι υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης διαφόρων προϊόντων (π.χ. βενζίνης) αποτελούν μια από τις πλέον χαρακτηριστικές πηγές ρύπανσης. Τόσο στη βιομηχανία (π.χ. σε διυλιστήρια πετρελαίου, εργοστάσια παραγωγής βαφών, χημικών διαλυτών και φυτοφαρμάκων, κα.), όσο και στις ιδιωτικές μικρές επιχειρήσεις (π.χ. βενζινάδικα) χρησιμο-

αδύνατη την αντιστροφή και γενικότερα την αντιμετώπιση ενός τέτοιου γεγονότος.

- *Ρυπασμένα επιφανειακά ύδατα*

Με δεδομένη την αλληλεπίδραση και την επικοινωνία των επιφανειακών και των υπογείων υδάτων, είναι εμφανής η πιθανότητα επιβάρυνσης των υδροφορέων από ποτάμια ή λίμνες που επικοινωνούν με αυτούς και περιέχουν ρύπους. Ομολογουμένως, η ρύπανση των επιφανειακών υδάτων είναι πιο εύκολη, λόγω της μεγάλης έκθεσής τους στον άνθρωπο και τις δραστηριότητές του. Επομένως, η εισαγωγή ρύπων σε ποτάμια και λίμνες καθιστά δυνατή τη μεταφορά αυτών στα υπόγεια ύδατα, δημιουργώντας ευρύτερο και πολυπλοκότερο πρόβλημα ρύπανσης και αναγκαίας αποκατάστασης.

- *Πηγάδια απόρριψης αποβλήτων*

Αν και στην Ελλάδα η χρήση πηγαδιών για την απόρριψη αποβλήτων δεν αποτελεί διαδεδομένη πρακτική (τουλάχιστον επίσημα και με τρόπο οργανωμένο), στο εξωτερικό (π.χ. στις Η.Π.Α.) συνηθίζεται η απόρριψη αστικών και βιομηχανικών λυμάτων ή ακόμη και υγρών επικινδύνων ή ραδιενεργών αποβλήτων σε βαθιά πηγάδια. Στόχος είναι η μεταφορά τους σε μεγάλο βάθος στο υπέδαφος, όπου δεν υπάρχει υπόγειος υδροφορέας ή όπου η γεωλογία αποτρέπει την οποιαδήποτε μεταφορά τους και επαφή τους με αποθέματα νερού. Όπως έχει όμως αποδειχτεί πολλές φορές η πλήρης πρόβλεψη της τύχης τους στο υπέδαφος και η λεπτομερής γνώση των επικρατούντων γεωλογικών χαρακτηριστικών είναι ιδιαίτερα δύσκολη με αποτέλεσμα την σημαντική επιβάρυνση των υπογείων υδάτων και του εδάφους σε ακτίνα πολλών χιλιομέτρων από το σημείο απόρριψης των αποβλήτων.

- *Σηπτικά συστήματα*

Με τον όρο σηπτικές δεξαμενές – συστήματα εννοούνται κατά κύριο λόγο οι μέχρι πρότείνος ευρέως χρησιμοποιούμενοι «βόθροι» και οι σωληνώσεις μεταφοράς των αστικών λυμάτων σε αυτούς. Τέτοιου είδους συστήματα αποθήκευσης των παραγόμενων αστικών λυμάτων υπήρχαν σε όλα σχεδόν τα σπίτια, παρουσιάζοντας σημαντικές διαρ-

ροές και προκαλώντας σημαντική επιβάρυνση του εδάφους και των υπόγειων υδροφορέων.

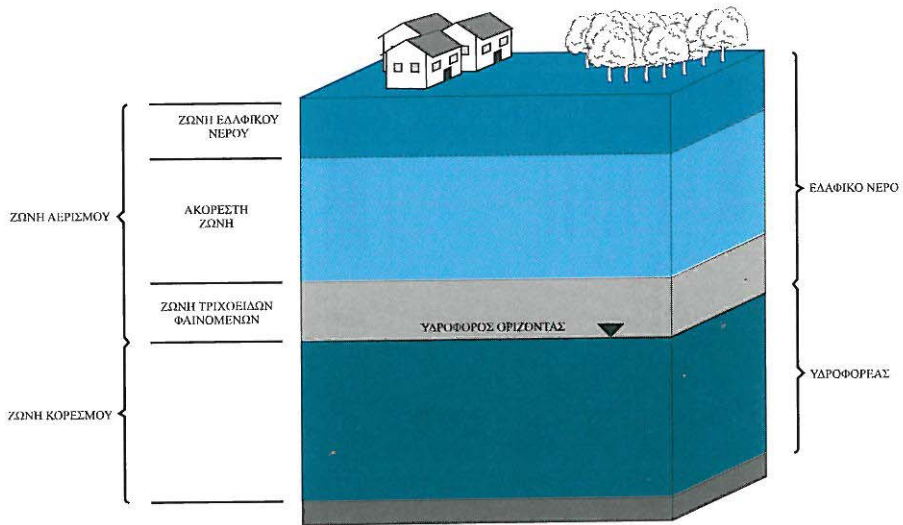
• *Γεωργικές δραστηριότητες – χρήση φυτοφαρμάκων*

Τα φυτοφάρμακα ανιχνεύθηκαν στα υπόγεια ύδατα περίπου πριν 20 χρόνια, κρούοντας τον κώδωνα του κινδύνου για την υπερβολική χρήση τους, η οποία είχε ως αποτέλεσμα την διείσδυσή τους στο υπέδαφος και τους υπόγειους υδροφορείς. Η ευρεία χρήση τους και η μεγάλη ποικιλία τους (χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι υπάρχουν πάνω από 50.000 διαφορετικά φυτοφάρμακα, που αποτελούνται από περίπου 600 διαφορετικά συστατικά) κατέστησε ιδιαίτερα έντονο το πρόβλημα της ρύπανσης του υπεδάφους από αυτά και παράλληλα αρκετά πολύπλοκο το πρόβλημα αποκατάστασής του.

Οι εναλλακτικές λύσεις που εξετάζονταν μέχρι πρότινος για την αντιμετώπιση οποιουδήποτε προβλήματος ρύπανσης του υπεδάφους ήταν οι εξής:

- Καμία επέμβαση στο υπέδαφος και περιορισμός της χρήσης αυτού.
- Μερικός ή ολικός περιορισμός – αποκλεισμός της ρύπανσης.
- Εκσκαφή ή άντληση του ρυπασμένου εδάφους και νερού, αντίστοιχα.
- In-situ ή on-site επεξεργασία και αποκατάσταση του υπεδάφους.

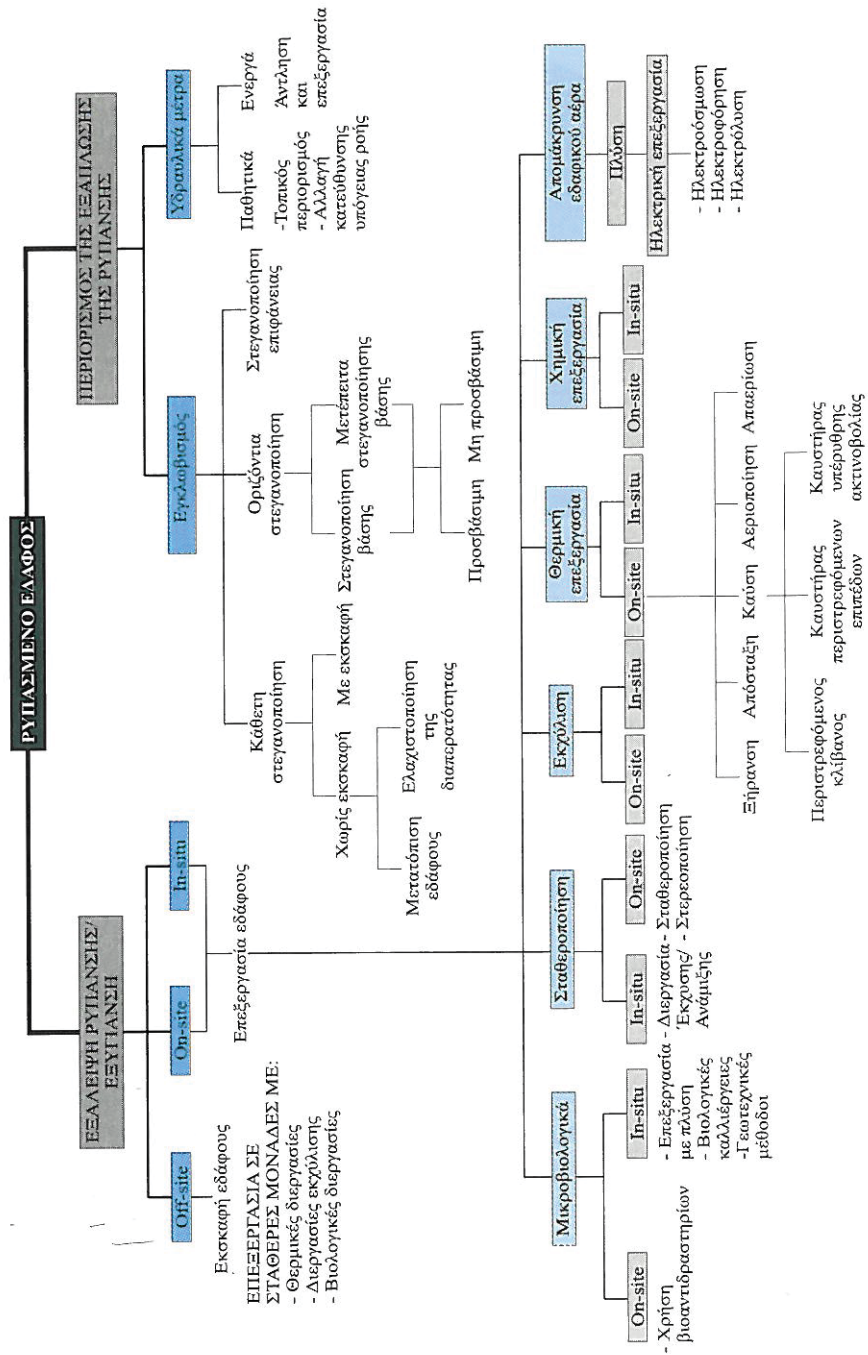
Με τον καιρό, επικράτησε η επιλογή της τελευταίας εναλλακτικής λύσης, δεδομένου ότι γενικά συνδύαζε υψηλή απόδοση εξυγίανσης και χαμηλό κόστος εφαρμογής. Παρόλα αυτά, ο μεγάλος αριθμός των πιθανών ρύπων και η μεγάλη ποικιλία των ενδεχόμενων πηγών ρύπανσης του υπεδάφους κατέστησαν αναγκαία την ανάπτυξη εξίσου πολλών πιθανών, σχεδόν ειδικευμένων, τεχνολογιών εξυγίανσης. Ταυτόχρονα, η επικράτηση διαφορετικών συνθηκών στο ακόρεστο έδαφος και στους υπόγειους υδροφορείς απαίτησε την εφαρμογή ξεχωριστών τεχνολογιών αποκατάστασης για κάθε μια από τις βασικές «ζώνες» του υπεδάφους (Σχήμα 1-2).



Σχήμα 1-2: Κύριες ζώνες υπεδάφους [Πηγή Bedient B.P. et al., 1999].

Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζονται αναλυτικά οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο υπέδαφος (κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη) και καθορίζουν τόσο τη μεταφορά, όσο και την τύχη των εισερχόμενων σε αυτό ρύπων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πλέον προηγμένες και εφαρμόσιμες τεχνολογίες εξυγίανσης εδαφών και υπογείων υδάτων.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 1-3) παρουσιάζονται εναλλακτικές επιλογές εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών, οι οποίες έχουν επικρατήσει τα τελευταία χρόνια.



Σχήμα 1-3: Εναλλακτικές επιλογές εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών [Πηγή: Gidarakos E., 2000].

ΜΕΡΟΣ

I

**ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ, ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ
ΚΑΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ
ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ**

Η μεταφορά και γενικότερα η τύχη των ρύπων στο υπέδαφος καθορίζονται από δυο βασικές παραμέτρους:

- τις ιδιότητες των υπόγειων εδαφικών σχηματισμών και γενικότερα του υπόγειου περιβάλλοντος και
- τις φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες των ρύπων.

Οι μη αντιδράντες (συντηρητικοί) ρύποι έχουν την τάση να κινούνται μέσα στο υπέδαφος μαζί με το υπόγειο νερό και δεν επηρεάζονται από άλλες βιοτικές ή μη βιοτικές διεργασίες που πιθανόν να λαμβάνουν χώρα. Επομένως, κύριο ρόλο στην τύχη και τη μεταφορά τους παίζουν τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους. Αντίθετα, η τύχη και η μεταφορά των ρύπων που τείνουν να αντιδρούν (μη συντηρητικοί ρύποι) επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τις ιδιότητές τους (π.χ. την ικανότητά τους να βιοαποικοδομούνται, να προσροφούνται, κτλ) και λιγότερο από τις υδροδυναμικές διεργασίες που τυχόν να πραγματοποιούνται.

Σε γενικές γραμμές οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο υπέδαφος χωρίζονται στις εξής βασικές κατηγορίες :

- υδροδυναμικές (συμμεταφορά, διάχυση και διασπορά),
- αβιοτικές (προσρόφηση, εξάτμιση, ιονανταλλαγή, κα),
- βιοτικές (βιοαποικοδόμηση, νιτροποίηση, κα).

Στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 2-1 και 2-2) αναφέρονται οι διεργασίες που δύναται να λάβουν χώρα στο υπέδαφος και οι αντίστοιχες ιδιότητες του εδάφους και των υφιστάμενων ρύπων που τις επηρεάζουν, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι αναφερθείσες διεργασίες.

Πίνακας 2-1: Διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο υπέδαφος και ιδιότητες αυτού που τις επηρεάζουν [Πηγή: Knox C.R. et al, 1993].

Διεργασία	Ιδιότητα Υπεδάφους
Υδροδυναμική Μεταφορά	
Συμμεταφορά	Υδραυλική κλίση, υδραυλική αγωγιμότητα, πορώδες
Διάχυση - διασπορά	Κατανομή μεγέθους εδαφικών σωματιδίων, ταχύτητα νερού
Επικρατέστερη ροή (preferential flow)	Κατανομή μεγέθους εδαφικών πόρων, παρουσία μακροπόρων και αδιαπέρατων φακών
Αβιοτική Μεταφορά	
Προσρόφηση	Περιεχόμενο εδάφους σε άνθρακα και άργιλο, ειδική επιφάνεια εδάφους
Εξάτμιση	Βαθμός κορεσμού του εδάφους
Ιονανταλλαγή	Ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, σθένος ιόντων
Υδρόλυση	pH, ανταγωνιστικές αντιδράσεις
Καθίζηση/ διάλυση	pH, παρουσία μετάλλων
Αλληλεπίδραση ρύπων (cosolvation)	Είδος και ποσότητα υφιστάμενων ρύπων
Οξειδοαναγωγή	pE, pH
Μεταφορά κολλοειδίων	pH, σθένος ιόντων, χημικά χαρακτηριστικά υδροφορέα και εδαφικών σωματιδίων, μέγεθος εδαφικών σωματιδίων
Βιοτικές Διεργασίες	
Μεταβολισμός/ συμμεταβολισμός	Παρουσία μικροοργανισμών και θρεπτικών συστατικών, pH, pE (δέκτες ηλεκτρονίων), παρουσία ιχνοστοιχείων
Πολυφασική (multiphase) Ροή	
	Ενδογενής (intrinsic) διαπερατότητα εδάφους, βαθμός κορεσμού, πορώδες

Πίνακας 2-2: Διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο υπέδαφος και ιδιότητες του υφιστάμενου ρύπου που τις επηρεάζουν [Πηγή: Knox C.R. et al, 1993].

Διεργασία	Ιδιότητα Ρύπου	Αλληλεπιδράσεις
Υδροδυναμική Μεταφορά		
Συμμεταφορά	Ανεξάρτητη από τον υφιστάμενο ρύπο	
Διάχυση - διασπορά	Συντελεστής διάχυσης - διασποράς	Συντελεστής διάχυσης - διασποράς
Επικρατέστερη ροή (preferential flow)		
Αβιοτική Μεταφορά		
Προσρόφηση	Διαλυτότητα, συντελεστής κατανομής οκτανόλης - νερού	
Εξάτμιση	Τάση ατμών, σταθερά Henry	
Ιονανταλλαγή	Σθένος, διπολικότητα	
Υδρόλυση	Χρόνος ημιζωής υδρόλυσης	
Καθίζηση/ διάλυση	Διαλυτότητα συναρτήσει του pH, ειδικές αντιδράσεις	
Αλληλεπίδραση ρύπων (cosolution)	Διαλυτότητα, συντελεστής κατανομής οκτανόλης - νερού	
Οξειδοαναγωγή	Σταθερά ιονισμού pK_a	
Μεταφορά κολλοειδών	Προσρόφηση, αντιδραστικότητα, διαλυτότητα	Σταθερότητα κολλοειδών
Βιοτικές Διεργασίες		
Μεταβολισμός/ συμμεταβολισμός	BOD, COD, βαθμός αλογόνωσης, κτλ.	
Πολυφασική (multiphase) Ροή		
	Διαλυτότητα, πηκτικότητα, πυκνότητα, ιξώδες	Σχετική διαπερατότητα, διαβρεξιμότητα, επιφανειακές τάσεις, τριχοειδής τάση, κορεσμός

2.1. Υδροδυναμικές διεργασίες

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι υδροδυναμικές διεργασίες μεταφοράς ρύπων στο υπέδαφος περιλαμβάνουν:

- τη συμμεταφορά
- τη διάχυση και τη διασπορά
- την επικρατέστερη ροή (preferential flow)

2.1.1. Συμμεταφορά

Με τον όρο συμμεταφορά εννοείται η μεταφορά μάζας ενός ρύπου μαζί με το υπόγειο νερό, λόγω της ροής του. Η συμμεταφορά λοιπόν αναφέρεται στην κίνηση των ρύπων στο νερό ως αποτέλεσμα της υδραυλικής κλίσης του υδροφορέα. Το νερό που κινείται αναγκάζει τους ρύπους να μετακινηθούν, ανάλογα με τη διαπερατότητα του εδάφους, η οποία σχετίζεται με το μέγεθος των σωματιδίων του, τον τύπο και τη δομή του, το πορώδες και την περιεχόμενη υγρασία.

Εάν αυτή ήταν η μόνη διαδικασία μεταφοράς μάζας στο υπέδαφος, η μέση ταχύτητα του ρύπου θα ήταν ίση με τη μέση ταχύτητα των υπογείων υδάτων. Η ροή του υπόγειου νερού περιγράφεται από το νόμο του Darcy, στην περίπτωση που είναι στρωτή (δηλαδή η τιμή του αριθμού Reynolds είναι μεταξύ 1 και 10), σύμφωνα με τον οποίο ισχύει η εξής σχέση:

$$V_x = -\frac{K}{\varepsilon} \frac{dh}{dx} \quad (2-1)$$

όπου: V_x = η οριζόντια ταχύτητα του υπόγειου νερού [L/T]

K = η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα [L/T]

ε = το πορώδες του υδροφορέα [αδιάστατο μέγεθος]

$\frac{dh}{dx}$ = η υδραυλική κλίση του υδροφορέα [αδιάστατο μέγεθος]

Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός υδροφορέα εκφράζει την ευκολία με την οποία μεταφέρεται το νερό μέσα σε αυτόν και εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά του υπάρχοντος γεωλογικού σχηματισμού. Η

τιμή της μπορεί να προκύψει συναρτήσει της λεγόμενης ενδογενούς διαπερατότητας k (intrinsic permeability), η οποία είναι χαρακτηριστική για κάθε τύπο εδάφους και ανεξάρτητη από τις ιδιότητες του εκάστοτε ρευστού, από τον ακόλουθο τύπο:

$$K = k \frac{\rho \cdot g}{\mu} \quad (2-2)$$

όπου: K = η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα [L/T]
 k = η ενδογενής διαπερατότητα [L²]
 ρ = η πυκνότητα του ρευστού (π.χ. υπόγειου νερού) [M/L³]
 g = η σταθερά της επιτάχυνσης της βαρύτητας [L/T²]
 μ = δυναμικό ιξώδες του ρευστού (υπόγειου νερού) [M/L/T]

Η τιμή της ενδογενούς διαπερατότητας αλλάζει κατά 12 τάξεις μεγέθους ανάλογα με τον τύπο του εδάφους (από πολύ διαπερατά χαλίκια έως σχεδόν αδιαπέρατη άργιλο).

Το πορώδες ενός υδροφορέα ή ενός συγκεκριμένου τύπου εδάφους εκφράζει το κλάσμα του κενού όγκου προς το συνολικό όγκο:

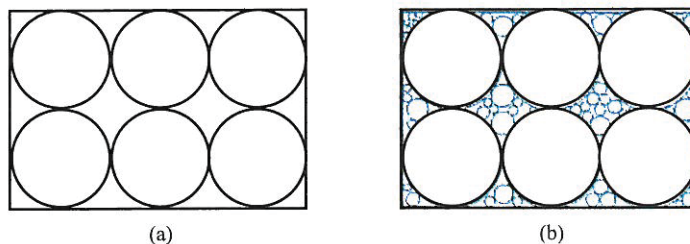
$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_{tot}} \quad (2-3)$$

όπου: ε = το πορώδες του υδροφορέα [αδιάστατο μέγεθος]
 V_v = ο κενός όγκος του εδάφους [L³]
 V_{tot} = ο συνολικός όγκος του εδάφους [L³]

Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 2-1) η πυκνότητα, το μέγεθος και το σχήμα των εδαφικών σωματιδίων καθορίζουν πλήρως τον κενό όγκο που παρατηρείται σε ένα δεδομένο δείγμα εδάφους, προσδίδοντας έμμεσα την τιμή του πορώδους.

Η υδραυλική κλίση εκφράζει τη μεταβολή του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα (ή του ύψους της πιεζομετρικής επιφάνειας) προς τη μεταβολή του μήκους στην οριζόντια διεύθυνση.

Επομένως, όταν η μεταφορά ενός ρύπου οφείλεται μόνο στη συμμεταφορά η ροή αυτού, για παράδειγμα στην διεύθυνση x , δίνεται από τον εξής τύπο:



Σχήμα 2-1: Πιθανά μεγέθη και διατάξεις εδαφικών σωματιδίων που καθορίζουν το πορώδες (κενό χώρο) του εδάφους.

$$F_x = V_x \cdot \varepsilon \cdot C \quad (2-4)$$

όπου: F_x = η ροή (flux) του ρύπου στη διεύθυνση x [$M/L^2/T$]
 V_x = η ταχύτητα του υπόγειου νερού στη διεύθυνση x [L/T]
 ε = το πορώδες του υδροφορέα [αδιάστατο μέγεθος]
 C = η συγκέντρωση του ρύπου στο υπόγειο νερό [M/L^3]

2.1.2. Διάχυση - διασπορά

Οι ρύποι που βρίσκονται σε ασυνεχείς εδαφικούς πόρους ίσως να μην έρθουν σε άμεση επαφή με τα μονοπάτια ροής του νερού. Κατ' επέκταση, αυτοί οι ρύποι θα πρέπει να κινηθούν με μοριακή διάχυση και στη συνέχεια να μεταφερθούν μέσω άλλων μηχανισμών μεταφοράς μάζας, όπως διασπορά ή συμμεταφορά. Η διαδικασία διάχυσης αφορά στη μεταφορά των ρύπων από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης σε περιοχές χαμηλής συγκέντρωσης και αποτελεί ένα φαινόμενο μεταφοράς μάζας, το οποίο οφείλεται στην κινητική ενέργεια των μορίων, δηλαδή στην κίνηση Brown. 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 υπόγειου ύδατος.

Η διεργασία της διάχυσης περιγράφεται από το νόμο του Fick:

$$J_x = -D_s \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2-5)$$

όπου: J_x = η ροή (flux) του ρύπου στη διεύθυνση x [$M/L^2/T$]

D_s = ο συντελεστής μοριακής διάχυσης [L^2/T]

$\frac{\partial C}{\partial x}$ = η μεταβολή της συγκέντρωσης του ρύπου στη διεύθυνση x [$M/L^3/L$]

Ο νόμος του Fick χρησιμοποιείται στην περίπτωση πορώδων μέσων, αντικαθιστώντας τον συντελεστή D_s με έναν φαινομενικό συντελεστή διάχυσης D_e :

$$D_e = \tau \cdot D_s \quad (2-6)$$

όπου: D_e = ο φαινομενικός συντελεστής διάχυσης [L^2/T]

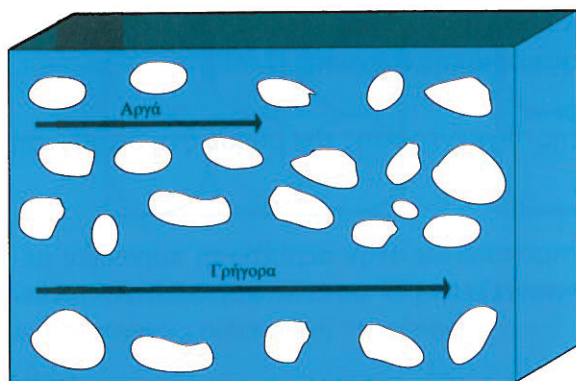
τ = ο συντελεστής στρεβλότητας (tortuosity)

Η τιμή του συντελεστή τ είναι πάντοτε μικρότερη της μονάδος, εκφράζει τη γεωμετρία των «καναλιών» του εδάφους που χρησιμοποιούνται για την κίνηση του υπόγειου νερού και των ρύπων και μπορεί να προσδιοριστεί με πειράματα διάχυσης. Οι τιμές του τ κυμαίνονται στην περιοχή 0,5-0,01 για φυσικά γεωλογικά υλικά.

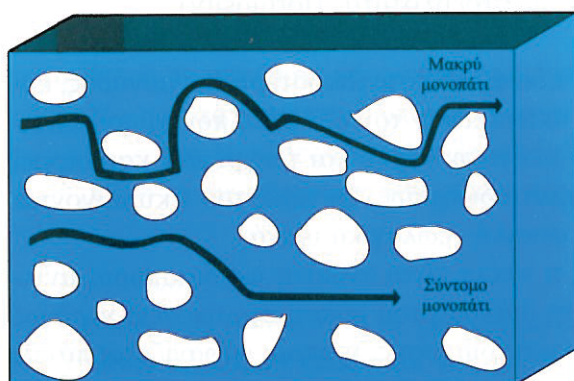
Η μηχανική διασπορά, η οποία είναι γνωστή ως διασπορά, αντιστοιχεί στην εξάπλωση ή τη διάλυση του ρύπου στο υπόγειο νερό ως αποτέλεσμα τόσο της μοριακής διάχυσης, η οποία εμφανίζεται πάντα εάν υπάρχει διαβάθμιση συγκέντρωσης στο σύστημα, όσο και της μίξης του ρύπου, λόγω της αναταραχής και της ταχύτητας που επικρατεί στον υδροφορέα.

Η μηχανική διασπορά είναι μια διεργασία ανάμιξης, η οποία οφείλεται κατά κύριο λόγο στα εξής τρία φαινόμενα (Σχήμα 2-2 και 2-3):

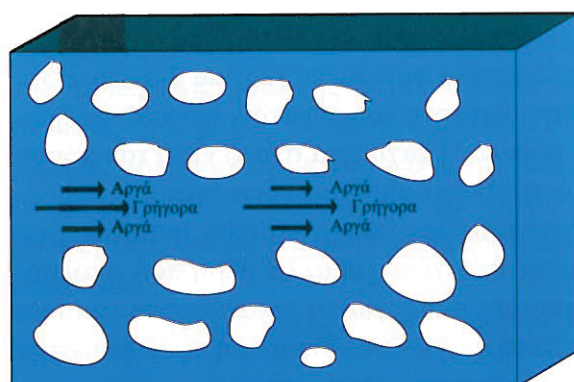
1. Ύπαρξη διαφοράς στην ταχύτητα του ρευστού, όπως κατανέμεται στη διατομή των πόρων. Η ταχύτητα στο κέντρο του πόρου είναι μεγαλύτερη από αυτήν πλησίον των τοιχωμάτων.
2. Κάποιο μέρος του ρευστού διανύει μεγαλύτερη απόσταση σε ορισμένες γραμμές ροής σε σχέση με άλλα μέρη που ακολουθούν διαφορετικές γραμμές ροής, για να «διανύσουν» την ίδια οριζόντια απόσταση. Αυτή η «ζικ-ζακ» διαδρομή οφείλεται στην στρεβλότητα του πορώδους μέσου (tortuosity).
3. Μερικοί πόροι έχουν μεγαλύτερη διάμετρο από άλλους, με απο-



ΜΕΓΕΘΟΣ ΠΟΡΩΝ

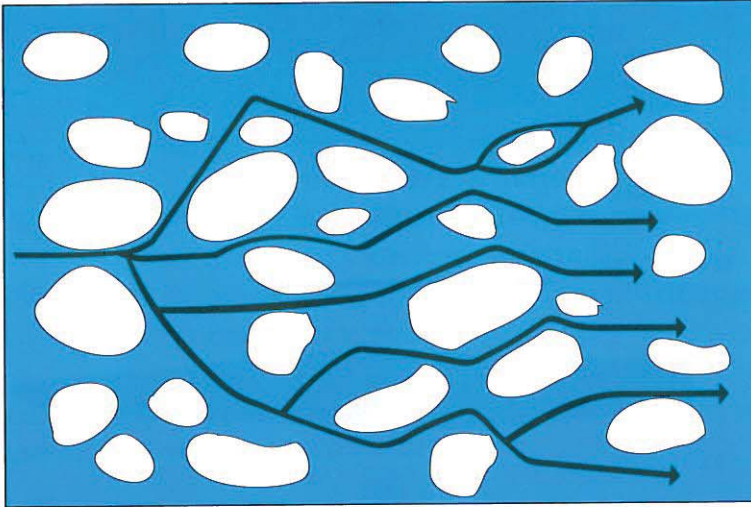


ΜΗΚΟΣ ΜΟΝΟΠΑΤΙΟΥ



ΤΡΙΒΗ ΜΕΣΑ ΣΤΟΥΣ ΠΟΡΟΥΣ

Σχήμα 2-2: Μηχανισμοί που λειτουργούν στους πόρους ενός πορώδους μέσου και προκαλούν επιμήκη διασπορά [Πηγή: Fetter C.W., 1993].



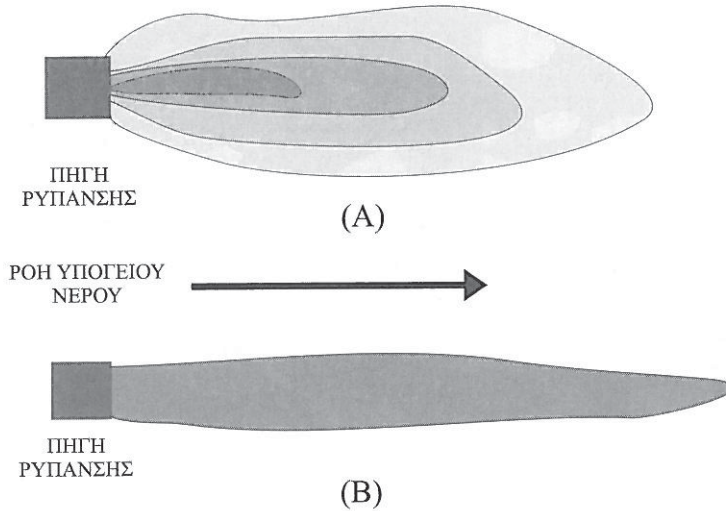
Σχήμα 2-3: Γραμμές ροής σε πορώδες μέσο, οι οποίες προκαλούν εγκάρσια υδροδυναμική διασπορά [Πηγή: Fetter C.W., 1993].

τέλεσμα να αναπτύσσονται μεγαλύτερες ταχύτητες στους μεγαλύτερους πόρους.

Η ανάμιξη και εξάπλωση των ρύπων στη διεύθυνση της ροής λέγεται και επιμήκης (longitudinal) διασπορά, ενώ αυτή που είναι κάθετη στη διεύθυνση της ροής λέγεται εγκάρσια (transverse) διασπορά. Ο συνδυασμός λέγεται υδροδυναμική διασπορά (hydrodynamic dispersion).

Το αποτέλεσμα της υδροδυναμικής διασποράς είναι ότι μερικά μέρη των ρύπων και του νερού κινούνται ταχύτερα από τη μέση ταχύτητα του νερού και μερικά άλλα κινούνται βραδύτερα. Έτσι, οι ρύποι εξαπλώνονται και ελαττώνεται η συγκέντρωσή τους (Σχήμα 2-4), με συνέπεια την άφιξή τους σε κάποιο σημείο αναφοράς (π.χ. σε κάποιο πηγάδι υδροληψίας) ταχύτερα από ότι υπολογίζεται με βάση τη μέση ταχύτητα ροής από το νόμο του Darcy.

Η ροή μάζας ενός ρύπου που οφείλεται στη διασπορά υπολογίζεται από εξισώσεις παρόμοιες στη μορφή με εκείνη του νόμου του Fick. Ο συντελεστής της μοριακής διάχυσης αντικαθίσταται από τον



Σχήμα 2-4: Κατανομή ρύπου όταν λαμβάνει χώρα (Α) συμμεταφορά και διασπορά και (Β) μόνο συμμεταφορά [Πηγή: Bedient B.P. et al., 1999].

συντελεστή υδροδυναμικής διασποράς. Για την οριζόντια διεύθυνση, ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς δίνεται από τη σχέση:

$$D_{Hx} = D_e + \alpha_x \cdot V_x^m \quad (2-7)$$

όπου: D_{Hx} = ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς στην οριζόντια διεύθυνση [L^2/T]

D_e = ο φαινομενικός συντελεστής διάχυσης [L^2/T]

α_x = η σταθερά υδροδυναμικής διασποράς στην οριζόντια διεύθυνση [L]

V_x = η ταχύτητα του υπόγειου νερού στη διεύθυνση x [L/T]

m = μια εμπειρική σταθερά με τιμές μεταξύ 1-2

Σε κοκκώδη γεωλογικά υλικά γενικά ισχύει ότι $m = 1$, επομένως προκύπτει ότι:

$$D_{Hx} = D_e + \alpha_x \cdot V_x \quad (2-8)$$

Για τις υπόλοιπες διευθύνσεις (y και z) ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς δίνεται από τις σχέσεις:

$$D_{Hy} = D_e + a_y \cdot V_y \quad (2-9)$$

$$D_{Hz} = D_e + a_z \cdot V_z \quad (2-10)$$

όπου: D_{Hy} και D_{Hz} = οι συντελεστές υδροδυναμικής διασποράς στις διευθύνσεις y και z, αντίστοιχα [L^2/T]

a_y και a_z = οι σταθερές υδροδυναμικής διασποράς στις διευθύνσεις y και z, αντίστοιχα [L]

V_y και V_z = οι ταχύτητες του υπόγειου νερού στις διευθύνσεις y και z, αντίστοιχα [L/T]

Τελικά, η ροή ενός ρύπου λόγω υδροδυναμικής διασποράς μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$J_{Hz} = -D_{Hz} \frac{dC}{dz} \quad (2-11)$$

όπου: J_{Hz} = η ροή (flux) του ρύπου στη διεύθυνση z [$M/L^2/T$]

D_{Hz} = ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς στη διεύθυνση z [L^2/T]

$\frac{dC}{dz}$ = η μεταβολή της συγκέντρωσης του ρύπου στη διεύθυνση z [$M/L^3/L$]

2.1.3. Επικρατέστερη ροή

Πολλές φορές παρατηρείται ραγδαία μεταφορά ρύπων τόσο στην ακόρεστη, όσο και στην κορεσμένη ζώνη. Ειδικοί πιστεύουν ότι τέτοια φαινόμενα, εκτός των άλλων, οφείλονται στην επικράτηση της λεγόμενης επικρατέστερης ροής. Παράγοντες όπως η έντονη ανομοιογένεια των εδαφικών πόρων, η παρουσία μικροπόρων και μακροπόρων και το χαρακτηριστικό φαινόμενο δημιουργίας «χαραμάδων» (fingering) μπορούν να αλλάξουν σημαντικά τη γενική μορφή και την ταχύτητα της ροής του υπόγειου νερού και κατά συνέπεια τη μεταφορά των ρύπων.

Η εμφάνιση επικρατέστερης ροής από το νερό, οφείλεται στην ύπαρξη «μονοπατιών» χαμηλότερης πυκνότητας και κατά συνέπεια μικρότερης αντίστασης, τα οποία το νερό ανακαλύπτει και ακολουθεί.

Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και στην περίπτωση παρουσίας μακροπόρων ή μικροπόρων, οι οποίοι μπορεί να έχουν δημιουργηθεί από διάφορους παράγοντες, όπως για παράδειγμα από την ύπαρξη ριζών διαφόρων φυτών. Αντίστοιχα, η δημιουργία «χαραμάδων» (fingering) σχετίζεται κυρίως με την παρουσία στρωματοποιημένων εδαφών, συμπιεσμένου αέρα και την ανακατανομή του νερού που ακολουθεί μια νεροποντή.

Γενικότερα, η εμφάνιση των παραπάνω φαινομένων καθιστά τη ροή ασυνεχή και επομένως δημιουργούνται πολλά προβλήματα τόσο στην κατανόηση των συνθηκών που επικρατούν στο υπέδαφος, όσον αφορά στην ροή, όσο και στη μαθηματική περιγραφή της. Η λεγόμενη μη ιδανική ροή εξαρτάται άμεσα από την κατανομή του μεγέθους των πόρων, η οποία μπορεί να είναι δυο ειδών:

- Ομοιόμορφη κατανομή: όπου οι πόροι του μέσου είναι σχετικώς ίδιου μεγέθους και ομοιόμορφου σχήματος. Στην περίπτωση αυτή έχει διαπιστωθεί ότι η μη ιδανική ροή γίνεται πιο έντονη καθώς μειώνεται η περιεχόμενη στο μέσο υγρασία και μέχρι αυτή να φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή, πέρα από την οποία οποιαδήποτε μείωση της υγρασίας επιφέρει μείωση της μη ιδανικής ροής.
- Ανομοιόμορφη κατανομή: όπου οι πόροι του μέσου διαφέρουν σημαντικά ως προς το μέγεθος και ως προς τη μορφή. Στην περίπτωση κορεσμένου μέσου η μη ιδανική ροή είναι αυξημένη. Καθώς όμως γίνεται απομάκρυνση του νερού από το μέσο, η μη ιδανική ροή μειώνεται και μετά από μια ορισμένη τιμή της περιεχόμενης υγρασίας η ροή αυξάνεται.

2.1.4. Πολυφασική ροή

Με τον όρο πολυφασική ροή εννοείται η μεταφορά ρύπων στο υπέδαφος, οι οποίοι προέρχονται από την ίδια πηγή αλλά παρουσιάζουν διαφορετικές ιδιότητες, με αποτέλεσμα να βρίσκονται σε διαφορετική φάση (υγρή, αέρια, διαλυμένη στο νερό, κτλ.). Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου είδους ρύπων αποτελούν οι πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες, που γενικά ανήκουν στα λεγόμενα μη υδατικής φάσης υγρά (Non Aqueous Phase Liquids – NAPL). Οι ρύποι αυτοί αποτελούνται