

ΤΕΙ ΠΑΤΡΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΣΤΕ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ

ΚΩΤΣΑΡΕΛΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΠΟΛΥΧΡΟΝΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΙ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ: ΚΑΘΡΕΠΤΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ- ΜΑΡΙΑ ΘΕΟΔΩΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΠΑΤΡΑ 2012

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ανατέθηκε από την Καθηγήτρια Μαρία Π. Θεοδωροπούλου και εκπονήθηκε στα πλαίσια του μαθήματος Χημική Τεχνολογία της σχολής Πολιτικών Έργων Υποδομής Πάτρας κατά το διάστημα 2011-2012.

Στην εργασία αυτή αναζητήθηκαν βιβλιογραφικά και καταγράφηκαν οι μηχανισμοί ρύπανσης του εδάφους και των υπόγειων υδάτων. Προηγήθηκε μια αναλυτική συζήτηση για τα υπόγεια ύδατα, τα χαρακτηριστικά τους και τον υδρολογικό κύκλο. Ακόμα αναλύθηκε το θέμα του εδάφους σε ότι έχει σχέση με το πορώδες του αλλά και τους γεωλογικούς σχηματισμούς του.

Επίσης ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στα συστήματα υπόγειας ροής, στους υδροφορείς και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά τους και την κίνηση του νερού με τους νόμους που την διέπουν.

Το κύριο μέρος της εργασίας αφορά την ρύπανση των υπόγειων υδάτων και του εδάφους. Αναλυτικότερα, αναφέρονται τα είδη και οι κυριότερες πηγές ρύπανσης, οι ρυπαντικές παράμετροι και κάποια αναλυτικά παραδείγματα ρύπανσης. Οι μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων στο έδαφος και τα υπόγεια ύδατα και η αλληλεπίδραση των ρύπων με το έδαφος είναι το ζητούμενο της εργασίας και συζητήθηκε εκτενέστερα.

Η εργασία ολοκληρώθηκε με κάποιες βασικές μεθόδους απορρύπανσης και με κάποια μέτρα προστασίας από την επέκταση της ρύπανσης στο έδαφος. Θεωρήθηκε απαραίτητο στο τέλος της εργασίας να αναφερθούν τα θεσμικά πλαίσια που ισχύουν στην Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ελλάδα για την διάθεση των αποβλήτων στο έδαφος καθώς και τα όρια επικινδυνότητας που έχουν θεσπιστεί για κάθε ρυπαντική ουσία.

Από τη θέση αυτή θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε:

Την Καθηγήτρια κα. Μαρία Π. Θεοδωροπούλου για την ανάθεση του θέματος, την βοήθειά της κατά την εκπόνηση της εργασίας, αλλά και για την καθοδήγηση και τη στήριξή της, σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

Πάτρα, Απρίλιος 2012  
Κωτσαρέλης Κωνσταντίνος  
Πολύχρονος Νικόλαος

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη εργασία έχει ως θέμα τους μηχανισμούς ρύπανσης των υπόγειων υδάτων και του εδάφους. Αρχικά γίνεται αναφορά στα υπόγεια ύδατα γενικά, στα χαρακτηριστικά τους και στον κύκλο του νερού ενώ στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο έδαφος και πιο συγκεκριμένα στους εδαφικούς ορίζοντες, στο πορώδες του εδάφους, στους γεωλογικούς σχηματισμούς που μπορεί να είναι υδροπερατοί ή αδιαπέρατοι και στην ομοιογένεια του εδάφους.

Στο τρίτο κεφάλαιο ξεκινά η μελέτη των υπόγειων συστημάτων ροής, των υδροφορέων και της κατανομής του υπόγειου νερού στις ζώνες αερισμού, κορεσμού και στην ακόρεστη ζώνη. Από αυτό το κεφάλαιο δε θα μπορούσε να εξαιρεθεί η έννοια της κατείσδυσης. Επίσης όσον αφορά τους υδροφορείς γίνεται διεξοδική αναφορά στα είδη και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά τους όπως η υδροπερατότητα. Τέλος περιγράφεται η κίνηση του νερού μέσα στο έδαφος μέσα από τους αντίστοιχους νόμους που την διέπουν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η ρύπανση. Συγκεκριμένα περιγράφονται τα είδη της ρύπανσης, οι κυριότερες πηγές ρύπανσης, οι ρυπαντικές παράμετροι που διακρίνονται σε φυσικές, χημικές και οργανικές και ακόμα κάποια παραδείγματα ρύπανσης πιο αναλυτικά δοσμένα όπως η υγειονομική ταφή απορριμμάτων και η επιβάρυνση από την γεωργία και την κτηνοτροφία.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση των μηχανισμών μεταφοράς ρύπων με την αναφορά στους φυσικούς μηχανισμούς μεταφοράς (μεταγωγή, διάχυση και διασπορά), με αναφορά στην επιβράδυνση από φιλτράρισμα, αποδόμηση κτλ και βέβαια με τις απαραίτητες μαθηματικές σχέσεις και νόμους.

Στο έκτο κεφάλαιο μελετάται η αλληλεπίδραση των ρύπων με το έδαφος, ομοίως με το προηγούμενο κεφάλαιο με τις αντίστοιχες μαθηματικές σχέσεις.

Στα επόμενα δυο κεφάλαια αναφέρονται μέθοδοι απορρύπανσης όπως η βιολογική αποκατάσταση κτλ και συστήματα για την προστασία από την ρύπανση αντίστοιχα.

Στο τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται τα θεσμικά πλαίσια που ισχύουν στην Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ελλάδα για την διάθεση των αποβλήτων στο έδαφος καθώς και τα όρια επικινδυνότητας που έχουν θεσπιστεί για κάθε ρυπαντική ουσία.

## Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ .....	2
1.1.Γενικά.....	2
1.3.Χαρακτηριστικά Υπογείων Νερών.....	3
1.4.Κύκλος του νερού-Υδρολογικό Ισοζύγιο .....	4
2.Έδαφος .....	6
2.1.Εδαφικοί Ορίζοντες .....	6
2.2.Υδρογεωλογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών.....	7
2.2.1.Το πορώδες .....	7
2.3. Γεωλογικοί Σχηματισμοί.....	8
2.3.1.Υδροπερατοί σχηματισμοί. ....	8
2.3.2.Αδιαπέρατοι σχηματισμοί.....	8
2.4.Ομοιογένεια και Ισοτροπία.....	9
3. Συστήματα Υπόγειας Ροής, Υδροφορείς και Κίνηση νερού .....	10
3.1. Συστήματα υπόγειας ροής .....	10
3.2.Υδροφορείς.....	11
3.3. Κατακόρυφη κατανομή του υπόγειου νερού .....	12
3.4. Κατείσδυση.....	14
3.5. Κυριότεροι τύποι υπόγειων υδροφορέων .....	15
3.6.Υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων.....	16
3.7. Κίνηση του υπόγειου νερού .....	19
3.8. Εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων .....	22
4.Ρύπανση Υπογείων Υδάτων.....	24
4.1.Γενικά.....	24
4.2.Είδη ρύπανσης.....	25
4.3.Κυριότερες πηγές ρύπανσης .....	26
4.4.Έλεγχος και Προστασία .....	29
4.5.Ρυπαντική Επιδεκτικότητα .....	29
4.6.Ρυπαντικές Παράμετροι.....	31
4.6.1.Φυσικές Παράμετροι.....	31
4.6.2. Χημικές Παράμετροι.....	33

4.6.3.Οργανικές Παράμετροι .....	37
4.6.4.Μη αναμίξιμα με το νερό Υγρά.....	39
4.7.Παραδείγματα Πηγών Ρύπανσης Αναλυτικά.....	39
4.7.1.Όξινη Απορροή Μεταλλείων.....	39
4.7.2.Επιβάρυνση από Γεωργία .....	41
4.7.3.Ελαιουργεία.....	42
4.7.4.Υγειονομική Ταφή .....	42
5.Μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων .....	44
5.1.Γενικά.....	44
5.2.Φυσικοί μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων.....	44
5.3. Μη-μηχανικές διεργασίες υποβάθμισης ρύπων .....	47
5.4.Επιβράδυνση .....	47
5.5. Προσομοίωση μεταφοράς ρύπων.....	49
5.5.1 Μεταφορά ρύπων λόγω μεταγωγής.....	49
5.5.2 Μεταφορά ρύπων λόγω διάχυσης-διασποράς.....	50
5.5.3 Αρχή διατήρησης της μάζας του ρύπου.....	51
6. Αλληλεπίδραση ρύπων με το έδαφος.....	54
6.1 Εισαγωγή .....	54
6.1.1.Οι φάσεις του εδάφους και των ρύπων.....	55
6.2. Ισορροπία μεταξύ αέριας φάσης και μη υδατικής υγρής φάσης.....	57
6.3 Ισορροπία μεταξύ αέριας φάσης και υδατικής φάσης.....	58
6.4 Ισορροπία μεταξύ υδατικής φάσης και μη υδατικής υγρής φάσης .....	59
6.5 Ισορροπία μεταξύ υδατικής φάσης και στερεάς φάσης.....	60
6.5.1 Μηχανισμοί εισρόφησης.....	61
6.5.2 Μαθηματική προσομοίωση του φαινομένου της εισρόφησης.....	62
6.6 Πρακτικές συνέπειες της αλληλεπίδρασης ρύπων – εδάφους.....	66
7.Μέθοδοι Απορρύπανσης .....	69
7.1.Γενικά.....	69
7.1.1. Η μέθοδος άντλησης και απορρύπανσης διαλυμένων ρυπαντών (pump and treat)...	69
7.1.2. Αεροδιαχωρισμός (air stripping) .....	70
7.1.3.Αεροδιασπορά (air sparging). .....	70
7.1.4. Η βιολογική αποκατάσταση (bio-remediation).....	70
7.1.5. Η μέθοδος άντλησης επιπλεόντων ρυπαντών .....	71
7.1.6.Αφαίρεση βαρέων μετάλλων με εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος .....	71

7.2.Απορρύπανση Ακόρεστης Ζώνης .....	73
8. Προστασία από Ρύπανση .....	75
8.1. Συστήματα Κάλυψης .....	75
8.2. Κατακόρυφα περιμετρικά διαφράγματα .....	75
8.3. Σταθεροποίηση του εδάφους .....	76
8.4. Υδραυλικά συστήματα .....	76
9. Θεσμικά Πλαίσια .....	77
9.1. Θεσμικά πλαίσια .....	77
9.2. Όρια Ρύπανσης.....	79
Βιβλιογραφία.....	80

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα υπόγεια νερά ως υπόγειος πλούτος μιας χώρας συνδέονται άμεσα με τον άνθρωπο. Επίσης το νερό είναι καθοριστικός παράγοντας για την οικονομία και την πρόοδο μια κοινωνίας. Η οικιστική ανάπτυξη, η βιομηχανία, η γεωργία και η κτηνοτροφία, ο τουρισμός κτλ είναι δραστηριότητες για τις οποίες απαιτούνται μεγάλες ποσότητες νερού.

Έτσι τα υπόγεια ύδατα πρέπει να θεωρούνται ως ένας από τους πιο σημαντικούς πόρους ενός κράτους ή μιας διοικητικής περιφέρειας. Σε αντίθεση με τους άλλους υπόγειους φυσικούς πόρους (μεταλλεύματα, υδρογονάνθρακες, ορυκτά κτλ) τα υπόγεια ύδατα έχουν το πλεονέκτημα της ανανέωσης αλλά ταυτόχρονα και το μειονέκτημα της επιδεκτικότητας σε ρύπανση.

Η προστασία τους επομένως τόσο ως προς την ποιότητα αλλά και ως προς την ποσότητα είναι απαραίτητη. Η απειλή της ποιοτικής υποβάθμισης των νερών αλλά και της ποσοτικής μείωσής τους αποτελεί τεράστιο περιβαλλοντικό πρόβλημα και χρειάζεται προσοχή ως προς το μέγεθος του προβλήματος αλλά και την μεθόδευση για την λύση του και τους τρόπους που θα οδηγήσουν σε αυτή.

Η ανανέωση των υπόγειων νερών συνδέεται με την ποσοτική έννοια του υπόγειου υδατικού δυναμικού ενώ η ρύπανση με την ποιότητά του και τις μεταβολές της τόσο τοπικά όσο και χρονικά. Υπάρχουν βέβαια και περιπτώσεις όπως η διείσδυση αλμυρού θαλασσινού νερού σε κάποιους υπόγειους υδροφορείς, που η ποιοτική και ποσοτική έννοια έχουν στενή σχέση μεταξύ τους.

Τέλος αξίζει να επισημανθεί πως η υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων οφείλεται στο μεγαλύτερο βαθμό σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες και πιο σπάνια σε φυσικά αίτια όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της επίδρασης των πετρωμάτων με τα οποία το νερό έρχεται σε επαφή κατά την υπόγεια κίνησή του.



# 1.ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ

## 1.1.Γενικά

Το νερό που υπάρχει στη φύση και είναι χρήσιμο για τον άνθρωπο διακρίνεται σε α) επιφανειακό και β) σε υπόγειο. Το επιφανειακό νερό ορίζεται ως το νερό των λιμνών και των ποταμών ενώ το υπόγειο ως το νερό που είναι αποθηκευμένο ή κινείται μέσα στο έδαφος.

Τα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν το μεν από το δε μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

- a) Κατανομή στον χώρο: τα επιφανειακά ύδατα εμφανίζονται τοπικά (π.χ. λίμνες) ή ακολουθούν συγκεκριμένη πορεία (π.χ. ποτάμια) ενώ τα υπόγεια καταλαμβάνουν πολύ μεγάλες εκτάσεις.
- b) Χρονική μεταβλητότητα: τα υπόγεια ύδατα σε αντίθεση με τα επιφανειακά παρουσιάζουν πολύ μικρή μεταβλητότητα στον χρόνο. Έτσι τα υδάτινα αποθέματα στο έδαφος είναι συνήθως μεγάλα και μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες σε διάφορες χρονικές περιόδους.
- c) Κόστος εγκαταστάσεων και λειτουργίας: τα έργα συλλογής επιφανειακών υδάτων όπως φράγματα, αγωγοί μεταφοράς κτλ έχουν τεράστιο κόστος αλλά μικρό κόστος λειτουργίας. Αντίθετα, το κόστος των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης υπόγειων νερών όπως γεωτρήσεις, αντλιοστάσια κτλ είναι μικρό, όμως το κόστος τόσο της λειτουργίας είναι μεγάλο και ιδιαίτερα όταν η άντληση γίνεται σε υδροφόρα στρώματα που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος.
- d) Ποιότητα νερού: πολύ σημαντικό θέμα όσον αφορά την εκμετάλλευση και την διαχείριση. Ειδικά στην περίπτωση των υπόγειων υδάτων, τα οποία είναι και λιγότερο εκτεθειμένα στην ρύπανση, η διαδικασία καθαρισμού σε περίπτωση ρύπανσης είναι πιο δύσκολη και πιο δαπανηρή. (1)

Τα υπόγεια νερά αποτελούν μέρος του υδρολογικού κύκλου και αντιστοιχούν σε 0,6% του συνολικού νερού του πλανήτη. Η κυριότερη προέλευσή τους είναι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Μικρό ποσοστό των υπόγειων νερών είναι μαγματικής ή κοσμικής προέλευσης, που εισέρχεται για πρώτη φορά στον υδρολογικό κύκλο. Υπάρχει και το συγγεντικό που είναι νερό το οποίο δεν έχει έλθει σε επαφή με την ατμόσφαιρα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το νερό εισέρχεται στο υπέδαφος από την επιφάνεια του εδάφους, είτε κατευθείαν από τις βροχοπτώσεις, είτε από σώματα επιφανειακού νερού όπως ποτάμια και λίμνες. Μετά κινείται αργά σε διάφορες αποστάσεις μέχρι να επιστρέψει στην επιφάνεια του εδάφους, είτε με φυσική εκφόρτιση (π.χ. πηγές), είτε

με ανθρώπινη παρέμβαση (π.χ. πηγάδια και γεωτρήσεις), είτε τέλος μέσω της διαπνοής των φυτών. Ο χρόνος παραμονής του υπόγειου νερού στο υπέδαφος αποτελεί την ηλικία του νερού.

Γενικά το υπόγειο νερό που προέρχεται από την κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων διαχωρίζεται σε:

**§ Βαρυτικό νερό:** υπακούει στους νόμους της βαρύτητας και παίρνει μέρος στην υπόγεια κυκλοφορία. Το νερό αυτό μπορεί να ληφθεί άμεσα ή έμμεσα.

Η ειδική απόδοση  $S_y$  (specific yield) ενός γεωλογικού σχηματισμού ορίζεται ως ο λόγος του βαρυτικού νερού ( $V_w$ ), προς τον όγκο του σχηματισμού αυτού ( $V$ ):  $S_y = V_w/V$ . Η ειδική απόδοση ταυτίζεται με το ενεργό πορώδες.

**§ Νερό κατακράτησης:** δεν υπακούει στους νόμους της βαρύτητας άρα δεν παίρνει μέρος στην υπόγεια κυκλοφορία.

Η ειδική κατακράτηση  $S_r$  (specific retention) ενός γεωλογικού σχηματισμού ορίζεται ως ο λόγος του νερού κατακράτησης ( $V_r$ ) προς τον όγκο του σχηματισμού αυτού ( $V$ ):  $S_r = V_r/V$

### 1.3.Χαρακτηριστικά των Υπόγειων Νερών

Τα υπόγεια νερά απαντώνται πάντα χωρίς φως, χωρίς τη δυνατότητα ανανέωσης του οξυγόνου και επηρεάζονται από την αργή διήθηση μέσα από πορώδη εδαφικά υλικά στα οποία υπάρχουν αναερόβια βακτηρία και διάφορα άλατα. Η θερμοκρασία τους, ανάλογα βέβαια και με το βάθος επηρεάζεται ελάχιστα ή καθόλου από τις μεταβολές της ατμόσφαιρας. Η θερμοκρασία παρουσιάζει ιδιαίτερη σταθερότητα και στον χρόνο και κυμαίνεται συνήθως γύρω στους  $16^{\circ}\text{C}$  και  $18^{\circ}\text{C}$ . Μεγαλύτερες τιμές της θερμοκρασίας συνδέονται με ανωμαλίες της γεωθερμικής βαθμίδας.

Η χημική σύσταση των υπόγειων υδάτων καθορίζεται από:

α) το είδος και την σύσταση των πετρωμάτων διαμέσου των οποίων κατεισδύει μέχρι να φτάσει στον υδροφορέα και αυτών που συναντά κατά την κίνησή του μέσα στον υδροφορέα

β) από την χρονική διάρκεια της επαφής νερού-πετρωμάτων και τον χρόνο παραμονής του στο υπέδαφος

Η χημική σύσταση των υπόγειων νερών δεν είναι σταθερή. Μεταβάλλεται συναρτήσει του χώρου και του χρόνου και δευτερευόντως επηρεάζεται σε μικρό ή μεγαλύτερο βαθμό από παράγοντες

ανθρωπογενούς προέλευσης που προκαλούν την μεταβολή της φυσικής ποιότητάς τους.

Προέλευση κύριων ιόντων:

- §  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{Mg}^{2+}$ : το ασβέστιο κυρίως από ανθρακικά ιζηματογενή πετρώματα και το μαγνήσιο κυρίως από ανθρακικά πετρώματα, (περιδοτίτες και σερπεντινίτες).
- §  $\text{K}^+$  και  $\text{Na}^+$ : κυρίως από πετρώματα που περιέχουν γρανίτες, βασάλτες κτλ, αργιλικά ορυκτά, μοσχοβίτη κτλ
- §  $\text{HCO}_3^-$ : από ανθρακικά πετρώματα διαλυμένα στο νερό και από το  $\text{CO}_2$  της ατμόσφαιρας ή του εδάφους
- §  $\text{Cl}^-$ : από διείσδυση θαλασσινού νερού, από παρουσία εβαποριτικών ορυκτών, από λύματα και οικιακά απόβλητα
- §  $\text{SO}_4^{2-}$ : από διάλυση του  $\text{CaSO}_4$ , από οξείδωση πυριτικών και αργιλικών πετρωμάτων.
- §  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  και  $\text{NO}_2^-$ : μορφές διαλυμένου αζώτου στο υδάτινο περιβάλλον που μετατρέπονται από τη μια μορφή στην άλλη. Η νιτρική οφείλεται κυρίως στα οικιακά απόβλητα και στις γεωκτηνοτροφικές δραστηριότητες (λιπάσματα κτλ).

Δευτερεύοντα συστατικά:

Οι συγκεντρώσεις τους στα νερά είναι συνήθως μικρότερες του 1 mg/l. Τα συνηθέστερα είναι : σίδηρος, στρόντιο, βόριο, βάριο, βρώμιο, ιώδιο, χρώμιο, χαλκός, κοβάλτιο, μόλυβδος, μαγγάνιο, νικέλιο, φωσφορικά κ.ά.  
(2)

#### **1.4.Κύκλος του νερού-Υδρολογικό Ισοζύγιο**

Η κυκλική κίνηση του νερού από τη θάλασσα στην ατμόσφαιρα και από την ατμόσφαιρα με τις κατακρημνίσεις πίσω στη γη, όπου συλλέγεται στα ρεύματα και κυλά πάλι στη θάλασσα είναι γνωστή ως υδρολογικός κύκλος. Εδώ το νερό εμφανίζεται με όλες τις δυνατές μορφές: υγρό, αέριο (υδρατμοί), στερεό (χιόνι, χαλάζι). Το σύνολο της ενέργειας που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί ο κύκλος του νερού προέρχεται αποκλειστικά από τον ήλιο.



Σχ.1.1. Απλοποιημένη γραφική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου

Αφού το νερό φθάσει στη γη με τις διάφορες μορφές κατακρημνισμάτων μπορεί να ακολουθήσει μια από τις εξής πορείες:

- Να διαπεράσει την επιφάνεια του εδάφους, να κατέλθει στο υπέδαφος και στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες και να προστεθεί στο υπόγειο νερό. Η ποσότητα αυτή ορίζεται ως κατείσδυση (I). Μέρος της ποσότητας αυτής μπορεί να επανέλθει στην επιφάνεια ύστερα από κάποιο χρόνο παραμονής στο υπέδαφος και έπειτα να οδηγηθεί στη θάλασσα από όπου εξατμίζεται ξανά για να επαναληφθεί ο κύκλος.
- Να ρέει επιφανειακά και παραλαμβάνόμενο από το υδρογραφικό δίκτυο να εκχυθεί στη θάλασσα (ή σπανιότερα σε λίμνες). Η ποσότητα που ρέει επιφανειακά και καταλήγει στη θάλασσα συνιστά την επιφανειακή απορροή (R) .
- Να επανεξατμιστεί από την επιφάνεια του εδάφους, από την ελεύθερη επιφάνεια του υδρογραφικού συστήματος ή μέσω της διαπνοής των φυτών, τα οποία το αντλούν από το υπέδαφος. Αυτή η ποσότητα είναι η εξατμισοδιαπνοή (E).

Όλο αυτό το φαινόμενο της κυκλοφορίας και κατανομής του νερού στην ατμόσφαιρα και τη γη, εκφράζεται από την εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου. Η εξίσωση αυτή είναι χαρακτηριστική για κάθε περιοχή και χαρακτηρίζει την υδάτινη οικονομία της:  $P=R+E+I$

Όπου:  $P$  = τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (precipitation)

$E$  = η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration )

$R$  = η επιφανειακή απορροή (runoff)  
 $I$  = η κατείδυση (infiltration)

Τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να εκφραστούν σε ύψος νερού (mm) ή σε όγκο νερού ( $m^3$ ) ή σε ποσοστό επί τοις εκατό (%). (3)

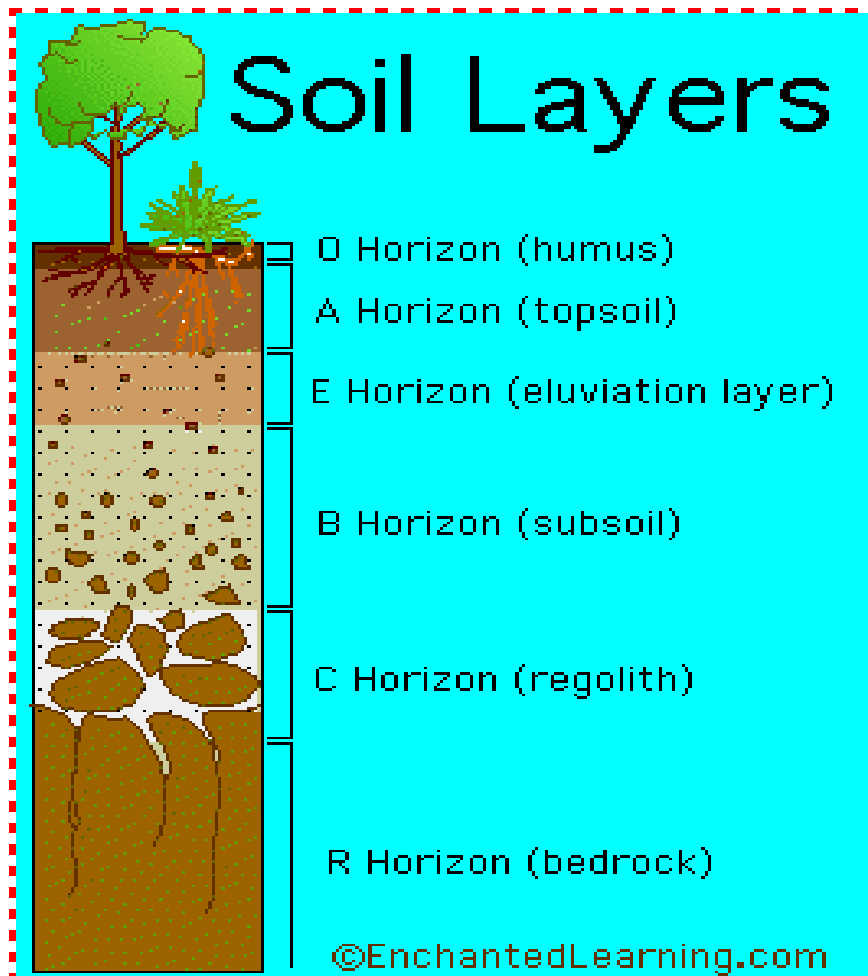
## 2. Έδαφος

### 2.1. Εδαφικοί Ορίζοντες

Από μια κατακόρυφη τομή του εδάφους διακρίνονται οι παρακάτω εδαφικοί ορίζοντες οι οποίοι απεικονίζονται και στο σχήμα 2.1:

- Ø Επιφανειακός ορίζοντας O: Στρώμα νεκρής οργανικής ύλης
- Ø Ορίζοντας A: Ανάμιξη οργανικής ύλης με ανόργανη
- Ø Ορίζοντας B: Εμπλουτισμένος με κolloειδή και θρεπτικές ουσίες
- Ø Ορίζοντας C: Ημιαποσαθρωμένο μητρικό υλικό
- Ø Ορίζοντας R: Βραχώδες υπόθεμα (bedrock) κάτω από το έδαφος

Περιβαλλοντικά ενδιαφέρουν οι εδαφικοί ορίζοντες A, B και C. (4)



## 2.2.Υδρογεωλογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών

### 2.2.1.Το πορώδες

Το πορώδες ( $n$ ) είναι ένα μέτρο των διακένων (πόρων, κενών και ρωγμών) που υπάρχουν σε ένα πέτρωμα ή στο έδαφος και εκφράζεται με το λόγο του συνολικού όγκου των διακένων ( $V_{κ}$ ) προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος ή του εδάφους αντίστοιχα ( $V_{ολ}$ ):  $n=V_{κ}/V_{ολ}$ . Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές ολικού πορώδους από 0-60%.

Πίν.2.1: Τιμές ολικού πορώδους (5)

Προσχώσεις	Πορώδες (%)	Ιζηματογενή πετρώματα	Πορώδες (%)	Κρυσταλλικά πετρώματα	Πορώδες (%)
Μικρά χαλίκια	24-36	Ψαμμίτες	5-30	Ρωγματομένα	0-10
Μεγάλα χαλίκια	25-38	Ψιλόλιθοι	21-41	Μη ρωγματομένα	0-5
Χονδρόκοκκη άμμος	31-48	Ασβεστόλιθοι	0-40	Βασάλτες	3-35
Λεπτόκοκκη άμμος	26-53	Καρστοποιημένοι ασβεστόλιθοι	0-40	Αποσαθρωμένοι γρανίτες	34-57
Ψύς	34-61	Σχιστόλιθοι	0-10		
Άργιλος	34-60				

Το ενεργό πορώδες αναφέρεται στα διάκενα που επικοινωνούν μεταξύ τους και επιτρέπουν τη ροή του υπόγειου νερού λόγω βαρύτητας ή υδροστατικής πίεσης. Τα διάκενα που δεν συνεισφέρουν στη ροή αυτή καταλαμβάνονται από νερό συγκράτησης. Στους κοκκώδεις σχηματισμούς το ενεργό πορώδες κυμαίνεται από 0-3% (άργιλος) έως 20% (χαλίκια). Το πορώδες χαρακτηρίζεται σαν α) πρωτογενές: πορώδες που οφείλεται στα διάκενα που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια σχηματισμού του πετρώματος και σαν β) δευτερογενές: πορώδες που οφείλεται στα διάκενα που δημιουργήθηκαν λόγω αποσάθρωσης, διάλυσης, δράσης του έμβιου κόσμου κ.ά. (Σχ. 2.2). Το πρωτογενές πορώδες εξαρτάται από τη διάταξη, το μέγεθος και τη μορφή των κόκκων. Μετά από κοσκίνισμα με κόσκινα καθορισμένης σειράς ανοίγματος διακένων κατασκευάζονται οι αθροιστικές κοκκομετρικές καμπύλες γεωλογικών υλικών. Από τις καμπύλες αυτές υπολογίζονται

χρήσιμα μεγέθη όπως: το ενεργό μέγεθος κόκκων, ο συντελεστής ομοιομορφίας, ο συντελεστής διαβάθμισης κ.ά.

### 2.3. Γεωλογικοί Σχηματισμοί

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί ταξινομούνται σύμφωνα με τη δυνατότητα που παρέχουν στο νερό να διεισδύσει και να κινηθεί μέσα στη μάζα τους σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τους υδροπερατούς και τους αδιαπέρατους σχηματισμούς.

#### 2.3.1. Υδροπερατοί σχηματισμοί.

Ονομάζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που επιτρέπουν τη διείσδυση και κυκλοφορία του νερού διαμέσου της μάζας τους και διακρίνονται περαιτέρω σε δύο υποκατηγορίες:

##### 1. Μικροδιαπερατά

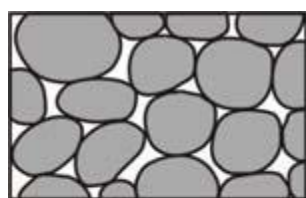
Πρόκειται για χαλαρά υλικά (άμμοι, χάλικες, κροκάλες) ή συμπαγή πετρώματα που η υδροπερατότητά τους οφείλεται στο πρωτογενές πορώδες.

##### 2. Μακροδιαπερατά

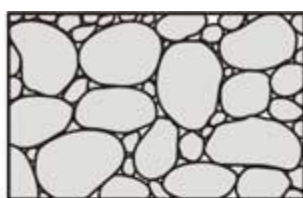
Πρόκειται για πετρώματα των οποίων η υδροπερατότητα οφείλεται στο δευτερογενές πορώδες. Είναι σύνηθες οι διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί να είναι μικρο- ή μακρο- διαπερατοί.

#### 2.3.2. Αδιαπέρατοι σχηματισμοί

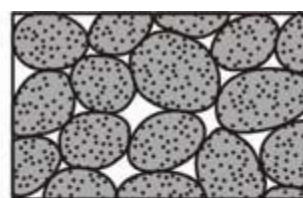
Οι αδιαπέρατοι σχηματισμοί δεν επιτρέπουν την κίνηση του νερού διαμέσου της μάζας τους, υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης.



(α)



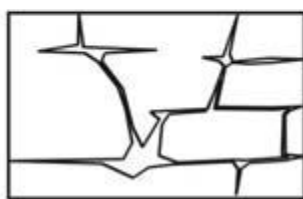
(β)



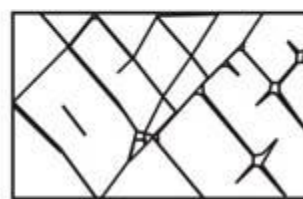
(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

Σχ.2.2: Παραδείγματα διάκενων: α) καλή διαβάθμιση υλικού με υψηλό πορώδες, β) φτωχή διαβάθμιση με μικρό πορώδες, γ) καλή διαβάθμιση σε πορώδη χαλίκια με υψηλό πορώδες, δ) καλή διαβάθμιση με παρουσία ορυκτής ύλης και μειωμένο πορώδες, ε) πορώδες από διάλυση, στ) πορώδες από ρηγμάτωση.

## 2.4.Ομοιογένεια και Ισοτροπία

Χρειάζεται η αναγκαία υπόθεση της ομοιογένειας του εδάφους για να αναπτυχθούν οι θεωρίες για κίνηση, αποθήκευση, κατανομή κτλ του υπόγειου νερού.

Ομοιογενές λέγεται ένα υλικό ως προς μια ιδιότητά του όταν παντού στην μάζα του κατά την ίδια κατεύθυνση η ιδιότητα αυτή έχει την ίδια τιμή. Για παράδειγμα ένα υλικό είναι ομοιογενές ως προς την περατότητα όταν σε όλα τα σημεία παρουσιάζει τον ίδιο συντελεστή περατότητας προς την ίδια βέβαια κατεύθυνση. Εάν μια ιδιότητα δε μετράται με διανυσματικό μέγεθος τότε δεν τίθεται θέμα κατεύθυνσης αλλά μόνο τιμής, όπως στο παράδειγμα του ενεργού πορώδους. Ένα έδαφος χαρακτηρίζεται ως ομοιογενές όταν σε όλα τα σημεία παρουσιάζει την ίδια τιμή ενεργού πορώδους.

Σύμφωνα με τον ορισμό της ομοιογένειας δεν υπάρχει κανένα έδαφος που να είναι απόλυτα ομοιογενές. Όμως παρόλα αυτά συμβαίνει τα διάφορα πετρώματα και οι σχηματισμοί να συμπεριφέρονται σαν να ήταν αυστηρά ομοιογενή. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται σε στατική αντιστάθμιση της ετερογένειάς τους. Γενικά, ένα σύνολο υλικών μπορεί να θεωρηθεί ομοιογενές εάν ο θεωρούμενος όγκος του έχει διαστάσεις 50-100 φορές πιο μεγάλες από αυτές που έχουν τα μεγαλύτερα αυτοτελή – συμπαγή τεμάχια που το απαρτίζουν, με την προϋπόθεση βέβαια όλος ο όγκος αυτός να σχηματίστηκε υπό τις ίδιες συνθήκες και να μη αποτελείται από διαφορετικές ζώνες.

Για παραμέτρους που εκφράζονται με διανυσματικά μεγέθη, όπως π.χ. είναι η περατότητα υπεισέρχεται η έννοια της ισοτροπίας. Ένα έδαφος χαρακτηρίζεται ως ισότροπο ως προς μια διανυσματική ιδιότητα όταν προς όλες τις κατευθύνσεις η ιδιότητα αυτή έχει την ίδια τιμή. Αν η τιμή της ιδιότητας αυτής αλλάζει από κατεύθυνση σε κατεύθυνση τότε το έδαφος χαρακτηρίζεται ως ανισότροπο. Είναι δυνατό ένα έδαφος να είναι ισότροπο προς μια ιδιότητα και ανισότροπο ως προς μια άλλη. Τονίζεται πως για μονόμετρα μεγέθη δεν υπάρχει το ζήτημα της ισοτροπίας.

Η διερεύνηση των υπόγειων ροών στηρίζεται στην υδραυλική συμπεριφορά τους. Συγκεκριμένα αναφέρεται στο δισδιάστατο επίπεδο, παρόλο που η κίνησή τους εξελίσσεται στην πραγματικότητα στον



τρισεδιάστατο χώρο. Η παραδοχή της υπόθεσης οφείλεται στο γεγονός ότι στα πρακτικά προβλήματα το πάχος των υδροφορέων είναι πολύ μικρότερο των οριζόντιων διαστάσεών τους και έτσι οι μεταβολές στην κατακόρυφη διεύθυνση θεωρούνται αμελητέες. (1)

### 3. Συστήματα Υπόγειας Ροής, Υδροφορείς και Κίνηση νερού

#### 3.1. Συστήματα υπόγειας ροής

Σύστημα υπόγειας ροής ορίζεται μια συνεχής τρισεδιάστατη μονάδα υπόγειας ροής με μία περιοχή τροφοδοσίας (εμπλουτισμού) και μία ή περισσότερες περιοχές εκφόρτισης ή εκροής. Ο **εμπλουτισμός** συμβαίνει σε περιοχές όπου το νερό της βροχόπτωσης πέφτει στην επιφάνεια, κινείται στην ακόρεστη ζώνη και εισέρχεται στην κορεσμένη. Συμβαίνει επίσης σε περιοχές όπου επιφανειακά στρώματα νερού τροφοδοτούν υπόγεια υδροφόρα στρώματα. Η **εκφόρτιση** πραγματοποιείται σε πηγές, λίμνες, καθώς και ως διαπνοή των φυτών (Σχ.3.1). Η σταθερότητα του συστήματος ροής είναι σε συνάρτηση με το βάθος και τη θέση.



Σχ.3.1.Περιοχές εμπλουτισμού και εκφόρτισης

### 3.2.Υδροφορείς

Το υπόγειο νερό κινείται μέσα στα διάκενα εδαφών ή πετρωμάτων τα οποία χαρακτηρίζονται ως διαπερατά (ή υδατοπερατά). Οι όγκοι των γεωλογικών σχηματισμών μέσα στους οποίους μπορεί να κινηθεί το νερό λέγονται υδροφορείς ή υδροφόρα στρώματα. Μέσα τους περιέχεται αρκετό κορεσμένο υλικό με νερό, ώστε να μπορούν να τροφοδοτήσουν με νερό γεωτρήσεις ή πηγές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα υδροφορέων αποτελούν αλουβιακές αποθέσεις άμμων και χαλίκων. Αντίθετα, τα αδιαπέρατα αποθηκεύουν μικρές ποσότητες νερού χωρίς όμως να έχουν την ικανότητα μεταφοράς του. Εδώ ανήκουν τα αργιλικά εδάφη, ο φλύσγις και τα πυριγενή (μαγματικά) ή μεταμορφωμένα πετρώματα, των οποίων το πορώδες είναι πολύ μικρό. Η ενδιάμεση κατηγορία των δυο παραπάνω είναι εδάφη με σημαντικά μικρότερη ικανότητα μεταφοράς νερού από τα διαπερατά εδάφη. Αυτά τα στρώματα χαρακτηρίζονται ως ημιπερατά. Τυπικό παράδειγμα είναι οι φακοί αργίλου σε εναλλαγές με αμμώδη εδάφη.

Η ροή του νερού στους υδροφορείς λέγεται αλλιώς και ροή σε πορώδη μέσα. Το μέτρο της ικανότητας του νερού να διέρχεται από κάποιο υλικό λέγεται διαπερατότητα. Ο ρυθμός κίνησης του υπεδαφικού νερού εξαρτάται πρώτον από τη φύση και την έκταση της πρωτογενούς και δευτερογενούς διαπερατότητας και δεύτερον από την υδραυλική κλίση (κλίση υδροφόρου ορίζοντα). Η πρωτογενής διαπερατότητα οφείλεται στο ενεργό πορώδες ενώ η δευτερογενής στο ρηξιγενή ιστό πετρωμάτων και εδαφών.

Γενικά τα υδροφόρα στρώματα εξυπηρετούν πολλαπλούς στόχους όπως τους εξής:

1. Αποτελούν πηγές παροχής νερού: τα υπόγεια ύδατα θεωρούνται ανανεώσιμοι πόροι λόγω της επαναπλήρωσης των αποθεμάτων με τις κατακρημνίσεις.
2. Μπορούν να λειτουργήσουν ως φίλτρα καθαρισμού: υπάρχουν τεχνικές τεχνητού εμπλουτισμού με τις οποίες ακάθαρτα επιφανειακά νερά μπορούν να διηθηθούν στο έδαφος με αποτέλεσμα τον μερικό ή πλήρη καθαρισμό τους.
3. Ρυθμίζουν παροχές επιφανειακών υδάτων: η λειτουργία αυτή πραγματοποιείται τόσο στα ποτάμια όσο και στις πηγές με την ρύθμιση της στάθμης των υπόγειων υδάτων (π.χ. με αντλήσεις) σε

υδροφόρα στρώματα που επικοινωνούν με επιφανειακά νερά υδραυλικά.

### 3.3. Κατακόρυφη κατανομή του υπόγειου νερού

Το υπόγειο νερό στο υπέδαφος μπορεί να διακριθεί σε δύο ζώνες:

#### 1. Ζώνη αερισμού (Zone of aeration)

Η ζώνη αυτή αποτελείται από διάκενα, στα οποία υπάρχει μερικώς νερό και μερικώς αέρας (διφασική ροή). Υποδιαιρείται σε (Σχ. 3.2):

- Υποζώνη εδαφικού νερού μικρού πάχους, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και τη βλάστηση. Εδώ η υγρασία μεταβάλλεται ανάλογα με τους κλιματικούς παράγοντες.
- Ενδιάμεση ζώνη όπου το νερό συγκρατείται με υγροσκοπικές και τριχοειδείς δυνάμεις και από την οποία το νερό περνάει κινούμενο προς τη ζώνη κορεσμού.
- Τριχοειδή υποζώνη με ύψος που μεταβάλλεται, αντιστρόφως ανάλογα, με το μέγεθος των. Η τριχοειδής ανύψωση  $h_c$  δίνεται από τη σχέση:

$$h_c = (2\tau/\epsilon R)\sin\varphi$$

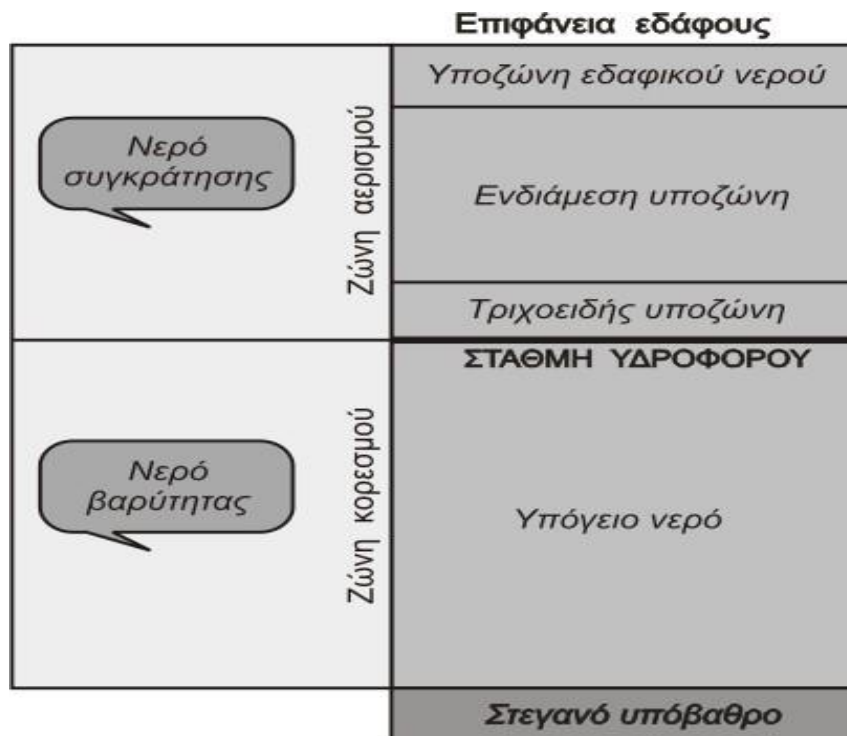
όπου:

$\tau$ : η επιφανειακή τάση,  $\epsilon$ : το ειδικό βάρος του νερού,  $R$ : η ακτίνα του τριχοειδούς σωλήνα και  $\varphi$ : η γωνία επαφής ανάμεσα στα τοιχώματα του σωλήνα και το μηνίσκο. Για το καθαρό νερό σε θερμοκρασία 20 °C, το ύψος της τριχοειδούς ανύψωσης είναι  $h_c = 0,153/R$ . Στα αργιλώδη εδάφη το αναπτυσσόμενο δυναμικό από τριχοειδή φαινόμενα είναι μεγάλο. Στα αμμώδη εδάφη θεωρείται ασήμαντο.

#### 2. Ζώνη κορεσμού (Zone of saturation)

Τα διάκενα σε αυτή τη ζώνη είναι γεμάτα νερό κάτω από υδροστατική πίεση (μονοφασική ροή). Αντιπροσωπεύει το υδροφόρο στρώμα και η επάνω επιφάνεια της ζώνης αυτής είναι η ελεύθερη (ή αλλιώς φρεάτια) επιφάνεια. Η ζώνη αυτή μπορεί να τροφοδοτήσει με νερό τον άνθρωπο και ως εκ τούτου έχει ιδιαίτερη σημασία. Το επιφανειακό νερό υπό την επίδραση της βαρύτητας, της υδροστατικής πίεσης κ.λ.π. διεισδύει στο έδαφος διαμέσου των διακένων και κινείται προς την κορεσμένη ζώνη, εμπλουτίζοντας με αυτό τον τρόπο τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Η κατείσδυση λοιπόν αναφέρεται στην κατακόρυφη κίνηση

του νερού στη ζώνη αερισμού ενώ η διήθηση αναφέρεται στην κίνηση του νερού στην κορεσμένη ζώνη.



Σχ.3.2. Ζώνες του υπόγειου νερού.

### 3. Ακόρεστη ζώνη

Η ακόρεστη ζώνη (unsaturated) ή αλλιώς μερικώς κορεσμένη ζώνη (partially saturated zone) καταλαμβάνει το τμήμα που υπάρχει μεταξύ της στάθμης του υπόγειου νερού και της επιφάνειας του εδάφους. Οι πόροι περιέχουν νερό και αέρα. Η ποσότητα του νερού σε ένα μερικώς κορεσμένο μέσο εκφράζεται με την περιεκτικότητα κατ' όγκο σε νερό ( $\theta$ ), που ορίζεται ως:  $\theta = V_w / V_T$  όπου:

$V_w$  : ο όγκος του νερού και

$V_T$  : ο όγκος του μέσου. Αν οι πόροι είναι κορεσμένοι, ο περιεχόμενος όγκος νερού είναι ίσος με το πορώδες ( $n$ ). Έτσι στην ακόρεστη ζώνη το περιεχόμενο νερό κυμαίνεται μεταξύ  $0 \leq \theta \leq n$ . Η κύρια συνιστώσα της ροής στην ακόρεστη ζώνη είναι η κατακόρυφη. Η κίνηση μπορεί να είναι ανοδική (εξάτμιση) ή καθοδική (κατείσδυση). Στην ακόρεστη ζώνη είναι σημαντικός ο ρόλος της στην εξασθένηση της ρύπανσης.

Η βασική διαφορά στην κίνηση του νερού μέσα στις δυο ζώνες είναι ότι στην ακόρεστη ζώνη γίνεται κατακόρυφα ενώ στην κορεσμένη ζώνη η κίνηση του νερού γίνεται σχεδόν στην οριζόντια διεύθυνση. (6)

### 3.4. Κατείσδυση

Όπως προαναφέρθηκε κατείσδυση είναι το μέρος εκείνο των κατακρημνισμάτων που διαπερνά την επιφάνεια του εδάφους, φθάνει στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες και προστίθεται στο υπόγειο νερό.

Αναλυτικότερα, τα βασικότερα φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την κατείσδυση είναι τα παρακάτω: ένα μέρος του νερού που διαπερνά την επιφάνεια του εδάφους αρχικά συμπληρώνει το έλλειμμα υγρασίας των στρωμάτων από τα οποία περνά (νερό κατακράτησης). Το υπόλοιπο νερό λόγω της βαρύτητας κινείται προς τα κάτω και προστίθεται στο υπάρχον υπόγειο νερό των υδροφόρων στρωμάτων ή κινείται στα διάφορα τμήματα του εδάφους και επανέρχεται στην επιφάνεια πριν φθάσει στους υπόγειους ορίζοντες. Κάποια ποσότητα κυρίως μέσω της διαπνοής των φυτών επανέρχεται στην ατμόσφαιρα.

Έτσι ουσιαστικά δεν παραμένει τελικά στο υπόγειο όλη η ποσότητα που περνά την επιφάνεια του εδάφους (ολική κατείσδυση) αλλά ένα μέρος αυτού το οποίο αποτελεί την ενεργή κατείσδυση ή απλά κατείσδυση.

Η ικανότητα του εδάφους να απορροφά το νερό της βροχής εκφράζεται με το δυναμικό ολικής κατείσδυσης ( $F$ ), το οποίο είναι ο μέγιστος βαθμός με τον οποίο ένα συγκεκριμένο έδαφος υπό συγκεκριμένες συνθήκες απορροφά το νερό κατακρήμνισης. το δυναμικό ολικής κατείσδυσης εκφράζεται σε mm/h ή mm/min. Αν η ένταση της βροχής  $P_i$  είναι μεγαλύτερη από το δυναμικό κατείσδυσης  $F$ , τότε η διαφορά  $P_i - F$  απορρέει επιφανειακά.

Παράγοντες που επηρεάζουν το ποσοστό κατείσδυσης είναι οι παρακάτω:

- Η ένταση της βροχόπτωσης. Όσο η ένταση αυξάνεται τόσο το ποσοστό κατείσδυσης μειώνεται.
- Η κλίση του εδάφους. Στις μεγάλες κλίσεις διευκολύνεται η απορροή και όχι η κατείσδυση.
- Η βλάστηση. Τα φυτά συγκρατούν και διευκολύνουν την ολική κατείσδυση σε βάρος της επιφανειακής απορροής.

- Η υγρασία του εδάφους, η πάκτωση του εδάφους από διέλευση ζώων, ανθρώπων, μηχανημάτων και το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο υποκείμενος υδροφόρος ορίζοντας επιδρούν στο βαθμό της κατείδυσης.
- Το γεωλογικό υπόβαθρο κάθε περιοχής μεταβάλλει το ποσοστό κατείδυσης.(Πίν. 3.1) (1)

Πίν. 3.1. Συντελεστής Ενεργής Κατείδυσης σε σχέση με το γεωλογικό υπόβαθρο.

Γεωλογικό Υπόβαθρο	Συντελεστής Ενεργής Κατείδυσης
Ασβεστολιθικό	25-60%
Προσχωσιγενές	10-20%
Οφιολιθικό	4-8%
Με φλύσση, μάργες, σχιστόλιθους	3-7%
Γρανιτικό	5-12%
Μολασσικό, ψαμμιτικό	15-25%
Ηφαιστειακό	3-8%

### 3.5. Κυριότεροι τύποι υπόγειων υδροφορέων

#### 1) Ελεύθεροι υδροφορείς

Είναι οι υδροφόροι που έχουν ως δάπεδο στεγανό στρώμα και στην οροφή τους δεν παρεμβάλλεται αδιαπέρατο γεωλογικό στρώμα. Ως αποτέλεσμα στην ελεύθερη επιφάνεια των υπόγειων νερών η υδροστατική πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Κάθε μεταβολή της στάθμης του νερού αντιστοιχεί σε μεταβολή του όγκου του αποθηκευμένου νερού στον υδροφόρο. Ειδική περίπτωση ελεύθερων υδροφόρων είναι οι κρεμαστοί ή επικρεμάμενοι υδροφόροι (Σχ. 3.3).

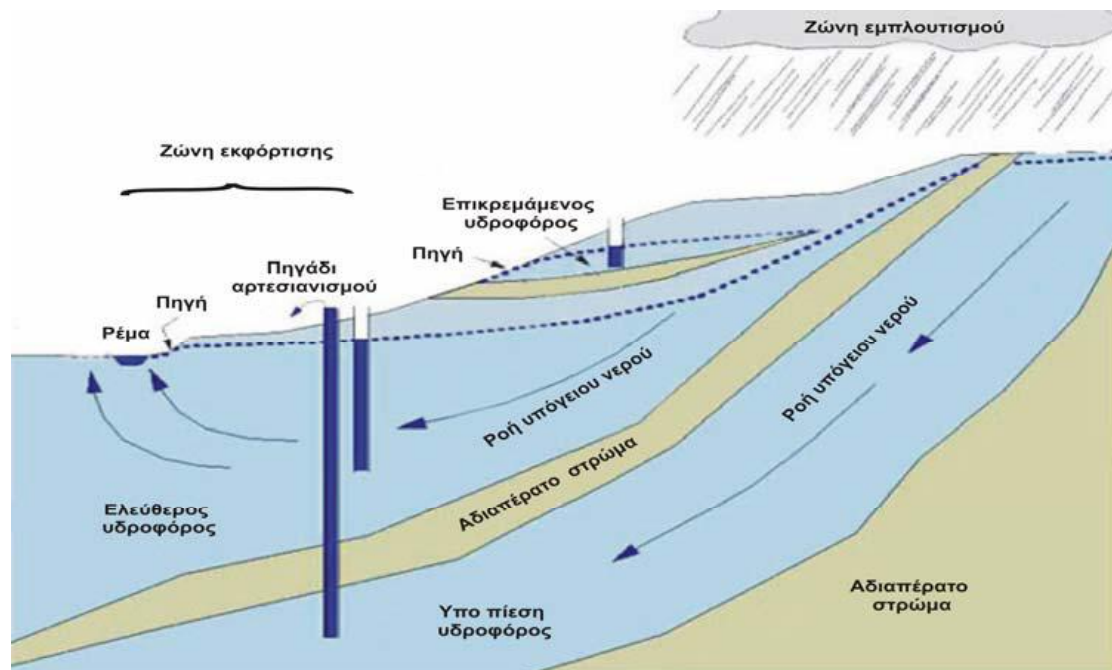
#### 2) Υπό πίεση υδροφόροι ή εγκλωβισμένοι ή αρτεσιανοί

Στα υδροφόρα αυτά στρώματα το νερό είναι εγκλωβισμένο ανάμεσα στο αδιαπέρατο στρώμα του δαπέδου και αυτό της οροφής (Σχ. 3.3). Είναι κορεσμένοι και η πίεση του νερού είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Για τον λόγο αυτό η πιεζομετρική επιφάνεια βρίσκεται ψηλότερα από την αδιαπέρατη οροφή. Στην περίπτωση που η πιεζομετρική επιφάνεια βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, παρατηρείται ροή με τη μορφή πίδακα (αρτεσιανισμός).

### 3) Ημιαρτεσιανοί (υπό μερική πίεση) υδροφορείς

Είναι υπόγειοι υδροφορείς ανάλογοι με τους υπό πίεση με τη διαφορά όμως ότι το υπερκείμενο στρώμα είναι ημιπερατό, δηλαδή παρουσιάζει μικρή υδροπερατότητα. Από πετρογραφικής άποψης διακρίνονται δύο κατηγορίες:

- 1) καρστικοί (karst aquifers), που αναπτύσσονται στα ανθρακικά πετρώματα και
- 2) πορώδεις (porous aquifers), που αναπτύσσονται σε κοκκώδεις σχηματισμούς.



Σχήμα 3.3. Είδη υδροφόρων οριζόντων.

Τα κυριότερα στοιχεία για να περιγραφεί ένα υδροφόρο στρώμα είναι:

- Γεωμετρικά: πάχος, ισοϋψείς οροφής, βάσης κτλ
- Υδροδυναμικά: ισοϋψείς πιεζομετρικών ή ελεύθερων επιφανειών
- Υδρολιθολογικά: λιθολογία και στρωματογραφία του υδροφορέα.
- Υδραυλικά: περατότητα, υδραυλική αγωγιμότητα κτλ (6)

### 3.6.Υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων

Τα κυριότερα υδραυλικά χαρακτηριστικά των υπόγειων υδροφορέων είναι:

A) Το υδραυλικό φορτίο (Hydraulic head)

Τα υπόγεια νερά κινούνται με την επίδραση της συνολικής τους ενέργειας και η οποία ισούται με το άθροισμα της κινητικής, της δυναμικής και της υδροστατικής ενέργειας. Πρακτικά η ενέργεια αυτή (H) ανά μονάδα βάρους (ή υδραυλικό φορτίο) ισούται με το άθροισμα του φορτίου πίεσης P/γ (pressure head) και του φορτίου ύψους (ή θέσης) z (elevation head):  $H=(P/\gamma)+z$  ,

όπου P: η υδροστατική πίεση και γ: το ειδικό βάρος του νερού. Το φορτίο H αναφέρεται και ως πιεζομετρικό φορτίο και ταυτίζεται με το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού σε μια γεώτρηση ανορυγμένη σε ελεύθερο υδροφορέα. Στους υπό πίεση υδροφορείς το φορτίο είναι το υψόμετρο που θα έφτανε το νερό, αν ο σωλήνας της γεώτρησης επεκτεινόταν πάνω από το έδαφος. Η κίνηση λοιπόν του υπόγειου νερού σε κάποιο πορώδες μέσο γίνεται λόγω της υδροστατικής πίεσης και της θέσης του. Οι γραμμές ίσου υδραυλικού φορτίου (ισοδυναμικές γραμμές) απεικονίζονται σε χάρτες. Οι γραμμές ροής και οι ισοδυναμικές γραμμές είναι κάθετες μεταξύ τους. Η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου ανά μονάδα μήκους ονομάζεται υδραυλική κλίση και δίνεται από τη σχέση:  $i=dH/dl$ . Το υδραυλικό φορτίο H σε ένα σημείο του πορώδους μέσου πολλαπλασιασμένο με την επιτάχυνση της βαρύτητας g, δίνει το δυναμικό ροής Φ στο σημείο αυτό:  $\Phi=H \cdot g$ . Με άλλα λόγια το Φ είναι η ενέργεια ανά μονάδα μάζας και το H η ενέργεια ανά μονάδα βάρους. Το υδραυλικό φορτίο μειώνεται κατά την κίνηση του υπόγειου νερού, λόγω απωλειών από τριβές.

## B) Διαπερατότητα-Υδροπερατότητα

Η διαπερατότητα είναι σταθερά και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου (σχήμα, μέγεθος, διάταξη κόκκων). Έχει διαστάσεις  $L^2$ . Ένα μέσο έχει υδραυλική αγωγιμότητα ίση με τη μονάδα, όταν μεταβιβάζει στη μονάδα του χρόνου κάθετα στη διεύθυνση της υπόγειας ροής, τη μονάδα όγκου νερού από μια μοναδιαία διατομή με υδραυλική κλίση που ισούται με τη μονάδα. Το κινηματικό ιξώδες σχετίζεται με την αντίσταση του υγρού στη ροή. Η υδραυλική αγωγιμότητα έχει διαστάσεις ταχύτητας  $LT^{-1}$  και υπολογίζεται από τον νόμο του Darcy.

Γενικά οι γεωλογικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως (Πίν. 3.2):

- § Πολύ υδροπερατοί (  $k \geq 10^{-1}$  m/s )
- § Υδροπερατοί (  $10^{-6} < k < 10^{-1}$  m/s )
- § Λίγο υδροπερατοί (  $10^{-9} < k < 10^{-6}$  m/s )
- § Πρακτικά στεγανοί (  $k \leq 10^{-9}$  m/s )

Πίν. 3.2: Τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας



Υλικό	<b>k (m/s)</b>
Μεγάλα χαλίκια	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Χαλίκια μεσαίου μεγέθους	$3,1 \cdot 10^{-3}$
Χαλίκια μικρού μεγέθους	$5,2 \cdot 10^{-3}$
Χονδρόκοκκη άμμος	$5,2 \cdot 10^{-4}$
Μεσόκοκκη άμμος	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Λεπτόκοκκη άμμος	$2,9 \cdot 10^{-5}$
Ίλύς	$9,2 \cdot 10^{-7}$
Άργιλος	$2,7 \cdot 10^{-9}$

Η διαπερατότητα ( $K_s$ ) συνδέεται με την υδραυλική αγωγιμότητα ( $k$ ) με τη σχέση:  $K_s = k \cdot \mu / \gamma$  όπου

$\mu$ : το δυναμικό ιξώδες (μονάδες  $ML^{-1}T^{-1}$ ) και

$\gamma$ : το ειδικό βάρος του ρευστού ( $N/m^3$ ).

Η υδραυλική αγωγιμότητα υπολογίζεται από επιτόπου πειραματικές μετρήσεις, από δοκιμαστικές αντλήσεις, από την κοκκομετρία με τη βοήθεια εμπειρικών τύπων και με εργαστηριακές μεθόδους. Η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα, ως μέτρο κίνησης του νερού σε ακόρεστο μέσο, έχει μικρότερη τιμή από αυτή της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κορεσμένο μέσο. Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός ακόρεστου μέσου ( $k_{unsat}$ ) σε σχέση με την κορεσμένη τιμή ( $k$ ) δίνεται από τη σχέση:  $k_{unsat} = k [(S_s - S_o) / (1 - S_o)]^3$

Όπου:  $S_s$ : ο βαθμός κορεσμού και

$S_o$ : ο κορεσμός που αντιπροσωπεύει το νερό των πόρων που δεν κινείται. (5)

### Γ) Μεταβιβαστικότητα

Είναι το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας ( $k$ ) και του πάχους του υδροφόρου στρώματος ( $D$ ):  $T = k \cdot D$ . Η μεταβιβαστικότητα εκφράζει τον όγκο του νερού που περνά από μια διατομή του υδροφόρου στρώματος με μοναδιαία υδραυλική κλίση.

### Δ) Αποθηκευτικότητα

Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας ( $S$ ) είναι ο όγκος νερού που μπορεί να ληφθεί από ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός υδροφόρου στρώματος με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου.

Έτσι η αποθηκευτικότητα ορίζεται από τη σχέση:  $S = \Delta V / (A \cdot \Delta h)$ ,

όπου  $\Delta V$ : ο όγκος νερού που απελευθερώνεται από τη μονάδα οριζόντιας επιφάνειας  $A$ , εξαιτίας μοναδιαίας πτώσης του φορτίου  $\Delta h$ . Από αυτόν τον ορισμό προκύπτει ότι ο ρυθμός ταπείνωσης της στάθμης ( $\Delta h/\Delta t$ ) σε έναν υδροφορέα με συντελεστή αποθηκευτικότητας  $S$ , για άντληση με παροχή  $Q$ , χωρίς να συμβαίνει εμπλουτισμός, δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta h/\Delta t = Q/(S.A)$$

Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας είναι καθαρός αριθμός και στους ελεύθερους υδροφορείς παίρνει τιμές από 1%-30%, ενώ στους υπό πίεση από 0,0001%-0,5%. Η διαφορά αυτή οφείλεται στον διαφορετικό μηχανισμό απελευθέρωσης νερού από αυτά τα είδη υδροφορέων. Στους υπό πίεση υδροφορείς η αφαίρεση νερού οφείλεται σε διόγκωση του νερού και συμπίεση του υδροφορέα. Συνεπώς η αποθηκευτικότητα εξαρτάται από την ελαστικότητα του υδροφορέα και την συμπιεστότητα του υπόγειου νερού. Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας  $S$  στους ελεύθερους υδροφορείς συμπίπτει με το ενεργό πορώδες, ενώ στους υπό πίεση υδροφορείς ισχύει:

$$S = \gamma D (\alpha + \beta S_y)$$

όπου  $\gamma$ : ειδικό βάρος νερού,

$D$ : πάχος υδροφορέα,

$S_y$ : ενεργό πορώδες,

$\alpha$ : συντελεστής συμπιεστότητας υδροφορέα και

$\beta$ : συντελεστής συμπιεστότητας νερού.

### 3.7. Κίνηση του υπόγειου νερού

Η κίνηση των υπόγειων νερών ακολουθεί τους νόμους των Νευτώνιων ρευστών. Το νερό είναι Νευτώνειο ρευστό και αυτό σημαίνει ότι η διατμητική τάση ( $\tau$ : δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας) είναι ανάλογη της βαθμίδας ταχύτητας ( $du/dy$ ) και του δυναμικού ιξώδους ( $\mu$ ):  $\tau = \mu(du/dy)$

Η σχέση αυτή αποτελεί το νόμο του ιξώδους του Νεύτωνα. Ιξώδες είναι η αντίσταση ενός υγρού στη ροή. Η εσωτερική τριβή κατά την κίνηση του νερού, παράγει έργο το οποίο μετατρέπεται σε θερμότητα αυξάνοντας τη θερμοκρασία του νερού. Σε προβλήματα ροής, όπου υπάρχουν και δυνάμεις αδράνειας και τριβής εμφανίζεται ο λόγος του δυναμικού ιξώδους ( $\mu$ ) προς την πυκνότητα ( $\rho$ ). Ο λόγος αυτός ονομάζεται κινηματικό ιξώδες:  $\nu = \mu/\rho$ .

Οι συντελεστές  $\mu$  και  $\nu$  μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας και έχουν διαστάσεις:  $\mu = L^{-1}M^1T^{-1}$  και  $\nu = L^2M^0T^{-1}$ . Ένα υγρό είναι ιδανικό, όταν δεν εμφανίζει εσωτερική τριβή ( $\mu=0$ ). Το νερό εμφανίζει μεγάλη

αντίσταση σε κάθε μεταβολή του όγκου του και γι' αυτό πρακτικά χαρακτηρίζεται ως ασυμπίεστο. Οι δυνάμεις συνοχής δίνουν στο νερό χαρακτηριστική επιφανειακή τάση. Οι δυνάμεις συνάφειας εμφανίζονται μεταξύ ετεροειδών μορίων, δηλ. μεταξύ του νερού και των στερεών σωμάτων με τα οποία έρχεται σε επαφή. Οι εξισώσεις που διέπουν την κίνηση των υπόγειων ροών είναι:

1) Ο νόμος του Darcy που περιγράφεται από την εξίσωση:

$$v = -k \text{ grad } h \quad (3.8.1)$$

Ο νόμος του Darcy έχει θεμελιωθεί σε καθεστώς ισορροπίας (μόνιμη ροή). Δεχόμαστε όμως ότι ισχύει στιγμιαία και για μη μόνιμες ροές. Οι φυσικές υπόγειες ροές υπακούουν στον νόμο του Darcy.

2) Ο νόμος της συνέχειας (εξίσωση διατήρησης της μάζας) εκφράζεται από τη μαθηματική σχέση:

$$\text{div } v = 0 \rightarrow \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \right) \quad (3.8.2)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις το  $v$  αντιστοιχεί στην ταχύτητα (m/s) με συνιστώσες  $u$ ,  $v$ ,  $w$  στο τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων,  $k$  είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (m/s) και  $h$  το πιεζομετρικό φορτίο (m). Εισάγοντας στην εξίσωση της συνέχειας (3.8.2) την (3.8.1) από το νόμο του Darcy και θεωρώντας το πορώδες μέσο ανομοιογενές προκύπτει η εξίσωση της διάχυσης (3.8.3):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{\partial h}{\partial t} S_s$$

Όπου:

$k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$ : οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας στους αντίστοιχους άξονες

$S_s$ : ειδική αποθηκευτικότητα ( $m^{-1}$ ). Εκφράζει την ποσότητα του νερού που μπορεί ν' ανακτηθεί από μοναδιαίο όγκο ενός υδροφορέα ανά μονάδα πτώσης του φορτίου.

Αν η ροή είναι μόνιμη τότε  $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$  και η πιεζομετρική επιφάνεια είναι σταθερή ομοίως και η ταχύτητα ροής είναι σταθερή

Αντίθετα στις μη μόνιμες ροές  $\frac{\partial h}{\partial t} \neq 0$  και η πιεζομετρική επιφάνεια αλλάζει με τον χρόνο.

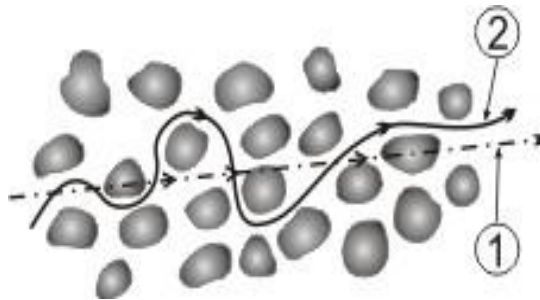
Ο νόμος του Darcy στην απλή μορφή του εκφράζεται με την εξίσωση:

$$v = -k \cdot i$$

όπου:  $k$  = η υδραυλική αγωγιμότητα και  $i = dh/dl$  η υδραυλική βαθμίδα ίση με την βαθμίδα ενεργειακού ύψους που αντιπροσωπεύει την μεταβολή του φορτίου ( $h$ ) ανά μονάδα μήκους διαδρομής ( $l$ ). Στην πράξη αναπαριστά την κλίση ( $i$ ) της πιεζομετρικής επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα μεταξύ δύο σημείων. Το πρόσημο (-) στην εξίσωση Darcy υποδηλώνει ότι η ροή γίνεται από περιοχές υψηλότερου προς περιοχές χαμηλότερου υδραυλικού φορτίου. (3)

Υπάρχει η φαινόμενη ταχύτητα Darcy (μακροσκοπική ταχύτητα) και η πραγματική ταχύτητα (μικροσκοπική ταχύτητα) η οποία ισούται με:  $v = v_{\phi} / S_y$ ,

όπου  $S_y$  = το ενεργό πορώδες. Ένα μόριο νερού δεν κινείται ευθύγραμμα σε πορώδη μέσα, αλλά ακολουθεί μια σύνθετη τροχιά, λόγω πρόσκρουσης με τους κόκκους του μέσου και τα γειτονικά μόρια νερού (Σχ. 3.4).



Σχήμα 3.4. Θεωρητική (1) και πραγματική (2) τροχιά μορίων νερού σε πορώδες μέσο.

Σε γενικευμένη μορφή ο νόμος του Darcy εκφράζεται με τη σχέση:  $Q = k \cdot i$ . Α όπου

$Q$ : η παροχή και

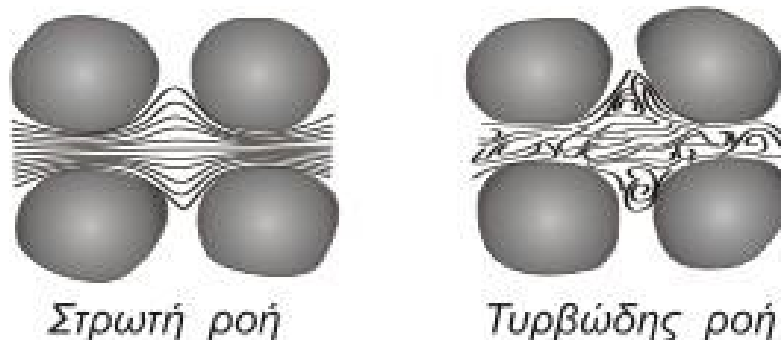
$A$ : η διατομή από την οποία περνά το νερό. Για να ισχύει ο νόμος του Darcy πρέπει η ροή να είναι στρωτή (Σχ. 3.5). Στη στρωτή ροή η ταχύτητα είναι ανάλογη με την πρώτη δύναμη της υδραυλικής κλίσης. Δείκτης για το είδος ροής (στρωτή ή τυρβώδης) αποτελεί ο αριθμός Reynolds ( $R$ ), που ισούται με:

$$R = \rho \cdot v \cdot d_m / \mu.$$

όπου:

$\rho$ : πυκνότητα του νερού,

$v$ : μέση ταχύτητα ροής,  
 $d_m$ : μέση διάμετρος κόκκων του πορώδους μέσου και  
 $\mu$ : δυναμικό ιξώδες.



Σχήμα 3.5. Στρωτή και τυρβώδης ροή.

Αν  $R \leq 10$  η ροή είναι στρωτή. Στην ακόρεστη ζώνη δεν ισχύει ο τύπος του Darcy επειδή η ροή δεν είναι μονοφασική, λόγω της παρουσίας αέρα. Λόγω της μεγάλης ταχύτητας ροής και της ανισοτροπίας που εμφανίζουν τα καρστικά υδροφόρα συστήματα συνήθως δεν ισχύει σε αυτά ο νόμος του Darcy.

Η μικροσκοπική ταχύτητα σε συνθήκες ακόρεστης ροής δίνεται από τη σχέση:  $v = v_\phi / \theta$ , όπου

$\theta$ : το περιεχόμενο κατ' όγκο εδαφικό νερό. Για ακόρεστες συνθήκες ροής ο συνδυασμός του νόμου του Darcy και της εξίσωσης της συνέχειας δίνει την παρακάτω γενική εξίσωση κίνησης του εδαφικού νερού:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k(\theta) \frac{\partial h_p}{\partial z} \right) - \frac{\partial k}{\partial z}$$

όπου:  $\theta$  το περιεχόμενο κατ' όγκο εδαφικό νερό,

$k(\theta)$ : η συνάρτηση κατανομής της υδραυλικής αγωγιμότητας,

$h_p$ : το φορτίο πίεσης και

$z$ : το φορτίο θέσης.

Η παραπάνω εξίσωση ροής στην ακόρεστη εδαφική ζώνη είναι μη γραμμική, γιατί όπως έχει προαναφερθεί η υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται από το περιεχόμενο κατ' όγκο εδαφικό νερό.

### 3.8. Εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων

Ο εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων γίνεται με φυσικό και τεχνητό τρόπο.

Ο φυσικός εμπλουτισμός επιτυγχάνεται:

- Ø Με απευθείας κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων
- Ø Διήθηση από τα επιφανειακά νερά
- Ø Υπόγεια τροφοδοσία από γειτονική λεκάνη

Στους ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες η περιοχή εμπλουτισμού μπορεί να καλύπτει όλη την περιοχή, που εκτείνονται. Στους υπό πίεση οι περιοχές εμπλουτισμού περιορίζονται εκεί όπου ο υδροφόρος εμφανίζεται στην επιφάνεια. Επίσης η ποσότητα εμπλουτισμού δεν μένει σταθερή με το χρόνο. Ο συνολικός εμπλουτισμός ενός υδροφορέα ισούται με το ποσοστό του νερού της βροχόπτωσης, το οποίο κατεισδύει και διηθείται στην κορεσμένη ζώνη, συν τον όγκο νερού της εξωτερικής τροφοδοσίας. Ο συνολικός εμπλουτισμός  $Q_r$  μπορεί να εκφρασθεί από την σχέση:

$$Q_r = P - E - R + Q_{in} - Q_{out} \pm \Delta S \text{ όπου:}$$

- P: τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα,
- E: η πραγματική εξατμισοδιαπνοή,
- R: η επιφανειακή απορροή,
- $Q_{in}$ : η εξωτερική τροφοδοσία,
- $Q_{out}$ : οι εκροές και
- $\Delta S$ : η μεταβολή των αποθεμάτων.

Στην περίπτωση αυτοτελών συστημάτων όπου η εξωτερική τροφοδοσία από γειτονικές λεκάνες θεωρείται μηδενική, οι μεταβολές στα υπόγεια αποθέματα είναι αμελητέες και οι παράγοντες,  $Q_{in}$ ,  $Q_{out}$ ,  $\Delta S$  παραλείπονται. Η παραπάνω εξίσωση προκύπτει από τη γενική:

$$\text{Εισροές} = \text{Εκροές} \pm \text{Μεταβολή αποθεμάτων}$$

Πέρα από τη φυσική τροφοδοσία για την ενίσχυση του υδατικού ισοζυγίου των υπόγειων νερών εφαρμόζεται ο τεχνητός εμπλουτισμός. Αυτός συνίσταται στην αύξηση του ρυθμού ανανέωσης του υπόγειου νερού των υδροφόρων οριζόντων με χρήση περίσσειας φυσικού ή επεξεργασμένου νερού με κατασκευή κατάλληλων διατάξεων. Η εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού μέσω πηγαδιών και γεωτρήσεων έχει εφαρμοσθεί με ικανοποιητικά αποτελέσματα τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα. Η μέθοδος είναι απλή και η τροφοδοσία γίνεται ταχύτερα. Απαιτείται όμως καθαρό νερό, γιατί εγκυμονούνται κίνδυνοι αποκροκίδωσης του εδάφους αν το νερό εμπλουτισμού περιέχει πολύ νάτριο (λόγω ανταλλαγής με ιόντα ασβεστίου). Επίσης το νερό δεν πρέπει να περιέχει βακτήρια για αποφυγή μόλυνσης.

Υδρογεωλογική λεκάνη λέγεται μια περιοχή τροφοδοσίας υπόγειων υδροφόρων οριζόντων. Τα όρια της υδρογεωλογικής λεκάνης δεν είναι τα ίδια με τα όρια της υδρολογικής λεκάνης. Είναι δυνατή η ύπαρξη

υπόγειας πλευρικής τροφοδοσίας ή απώλειας του υδροφόρου ορίζοντα, που αναπτύσσεται σε μια υδρολογική λεκάνη από ή προς μια παράπλευρη υδρολογική λεκάνη.

Εκροή είναι η ανάδυση νερού από το υπέδαφος. Το μεγαλύτερο ποσοστό φυσικής εκροής γίνεται στη θάλασσα, στις λίμνες ή στα υδρορεύματα. Αν το υπόγειο νερό εκφορτίζεται στην επιφάνεια του εδάφους με φυσικό τρόπο εμφανίζονται πηγές. Τα έργα με τα οποία γίνεται απόληψη υπόγειου νερού από τους υδροφόρους ορίζοντες ή τις πηγές λέγονται υδρομαστευτικά και διακρίνονται στα κατακόρυφα όπως γεωτρήσεις και πηγάδια και οριζόντια όπως στοές.

Η ακτίνα επίδρασης  $R$  είναι η απόσταση εκείνη από τη γεώτρηση, πέραν της οποίας δεν γίνονται αισθητά τα αποτελέσματα της άντλησης (η πτώση στάθμης ισούται με μηδέν). Η απόσταση αυτή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R=1,5 (\alpha t)^{1/2}$$

όπου:  $\alpha$ : διαχυτικότητα που είναι ίση με το πηλίκο  $T/S$  ( $T$ : η μεταβιβαστικότητα,  $S$ : η αποθηκευτικότητα του υδροφορέα) και

$t$ : χρόνος.

Από αυτή τη σχέση προκύπτει ότι η ακτίνα επίδρασης της γεώτρησης αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου και είναι ανεξάρτητη από την παροχή άντλησης. Ο ρυθμός όμως αύξησης είναι αντιστρόφως ανάλογος της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, πράγμα που σημαίνει ότι ο ρυθμός αύξησης της ακτίνας επίδρασης μειώνεται συνεχώς όσο περνά ο χρόνος.  
(6)

## **4.Ρύπανση Υπογείων Υδάτων**

### **4.1.Γενικά**

Τα υπόγεια νερά είναι πολύ λιγότερο εκτεθειμένα στις ρυπογόνες επιδράσεις σε σύγκριση με τα επιφανειακά νερά και έτσι προστατεύονται καλύτερα. Μπορεί βέβαια να υποστούν και αυτά ποιοτική υποβάθμιση που εκφράζεται με τους όρους ρύπανση και μόλυνση.

Ρύπανση είναι η εισαγωγή από τον άνθρωπο στο υδατικό περιβάλλον, άμεσα ή έμμεσα, ουσιών ή ενέργειας που έχουν ως αποτέλεσμα επιβλαβείς επιπτώσεις όπως καταστροφές των βιολογικών πόρων, κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία, παρεμπόδιση δραστηριοτήτων,

υποβάθμιση της ποιότητας του μέσου όσον αφορά τις διάφορες χρήσεις του κτλ. Σχετικές έννοιες είναι ο ρύπος και ο ρυπαντής (αυτός που ρυπαίνει).

Η μόλυνση είναι η παρουσία μέσα στο περιβαλλοντικό μέσο υψηλών συγκεντρώσεων ουσιών, ιζημάτων ή οργανισμών δηλαδή συγκεντρώσεων που βρίσκονται πάνω από το φυσιολογικό επίπεδο τιμών. (7)

Τα τελευταία χρόνια τα υπόγεια νερά πολλών χωρών έχουν ρυπανθεί εξαιτίας του τεχνολογικά ανεπαρκούς τρόπου διάθεσης και ταφής των απορριμμάτων και των αποβλήτων. Η ρύπανση κυμαίνεται από μια αλλοίωση της ποιότητας του νερού σε διαύγεια ή γεύση για παράδειγμα, μέχρι την παρουσία τοξικών ουσιών, βαρέων μετάλλων, οργανικών συστατικών, ραδιενεργών στοιχείων κτλ.

Η επικινδυνότητα κάποιου ρύπου που υπάρχει στο νερό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως: η συγκέντρωσή του, η τοξικότητά του κτλ.

Οι διαφορές στο φυσικό περιβάλλον συνδέονται με την ρύπανση του υπόγειου υδροφόρου όπως περίπου και με τους παράγοντες ρύπανσης του επιφανειακού νερού. Στα επιφανειακά νερά τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της ροής, η διαθεσιμότητα σε οξυγόνο και η ταχύτητα που γίνονται οι διεργασίες διάλυσης και διάχυσης, είναι πολύ διαφορετικά από τα αντίστοιχα του υπόγειου νερού όπως η δυνατότητα της βακτηριακής αποσύνθεσης των ρύπων. Για αυτό περιορίζονται ο ρυθμός κίνησης και η δυνατότητα διασποράς. Επίσης, η έλλειψη οξυγόνου στον υπόγειο ορίζοντα είναι κατάλληλο περιβάλλον για την ανάπτυξη αναερόβιων μικροβίων όχι όμως και για τα αερόβια.

## **4.2.Είδη ρύπανσης**

Η ρύπανση των υπόγειων υδροφόρων ανάλογα με το μέγεθος και τη γεωμετρία της πηγής προέλευσης των ρυπαντών διακρίνεται σε:

Σημειακή: η ρύπανση προέρχεται από μια μοναδική θέση (π.χ. χώρος απόθεσης ή ταφής αποβλήτων, πηγάδια διοχέτευσης αποβλήτων κ.ά.)

Γραμμική: η ρύπανση από πηγές ή αιτίες που παρουσιάζουν μια επικρατούσα γραμμική διάταξη (π.χ. διαρροές αποχετευτικού δικτύου κ.ά.)

Διάχυτη: όταν η πηγή ρύπανσης κατέχει μια εκτεταμένη περιοχή τελείως καθορισμένη ή όχι, π.χ. αγροτική ρύπανση από υπερλύπανση από χρήση φυτοφαρμάκων, από όξινη βροχή κτλ



### 4.3.Κυριότερες πηγές ρύπανσης

Οι κυριότερες πηγές ρύπανσης των υπόγειων νερών είναι:

1. Τα ατομικά συστήματα διάθεσης λυμάτων με κατάληξη την υπεδάφια διάθεση, όπως απορροφητικοί βόθροι. Τα λύματα διοχετεύονται μέσω διήθησης προς τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Αυτοί επιβαρύνονται με μικροβιολογική και χημική ρύπανση.
2. Η διάθεση στο έδαφος λυμάτων ή βιομηχανικών αποβλήτων, άμεσα μέσω γεωτρήσεων ή έμμεσα μέσω διήθησης από τις όχθες των αποδεκτών. Εάν ο αποδέκτης προκαλεί αραίωση του ρυπαντικού φορτίου όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός αραίωσης τόσο μικρότερη είναι η ρύπανση που μεταφέρεται μέσω διήθησης προς τα στρώματα του υπόγειου νερού..
3. Η ρύπανση από τα υγρά αποθηκών ζωικής χορτοτροφής που αποτελούν μια πρωτογενή πηγή ρύπανσης με νιτρικά. Κάθε διαρροή μολύνει τον αβαθή υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα.
4. Η ρύπανση από την έγχυση θερμού νερού στο υπέδαφος που προκαλεί άνοδο της θερμοκρασίας του υδροφόρου ορίζοντα.
5. Η υγειονομική ταφή των απορριμμάτων μέσα σε τάφρους, επιφανειακές κοιλότητες, χώρους λατομείων ή η επιφανειακή τοποθέτησή τους σε στρώσεις για την δημιουργία λόφων απορριμμάτων, ρυπαίνουν τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες κοντά στις εναποθέσεις όταν η στάθμη τους βρίσκεται κοντά στον πυθμένα του χώρου διάθεσης ή όταν μεταξύ του πυθμένα του χώρου διάθεσης και του υπόγειου υδροφόρου, υπάρχει έδαφος διαπερατό όπως για παράδειγμα άμμος ή χαλίκια. Βιολογικοί και χημικοί ρυπαντές, παρασύρονται από τα νερά της βροχόπτωσης που διηθούνται μέσα στα απορρίμματα, διαλύονται στο διηθούμενο νερό και τελικά κινούνται προς τους πιο κοντινούς υδροφόρους ορίζοντες.
6. Η διάθεση στο έδαφος αποβλήτων μικρών κτηνοτροφικών μονάδων και αγροτικών βιομηχανιών (κονσερβοποιίες, τυροκομεία κτλ).
7. Η ρύπανση από τα υγρά απορριμμάτων προερχόμενα από λατομικές δραστηριότητες.
8. Η εισχώρηση ακάθαρτων νερών από ρήγματα που έχουν προκληθεί από τεκτονικές εργασίες.
9. Η ρύπανση από τη γενική χρήση λιπασμάτων τα οποία χρησιμοποιούνται στα φυτά. Οι απώλειες των νερών της άρδευσης που διηθούνται στο έδαφος, μπορούν να αυξήσουν την

περιεκτικότητα σε άλατα και μεταλλικά στοιχεία του υπόγειου νερού. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κυκλοφορία των νιτρικών μέσα στο έδαφος και το νερό γίνεται από τις αποδοτικές βροχοπτώσεις, δηλαδή αυτές που πέφτουν μετά την δημιουργία υστέρησης σε νερό μέσα στο έδαφος.

10. Η ρύπανση από την εισροή θαλασσινού νερού προς τις θέσεις του υπόγειου νερού λόγω εξαντλητικής άντλησης του υπόγειου νερού που μειώνει τα αποθέματα και μεταφέρει εντός της ξηράς την διαχωριστική επιφάνεια γλυκού και θαλασσινού νερού. Γενικότερα, η μεταφορά του αλμυρού νερού ρυθμίζεται από την αναλογία πυκνότητας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού και τις υδραυλικές ιδιότητες του υδροφορέα. Η παρουσία υφάλμυρου νερού, σε μια παράκτια ζώνη βρίσκεται συνήθως μεταξύ ανερχόμενων γλυκών νερών και του ορίου του θαλασσινού νερού. Πηγάδια σε αυτές τις περιοχές ανάμιξης παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές του νερού ποιοτικά. Ξαφνικές πλευρικές διεισδύσεις του θαλασσινού νερού, μπορεί να εισαχθούν μέσω άντλησης. Για παράδειγμα για κάθε μέτρο γλυκού νερού που χάνεται το θαλασσινό νερό εισχωρεί κατά 40 m.
11. Η ρύπανση από μεταβολές στην μοριακή δομή των σύνθετων οργανικών ουσιών, που προκαλούνται από πυρκαγιές στους χώρους διάθεσης απορριμμάτων.
12. Η ρύπανση από την διήθηση των εκπλύσεων των αγρών κατά τις βροχοπτώσεις. Εκτός από τα υπολείμματα των λιπασμάτων μεταφέρουν τα κατάλοιπα από τα φυτοφάρμακα, εντομοκτόνα και ζιζανιοκτόνα.
13. Η ρύπανση από επίγειες κατασκευές όπως για παράδειγμα πετρελαιοδεξαμενές που παρουσιάζουν διαρροές.
14. Η ρύπανση από τυχαίες γεωλογικές μεταβολές του υπεδάφους, π.χ. καθιζήσεις και διάλυση ορυκτών στο υπόγειο νερό εξαιτίας γεωλογικών διεργασιών.
15. Η ρύπανση από την κατασκευή φραγμάτων. Τα φράγματα συγκρατούν την υπόγεια ροή των υδροφόρων οριζόντων και δημιουργούν στο υπέδαφος άνυδρες περιοχές.
16. Η ρύπανση από διαφυγές μεταφερόμενων λυμάτων από τους αγωγούς αποχέτευσης (φθορές, υπερφόρτιση, κατασκευή που δεν έχει ολοκληρωθεί, έλλειψη επαρκούς στεγανότητας κλπ).
17. Η ρύπανση από λάδια σιλικόνης που χρησιμοποιούνται για την ελάττωση του αφρού στα απορρυπαντικά υφασμάτων.
18. Άλλες πηγές δυναμικής ρύπανσης του νερού είναι:
  - A. Η ρύπανση των οδών από την συγκοινωνία:
    - a. Τριβές ελαστικών
    - b. Διαρροές από λάδια αυτοκινήτων

- c. Διάβρωση επιφάνειας δρόμων από την κυκλοφορία
  - d. Σκουριά κτλ
- B. Πηγές ρύπανσης από καθημερινές δραστηριότητες:
- a. Υπερλίπανση κήπων
  - b. Περίσσεια χρήσης σε προστατευτικά φυτών σε κήπους
  - c. Πλύσιμο αυτοκινήτων
- C. Ρύπανση από την αέρια κυκλοφορία:
- a. Ελαττωματική λειτουργία δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμου
  - b. Καθάρισμα αεροπλάνων
  - c. Αντιπαγωτικά αεροδρομίων
- D. Η μεταφορά ρυπαντικών ουσιών από την ατμόσφαιρα. Η μεταφορά γίνεται μέσω της όξινης βροχής. Η ρύπανση του αέρα μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις και για αυτό θεωρείται διασυνοριακή ρύπανση.
- E. Η ρύπανση από τη χρήση εκατοντάδων χημικών ουσιών με τη μορφή φαρμάκων ή συντηρητικών ουσιών των τροφίμων των οποίων κατάλοιπα μέσω των απορριμμάτων περνούν στο υπόγειο νερό.
19. Η διάθεση ραδιενεργών και τοξικών αποβλήτων σε βαθείς γεωλογικούς σχηματισμούς της ξηράς.
20. Η ρύπανση από βαρέα μέταλλα. Τα βαρέα μέταλλα χρησιμοποιούνται πρώτον ως πρωτογενή υλικά για την παραγωγή πολλών βιομηχανικών προϊόντων και δεύτερον ως καταλύτες σε χημικές διεργασίες. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το υπόγειο νερό παρουσιάζουν τα: Cd (κάδμιο), Hg (υδράργυρος), Pb (μόλυβδος), Cr (χρώμιο), Ti (τιτάνιο) και Zn (ψευδάργυρος).
21. Η ρύπανση από τις κτηνοτροφικές μονάδες στις οποίες συγκεντρώνονται πολλά ζώα για την παραγωγή κρέατος ή γάλακτος. Σε αυτές δημιουργούνται μεγάλες ποσότητες στερεών αποβλήτων (κοπριάς). Η συγκέντρωση μεγάλου αριθμού ζώων σε περιορισμένο χώρο ξεπερνά την ικανότητα του εδάφους να δεχτεί τις μεγάλες ποσότητες αποβλήτων που παράγονται.
22. Η ρύπανση από οργανοχλωριούχες ενώσεις που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιομηχανία, την γεωργία αλλά και τα νοικοκυριά.
23. Η ρύπανση από τα νεκροταφεία, στα οποία δημιουργούνται υγρά πλούσια σε COD, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub> και άλλα. Με τη βροχή τα υγρά αυτά κατεισδύουν στον υδροφόρο ορίζοντα.
24. Η ρύπανση από μεταλλευτικές δραστηριότητες σε μεταλλεία σιδήρου, χαλκού, ψευδαργύρου και μολύβδου. Όταν γίνονται αντλήσεις για να προχωρήσει η εξόρυξη μεταλλεύματος κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, το αντλούμενο νερό είναι πολύ ρυπασμένο και περιέχει πολλά ορυκτά μεγάλης συγκέντρωσης.

25. Η ρύπανση του υπόγειου νερού από την μεταφορά ψιλής άμμου.
26. Η ρύπανση λόγω αυξημένης αλατότητας στο νερό επιστροφής από το νερό της άρδευσης, μέσω του στραγγιστικού δικτύου. (8)

#### **4.4. Έλεγχος και Προστασία**

Οι βασικότερες δυσκολίες ελέγχου της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων είναι:

- Η μη αντιληπτή ύπαρξη της ρύπανσης για μεγάλο χρόνο λόγω της μικρής ταχύτητας κίνησης του ύδατος και συνεπώς της βραδείας εκδήλωσης ρύπανσης σε πηγάδια και επιφανειακά νερά.
- Η δύσκολη και δαπανηρή επανόρθωση του ρυπασμένου υδροφόρου στρώματος, το οποίο καθίσταται ακατάλληλο ως πηγή παροχής πόσιμου νερού για δεκαετίες και ίσως αιώνες. Η ρύπανση των υπογείων υδάτων δε γίνεται αντιληπτή συνήθως μέχρι κάποια πηγή πόσιμου νερού παρουσιάσει πρόβλημα.
- Η συνεχής εξάπλωση της ρύπανσης στο υδροφόρο στρώμα ακόμη και μετά από την παύση εκπομπής ρύπων από την πηγή ρύπανσης

Για τη βελτίωση της ποιότητας του νερού και της οικολογικής ποιότητας των επιφανειακών, υπόγειων υδάτων και των υδάτων της παράκτιας ζώνης η Ευρωπαϊκή Ένωση θέσπισε την Οδηγία Πλαίσιο 2000/60.

Η οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης 2000/60 θεσπίζει ένα πλαίσιο δράσης για την προστασία των υδάτων (επιφανειακά, υπόγεια, μεταβατικά και παράκτια). Περιληπτικά οι περιβαλλοντικοί στόχοι που θέτει η οδηγία είναι:

- Ø Επίτευξη καλής οικολογικής και χημικής κατάστασης των επιφανειακών υδάτων.
- Ø Επίτευξη καλού οικολογικού δυναμικού και καλής χημικής κατάστασης των τεχνητών υδατικών συστημάτων.
- Ø Επίτευξη καλής κατάστασης των υπόγειων υδάτων.

#### **4.5. Ρυπαντική Επιδεκτικότητα**

Είναι απαραίτητη η αναφορά στην έννοια ρυπαντική επιδεκτικότητα για να συνδυαστούν οι τρόποι προστασίας των υπόγειων νερών με τους φυσικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ρύπανσή τους.

Ως ρυπαντική επιδεκτικότητα ορίζεται η ευκολία με την οποία ρυπαίνεται ένας υδροφόρος ορίζοντας και εξαρτάται από:

A) Σε ό,τι αφορά το έδαφος κυρίως από:

- Τη δομή και την υφή του
- Την περιεκτικότητα σε οργανικές ουσίες
- Την υδροπερατότητά του
- Την περιεκτικότητά του σε αργιλικά ορυκτά
- Το πάχος του
- Την ικανότητα προσρόφησης και μείωσης ρύπων
- Την ιοντοανταλλακτική του ικανότητα

B) Σε ό,τι αφορά την κορεσμένη ζώνη κυρίως από:

- Το πάχος της
- Το ενεργό πορώδες
- Την λιθολογία της
- Την υδραυλική αγωγιμότητα
- Την συμπύκνωση και την στρωμάτωση των πετρωμάτων της
- Την διεύθυνση κίνησης των υπογείων νερών
- Την αποθηκευτική ικανότητα
- Τον χρόνο διαδρομής του νερού εντός αυτής

Γ) Σε ό,τι αφορά την ακόρεστη ζώνη κυρίως από:

- Το πάχος της
- Την συμπύκνωση
- Τον χρόνο που χρειάζεται για να την διαπεράσει το νερό
- Τη λιθολογία της
- Την υδροπερατότητα
- Τον βαθμό αποσάθρωσης

Δ) Σε ό,τι αφορά την τροφοδοσία των υδροφόρων από:

- Την ετήσια βροχόπτωση
- Την εξάτμιση και εξατμισοδιαπνοή
- Την ετήσια τροφοδοσία

Δευτερευόντως η ρυπαντική επιδεκτικότητα εξαρτάται από :

A) Σε ό,τι αφορά την τοπογραφία από:

- Την κλίση της επιφάνειας του εδάφους
- Την φυτική κάλυψη του εδάφους

B) Σε ό,τι αφορά το γεωλογικό υπόβαθρο του υδροφορέα από:

- Την υδροπερατότητα

- Την τεκτονική δομή

Γ) Σε ό,τι αφορά επαφή υπόγειου υδροφόρου συστήματος με επιφανειακά νερά και θάλασσα από:

- Την μεταξύ τους υδραυλική κλίση
- Την υδαταγωγιμότητα της μεταξύ τους ζώνης
- Τα υδραυλικά φορτία
- Την θέση στον χώρο και στον χρόνο της διεπιφάνειας γλυκών και αλμυρών νερών.

Είναι προφανές ότι η ρυπαντική επιδεκτικότητα των υπόγειων υδροφόρων συνδέεται επίσης με:

- Ø Την χρήση γης (δάση, καλλιεργημένες εκτάσεις, βιομηχανικές ζώνες, αστικές χρήσεις κ.ά.)
- Ø Την πληθυσμιακή πυκνότητα
- Ø Την άρδευση
- Ø Την αποστράγγιση κ.ά.

Κρίνεται ότι είναι σημαντική η σύνταξη υδρογεωλογικών χαρτών ρυπαντικής επιδεκτικότητας, έτσι ώστε να προσδιορίζονται οι διάφορες χρήσεις γης. Στόχος είναι η βέλτιστη προστασία των υπόγειων νερών από ποιοτική υποβάθμιση. (2)

#### 4.6.Ρυπαντικές Παράμετροι

Οι παράμετροι που είναι απαραίτητο να εξετάζονται για τον χαρακτηρισμό των στραγγισμάτων αλλά και υπογείων υδάτων είναι: α) φυσικές παράμετροι: pH, χρώμα, ολικά, διαλυμένα και αιωρούμενα στερεά, αγωγιμότητα, β) οργανικές παράμετροι: BOD<sub>5</sub>, COD, γ) χημικές παράμετροι: χλωριόντα (Cl<sup>-</sup>), θειικά (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), φωσφορικά (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), αμμωνιακά (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), αλκαλικότητα, σκληρότητα, κάλιο (K), νάτριο (Na), ασβέστιο (Ca) και μέταλλα (Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb και Zn).

##### 4.6.1.Φυσικές Παράμετροι

pH

Οι τιμές του pH των στραγγισμάτων έχει σχέση με το είδος των χημικών συστατικών που είναι διαλυμένα σε αυτά. Το pH των περισσότερων νερών είναι ανάμεσα στο 4 και το 9. Η πλειοψηφία των νερών είναι ελαφρώς αλκαλική λόγω της παρουσίας CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> και HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Αύξηση της εισροής όξινων ή αλκαλικών βιομηχανικών αποβλήτων προκαλεί την

μεταβολή του pH. Η μέτρηση και ο έλεγχος του pH σε βιομηχανικά απόβλητα επιβάλλεται για τον έλεγχο της ρύπανσης.

### Χρώμα

Το χρώμα που παρουσιάζουν τα στραγγίσματα και τα νερά οφείλεται στα μεταλλικά ιόντα (Fe, Mg) διαλυτών οργανικών ενώσεων και στην παρουσία αιωρούμενων συστατικών. Υψηλές τιμές χρώματος είναι ενδεικτικές για την σημαντική επιβάρυνση των στραγγισμάτων από τα παραπάνω συστατικά.

### Αγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα των στραγγισμάτων εκφράζει την ικανότητα να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Επηρεάζεται από ανόργανα διαλυμένα στερεά, όπως ανιόντα χλωρίου, νιτρικά, θειικά και φωσφορικά και κατιόντα νατρίου, μαγνησίου, ασβεστίου, σιδήρου και αργιλίου τα οποία την αυξάνουν. Η αγωγιμότητα των πόσιμων νερών κυμαίνεται από 50 - 1500 μmhos/cm. Κάποια βιομηχανικά απόβλητα έχουν αγωγιμότητα μεγαλύτερη από 10000 μmhos/cm. Η αγωγιμότητα αποτελεί ένα χρήσιμο κριτήριο για την εκτίμηση της επίδρασης των διαφόρων ιόντων στη χημική ισορροπία, τις συνέπειες σε φυτά και ζώα, την διάβρωση κτλ.

### Θολερότητα

Η θολερότητα εκφράζει το μέτρο της περίθλασης και απορρόφησης του φωτός από τα ύδατα που περιέχουν κολλοειδή και αιωρούμενα στερεά μικρού μεγέθους. Έχει δυσμενή επίδραση στην αισθητική εικόνα και συχνά συσχετίζεται και με την οργανική φόρτιση (BOD). Τα υλικά αυτά είναι σωματίδια ιλύος, ανόργανες και οργανικές ύλες ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), μικροοργανισμοί κτλ. Η πιο διαδεδομένη μονάδα θολερότητας που χρησιμοποιείται είναι το αιώρημα 1mg/l  $\text{SiO}_2$  στο νερό. Σύμφωνα με αυτή την μονάδα, νερό που έχει 5 μονάδες χαρακτηρίζεται ως θολερό και είναι ακατάλληλο για πόση.

### Οσμή

Η οσμή είναι χαρακτηριστική του αποβλήτου καθώς εξέρχεται. Ακόμα μπορεί να αναπτυχθεί στην πορεία λόγω αποσύνθεσης διαφόρων ρυπαντών που υπάρχουν μέσα σε αυτό.

### Ολικά, αιωρούμενα και διαλυμένα στερεά

Τα διαλυμένα στερεά που υπάρχουν στα στραγγίσματα οφείλονται κυρίως στην παρουσία ανόργανων αλάτων. Τέτοια ευδιάλυτα συστατικά είναι τα χλωριούχα, θειικά και νιτρικά άλατα των αλκαλίων. Αυτά βρίσκονται στο χώρο διάθεσης των απορριμμάτων και περνούν στο

διερχόμενο στράγγισμα λόγω της διάλυσής τους. Αντίθετα τα αιωρούμενα στερεά οφείλονται στα λεπτομερή σωματίδια και κολλοειδή που περνάνε από τον χώρο διάθεσης στο στράγγισμα μέσω εκχύλισης. Το σύνολο διαλυμένων και αιωρούμενων στερεών αποτελεί τα ολικά στερεά.

Τα αιωρούμενα στερεά μειώνουν την διείσδυση του φωτός στα νερά και επιδρούν αρνητικά στην εικόνα του νερού. Τα στερεά που παραμένουν στο νερό μετά την διήθηση ως στερεό υπόλειμμα είναι τα διαλυμένα στερεά. Οι διαλυμένες ουσίες μπορεί να είναι οργανικές ή ανόργανες. Το νερό έρχεται σε επαφή με αυτές τις ουσίες μέσω της ατμόσφαιρας, μέσω επιφανειών και εδάφους. Υλικά από τα προϊόντα αποσύνθεσης της βλάστησης, από οργανικές ενώσεις και από τα οργανικά αέρια είναι συνήθη οργανικά διαλυμένα συστατικά. Διαλυμένα ορυκτά, αέρια και οργανικά συστατικά είναι δυνατόν να επιβαρύνουν πολύ την ποιότητα του νερού. Επίσης κάποια από αυτά μπορεί να είναι τοξικά ενώ άλλα κάποια άλλα να είναι καρκινογόνα. Συχνά δυο ή περισσότερες διαλυμένες ουσίες ενώνονται μεταξύ τους σχηματίζοντας ουσίες περισσότερο επιβλαβείς των αρχικών.

#### **4.6.2. Χημικές Παράμετροι**

##### **Σκληρότητα**

Σκληρότητα του νερού ορίζεται η συνολική συγκέντρωση ιόντων Ca και ιόντων Mg που εκφράζονται ως ανθρακικό ασβέστιο  $\text{CaCO}_3$ . Κυμαίνεται από μηδέν έως κάποιες εκατοντάδες mg/l ανθρακικού ασβεστίου και εξαρτάται από την πηγή και την επεξεργασία στην οποία έχει υποβληθεί το νερό. Το νερό δεν είναι ποτέ χημικά καθαρό λόγω της διαβρωτικής του δράσης στο έδαφος και της διαλυτότητας ορισμένων ατμοσφαιρικών αερίων σε αυτό. Η διαδικασία σκλήρυνσης του νερού έχει ως εξής: πρώτη είναι η διάλυση του  $\text{CO}_2$ . Με τη διείσδυση του νερού της βροχής μέσα από ασβεστολιθικά πετρώματα το  $\text{CaCO}_3$  μετατρέπεται στο  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  που είναι διαλυτό στο νερό. Το νερό που οφείλει την σκληρότητά του στο  $\text{HCO}_3^-$  λέγεται 'παροδικά σκληρό νερό'. Με την θέρμανση τα ιόντα  $\text{HCO}_3^-$  μετατρέπονται σε ιόντα  $\text{CO}_3^{2-}$ . Μέσα από την αλλαγή αυτή φαίνονται οι επικίνδυνες συνέπειες του παροδικά σκληρού νερού. Το  $\text{CO}_3^{2-}$  που δημιουργείται με τα κατιόντα του νερού  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  σχηματίζει λεβητόλιθο που δημιουργεί προβλήματα σε βιομηχανικές εφαρμογές.



## Αλκαλικότητα

Η αλκαλικότητα διαφόρων διαλυμάτων είναι η ποσοτική ικανότητα να εξουδετερώνουν κάποιο ισχυρό οξύ σε ένα καθορισμένο pH. Η αλκαλικότητα είναι σημαντική για πολλές χρήσεις του νερού. Η αλκαλικότητα πολλών επιφανειακών νερών είναι μια ένδειξη συγκέντρωσης συστατικών όπως  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $(\text{OH}^-)$ . Η παρουσία των  $\text{BO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  ή πυριτικών αλάτων συνεισφέρει στις μετρούμενες τιμές. Όταν η αλκαλικότητα είναι υψηλή σε σχέση με τις αλκαλικές συγκεντρώσεις του εδάφους τότε είναι καθοριστικός παράγοντας για την καταλληλότητα του νερού για άρδευση. Σε μεγάλες συγκεντρώσεις το νερό παρουσιάζει πικρή γεύση.

## Θειικά

Τα θειικά είναι ευρέως κατανεμημένα στη φύση και στα νερά. Βρίσκονται σε συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από λίγα μέχρι αρκετές χιλιάδες mg/l. Τα θειικά στο πόσιμο νερό δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 250 mg/l ενώ συγκεντρώσεις από 300-400 mg/l προκαλούν ανεπιθύμητη γεύση. Οι ενώσεις θειικού νατρίου και μαγνησίου ασκούν καθαριστική δράση και δεν πρέπει να βρίσκονται στο πόσιμο νερό.

## Χλωριόντα

Σε παράκτιες περιοχές το χλώριο μπορεί να βρίσκεται σε μεγάλες συγκεντρώσεις εξαιτίας της εισροής αλμυρού νερού στο υδροφόρο στρώμα. Υψηλή συγκέντρωση χλωρίου είναι επιβλαβής για τις μεταλλικές σωληνώσεις και κατασκευές και για τις γεωργικές καλλιέργειες.

## Φωσφορικά

Ο φώσφορος βρίσκεται στα φυσικά νερά με διαφόρους τύπους φωσφορικών ενώσεων. Τα οργανικά φωσφορικά σχηματίζονται πρωτογενώς από βιολογικές διεργασίες και συναντώνται στη λάσπη, στα απόβλητα και στα υπολείμματα τροφών. Ο φώσφορος είναι απαραίτητος για την ανάπτυξη των οργανισμών αλλά η απόρριψη μη επεξεργασμένων αποβλήτων μπορεί να διεγείρει την ανάπτυξη φωτοσυνθετικών υδατικών μικροοργανισμών. Έτσι ενώ τα φωσφορικά δεν είναι τοξικά και δεν αποτελούν απευθείας απειλή για την υγεία μπορεί έμμεσα να έχουν βλαβερές επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού.

## Ενώσεις Αζώτου

Στα νερά και απόβλητα οι κυριότερες μορφές αζώτου είναι κατά σειρά μειωμένης οξειδωτικής κατάστασης νιτρικά ( $\text{NO}_3^-$ ), νιτρώδη ( $\text{NO}_2^-$ ), αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ) και οργανικό άζωτο. Το οργανικό άζωτο ορίζεται ως το οργανικά συνδεδεμένο άζωτο στην οξειδωτική κατάσταση και δεν περιλαμβάνει όλες τις οργανικές ενώσεις που το περιέχουν. Οι παραπάνω μορφές αζώτου καθώς και το αέριο είναι βιοχημικά αλληλομετατρέψιμες και είναι συστατικά του κύκλου του αζώτου. Τα  $\text{NO}_3^-$  απατώνται σε ίχνη στα επιφανειακά νερά αλλά μπορεί να φθάσουν σε υψηλά επίπεδα στα υπόγεια νερά. Τα νιτρώδη και η αμμωνία είναι τοξικότερα από ότι τα νιτρικά.

Η αμμωνία βρίσκεται στα επιφανειακά και υπόγεια νερά καθώς και στα απόβλητα. Η συγκέντρωση των αμμωνιακών στα στραγγίσματα οφείλεται στην αποδόμηση οργανικών συνθέτων που περιέχουν άζωτο και στην αναγωγή των νιτρικών υπό αναερόβιες συνθήκες.

## Μέταλλα

Ο μόλυβδος (Pb) συσσωρεύεται στον ανθρώπινο οργανισμό. Τα φυσικά νερά σπάνια περιέχουν περισσότερο από 20mg/l. Ο Pb που υπάρχει στα νερά προέρχεται κυρίως από βιομηχανική δραστηριότητα. Η επιτρεπτή συγκέντρωση του μολύβδου στο πόσιμο νερό είναι 0,05 mg/l.

Ο χαλκός (Cu) είναι απαραίτητο στοιχείο για τον άνθρωπο και η καθημερινά απαιτούμενη ποσότητα για τους ενήλικες είναι 2 mg. Άλατα χαλκού σε επίπεδα από 1 - 5 mg/l προσδίδουν δυσάρεστη γεύση για αυτό και έχει ορισθεί ως όριο στο πόσιμο νερό το 1 mg/l. Τα νερά ρυπαίνονται από χαλκό κυρίως λόγω διάβρωσης κραμάτων χαλκού, βιομηχανικές δραστηριότητες κτλ.

Τα άλατα του χρωμίου (Cr) χρησιμοποιούνται στις βιομηχανικές διαδικασίες και εισέρχονται στο νερό λόγω απόρριψης αποβλήτων. Το χρώμιο μπορεί να βρίσκεται στα αποθέματα νερού είτε ως εξασθενές είτε ως τρισθενές. Λόγω της υψηλής τοξικότητας και της αναγνωρισμένης καρκινογόνου δράσης του στον άνθρωπο τα όρια του  $\text{Cr}^{6-}$  στο νερό είναι ιδιαίτερα χαμηλά 0,05 mg/l.

Το κάδμιο (Cd) είναι πολύ τοξικό και συσσωρεύεται στον ανθρώπινο οργανισμό. Το πόσιμο νερό συνήθως περιέχει πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις καδμίου οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 0,2 - 2 μg/l. Πηγές ρύπανσης από κάδμιο είναι κυρίως οι αγωγοί νερού και οι γαλβανισμένοι σωλήνες σιδήρου, βιομηχανικά απόβλητα από επιμεταλλώσεις, τα ζιζανιοκτόνα κτλ.

Το νικέλιο (Ni) περιέχεται στα φυσικά νερά σε συγκεντρώσεις μικρότερες από 0,1 mg/l, ενώ στο πόσιμο νερό κυμαίνεται από μη ανιχνεύσιμα μέχρι 34 mg/l. Στο πόσιμο νερό μπορεί να προέλθει από έκπλυση ορυκτών, από βιομηχανικά απόβλητα και από τις σωληνώσεις του δικτύου ύδρευσης.

Ο ψευδάργυρος (Zn) χρειάζεται για την ανάπτυξη του σώματος (η έλλειψή του σχετίζεται με το νανισμό). Οι συγκεντρώσεις του ψευδαργύρου στο πόσιμο νερό δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 1 mg/l. Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες των 5 mg/l προκαλούν στυφή γεύση και έναν ιριδισμό στα αλκαλικά νερά. Οι συγκεντρώσεις του ψευδαργύρου στο πόσιμο νερό ποικίλουν από 0,06-7,0 mg/l. Η παρουσία του στα ύδατα οφείλεται σε βιομηχανικά απόβλητα. Επίσης, ο ψευδάργυρος, εισέρχεται στο πόσιμο νερό από διαβρώσεις επιψευδαργυρωμένων επιφανειών και επιφανειών γαλβανισμένου Fe.

Η παρουσία σιδήρου (Fe) στο νερό συνεισφέρει στην σκληρότητα και σε πολύ μικρά ποσά ( $>0,03\text{mg/l}$ ) προκαλεί δυσάρεστη γεύση. Η συγκέντρωση σιδήρου στο νερό δεν πρέπει να είναι πάνω από 0,01 mg/l.

#### Φαινόλες

Οι φαινόλες είναι όλα τα υδροξυλιωμένα παράγωγα του βενζολίου και των συμπυκνωμένων βενζολικών δακτυλίων. Το απλούστερο μέλος είναι η φαινόλη από το οποίο πήραν την ονομασία το σύνολο των ενώσεων αυτών. Η φαινόλη χρησιμοποιείται στην βιομηχανία αποτελώντας την πρώτη ύλη για παρασκευή φαρμάκων, χρωμάτων και διάφορων πολυμερών. Έτσι οι φαινόλες μπορεί να βρίσκονται στα αστικά και στα βιομηχανικά απόβλητα. Η χλωρίωση υδάτων που περιέχουν φαινόλες οδηγεί στον σχηματισμό χλωροπαραγώγων τους που παρουσιάζουν δυσάρεστη οσμή και γεύση. Η φαινόλη είναι τοξική ένωση και η επαφή με το δέρμα προκαλεί έντονο ερεθισμό. Για το πόσιμο νερό ισχύει η τιμή 0,001 ppm ως όριο.

#### Χλωριωμένοι διαλύτες

Οι χλωριωμένοι διαλύτες χρησιμοποιούνται στον καθαρισμό μετάλλων και στη σύνθεση χημικών. Σαν ρύποι, οι χλωριωμένοι διαλύτες χαρακτηρίζονται από υψηλή τοξικότητα, κινητικότητα και αντοχή, γι' αυτό και η απομάκρυνσή τους από ρυπασμένα εδάφη και νερά είναι αρκετά δύσκολη. Επίσης και ενώσεις που προκύπτουν από τη διάσπασή τους είναι τοξικές.

## Πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες

Η ρύπανση από πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες προέρχεται από εγκαταστάσεις πετρελαίου και διυλιστήρια. Η ομάδα πετρελαϊκών υδρογονανθράκων αποτελείται από:

- Ø Αλειφατικούς υδρογονάνθρακες.
- Ø Υδρογονάνθρακες με έναν αρωματικό δακτύλιο ή ομάδα υδρογονανθράκων γνωστή ως ΒΤΕΧ (βενζόλιο, τολουόλιο, αίθυλο-βενζόλιο και ξυλένιο).
- Ø Υδρογονάνθρακες με δυο ή περισσότερους αρωματικούς δακτυλίους ή πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (ΡΑΗ).

Η ομάδα των ΒΤΕΧ παρουσιάζει μεγάλη διαλυτότητα στο νερό και μικρότερη πυκνότητα από το νερό. Για το λόγο αυτό, το πλούσιο ρύπανσης σε εδάφη ρυπασμένα από ΒΤΕΧ συγκεντρώνεται στην επιφάνεια της κορεσμένης ζώνης. Τα ΒΤΕΧ είναι επίσης πολύ πτητικά, αλλά εξαιτίας της μεγαλύτερης πυκνότητας που έχουν οι ατμοί τους από τον αέρα, οι ατμοί των ΒΤΕΧ συγκεντρώνονται στο τέλος της ακόρεστης ζώνης.

Οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες είναι ενώσεις ευρέως διαδεδομένες στο περιβάλλον. Προέρχονται από την πλήρη καύση ή την πυρόλυση οργανικών ενώσεων. Από τη ρύπανση με αρωματικούς υδρογονάνθρακες επηρεάζονται και υπόγεια νερά και εδάφη.

Στους πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες συμπεριλαμβάνεται ο ΜΤΒΕ (Μεθυλ – τερτ – βουτυλ αιθέρας). Ο ΜΤΒΕ είναι διαλύτης που προστίθεται στη βενζίνη. Η μαζική παραγωγή του ΜΤΒΕ, σε συνδυασμό με την υψηλή διαλυτότητά του στο νερό και το χαμηλό ρυθμό βιοαποδόμησής του, τον καθιστούν σημαντικό ρύπο για τα υπόγεια νερά. Η κύρια πηγή ρύπανσης από ΜΤΒΕ είναι δεξαμενές καυσίμων με διαρροή. Ο ΜΤΒΕ είναι καρκινογόνος για τα ζώα και πιθανώς και για τους ανθρώπους. (9)

### 4.6.3.Οργανικές Παράμετροι

#### BOD

Με την παράμετρο του βιοχημικώς απαιτούμενου οξυγόνου BOD, εννοείται η ποσότητα του οξυγόνου που καταναλώνεται από τους

μικροοργανισμούς για να αποικοδομήσουν οξειδωτικά τις οργανικές ενώσεις που υπάρχουν στο νερό σε διάστημα 5 ημερών, χωρίς φως και σε θερμοκρασία 20°C. Αυτός είναι ένα έμμεσος τρόπος υπολογισμού του φορτίου σε οργανικές ουσίες που υπάρχουν στο νερό.

Ο προσδιορισμός του BOD είναι σημαντικός γιατί με αυτόν διαπιστώνεται εύκολα η ολική ρύπανση των υδάτων από οργανικές ουσίες. Επίσης αποτελεί μέτρο της τοξικότητας των υγρών αποβλήτων γιατί οι τοξικές ενώσεις ή παρεμποδίζουν ή αναστέλλουν την ικανότητα μεταβολισμού των ζωντανών κυττάρων με αντίστοιχη μείωση του BOD.

## COD

Με την παράμετρο του χημικώς απαιτούμενου οξυγόνου COD (Chemical Demanding Oxygen) προσδιορίζεται το συνολικό οργανικό φορτίο που υπάρχει στα στραγγίσματα και στα νερά. Από την τιμή της συγκέντρωσης του COD και του λόγου BOD/COD εξάγονται συμπεράσματα που αφορούν την μορφή με την οποία το οργανικό φορτίο βρίσκεται στα στραγγίσματα.

Το COD είναι η παράμετρος με την οποία υπολογίζεται η ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για την οξείδωση οργανικών ουσιών με χημικά μέσα. Ο προσδιορισμός του COD είναι απαραίτητος για την εκτίμηση του συνολικού οργανικού φορτίου που υπάρχει στα στραγγίσματα. Περιλαμβάνει:

1. Τη βιοαποικοδομήσιμη οργανική ύλη η οποία αποσυντίθεται από τα βακτήρια κατά την διάρκεια πέντε ημερών
2. Τη βιοαποικοδομήσιμη οργανική ύλη η οποία αποσυντίθεται από τα βακτήρια μετά από πέντε ημέρες
3. Την οργανική ύλη η οποία δεν αποδομείται βιολογικά.

## Οργανικές Ενώσεις

Οι οργανικές ενώσεις υπάρχουν πάντα στο νερό με διάφορες μορφές και δεν περιορίζονται μόνο στα επιφανειακά νερά. Εισέρχονται στο έδαφος από φυσικές πηγές αλλά και από ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι περισσότερες φυσικές οργανικές ουσίες αποτελούνται από τα προϊόντα αποδόμησης οργανικών εδαφών. Οι συνθετικές οργανικές ενώσεις είναι συνήθως το αποτέλεσμα της απόθεσης βιομηχανικών, γεωργικών και οικιακών αποβλήτων. Οι πιο σημαντικές από τις ενώσεις αυτές είναι χλωριωμένοι διαλύτες, οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες κ.ά. Οι οργανικές ενώσεις που είναι διαλυμένες στο νερό διακρίνονται σε βιοαποδομήσιμες και μη. Οι πρώτες είναι οι οργανικές ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν τροφή από μικροοργανισμούς και περιλαμβάνουν το άμυλο, λίπη, πρωτεΐνες, αλκοόλες, οξέα, και εστέρες.

Παρόλο που κάποιες από αυτές τις ενώσεις προκαλούν προβλήματα χρώματος, γεύσης και οσμής, το κύριο πρόβλημα είναι ότι η χρήση τους από τους μικροοργανισμούς σε αναερόβιες συνθήκες οδηγεί στη δημιουργία προβληματικών τελικών προϊόντων. Το ταννικό οξύ, η κυτταρίνη και οι φαινόλες συναντώνται συχνά στα φυσικά νερά και επειδή αποδομούνται πολύ αργά κατατάσσονται στις μη βιοαποδομήσιμες οργανικές ενώσεις. Μερικές οργανικές ενώσεις δεν αποδομούνται βιολογικά επειδή είναι τοξικές για τους μικροοργανισμούς. Σε αυτές ανήκουν τα οργανικά παρασιτοκτόνα, κάποια βιομηχανικά χημικά και κάποιες ενώσεις χλωριωμένων υδρογονανθράκων. Οι οργανικές ενώσεις που αποτελούν το μεγαλύτερο κίνδυνο για την δημόσια υγεία και απαντούν σε ρυπασμένους υδροφορείς σε περιοχές χώρων διάθεσης οικιακών-εμπορικών απορριμμάτων είναι το βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλοβενζόλιο, ξυλόλιο κ.ά. (10; 1)

#### **4.6.4.Μη αναμίξιμα με το νερό Υγρά**

Τα μη αναμίξιμα με το νερό υγρά (non-aqueous phase liquids NAPLs) είναι υγρά που εμφανίζουν μια χωριστή υγρή φάση στο υδάτινο περιβάλλον. Γενικά τα NAPLs διακρίνονται στα LNAPLs τα οποία είναι τα μη αναμίξιμα με το νερό υγρά με πυκνότητα μικρότερη του νερού και στα DNAPLs με πυκνότητα μεγαλύτερη από αυτή του νερού. Τα υγρά καύσιμα των υδρογονανθράκων, όπως η βενζίνη και το πετρέλαιο θέρμανσης είναι παραδείγματα LNAPLs. Στα DNAPLs περιλαμβάνονται οι χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες όπως ο τετραχλωράνθρακας, το χλωροβενζόλιο κτλ.

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 απελευθερώνεται, τις φυσικές ιδιότητες και τη δομή του εδάφους διαμέσου του οποίου κινούνται. (11)

### **4.7.Παραδείγματα Πηγών Ρύπανσης Αναλυτικά**

#### **4.7.1.Όξινη Απορροή Μεταλλείων**

Κατά την εξόρυξη μινεράλων θειούχων μεταλλευμάτων μια από τις κυριότερες πηγές ρύπανσης είναι η Όξινη Απορροή Μεταλλείων η οποία αποτελεί μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα της μεταλλευτικής βιομηχανίας σε διεθνές επίπεδο. Οφείλεται στην οξείδωση θειούχων

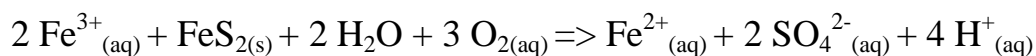
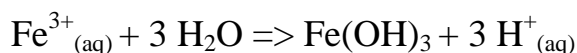
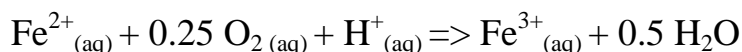
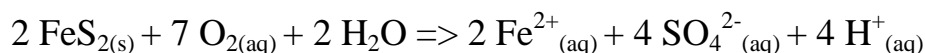
ορυκτών οι οποίοι παρουσία αέρα, νερού και οξειδωτικών βακτηρίων οξειδώνονται προς θειικό οξύ και τρισθενή σίδηρο. Άλλα θειούχα ορυκτά όπως ο χαλκοπυρίτης, ο σφαλερίτης, κλπ οξειδώνονται είτε άμεσα με την δράση του νερού και του αέρα είτε έμμεσα από τον τρισθενή σίδηρο. Συνολικά σχηματίζονται όξινα διαλύματα με σημαντική περιεκτικότητα σε μέταλλα τοξικά και μη όπως Fe, As, Cu, Mn, Zn, Cd κλπ.

Οι κύριες πηγές σχηματισμού Όξινης Απορροής Μεταλλείων είναι στις μεταλλευτικές εργασίες, στις θέσεις απόθεσης μεταλλευτικών στείρων, τελμάτων επίπλευσης και σωρούς προϊόντων εμπλουτισμού. Αν δεν λαμβάνονται μέτρα για την αντιμετώπιση του προβλήματος το αποτέλεσμα είναι η ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων στην ευρύτερη περιοχή του μεταλλευτικού έργου.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος απαιτείται συνεχής έλεγχος της ποιότητας των υγρών αποβλήτων και τη συλλογή και κατεργασία των όξινων νερών κατά την διάρκεια λειτουργίας.

Τα προβλήματα συνεχίζουν και μετά την περάτωση της μεταλλευτικής δραστηριότητας γιατί στα θειούχα μεταλλεία η οξειδωτική δράση μπορεί να συνεχιστεί ανεμπόδιστη στην επιφάνεια ή στα υπόγεια.

Αναλυτικότερα, στη δημιουργία της Όξινης Απορροής Μεταλλείων συμμετέχει κατά κύριο λόγο ο σιδηροπυρίτης που αφθονεί ως ορυκτό στις θειούχες μεταλλοφορίες ενώ οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την οξείδωσή του είναι:



Η οξείδωση του δισθενούς σιδήρου σε τρισθενή αποτελεί το καθοριστικό στάδιο της κινητικής της οξείδωσης. Η ταχύτητα της παραπάνω αντίδρασης αυξάνεται εκθετικά με την καταλυτική παρουσία αυτότροφων και οξύφιλων βακτηρίων τα οποία βρίσκονται σε όξινα νερά των μεταλλείων.

Σε γενικές γραμμές ο μηχανισμός δημιουργίας Όξινης Απορροής Μεταλλείων διακρίνεται σε τρία στάδια:

1) στο πρώτο στάδιο το pH του νερού κυμαίνεται σε ουδέτερες τιμές. Αυτό οφείλεται στη μη έναρξη της οξείδωσης στο περιβάλλον των

θειούχων ορυκτών ή λόγω της εξουδετέρωσης των παραγόμενων διαλυμάτων από αλκαλικά πετρώματα στην περιοχή αντίδρασης.

2) Μόλις εξαντληθεί η δυναμικότητα εξουδετέρωσης των περιβαλλόντων αλκαλικών πετρωμάτων αρχίζει η μείωση της τιμής του pH σε πιο όξινες περιοχές και η αύξηση της συγκέντρωσης Fe στο διάλυμα. Στη φάση αυτή δεν έχουν δημιουργηθεί ακόμα συνθήκες ευνοϊκές για την ανάπτυξη των οξύφιλων βακτηρίων και η κινητική της αντίδρασης είναι βραδεία.

3) Όταν η τιμή του pH των νερών στην περιοχή της αντίδρασης προσεγγίσει την τιμή 3,5 αρχίζει η ανάπτυξη των μικροοργανισμών που καταλύουν την οξείδωση του δισθενούς σιδήρου συνεισφέροντας με αυτόν τον τρόπο στην αναγέννηση του οξειδωτικού διαλύματος και στην περαιτέρω διαλυτοποίηση των θειούχων ορυκτών. Τα επιφανειακά και υπόγεια νερά συμπαρασύρουν τα ευδιάλυτα προϊόντα οξείδωσης του σιδηροπυρίτη, σχηματίζοντας έτσι όξινα σιδηρούχα διαλύματα τα οποία με τη σειρά τους οξειδώνουν θειούχα ορυκτά σε άλλες περιοχές του κοιτάσματος. Αποτέλεσμα είναι η εξάπλωση της ρύπανσης του υδροφόρου ορίζοντα των επιφανειακών ρευμάτων. (12)

#### **4.7.2.Επιβάρυνση από Γεωργία**

Η εντατική καλλιέργεια της γης έχει οδηγήσει στη χρήση μεγάλων ποσοτήτων λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών προϊόντων τα οποία απειλούν με ρύπανση τα ύδατα, υπόγεια και επιφανειακά.

Η λίπανση των καλλιεργειών είναι απαραίτητη για την απόδοση των καλλιεργειών. Θρεπτικά συστατικά, όπως το άζωτο, φώσφορος και το κάλιο, χρειάζονται σε μεγάλες ποσότητες, ενώ άλλα όπως ο χαλκός και ο σίδηρος σε μικρότερες. Μη ορθολογική χρήση των λιπασμάτων μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση της γεωργικής παραγωγής και σε περιβαλλοντικά προβλήματα. Τα είδη των λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται σήμερα στη γεωργία είναι:

##### **1. Ανόργανα λιπάσματα:**

- Ø Αζωτούχα (π.χ. νιτρική αμμωνία)
- Ø Φωσφορούχα
- Ø Καλιούχα
- Ø Σύνθετα

##### **2. Οργανικά λιπάσματα**

- Ø Στερεή κοπριά
- Ø Υγρή κοπριά
- Ø Διάφορα φυτικά υπολείμματα



- Ø Προϊόντα οργανικής ζύμωσης
- Ø Οργανικά λιπάσματα βιομηχανικών παραγόμενα

Τα αζωτούχα λιπάσματα είναι αυτά που μπορούν να προκαλέσουν περιβαλλοντικά προβλήματα. Τα νιτρικά ιόντα είναι ευδιάλυτα στο νερό και παρουσιάζουν μεγάλη κινητικότητα στο έδαφος, σε αντίθεση με τα φωσφορικά ιόντα και το κάλιο. Έτσι τα νιτρικά ιόντα μπορούν να εκπλυθούν εύκολα από το έδαφος και να βρεθούν στο υπόγειο και επιφανειακό νερό. Τα επιπλέον φορτία αζώτου στα επιφανειακά νερά προκαλούν ευτροφισμό και υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων που χρησιμοποιούνται για πόσιμο νερό. Όσον αφορά στα υπόγεια νερά, υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία. Η αποκατάσταση της ρύπανσης υπόγειων νερών είναι δυσκολότερη, αφού μπορεί να περάσουν χρόνια για τη μείωση των συγκεντρώσεων των νιτρικών στο νερό. Επίσης η αμμωνία που αποθηκεύεται στο έδαφος συνεισφέρει στην μείωση του pH του εδάφους.

#### **4.7.3.Ελαιουργεία**

Αρκετά από τα ελαιουργεία διαθέτουν τα απόβλητα τους ανεπεξέργαστα σε ρέματα ή κατευθείαν σε ποταμούς δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα ρύπανσης των ποταμών και του υπόγειου υδροφορέα. Τα υγρά απόβλητα ελαιουργείων έχουν υψηλές συγκεντρώσεις οργανικού φορτίου, στερεών, αζώτου και φωσφόρου. Επίσης μπορεί να είναι τοξικά για μερικούς οργανισμούς, εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης σε φαινόλες και του χαμηλού pH. (9)

#### **4.7.4.Υγειονομική Ταφή**

Η υγειονομική μέθοδος είναι η μέθοδος διάθεσης στερεών αποβλήτων κατά την οποία τα απορρίμματα συμπιέζονται από ειδικά μηχανήματα και καλύπτονται από ένα στρώμα εδαφικού υλικού κάθε μέρα. Το βάθος της ταφής είναι 2-20 μέτρα και το επιφανειακό στρώμα κάλυψης των απορριμμάτων έχει πάχος τουλάχιστον 40 cm συμπίεμένο γαιώδες υλικό. Σκοπός είναι να ελαχιστοποιείται η διείσδυση νερού στο εσωτερικό του χώρου διάθεσης.

Ιδιαίτερο πρόβλημα της υγειονομικής ταφής είναι η δημιουργία στραγγισμάτων. Αυτά εμφανίζονται κατά την κατείσδυση νερού στο χώρο, όταν η ικανότητα κατακράτησης υγρασίας από τα απορρίμματα υπερνικηθεί. Πολλές φορές εμφανίζεται και πριν κορεσθούν λόγω της ετερογένειάς τους. Δημιουργούνται κανάλια μέσα από τα οποία ρέει το στράγγισμα. Το νερό που διεισδύει επιβαρύνεται με διάφορους ανόργανους και οργανικούς ρυπαντές αλλά και με προϊόντα που

δημιουργούνται κατά την αποδόμηση των απορριμμάτων. Έτσι το παραγόμενο στράγγισμα είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο για τα υπόγεια νερά.

Αν οι αποθέσεις βρίσκονται πάνω από την πιεζομετρική επιφάνεια, η πιθανότητα ρύπανσης είναι μικρή γιατί το στράγγισμα έχει εν μέρει περιορισθεί από το φυσικό φιλτράρισμα κατά την κίνησή του προς τον υδροφόρο ορίζοντα. Όμως αν ο υδροφόρος ορίζοντας είναι υψηλότερα ή το υλικό κάλυψης λεπτότερο και διαπερατό τότε υπάρχει πιθανότητα εκτεταμένης ρύπανσης του νερού.

Αν υπάρχει κεκλιμένος ασβεστολιθικός υδροφορέας που καλύπτεται από διαπερατά εδάφη, τότε είναι πιθανή η σημαντική ρύπανση του υπόγειου νερού. Αυτό συμβαίνει γιατί γίνεται γρήγορη κατείσδυση του νερού μέσα από τα περατά εδάφη και φθάνει στον ασβεστόλιθο όπου οι ανοικτές ρωγμές μπορεί να προκαλέσουν στους ρύπους μικρή διασπορά ή διάλυση. Αν το κεκλιμένο πέτρωμα είναι σχιστόλιθος (συνήθως αδιαπέρατος) τότε η πιθανότητα ρύπανσης μειώνεται πάρα πολύ.

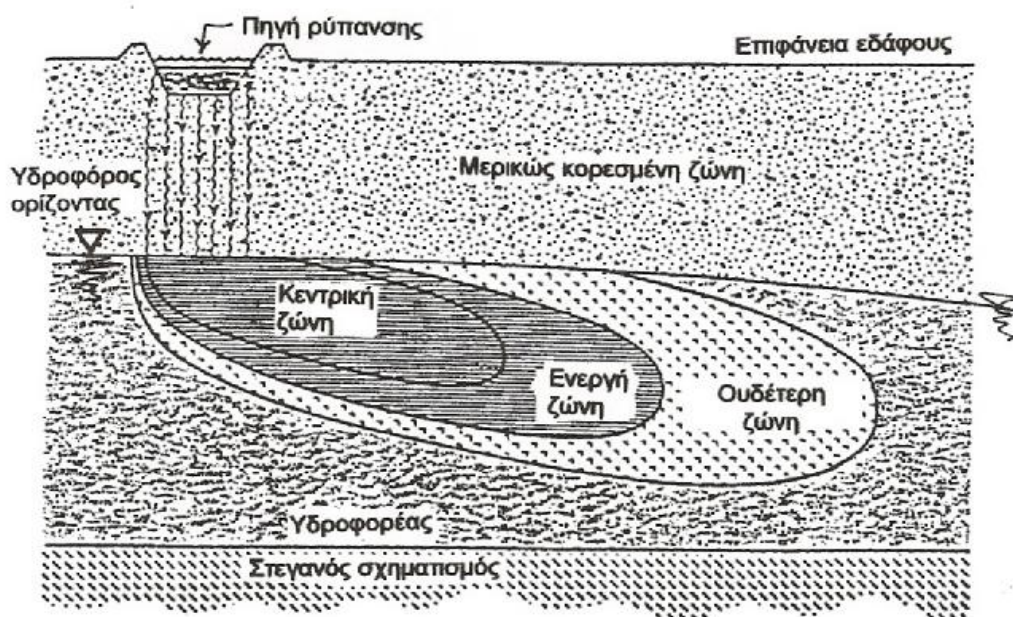
Οι βασικότεροι μηχανισμοί ρύπανσης του νερού που διέρχεται από τον χώρο διάθεσης είναι:

- Ø Διάλυση διαλυτών συστατικών που υπάρχουν αρχικά στον χώρο όπως,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , μερικά οργανικά (χουμικά οξέα κτλ)
- Ø Διάλυση οργανικών παραγώγων που σχηματίζονται κατά την βιοαποδόμηση σύνθετων οργανικών ενώσεων (καρβοξυλικά οξέα, σάκχαρα κτλ)
- Ø Διάλυση αμμωνιακών που σχηματίζονται κατά την βιοαποδόμηση αζωτούχων οργανικών ενώσεων και την αναγωγή νιτρικών και νιτροδών
- Ø Διάλυση οργανικών παραγώγων που σχηματίζονται κατά τις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στη χωματερή
- Ø Διάλυση φωσφορικών που σχηματίζονται κατά την βιοαποδόμηση σύνθετων οργανικών που περιέχουν φώσφορο
- Ø Διάλυση των ευδιάλυτων  $\text{Fe}^{2+}$  που σχηματίζονται κατά την αναγωγή των  $\text{Fe}^{3+}$
- Ø Εκπλυση λεπτομερών σωματιδίων και κολλοειδών
- Ø Απλή εκχύλιση δυσδιάλυτων ή αδιάλυτων οργανικών συστατικών (πολυσακχαρίτες, ανώτερα λιπαρά οξέα, πρωτεΐνες, πεπτίδια, φαινόλες κτλ) (1)

## 5.Μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων

### 5.1.Γενικά

Όταν οι ρύποι διαφεύγουν από ένα χώρο διάθεσης αποβλήτων (Σχήμα 5.1) κινούνται μέσα από την μερικώς κορεσμένη ζώνη. Ένα μέρος των ρύπων συγκρατείται στην επιφάνεια των εδαφικών κόκκων λόγω γεωχημικής προσρόφησης ή μηχανικής συγκράτησης (τριχοειδείς δυνάμεις). Το υπόλοιπο μέρος των ρύπων καταλήγει στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Οι διαλυμένοι ρύποι στο νερό που φθάνουν στον υδροφόρο ορίζοντα κινούνται όπως το υπόγειο νερό και παρασύρονται προς τα κατάντη. Κατά την διάρκεια της κίνησής τους οι ρύποι υποβάλλονται σε μηχανικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες. Αποτέλεσμα είναι η επέκταση της ρύπανσης, η αραίωση των ρύπων και η βαθμιαία εξασθένηση του ρυπαντικού φορτίου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές αρχές και η μαθηματική προσομοίωση της μεταφοράς των ρύπων στα εδάφη και τους υδροφορείς.



Σχ 5.1. Κίνηση των ρύπων στο έδαφος.

### 5.2.Φυσικοί μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων

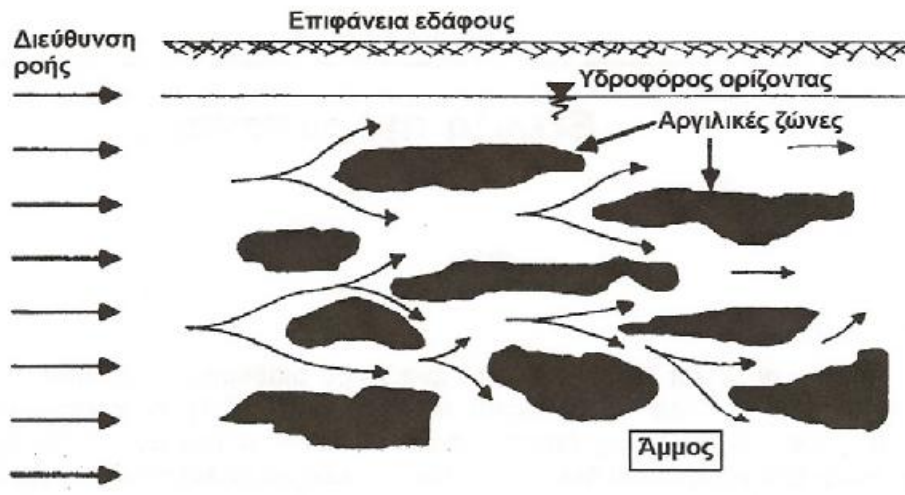
Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται οι μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων που μπορούν να αναμειχθούν με το υπόγειο νερό, σε κορεσμένα και μερικώς κορεσμένα εδαφικά υλικά. Δεν ενδιαφέρουν αυτό το κεφάλαιο οι περιπτώσεις ρύπανσης με επιπλέοντες ρύπους (όπως τα πετρελαιοειδή)

των οποίων οι μηχανισμοί μεταφοράς διαφέρουν. Οι ρύποι μεταφέρονται εντός του ύδατος των εδαφικών πόρων μέσω των παρακάτω μηχανισμών:

(1) Μεταγωγή (advection). Ο ρύπος παρασύρεται από το υπόγειο νερό κατά την κίνησή του μέσα από τους πόρους λόγω υδραυλικής κλίσης. Κατά τη μεταγωγή η συγκέντρωση του ρύπου σε μια συγκεκριμένη θέση μεταβάλλεται χρονικά. Συνεχώς διέρχονται μόρια νερού στα οποία η συγκέντρωση του ρύπου είναι διαφορετική. Κατά τη μεταγωγή σε κάποιον συγκεκριμένο όγκο νερού η συγκέντρωση του ρύπου δεν μεταβάλλεται καθώς ο όγκος αυτός μετακινείται σύμφωνα με τη ροή (αρχή διατήρησης μάζας). Χωρίς ροή του υπογείου νερού δεν προκαλείται μεταφορά ρύπου λόγω μεταγωγής.

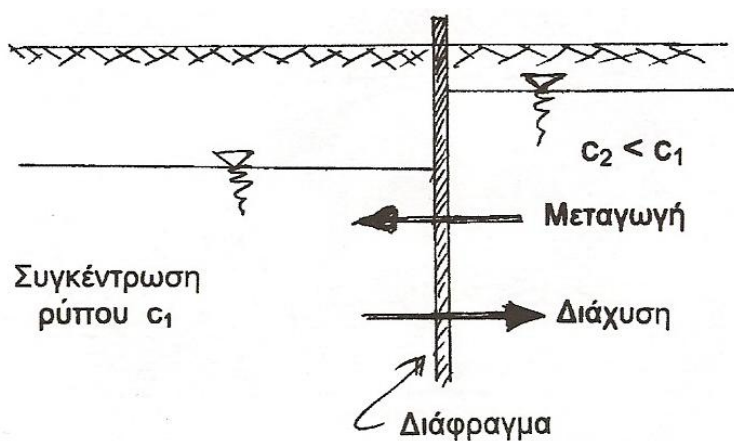
(2) Διάχυση (molecular diffusion). Ο ρύπος διαχέεται μέσα στο υπόγειο νερό λόγω διαφοράς συγκέντρωσης από θέση σε θέση. Πιο συγκεκριμένα, η κίνηση του ρύπου γίνεται από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης προς περιοχές χαμηλότερης συγκέντρωσης, μέχρι οι συγκεντρώσεις να γίνουν ίσες. Η διάχυση του ρύπου δεν εξαρτάται από την κίνηση του νερού άρα συμβαίνει ακόμη και όταν το νερό των πόρων ηρεμεί.

(3) Διασπορά (mechanical dispersion). Η κίνηση του ρύπου οφείλεται στην παρουσία αλληλοσυνδεδεμένων πόρων του σκελετού του εδάφους που έχουν τυχαίες διευθύνσεις και σχήματα. Έτσι στη μικροκλίμακα των εδαφικών πόρων, η ταχύτητα κίνησης του νερού εντός των πόρων μεταβάλλεται με αποτέλεσμα να αποκλίνει από τη μέση ταχύτητα της υπόγειας ροής (Σχήμα 5.2). Αποτέλεσμα είναι ο ρύπος που παρασύρεται από το νερό να διασπείρεται κατά μήκος και εγκάρσια της διεύθυνσης κίνησης του νερού. Η διάχυση και η διασπορά δεν διαφέρουν μακροσκοπικά και στη μαθηματική ανάλυση της μεταφοράς των ρύπων αντιμετωπίζονται από κοινού. Για το συνδυασμένο μηχανισμό της διάχυσης και της διασποράς χρησιμοποιείται ο όρος υδροδυναμική διασπορά.



Σχ 5.2. Διασπορά ρύπων στο έδαφος

Παρόλο που οι μηχανισμοί αυτοί δρουν συνήθως ταυτόχρονα μπορούν να δράσουν και ανταγωνιστικά. Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται μια τέτοια περίπτωση κατά την οποία ο μηχανισμός της μεταγωγής προκαλεί κίνηση του ρύπου από την περιοχή υψηλού υδραυλικού φορτίου προς περιοχή χαμηλότερου υδραυλικού φορτίου, ενώ η μοριακή διάχυση προκαλεί κίνηση του ρύπου από την περιοχή υψηλής συγκέντρωσης του ρύπου προς την περιοχή χαμηλότερης συγκέντρωσης, δηλαδή αντίθετα. Ο κύριος μηχανισμός κίνησης είναι η οριζόντια μεταφορά ενώ η διασπορά θεωρείται δευτερεύων μηχανισμός.



Σχ 5.3. Ανταγωνιστική δράση μεταγωγής και διάχυσης

### 5.3. Μη-μηχανικές διεργασίες υποβάθμισης ρύπων

Εκτός από τους παραπάνω φυσικούς μηχανισμούς μεταφοράς των ρύπων σε πορώδη υλικά, η μεταφερόμενη μάζα τους επηρεάζεται και από άλλες, μη-μηχανικές διεργασίες, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα τη βαθμιαία υποβάθμιση του ρύπου. Οι διεργασίες αυτές είναι οι εξής:

1. Βιολογικές και βιοχημικές διεργασίες. Παράδειγμα είναι η αποσύνθεση των οργανικών ρύπων και η αποδόμηση ποικίλων ρύπων μέσω μικροοργανισμών.
2. Χημικές διεργασίες. Η προσρόφηση ρύπων στην επιφάνεια των αργιλικών ορυκτών που αποτελούν τους εδαφικούς κόκκους, η ανταλλαγή ιόντων μεταξύ ρύπων και εδαφικών κόκκων και η καθίζηση, οξειδωση και αναγωγή ρύπων είναι μερικά παραδείγματα.
3. Πυρηνικές διεργασίες. Παράδειγμα είναι η βαθμιαία διάσπαση των ραδιενεργών ισοτόπων με την πάροδο του χρόνου.

### 5.4.Επιβράδυνση

Οι κυριότερες διεργασίες επιβράδυνσης της μεταφοράς ρύπων σε υδροφόρα στρώματα είναι το φιλτράρισμα, η ρόφηση, η καθίζηση και η αποδόμηση.

- **Φιλτράρισμα**

Το φιλτράρισμα οφείλεται στην παγίδευση των στερεών σωματιδίων και των μεγάλων διαλυμένων μορίων στους κενούς πόρους της ακόρεστης και της κορεσμένης ζώνης. όταν το μέγεθος των σωματιδίων είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος των διακένων τότε συμβαίνει το επιφανειακό φιλτράρισμα. όταν το μέγεθος των σωματιδίων είναι περίπου το ίδιο με το μέγεθος των διακένων τότε συμβαίνει η καθοδική πορεία. Σε αυτή την περίπτωση, τα σωματίδια κινούνται μέχρι το σημείο στο οποίο το μέγεθος των διακένων δεν επιτρέπει την κίνησή τους παραπέρα. Αυτό που μπορεί επίσης να εμποδίσει την κίνηση των ρύπων είναι η δημιουργία φυσαλλίδων αερίου. Ποσοστό αύξησης στο περιεχόμενο αέριο 15% στα διάκενα οδηγεί σε μείωση κατά 15% στο ενεργό πορώδες, 35% μείωση στην περατότητα και 50% μείωση στο γενικότερο φαινόμενο της διασποράς.

- **Ιοντοεναλλαγή –Προσρόφηση**

Η ιοντοεναλλαγή οφείλεται στην αντικατάσταση ενός κατιόντος που βρίσκεται προσκολλημένο σε μια αρνητικά φορτισμένη περιοχή στην

επιφάνεια ενός γεωλογικού στρώματος από κάποιο άλλο. Όταν οι διαθέσιμες θέσεις για ιοντοεναλλαγή συμπληρωθούν, ο ρύπος αρχίζει πάλι να κινείται χωρίς να επιβραδύνεται πια. Οι μεταβολές στο pH και η παρουσία πολλών ιόντων κάνουν το φαινόμενο αυτό πολύπλοκο. Αν διαλυθεί στο νερό πιο επικίνδυνος ρύπος που προϋπήρχε στο γεωλογικό στρώμα το φαινόμενο αυτό επιφέρει χειρότερα αποτελέσματα.

Προσρόφηση είναι η δέσμευση ενός ιόντος στην επιφάνεια ενός γεωλογικού στρώματος όταν στο τελευταίο υπάρχουν ενεργές θέσεις για την εκδήλωση του φαινομένου αυτού.

Οι ιοντοεναλλαγή και προσρόφηση είναι αντιστρέψιμες αντιδράσεις.

- **Καθίζηση**

Η καθίζηση οφείλεται σε γεωχημικές αντιδράσεις οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία μη διαλυτών ενώσεων. Η καθίζηση είναι αντιστρέψιμη αντίδραση κάτι που σημαίνει πως είναι δυνατή η επαναδιαλυτοποίηση ενός ρύπου σε κατάλληλες συνθήκες. Η σημαντική κατακράτηση των βαρέων μετάλλων στην ακόρεστη ζώνη οφείλεται στην καθίζηση και την προσρόφηση.

- **Αποδόμηση**

Οι αντιδράσεις αποδόμησης επιβραδύνουν την κίνηση των ρύπων αφού ο ρύπος παύει να υπάρχει στην πρωταρχική του μορφή. Παρόλα αυτά, μπορεί η ρύπανση να συνεχίζει να υφίσταται διότι οι ενώσεις που προέρχονται από την αποδόμηση μπορεί να είναι το ίδιο ή παραπάνω τοξικές. Συχνά με την υδρόλυση οργανικών ενώσεων σχηματίζονται ενδιάμεσα παράγωγα όχι το ίδιο τοξικά. Η μικροβιακή δράση είναι ίσως η πιο σημαντική διεργασία αποδόμησης και συνίσταται από οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις και αντιδράσεις βιοαποδόμησης.

Γενικά οι μηχανισμοί μείωσης της συγκέντρωσης διαφόρων ρυπαντικών παραμέτρων, στα υπόγεια ύδατα έχουν ως ακολούθως: Cu, Pb, Zn : καθίζηση, προσρόφηση, ιοντοεναλλαγή και διάλυση, Fe : καθίζηση, ιοντοεναλλαγή, προσρόφηση, διάλυση, πρόσληψη από μικροοργανισμούς,  $\text{NH}_4^+$ , Mg, K, Na : εναλλαγή ιόντων, BOD<sub>5</sub>, COD : διάλυση, βιοαποδόμηση, φιλτράρισμα, προσρόφηση, Νιτρικά, χλωριόντα: διάλυση,  $\text{SO}_4^{2-}$  : εναλλαγή ανιόντων, προσρόφηση, καθίζηση και διάλυση. (13)

## 5.5. Προσομοίωση μεταφοράς ρύπων

### 5.5.1 Μεταφορά ρύπων λόγω μεταγωγής

Κατά τη μεταγωγή ο ρύπος ακολουθεί την κίνηση του υπογείου νερού, η οποία έχει σχέση με την υδραυλική κλίση και τον νόμο του Darcy:

$$\mathbf{v} = \mathbf{k} \cdot (-\nabla h) \quad (5.1\alpha)$$

όπου  $\mathbf{v}$ : η φαινόμενη ταχύτητα του υπογείου νερού συχνά αναφερόμενη και ως ταχύτητα Darcy,  $\mathbf{k}$ : η υδραυλική αγωγιμότητα (m/sec), και  $\nabla h$ : η κλίση της συνάρτησης του υδραυλικού φορτίου  $h$ . Στην υπόγεια ροή το υδραυλικό φορτίο ορίζεται από τη σχέση:

$$h \equiv z + p/\gamma \quad (5.1\beta)$$

όπου  $z$ : το υψόμετρο της θέσης στην οποία υπολογίζεται το υδραυλικό φορτίο,  $p$ : η πίεση και  $\gamma$ : το ειδικό βάρος του νερού. Η υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και του ρευστού. Συχνά οι δύο αυτές επιρροές διαχωρίζονται ως εξής:

$$k \equiv \frac{\gamma}{\mu} K \quad (5.2)$$

όπου, η πραγματική διαπερατότητα  $\mathbf{K}$  (m<sup>2</sup>) εξαρτάται μόνον από τα χαρακτηριστικά του εδαφικού σχηματισμού, και οι ιδιότητες του ρευστού των πόρων υπεισέρχονται μέσω του ειδικού βάρους  $\gamma$  (kN/m<sup>3</sup>) και του ιξώδους  $\mu$  (kN·sec/m<sup>2</sup>). Ο προσδιορισμός της φαινόμενης ταχύτητας  $\mathbf{v}$  που είναι συνάρτηση της θέσης και του χρόνου, συνήθως γίνεται με αναλυτικά προσομοιώματα, τα οποία διέπονται από την αρχή διατήρησης της μάζας του υπογείου νερού κατά την κίνησή του. Η αρχή διατήρησης μάζας του υπόγειου νερού καταλήγει στην εξίσωση:

$$\nabla \cdot (\mathbf{T} \cdot \nabla h) = \nabla(T\nabla h) = S \frac{\partial h}{\partial t} - w \quad (5.3)$$

όπου  $\mathbf{T} \equiv \mathbf{k} \cdot H$  είναι η διαβιβαστικότητα του υδροφορέα,  $H$  το πάχος του υδροφορέα στην κατακόρυφη διεύθυνση,  $S$  ο συντελεστής εναποθήκευσης και  $w$  μια συνάρτηση τροφοδοσίας του υπό μελέτη υδροφορέα (η κατεισδύουσα βροχόπτωση κλπ). Η διαφορική εξίσωση (5.3) μπορεί να επιλυθεί ως προς το υδραυλικό φορτίο  $h$  και, στη συνέχεια, η φαινόμενη ταχύτητα κίνησης του υπογείου νερού μπορεί να προσδιορισθεί μέσω της εξίσωσης (5.1α). Η επίλυση της εξίσωσης (5.3), που καταλήγει στον προσδιορισμό της ταχύτητας  $\mathbf{v}$  του νερού, γίνεται ανεξάρτητα από την παρουσία ρύπων. Η προσομοίωση της μεταφοράς των ρύπων στο υπόγειο νερό γίνεται μέσω της αρχής διατήρησης της μάζας των ρύπων που παρουσιάζεται παρακάτω. Η μάζα του ρύπου που



ακολουθεί την κίνηση του υπόγειου νερού λόγω μεταγωγής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$dm' = c \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS \quad (5.4)$$

όπου  $dm'$  είναι η μάζα του ρύπου που διέρχεται ανά μονάδα χρόνου μέσω μιας στοιχειώδους επιφάνειας  $dS$  ( $\mathbf{n}$ : κάθετο διάνυσμα κατεύθυνσης) και  $c$  η συγκέντρωση του ρύπου σε κάθε θέση. Η ποσότητα  $(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS)$  εκφράζει τον όγκο του νερού των πόρων που διέρχεται μέσω της στοιχειώδους επιφάνειας  $dS$  ανά μονάδα χρόνου.

### 5.5.2 Μεταφορά ρύπων λόγω διάχυσης-διασποράς

Η μεταφορά ρύπων λόγω διάχυσης και διασποράς συνήθως περιγράφεται με ενιαίο τρόπο, μέσω του νόμου του Fick, σύμφωνα με τον οποίο η μάζα  $dm''$  του ρύπου που διέρχεται (λόγω διάχυσης και διασποράς) ανά μονάδα χρόνου μέσω μιας στοιχειώδους επιφάνειας είναι ανάλογη της κλίσης της συγκέντρωσης του ρύπου  $(\nabla c)$ , δηλαδή:

$$dm'' = (-\nabla c) \cdot n(\mathbf{D}_2 + \mathbf{D}_3) \cdot \mathbf{n} dS \quad (5.5)$$

όπου  $n$ : το ενεργό πορώδες του εδάφους,  $\mathbf{D}_2$ : ο συντελεστής διάχυσης και  $\mathbf{D}_3$ : ο συντελεστής διασποράς ( $m^2/sec$ ). Οι μηχανισμοί της διάχυσης και της διασποράς μοιάζουν ως προς το πώς επηρεάζουν την μεταφορά των ρύπων και για αυτό συχνά στην σχέση (5.5.) χρησιμοποιείται ένας συντελεστής, ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς που ορίζεται ως  $\mathbf{D} \equiv \mathbf{D}_2 + \mathbf{D}_3$ . Η τιμή του συντελεστή διάχυσης εξαρτάται από το είδος και την κατάσταση των ρύπων (π.χ. αν αιωρούνται στο υπόγειο νερό) ενώ η τιμή του συντελεστή διασποράς εξαρτάται από την τάξη μεγέθους της ταχύτητας κίνησης του υπόγειου νερού.

Η σχετική σημασία των τριών αυτών μηχανισμών στη μεταφορά ρύπων μέσω του υπόγειου νερού εξαρτάται από την ταχύτητα μεταγωγής  $\mathbf{v}$  δηλαδή ουσιαστικά από την υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους και το μέγεθος της υδραυλικής κλίσης. Σε αργιλικούς σχηματισμούς έχουν προκύψει τα συμπεράσματα του ακόλουθου πίνακα:

ΣΧΕΤΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΡΥΠΙΩΝ (ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ)	
Ταχύτητα μεταγωγής (m/ έτος)	Σχετική σημασία μηχανισμών μεταφοράς ρύπων στο υπόγειο νερό
$v < 0.0001$	Μόνον διάχυση
$0.0001 < v < 0.02$	Διάχυση και μεταγωγή
$0.02 < v < 0.1$	Μόνον μεταγωγή
$v > 0.1$	Μεταγωγή και διασπορά

Ο πίνακας αυτός χρησιμοποιείται για την απλοποίηση της ανάλυσης προβλημάτων μεταφοράς ρύπων μέσω της απαλοιφής των όρων που έχουν μικρή επιρροή στο αποτέλεσμα (δηλαδή των όρων μεταγωγής  $v$ , διάχυσης  $D_2$  ή διασποράς  $D_3$ ).

### 5.5.3 Αρχή διατήρησης της μάζας του ρύπου

Σύμφωνα με τις εξισώσεις (5.4) και (5.5), η συνολική μάζα του ρύπου που διέρχεται ανά μονάδα χρόνου διαμέσου μιας στοιχειώδους επιφάνειας λόγω μεταγωγής, διάχυσης και διασποράς μαζί δίνεται από τη σχέση:

$$dm = [cv - (\nabla c) \cdot nD] \cdot n dS \quad (5.6)$$

Οι ανωτέρω θεωρήσεις, που αφορούν τη μαθηματική περιγραφή της μεταφοράς ρύπων σε κορεσμένα εδάφη, μπορούν να γενικευθούν και για την ανάλυση της μεταφοράς ρύπων στη μερικώς κορεσμένη ζώνη με κατάλληλη τροποποίηση του συντελεστή υδροδυναμικής διασποράς  $D$  και της ταχύτητας Darcy  $v$ . Οι τιμές τους στην περίπτωση αυτή θα εξαρτώνται και από το βαθμό κορεσμού σε κάθε θέση. Όσον αφορά τις διεργασίες υποβάθμισης του ρυπαντικού φορτίου, έστω  $f$  η συνάρτηση μείωσης της μάζας του ρύπου ανά μονάδα χρόνου και όγκου του εδάφους λόγω φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών και  $g$  η αντίστοιχη μείωση της μάζας του ρύπου λόγω πυρηνικής διάσπασης. Η μάζα του ρύπου ανά μονάδα όγκου του εδάφους είναι:

$$m = n c \quad (5.7)$$

Ο ρυθμός των πυρηνικών διασπάσεων θεωρείται εκθετικός. Ο ρυθμός μείωσης λοιπόν της μάζας του ρύπου ανά μονάδα όγκου του εδάφους είναι:

$$-dm = f + g = f + \lambda m = f + \lambda n c \quad (5.8)$$

όπου  $\lambda$  ένας συντελεστής πυρηνικών διασπάσεων ( $\text{sec}^{-1}$ ). Η εισρόφηση εκφράζεται μέσω του συντελεστή υστερήσεως ( $Rd > 1$ ) ο οποίος μειώνει τις τιμές του συντελεστή διάχυσης-διασποράς και της ταχύτητας στην εξ. (5.6) και δίνει:

$$dm = \frac{1}{Rd} [c v - (\nabla c) \cdot nD] \cdot ndS$$

Αυτό συμβαίνει επειδή το αποτέλεσμα των μηχανισμών αυτών είναι η καθυστέρηση της προώθησης του μετώπου της ρύπανσης, καθώς μέρος του διαλυμένου ρύπου μεταφέρεται στη στερεά φάση του εδάφους και δεν παρακολουθεί την κίνηση του υπογείου νερού. Στην γραμμική εισρόφηση ο συντελεστής υστερήσεως δίνεται από τη σχέση:

$$Rd = 1 + \frac{\rho K}{\eta}$$

όπου,  $\rho$  η πυκνότητα του εδάφους.

Ο συντελεστής διάχυσης  $D_2$  είναι της τάξεως του  $10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$ . Στην περίπτωση διάχυσης ρύπων εντός του κορεσμένου εδάφους, ο συντελεστής υστερήσεως  $Rd$  είναι της τάξεως του  $10 \div 100$ . Ο συντελεστής  $D_3$  εξαρτάται από την ταχύτητα του υπόγειου νερού. Για μονοδιάστατη ροή ( $v_y = v_z = 0$ ), οι τρεις συντελεστές διασποράς προσδιορίζονται από τις σχέσεις:

$$D_{3x} = \alpha_L (v_x/n) = \alpha_L \cdot \bar{v}_x \quad \text{και}$$

$$D_{3y} = D_{3z} = \alpha_T (v_x/n) = \alpha_L \cdot \bar{v}_x ,$$

όπου  $\alpha_L$  ο συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς και  $\alpha_T$  ο συντελεστής εγκάρσιας μηχανικής διασποράς. Ο συντελεστής  $\alpha_L$  εξαρτάται από την κλίμακα του πεδίου ροής και μάλιστα μεγαλώνει όσο μεγαλώνει το μήκος του πεδίου ροής.

Η προσομοίωση της κίνησης των ρύπων στο έδαφος και το υπόγειο νερό γίνεται με τη μαθηματική σχέση που εκφράζει τη διατήρηση μάζας του ρύπου κατά την κίνησή του μέσω του εδάφους. Θεωρείται σταθερός όγκος εδάφους  $V$ , περιβαλλόμενος από κλειστή επιφάνεια  $S$  και παρακολουθείται η μάζα του ρύπου μέσα στον όγκο αυτό. Η διατήρηση της μάζας απαιτεί η συνολική μείωση της μάζας του ρύπου μέσα στον όγκο  $V$  να ισούται με το άθροισμα:

(1) της μάζας του ρύπου που εξέρχεται του όγκου  $V$  μέσω της επιφάνειας  $S$ ,

(2) της μείωσης της μάζας του ρύπου μέσα στον όγκο  $V$  λόγω της υποβάθμισης όπως εξετάσθηκε παραπάνω και

(3) της μείωσης της μάζας του ρύπου μέσα στον όγκο  $V$  λόγω αφαίρεσης μέρους του ρύπου με τεχνητή απορρύπανση.

Σύμφωνα με τα παραπάνω:

(α) Η συνολική μείωση της μάζας του ρύπου μέσα στον  $V$  ανά μονάδα χρόνου είναι (από εξ. 5.7):

$$A = -\frac{\partial}{\partial t} \int_V dm = -\int_V \frac{\partial(\rho c)}{\partial t} dV \quad (5.9\alpha)$$

(β) Η μάζα του ρύπου που εξέρχεται από τον  $V$  μέσω της επιφάνειας  $S$  ανά μονάδα χρόνου είναι (από εξ. 5.6):

$$B = \int_S dm = \int_S \frac{1}{Rd} [c v - (\nabla c) \cdot nD] \cdot n dS$$

και με χρήση του θεωρήματος Green (μετατροπή του επιφανειακού ολοκληρώματος σε ολοκλήρωμα όγκου):

$$B = \int_V \nabla \left[ \frac{1}{Rd} c v - \frac{1}{Rd} (\nabla c) \cdot nD \right] dV \quad (5.9\beta)$$

(γ) Η μείωση της μάζας μέσα στον  $V$  λόγω διαδικασιών υποβάθμισης ανά μονάδα χρόνου είναι (από εξ. 5.8):

$$\Gamma = \int_V (-dm) = \int_V f dV + \int_V \lambda n c dV \quad (5.9\gamma)$$

(δ) Τέλος, η μείωση της μάζας του ρύπου εντός του  $V$  ανά μονάδα χρόνου, λόγω αφαίρεσης ρύπου με τεχνητή απορρύπανση, είναι:

$$\Delta \equiv \int_V c q dV \quad (5.9\delta)$$

όπου  $q$  είναι η ειδική παροχή της άντλησης.

Με τήρηση των ανωτέρω σχέσεων (5.9), η αρχή διατήρησης μάζας του ρύπου δίνει ότι  $A = B + \Gamma + \Delta$ , δηλαδή:

$$n \frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot \left[ \frac{1}{Rd} (\nabla c) \cdot n \mathbf{D} \right] - \nabla \cdot \left( \frac{1}{Rd} c \mathbf{v} \right) - f - \lambda n c - c q \quad (5.10\alpha)$$

Στην περίπτωση ισότροπης συμπεριφοράς του ρύπου σε διάχυση και διασπορά (δηλαδή αν το  $\mathbf{D}$  είναι ισότροπο και έχει μέγεθος  $D$ ), η παραπάνω σχέση δίνει:

$$n \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{nD}{Rd} (\nabla^2 c) - \nabla \cdot \left( \frac{c}{Rd} \mathbf{v} \right) - f - \lambda n c - c q \quad (5.10\beta)$$

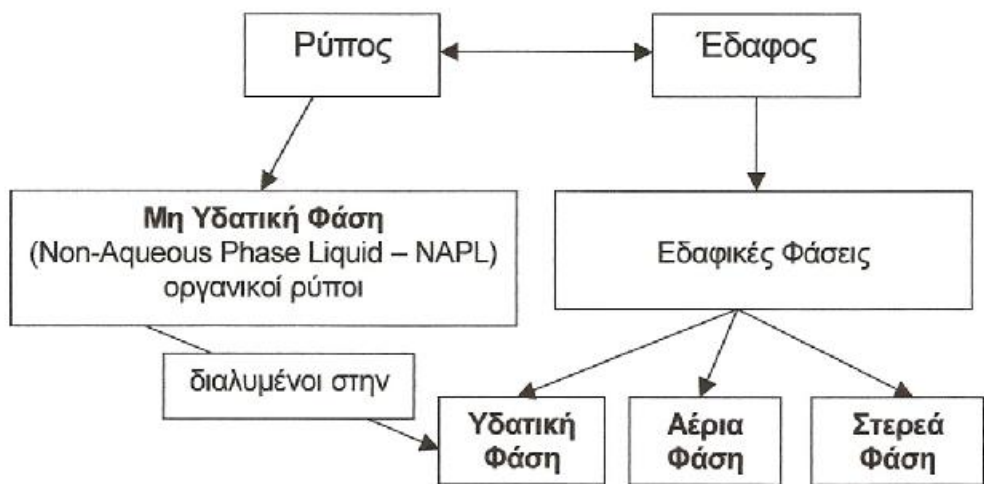
Στη γενική περίπτωση όπου η συγκέντρωση  $c$  εξαρτάται από τη θέση ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) και το χρόνο  $t$ , η ανωτέρω διαφορική εξίσωση ως προς  $c$  μπορεί να επιλυθεί αριθμητικά με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών. (6)

## 6. Αλληλεπίδραση ρύπων με το έδαφος

### 6.1 Εισαγωγή

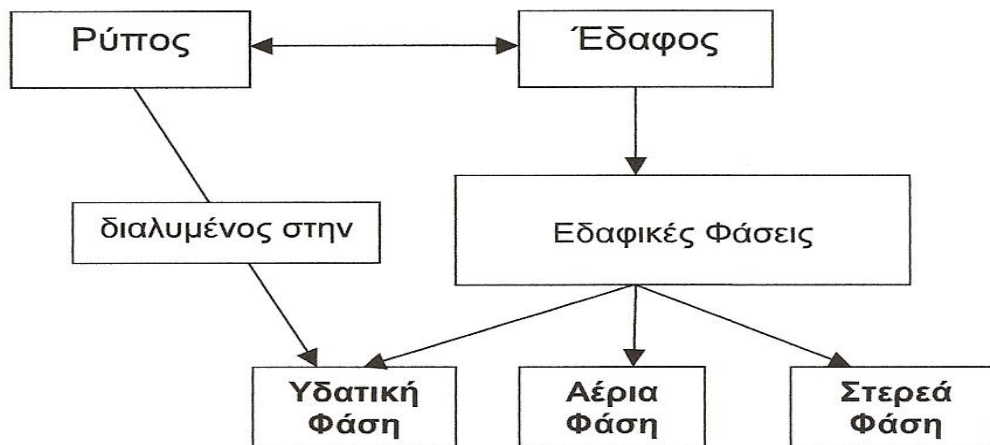
Η μελέτη της αλληλεπίδρασης των ρύπων με το έδαφος απαιτείται για προβλήματα προστασίας και αποκατάστασης του υπεδάφους. Παράδειγμα είναι το πόσο εύκολο ή δύσκολο είναι για ένα ρύπο να μεταφερθεί από το υπόγειο νερό στον αέρα της ακόρεστης ζώνης. Η απάντηση σε αυτό το ζήτημα ενδιαφέρει για να εκτιμηθεί αν πρέπει να ληφθεί υπόψη μεταφορά του ρύπου και στην υγρή και στην αέρια φάση (δηλ. και στην κορεσμένη και στην ακόρεστη ζώνη, αντίστοιχα). Αυτή η απάντηση επίσης ενδιαφέρει και για την επιλογή μεθόδου απορρύπανσης, καθώς, αρκετές τεχνολογίες αποκατάστασης του υπεδάφους βασίζονται στη μεταφορά πτητικών ρύπων από την υγρή στην αέρια φάση. Επιπλέον, ενδιαφέρει να μπορεί να εκτιμηθεί η συνολική μάζα του ρύπου, που έχει διαρρεύσει στο υπέδαφος, συμπληρώνοντας αποτελέσματα από επιτόπου δειγματοληψίες υπόγειου νερού και εδάφους και χημικές αναλύσεις των δειγμάτων.

### 6.1.1.Οι φάσεις του εδάφους και των ρύπων



Σχ.6.1. Οι φάσεις του εδάφους και του ρύπου που μελετώνται στην γενικότερη περίπτωση ρύπανσης του υπεδάφους

Για να μελετηθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ του εδάφους και ενός ρύπου, πρέπει οι φάσεις του κάθε ενός να διαχωριστούν (Σχ. 6.1). Το Σχήμα 6.1 αντιστοιχεί σε περιπτώσεις διαρροής στην ακόρεστη ζώνη οργανικών ρύπων που δεν αναμειγνύονται με το νερό. Στην ακόρεστη ζώνη διακρίνονται τρεις εδαφικές φάσεις, η στερεά, η υγρή και η αέρια. Όσον αφορά τον οργανικό ρύπο, διαχωρίζονται οι περιπτώσεις όπου αυτός έχει διαρρεύσει ως ξεχωριστή φάση (π.χ. διαρροή από υπόγεια δεξαμενή πρατηρίου καυσίμων), (Σχ. 6.1), ή ως υδατικό διάλυμα (π.χ. διαρροή υγρών αποβλήτων χημικής διεργασίας τα οποία περιέχουν κάποια ποσότητα ρύπου πλήρως διαλυμένου σε νερό), (Σχ. 6.2). Η ανάλυση αυτού του κεφαλαίου αφορά κυρίως μη υδατικούς υγρούς ρύπους γιατί αντιστοιχούν στην πιο γενική περίπτωση όπου υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές φάσεις και γιατί πρόκειται για διαρροή ενός ανόργανου ρύπου σε υδατικό διάλυμα. Η διάκριση των φάσεων είναι ίδια με αυτήν του Σχήματος 4.2. Στην περίπτωση που εξετάζεται μόνο η κορεσμένη ζώνη, το πρόβλημα απλοποιείται γιατί δεν χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η αέρια φάση.



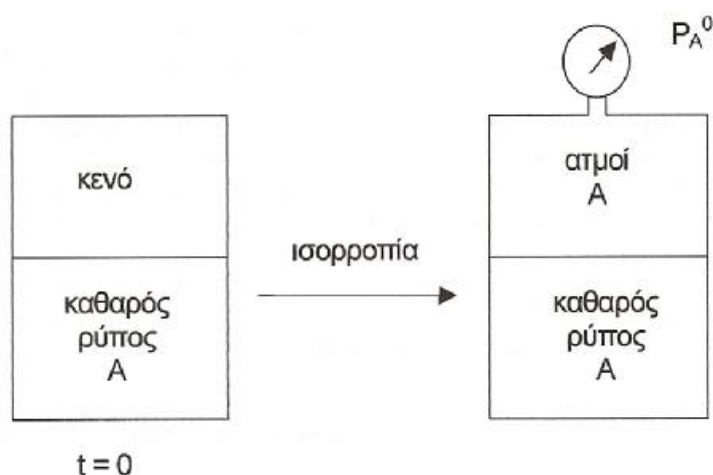
Σχ.6.2. Οι φάσεις του εδάφους και του ρύπου που μελετώνται σε περιπτώσεις διαρροής υδατικού διαλύματος ρύπου

Από τη στιγμή που ο ρύπος θα διαρρεύσει στο υπέδαφος, είτε ως ξεχωριστή φάση είτε ως υδατικό διάλυμα, θα κατανεμηθεί σε όλες τις εδαφικές φάσεις. Η κατανομή των ρύπων στις διάφορες φάσεις ακολουθεί φυσικοχημικούς νόμους η βασική αρχή των οποίων είναι ότι ο ρύπος θα κατανεμηθεί στις φάσεις ώσπου να επιτευχθεί χημική ισορροπία. Η κατανομή ενός συγκεκριμένου ρύπου περιγράφεται από τις φυσικοχημικές του ιδιότητες. Η μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ των ρύπων και του εδάφους απαιτεί συστηματική καταστήμανση της κάθε φάσης και των συστατικών της. Έτσι είναι σημαντικό να χρησιμοποιούνται δείκτες για την διάκριση της αέριας ( $a$ ), της υδατικής ( $w$ ), της στερεάς ( $s$ ) και, στη γενική περίπτωση, της μη υδατικής υγρής φάσης ( $n$ ). Για συγκεκριμένο ρύπο  $A$ , θα διακρίνονται: α) οι ατμοί του ρύπου, οι οποίοι θα χαρακτηρίζονται από τη συγκέντρωσή τους στην αέρια φάση  $C_{Aa}$  (μάζα ρύπου  $A$  ανά όγκο της αέριας φάσης στους εδαφικούς πόρους), β) ο διαλυμένος ρύπος σε συγκέντρωση  $C_{Aw}$  (μάζα ρύπου  $A$  ανά όγκο νερού στους εδαφικούς πόρους), και γ) ο προσροφημένος ρύπος  $C_{As}$ , (μάζα ρύπου  $A$  ανά ξηρή μάζα εδαφικών στερεών). Έτσι για να υπολογισθεί η μάζα ενός ρύπου στο έδαφος, θα πρέπει να προσδιορισθούν οι προαναφερθείσες συγκεντρώσεις στις τρεις εδαφικές φάσεις και να πολλαπλασιαστούν με την αντίστοιχη ποσότητα αναφοράς. Η αναλογία των εδαφικών φάσεων δίνεται από τα εδαφομηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως το πορώδες ( $n$ ), την ξηρή πυκνότητα του εδάφους ( $\rho_d$  : μάζα εδαφικών στερεών / όγκος εδαφικού δείγματος) και το βαθμό κορεσμού για το νερό ( $S_w$  : όγκος νερού στους εδαφικούς πόρους / όγκος εδαφικών πόρων). Για τον υπολογισμό της συνολικής μάζας στην περίπτωση οργανικού ρύπου που δεν αναμειγνύεται με το νερό, θα πρέπει να είναι γνωστό αν υπάρχει στο υπέδαφος και μη υδατική υγρή φάση, η ποσότητα της οποίας μπορεί να υπολογιστεί με το βαθμό κορεσμού για τη μη υδατική φάση ( $S_n$  : όγκος

μη υδατικής φάσης στους εδαφικούς πόρους / όγκος εδαφικών πόρων) και την πυκνότητα τού μη υδατικού ρύπου.

## 6.2. Ισορροπία μεταξύ αέριας φάσης και μη υδατικής υγρής φάσης

Για να μελετηθεί η ισορροπία μεταξύ αέριας φάσης και μη υδατικής υγρής φάσης εξετάζεται ως περιστατικό η διαρροή σε πρακτικά ξηρό έδαφος (π.χ. κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, μακριά από τον υδροφόρο ορίζοντα) ενός οργανικού διαλύτη με ευρεία χρήση σε βιομηχανικές εφαρμογές, του τριχλωροαιθυλίου. Το τριχλωροαιθέριο είναι η μη υδατική φάση η οποία θα καταλάβει κάποιο ποσοστό των εδαφικών πόρων, ενώ ταυτόχρονα κάποιο μέρος της θα εξατμιστεί στον αέρα των εδαφικών πόρων. Είναι γνωστό ότι όσο πιο πτητικό είναι ένα υγρό, τόσο μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας του μεταβαίνει στην αέρια φάση. Η πτητικότητα μιας ουσίας περιγράφεται από την τάση ατμών της, η οποία αντιστοιχεί στην κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των δύο φάσεων (δηλ. αέριας και υγρής), (Σχ. 6.3). Αν υποθεθεί ότι στο χρόνο μηδέν εισάγεται στο κενό αέρος του δοχείου του Σχ. 6.3 υγρός ρύπος A, η ένδειξη της πίεσης στο μανόμετρο του δοχείου θα ανεβαίνει, καθώς το υγρό θα εξατμίζεται, μέχρι να επέλθει ισορροπία. Η πίεση που αντιστοιχεί στην κατάσταση ισορροπίας είναι η τάση ατμών της ουσίας A,  $P_A^0$ , η οποία είναι ιδιότητα της ουσίας και μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Με γνωστή την πίεση των ατμών, μπορεί να υπολογισθεί η συγκέντρωση της ουσίας A στην αέρια φάση,  $C_{Aa}$ , με την χρήση του νόμου των ιδανικών αερίων.



Σχ.6.3: Ισορροπία μεταξύ υγρού ρύπου (μη υδατική φάση) και των ατμών του (αέρια φάση).

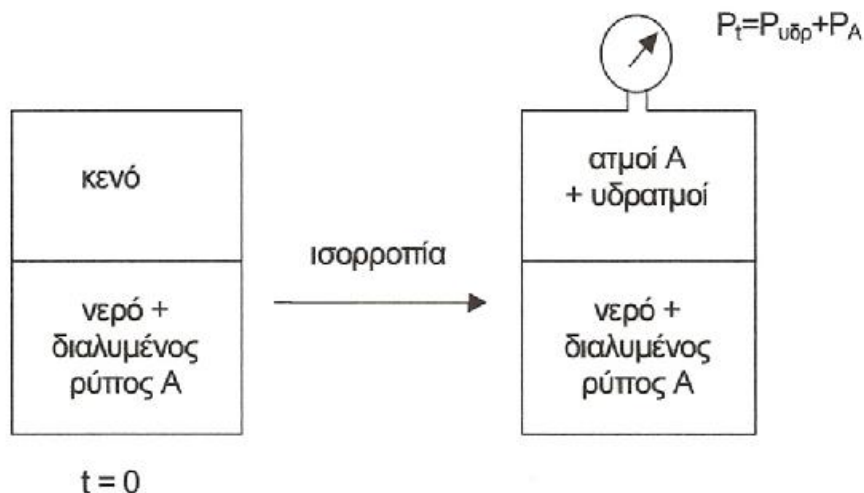
Η διαφορά του περιστατικού διαρροής του τριχλωροαιθυλίου σε ξηρό έδαφος από την περίπτωση του Σχ. 6.3 είναι ότι στο έδαφος δεν υπάρχει κλειστό σύστημα, με αποτέλεσμα η ισορροπία να αποτελεί εξιδανίκευση.



Επίσης, στο έδαφος τα κενά περιέχουν και αέρα μαζί με τους ατμούς του ρύπου. Παρ' όλα αυτά, η συγκέντρωση  $C_{Aa}$  δίνει ένα άνω όριο της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθυλενίου στα εδαφικά κενά, ενώ είναι μια αρκετά ακριβής εκτίμηση στην άμεση περιοχή της διαρροής.

### 6.3 Ισορροπία μεταξύ αέριας φάσης και υδατικής φάσης

Για να μελετηθεί η ισορροπία μεταξύ αέριας και υδατικής φάσης εξετάζεται η διαρροή ενός αραιού διαλύματος τριχλωροαιθυλενίου από μια υπόγεια δεξαμενή που βρίσκεται πολύ κοντά στη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Έστω ότι πρόκειται για απόβλητα κάποιας δεδομένης βιομηχανικής εφαρμογής, για την οποία μπορεί να εκτιμηθεί η συγκέντρωση του τριχλωροαιθένιου στο υδατικό διάλυμα,  $C_{Aw}$ . Έτσι, αν είναι γνωστός ο όγκος των διαρρευσάντων αποβλήτων, μπορεί να υπολογισθεί η μάζα του διαρρευσάντος τριχλωροαιθένιου στο υπόγειο νερό. Πώς θα εξελιχτεί όμως αυτή η διαρροή; Όλη η μάζα του τριχλωροαιθένιου θα παραμείνει στο υπόγειο νερό; Τι θα συμβεί στη διεπιφάνεια της κορεσμένης με την ακόρεστη ζώνη; Η αρχή της χημικής ισορροπίας υπαγορεύει ότι κάποιο ποσοστό των μορίων του τριχλωροαιθυλενίου θα εγκαταλείψει το υδατικό διάλυμα και θα περάσει στην αέρια φάση. Η ισορροπία μεταξύ αέριας και υδατικής φάσης με τη μελετάται με την βοήθεια του εξιδανικευμένου Σχ. 6.5.



Σχ.6.5: Ισορροπία μεταξύ διαλυμένου ρύπου (υδατική φάση) και των ατμών του (αέρια φάση).

Στο χρόνο μηδέν εισάγεται στο δοχείο (Σχ. 6.5) υδατικό διάλυμα ουσίας A και παρατηρείται ότι η ένδειξη της πίεσης στο μανόμετρο του δοχείου ανεβαίνει, καθώς τα μόρια τόσο του νερού όσο και της ουσίας A ανακατανέμονται μεταξύ της υδατικής και της αέριας φάσης, μέχρι να επέλθει ισορροπία. Η ένδειξη του μανόμετρου,  $P_t$ , αντιστοιχεί στην ολική πίεση, δηλαδή στο άθροισμα της μερικής πίεσης των υδρατμών και της

μερικής πίεσης των ατμών της ουσίας A,  $P_A$ , η οποία δίνεται από το νόμο του Henry ως:

$$P_A = H_{MA} x_{Aw}$$

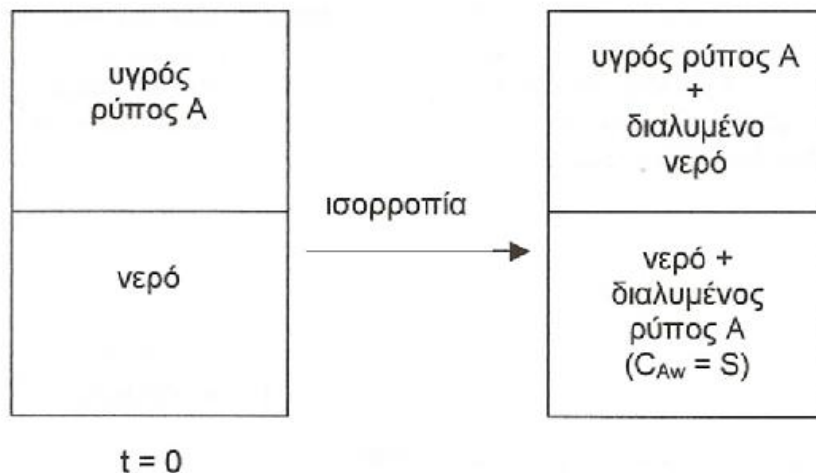
όπου  $H_{MA}$  η σταθερά του νόμου Henry για την ουσία A, σε μονάδες πίεσης, η οποία μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, και  $x_{Aw}$  το μοριακό κλάσμα της ουσίας στο υδατικό διάλυμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο νόμος του Henry εκφράζεται και εναλλακτικά ως:

$$P_A = H_{CA} C_{Awm}$$

όπου  $H_{CA}$  η σταθερά του νόμου Henry για την ουσία A, και  $C_{Awm}$  η μοριακή συγκέντρωση της ουσίας A, δηλ. τα mol της ουσίας A ανά μοναδιαίο όγκο του υδατικού διαλύματος. Ο νόμος του Raoult ισχύει για μείγματα παρόμοιας χημικής δομής ή τουλάχιστον ομοειδών ενώσεων. Έτσι ενώ μπορεί να εφαρμοστεί για ένα μείγμα υδρογονανθράκων, δεν μπορεί να εφαρμοστεί για ανόμοιες ενώσεις όπως είναι το νερό και ένας οργανικός ρύπος. Με τη σειρά του, ο νόμος του Henry ισχύει για αραιά υδατικά διαλύματα, πρέπει δηλαδή  $x_{Aw} \ll 1$ , περίπτωση η οποία είναι σχεδόν πάντα ο κανόνας στα περιστατικά ρύπανσης του υπεδάφους. Τέλος, στην περίπτωση υδατικού διαλύματος ενός αριθμού ρύπων, χρησιμοποιείται πάλι ο νόμος του Henry για τον κάθε ρύπο ξεχωριστά, υπάρχουν όμως αποκλίσεις.

#### **6.4 Ισορροπία μεταξύ υδατικής φάσης και μη υδατικής υγρής φάσης**

Θεωρείται διαρροή από υπόγεια δεξαμενή βενζολίου, κοντά στη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Το βενζόλιο είναι μια οργανική ένωση ελαφρότερη από το νερό, κι έτσι όταν φτάσει στον υδροφόρο ορίζοντα θα αρχίσει να εξαπλώνεται οριζόντια δημιουργώντας μια κηλίδα, ενώ παράλληλα θα αρχίσει να διαλύεται στο νερό. Η απλοποίηση του παραδείγματος φαίνεται στο εξιδανικευμένο Σχ. 6.6.



Σχ.6.6: Ισορροπία μεταξύ υγρού ρύπου που δεν αναμειγνύεται με το νερό (μη υδατική φάση) και διαλυμένου ρύπου (υδατική φάση).

Έστω ότι τη χρονική στιγμή μηδέν έρχονται σε επαφή νερό και οργανική ουσία Α η οποία δεν αναμειγνύεται με το νερό. Έτσι μόρια της ουσίας Α αρχίζουν να μεταφέρονται στο νερό (ενώ παράλληλα μόρια νερού αρχίζουν να μεταφέρονται στην ουσία Α), με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συγκέντρωση της ουσίας Α στο νερό (και του νερού στην ουσία Α), έως ότου επιτευχθεί ισορροπία. Η μέγιστη δυνατή συγκέντρωση της ουσίας Α στο νερό, είναι η διαλυτότητα της ουσίας Α,  $S$ , και είναι αυτή που αντιστοιχεί στην κατάσταση ισορροπίας. Οι οργανικοί ρύποι που δεν αναμειγνύονται με το νερό, οι οποίοι δηλ. μπορούν να βρίσκονται ως ξεχωριστή μη υδατική φάση, χαρακτηρίζονται από πολύ μικρές τιμές διαλυτότητας, της τάξης των εκατοντάδων έως λίγων χιλιάδων χιλιοστογράμμων σε ένα λίτρο νερού, για θερμοκρασίες μεταξύ  $20^{\circ}\text{C}$  και  $25^{\circ}\text{C}$ . Με άλλα λόγια, οι μέγιστες δυνατές τιμές των ρύπων που δεν αναμειγνύονται με το νερό δεν ξεπερνούν τα λίγα γραμμάρια στο λίτρο.

### 6.5 Ισορροπία μεταξύ υδατικής φάσης και στερεάς φάσης

Στα παραπάνω εξιδανικευμένα Σχ.6.4 έως 6.6 εξετάστηκε η αλληλεπίδραση μεταξύ των ρευστών φάσεων χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδρασή τους με τα στερεά τοιχώματα του δοχείου. Στην περίπτωση της ρύπανσης του υπεδάφους, το ρόλο των στερεών τοιχωμάτων των δοχείων τον παίζει η στερεά εδαφική φάση. Η ολοκληρωμένη περιγραφή της αλληλεπίδρασης ρύπου Α και εδάφους περιλαμβάνει την κατανομή τού ρύπου Α μεταξύ α) του αέρα των εδαφικών πόρων (στην ακόρεστη ζώνη), β) του νερού των πόρων και γ) των εδαφικών στερεών. Αντίστοιχα, ο ρύπος Α διακρίνεται σε 1) ατμούς του ρύπου, 2) διαλυμένο ρύπο και 3) εισροφημένο ρύπο. Το φαινόμενο της εισρόφησης (sorption) περιγράφει τη μεταφορά μιας διαλυμένης ουσίας

Α από την υδατική φάση στη στερεά φάση και είναι αποτέλεσμα μιας σειράς μηχανισμών που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια και οι οποίοι εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη σύσταση του εδάφους καθώς βέβαια και από τις ιδιότητες της ουσίας. Ο αντίστροφος μηχανισμός λέγεται εκρόφιση (desorption) και περιγράφει τη μεταφορά ουσίας Α από τη στερεά φάση στην υδατική, κάτι που θα συμβεί αν π.χ. εισπνεστεί καθαρό νερό σε ρυπασμένο έδαφος.

### **6.5.1 Μηχανισμοί εισρόφησης**

Το φαινόμενο της εισρόφησης περιλαμβάνει την προσρόφιση (adsorption), όπου η ουσία Α συγκεντρώνεται στην επιφάνεια της στερεάς φάσης, και την απορρόφιση (absorption), κατά την οποία η ουσία Α διαχέεται στο εσωτερικό της στερεάς φάσης. Η εισρόφιση αποτελείται περαιτέρω από τους πιο κάτω μηχανισμούς. Η φυσική προσρόφιση (physical adsorption) οφείλεται σε ασθενείς ελκτικές δυνάμεις μεταξύ μορίων και παρατηρείται σε ευρύ φάσμα ρύπων. Τα μόρια που προσροφούνται δεν προσαρτώνται σε ένα συγκεκριμένο σημείο της επιφάνειας αλλά κινούνται ελεύθερα πάνω σε αυτή. Το υλικό που προσροφάται μπορεί να εμφανίσει συμπυκνωμένη διάταξη έτσι ώστε να σχηματισθούν μοριακές στρώσεις που επικάθονται η μια πάνω στην άλλη.

Η φυσική προσρόφιση είναι μια διαδικασία αντιστρέψιμη: μόλις μειωθεί η συγκέντρωση της προσροφημένης ουσίας στο υδατικό διάλυμα, τα προσροφημένα μόρια εγκαταλείπουν την επιφάνεια πάνω στην οποία έχουν συγκεντρωθεί και επιστρέφουν στο υδατικό διάλυμα.

Η χημική προσρόφιση (chemical adsorption) προκαλείται από πολύ ισχυρότερες δυνάμεις, της τάξεως αυτών που οδηγούν στο σχηματισμό χημικών ενώσεων. Η ουσία που προσροφάται σχηματίζει στρώμα πάχους ενός μόνο μορίου πάνω στη στερεά επιφάνεια. Τα προσροφημένα μόρια δεν είναι ελεύθερα να κινηθούν στην επιφάνεια. Έτσι, μόλις η επιφάνεια καλυφθεί πλήρως από το μονομοριακό στρώμα της προσροφημένης ουσίας, το φαινόμενο της προσρόφησης σταματά. Σε αντίθεση με την φυσική προσρόφιση, υπό κανονικές συνθήκες η χημική προσρόφιση δεν είναι αντιστρεπτή διαδικασία· για την εκρόφιση (desorption) απαιτείται αύξηση της θερμοκρασίας.

Τέλος, η προσρόφιση ανταλλαγής (exchange adsorption) χαρακτηρίζεται από ελκτικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων της προσροφημένης ουσίας και της στερεάς επιφάνειας. Η ανταλλαγή ιόντων (ion exchange) αποτελεί το πιο συνηθισμένο είδος προσρόφησης ανταλλαγής. Τα ιόντα της εν διαλύσει ουσίας συγκεντρώνονται στη

στερεά επιφάνεια σαν αποτέλεσμα ηλεκτροστατικής έλξης μεταξύ αυτών και σημείων της επιφάνειας που έχουν αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο. Όπως είναι αναμενόμενο, τα πολυσθενή ιόντα που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο ηλεκτρικό φορτίο έλκονται σε αντίθετα φορτισμένα σημεία της στερεάς επιφάνειας περισσότερο από ιόντα με μικρότερο ηλεκτρικό φορτίο. Επίσης, όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του (ένυδρου) ιόντος τόσο μεγαλύτερη η ελκτική δύναμη που παρατηρείται. Το φαινόμενο της ανταλλαγής κατιόντων είναι πολύ σημαντικό για τις αργίλους.

Όσον αφορά την απορρόφηση, διακρίνονται η διάχυση σε πορώδεις εδαφικούς κόκκους και η διάχυση στο οργανικό κλάσμα του εδάφους. Η απορρόφηση στο οργανικό κλάσμα του εδάφους είναι ιδιαίτερα σημαντική για οργανικούς υδροφοβικούς ρύπους.

Ενώ οι μηχανισμοί της εισρόφησης έχουν περιγραφεί στη βιβλιογραφία, λείπουν επαρκή δεδομένα που να δείχνουν σε μοριακή κλίμακα τις θέσεις όπου συσσωρεύεται ο ρύπος στη στερεά φάση. Έτσι είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ στερεάς και υδατικής φάσης ξεκινώντας από τη γνώση των μηχανισμών της εισρόφησης. Έτσι, τις περισσότερες φορές η αλληλεπίδραση αυτή περιγράφεται με πειραματικές καμπύλες οι οποίες συνδέουν τη συγκέντρωση ουσίας  $A$  στο υδατικό διάλυμα,  $C_{Aw}$ , με τη συγκέντρωση της ουσίας στη στερεά φάση,  $C_{As}$ . Οι πειραματικές αυτές μετρήσεις γίνονται σε σταθερή θερμοκρασία και οι καμπύλες που προσδιορίζονται λέγονται ισόθερμες.

### 6.5.2 Μαθηματική προσομοίωση του φαινομένου της εισρόφησης

Η πιο απλή μορφή ισόθερμης είναι η γραμμική, η οποία χρησιμοποιείται πιο συχνά σε προβλήματα ρύπανσης και αποκατάστασης του υπεδάφους. Δύο άλλα συνηθισμένα μαθηματικά μοντέλα εισρόφησης είναι α) η ισόθερμη του Langmuir (έχει αναπτυχθεί βάσει θεωρητικών συλλογισμών και προσεγγίζεται πολύ καλά από τη γραμμική ισόθερμη για μικρές τιμές υδατικών συγκεντρώσεων) και β) η ισόθερμη του Freundlich (έχει αναπτυχθεί εμπειρικά).

**Γραμμική Ισόθερμη.** Η γραμμική εισρόφηση περιγράφεται από τη σχέση:

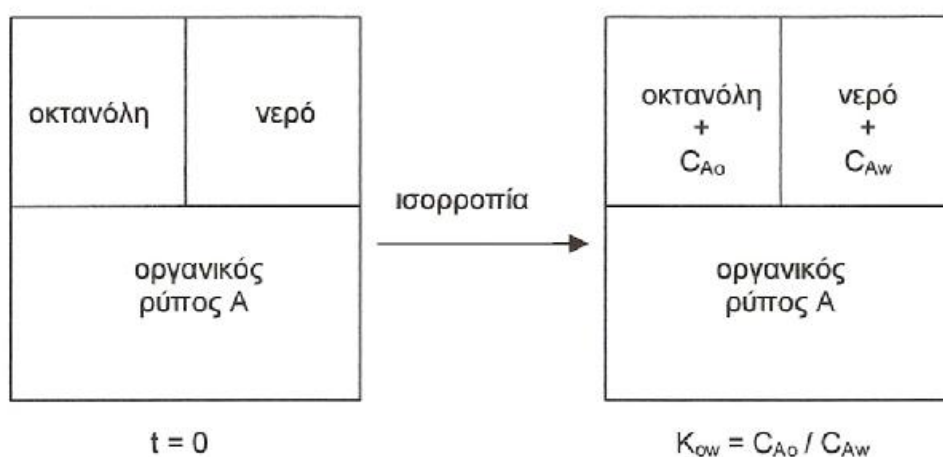
$$C_{As} = K_p C_{Aw}$$

όπου  $K_p$  ο σταθερός συντελεστής που συνδέει τις συγκεντρώσεις στη στερεά φάση  $C_{As}$ , και την υδατική φάση  $C_{Aw}$ . Λέγεται συντελεστής διαχωρισμού (partition coefficient) και έχει μονάδες l/kg, για τις συνήθεις

μονάδες συγκέντρωσης στη στερεά (mg/kg) και την υδατική φάση (mg/l). Ο συντελεστής διαχωρισμού προσδιορίζεται πειραματικά και εξαρτάται από τις ιδιότητες του ρύπου και του εδάφους. Εναλλακτικά, μπορεί να προσδιοριστεί μέσω συσχετίσεων, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί για συγκεκριμένες κατηγορίες ρύπων και εδαφών. Συγκεκριμένα, η πρόβλεψη του συντελεστή διαχωρισμού είναι δυνατή για υδροφοβικούς οργανικούς ρύπους για τους οποίους ο κύριος μηχανισμός εισρόφησης είναι η απορρόφηση στο οργανικό εδαφικό κλάσμα. Σε αυτήν την περίπτωση ισχύει:

$$K_p = K_{oc} f_{oc}$$

όπου  $K_{oc}$  είναι ένας νέος συντελεστής διαχωρισμού, μεταξύ της υδατικής φάσης και του οργανικού κλάσματος της στερεάς φάσης, ο οποίος περιγράφει τη συγγένεια του ρύπου προς το οργανικό εδαφικό κλάσμα.  $f_{oc}$  είναι το κλάσμα του οργανικού άνθρακα στο έδαφος (μάζα οργανικού άνθρακα / μάζα εδάφους). Η πιο πάνω σχέση ισχύει όταν ο κύριος μηχανισμός εισρόφησης είναι η απορρόφηση στο οργανικό εδαφικό κλάσμα και για αυτό συνιστάται όταν  $f_{oc} > 0.1\%$  και για μικρά ποσοστά αργίλου (έτσι ώστε η συμβολή της προσρόφησης ανταλλαγής στο συνολικό φαινόμενο της εισρόφησης να μην είναι σημαντική). Ο συντελεστής διαχωρισμού  $K_{oc}$  είναι ιδιότητα του ρύπου και βρίσκεται βιβλιογραφικά. Εναλλακτικά, μπορεί να προσδιοριστεί μέσω συσχετίσεων με το συντελεστή διαχωρισμού μεταξύ οκτανόλης και νερού,  $K_{ow}$ , ο οποίος ορίζεται με τη βοήθεια του Σχ. 6.7 ως ο λόγος των συγκεντρώσεων ισορροπίας του ρύπου στην οκτανόλη και στο νερό.



Σχ.6.7: Θεώρηση της ισορροπίας μεταξύ οκτανόλης, νερού και οργανικού ρύπου Α για τον ορισμό του συντελεστή διαχωρισμού μεταξύ οκτανόλης και νερού,  $K_{ow}$ .

Ο συντελεστής διαχωρισμού  $K_{ow}$  περιγράφει τη σχετική προτίμηση του ρύπου για τις οργανικές ενώσεις σε σχέση με το νερό: για  $K_{ow} < 10$  ο

τύπος θεωρείται υδρόφιλος. Για μια σειρά από πολυκυκλικές αρωματικές ενώσεις και αλογονοπαράγωγα, ισχύει:

$$K_{oc} = 0.63 K_{ow}$$

Η εξίσωση 4.6 ισχύει για ένα μεγάλο αριθμό οργανικών ενώσεων. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, ανάλογες σχέσεις έχουν προσδιοριστεί για συγκεκριμένες κατηγορίες οργανικών ενώσεων.

**Ισόθερμη Langmuir.** Η θεωρητική ισόθερμη καμπύλη του μοντέλου Langmuir αφορά μονομοριακή προσρόφηση και έχει ως ακολούθως :

$$q = \frac{x}{m} = \frac{q_m \cdot \beta \cdot C_e}{1 + \beta \cdot C_e}$$

όπου:

$q$  : συγκέντρωση προσροφημένης ουσίας (σε gr/gr), που είναι ίση με  $x/m$ , όπου  $x$  η μάζα της προσροφημένης ουσίας και  $m$  η μάζα του προσροφητή

$q_m$  : εμπειρική σταθερά (σε gr/gr) που αντιστοιχεί στην μέγιστη δυνατή συγκέντρωση προσροφημένης ουσίας (ικανότητα προσρόφησης)

$\beta$  : εμπειρική σταθερά (σε  $m^3/gr$ ) (σχετίζεται με την ενθαλπία της προσρόφησης)

$C_e$  : συγκέντρωση (ισορροπίας) της ουσίας στο διάλυμα ( $gr/m^3$ )

Η παραπάνω σχέση μπορεί εναλλακτικά να γραφεί στην ακόλουθη μορφή που προσφέρεται καλύτερα για γραφικό υπολογισμό των παραμέτρων  $q_m$  και  $\beta$ :

$$\frac{C_e}{q} = \left( \frac{1}{\beta q_m} \right) + \left( \frac{1}{q_m} \right) C_e$$

Στην παραπάνω εξίσωση, η ισόθερμη έχει λάβει την γενική μορφή της γραμμικής συσχέτισης  $Y = a_0 + a_1 X$ , όπου η εξαρτημένη μεταβλητή  $Y$  ισούται με  $C_e/q$  και η ανεξάρτητη μεταβλητή  $X$  με  $C_e$ . Με υπολογισμό της εξίσωσης γραμμικής παλινδρόμησης, ο συντελεστής θα είναι ίσος με  $(\beta \cdot q_m)^{-1}$ , ενώ ο συντελεστής θα είναι ίσος με  $1/q_m$ .

Η ισόθερμη του Langmuir βασίζεται σε δυο παραδοχές :

1. Στην επιφάνεια του στερεού προσροφητή υπάρχει ένας συγκεκριμένος αριθμός θέσεων προσρόφησης, οι οποίες είναι ενεργειακά ακριβώς ίδιες.

2. Η προσρόφηση είναι αντιστρεπτή διαδικασία και μάλιστα το φαινόμενο ευρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας όταν ο ρυθμός προσρόφησης γίνει ίσος με τον ρυθμό εκρόφησης. Ο ρυθμός του φαινομένου είναι ανάλογος της διαφοράς συγκέντρωσης μεταξύ της εν διαλύσει ουσίας και αυτής που έχει προσροφηθεί. Όταν αυτή η διαφορά γίνει μηδέν έχει επιτευχθεί ισορροπία. Τονίζεται ότι τυχόν συμφωνία πειραματικών δεδομένων με την ισόθερμη του Langmuir δεν σημαίνει απαραίτητα ότι αυτές οι δυο υποθέσεις δεν έχουν παραβιασθεί, διότι ενδέχεται οι διεργασίες που τις παραβιάζουν να έχουν αντίθετα αποτελέσματα ώστε η μια να αναιρεί την άλλη.

**Ισόθερμη Freundlich.** Το εμπειρικό μοντέλο του Freundlich για προσρόφηση πολλών μοριακών στρωμάτων έχει ως ακολούθως:

$$q = \frac{x}{m} = K C_e^{1/n}$$

όπου:

$q$  : συγκέντρωση προσροφημένης ουσίας (σε gr/gr) (ως πηλίκο της μάζας της ουσίας που έχει προσροφηθεί  $x$ , προς τη μάζα του στερεού προσροφητή  $m$ )

$C_e$  : συγκέντρωση ισορροπίας της ουσίας στο διάλυμα (σε gr/m<sup>3</sup>)

$K, n$ : σταθερές

Οι σταθερές  $K$  και  $n$  υπολογίζονται με βάση συγκεκριμένα δεδομένα για διαφορετικά διαλύματα και θερμοκρασίες. Για τον γραφικό υπολογισμό τους, χρησιμοποιείται η ακόλουθη λογαριθμική μορφή της ισόθερμης Freundlich:

$$\log_{10} q = (\log_{10} K) + \left(\frac{1}{n}\right) \log_{10} C_e$$

Στην ανωτέρω εξίσωση, η ισόθερμη του Freundlich έχει λάβει την γενική μορφή της γραμμικής συσχέτισης  $Y = a_0 + a_1 X$ , όπου η εξαρτημένη μεταβλητή  $Y$  ισούται με  $\log_{10} q$  και η ανεξάρτητη μεταβλητή  $X$  με  $\log_{10} C_e$ . Με υπολογισμό της εξίσωσης γραμμικής παλινδρόμησης, ο συντελεστής  $a_0$  θα είναι ίσος με  $\log_{10} K$  ενώ ο συντελεστής θα είναι ίσος με  $1/n$ .



## 6.6 Πρακτικές συνέπειες της αλληλεπίδρασης ρύπων – εδάφους

Σχετικά με την εξέλιξη της ρύπανσης στο υπόγειο νερό πρακτικά η αλληλεπίδραση μεταξύ των φάσεων είναι ότι για δεδομένη μάζα ρύπου, ένα ποσοστό μόνο θα παραμείνει στο υπόγειο νερό, ενώ το υπόλοιπο θα μοιραστεί, όπως περιγράφηκε παραπάνω, στην αέρια και στη στερεά φάση. Δηλαδή όσον αφορά την ποσότητα του ρύπου στο υπόγειο νερό, θα υπάρξει μια μείωση, ή υποβάθμιση, του ρυπαντικού φορτίου. Αυτό δεν σημαίνει ότι μειώθηκε απαραίτητα η συνολική ποσότητα του ρύπου στο υπέδαφος, αλλά ότι δεν βρίσκεται όλη στην υδατική φάση. Ιδιαίτερα όσον αφορά το φαινόμενο της εισρόφησης, παρόλο που ίσως φαίνεται ότι το έδαφος “κατακρατά” τους ρύπους, σε λίγες περιπτώσεις αυτή η “κατακράτηση” είναι μόνιμη. Εξαιρεση αποτελεί η χημική προσρόφηση που είναι σπάνια αναστρέψιμη. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, έτσι όπως η αύξηση της υδατικής συγκέντρωσης επιφέρει την αύξηση της συγκέντρωσης στη στερεά φάση(εισρόφηση), έτσι και η μείωση της συγκέντρωσης του ρύπου στην υδατική φάση έχει σαν αποτέλεσμα την ανάλογη μείωση της συγκέντρωσης στη στερεά φάση (εκρόφηση). Έτσι η εισρόφηση θεωρείται πιο πολύ ως μια “προσωρινή αποθήκευση”, παρά ως “μόνιμη εξαφάνιση”.

Για την ολοκληρωμένη μελέτη της εξέλιξης της ρύπανσης στο υπόγειο νερό, πρέπει παράλληλα με τα φαινόμενα της αλληλεπίδρασης ρύπων-εδάφους να ληφθούν υπόψη και οι χημικές και βιολογικές αντιδράσεις που συντελούν στη μεταβολή της συγκέντρωσης των ρύπων στο υπόγειο νερό κατά την κίνησή του διαμέσου των εδαφικών πόρων. Αυτές οι αντιδράσεις ανήκουν στις ακόλουθες κατηγορίες:

1. Αντιδράσεις τύπου οξέως-βάσεως (acid-base)
2. Αντιδράσεις τύπου διάλυσης-καθίζησης (solution-precipitation)
3. Αντιδράσεις τύπου οξειδωσης-αναγωγής (oxidation-reduction)
4. Αντιδράσεις τύπου ζεύξης ή σύζευξης ιόντων (ion pairing-complexation)
5. Αντιδράσεις τύπου μικροβιακής κυτταρικής σύνθεσης (microbial cell synthesis)
6. Αντιδράσεις ραδιενεργού απομείωσης (radio-active decay)

Οι διεργασίες αυτές δεν εξαρτώνται απαραίτητα από την παρουσία των εδαφικών κόκκων και συνεπώς λαμβάνουν χώρα και στα επιφανειακά ύδατα. Παραδείγματα τέτοιων μηχανισμών είναι η υδρόλυση, η

βιοχημική οξείδωση των οργανικών ρύπων, η νιτροποίηση του αμμωνιακού αζώτου, η αναγωγή των θεικών ιόντων προς υδρόθειο, η πυρηνική διάσπαση των ραδιενεργών ισοτόπων κλπ. Για την ποσοτική περιγραφή του ρυπαντικού φορτίου του υπόγειου νερού ορίζεται η *συγκέντρωση (C)* του ρύπου στο υπόγειο νερό ως η μάζα του ρύπου που περιέχεται στη μονάδα του όγκου του νερού των πόρων. Επίσης ορίζεται η ειδική μάζα (*m*) ως η μάζα του ρύπου που περιέχεται στη μονάδα όγκου του εδάφους. Οι δυο αυτές ποσότητες σχετίζονται ως εξής:

$$m = C S_w n$$

όπου  $S_w$  ο βαθμός κορεσμού του εδάφους και  $n$  είναι το ενεργό πορώδες του εδάφους. Στην περίπτωση που ο ρύπος είναι *συντηρητικός*, δηλαδή δεν εισροφάται στην επιφάνεια των εδαφικών κόκκων αλλά ούτε και υποβαθμίζεται με κάποιον άλλο τρόπο (π.χ. μέσω χημικών ή βιολογικών αντιδράσεων), παρακολουθεί τη κίνηση του υπόγειου νερού και μεταφέρεται στα κατάντη προκαλώντας επέκταση της ρύπανσης. Αντίθετα, στην περίπτωση μη συντηρητικών ρύπων:

1. η συνολική μάζα του ρύπου μειώνεται λόγω των διαδικασιών υποβάθμισης, και
2. η μέση ταχύτητα κίνησης του ρύπου είναι μικρότερη από τη μέση ταχύτητα μεταγωγής του υπόγειου νερού, με συνέπεια να προκαλείται καθυστέρηση στην επέκταση της ρύπανσης.

Η μεταβολή (μείωση) της ειδικής μάζας του ρύπου λόγω των διαδικασιών υποβάθμισης συνήθως περιγράφεται με τη σχέση:

$$- (dm / dt) = f + \lambda m$$

όπου:

*f*: γνωστή συνάρτηση απομείωσης της μάζας του ρύπου (ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα όγκου του εδάφους) λόγω χημικών ή βιολογικών αντιδράσεων. Εάν η τιμή της *f* είναι σταθερή, ονομάζεται *σταθερός συντελεστής διασπάσεως*. Ο συντελεστής αυτός περιγράφει τη διάσπαση ρύπων των οποίων ο ρυθμός υποβάθμισης είναι σταθερός (δηλαδή π.χ. ανεξάρτητος της συγκέντρωσης του ρύπου).

*λ*: ο συντελεστής γραμμικής διασπάσεως που χρησιμεύει στην περιγραφή της απομείωσης της μάζας του ρύπου λόγω πυρηνικών ή βιοχημικών αντιδράσεων των οποίων ο ρυθμός εξέλιξης είναι ανάλογος της εκάστοτε μάζας του ρύπου. Ο προσδιορισμός της τιμής του *λ* γίνεται μέσω του *χρόνου ημιζωής*, δηλαδή του χρόνου που απαιτείται για τον υποδιπλασιασμό της μάζας του ρύπου. Συγκεκριμένα:

$$dm / dt = - \lambda m \Rightarrow m = m_0 e^{-\lambda t}$$

και

$$m_0/2 = m_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \lambda = 0.693/t_0$$

όπου  $t_0$  είναι ο χρόνος ημιζωής του ρύπου.

Η βαθμιαία υποβάθμιση του ρυπαντικού φορτίου κατά την κίνηση των ρύπων διαμέσου των εδαφικών πόρων εκφράζεται και μέσω μιας καθυστέρησης στην επέκταση της ρύπανσης, δηλαδή στη μεταφορά των ρύπων με μέση ταχύτητα  $v'$  μικρότερη από τη μέση ταχύτητα  $v$  της μεταγωγής του υπόγειου νερού που τους παρασύρει. Η σχέση μεταξύ των δυο ταχυτήτων είναι :

$$v = \frac{v'}{R_d}$$

όπου ο συντελεστής  $R_d$  ( $\geq 1$ ) ονομάζεται *συντελεστής υστερήσεως*. Στην περίπτωση υποβάθμισης του ρυπαντικού φορτίου μέσω εισρόφησης του ρύπου στην επιφάνεια των εδαφικών κόκκων, η τιμή του  $R_d$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_d = 1 + \frac{\rho_d}{\eta} \left( \frac{dS}{dC} \right)$$

όπου  $\rho_d$  η ξηρή πυκνότητα του εδάφους,  $n$  το πορώδες,  $C$  η συγκέντρωση του ρύπου στο υπόγειο νερό και  $S$  η προσροφημένη ειδική μάζα, δηλαδή η μάζα του εισροφημένου ρύπου ανά μονάδα μάζας του εδάφους. Έτσι, ο όρος  $(dS / dC)$  εκφράζει το ρυθμό εξέλιξης του μηχανισμού εισρόφησης συναρτήσει της συγκέντρωσης του ρύπου στο υπόγειο νερό. Συχνά ο όρος  $(dS / dC)$  θεωρείται σταθερός, οπότε ονομάζεται *συντελεστής διαχωρισμού* και συμβολίζεται με  $K_p$ . Σε αυτήν την περίπτωση:

$$R_d = 1 + \frac{\rho_d}{\eta} K_p$$

Εάν η τιμή του  $K_p$  είναι μηδέν, τότε δεν παρουσιάζεται υστέρηση και η ρύπανση διαδίδεται προς τα κατάντη με μέση ταχύτητα ίση με τη μέση ταχύτητα μεταγωγής του υπόγειου νερού. (6)

## 7.Μέθοδοι Απορρύπανσης

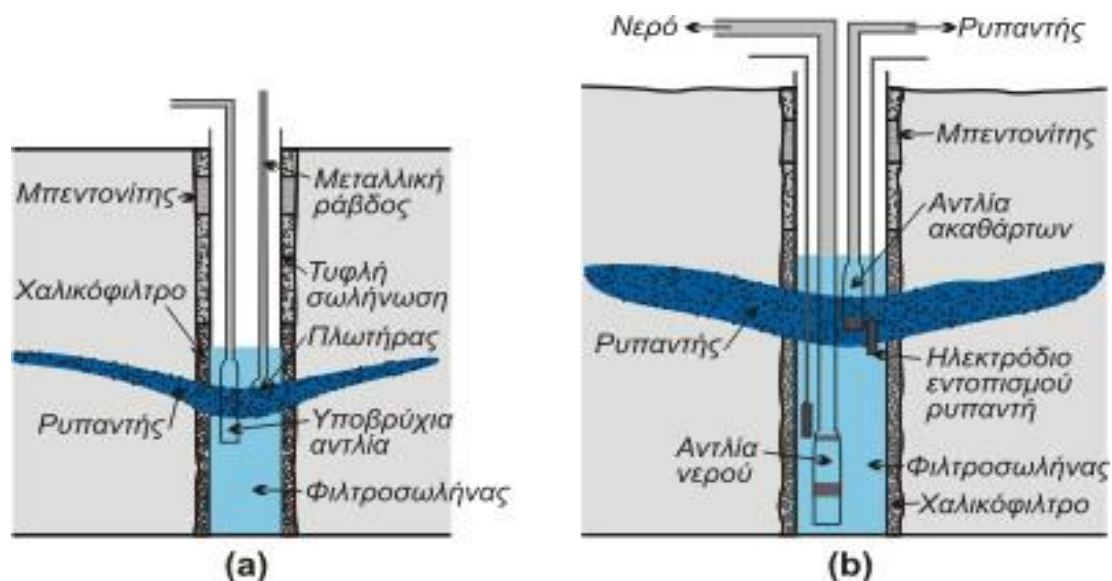
### 7.1.Γενικά

Οι μέθοδοι απορρύπανσης περιλαμβάνουν την απομάκρυνση των ρυπαντών ή την επεξεργασία των ρύπων επιτόπου και αναφέρονται σαν μέθοδοι ενεργητικής απορρύπανσης.

Οι κυριότερες μέθοδοι απορρύπανσης είναι οι κάτωθι: (14) (11)

#### 7.1.1. Η μέθοδος άντλησης και απορρύπανσης διαλυμένων ρυπαντών (pump and treat)

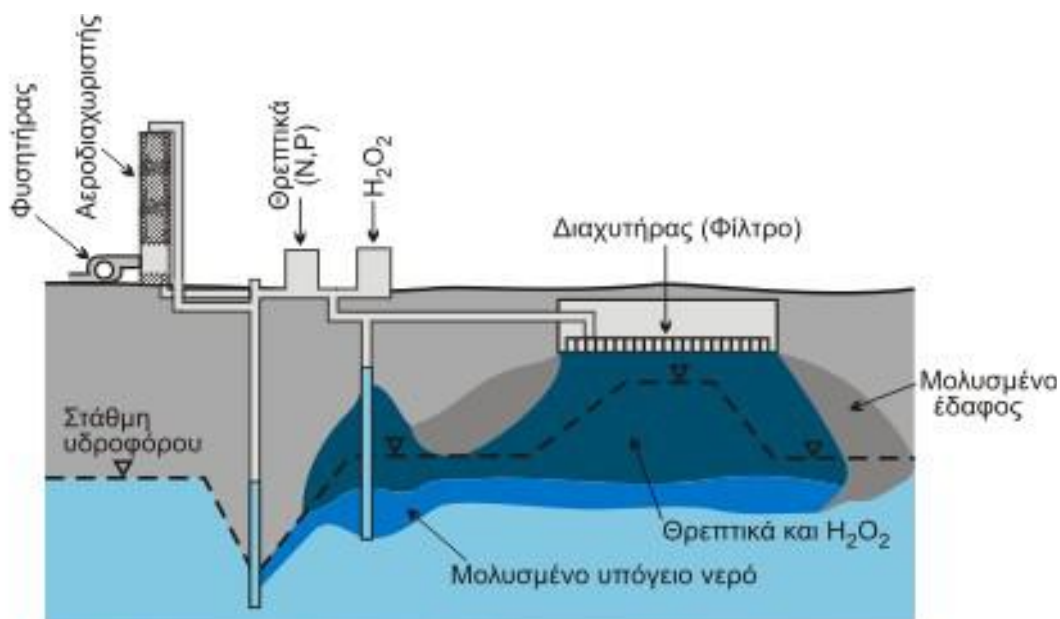
Με την μεθόδου αυτή στην περίπτωση διαλυμένων ρυπαντών που αναμειγνύονται με το υπόγειο νερό, γίνεται άντληση του υπόγειου νερού με σύστημα γεωτρήσεων και έπειτα οδηγείται σε μονάδα επεξεργασίας. Μετά την επεξεργασία είναι δυνατή η επανεισαγωγή του επεξεργασμένου νερού στον υδροφόρο, η διάθεση στο έδαφος ή η διοχέτευσή του σε γειτονικό υδρόρευμα. Η βέλτιστη απόσταση των γεωτρήσεων απορρύπανσης είναι συνάρτηση της ταχύτητας ροής του υπόγειου νερού, του πάχους του υδροφόρου, του συνολικού αριθμού γεωτρήσεων και της παροχής άντλησης καθεμιάς εξ' αυτών. Ο συνδυασμός γεωτρήσεων άντλησης-έκχυσης δίνει καλύτερα αποτελέσματα, ιδιαίτερα όταν διατάσσονται κατάλληλα (Σχ. 7.1). Η πλέον αποτελεσματική διάταξη είναι αυτή στην οποία υπάρχουν δύο γεωτρήσεις άντλησης και μία γεώτρηση έκχυσης στο μέσο των δύο πρώτων, όλες σε ευθεία γραμμή.



Σχ.7.1.Συστήματα “άντλησης-επεξεργασίας” για την ανάκτηση NAPL: (a) Απλή γεώτρηση, μία αντλία, (b) απλή γεώτρηση, ζεύγος αντλιών

### 7.1.2. Αεροδιαχωρισμός (air stripping)

Η μέθοδος του αεροδιαχωρισμού εφαρμόζεται στην περίπτωση των επιπλεόντων πτητικών ρυπαντών (βενζίνη, πτητικοί υδρογονάνθρακες κτλ.). Στον αεροδιαχωριστή προκαλείται εξάτμιση των πτητικών ουσιών σύμφωνα με τον νόμο του Henry, λόγω διαβίβασης αέρα από φυσητήρα (Σχ. 7.2). Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μεταφορά της ρύπανσης στην ατμόσφαιρα.



Σχ.7.2: Μέθοδος βιοαποκατάστασης με αεροδιαχωρισμό. (14)

### 7.1.3. Αεροδιασπορά (air sparging).

Κατά την αεροδιασπορά ο ρυπαντής εξαερώνεται μετά από διαβίβαση αέρα από αεροσυμπιεστή. Η διαβίβαση αέρα γίνεται μέσα από κατακόρυφο σωλήνα στην κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη. Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ταυτόχρονη απορρύπανση τόσο της κορεσμένης όσο και της ακόρεστης ζώνης.

### 7.1.4. Η βιολογική αποκατάσταση (bio-remediation)

Η βιολογική αποκατάσταση ανήκει στις μη συμβατικές τεχνικές επεξεργασίας που εφαρμόζονται επιτόπου. Στηρίζεται στην αποδόμηση των οργανικών ουσιών με τη δράση μικροοργανισμών. Βασικό κριτήριο για την εφαρμογή της μεθόδου αποτελεί η επιδεκτικότητα του ρυπαντή στη βιοδιάσπαση από τους μικροοργανισμούς που εισάγονται στη θέση της ρύπανσης. Η δράση των μικροοργανισμών εξαρτάται από το είδος και την πυκνότητα της μικροβιακής κοινότητας, καθώς και από τις

συνθήκες που ευνοούν ή αναστέλλουν την ανάπτυξή τους όπως pH, θερμοκρασία κτλ.

Η βιοαποκατάσταση εφαρμόζεται σήμερα στην απορρύπανση των υδρογονανθράκων. Το τελικό προϊόν είναι ανόργανες ουσίες όπως CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, νιτρικά και θειικά άλατα. Για να γίνει αερόβια αποσύνθεση διαβιβάζεται αέρας, μέσω βαθιών γεωτρήσεων. Η μέθοδος έχει μικρό κόστος και για να είναι αποτελεσματικότερη χρησιμοποιείται συνδυαστικά και με άλλες μεθόδους απορρύπανσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται η τεχνητή δημιουργία συνθηκών που θα εξασφαλίσουν τα απαραίτητα υλικά για τροφή και παροχή ενέργειας στους μικροοργανισμούς (μηχανική βιοαποκατάσταση). Αν η βιοαποκατάσταση γίνεται χωρίς την παρέμβαση του ανθρώπου ονομάζεται ειδική βιοαποκατάσταση. Η μηχανική βιοαποκατάσταση είναι ταχύτερη από την ειδική.

Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η πιθανή απόφραξη των γεωτρήσεων από τη συγκέντρωση των μικροοργανισμών σε μια θέση. Για την αντιμετώπιση της απόφραξης χρησιμοποιούνται πρωτόζωα, τα οποία καταστρέφουν τα βακτήρια ή γίνεται χρήση υπεροξειδίου του υδρογόνου αντί οξυγόνου.

#### **7.1.5. Η μέθοδος άντλησης επιπλέοντων ρυπαντών**

Η απορρύπανση από επιπλέοντες ρυπαντές γίνεται με το σύστημα της διπλής άντλησης του επιπλέοντος ρυπαντή. Αρχικά γίνεται άντληση υπόγειου νερού, οπότε διαμορφώνεται ένας κώνος κατάπτωσης. Ο ρυπαντής λόγω υδραυλικής κλίσης κινείται προς τη γεώτρηση, απ' όπου γίνεται άντλησή του με δεύτερη αντλία (Σχ. 7.2). Η πτώση της στάθμης πρέπει να γίνεται με τρόπο ώστε να μην ρυπανθεί ο υδροφορέας σε όλο το πάχος του.

#### **7.1.6. Αφαίρεση βαρέων μετάλλων με εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος**

Τα βαρέα μέταλλα απομακρύνονται κυρίως με την προσρόφηση των ιόντων τους στην επιφάνεια των αργιλικών ορυκτών (φυσική απορρύπανση). Επιπλέον για την αφαίρεση βαρέων μετάλλων εφαρμόζεται τάση μέσω ηλεκτροδίων και τα ιόντα των μετάλλων συλλέγονται στην άνοδο.

Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι κυριότερες μέθοδοι και τεχνικές απορρύπανσης των υδροφόρων και του εδάφους.

**Πίν.7.1:** Κυριότερες μέθοδοι και τεχνικές απορρύπανσης των υδροφόρων και του εδάφους (14).

α/α	Τεχνική	Στόχος –Περιγραφή
1	Έλεγχος της πηγής ρύπανσης με μείωση του όγκου του ρυπαντή και φυσική χημική εξουδετέρωσή του.	-Ελαχιστοποίηση ή πρόληψη της ρύπανσης των υδροφόρων. -Μείωση του όγκου του ρυπαντή ή εξουδετέρωση του φυσικού ή χημικού του χαρακτήρα.
2	Συστήματα υδρογεωτρήσεων: -Συστοιχίες ρηχών γεωτρήσεων - Βαθιές γεωτρήσεις -Υδραυλικός φραγμός -Σύνθετα συστήματα -Συστήματα αφαίρεσης μη αντιδρώντων ρυπαντών (υδρογονάνθρακες).	-Έλεγχος της υδραυλικής κλίσης και μέσω αυτής της υπόγειας ροής με άντληση ή έκχυση νερού. -Απόληψη του μολυσμένου νερού ή/και του επιπλέοντος ρυπαντή (υδρογονάνθρακες).
3	Συστήματα σύλληψης: -Στραγγιστήρια (συλλεκτήρια συστήματα στραγγιδιών-στραγγιστήρια εκτόνωσης) -Τάφος συλλογής με άντληση ή με βαρυτική ροή.	Τα συστήματα σύλληψης, είναι εκσκαφές στην κορεσμένη ζώνη, εξοπλισμένες με σωλήνα. Η εκσκαφή μπορεί να είναι ανοιχτή ή πληρωμένη με χαλίκι, πάνω από τον σωλήνα. Οι ανοιχτές εκσκαφές μπορεί να είναι ενεργές (άντληση) ή παθητικές (βαρυτική ροή). Προσομοιώνονται με συστοιχίες γεωτρήσεων άντλησης, που δημιουργούν έναν εκτεταμένο κώνο κατάπτωσης σε όλο το μήκος της εκσκαφής.
4	Έλεγχος των επιφανειακών νερών (φυσική εξουδετέρωση, επένδυση, αποχέτευση και συνδυασμός).	Ελαχιστοποίηση των αφίξεων επιφανειακών νερών και της κατείδυσης, μέσω αποχέτευσης, επένδυσης-στεγανοποίησης ή/και εξουδετέρωση του ρυπαντή με προσρόφηση.
5	Φραγμοί (στεγανοί): -πασσαλοσανίδες -κουρτίνες στεγανοποίησης -διαφράγματα από υδαρές υλικό.	Διοχέτευση υλικού μικρής υδροπερατότητας στο υπέδαφος, όπως πασσαλοσανίδες (άμεση στεγανοποίηση), τσιμεντενέσεις.
6	Επιτόπια επεξεργασία: -Χημική -Βιολογική	Εισαγωγή στο υπέδαφος υλικών που προκαλούν ή ενισχύουν το ρυθμό των χημικών αντιδράσεων, που ακινητοποιούν ή απομακρύνουν το ρυπαντή ή

		δημιουργούν περιβάλλον ευνοϊκό για την ανάπτυξη μικροοργανισμών, που χρησιμοποιούν το ρυπαντή ως πηγή ενέργειας.
7	Επεξεργασία του υπόγειου νερού στην επιφάνεια ή στο υπέδαφος.	Αερο-διαχωρισμός οργανικών ρυπαντών, αερο-διασπορά, βιοαπορρύπανση, προσρόφηση από ενεργό άνθρακα. Για την αφαίρεση των μετάλλων και των ανόργανων ρυπαντών χρησιμοποιείται η χημική καθίζηση.

## 7.2.Απορρύπανση Ακόρεστης Ζώνης

Για την απορρύπανση της ακόρεστης ζώνης του εδάφους εφαρμόζονται οι εξής τεχνικές:

### - Μέθοδοι βιολογικής απορρύπανσης

Γίνεται αποδόμηση με τη δράση βακτηρίων και μυκήτων. Ο ρυθμός της βιολογικής διάσπασης ακολουθεί τον εκθετικό νόμο:

$$C=C_0 e^{-at}$$

όπου:

C: η συγκέντρωση μετά χρόνο t, C<sub>0</sub>: η αρχική συγκέντρωση και a: η σταθερά διάσπασης. Η σταθερά a ισούται με  $a=0,693/t(1/2)$ , όπου t(1/2) είναι ο χρόνος ημιζωής.

### - Θερμική επεξεργασία του εδάφους

Η επεξεργασία γίνεται σε κλιβάνους ή με διοχέτευση υπέρθερμου ατμού στο έδαφος για την εξάτμιση των πτητικών ρυπαντών. Η αφαίρεση των πτητικών ουσιών από το έδαφος μπορεί να επιτευχθεί και με την ανόρυξη γεωτρήσεων εκτόνωσης, αλλά στην περίπτωση αυτή ρυπαίνεται η ατμόσφαιρα.

### - Χημική επεξεργασία



Χρησιμοποιείται νερό με πίεση που περιέχει απορρυπαντικά, οξέα ή βάσεις.

#### **- Εφαρμογή υπό πίεση αέρα**

Αέρας υπό πίεση διοχετεύεται σε σύστημα γεωτρήσεων εντός της μερικώς κορεσμένης ζώνης και εφαρμόζεται αναρρόφηση ώστε να εξατμισθούν οι πτητικοί υδρογονάνθρακες. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε εδάφη με αδρομερή υλικά όπως χάλικες επειδή στα λεπτόκοκκα εδάφη η εφαρμογή υποπίεσης είναι δύσκολο να επιτευχθεί σε μεγάλη ακτίνα γύρω από τη γεώτρηση. Η εφαρμογή υποπίεσης δεν μπορεί να γίνει κάτω από τη στάθμη του υπόγειου νερού, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται μόνο η επιφάνεια του υδροφορέα. Για το λόγο αυτό η μέθοδος εφαρμόζεται για την απορρύπανση από επιπλέοντες πτητικούς ρυπαντές.

Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ταυτόχρονη απορρύπανση τόσο της μερικά κορεσμένης ζώνης, όσο και των επιπλεόντων ρυπαντών. Απαιτείται απομόνωση της μερικά κορεσμένης ζώνης από τον ατμοσφαιρικό αέρα, ώστε να είναι αποδοτική η εφαρμογή της αναρρόφησης, κάτι που γίνεται με την κάλυψη του εδάφους με συνθετική μεμβράνη.

#### **- Έκπλυση του εδάφους**

Η αφαίρεση του ρύπου γίνεται με κατάκλυση του εδάφους με νερό. Παράλληλα γίνεται χρήση επιφανειοδραστικών ουσιών.

#### **- Εκσκαφή του εδάφους**

Το ρυπασμένο έδαφος αφαιρείται και μεταφέρεται σε άλλη περιοχή για απόθεση ή ενταφιασμό μετά από επεξεργασία. Η επεξεργασία του ρυπασμένου εδάφους μπορεί να γίνει και επιτόπου. Η επαναπλήρωση της εκσκαφής γίνεται με το επεξεργασμένο εδαφικό υλικό ή από άλλο καθαρό υλικό που έχει μεταφερθεί από αλλού.

#### **-Εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων**

Για την εξαέρωση πτητικών υδρογονανθράκων εφαρμόζεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υψηλής συχνότητας. Η εξαέρωση επιτυγχάνεται από τη θέρμανση του εδάφους σε θερμοκρασίες κοντά στους 150°C για χρονικό διάστημα δύο εβδομάδων. (15)

## **8. Προστασία από Ρύπανση**

Παρακάτω αναφέρονται μερικές μέθοδοι που εφαρμόζονται για την αποτροπή της επέκτασης της ρύπανσης στο έδαφος.

### **8.1. Συστήματα Κάλυψης**

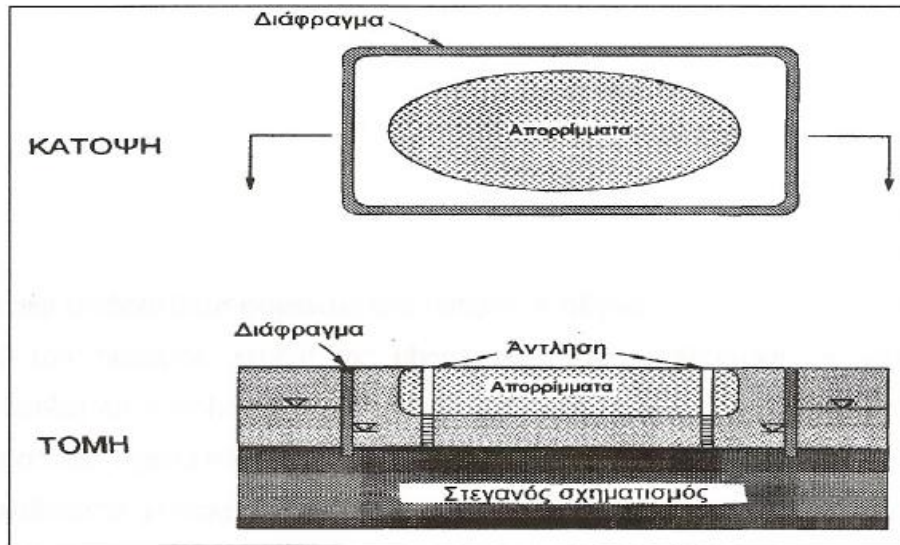
Πραγματοποιείται κάλυψη της επιφάνειας εδαφών που έχουν ρυπανθεί, με ασφαλτικά υλικά, σκυρόδεμα ή και απλό έδαφος. Το πάχος της κάλυψης πρέπει να είναι αρκετό έτσι ώστε οι ρίζες των φυτών που θα φυτρώσουν να μην εισέρχονται στο ρυπασμένο στρώμα και να μην υπάρχει κίνδυνος αποκάλυψης του στρώματος αυτού σε περίπτωση εκσκαφών για τεχνικά έργα. Ακόμη είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι διακυμάνσεις του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Η λύση είναι απλή και φτηνή αλλά προσωρινή.

### **8.2. Κατακόρυφα περιμετρικά διαφράγματα**

Πραγματοποιείται κατασκευή περιμετρικών διαφραγμάτων για απομόνωση του εδάφους που έχει ρυπανθεί. Διακρίνονται οι παρακάτω τύποι διαφραγμάτων:

- Συμβατικά διαφράγματα: τμηματική εκσκαφή και αφαίρεση εδαφικού υλικού. Πλήρωση με μίγμα μπετονίτη – τσιμέντου.
- Σύστημα αλληλοτεμνόμενων πασσάλων από σκυρόδεμα (εφαπτόμενοι φρεατοπάσσαλοι).
- Σύστημα προκατασκευασμένων μεταλλικών πασσαλοσανίδων
- Διάφραγμα τσιμεντενέσεων με εισπίαση ενέματος υπό υψηλή πίεση ή ανάμιξη εδαφικού υλικού με τσιμεντένεμα

Ακόμη μπορεί να εφαρμοστεί και παρεμπόδιση επέκτασης της ρύπανσης με πήξη μέσω ψύξης του υπόγειου νερού ως προσωρινό μέτρο. Σχηματικά τα περιμετρικά διαφράγματα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ.8.1. Κατακόρυφα περιμετρικά διαφράγματα

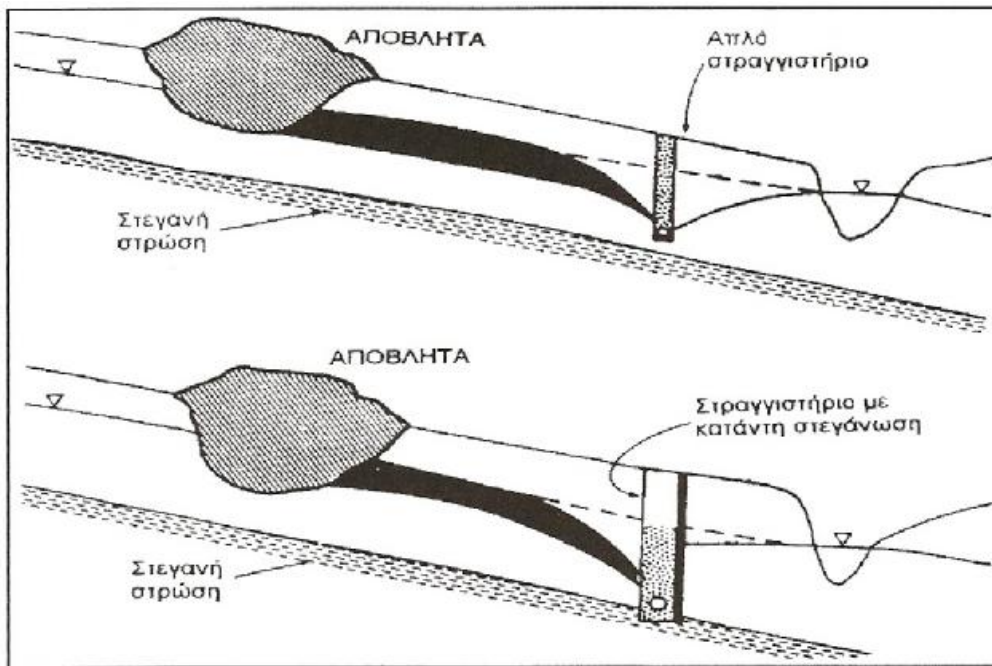
Συχνά χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικά στα κατακόρυφα διαφράγματα και οριζόντια διαφράγματα βάσης. Η κατασκευή γίνεται σε περίπτωση απουσίας κάποιας στεγανής στρώσης σε λογικό βάθος. Ωστόσο, τα οριζόντια διαφράγματα βάσης παρουσιάζουν δυσκολία στην κατασκευή, ανεπαρκή στεγάνωση και υψηλό κόστος. Μια συνήθης μέθοδος κατασκευής τους είναι να γίνουν ως διαφράγματα τσιμεντενέσεων με εισπίαση ενέματος υπό υψηλή πίεση.

### 8.3. Σταθεροποίηση του εδάφους

Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον περιορισμό της επέκτασης της ρύπανσης είναι η ανάμιξη του εδάφους με κάποιο υλικό ώστε το μίγμα να αποκτά μηχανική αντοχή (στερεοποιείται) και μικρή διαπερατότητα. Έτσι ακινητοποιείται το ρυπαντικό φορτίο μέσα στη στερεοποιημένη εδαφική μάζα. Σε περίπτωση ατελούς σταθεροποίησης, το σταθεροποιημένο έδαφος συγκρατεί και το ασταθές. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται έτσι είναι τσιμέντο, πουζολάνες, αμίαντος και διάφορα ασφαλτικά υλικά και πολυμερή.

### 8.4. Υδραυλικά συστήματα

Στόχος των υδραυλικών συστημάτων είναι η μεταβολή της κίνησης του υπόγειου νερού μέσω τροποποίησης της πιεζομετρίας. Γίνονται εκτεταμένες αντλήσεις σε κάποια περιοχή ενώ κατασκευάζεται επίμηκες στραγγιστήριο μεταξύ της πηγής ρύπανσης και του σημείου εκμετάλλευσης του υπόγειου νερού. Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ.8.2. Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου με Υδραυλικά συστήματα.

(2) (4)

## 9. Θεσμικά Πλαίσια

Η διάθεση αποβλήτων στο έδαφος πρέπει να είναι ελεγχόμενη ώστε ο ρυθμός αδρανοποίησης των ρύπων να γίνεται μέγιστος με αποτέλεσμα η ρύπανση του υπεδάφους να είναι η ελάχιστη δυνατή. Για τον λόγο αυτό έχουν θεσπιστεί κάποια θεσμικά πλαίσια και έχουν καθοριστεί όρια για κάθε τύπο ρύπανσης.

### 9.1. Θεσμικά πλαίσια

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση έχουν θεσπιστεί Οδηγίες για την διάθεση των αποβλήτων, την ρύπανση εδαφών κτλ. Στην Ελλάδα η εφαρμογή αυτών των οδηγιών είναι υποχρεωτική. Σχετικά με τον τύπο των αποβλήτων διακρίνουμε τις Οδηγίες σε:

1.Οδηγίες σχετικά με την ρύπανση υπογείων υδάτων:

- 80/68/EEC : Σχετικά με την προστασία του υπόγειου νερού έναντι συγκεκριμένων ρύπων
- 2000/60/EC : Ενεργοποίηση ενός μεγάλου αριθμού κοινοτικών οδηγιών για τα υπόγεια νερά, με στόχο να συμπληρωθούν ή να αντικατασταθούν ώστε να δημιουργηθεί ένα πλαίσιο δράσης για τα υπόγεια νερά.

## 2.Οδηγίες για την διάθεση και διαχείριση αποβλήτων:

- 75/442/EEC : γενικό πλαίσιο για διάθεση αποβλήτων. Απαιτούνται άδειες από όλες τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας, αποθήκευσης και απόθεσης στερεών αποβλήτων.
- 91/689/EEC : Διαχείριση τοξικών αποβλήτων
- 96/61/EC : Εκπομπές ρύπων από βιομηχανικές και βιοτεχνικές μονάδες
- 99/31/EC : Κατασκευή, λειτουργία και αποκατάσταση ΧΥΤΑ

## 3.Οδηγίες για διάθεση ειδικών κατηγοριών αποβλήτων:

- 75/439/EEC : Διάθεση πετρελαϊκών αποβλήτων
- 78/176/EEC : Διάθεση αποβλήτων βιομηχανίας  $TiO_2$
- 82/883/EEC : Προσομοίωση περιοχών διάθεσης  $TiO_2$
- 83/29/EEC : Αναδιατύπωση της 78/176/ EEC
- 86/278/EEC : Περί χρήσης αστικών λυμάτων στη γεωργία
- 87/217/EEC : Προστασία και διάθεση αμιάντου
- 89/428/EEC : Εναρμονισμός διάθεσης  $TiO_2$
- 96/59/EC : Διάθεση πολυχλωριούχων υδρογονανθράκων

## 4.Οδηγίες σχετικές με Ραδιενεργά κατάλοιπα:

- 75/406/Euroatom : Διαχείριση και αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων
- 82/74/Euroatom : Αποθήκευση και επανεπεξεργασία απεμπλουτισμένων πυρηνικών αποβλήτων
- 89/664/Euroatom : Αποδοχή συγκεκριμένης πολιτικής στην έρευνα και τεχνολογία για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων

## Στην Ελλάδα ισχύουν ακόμα κάποιες ειδικές διατάξεις:

- Νόμος 1650/1986 : Νόμος για την προστασία του περιβάλλοντος
- Κοινή υπουργική απόφαση 26857/553/1988 : Μέτρα και περιορισμοί για την προστασία των υπόγειων υδάτων από απόρριψη ορισμένων επικίνδυνων ουσιών
- Κοινή υπουργική απόφαση 16396/1546/1997 : Εφαρμογή της 91/689/EC στη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων
- Κοινή υπουργική απόφαση 114218/1997 : προδιαγραφές προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων (διατάξεις ΧΥΤΑ)
- Κοινή υπουργική απόφαση 29407/3508/2002 : Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή αποβλήτων με προσαρμογή κοινοτικών νομοθεσιών.

## 9.2. Όρια Ρύπανσης

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση ο έλεγχος ρύπανσης με τον καθορισμό ορίων γίνεται με την επιβολή Στόχων Ποιότητας του Περιβάλλοντος. Λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ρύπανσης στη χρήση που γίνεται στο έδαφος και στο υπόγειο νερό και με επιβολή Ορίων Καθορισμού Ποιότητας του Περιβάλλοντος καθορίζονται οι μέγιστες αποδεκτές συγκεντρώσεις διαφόρων ρύπων οι οποίες καθορίζονται από την κάθε χώρα χωριστά.

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση υπάρχουν δυο κατηγορίες ρύπων. Στην Κατηγορία 1 (Black list) ανήκουν οι πλέον τοξικοί ρύποι και στην Κατηγορία 2 (Grey list) οι λιγότερο τοξικοί.

Τοξικές Ρυπαντικές Ουσίες Κατηγορίας 1(Black list).

1. Οργανο-αλογόνες ουσίες και ουσίες που μπορούν να τις παράγουν
2. Ουσίες που περιέχουν οργανικό φώσφορο ή οργανικό κασσίτερο
3. Ουσίες που μπορούν να προκαλέσουν καρκινογενέσεις
4. Ουσίες που περιέχουν υδράργυρο ή κάδμιο
5. Ανθεκτικά ορυκτέλαια και ανθεκτικοί υδρογονάνθρακες πετρελαιοειδών
6. Ανθεκτικές συνθετικές ουσίες

Τοξικές Ρυπαντικές Ουσίες Κατηγορίας 2 (Grey list)

1. Τα μέταλλα: ψευδάργυρος, χαλκός, νικέλιο, χρώμιο, μόλυβδος, σελήνιο, αρσενικό, αντιμόνιο, μολυβδένιο, τιτάνιο, κασσίτερος, βάριο, βηρύλιο, βόριο, ουράνιο, βανάδιο, κοβάλτιο, θάλλιο, τελούριο, άργυρος.
2. Οργανικές ενώσεις των παραπάνω μετάλλων που δεν περιλαμβάνονται στην Κατηγορία 1
3. Ουσίες που μπορούν να επηρεάσουν δυσμενώς την γεύση ή την οσμή του υπόγειου νερού, σε περίπτωση που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για ύδρευση
4. Τοξικές ή ανθεκτικές οργανικές ενώσεις του πυριτίου που μπορούν να ανιχνευθούν στο υπόγειο νερό
5. Ανόργανες ενώσεις του φωσφόρου και καθαρός φώσφορος
6. Μη ανθεκτικά ορυκτέλαια και υδρογονάνθρακες πετρελαιοειδών
7. Κυανιούχα και φθοριούχες ενώσεις
8. Ουσίες που έχουν δυσμενείς επιδράσεις στην ισορροπία του οξυγόνου όπως αμμωνία, νιτρικά κτλ (16)

## **Βιβλιογραφία**

1. **Φάττα, Δ.** *Ανάπτυξη Μεθοδολογίας για την Εκτίμηση της Ρύπανσης των Υπόγειων Υδάτων σε Χώρους Απόρριψης Αποβλήτων.* Αθήνα : ΕΜΠ, 1998.
2. **Ι.Κουμαντάκη.** *Κεφάλαια Περιβαλλοντικής Υδρογεωλογίας.* Αθήνα : ΕΜΠ, 2000.
3. **Ε.Wilson.** *Υδρολογία.* s.l. : Εκδ. Μόσχος Γκιούρδας, 1977.
4. **Μπονάζούντας, Μ.** *Εδαφική Ρύπανση.* Αθήνα : s.n., 2004.
5. **Καλλέργης, Γ.Α.** *Εφαρμοσμένη- Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Τόμος Α.* s.l. : ΤΕΕ, 1999.
6. **Κώστας Βουδούρης, Λέκτορας Α.Π.Θ.** *ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ-ΟΡΟΛΟΓΙΑ.* Θεσ/κη : ΑΠΘ, Τμήμα Γεωλογίας.
7. **Ρήγας, Φώτης.** *Επιστήμη και Τεχνολογία Περιβάλλοντος.* Αθήνα : ΕΜΠ, 2004.
8. **Μηχ., Π.Σ. Κόλλια Πολτικός.** *Η Προστασία των Υπόγειων Υδάτων από την Ρύπανση.* s.l. : διατριβή ΕΜΠ. 1998.
9. **Ανδριανάκη Μαρία, Μηχ Περιβάλλοντος.** *Ελεγχόμενη Φυσική Αποκατάσταση Ρύπων στη Λεκάνη Απορροής του ποταμού Ευρώτα.* Χανιά : Πολυτεχνείο Κρήτης, 2007.

10. **Βασιλακιώτη, Γ.Σ.** *Μέθοδοι Ελέγχου Ρυπάνσεως Περιβάλλοντος.* Θεσ/κη : Εκδ. Ζήτη, 1986.
11. **Β.Αντωνόπουλος.** *Ποιότητα και Ρύπανση Υπόγειων Νερών.* Θεσ/κη : Εκδ. Ζήτη, 2001.
12. **Αδάμ, Κατερίνα.** *Όξινη Απορροή Μεταλλείων, Γένεση και Συνολική Θεώρηση των Μεθόδων Αντιμετώπισης.* s.l. : ΕΜΠ, 1993.
13. **R.A. Freeze, J.A. Cherry.** *Groundwater.* Prentice-Hall : Inc. Englewood Cliffs, 1979.
14. **Γ.Α.Καλλέργης.** *Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Τόμος Β.* s.l. : ΤΕΕ, 2000.
15. **Φιλίος, Επιμέλεια Ελλ. Έκδοσης Ανδρόνικος.** *Τεχνολογία Προστασίας Περιβάλλοντος.* s.l. : Ευρωπαϊκές Τεχνολογικές Εκδόσεις, 2003.
16. **Χ.Α.ΚΟΡΚΟΒΕΛΟΣ.** *Η Προστασία του Περιβάλλοντος στην Ευρωπαϊκή Ένωση.* s.l. : Εκδ. ΑΝΤ. Ν. ΣΑΚΚΟΥΛΑΣ, 1997.