

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΩΝ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ
ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ»**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:

ΝΙΩΡΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Α.Μ.:5070

ΚΑΡΑΦΩΤΙΑ ΙΩΑΝΝΑ Α.Μ.:5340

**Επιβλέπων Καθηγητής:
Πίκιος Κωνσταντίνος**

ΠΑΤΡΑ 2013

<u>Περιεχόμενα</u>	<u>ΣΕΛ.</u>
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	1
3. ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	2
4. ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	4
5. ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	4
6. ΑΝΑΓΚΕΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ ΣΕ ΝΕΡΟ.....	5
7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΗΣΕΩΝ ΝΕΡΟΥ.....	7
8.ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	8
8.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	8
8.2 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	11
8.2.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ.....	11
8.2.2 ΟΞΥΤΗΤΑ (pH).....	12
8.2.3 ΑΛΚΑΛΙΚΟΤΗΤΑ.....	13
8.2.4 ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	13
8.2.5 ΟΣΜΗ ΚΑΙ ΓΕΥΣΗ.....	16
8.2.6 ΧΡΩΜΑ.....	18
8.2.7 ΘΟΛΟΤΗΤΑ.....	19
8.2.8 ΑΛΑΤΑ-ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ.....	20
9 ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ.....	22
10. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ.....	29
11. ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ.....	33
11.1 ΡΥΠΑΝΣΗ ΚΑΙ ΜΟΛΥΝΣΗ.....	33
11.2 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ.....	34
11.3 ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ.....	36
11.3.1 Οικιακά λύματα (domestic sewage).....	36
11.3.2 Βιομηχανικά απόβλητα.....	38
11.3.3 Τοξικά απόβλητα.....	38

11.3.4 Αστικά απορρίμματα (municipal waste).....	39
11.3.5 Τα απόβλητα μεταλλευτικής δραστηριότητας (mining waste).....	39
11.3.6 Απόβλητα γεωργο-κτηνοτροφικής δραστηριότητας.....	40
11.3.7 Μόλυνση από νεκροταφεία.....	41
11.3.8 Ρύπανση από ραδιενεργές ουσίες.....	42
11.3.9 Ρύπανση από φυσικές διεργασίες.....	43
12 ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ.....	47
12Α. ΔΙΑΛΥΜΕΝΟΙ ΡΥΠΟΙ.....	47
12Α.1 ΜΕΤΑΦΟΡΑ-ΔΙΑΣΠΟΡΑ-ΔΙΑΧΥΣΗ.....	48
12Α.1.1 Μεταφορά.....	48
12Α.1.2 Μοριακή Διάχυση.....	49
12Α.1.3 Διασπορά.....	49
12Α.1.4 Υδροδυναμική διασπορά.....	51
12Α.1.5 Διάδοση δραστικών ρύπων.....	52
12Β. ΔΙΑΔΟΣΗ ΜΗ ΑΝΑΜΕΙΞΙΜΩΝ (ΜΗ ΔΙΑΛΥΜΕΝΩΝ) ΡΥΠΩΝ.....	52
13. ΕΔΑΦΟΣ.....	55
13.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	55
13.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	55
13.3. ΟΙ ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΑΙΤΙΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ....	57
14 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ.....	60
14.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	60
14.2 ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ.....	63
14.3 ΖΩΝΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	65
14.3.1 Ζώνη I ή Ζώνη Άμεσης Προστασίας.....	65
14.3.2 Ζώνη II ή Ελεγχόμενη Ζώνη.....	65
14.4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ.....	66
14.5 ΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	68

14.5.1 Φυσικές διεργασίες καθαρισμού.....	69
14.5.2 Ανθρωπογενείς διαδικασίες ελέγχου.....	70
14.5.3 Μέθοδοι επιτόπου εξυγίανσης.....	73
14.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ.....	75
14.6.1. Η μέθοδος άντλησης και απορρύπανσης διαλυμένων ρυπαντών (pump and treat).....	75
14.6.2. Αεροδιαχωρισμός (air stripping).....	76
14.6.3 Αεροδιασπορά (air sparging).....	77
14.6.3.1 Πλεονεκτήματα της θέρμανσης δι' ατμού αέρα.....	80
14.6.3.2 Μειονεκτήματα της θέρμανσης δι' ατμού αέρα.....	80
14.6.4. Η βιολογική αποκατάσταση (bio-remediation).....	81
14.6.4.1 Περιγραφή της μεθόδου.....	82
14.6.4.2 Μικρο-οργανισμοί και οργανικές ενώσεις.....	84
14.6.4.3 Θρεπτικές ουσίες (nutrients).....	86
14.6.4.4 Δέκτες ηλεκτρονίων.....	86
14.6.4.5 Υγρασία.....	87
14.6.4.6 Θερμοκρασία.....	87
14.6.4.7 pH.....	87
14.6.4.8 Τοξικότητα.....	88
14.6.5 Η μέθοδος άντλησης επιπλεόντων ρυπαντών.....	88
14.6.6 Μέθοδος εξυγίανσης με συγκλίνοντα φράγματα και διόδους.....	94
14.6.6.1 Περιγραφή των διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων.....	94
14.6.6.2 Περιγραφή συγκλινόντων φραγμάτων και διοδίων.....	94
14.6.6.3 Εύρεση βέλτιστης διάταξης των συγκλινόντων φραγμάτων και διοδίων.....	96
14.6.7 Αφαίρεση βαρέων μετάλλων με εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος	96
14.6.8 Φυτοεξυγίανση (Phytoremediation).....	96
14.6.8.1 Η επιτυχία της εξαρτάται κυρίως από τους παρακάτω παράγοντες.....	98

14.6.8.2 Τεχνικές της φυτοεξυγίανσης.....	99
14.6.8.3 Φυτοεξαγωγή-Phytoextraction.....	101
14.6.8.4 Φυτοδιάσπαση –Phytodegradation.....	101
14.6.8.5 Φυτοεξαέρωση –Phytovolatilization.....	101
14.6.8.6 Ριζοδιάσπαση-Rhizodegradation.....	102
14.6.8.7 Ριζοδιήθηση-Rhizofiltration.....	102
14.6.8.8 Φυτοσταθεροποίηση-phytostabilization.....	102
14.6.8.9 Συγκομιδή, επεξεργασία και διάθεση των φυτών.....	102
14.6.9 Απονίτρωση υπόγειων νερών.....	104
14.6.10 Περιορισμός της επέκτασης της ρύπανσης.....	108
14.6.10.1 Υδραυλικές μέθοδοι αναστροφής της κίνησης του υπόγειου νερού.....	108
14.6.10.2 Μέθοδος σταθεροποίησης του εδάφους (soil stabilization, solidification).....	108
14.6.10.3 Έπλυση του εδάφους.....	111
14.6.10.4 Εκσκαφή του εδάφους.....	111
14.6.10.5 Εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	111
15. Ο ΑΣΩΠΙΟΣ Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ.....	111
15.1 ΤΑ ΑΙΤΙΑ ΜΟΛΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΑΣΩΠΙΟΥ.....	112
15.2 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ.....	114
15.3 ΛΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	116
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	119
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	122

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια η ρύπανση του περιβάλλοντος εξαιτίας της μεγάλης τεχνολογικής προόδου και της ραγδαίας βιομηχανικής ανάπτυξης έχει πάρει επικίνδυνες και σε πολλές περιπτώσεις, καταστροφικές διαστάσεις για τον πλανήτη μας. Η ρύπανση του περιβάλλοντος είναι ένα θέμα που απασχόλησε και συνεχίζει να απασχολεί όλο και περισσότερο τους επιστήμονες ανά τον κόσμο, ιδιαίτερα στις μέρες μας.

Η ρύπανση του εδάφους με τοξικές ουσίες ή βιομηχανικά απόβλητα μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων ή άλλων τοξικών ουσιών στα υπόγεια νερά τα οποία είναι πολύ ευαίσθητα στη ρύπανση και έχουν περιορισμένη ικανότητα αυτοκαθαρισμού. Η κατάληξη αστικών λυμάτων, ξεπλυμάτων εδάφους από εντατική χρήση χημικών λιπασμάτων, αλλά και κτηνοτροφικών αποβλήτων στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα έχει ως κύριο αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών αλάτων. Εξαιτίας αυτής της ρύπανσης, τα υπόγεια νερά γίνονται επικίνδυνα για τον άνθρωπο και τους ζωικούς οργανισμούς. Για τους παραπάνω λόγους πρέπει να γίνουν γνωστές σε όλους οι μέθοδοι απορρύπανσης και προστασίας των ρυπασμένων εδαφών και υδάτων.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία γίνεται μια συνοπτική αναφορά στο νερό και τις ιδιότητές του. Παρουσιάζονται οι ανάγκες του ανθρώπου σε νερό, οι χρήσεις του καθώς και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά αυτού. Εκτενής αναφορά γίνεται στις πηγές αλλά και στους μηχανισμούς ρύπανσης.

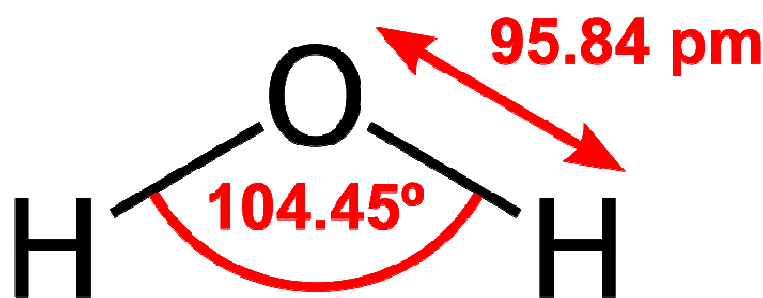
Τέλος αναφέρονται οι τεχνολογίες απορρύπανσης και προστασίας των ρυπασμένων εδαφών, όπως η μέθοδος της Βιολογικής Αποκατάστασης και η τεχνολογία της Φυτοεξυγίανσης. Παρατίθενται νέες μέθοδοι προστασίας των υπόγειων υδάτων όπως η τεχνολογία Air sparging και η μέθοδος εξυγίανσης με Συγκλίνοντα Φράγματα και Διόδους. Στόχος ήταν η εύρεση της βέλτιστης και αποτελεσματικότερης λύσης του προβλήματος της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων αλλά και η ευαισθητοποίηση των πολιτών σε ότι αφορά το περιβάλλον και την προσδοκώμενη καλύτερη ποιότητα ζωής.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το **νερό** είναι η περισσότερο διαδεδομένη χημική ένωση που είναι απαραίτητη σε όλες τις γνωστές μορφές ζωής στον πλανήτη μας. Οι άνθρωποι και τα ζώα έχουν στο σώμα τους 60-70% νερό (κατά βάρος), ενώ φθάνει μέχρι και το 90% εκείνου των κυττάρων. Το **νερό** αποτελείται από υδρογόνο(H) και οξυγόνο(O)[1].

2. ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΜΟΡΙΟΥ

Το μόριο του νερού δεν είναι γραμμικό, δηλαδή οι δεσμοί O-H δε βρίσκονται πάνω στην ίδια ευθεία, αλλά σχηματίζουν γωνία 104,45 μοιρών.[2] Το μήκος του δεσμού O-H είναι 0,96 Å (Άγκστρεμ, 1 Å = 10⁻⁸ cm). Λόγω της γωνιακής διάταξης του δεσμού O-H, το μόριο του νερού είναι ασύμμετρο και έχει υψηλή διπολική ροπή. Το κέντρο του θετικού φορτίου βρίσκεται προς την πλευρά του υδρογόνου και του αρνητικού προς την πλευρά του οξυγόνου. Ο υψηλός πολικός χαρακτήρας του μορίου εξηγεί τη μεγάλη του διηλεκτρική σταθερά (78 στους 25°C) και άλλες ιδιότητες αυτού, όπως είναι η διάλυση ετεροπολικών ενώσεων στο νερό, ιδιότητα που το καθιστά ένα από τα καλύτερα διαλυτικά μέσα.



Σχήμα 1: Δομή του νερού.

Το νερό παρουσιάζει έντονα το φαινόμενο της σύζευξης, με τη δημιουργία δεσμών διά γέφυρας υδρογόνου. Τα μόρια δηλαδή του νερού σχηματίζουν δεσμούς μεταξύ του ηλεκτροθετικού υδρογόνου του ενός μορίου και του ηλεκτροαρνητικού οξυγόνου του άλλου μορίου. Δεσμοί υδρογόνου μεταξύ των μορίων του νερού

εξακολουθούν να υπάρχουν και σε υψηλή σχετικά θερμοκρασία, όπως το μόλις λιωμένο νερό στο οποίο έχουν σπάσει το 15% των δεσμών υδρογόνου. Έτσι, στους 25°C ο αριθμός των δεσμών υδρογόνου μεταξύ των μορίων του νερού έχει τέτοια τιμή, ώστε ο στοιχειομετρικός τύπος του, στους 25°C, δεν είναι ο γνωστός H₂O, αλλά H₁₈₀O₉₀. Αυτοί οι σχηματισμοί είναι αποτέλεσμα των δεσμών υδρογόνου και ονομάζονται παγωειδή συγκροτήματα, ενώ το μοντέλο που περιγράφει τη συμπεριφορά του νερού με αυτόν τον τρόπο ονομάζεται *ταλαντευόμενο συγκρότημα*.

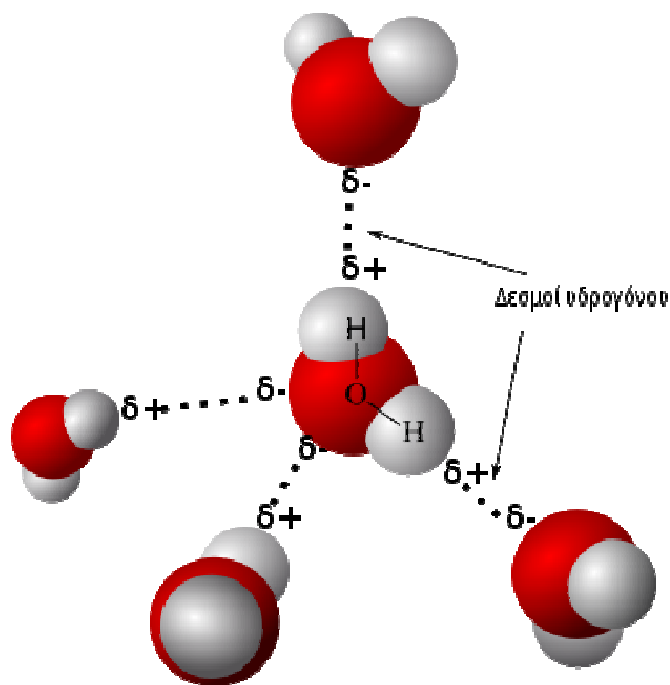
3. ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Το νερό είναι υγρό, διαυγές, άχρωμο σε λεπτά στρώματα, κυανίζον σε μεγάλους όγκους[3]. Η καθαρή ουσία είναι άγευστη, ενώ το καλό πόσιμο νερό έχει ευχάριστη γεύση, που οφείλεται στα διαλυμένα άλατα και αέρια. Η πυκνότητα του νερού μεταβάλλεται με την θερμοκρασία, με μέγιστη στους 4°C. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές της πυκνότητας του νερού σε διάφορες θερμοκρασίες (0-100°C).

Πίνακας I: Περιέχει την πυκνότητα του νερού και του πάγου σε διάφορες θερμοκρασίες.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΕΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΠΑΓΟΥ	
Θερμοκρασία σε °C	Πυκνότητα (gr/cm ³)
100	0.9586
80	0.9719
60	0.9833
40	0.9923
20	0.9982
10	0.9997
5	0.9999
3.98	1.0000
0 (νερό)	0.9998
0 (πάγος)	0.9170

Από τον πίνακα φαίνεται πως το νερό σε στερεή κατάσταση έχει μικρότερη πυκνότητα απ' ό,τι στην υγρή. Ο όγκος μιας συγκεκριμένης ποσότητας νερού αυξάνεται κατά την ψύξη, γιατί η μοριακή δομή του πάγου στηρίζεται στους δεσμούς υδρογόνου, οι οποίοι συγκρατούν τα μόρια σε θέσεις με αρκετά κενά μεταξύ τους. Αυτό έχει μεγάλη σημασία για την οικονομία της φύσης: Οι πάγοι επιπλέουν στο νερό και δρουν ως μονωτικά, εμποδίζοντας το νερό που βρίσκεται από κάτω να παγώσει, μ' όλες τις ευεργετικές συνέπειες στη ζωή του υδρόβιου κόσμου. Χωρίς την "ανωμαλία" αυτή της πυκνότητας του νερού, η ζωή στον πλανήτη μας δε θα υπήρχε, τουλάχιστον με τη σημερινή της μορφή, εξαιτίας της βαθμιαίας ψύξης του νερού της επιφάνειας της Γης. Η ιδιορρυθμία της πυκνότητας του νερού είναι η αιτία της αποσάθρωσης των βράχων. Το νερό που εισέρχεται στις ρωγμές των βράχων στερεοποιείται κατά τη διάρκεια του χειμώνα και προκαλεί την αποσάθρωσή τους. Ακόμα, το σπάσιμο των σωλήνων διανομής του νερού κατά το χειμώνα οφείλεται στην αύξηση του όγκου του νερού κατά τη μετάβαση από την υγρή στη στερεή κατάσταση. Η ανωμαλία αυτή διαρκεί μέχρι τους 4°C περίπου και έπειτα η συμπεριφορά είναι η γνωστή, όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, αυξάνεται και ο όγκος.



Σχήμα 2: Δεσμοί υδρογόνου στο μόριο του νερού.

Το νερό έχει ειδική θερμότητα πολύ μεγάλη (1 cal/gr deg). Χρησιμοποιείται ευρύτατα ως ψυκτικό μέσο και ως φορέας θερμότητας στα καλοριφέρ.

4. ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Το νερό έχει ποικίλη χημική δράση. Σχηματίζει "ενώσεις διά προσθήκης" με πολλά άλατα, καθώς και με πολλά μόρια άλλων ουσιών[1]. Οι ενώσεις αυτές ονομάζονται υδρίτες ή ένυδρες ενώσεις. Οι δυνάμεις που ενώνουν τα μόρια των ουσιών και του νερού είναι:

1. Ελκτικές δυνάμεις μεταξύ του θετικού ιόντος του μετάλλου και του αρνητικού οξυγόνου του πολωμένου μορίου του νερού.
2. Σχηματισμός ημιπολικού δεσμού μεταξύ του ατόμου του οξυγόνου και του ιόντος του μετάλλου με ένα ζεύγος ηλεκτρονίων.
3. Σχηματισμός γέφυρας υδρογόνου μεταξύ του μορίου του νερού και της ουσίας.

Άλλος σημαντικός τύπος αντίδρασης του νερού είναι η υδρόλυση. Το νερό επιτελεί αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, όπου δρα άλλοτε ως οξειδωτικό και άλλοτε ως αναγωγικό μέσο.

5. ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Το φυσικό νερό (πηγών, ποταμών κ.λ.π.) δεν είναι καθαρή χημική ένωση. Περιέχει σχεδόν πάντοτε διαλυμένα ανόργανα άλατα, αέρια και άλλες ουσίες, πολλές φορές και οργανικές[3]. Σχηματίζεται από τη συμπύκνωση των υδρατμών που παράγονται από την εξάτμιση του νερού των ποταμών, των λιμνών και των θαλασσών που πέφτει ως βροχή, χιόνι ή χαλάζι. Η ανακύκλωση του νερού του πλανήτη μέσω συνεχών μετατροπών στη φυσική του κατάσταση είναι γνωστή και ως υδρολογικός κύκλος ή κύκλος του νερού.

Το νερό της βροχής διαλύει διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας, π.χ. διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), λίγο οξυγόνο και άζωτο, συμπαρασύρει σκόνη, αιθάλη και άλλες αιωρούμενες ουσίες. Φτάνει στη γη ως αραιότατο οξύ, λόγω του διαλυμένου διοξειδίου του άνθρακα. Για το λόγο αυτόν, το φυσικό νερό διαλύει τα δυσδιάλυτα ανθρακικά άλατα του ασβεστίου και του μαγνησίου και τα μετατρέπει

σε ευδιάλυτα όξινα ανθρακικά άλατα των στοιχείων.



Σχήμα 3: Ο υδρολογικός κύκλος του νερού.

Κατά την εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια της γης απορροφάται το 30% της ενέργειας του ήλιου που φτάνει στην επιφάνεια της γης με μορφή ακτινοβολίας. Σε αυτό οφείλονται μετεωρολογικά φαινόμενα όπως τυφόνες και τροπικές καταιγίδες. Επιπλέον το κλίμα μιας περιοχής εξαρτάται από την εγγύτητα σε γεωγραφικές περιοχές νερού αλμυρές ή γλυκές, όσο πιο κοντά είναι μια περιοχή σε νερό τόσο πιο ομαλό είναι το κλίμα εξ' αιτίας της μεγάλης ειδικής θερμότητας του νερού.

6. ΑΝΑΓΚΕΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ ΣΕ ΝΕΡΟ

Το πόσιμο νερό είναι παράγοντας που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι ανάγκες σε πόσιμο νερό συνεχώς αυξάνονται. Αυτό οφείλεται τόσο στην αύξηση του πληθυσμού όσο και στη βελτίωση του επιπέδου διαβίωσης των ανθρώπων[4]. Οι συνολικές ανάγκες σε πόσιμο νερό καλύπτονται από

τα υπόγεια νερά, από τις πηγές και από τα επιφανειακά νερά των ποταμών και λιμνών. Η ποιότητα των υπόγειων νερών και των πηγών είναι τέτοια, που επιτρέπει κατά κανόνα την απευθείας διάθεσή τους. Αντίθετα, τα νερά των ποταμών και λιμνών πρέπει να υποστούν κατεργασία, πριν χρησιμοποιηθούν ως πόσιμα.

Σήμερα σ' όλα τα μεγάλα αστικά κέντρα υπάρχουν εγκαταστάσεις επεξεργασίας του πόσιμου νερού, πριν αυτό διοχετευθεί στο δίκτυο ύδρευσης. Η πληθυσμιακή έκρηξη, όπως χαρακτηρίζεται η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού κυρίως στους λαούς που εισέρχονται στο στάδιο της σύγχρονης ανάπτυξης, δημιουργεί μεγάλες ανησυχίες. Ο πληθυσμός συνεχώς αυξάνει, ενώ η γη είναι πεπερασμένων και ορισμένων διαστάσεων. Αυτή η αύξηση επιδεινώνει το πρόβλημα της ρύπανσης του περιβάλλοντος.

Με την πίεση αυτή για παροχή όλο και περισσότερο νερού και ειδικά υπόγειου, είναι φανερό πως ανατρέπεται η ισορροπία του κύκλου του. Στο μεταξύ έχει αρχίσει με επιτυχία η παραγωγή γλυκού νερού από θαλάσσιο νερό με απόσταξη, αντίστροφη ώσμωση με ημιπερατές μεμβράνες κτλ. Φαίνεται πλέον πως μόνη προσιτή και περιβαλλοντολογικά σωστή λύση είναι η πολλαπλή χρήση του νερού με ανακύκλωση. Με αυτόν τον τρόπο, θα αύξανε σημαντικά το δυναμικό σε νερό και θα αποτρεπόταν ο κίνδυνος για ρύπανση των δεξαμενών του νερού.

Πρόβλημα δεν αποτελεί η ύπαρξη αρκετού νερού αλλά η εξασφάλιση ικανοποιητικής ποσότητας γλυκού νερού σε τοπική κατανομή και σε λογική τιμή για την ικανοποίηση των σύγχρονων και των μελλοντικών αναγκών σε πόσιμο νερό, για άρδευση στη γεωργία και για ανάπτυξη της βιομηχανίας. Για την ικανοποίηση των αυξανόμενων αναγκών, το γλυκό νερό αναζητάται παντού και τα αποθέματα σε υπόγειο και επίγειο νερό μεταφέρονται στα αστικά και βιομηχανικά κέντρα από μεγάλες αποστάσεις.

Η συνεχής αύξηση της ζήτησης του γλυκού νερού οφείλεται σε πολλούς λόγους, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι:

- Αύξηση του μόνιμου πληθυσμού και του βιοτικού επιπέδου
- Αύξηση του εποχιακού πληθυσμού (τουρίστες)
- Επέκταση των καλλιεργούμενων και αρδευόμενων εκτάσεων
- Αύξηση του αριθμού των μεταποιητικών και βιομηχανικών μονάδων
- Δημιουργία καινούργιων αναγκών, όπως πότισμα κήπων, πλύσιμο δρόμων κτλ.

7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΗΣΕΩΝ ΝΕΡΟΥ

Στον πλανήτη μας η ετήσια κατά κεφαλή κατανάλωση νερού συνεχώς αυξάνεται και έτσι οι ανάγκες για νερό στο μέλλον θα είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τις σημερινές. Οι κύριες χρήσεις του νερού καλύπτουν τις παρακάτω ανάγκες:

A) ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ: Η κύρια σε όγκο χρήση νερού είναι η άρδευση φυτικών καλλιεργειών, αρκετές από τις οποίες δεν είναι δυνατόν να διατηρηθούν χωρίς νερό[5]. Ακόμη όμως και στις περιπτώσεις παραδοσιακών καλλιεργειών, όπως είναι η ελιά και το αμπέλι, η άρδυσή τους αυξάνει κάθετα την αποδοτικότητα και παραγωγικότητά τους. Η γεωργία χρησιμοποιεί στην Ελλάδα το 86% του νερού, ενώ 11% προορίζεται για βιομηχανική χρήση και 3% για οικιακή. Περίπου 13 εκατομμύρια στρέμματα αρδεύονται στη χώρα μας. Η γεωργική χρήση του νερού, κυρίως για άρδευση, εκτιμάται σε 5.355 εκατομμύρια m³ νερού (=11,9 εκατομμύρια στρέμματα x 450 χιλιοστά/ στρέμμα).

B) ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ: Η βιομηχανία απαιτεί μεγάλες ποσότητες νερού, που εκφράζονται ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος και εξαρτώνται από το είδος του. Από τις πιο υδροφόρες βιομηχανίες είναι η χαρτοβιομηχανία (60.000 lt/τόνο) και η χαλυβουργία (5.000 lt/τόνο).

Γ) ΟΙΚΙΑΚΕΣ-ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ: Ο άνθρωπος έχει μεγάλη ανάγκη από νερό. Η ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται για οικιακή χρήση εξαρτάται από το βιοτικό επίπεδο μιας χώρας και από το είδος του πληθυσμού. Για τις χώρες της Ευρώπης μια χαρακτηριστική τιμή κατανάλωσης νερού είναι γύρω στα 500 λίτρα νερό την ημέρα ανά άτομο, για ατομικές ανάγκες μόνο. Σε μερικούς οικισμούς, που συνήθως έχουν και προβλήματα υδρεύσεως, η ποσότητα αυτή είναι γύρω στα 50-80 λίτρα ανά ημέρα, ενώ στις μεγαλουπόλεις αυξάνεται.

Δ) ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ: Οι παγκόσμιες ενεργειακές απαιτήσεις, ειδικά για ηλεκτρισμό, θα αυξηθούν σε μεγάλο βαθμό στη διάρκεια του 21ου αιώνα που ήδη ξεκίνησε, όχι μόνο εξαιτίας δημογραφικών πιέσεων αλλά και εξαιτίας των συνεχώς βελτιούμενων προδιαγραφών διαβίωσης, την αστική και βιομηχανική διόγκωση και τις αυξανόμενες προσδοκίες. Η υδροηλεκτρική ενέργεια, είναι η πιο σημαντική και ευρεία χρησιμοποιούμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Αντιπροσωπεύει το 19% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρισμού. Σε όλο τον κόσμο υπάρχουν σήμερα περίπου 45.000 μεγάλα υδροηλεκτρικά φράγματα σε λειτουργία.

Ε) ΨΥΧΑΓΩΓΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΝΕΡΟΥ: Ο τουρισμός ασκεί ένα μεγάλο εύρος πιέσεων στο περιβάλλον που επηρεάζει. Ο αντίκτυπος στην ποσότητα νερού εξαρτάται από τη διαθεσιμότητά του αλλά και από την ικανότητα του συστήματος παροχής νερού να ικανοποιήσει τις μέγιστες ζητήσεις.

Η ένταση της χρήσης των φυσικών πόρων από τον τουρισμό μπορεί να συγκρουστεί με άλλες ανάγκες, ειδικά στις περιοχές όπου το καλοκαίρι οι υδατικοί πόροι είναι λιγοστοί και αυξάνεται ο ανταγωνισμός με άλλους τομείς της οικονομίας, όπως η γεωργία και η δασονομία. Τις τελευταίες δεκαετίες είναι χαρακτηριστική η ανεξέλεγκτη ανάπτυξη του τουρισμού, η οποία έχει οδηγήσει σε υποβάθμιση της ποιότητας του περιβάλλοντος, ιδιαίτερα στις παράκτιες και ορεινές ζώνες.

8. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

8.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα φυσικά χαρακτηριστικά του νερού αφορούν παράγοντες που χαρακτηρίζουν κατά κύριο λόγο την εμφάνισή του[5]. Μολονότι δεν είναι απαραίτητα συνδεδεμένα με την επίδραση του νερού στην υγεία των καταναλωτών, έχουν μεγάλη αξία, γιατί αυτά αντιλαμβάνεται κατά προτεραιότητα ο καταναλωτής.

Τα κυριότερα από τα φυσικά χαρακτηριστικά του νερού είναι :

- 1. Θερμοκρασία**
- 2. Γεύση και οσμή**
- 3. Χρώμα**
- 4. Θολερότητα**

Ο εντοπισμός και η εξουδετέρωση των αιτιών, που προκαλούν τη χειροτέρευση των φυσικών χαρακτηριστικών του νερού, είναι βασικό όπλο για την αναβάθμιση της ποιότητας των χαρακτηριστικών του. Σε γενικές γραμμές, η βελτίωση των φυσικών χαρακτηριστικών του νερού δεν είναι δύσκολη.

Τα χημικά χαρακτηριστικά οφείλονται στις χημικές ενώσεις που βρίσκονται στο νερό. Άλλες είναι φυσικής προελεύσεως και άλλες είναι αποτέλεσμα ανθρωπίνων δραστηριοτήτων. Η τοξικότητα αυτών των ενώσεων διαφέρει ανάλογα με το είδος της χημικής ένωσης. Έχει προταθεί ο χωρισμός τους σε ομάδες ανάλογα με τη βλάβη που είναι δυνατόν να προκαλέσουν σε :

Τοξικές ουσίες: Σ' αυτές περιλαμβάνονται τα βαρέα μέταλλα, το κυάνιο, τα παρασιτοκτόνα και απαγορεύεται η ύπαρξή τους.

Ανεπιθύμητες ενώσεις: Σ' αυτές περιλαμβάνονται οι αζωτούχες ενώσεις, τα απορρυπαντικά, οι υδρογονάνθρακες, ο σίδηρος, ο χαλκός.

Όσον αφορά στα **ποιοτικά χαρακτηριστικά** του νερού, οι θεμελιώδεις γνώσεις αποτελούν βασική προϋπόθεση για την ορθολογική και ολοκληρωμένη διαχείρισή του. Με βάση τα ποιοτικά του χαρακτηριστικά προσδιορίζεται ο βαθμός, τα στάδια και οι μέθοδοι επεξεργασίας του όταν αυτό προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση.

Πίνακας II: Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού

Ποιοτικά χαρακτηριστικά	Παράμετρος
(Α) Φυσικοχημικά	Θερμοκρασία
	Οξύτητα – Αλκαλικότητα
	Αγωγιμότητα
	Θολότητα
	Οσμή και γεύση
	Χρώμα
	Στερεές ουσίες
	Άλατα – Σκληρότητα
	Διάφορα κατιόντα (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+)
	Διάφορα ανιόντα (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Cl^-)
	Θρεπτικά συστατικά (N, P, S, Si)
Ιχνοστοιχεία / μέταλλα	
(Β) Βιοχημικά	Διαλυμένο οξυγόνο (DO)
	Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD)
	Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)
	Ολικός Οργανικός Άνθρακας (TOC)
(Γ) Μικροβιολογικά	Ιοί
	Βακτήρια
	Μύκητες
	Φύκια
	Πρωτόζωα
	Έλμινθες
	Μαλακόστρακα

Με βάση την ποιότητά τους προσδιορίζεται ο τρόπος επεξεργασίας τους για την επίτευξη των στόχων που είναι η προστασία της ποιότητας των νερών των φυσικών αποδεκτών και της δημόσιας υγείας.

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού μπορούν να διακριθούν σε φυσικοχημικά, βιοχημικά και μικροβιολογικά.

Στα **φυσικοχημικά** χαρακτηριστικά ανήκουν η θερμοκρασία, η οξύτητα, η αλκαλικότητα, η αγωγιμότητα, η αλατότητα, η θολότητα, η οσμή, η γεύση, το χρώμα, οι στερεές ουσίες, διάφορα άλατα, η σκληρότητα του νερού, διάφορα κατιόντα όπως αυτά του ασβεστίου (Ca^{2+}), του μαγνησίου (Mg^{2+}), του νατρίου (Na^+) και του καλίου (K^+), διάφορα ανιόντα όπως τα ανθρακικά (CO_3^{2-}), τα όξινα ανθρακικά (HCO_3^-), τα χλωριούχα (Cl^-), τα θειικά (SO_4^{2-}) και άλλα, τα θρεπτικά συστατικά όπως τα άλατα του αζώτου (αμμωνιακά NH_4^+ , νιτρώδη NO_2^- , νιτρικά NO_3^-), τα άλατα του φωσφόρου (PO_4^{3-}), του θείου (S) και του πυριτίου (Si), και τα βαρέα μέταλλα όπως ο μόλυβδος (Pb), ο υδράργυρος (Hg), το κάδμιο (Cd), το χρώμιο (Cr).

Η παρουσία του αζώτου και των ενώσεών του είναι σημαντική για τη διατήρηση της ζωής. Το άζωτο ως στοιχείο βρίσκεται στα νερά σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις, της τάξης 5×10^{-5} M. Αντίθετα η συγκέντρωση των οργανικών και ανόργανων ενώσεων του αζώτου είναι πολύ μεγαλύτερη. Η βιοαποικοδόμηση των αζωτούχων οργανικών ενώσεων οδηγεί κατά κανόνα στο σχηματισμό νιτρικών ιόντων, όταν επικρατούν αερόβιες συνθήκες και στο σχηματισμό αμμωνίας, όταν επικρατούν αναερόβιες συνθήκες.

Η ατμόσφαιρα περιέχει αέριο CO_2 σε σχετικά σταθερή μερική πίεση. Παράλληλα το διοξείδιο του άνθρακα βρίσκεται σ' όλα σχεδόν τα φυσικά νερά σε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις με τις μορφές: CO_2 , H_2CO_3 . Η παρουσία των ανθρακικών μορφών στα φυσικά νερά έχει ιδιαίτερη σημασία, τόσο από χημικής, όσο και από βιολογικής πλευράς. Από χημικής πλευράς τα ανθρακικά έχουν ενδιαφέρον, επειδή έχουν την ιδιότητα να ρυθμίζουν το pH των φυσικών νερών. Από βιολογικής πλευράς συμμετέχουν στον κύκλο της φωτοσύνθεσης και της αναπνοής.

Τα φυσικά νερά χαρακτηρίζονται και από την παρουσία διαφόρων μεταλλικών ιόντων. Το είδος και η συγκέντρωση των μεταλλικών διαφοροποιεί τα φυσικά νερά σε κατηγορίες. π.χ. μαλακά ή σκληρά νερά, μεταλλικά νερά, κ.α. Σε συνδυασμό και με άλλες παραμέτρους διακρίνουμε τα νερά των θαλασσών, ωκεανών, λιμνών, ποταμών κ.α.

Στα **βιοχημικά** χαρακτηριστικά του νερού ανήκει το διαλυμένο οξυγόνο (DO), η οργανική ύλη, ουσίες δηλαδή οι οποίες προσδιορίζονται με το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) και τον ολικό οργανικό άνθρακα (TOC).

Το οξυγόνο είναι απαραίτητο σ' όλους τους ζώντες οργανισμούς ακόμη και στους υδροχαρείς. Πρέπει να υπάρχει λοιπόν οξυγόνο στα νερά για να αναπτυχθούν οι οργανισμοί που ζουν σ' αυτά. Το οξυγόνο παρουσιάζει μικρή διαλυτότητα στο νερό, η οποία κυμαίνεται στις τιμές 6-15 ppm. Η συνεχής επαφή των νερών με την ατμόσφαιρα δίνει τη δυνατότητα για τη συνεχή τους οξυγόνωση. Η διαλυτότητα του οξυγόνου στο νερό εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση των αλάτων, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη και προς τις δύο αυτές παραμέτρους. Κάθε παράγοντας που προκαλεί κατανάλωση και μείωση του οξυγόνου στα νερά, δημιουργεί ταυτόχρονα κινδύνους για όλους τους υδρόβιους οργανισμούς. Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στα νερά αποτελεί και παράμετρο της ρύπανσης του.

Στα **μικροβιολογικά** χαρακτηριστικά ανήκουν οι μικροοργανισμοί, δηλαδή τα βακτήρια, οι ιοί, οι μύκητες, τα φύκια (άλγη), τα πρωτόζωα, οι έλμινθες (σκουλήκια) και τα μαλακόστρακα. Μέσα στο νερό υπάρχει μεγάλος αριθμός ειδών μικροβίων. Πολλά από αυτά είναι παθογόνα. Η παρουσία κολοβακτηριδίων στο νερό υποδηλώνει την μόλυνση από περιττώματα και επομένως και την πιθανή παρουσία παθογόνων μικροβίων. Η βελτίωση των μικροβιολογικών χαρακτηριστικών του νερού είναι ένα πρόβλημα, που έχει λυθεί σχετικά εύκολα με την απολύμανση. Πρέπει όμως να τονιστεί η μεγάλη σημασία της βελτίωσης των μικροβιολογικών χαρακτηριστικών του νερού. Κατά το παρελθόν ολόκληρη η Ευρώπη υπέφερε από ασθένειες που προέρχονται από τη μόλυνση του νερού.

8.2 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

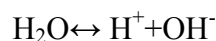
8.2.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Η θερμοκρασία είναι η παράμετρος που υπεισέρχεται σε όλες τις φυσικοχημικές και τις βιοχημικές αντιδράσεις[6]. Οι βιοχημικές αντιδράσεις εκτελούνται με ταχύτερο ρυθμό σε υψηλές θερμοκρασίες. Η διάθεση θερμών υγρών αποβλήτων σε φυσικούς αποδέκτες επηρεάζει άμεσα το οικοσύστημα γιατί η διαλυτότητα του οξυγόνου στο νερό εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία, είναι λιγότερο διαλυτό στο θερμό απ' ότι στο ψυχρό νερό. Εάν αυξηθεί η θερμοκρασία του αποδέκτη μειώνεται το ποσοστό του διαλυμένου οξυγόνου και εκτός αυτού το θερμό

νερό σαν ειδικά ελαφρύτερο παραμένει στην επιφάνεια (φαινόμενο αναστροφής), δημιουργώντας ένα θερμότερο στρώμα με μικρότερη ικανότητα διάλυσης του ατμοσφαιρικού οξυγόνου. Τέλος οι υψηλές θερμοκρασίες συντελούν και στην αύξηση του πολλαπλασιασμού των μικροοργανισμών. Η πλέον επιθυμητή διακύμανση της θερμοκρασίας του νερού που προορίζεται για πόσιμο είναι μεταξύ 5 και 12°C. Πάνω από τους 12°C, πέρα από την αισθητική και γευστική επίδραση, το νερό καθίσταται και λιγότερο κατάλληλο για ορισμένες χρήσεις.

8.2.2 ΟΞΥΤΗΤΑ (pH)

Οξύτητα είναι η ικανότητα των νερών να εξουδετερώνουν μια ορισμένη ποσότητα υδροξυλίωντων. Το καθαρό νερό ιονίζεται σε κατιόντα υδρογόνου (H^+) και ανιόντα υδροξυλίου (OH) σύμφωνα με την εξίσωση:



Ως οξύτητα (pH) ορίζεται «ο αρνητικός δεκαδικός λογάριθμος της συγκέντρωσης των κατιόντων υδρογόνου» ($-\log[H^+]$). Η κλίμακα μέτρησης του pH εκτείνεται από 0 ως 14. Η τιμή 7,0 αντιστοιχεί σε ουδέτερα δείγματα. Τιμές μικρότερες του 7,0 υποδεικνύουν υπεροχή κατιόντων υδρογόνου (H^+), ενώ τιμές μεγαλύτερες από 7,0 αντιστοιχούν σε αλκαλικά νερά (υπεροχή υδροξυλίωντων, OH^-).

Η ενεργός οξύτητα (pH) του νερού εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την αλατότητα (παρουσία ανιόντων θείου, χλωρίου κ.ά., κατιόντων ασβεστίου, μαγνησίου κ.ά.), τις συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα και του οξυγόνου, καθώς και από τη μεταβολική δραστηριότητα των υδρόβιων οργανισμών (φωτοσύνθεση, αναπνοή) και την αποσύνθεση των οργανικών ουσιών. Η ενεργός οξύτητα επηρεάζει πολλές βιολογικές και χημικές αντιδράσεις και πολλές φορές χρησιμεύει σαν δείκτης ρύπανσης. Το σύνολο των βιοχημικών αντιδράσεων πραγματοποιείται σε ουδέτερο pH.

Όξινα ή αλκαλικά περιβάλλοντα δυσχεραίνουν την πορεία των αντιδράσεων ή αναστέλλουν την πραγματοποίησή τους. Πολύ όξινα ή πολύ αλκαλικά απόβλητα είναι δύσκολο έως αδύνατο να υποστούν βιολογική επεξεργασία. Η αναερόβια επεξεργασία της ιλύος απαιτεί σταθερές τιμές pH (7,0–7,5) για να υπάρξει ισορροπία μεταξύ της όξινης και της αλκαλικής ζύμωσης.

Οι τιμές pH των εκροών των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων πρέπει να κυμαίνονται από 6,5–8,5 ώστε να μην μεταβάλλονται οι αντίστοιχες τιμές των

φυσικών νερών. Η εξουδετέρωση είναι ο μόνος τρόπος αντιμετώπισης της οξύτητας και της αλκαλικότητας του νερού.

8.2.3 ΑΛΚΑΛΙΚΟΤΗΤΑ

Αλκαλικότητα: Είναι η ικανότητα του νερού να εξουδετερώνει μια ορισμένη ποσότητα υδρογονοκατιόντων. Η αλκαλικότητα των φυσικών νερών εξαρτάται κυρίως από την συγκέντρωση των όξινων ανθρακικών (HCO_3^-) και των ανθρακικών (CO_3^{2-}) ιόντων, που προκύπτουν από τον ιονισμό του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και από τα υδροξύλια (OH^-) [7].

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) διαλύεται εύκολα στο νερό συμβάλλοντας στη διαμόρφωση ενός περιβάλλοντος κατάλληλου για τη ζωή, δεδομένου ότι συμμετέχει στις διαδικασίες της φωτοσύνθεσης και της αναπνοής και αποτελεί ουσιαστική πηγή άνθρακα, άμεσα ή έμμεσα, για τις ενεργειακές απαιτήσεις των οργανισμών. Αύξηση της συγκέντρωσης του CO_2 στα φυσικά νερά προκαλεί μείωση του pH και αντίστροφα. Αυτό συμβαίνει λόγω της αύξησης του ανθρακικού οξέος που σχηματίζεται από την αντίδραση του CO_2 με το νερό και κατ'επέκταση την αύξηση των κατιόντων υδρογόνου H^+ . Συνέπεια των παραπάνω είναι η μείωση του pH.

Τα φυσικά νερά παρουσιάζουν μεγάλη ρυθμιστική ικανότητα, ανθίστανται δηλαδή, μέσω μιας σειράς χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στο εσωτερικό τους, σε απότομες μεταβολές του pH. Σημαντικές και σχετικά μόνιμες μεταβολές στο pH παρατηρούνται συνήθως κάτω από την επίδραση εξωγενών παραγόντων. Χαμηλές τιμές του pH οφείλονται συχνά στην εισαγωγή οξέων στα φυσικά νερά (όξινη βροχή, αστικά και βιομηχανικά απόβλητα κ.ά.). Αλκαλικές τιμές pH συναντώνται σε περιπτώσεις έντονης φωτοσυνθετικής δραστηριότητας-ευτροφισμός, σε περιπτώσεις ρύπανσης των υδάτινων αποδεκτών με αλκαλικές ουσίες (απορρυπαντικά κ.ά. από αστικά και βιομηχανικά απόβλητα) και σε αυξημένες συγκεντρώσεις νατρίου (Na), καλίου (K), ασβεστίου (Ca) και μαγνησίου (Mg).

8.2.4 ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι εξ ορισμού η ικανότητα ενός υλικού να διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα και είναι αντιστρόφως ανάλογη της ηλεκτρικής

αντίστασης. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού αναφέρεται στην ικανότητά του να μεταφέρει (άγει) ηλεκτρικά φορτία[8]. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από την παρουσία ιόντων (κατ' επέκταση αλάτων), τη συγκέντρωση των ιόντων, την ευκινησία των ιόντων, το σθένος των ιόντων και τη θερμοκρασία του διαλύματος.

Η αγωγιμότητα διευκολύνει την εκτίμηση της επίδρασης των διαφόρων ιόντων στις χημικές ισορροπίες, στο ρυθμό διάβρωσης στα μέταλλα, στην ανάπτυξη των φυτών και ζώων κ.λ.π. Οι τιμές της αγωγιμότητας είναι ενδεικτικές για την ποιότητα των φυσικών νερών. Απότομη αύξηση της αγωγιμότητας του νερού ενός φυσικού αποδέκτη αποτελεί ένδειξη ρύπανσης.

Απόβλητα και ρύποι που εισέρχονται στους υδάτινους αποδέκτες τροποποιούν την αγωγιμότητα, ειδικότερα αν οι ρύποι περιλαμβάνουν ιόντα όπως ανθρακικά, θειικά, χλωρίου, μαγνησίου, νατρίου, καλίου και φωσφόρου. Με την αγωγιμότητα μπορούν να εκτιμηθούν οι ημερήσιες διακυμάνσεις της συγκέντρωσης των διαλυμένων μεταλλοϊόντων στα απόβλητα και να προσδιοριστεί προσεγγιστικά η ποσότητα των απαιτούμενων χημικών ουσιών για την εξουδετέρωση ή την κροκίδωση ορισμένων αποβλήτων.

Χρησιμοποιείται ως αντιπροσωπευτικό μέτρο της συγκέντρωσης των ολικών διαλυμένων στερεών (Total Dissolved Solids, TDS) στα υγρά απόβλητα καθώς και για την αξιολόγηση της καταλληλότητας των επεξεργασμένων αποβλήτων που προορίζονται για άρδευση και συνδέεται άμεσα με την αλατότητα. Ως **αλατότητα** ορίζεται το συνολικό ποσό σε γραμμάρια των διαλυμένων στερεών ουσιών που περιέχονται σε 1 Kg θαλασσινού νερού, όταν όλα τα ανθρακικά έχουν μετατραπεί σε οξείδια, το βρώμιο και το ιώδιο έχουν αντικατασταθεί από χλώριο και όλα τα οργανικά έχουν οξειδωθεί τελείως.

Τα ιόντα στο νερό προσθέτονται συνέχεια από δύο βασικές πηγές: τους ποταμούς που περιέχουν τα διαλυμένα προϊόντα της χημικής αποσάθρωσης των πετρωμάτων και την ηφαιστειακή δραστηριότητα (επιφανειακή & υποθαλάσσια).

Το νερό των ποταμών δεν περιέχει την ίδια αναλογία στοιχείων με τη θάλασσα. Έχει πολύ μεγαλύτερη ποσότητα ανθρακικών, ασβεστιτικών, πυριτικών και θεικών ιόντων, αλλά η συνολική ποσότητά τους είναι κατά πολύ μικρότερη του θαλασσινού νερού.

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα είναι υπεύθυνη σε σημαντικότερο ίσως βαθμό για τον εμπλουτισμό των ωκεανών με στοιχεία. Είναι γνωστός ο σχηματισμός υδροχλωρίου ή θεικού οξέως μέσα σε λίμνες που σχηματίζονται σε ηφαιστειακούς

κρατήρες, καθώς και η έκκληση κατά τις εκρήξεις, τεράστιων ποσοτήτων χλωρίου και θεικών. Δεν είναι όμως μόνο τα χερσαία ηφαιστεια. Η ηφαιστειακή δράση στις μεσο-ωκεάνιες ράχεις, οι οποίες διασχίζουν από άκρο σε άκρο τη γη, είναι ιδιαίτερα έντονη. Το 1977 έγινε η πρώτη ανακάλυψη υδροθερμικών πόρων επάνω στις μέσο - ωκεάνιες ράχεις. Το 1996-98 έγιναν γνωστά τα πρώτα αποτελέσματα συστηματικής υποθαλάσσιας έρευνας (η οποία συνεχίζεται), με βάση τα οποία ολόκληρη η ποσότητα του νερού που υπάρχει στους ωκεανούς της γης, ανακυκλώνεται μέσα από το σύστημα των υδροθερμικών πόρων κάθε 3 εκατομμύρια χρόνια. Στις ζώνες αυτές, το νερό μέσα από σύστημα διαρρήξεων εισέρχεται μέσα στο φλοιό, θερμαίνεται, αποθέτει τα θειικά και το μαγνήσιο, εμπλουτίζεται με σίδηρο, μαγγάνιο, ασβέστιο, χλώριο, κάλιο, πυριτικά, χαλκό, ψευδάργυρο μόλυβδο, υδρόθειο κ.α. και εξέρχεται, σαν υπέρθερμο νερό 350 °C.

Το υπέρθερμο νερό εξέρχεται από τους πόρους διεκφυγής γνωστούς σαν καμινάδες (chimneys), υπό την μορφή μαύρου 'καπνού' (black smoker). Γρήγορα γίνεται ψύξη και καθίζηση των περισσότερων μεταλλικών στοιχείων στο γύρω περιβάλλον του πόρου, αλλά τα πλέον ευδιάλυτα παραμένουν, συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στον εμπλουτισμό του ωκεάνιου νερού κυρίως με ασβέστιο και κάλιο.

Τα άλατα στη διάρκεια του γεωλογικού χρόνου δεν παραμένουν στο νερό των ωκεανών για πάντα, αλλά απομακρύνονται με διάφορες διεργασίες. Η θραύση των κυμάτων στη θάλασσα δημιουργεί ψεκασμό της ατμόσφαιρας με μικροσκοπικά σωματίδια αλάτων τα οποία μπαίνουν στην ατμοσφαιρική κυκλοφορία. Στις μεσο-ωκεάνιες ράχεις η διήθηση του νερού μέσα από το υδροθερμικό σύστημα, συγκρατεί το μαγνήσιο και τα θειικά, τα οποία σχηματίζουν εκεί ορυκτά και μεταλλεύματα. Το ασβέστιο, το πυρίτιο, τα θειικά και το μαγνήσιο, αποτίθενται στα ιζήματα του πυθμένα με τη βοήθεια βιολογικής δραστηριότητας, σαν κελύφη, σαν νεκροί μικροσκοπικοί οργανισμοί και σαν περιτώματα ζωικών οργανισμών (συμπεριλαμβανομένων και του ζωοπλαγκτού).

Ο πιο αποτελεσματικός όμως τρόπος απομάκρυνσης, ουσιαστικά όλων των διαλυμένων στο νερό ιόντων, γίνεται με την προσρόφησή τους στην επιφάνεια των βυθιζόμενων αργιλικών κόκκων ή άλλων βιολογικών σωματιδίων.

8.2.5 ΟΣΜΗ ΚΑΙ ΓΕΥΣΗ

Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι δυνατόν να προέρχονται από διάφορες χημικές ουσίες, από διαλυμένες ή από εν αιωρήσει οργανικές ουσίες σε αποσύνθεση, ή τέλος από μικροοργανισμούς και από διαλυμένα στο νερό αέρια. Οι ιδιότητες αυτές εκφράζονται συνήθως μόνον ποιοτικά σαν έντονες, μέτριες, ασθενείς κ.λ.π. Το προς πόση νερό πρέπει να είναι απαλλαγμένο από κάθε ίχνος δυσάρεστης οσμής ή γεύσης.

Τα προβλήματα γεύσης στο νερό οφείλονται στα διαλυμένα άλατα, καθώς επίσης στην παρουσία κάποιων μετάλλων, όπως είναι ο σίδηρος (Fe), ο χαλκός (Cu), το μαγγάνιο (Mn) και ο ψευδάργυρος (Zn). Τέλος, ουσίες όπως οι φαινόλες και οι χλωροφαινόλες δημιουργούν σοβαρά προβλήματα γεύσης στο νερό ακόμα και σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις.

Τα νερά με σύνολο διαλυμένων αλάτων (TDS) μικρότερο από 1200 mg/l δεν παρουσιάζουν προβλήματα γεύσης και είναι αποδεκτά από τον καταναλωτή, αν και πρέπει να προτιμάται συγκέντρωση TDS μικρότερη από 500 mg/l, σύμφωνα με την κοινή υπουργική απόφαση, ΚΥΑ Υ2/2600/2001(ΦΕΚ 892/11.07.2001 τμήκος Β') που αναφέρεται στην «Ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης» σε συμμόρφωση προς την οδηγία 98/83/ΕΚ του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης της 3/11/98.

Μερικά άλατα, όπως για παράδειγμα το χλωριούχο μαγνήσιο ($MgCl_2$), παρουσιάζουν μεγαλύτερα προβλήματα γεύσης. Αντίθετα η γεύση των θεικών αλάτων του μαγνησίου ($MgSO_4$) και ασβεστίου ($CaSO_4$) είναι λιγότερο δυσάρεστη.

Το υπολειμματικό χλώριο των δικτύων ύδρευσης είναι αυτό που αντιλαμβάνεται ο καταναλωτής και το συσχετίζει με την οσμή και τη γεύση του νερού. Το όριο γεύσης του χλωρίου σε ουδέτερο pH είναι 0.2 mg/l, το οποίο αυξάνει σε 0.5 mg/l για τιμή pH=9. Επίσης, το όριο γεύσης της μονοχλωραμίνης, μιας ουσίας η οποία δημιουργείται στο νερό κατά την χλωρίωση, εκτιμάται σε 0.48 mg/l. Το μεγαλύτερο όμως πρόβλημα με τη χλωρίωση του νερού είναι η δημιουργία οσμής και γεύσης από τις ενώσεις που προκύπτουν κατά την αντίδραση του χλωρίου με τα οργανικά συστατικά του νερού (χουμικά υλικά, αλειφατικοί και αρωματικοί υδρογονάνθρακες). Τέτοιες ενώσεις είναι το διχλωρομεθάνιο, το χλωροφόρμιο, το τριχλωροαιθυλένιο κ.ά. γνωστά ως χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες ή τριαλογονομένα μεθάνια (Tri-Halo-Methanes, THM).

Η αποικοδόμηση φυτικών υλικών και τα προϊόντα μεταβολισμού των μικροοργανισμών είναι οι περισσότερο πιθανές αιτίες δημιουργίας γεύσης και οσμής

στα επιφανειακά νερά. Οι μικροοργανισμοί που δημιουργούν συνήθως τέτοια προβλήματα είναι τα νηματοειδή βακτήρια, οι ακτινομύκητες και τα πράσινο-μπλε φύκια, αν και είναι δυνατή η δημιουργία τέτοιων προβλημάτων και από άλλους μικροοργανισμούς. Δύο προϊόντα μεταβολισμού των ακτινομυκήτων και των κυανοπράσινων φυκιών που ταυτοποιήθηκαν είναι η γεωσμίνη και η μεθυλοϊσοβορνεόλη (MIB). Τα συστατικά αυτά είναι ιδιαίτερα δύσσομα και υπεύθυνα για την οσμή γαιώδους μούχλας που προσδίδουν στο νερό.

Αρκετά υπόγεια νερά έχουν δυσάρεστη οσμή αλλά και γεύση που οφείλεται στο περιεχόμενο υδρόθειο (H_2S). Το υδρόθειο στα υπόγεια νερά προέρχεται συνήθως από την αναγωγή των θεικών αλάτων εξαιτίας αναερόβιων βιολογικών διεργασιών. Η οσμή αλλοιωμένου αυγού μπορεί να ανιχνευθεί σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 0.1 mg/l. Το βακτήριο που είναι συνήθως υπεύθυνο για την παραγωγή του υδρόθειου είναι το *Desulfovibrio desulfuricans*. Άλλες θειούχες ενώσεις, που οφείλονται σε μικροβιολογικές δράσεις και δημιουργούν οσμές και γεύσεις έλους-ιχθύος, είναι τα μεθυλοπολυσουλφίδια και η μεθυλομερκαπτάνη. Η οσμή είναι ένα οργανοληπτικό χαρακτηριστικό ή «εμφανές χαρακτηριστικό», το οποίο μπορεί να εκτιμηθεί εύκολα με τις αισθήσεις και γι' αυτό είναι υποκειμενικό, που μπορεί ωστόσο να αποτελέσει κριτήριο για την ταξινόμηση των νερών σε κατηγορίες χρήσεων (πόση, αναψυχή, διαβίωση ψαριών κ.λ.π.). Η οσμή των νερών στους επιφανειακούς ταμιευτήρες μπορεί να οφείλεται σε φυσικά ή ανθρωπογενή αίτια.

Όταν επικρατούν αναερόβιες συνθήκες, τα προϊόντα της διάσπασης της οργανικής ύλης είναι το υδρόθειο (H_2S), η αμμωνία (NH_3), το μεθάνιο (CH_4), αέρια δύσσομα, τοξικά και εκρηκτικά. Η ένταση των οσμών δεν εξαρτάται πάντα από τη συγκέντρωση των ουσιών που την προκαλούν αλλά και από την πτητικότητα. Αν και το όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της οσμής είναι η ανθρώπινη μύτη, υπάρχουν συγκεκριμένες τεχνικές με τις οποίες προσδιορίζεται ποιοτικά και ποσοτικά. Η ποιοτική κατάταξη γίνεται με βάση κατηγορίες αντιπροσωπευτικών ουσιών με χαρακτηριστική οσμή π.χ. τα βιομηχανικά απόβλητα, το χλώριο, τα απόβλητα διυλιστηρίων, το υδρόθειο, η αμμωνία αντιστοιχίζονται στην κατηγορία της οσμής φαρμάκων, φυτά σε αποσύνθεση στην κατηγορία της οσμής μούχλας κ.λ.π. Ποσοτικά η οσμή προσδιορίζεται (βάσει ειδικών εξετάσεων και κάτω από ειδικές συνθήκες) με τη μέθοδο των διαδοχικών αραιώσεων. Το δείγμα αραιώνεται σταδιακά και σαν όριο καταγράφεται αυτό στο οποίο η οσμή είναι ελάχιστα αντιληπτή.

8.2.6 ΧΡΩΜΑ

Το χρώμα που βλέπουμε σε έναν υδάτινο αποδέκτη καθορίζεται από το μήκος κύματος της μονοχρωματικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο νερό, από το είδος των σωματιδίων που αιωρούνται, από το χρώμα του ιζήματος, από την παρουσία ανόργανων ή οργανικών ουσιών, από το είδος των πλαγκτονικών οργανισμών και τη βιολογική τους δραστηριότητα, ακόμη και από το γεωλογικό υπόστρωμα της περιοχής[9]. Όλοι αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την απορρόφηση του φωτός στο νερό και του προσδίδουν συγκεκριμένο χρώμα που μπορεί να είναι από πράσινο-γαλάζιο έως σκούρο καφετί. Η απορρόφηση του φωτός υπολογίζεται με το συντελεστή απορρόφησης, ο οποίος είναι διαφορετικός για κάθε είδος φυσικού νερού αλλά και για κάθε μήκος κύματος του φωτός. Έτσι οι διαφανείς λίμνες έχουν μικρό συντελεστή απορρόφησης, ενώ οι θολές και εύτροφες (λίμνες που περιέχουν μεγάλη συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων και πλαγκτού και μικρή περιεκτικότητα σε οξυγόνο) μεγάλο.

Το χρώμα του νερού ενός φυσικού αποδέκτη μπορεί ν' αλλάζει εποχιακά, όταν εξαιτίας της διάχυσης του ιζήματος κατά τη φθινοπωρινή και εαρινή αναστροφή αναπτύσσεται υπερβολικά το φυτοπλαγκτόν εντείνοντας το πράσινο χρώμα ή με τη μεταφορά φερτών υλών από τη λεκάνη απορροής που προσδίδουν φαιό χρώμα στο νερό. Φυσικά νερά με έντονη βιολογική δραστηριότητα έχουν χρώμα πράσινο, ενώ αυτά με ασθενέστερη βιολογική δραστηριότητα έχουν χρώμα πράσινο-γαλάζιο. Ο χρωματισμός αποτελεί ένδειξη για την παρουσία συγκεκριμένων χημικών ουσιών π.χ. η παρουσία θείου (S) προσδίδει στο νερό κιτρινωπό χρώμα ενώ η παρουσία ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) πράσινο χρώμα.

Το χρώμα στο πόσιμο νερό είναι αισθητικά ανεπιθύμητο. Νερό που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση και έχει χρώμα πρέπει να εξεταστεί χημικά για να αναζητηθεί η προέλευσή του. Το καθαρό φυσικό νερό είναι διαυγές και άχρωμο σε μικρές μάζες. Όμως η παρουσία ορισμένων μεταλλικών ιόντων, όπως σιδήρου (Fe^{2+}) και μαγγανίου (Mn^{2+}) που βρίσκονται στη φύση, προσδίδουν στο νερό κάποιο χρώμα. Ακόμα το χρώμα στο φυσικό νερό μπορεί να οφείλεται σε άλλες χημικές ενώσεις, στο πλαγκτόν και σε βιομηχανικά απόβλητα (π.χ. απόβλητα βαφείων κ.α.).

Πολλές φορές το χρώμα χρησιμεύει και σαν ιχνηλάτης για τον προσδιορισμό του τόπου προέλευσης του νερού και έτσι μπορεί να θεωρηθεί και έμμεσος δείκτης

μόλυνσης. Για παράδειγμα το κοκκινωπό χρώμα είναι ενδεικτικό ύπαρξης ενώσεων σιδήρου (Fe), ενώ το γαλάζιο οφείλεται σε ύπαρξη χαλκού (Cu) ή των ενώσεών του. Το μελανό χρώμα μπορεί να οφείλεται σε ύπαρξη οργανικών οξέων και τανίνης.

Οι διεργασίες που εφαρμόζονται για την αντιμετώπιση του χρώματος είναι η οξειδωση, η προσρόφηση και η διήθηση. Ο προσδιορισμός του χρώματος στηρίζεται στην οπτική σύγκριση του δείγματος με έγχρωμο διάλυμα γνωστής συγκέντρωσης που παρασκευάζεται στο εργαστήριο. Το διάλυμα αυτό περιέχει λευκόχρυσο (Pt) και κοβάλτιο (Co). Με διαδοχικές αραιώσεις αυτού του προτύπου διαλύματος λαμβάνονται διαλύματα με συγκεκριμένες τιμές χρώματος της κλίμακας Pt/Co. Το δείγμα συγκρίνεται με τα πρότυπα αυτά διαλύματα της κλίμακας Pt/Co και το αποτέλεσμα της παρατήρησης εκφράζεται σε mg/l.

8.2.7 ΘΟΛΟΤΗΤΑ

Με τον όρο θολότητα εννοούμε την απουσία διαύγειας σε ένα υγρό δείγμα. Πιο συγκεκριμένα, θολότητα είναι η αντίσταση του νερού στην διέλευση του φωτός και οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη λεπτόκοκκων σωματιδίων ανόργανων και οργανικών υλικών, τα οποία αιωρούνται ή βρίσκονται σε κolloειδή μορφή και είναι διάσπαρτα στην υγρή φάση. Ως **Κolloειδές** χαρακτηρίζεται το ομογενές μίγμα που περιέχει μικροσκοπικά σωματίδια διαμέτρου 10^{-7} - 10^{-8} μιας χημικής ουσίας ομοιόμορφα διασκορπισμένα μέσα σε μια άλλη που παραμένουν μη αναμίξιμα[10].

Νερό που είναι θολό πρέπει να ελεγχθεί για ρύπανση. Κατανάλωση θολού νερού μπορεί να είναι επικίνδυνη για την υγεία. Η θολότητα είναι η περισσότερο μεταβαλλόμενη παράμετρος ποιότητας του νερού, η οποία καθορίζει συχνά την επιλογή της μεθόδου επεξεργασίας του.

Οι μέθοδοι που συνήθως εφαρμόζονται για την απομάκρυνση της θολότητας του νερού είναι η καθίζηση και η διήθηση. Η απολύμανση του πόσιμου νερού δεν είναι αποτελεσματική αν υπάρχει θολότητα, γιατί πολλοί παθογόνοι οργανισμοί εγκλωβίζονται στα σωματίδια που αιωρούνται με αποτέλεσμα έτσι να προστατεύονται από το απολυμαντικό. Επίσης, αυτά τα σωματίδια μπορεί να απορροφήσουν επιβλαβείς οργανικές ή ανόργανες ουσίες.

Το πόσιμο νερό που φτάνει στον καταναλωτή πρέπει να είναι διαυγές και όχι θολό. Η θολότητα προκαλεί εξασθένηση της έντασης της διερχόμενης φωτεινής ακτινοβολίας λόγω φαινομένων σκέδασης και απορρόφησης και μετριέται σε μονάδες

θολότητας (NTU) (Nephelometric Turbidity Units) ή σε mg/l (ppm) διοξειδίου του πυριτίου (SiO₂). Ως μονάδα θολότητας λαμβάνεται η περιεκτικότητα 1 mg SiO₂ σε 1 Lt νερού. Με τον όρο σκέδαση ή σκέδαση του φωτός ονομάζεται ο διασκορπισμός των φωτεινών ακτίνων που ακολουθεί όταν προσπέσουν σε μικροσκοπικά σωματίδια, έτσι ώστε να διαχέονται στο χώρο χωρίς να φαίνονται αυτές

Η μέτρηση της θολότητας γίνεται με το θολερόμετρο (ή νεφελόμετρο) και βασίζεται στη σύγκριση της έντασης του φωτός που υφίσταται διάχυση περνώντας μέσα από ένα δείγμα νερού (ή αποβλήτων) με την ένταση του φωτός που υφίσταται διάχυση κατά τη διέλευσή του από ένα πρότυπο αιώρημα κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Το όργανο διαθέτει μια πηγή φωτός και ένα σύστημα ένδειξης της έντασης του διαχεομένου φωτός σε γωνία 90° ως προς την προσπίπτουσα δέσμη όταν αυτή διέρχεται από το προς εξέταση δείγμα. Σημειώνεται ότι εάν ένα δείγμα περιέχει διαλυμένα υλικά που προσδίδουν χρώμα είναι ενδεχόμενο να προκαλείται απορρόφηση και μείωση της έντασης του σκεδαζόμενου φωτός με επίπτωση στην τιμή της μετρούμενης θολότητας.

8.2.8 ΑΛΑΤΑ-ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη συγκέντρωση και το είδος των αλάτων που περιέχονται στο νερό είναι το γήινο υπόβαθρο, το pH και η θερμοκρασία[8]. Η χημική σύσταση των φυσικών νερών μπορεί να τροποποιηθεί με τη βοήθεια των βιολογικών μεταβολισμών. Ο υδρολογικός κύκλος επιδρά στην αύξηση ή μείωση της συγκέντρωσης των διαφόρων χημικών στοιχείων.

Τα συνήθη ανόργανα συστατικά των φυσικών νερών είναι το ασβέστιο (Ca), το μαγνήσιο (Mg), το νάτριο (Na), το κάλιο (K), τα όξινα ανθρακικά (HCO₃⁻), τα ανθρακικά (CO₃²⁻), τα χλωριούχα (Cl⁻), τα θειικά (SO₄²⁻), τα νιτρικά (NO₃⁻) και τα πυριτικά. Οι συγκεντρώσεις των όξινων ανθρακικών για τα πόσιμα νερά κυμαίνονται από 200–400 mg/l. Οι συγκεντρώσεις των υπολοίπων στοιχείων κυμαίνονται από 1 – 100 mg/l. Άλλα συστατικά, των οποίων οι συγκεντρώσεις κυμαίνονται από 0,01–1 mg/l είναι η αμμωνία (NH₃), τα νιτρώδη (NO₂⁻), τα φωσφορικά (PO₄³⁻), ο σίδηρος (Fe), το μαγγάνιο (Mn) και το φθόριο (F). Ανάλογα με το γήινο υπόβαθρο της περιοχής, τη γεωργική και τη βιομηχανική ρύπανση, είναι δυνατόν να υπάρχει στο νερό κάθε στοιχείο του περιοδικού πίνακα σε πολύ χαμηλή συγκέντρωση (μg/l) ως ιχνοστοιχείο.

Το νερό της βροχής περιέχει πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις αλάτων σε αντίθεση με τα υπόγεια και επιφανειακά νερά τα οποία περιέχουν μεγάλες ποσότητες αλάτων. Ενώσεις που υπάρχουν από φυσική προέλευση στο νερό, αλλά η υπέρβαση της περιεκτικότητας τους πάνω από τα επιτρεπτά όρια μπορεί να κάνει το νερό ακατάλληλο για χρήση ανήκουν στις περιοριστικές παραμέτρους. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνεται και η σκληρότητα του νερού, μια παράμετρος, που εκφράζει την περιεκτικότητα του νερού σε πολυσθενή κατιόντα κυρίως ασβεστίου (Ca^{2+}) και μαγνησίου (Mg^{2+}) και διακρίνεται σε ολική, προσωρινή και μόνιμη. Το σκληρό νερό δεν έχει καλή γεύση, εμποδίζει το καλό βράσιμο των τροφίμων, δεν κάνει αφρό με το σαπούνι και δημιουργεί επικαθήσεις στις σωληνώσεις και στις οικιακές συσκευές. Επίσης, σε ορισμένες βιομηχανίες (βυρσοδεψεία, βαφεία, χημικών και φαρμακευτικών προϊόντων) το σκληρό νερό είναι επιζήμιο στην κατεργασία και στο τελικό προϊόν. Πολύ σοβαρές βιομηχανικές ενοχλήσεις δημιουργεί στους ατμολέβητες αφήνοντας μετά την εξάτμιση σημαντικές ποσότητες στερεών αποθεμάτων (πουρί). Η απομάκρυνση των διαλυμένων αλάτων στο νερό είναι δυνατή ουσιαστικά μόνο με την εφαρμογή μεθόδων αφαλάτωσης.

Η ολική σκληρότητα αναφέρεται στα νερά που κατά κανόνα περιέχουν σημαντικές ποσότητες κατιόντων ασβεστίου (Ca^{2+}) και μαγνησίου (Mg^{2+}) με τη μορφή του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) και ανθρακικού μαγνησίου (MgCO_3). Εάν συνυπάρχουν και άλλα κατιόντα όπως του στροντίου, του βαρίου, του μαγγανίου, του ψευδαργύρου, του σιδήρου και του αργιλίου, τότε συμπεριλαμβάνονται και αυτά.

Η προσωρινή (ανθρακική) σκληρότητα οφείλεται σε όξινα ανθρακικά άλατα του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) και μαγνησίου ($\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$). Η σκληρότητα αυτή αφαιρείται με βρασμό του νερού και το μεν CO_2 διαφεύγει, τα δε αδιάλυτα CaCO_3 και MgCO_3 καθιζάνουν σαν ανθρακικά άλατα.

Η μόνιμη σκληρότητα οφείλεται στα ανθρακικά, θειούχα, χλωριούχα και νιτρικά άλατα του ασβεστίου και του μαγνησίου (CaCO_3 , MgCO_3 , CaSO_4 , MgSO_4 , CaCl_2 , MgCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$) και δεν αφαιρείται με βρασμό.

«Μαλακά» χαρακτηρίζονται τα νερά με σκληρότητα 0–100 mg/l ισοδύναμο CaCO_3 , «Μέσης σκληρότητας» τα νερά με σκληρότητα 100–200 mg/l ισοδύναμο CaCO_3 , «Σκληρά» τα νερά με σκληρότητα 200–300 mg/l ισοδύναμο CaCO_3 και «Πολύ σκληρά» τα νερά με σκληρότητα μεγαλύτερη από 300 mg/l ισοδύναμο CaCO_3 .

Άλλες μονάδες έκφρασης της σκληρότητας είναι ο Γαλλικός ($^{\circ}\text{F}$), ο Γερμανικός ($^{\circ}\text{D}$) και Αγγλικός ($^{\circ}\text{E}$) βαθμός σκληρότητας. Σύμφωνα με τη νομοθεσία η σκληρότητα του νερού μπορεί να είναι από 10 έως 50 γαλλικούς βαθμούς. Νερό με σκληρότητα μέχρι και 500 mg/l ισοδύναμο CaCO_3 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πόσιμο, αλλά οι πιο καλές τιμές είναι μεταξύ 80 και 150. Τα πολύ σκληρά νερά υφίστανται αποσκλήρυνση ή αναμιγνύονται με πιο μαλακά νερά.

9. ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

Ο διαχωρισμός των υδατικών πόρων σε υπόγειους και επιφανειακούς είναι ένας διαχωρισμός τεχνητός και ορισμένες φορές, τουλάχιστον από άποψη διαχείρισης αποπροσανατολιστικός, αφού υπάρχει μια δυναμική σχέση που τους συνδέει όταν υπάρχει υδραυλική επικοινωνία μεταξύ τους[11]. Έτσι η μεταβολή στις υδραυλικές συνθήκες, που ορίζουν τη λειτουργία επιφανειακών υδατικών πόρων, έχει άμεσες επιπτώσεις στις συνθήκες λειτουργίας υπόγειων υδατικών πόρων, όταν βέβαια υπάρχει μεταξύ τους υδραυλική επικοινωνία, και αντιστρόφως.

Όσο όμως έντονη φαίνεται η συσχέτιση επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων, από άποψη διαχείρισης του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού, τόσο έντονες είναι και οι διαφορές στην υδραυλική λειτουργία τους. Το τελευταίο αυτό στοιχείο υποχρεώνει το μελετητή στο διαχωρισμό του τρόπου προσέγγισης και κατανόησης της λειτουργίας των υδατικών αυτών πόρων. Παρόλο που η παράλληλη χρησιμοποίηση διαθέσιμων επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων φαίνεται προφανής, σε πολλά προγράμματα διαχείρισης παρουσιάζεται μια διστακτικότητα στην εκμετάλλευση των υπόγειων υδατικών πόρων για τους παρακάτω συνήθως λόγους:

-Η εκμετάλλευση υπόγειων υδατικών πόρων είναι δαπανηρή από άποψη ενέργειας, που απαιτείται για την άντληση, ειδικά αν η στάθμη του νερού είναι σε μεγάλο βάθος.

-Ο σχεδιασμός της εκμετάλλευσης υπόγειων υδατικών πόρων απαιτεί συλλογή δεδομένων για μεγάλο χρονικό διάστημα, κάτι που συνήθως δεν είναι εφικτό.

-Ο σχεδιασμός και η εκτίμηση υπόγειων υδατικών πόρων απαιτεί εξειδικευμένο επιστημονικό προσωπικό που δεν είναι πάντα διαθέσιμο.

-Δεν υπάρχει οπτική επαφή με τους υπόγειους υδατικούς πόρους, όπως υπάρχει με τους επιφανειακούς, ώστε να διευκολύνεται η κατανόηση της λειτουργίας τους.

-Είναι δύσκολο να προβλέψει κανείς την απόκριση ενός υδροφορέα σε προτεινόμενα σενάρια διαχείρισης.

Από την άλλη μεριά όμως :

-Μπορεί το κόστος άντλησης από ένα υδροφορέα να είναι μεγάλο, αλλά είναι αμελητέο μπροστά στο αρχικό κεφάλαιο που απαιτείται για την εκμετάλλευση επιφανειακών πόρων (υδραυλικές κατασκευές, αγωγοί μεταφοράς, φράγματα κ.λ.π.).

-Λόγω της μεγάλης αποθηκευτικής ικανότητας αλλά και των πολύ μικρών ταχυτήτων ροής, οι αντιδράσεις των υδροφορέων αντικατοπτρίζουν μακροχρόνια υδρολογικά φαινόμενα αφού οι μεταβολές τους είναι μικρές, σε αντίθεση με τους επιφανειακούς υδατικούς πόρους όπου οι αντιδράσεις είναι άμεσες. Αυτό σημαίνει ότι βραχυχρόνια δείγματα δεδομένων είναι δυνατό να δώσουν μια ικανοποιητική προσέγγιση της λειτουργίας ενός υδροφορέα, ενώ για τη λειτουργία επιφανειακών υδατικών πόρων απαιτούνται μακροχρόνια δείγματα δεδομένων για να αντληφθεί κανείς την άμεση μεταβλητότητα τους σε σχέση με τα εκάστοτε αίτια που την προκαλούν.

-Η αναγνώριση της ανάγκης εκμετάλλευσης υπόγειων υδατικών πόρων οδήγησε στην καλύτερη εκπαίδευση και εξειδίκευση επιστημόνων στο συγκεκριμένο αντικείμενο με αποτέλεσμα περισσότεροι μηχανικοί και υδρογεωλόγοι να μπορούν να επιλύσουν προβλήματα λειτουργίας υπόγειων υδροφορέων.

-Με τα κατάλληλα δεδομένα, την αναγκαία εμπειρία και τα απαραίτητα μαθηματικά μοντέλα Η/Υ είναι δυνατή σήμερα η πρόβλεψη της απόκρισης υπόγειων υδροφορέων σε διάφορες θεωρητικές καταστάσεις και σενάρια διαχείρισης.

Είναι σαφές ότι ένας υδροφορέας αποτελεί ένα σύστημα που μπορεί κανείς να το χρησιμοποιήσει και να το διαχειριστεί ως μια ενότητα για να πετύχει διάφορους στόχους πέρα από την εκμετάλλευση του υδροφορέα ως πηγή νερού. Μερικές από τις λειτουργίες ενός υδροφορέα είναι οι εξής:

-Πηγή παροχής νερού.

-Δεξαμενή αποθήκευσης πλεονάζοντος νερού (με φυσικό ή ακόμα και τεχνητό τρόπο).

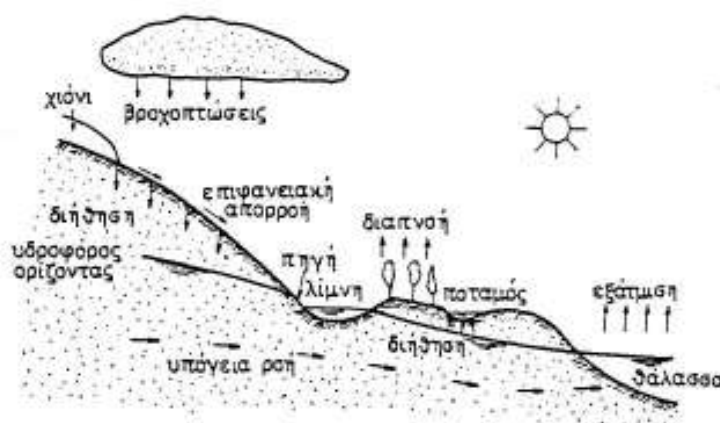
-Μεταφορά νερού.

-Καθαρισμός του νερού από αιωρούμενα σωματίδια και διάφορα χημικά στοιχεία.

-Έλεγχος ροής υδατορευμάτων.

Τα υπόγεια νερά αποτελούν λοιπόν ένα μικρό μέρος μιας τεράστιας ποσότητας νερού που βρίσκεται στον πλανήτη, ποσότητα που όμως δεν παραμένει στάσιμη, αλλά βρίσκεται σε μια διαρκή κυκλοφορία αλλά και μετατροπή στις διάφορες φάσεις του νερού (υγρή, στερεά, αέρια). Η κυκλοφορία αυτή παρουσιάζει περιοδική μεταβολή και είναι γνωστή ως υδρολογικός κύκλος (Βλ Σχήμα. 4)

Το υπόγειο νερό είναι αποθηκευμένο ή κινείται μέσα στα διάκενα των εδαφών ή των πετρωμάτων. Οι όγκοι αυτοί των γεωλογικών σχηματισμών, στους οποίους υπάρχει η δυνατότητα να κινηθεί το υπόγειο νερό, λέγονται υδροφορείς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα υδροφορέων αποτελούν οι αλλουβιακές αποθέσεις άμμων και χαλίκων. Αντίθετα, υπάρχουν τα λεγόμενα αδιαπέρατα στρώματα τα οποία, ενώ έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν-έστω και σε μικρές ποσότητες- νερό, πρακτικά δεν έχουν καμιά ικανότητα μεταφοράς του. Κλασικό παράδειγμα στην κατηγορία αυτή αποτελούν τα διάφορα αργιλικά εδάφη. Ανάμεσα στις δύο παραπάνω ακραίες κατηγορίες εδαφών υπάρχουν και ενδιάμεσες που έχουν σημαντικά μικρότερη, σε σχέση με τα διαπερατά στρώματα, ικανότητα μεταφοράς νερού. Τα εδαφικά αυτά στρώματα χαρακτηρίζονται γενικά ως ημιπερατά και τυπικό παράδειγμα τους είναι φακοί αργίλου σε εναλλαγή με αμμώδη εδάφη.



Σχήμα 4: Ο υδρολογικός κύκλος.

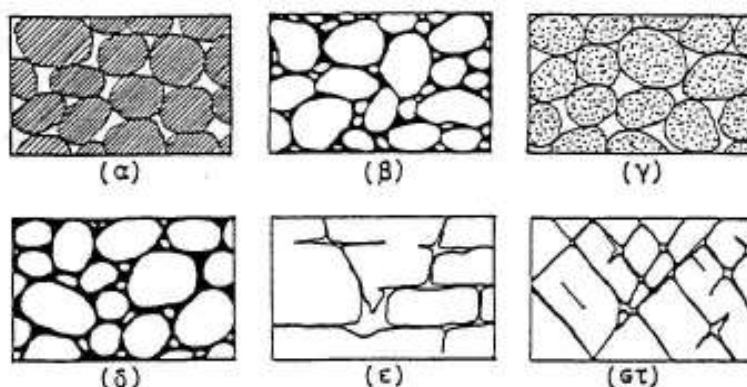
Η ροή του νερού στους υδροφορείς αναφέρεται συνήθως ως ροή σε πορώδη μέσα, αφού έτσι χαρακτηρίζονται όλα τα πετρώματα και εδάφη που αποτελούνται από ένα στερεό σκελετό με τη μορφή συνάθροισης στερεών κόκκων που διαχωρίζονται και περιβάλλονται από διάκενα, δηλαδή πόρους ή ρωγμές. Από την

πλευρά της μελέτης της κίνησης του υπόγειου νερού, ειδικά η περίπτωση των γεωλογικών σχηματισμών, όπου οι ρηγματώσεις έχουν σημαντικές διαστάσεις, αντιμετωπίζεται ως ιδιαίτερη κατηγορία φαινομένου που χαρακτηρίζεται ως ροή σε ρηγματωμένα μέσα. Από τη διάταξη λοιπόν του στερεού σκελετού και των διάκενων δημιουργείται και η ικανότητα του μέσου να μεταφέρει νερό. Τυπικές περιπτώσεις φαίνονται στο Σχήμα 5.

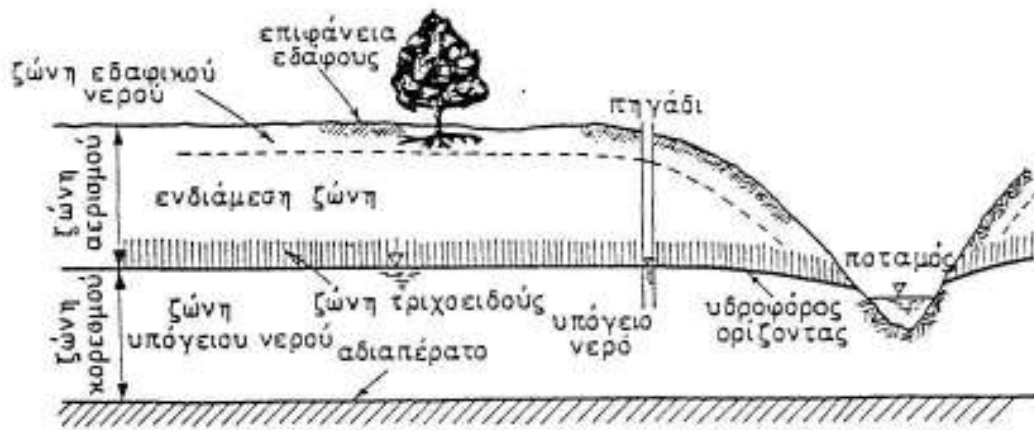
Το βασικό κριτήριο για μια γενικευμένη ταξινόμηση των υδροφορέων αποτελεί η θέση της ανώτατης στάθμης του νερού στο έδαφος. Θεωρώντας μια κατακόρυφη κατανομή του νερού στο έδαφος, παρατηρούνται δύο ζώνες στις οποίες οι νόμοι της κίνησης του είναι τελείως διαφορετικοί:

- α) η ζώνη αερισμού ή ακόρεστη ζώνη και
- β) η ζώνη κορεσμού ή κορεσμένη ζώνη (Βλ Σχήμα 6)

Το άνω όριο της ζώνης κορεσμού ονομάζεται υδροφόρος ή φρεάτιος ορίζοντας. Ενώ λοιπόν η κίνηση του νερού στη ζώνη αερισμού γίνεται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, στη ζώνη κορεσμού γίνεται οριζόντια, ή πιο σωστά σχεδόν οριζόντια. Επειδή τα προβλήματα που αφορούν στη διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων αναφέρονται στους υδάτινους όγκους που κινούνται ή αποθηκεύονται στη ζώνη κορεσμού, η θεωρητική και μαθηματική διερεύνηση του παρόντος συγγράμματος αφορά αποκλειστικά στους συγκεκριμένους μηχανισμούς κίνησης και μεταφοράς νερού αλλά και διαλυμένων σ' αυτό ουσιών μόνο στη ζώνη αυτή.

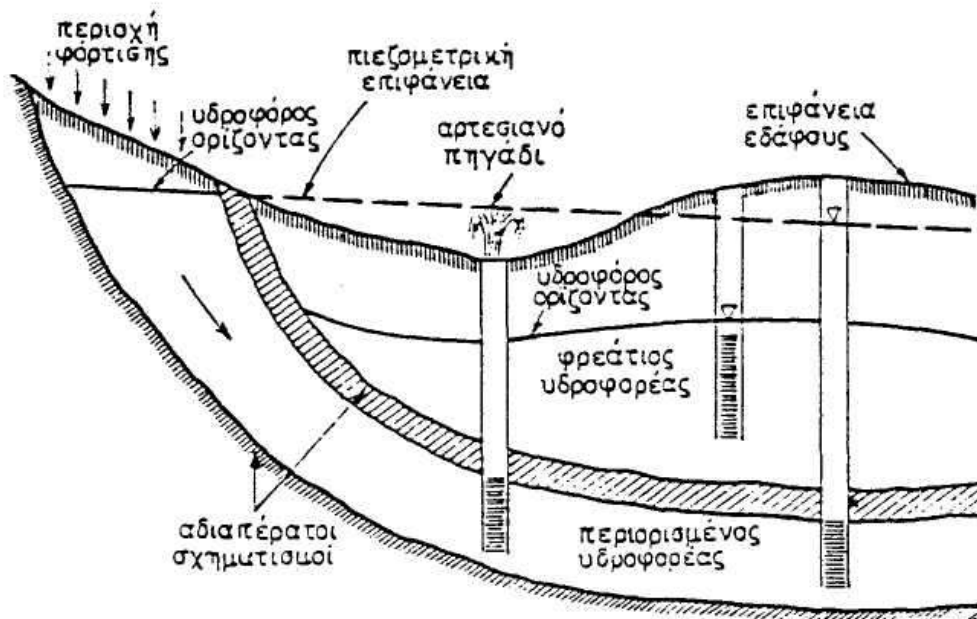


Σχήμα 5: Διάφοροι τύποι διάταξης στερεού σκελετού και διάκενων.



Σχήμα 6: Η κατανομή του υπόγειου νερού κατά βάθος.

Μια πρώτη ταξινόμηση των υδροφορέων που συνήθως εμφανίζονται στη φύση γίνεται ανάλογα με τη γεωλογική τους δομή αλλά και τις υδραυλικές συνθήκες που επικρατούν σ' αυτούς (Βλ. Σχήμα 7). Ο βασικός διαχωρισμός πάντως γίνεται σε συνάρτηση με το αν υπάρχει στον υδροφορέα ελεύθερη επιφάνεια του νερού ή όχι.

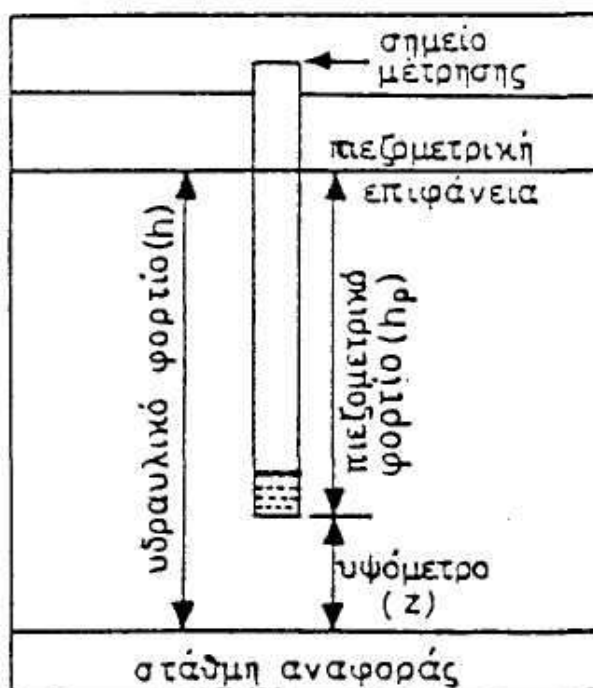


Σχήμα 7: Τύποι υπόγειων υδροφορέων.

Έτσι, όταν υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια (υδροφόρος οριζοντας) ο υδροφορέας ονομάζεται φρεάτιος. Χαρακτηριστικό των φρεάτιων υδροφορέων είναι ότι η ελεύθερη επιφάνειά τους δεν παραμένει σταθερή, αλλά ανεβαίνει ή κατεβαίνει

αποκρινόμενη στις μεταβολές του διηθούμενου νερού, τόσο από την επιφάνεια του εδάφους όσο και από ή προς γειτονικούς υδροφορείς. Αντίθετα, ένας υδροφορέας ονομάζεται περιορισμένος ή υπό πίεση αν περιορίζεται τόσο από κάτω όσο και από πάνω από αδιαπέρατους γεωλογικούς σχηματισμούς. Συνέπεια των οριακών αυτών συνθηκών είναι ότι το νερό σ' έναν περιορισμένο υδροφορέα βρίσκεται πάντα υπό πίεση. Αυτή η κατάσταση μπορεί να διαπιστωθεί εύκολα στο πεδίο αν υπάρχει κάποιο πηγάδι, αφού η στάθμη του νερού σ' αυτό πρέπει να είναι ψηλότερη από το πάνω όριο του υδροφορέα. Αν μάλιστα η στάθμη της πιεζομετρικής επιφάνειας του υδροφορέα βρίσκεται ψηλότερα και από την επιφάνεια του εδάφους τότε ο υδροφορέας λέγεται αρτεσιανός (Βλ. Σχήμα 7).

Η μέτρηση της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας για τους φρεάτιους υδροφορείς, ή της πιεζομετρικής επιφάνειας για τους περιορισμένους, γίνεται χρησιμοποιώντας πηγάδια παρατήρησης, πηγάδια εκμετάλλευσης ή πιεζόμετρα. Με βάση τις μετρήσεις αυτές υπολογίζεται το (ολικό) υδραυλικό φορτίο, $h[L]$, που συνήθως μετριέται από την επιφάνεια της θάλασσας και που ορίζεται ως το άθροισμα του φορτίου πίεσης, $h_p = p/\rho g$, και του υψομέτρου, z (Βλ. Σχήμα 8).



Σχήμα 8: Το υδραυλικό φορτίο και οι συνιστώσες του.

Εφόσον ο υδροφορέας είναι φρεάτιος το μέγεθος του h καθορίζει και τη θέση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού. Αν πάλι πρόκειται για περιορισμένο υδροφορέα τότε το φορτίο αυτό προσδιορίζει την πίεση που έχει το υπόγειο νερό σε κάθε σημείο του υδροφορέα, καλείται πιεζομετρικό φορτίο και-για πρακτικούς λόγους- διαφοροποιείται από τον γενικό συμβολισμό του υδραυλικού φορτίου και συμβολίζεται με $\varphi[L]$.

Η κίνηση του νερού στους υδροφορείς εξαρτάται τόσο από τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα όσο και από την υδραυλική κλίση, $J [L/L]$, της ελεύθερης ή πιεζομετρικής επιφάνειας, τη μεταβολή δηλαδή του φορτίου ανά μονάδα μήκους. Έτσι η παροχή $Q [L^3/T]$ οποιασδήποτε υπόγειας ροής μπορεί να υπολογισθεί εφαρμόζοντας τον νόμο του Darcy:

$$Q = KAJ \quad [11]$$

όπου η παράμετρος $K [L/T]$, χαρακτηρίζει τη διαπερατότητα του πορώδους μέσου και λέγεται υδραυλική αγωγιμότητα ενώ $A [L^2]$ είναι το εμβαδόν της διατομής του υδροφορέα μέσα από την οποία γίνεται η ροή.

Η ικανότητα ενός υδροφορέα να μεταφέρει νερό χαρακτηρίζεται από μια υδροδυναμική παράμετρο που καλείται μεταφορικότητα, $T [L^2/T]$, και ισούται με το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας επί το πάχος, b , ενός φρεατίου υδροφορέα ή του ύψους, h , της κορεσμένης ζώνης ενός ελεύθερου υδροφορέα. Μια άλλη σημαντική υδροδυναμική παράμετρος είναι η αποθηκευτικότητα, S , που εκφράζει την ποσότητα του νερού που απομακρύνεται ή προστίθεται στον αποθηκευμένο όγκο νερού ανά μονάδα επιφάνειας του υδροφορέα εξαιτίας μιας μοναδιαίας αύξησης στο φορτίο. Η τιμή της παραμέτρου αυτής στους φρεάτιους υδροφορείς ισούται με την ειδική απόδοση και κυμαίνεται από 0.1 ως 0.3 ενώ είναι πολύ μικρότερη στους περιορισμένους υδροφορείς, όπου κυμαίνεται από 10^{-4} ως 10^{-5} .

Η παραπάνω γενικευμένη ταξινόμηση των υδροφορέων δεν μπορεί να καλύψει την πολυπλοκότητα των σχηματισμών που παρουσιάζονται στη φύση. Έτσι, κυρίως οι γεωλογικές αλλά και άλλες συνθήκες διαφοροποιούν σημαντικά τους υδροφορείς από περιοχή σε περιοχή, με αποτέλεσμα κάθε προσπάθεια χαρακτηρισμού του ειδικού τύπου υδροφορέα να απαιτεί όχι μόνο εξειδικευμένη γνώση αλλά και συστηματική επιτόπου έρευνα.

Σε ό,τι αφορά τη ρύπανση των υπόγειων νερών, είναι προφανές ότι το υδρογεωλογικό περιβάλλον, δηλαδή ο τύπος τελικά του υδροφορέα, παίζει καθοριστικό ρόλο αφού επηρεάζει τα φαινόμενα μεταφοράς και διασποράς των

ρύπων. Ένα βασικό στοιχείο που διαφοροποιείται, ανάλογα με το αν ο υδροφορέας είναι περιορισμένος ή φρεάτιος, είναι η μεταβλητότητα στον χρόνο των ποιοτικών χαρακτηριστικών των υπόγειων νερών. Έτσι, όταν πρόκειται για περιορισμένο υδροφορέα γίνεται συνήθως-και όχι αδικαιολόγητα-η υπόθεση ότι η ποιότητα του υπόγειου νερού σε κάθε θέση παραμένει σταθερή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις περιπτώσεις αυτές δεν παρατηρούνται έντονες μεταβολές στις συνθήκες ροής.

Σε εκτεταμένους βέβαια υδροφορείς υπό πίεση, όπου εμφανίζονται μεγάλες μεταβολές στο υδραυλικό φορτίο, π.χ. από αντλήσεις, η πιθανότητα μεταβολών των ρυπαντικών φορτίων ή μετακίνησης νερών διαφορετικής ποιότητας από ή προς γειτονικούς υδροφορείς είναι σημαντική.

Σε αντίθεση με τους περιορισμένους, η ποιότητα του υπόγειου νερού σε φρεάτιους, και κυρίως αβαθείς, υδροφορείς μπορεί να μεταβάλλεται πολύ και σε μικρά ακόμα χρονικά διαστήματα, π.χ. λίγων ημερών ή και ωρών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι υδροφορείς αυτοί επηρεάζονται άμεσα από μεταβολές στον όγκο που προστίθεται ή αφαιρείται είτε από φυσικές πηγές (βροχοπτώσεις) είτε από ανθρωπογενείς (αντλήσεις), είτε από τον συνδυασμό τους.

10. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες η φυσική ποιότητα των υδατικών πόρων μεταβλήθηκε σημαντικά εξ' αιτίας των διαφόρων ανθρώπινων δραστηριοτήτων και χρήσεων του νερού. Οι περισσότερες περιπτώσεις ρύπανσης αναπτύχθηκαν βαθμιαία μέχρις ότου έγιναν φανερές και μετρήσιμες. Χρειάστηκε πολύς χρόνος μέχρι να φτάσει ο άνθρωπος στην αναγνώριση των προβλημάτων ρύπανσης και ακόμα περισσότερος για να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις και οι έλεγχοι[12].

Στα μέσα του εικοστού αιώνα και ταυτόχρονα με τη μεγάλη βιομηχανική ανάπτυξη, εμφανίστηκε στα μεγάλα ποτάμια της Ευρώπης και Β. Αμερικής, το πρόβλημα της σοβαρής εποχιακής μείωσης του οξυγόνου, το οποίο οφειλόταν στην υπερφόρτωση των ποταμών με αποικοδομούμενα οργανικά λύματα αστικής και βιομηχανικής προέλευσης. Το γεγονός αυτό προκάλεσε γενική υποβάθμιση της ποιότητας των νερών τους. Το πρόβλημα αυτό ακολούθησαν και άλλα διαφορετικής μορφής, έκτασης και έντασης ποιοτικά προβλήματα (συσσώρευση βαρέων μετάλλων

και οργανικών μικρορύπων, οξίνιση και τέλος αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών.

Η υπερφόρτιση των υδατορευμάτων με βιοαποικοδομήσιμα οργανικά απόβλητα από τους παρόχθιους οικισμούς και βιομηχανίες αντιμετωπίστηκε με την εγκατάσταση βιολογικών σταθμών επεξεργασίας και το αποτέλεσμα ήταν η βαθμιαία αποκατάσταση της ποιότητας του νερού των ποταμών. Παράλληλα όμως εμφανίστηκε το πρόβλημα του ευτροφισμού, που οφείλεται στις εισροές κυρίως φωσφόρου και αζώτου. Ο έλεγχος του ευτροφισμού επιτεύχθηκε με την μείωση του φώσφορου, ενός από τα βασικά θρεπτικά συστατικά, αν και η αποκατάσταση των λιμνών και ταμιευτήρων γίνεται βραδέως και για την πλήρη αποκατάσταση τους απαιτείται αρκετός χρόνος.

Στη δεκαετία του 1970 νέα προβλήματα εμφανίζονται από τη βαθμιαία αύξηση των βαρέων μετάλλων στα ιζήματα και στο νερό των ποταμών και λιμνών. Η βιοσυσσώρευση στα ψάρια είχε σαν αποτέλεσμα την ανάγκη επέμβασης στις πηγές τους, ιδιαίτερα των πιο επιβλαβών μετάλλων, όπως ο υδράργυρος και ο μόλυβδος. Την ίδια περίοδο η ρύπανση του περιβάλλοντος εισέρχεται σε μια νέα φάση από την παραγωγή και χρήση πολλών συνθετικών ουσιών. Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχουν αυτές παντού σήμερα στα υπόγεια και επιφανειακά νερά. Οι επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων και των οικοσυστημάτων άρχισαν να μελετούνται εντατικά και η έρευνα για τον έλεγχο, μείωση ή περιορισμό τους αποτελούν την κύρια προσπάθεια των επόμενων ετών.

Άλλα προβλήματα που εμφανίστηκαν αυτή την περίοδο είναι η ατμοσφαιρική μεταφορά των αερίων ρύπων από τις καύσεις των ορυκτών καυσίμων, η οξίνιση των λιμνών και των ποταμών και η μεταφορά των ρύπων αυτών στα υπόγεια νερά. Από τα πρώτα χρόνια της δεκαετίας του ογδόντα παρατηρήθηκε ότι τα νιτρικά στα υπόγεια και επιφανειακά νερά σε πολλές περιπτώσεις υπερβαίνουν τα συνιστώμενα όρια. Η αιτία είναι η εκτεταμένη χρήση των αζωτούχων λιπασμάτων και των στερεών αποβλήτων (ζώων και λάσπης βιολογικών σταθμών).

Τα τελευταία χρόνια τα περιβαλλοντικά προβλήματα επεκτείνονται σε παγκόσμια κλίμακα. Στα προβλήματα αυτά περιλαμβάνονται η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου από την αύξηση των εκπομπών κυρίως του CO₂, η αύξηση του επιπέδου της θάλασσας από το λιώσιμο των πάγων των πόλων, οι μεγάλες και καταστροφικές πλημμύρες λόγω της αύξησης της

ραγδαιότητας των βροχών και η ερημοποίηση νέων εκτάσεων λόγω των κλιματικών αλλαγών.

Η χώρα μας, η οποία δεν ακολούθησε την ίδια πορεία ανάπτυξης με αυτή των χωρών της Βόρειας Ευρώπης, δεν αντιμετώπισε με την ίδια χρονολογική ακολουθία και ένταση παρόμοια προβλήματα ρύπανσης των επιφανειακών υδατικών πόρων της. Όμως η συγκέντρωση του πληθυσμού σε ορισμένα αστικά κέντρα, η ευρύτατη και ανεξέλεγκτη εφαρμογή χημικών λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων στη γεωργία, η ραγδαία αυξανόμενη εισαγωγή χημικών ουσιών στο περιβάλλον, η ευρύτατη διασυνοριακή μεταφορά ρύπων, η γενική αλλαγή των υδρογεωλογικών κύκλων και η απουσία συστηματικής εφαρμογής μέτρων ελέγχου, φέρνουν τη χώρα μας μπροστά σε προβλήματα ρύπανσης δεύτερης και τρίτης γενιάς, τη στιγμή που δεν έχουν ακόμα αντιμετωπιστεί επαρκώς τα «παραδοσιακά» προβλήματα ρύπανσης.

Η ρύπανση και η μόλυνση των υδατικών πόρων απασχολεί επί δεκαετίες τη διεθνή κοινότητα. Η μόλυνση του νερού από παθογόνους μικροοργανισμούς είναι το κύριο πρόβλημα στις περισσότερες υπανάπτυκτες και αναπτυσσόμενες χώρες, ενώ η χημική ρύπανση του νερού έχει ανακύψει σαν εξίσου σοβαρή απειλή σ' όλες τις χώρες με γεωργική και βιομηχανική ανάπτυξη. Αυτοί οι κίνδυνοι για τον άνθρωπο και το περιβάλλον αναγνωρίστηκαν από τον Ο.Η.Ε. και το 1975, στα πλαίσια του προγράμματός του για το περιβάλλον (UNEP), ιδρύθηκε το Παγκόσμιο Περιβαλλοντικό Σύστημα Επιμελητείας (GEMS).

Πολλά διεθνή προγράμματα ελέγχου εφαρμόστηκαν από την UNEP, τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO), τον Παγκόσμιο Οργανισμό Μετεωρολογίας (WMO), τον Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας (FAO), τον Οργανισμό Εκπαίδευσης, Επιστήμης και Πολιτισμού (UNESCO) και άλλους διεθνείς και διακυβερνητικούς οργανισμούς. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ποιότητα και τη συμφωνία των στοιχείων που λαμβάνονται (ίδιες μεθοδολογίες μέτρησης), γεγονός που αυξάνει την αξία και την εγκυρότητα των μετρήσεων, έτσι ώστε τα στοιχεία αυτά να καταστούν χρήσιμα δεδομένα για την εκτίμηση της κατάστασης του περιβάλλοντος.

Παρόμοια δράση ανέλαβε η ΕΟΚ (1977), θεσπίζοντας κοινή διαδικασία ανταλλαγής πληροφοριών σχετικά με την ποιότητα των γλυκών επιφανειακών νερών. Η απόφαση έχει τροποποιηθεί το 1986. Οι τρεις βασικοί στόχοι της απόφασης είναι:

1) Να χαρακτηριστεί ο βαθμός ρύπανσης των ποταμών της Κοινότητας και να χαραχθούν κατευθυντήριες γραμμές για τον έλεγχο της ρύπανσης και των οχλήσεων.

2) Να παρακολουθούνται οι μακροπρόθεσμες τάσεις και οι βελτιώσεις που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της εφαρμογής της εθνικής και κοινοτικής νομοθεσίας.

3) Να καταστεί δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που διενεργούνται στους σταθμούς δειγματοληψίας μετρήσεων.

Τα κράτη μέλη μετρούν 19 συγκεκριμένες φυσικές, χημικές, μικροβιολογικές και βιολογικές παραμέτρους σε 126 σταθμούς, που βρίσκονται κυρίως στους μεγάλους ποταμούς της Ευρώπης και διαβιβάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων στην Επιτροπή, κάθε χρόνο. Η Ελλάδα άρχισε να αναφέρει δεδομένα το 1982 από 6 σταθμούς. Οι παράμετροι αυτές είναι:

Φυσικές: Παροχή, Θερμοκρασία, pH και Αγωγιμότητα στους 20 °C.

Χημικές: Χλωρίοντα, Νιτρικά, Αμμώνιο, Διαλυμένο οξυγόνο, BOD5, COD, Ολικός φωσφόρος, Ολικό Κάδμιο και Υδράργυρος.

Μικροβιολογικές: Κολοβακτηρίδια κοπράνων, Ολικά κολοβακτηρίδια, Στρεπτόκοκκοι κοπράνων και Σαλμονέλα.

Βιολογικές: Βιολογικοί δείκτες.

Η Επιτροπή δημοσιεύει συγκεντρωτική έκθεση των δεδομένων αυτών κάθε τρία χρόνια. Η αξιολόγηση των χρονικών τάσεων των μετρούμενων παραμέτρων βασίζεται στις μέσες ετήσιες τιμές. Από το 1971 η εφαρμογή του προγράμματος εκτέλεσης ελέγχου ποιότητας αρδευτικών υδάτων από το Υπουργείο Γεωργίας, έχει δημιουργήσει ένα σημαντικό αρχείο στοιχείων ποιότητας των επιφανειακών και υπόγειων νερών της χώρας.

Η μελέτη της ποιότητας του νερού των υδατορευμάτων έχει απασχολήσει πολλούς ξένους και έλληνες επιστήμονες από το τέλος του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου και μετά, οπότε εμφανίστηκαν και τα πρώτα προβλήματα ρύπανσης. Ιδιαίτερα όμως κατά την τελευταία τριακονταετία και επειδή τα προβλήματα αυτά συνεχώς εντείνονται ή αλλάζουν μορφή και η ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης αυξάνεται, το ζήτημα δεν περιορίζεται στα πλαίσια της επιστημονικής έρευνας, αλλά έγινε υπόθεση εθνική και διεθνής και η έρευνα βρίσκεται στην υπηρεσία διεθνών και εθνικών οργανισμών και φορέων θεσμοθέτησης, διαχείρισης και ελέγχου των υδατικών πόρων.

11. ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

11.1 ΡΥΠΑΝΣΗ ΚΑΙ ΜΟΛΥΝΣΗ

Η ποιότητα των υπόγειων νερών, όπως προαναφέρθηκε καθορίζεται από πολλούς παράγοντες, κυριότεροι εκ των οποίων είναι[7]:

- Η αποσάθρωση και διάλυση των πετρωμάτων
- Η απόθεση ορυκτών
- Η οργανική ύλη (έκλυση CO₂, αναγωγή οξειδίων Fe, NO₃, SO₄, μεθανογένεση)
- Η παρουσία βλάστησης (πρόσληψη καλίου, φωσφόρου, αερίων από την ατμόσφαιρα)
- Οι παράμετροι του υδρολογικού κύκλου (μεγάλη εξάτμιση στους αβαθείς υδροφόρους ορίζοντες αυξάνει τη συγκέντρωση αλάτων)
- Αντιδράσεις ιοντοανταλλαγής
- Ανθρώπινες δραστηριότητες (χρήση φυτοφαρμάκων, εντομοκτόνων και λιπασμάτων στη γεωργία, διάθεση αστικών λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων στο έδαφος, διαρροές από χωματερές, διαφυγές ρυπαντών κ.ά).

Η καθαρότητα των φυσικών νερών έχει ιδιαίτερη σημασία για το περιβάλλον, μιας και το νερό αποτελεί βασικό παράγοντα για τη διατήρηση της ζωής. Η χρήση του νερού και διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες υποβαθμίζουν ποιοτικά το νερό.

Ρύπανση (pollution) θεωρείται οποιαδήποτε υποβάθμιση της φυσικής ποιότητας του νερού. Σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60 της Ε.Ε για την πολιτική των νερών, ρύπανση ορίζεται η, συνεπεία ανθρώπινων δραστηριοτήτων, άμεση ή έμμεση εισαγωγή, στον αέρα, το νερό ή το έδαφος, ουσιών ή θερμότητας που μπορούν να είναι επιζήμια για την υγεία του ανθρώπου ή την ποιότητα των υδατικών οικοσυστημάτων ή των χερσαίων οικοσυστημάτων που εξαρτώνται άμεσα από υδατικά οικοσυστήματα, συντελούν στη φθορά υλικής ιδιοκτησίας, ή επηρεάζουν δυσμενώς ή παρεμβαίνουν σε λειτουργίες αναψυχής ή σε λοιπές νόμιμες χρήσεις του περιβάλλοντος.

Η **μόλυνση (contamination)** περιορίζεται στη ρύπανση εκείνη που αποτελεί κίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου. Η μόλυνση έχει μικροβιακό χαρακτήρα και

συνδέεται με την παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών, ως αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

Ρυπαντής ή ρύπος ή ρυπαντική ουσία είναι κάθε διαλυτή (υδρόφιλη π.χ. ανόργανα άλατα) ή αδιάλυτη (υδρόφοβη, π.χ. υδρογονάνθρακες, PCBs, διαλύτες κ.λπ.) στο νερό, ουσία, η οποία όταν εισάγεται στο περιβάλλον από ανθρώπινες δραστηριότητες, προκαλεί δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Οι πιο συνηθισμένοι ρυπαντές, που με διάφορους τρόπους καταλήγουν στα νερά είναι:

- 1) Βαρέα μέταλλα (Hg, Pd, Cd κ.ά.)
- 2) Τοξικά στοιχεία και ενώσεις (As, Se, CN- κ.ά.)
- 3) Ανόργανες ενώσεις (NO₃⁻, PO₄³⁻, NO₂⁻ κ.ά.)
- 4) Οργανικές ενώσεις (φαινόλες, χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες, απορρυπαντικά, παρασιτοκτόνα, χρώματα βαφής, προϊόντα πετρελαίου κ.ά.).
- 5) Ραδιενεργές ουσίες
- 6) Παθογόνοι μικροοργανισμοί (βακτήρια και ιοί)

Ποιοτική υποβάθμιση των νερών συμβαίνει επίσης λόγω θερμικής αλλοίωσης από νερά ψύξης των βιομηχανιών και από υφαλμύριση του γλυκού νερού στους παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες.

11.2 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ

Οι κυριότερες φυσικοχημικές ιδιότητες των ρύπων είναι:

Η διαλυτότητα

Είναι η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να διαλυθεί σε ορισμένη ποσότητα διαλύτη, σε ορισμένες συνθήκες. Τα ευδιάλυτα μεταφέρονται πιο εύκολα από τα επιφανειακά νερά.

Πτητικότητα

Είναι η ικανότητα που έχουν τα μόριά τους να διαφεύγουν από την επιφάνεια του υγρού και να μεταβαίνουν στην αέρια φάση.

Προσροφητικότητα

Εκφράζει την ικανότητα προσρόφησης μιας ουσίας από τα σωματίδια του εδάφους.

Βαθμός αποσύνθεσης

Είναι ο χρόνος που απαιτείται για να αποσυντεθεί μια ουσία (παρασιτοκτόνο) σε άλλες ενώσεις.

Ο συντελεστής κατανομής

Περιγράφει τον τρόπο κατανομής ενός ρύπου μεταξύ δύο μέσων, π.χ. στερεού-υγρού, ατμών-υγρού.

Πίεση των ατμών

Είναι η πίεση που ασκούν οι ατμοί ενός υγρού, όταν το υγρό βρίσκεται σε ισορροπία με τους ατμούς του και εκφράζεται με το νόμο του Raoult. Η σταθερά Henry (*H*) συνδέει τη μερική πίεση (P_{μ}) μιας πτητικής ουσίας σε ισορροπία πάνω από διάλυμα, με τη συγκέντρωσή της (*C*) στο διάλυμα:

$$P_{\mu}=H.C \text{ (νόμος Henry)} \quad [7]$$

Από αυτήν προκύπτει ότι η διαλυτότητα αερίου εντός υγρού (g/L) υπό σταθερή θερμοκρασία είναι ανάλογη με την πίεση του αερίου σε ισορροπία με το υγρό.

Δείκτης βιοσυγκέντρωσης

Εκφράζει την ποσότητα μιας ουσίας που μπορεί να συσσωρευθεί στους υδρόβιους μηχανισμούς.

Τοξικότητα

Είναι η πρόκληση δυσμενών επιπτώσεων στα οικοσυστήματα, όταν εκτεθούν στους ρύπους. Η έκθεση γίνεται μέσω της αναπνοής, της διατροφής και της επιδερμίδας. Η τοξικότητα εκφράζεται με τη μέση θανατηφόρα δόση (LD_{50}), που είναι η δόση (mg/kg σωματικού βάρους) στην οποία επιβιώνει μόνο το 50% των οργανισμών που εκτίθενται σε αυτή για ορισμένο χρονικό διάστημα. Όταν η έκθεση γίνεται με την αναπνοή, η τοξικότητα εκφράζεται με τη μέση θανατηφόρο συγκέντρωση (LC_{50}), που είναι η συγκέντρωση του ρύπου σε ορισμένο όγκο αέρα που εισπνέεται, στην οποία επιβιώνει μόνο το 50% των οργανισμών.

Τοξικοί ρύποι στα επιφανειακά νερά είναι: βαρέα μέταλλα (Hg, Cd, Pb, Cr κ.ά), οργανικές ενώσεις (παρασιτοκτόνα και ζιζανιοκτόνα, απορρυπαντικά, πολυχλωριωμένα διφαινόλια PCBs, διοξίνες), τοξικά αέρια (Cl_2 , NH_3), τοξικά ανιόντα (CN⁻), οξέα και αλκάλια.

Οι ρύποι εισάγονται στον οργανισμό μέσω της πεπτικής οδού, με την αναπνοή και μέσω του δέρματος. Συσσωρεύονται κυρίως στο λίπος (PCBs), τα οστά (Pb, F), τα νεφρά (Cd) και το πλάσμα του αίματος.

11.3 ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Οι πηγές ρύπανσης ταξινομούνται ανάλογα με:

(α) Γεωμετρία

- i) σημειακές (ΧΥΤΑ, χωματερές, βόθροι, υπόγειες δεξαμενές)
- ii) γραμμικές (δρόμοι, αύλακες)
- iii) διάχυτες (νιτρορρύπανση, όξινη βροχή)

(β) Ρυθμός εκπομπής

- i) συνεχούς εκπομπής
- ii) στιγμιαίας εκπομπής

Οι περισσότερες πηγές ρύπανσης του γεωπεριβάλλοντος δηλ. του εδάφους και των υπόγειων νερών, προέρχονται από τις κάτωθι δραστηριότητες[13]:

- Απόρριψη υγρών και στερεών αποβλήτων (λύματα, σκουπίδια κ.ά.)
- Χρήση λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων, εντομοκτόνων
- Διάθεση βιομηχανικών αποβλήτων
- Προϊόντα μεταλλευτικής δραστηριότητας
- Διάθεση πυρηνικών αποβλήτων

Στις περιπτώσεις που η ρύπανση των υπόγειων νερών οφείλεται σε φυσικά αίτια, αυτό αποδίδεται: στην επίδραση ευδιάλυτων πετρωμάτων (γύψος, ορυκτό αλάτι κ.ά), στην έντονη εξάτμιση, που προκαλεί ανύψωση του υπόγειου νερού και απόθεση αλάτων, στην οξείδωση των πετρωμάτων και στη διείδυση της θάλασσας. Αναλυτικά οι κυριότερες πηγές ρύπανσης περιγράφονται παρακάτω.

11.3.1 Οικιακά λύματα (domestic sewage)

Ονομάζονται γενικά τα υγρά απόβλητα των κατοικιών, ιδρυμάτων ή άλλων εγκαταστάσεων μιας περιοχής, που είναι συνδεδεμένες με τις λειτουργίες της πόλης (ζαχαροπλαστική, μαγειρεία, πλυντήρια). Αποτελούνται κατά μεγάλο ποσοστό από νερό, που περιέχει οργανικά και ανόργανα προϊόντα. Η δυσάρεστη οσμή τους

οφείλεται στο οργανικό υλικό που υφίσταται αναερόβια βακτηριακή δράση. Το χρώμα των αποβλήτων είναι ενδεικτικό της ηλικίας και της προέλευσής τους. Τα οργανικά υλικά στα λύματα είναι συνήθως: χαρτιά, ούρα, κόπρανα, σαπούνια, απορρυπαντικά, υπολείμματα τροφών, έλαια, λίπη. Τα ανόργανα συστατικά είναι: αμμωνία, άλατα του αμμωνίου, άργιλος κ.ά. Η ποσότητα των παραγόμενων λυμάτων ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή και από χώρα σε χώρα. Η μέση ημερήσια παραγόμενη ποσότητα κυμαίνεται από 150-500 L/άτομο. Η διάθεση λυμάτων στους αποδέκτες δημιουργεί έντονα προβλήματα ρύπανσης, όπως:

ευτροφισμό, ρύπανση υπόγειων υδροφορέων, ελάττωση της ικανότητας αυτοκαθαρισμού των νερών, καταστροφή των βιοκοινωνιών τους κ.ά. Επειδή στη σύγχρονη κοινωνία η κατανάλωση νερού έχει αυξηθεί κατά πολύ οι μικροοργανισμοί που ζουν στη θάλασσα (αποδομητές) δεν προλαβαίνουν να διασπάσουν τις μεγάλες ποσότητες οικιακών λυμάτων που καταλήγουν εκεί. Μερικές φορές μάλιστα δεν μπορούν να διασπάσουν κάποιες ενώσεις, όπως π.χ. χρώματα, απορρυπαντικά, κ.λπ.

Σε μικρούς οικισμούς οι σηπτικές δεξαμενές και οι απορροφητικοί βόθροι είναι οι πιο κοινοί τρόποι διάθεσης των οικιακών λυμάτων. Η συλλογική συγκέντρωση των λυμάτων και η μεταφορά τους σε εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού έχει σαν σκοπό την κατάλληλη επεξεργασία-καθαρισμό των λυμάτων για να επαναχρησιμοποιηθούν ή να διατεθούν ακίνδυνα σ' ένα υδατικό αποδέκτη ή στο έδαφος απαλλαγμένα από τα βλαβερά συστατικά. Ως "βλαβερά" συστατικά των λυμάτων θεωρούνται:

- α) τα αιωρούμενα στερεά
- β) τα οργανικά συστατικά
- γ) οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και τα θρεπτικά στοιχεία (άζωτο και φωσφόρος)

Ο βαθμός καθαρισμού μιας εγκατάστασης καθορίζεται από το ποια από τα προαναφερθέντα "βλαβερά" συστατικά απομακρύνει. Τα ογκώδη στερεά, η άμμος και τα αιωρούμενα συστατικά απομακρύνονται σχεδόν πάντα, οπότε ο καθαρισμός χαρακτηρίζεται πρωτοβάθμιος. Ο δευτεροβάθμιος καθαρισμός (βιολογικός) αποσκοπεί στην απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και των παθογόνων μικροοργανισμών.

Τα αστικά λύματα επιβαρύνουν τους υδατικούς πόρους με βιοαποικοδομήσιμα υλικά και με θρεπτικά συστατικά που προκαλούν ευτροφίες. Πολλές λίμνες και κλειστοί κόλποι παρουσιάζουν προβλήματα ευτροφισμού με

σημαντικές μεταβολές στο οικοσύστημά τους. Ο τριτοβάθμιος καθαρισμός αποσκοπεί στην απομάκρυνση με χημικούς τρόπους και των θρεπτικών στοιχείων (P, N), τα οποία είναι υπεύθυνα για το φαινόμενο του ευτροφισμού.

11.3.2 Βιομηχανικά απόβλητα

Ονομάζονται τα υγρά απόβλητα διαφόρων βιομηχανιών, που δεν περιέχουν απόβλητα από χώρους εξυπηρέτησης του προσωπικού[7]. Τα βιομηχανικά απόβλητα είναι αποτέλεσμα της χρήσης νερού στη βιομηχανία, που έχει εμπλουτισθεί με διάφορα συστατικά σε μικρές ή μεγάλες συγκεντρώσεις και διακρίνονται σε βιολογικά και μη βιολογικά.

- Τα βιολογικά περιλαμβάνουν τα απόβλητα των εργοστασίων παραγωγής τροφίμων, παραγωγής χαρτιού και επεξεργασίας υφαντικών ινών.

- Τα μη βιολογικά είναι απόβλητα χημικών βιομηχανιών και περιέχουν ρυπαντές όπως: οξέα, βάσεις, χλώριο, κυανιούχα, μέταλλα, άλατα, υδρογονάνθρακες, φωσφορικά.

Τα υγρά βιομηχανικά απόβλητα σε σύγκριση με τα αστικά λύματα παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά: Περιέχουν τοξικά στοιχεία, εμφανίζουν δυσκολία επεξεργασίας και μεγάλες διαφορές μεταξύ των αποβλήτων διαφόρων βιομηχανιών. Ένα μέρος των βιομηχανικών αποβλήτων χαρακτηρίζονται ως **επικίνδυνα** (hazardous) και απαιτούνται αυστηροί περιβαλλοντικοί περιορισμοί για τη διάθεσή τους στο γεωπεριβάλλον. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και άλλα απόβλητα, όπως τα νοσοκομειακά.

11.3.3 Τοξικά απόβλητα

Ο όρος **τοξικά** (toxic) χρησιμοποιείται για απόβλητα που περιέχουν ουσίες που προκαλούν σοβαρές βλάβες ή και θάνατο σε ανθρώπους ή ζώα. Γενικά, τα επικίνδυνα απόβλητα κατατάσσονται στις κάτωθι τέσσερις κατηγορίες[14]:

1. **Βαρέα μέταλλα** που περιέχουν (μόλυβδος, υδράργυρος, κάδμιο, αρσενικό) και κυανίδια.

2. Οργανικά υδατοδιαλυτά απόβλητα (Aqueous Phase Liquids-APLs) Ανήκουν τα απόβλητα της φαρμακευτικής βιομηχανίας, της βιομηχανίας γεωργικών φαρμάκων, διαλύτες, χρώματα.

3. Οργανικά μη υδατοδιαλυτά απόβλητα (Non-Aqueous Phase Liquids-**NAPLs**). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα λιπαντικά, ελαιοχρώματα, ελαιώδεις διαλύτες, προϊόντα πετρελαίου. Τα μη αναμείξιμα εξ' αυτών με πυκνότητα μικρότερη του νερού **LNAPLs** (βενζίνη, πετρέλαιο κ.ά) επιπλέουν στο νερό και συγκεντρώνονται στην επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα, διαχεόμενα μόνον οριζόντια. Οι υδρογονάνθρακες έχουν τη δυνατότητα να παραμένουν επί πολύ χρόνο στην επιφάνεια των υπόγειων νερών, προσδίνοντας δυσάρεστη οσμή. Τα βαρύτερα **DNAPLs** (χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες) κινούνται κατακόρυφα στην ακόρεστη και κορεσμένη ζώνη και εγκαθίστανται πάνω στο αδιαπέρατο υπόβαθρο, ρυπαίνοντας έτσι τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες σε βάθος.

4. Απόβλητα με μορφή παχύρρευστων υγρών, ιλύος και στερεών. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται απόβλητα διύλιστηρίων και απόβλητα καθαρισμού των δεξαμενών πλοίων μεταφοράς πετρελαιοειδών. Τα βιομηχανικά απόβλητα υποβάλλονται σε επεξεργασία για να απαλλαγούν από τους ρυπαντές και να διατεθούν εν συνεχεία στο περιβάλλον ή να επαναχρησιμοποιηθούν.

11.3.4 Αστικά απορρίμματα (municipal waste)

Αποτελούνται από τρόφιμα, χαρτί, γυαλί, πλαστικά, φυτικές ύλες, υφάσματα, ξύλο, ελαστικά κ.ά. Πιθανόν πολλές φορές να περιέχουν και μικρές ποσότητες επικίνδυνων αποβλήτων, όπως: χρώματα, ορυκτέλαια, απορρυπαντικά κ.λπ. Σε πολλές χώρες, λόγω εφαρμογής προγραμμάτων ανακύκλωσης σε χαρτί, μέταλλα, γυαλί τα απορρίμματα περιέχουν μικρές ποσότητες των υλικών αυτών. Τα απορρίμματα περιέχουν και ποσότητα νερού, σε ποσοστό που κυμαίνεται από 25-60%. Τα στραγγίσματα ή διασταλάζοντα (leachates) από χώρους διάθεσης ή ταφής στερεών αποβλήτων είναι πλούσια σε ενώσεις του αζώτου, χλωριόντα, μόλυβδο, σίδηρο κ.ά. και μπορεί να αποτελέσουν σημαντική αιτία ρύπανσης και μόλυνσης των υπόγειων νερών.

11.3.5 Τα απόβλητα μεταλλευτικής δραστηριότητας (mining waste)

Παράγονται κατά την εξόρυξη ορυκτών πόρων σε ανθρακορυχεία, μεταλλεία και αποτελούνται από ένα ετερογενές μίγμα νερού και κονιορτοποιημένου ορυκτού και πιθανά περιέχουν και βαρέα μέταλλα, ως παραπροϊόντα. Με τις διαδικασίες

αποκάλυψης των μεταλλευμάτων αφαιρείται ο προστατευτικός εδαφικός μανδύας και έτσι οι πιθανοί ρύποι οδηγούνται κατευθείαν στους υδροφόρους ορίζοντες. Συχνά οι μεταλλευτικές εργασίες επεκτείνονται κάτω από την επιφάνεια του υπόγειου νερού και απαιτείται στράγγιση. Το νερό αυτό είναι πλούσιο σε μέταλλα, γνωστό ως όξινο νερό μεταλλείου. Οι εκσκαφές μετά το πέρας της εκμετάλλευσης χρησιμοποιούνται συνήθως σαν χώροι απόθεσης απορριμμάτων με πιθανή ρύπανση των υπόγειων νερών. Οι αποθέσεις τους, λόγω της μικρής διατμητικής αντοχής είναι ασταθείς και παρουσιάζουν μεγάλες καθιζήσεις.

Στην Ελλάδα το πρόβλημα εντοπίζεται στην παραγόμενη τέφρα των λιγνιτορυχείων (Μεγαλόπολη, Πτολεμαΐδα). Σε περιπτώσεις που τα παραγόμενα απόβλητα των ορυχείων ή διάφορα παραπροϊόντα (εξόρυξη λατομικών ορυκτών) δεν είναι επικίνδυνα, μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως δομικά υλικά για επιχωματώσεις κ.λπ.

11.3.6 Απόβλητα γεωργο-κτηνοτροφικής δραστηριότητας

Το νερό που επιστρέφει από τις αρδεύσεις διηθείται παρασέρνοντας διαλυμένες ουσίες στα υπόγεια νερά. Έτσι στοιχεία που περιέχονται στα λιπάσματα οδηγούνται στο υπόγειο νερό, ειδικά σε περιπτώσεις διαπερατών εδαφικών σχηματισμών. Οι πλέον επικίνδυνοι ρύποι είναι τα νιτρικά ιόντα, τα οποία έχουν μεγάλη ευκινησία και μετακινούνται εύκολα από την ακόρεστη ζώνη στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Στην ακόρεστη ζώνη οι διαλυμένες ουσίες κινούνται κατακόρυφα προς την υπόγεια στάθμη και στην κορεσμένη ζώνη η υδραυλική κλίση προκαλεί την οριζόντια κίνηση του υπόγειου νερού και των ρύπων που περιέχονται σε αυτό[7].

Η αλόγιστη χρήση λιπασμάτων με αποτέλεσμα την αύξηση των νιτρικών ιόντων έχει οδηγήσει σε πλήρη υποβάθμιση πολλούς υδροφόρους ορίζοντες, κυρίως φρεάτιους σε πολλές περιοχές της χώρας μας. Σημαντικές ποσότητες νερού από αυτές που χρησιμοποιούνται για άρδευση (περίπου το 10%) επιστρέφουν και τροφοδοτούν τον υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα (irrigation return flow). Το νερό αυτό είναι εμπλουτισμένο σε άλατα, τα οποία προστίθενται με τη διαδικασία της διάλυσης κατά την άρδευση ή στα άλατα των λιπασμάτων. Επικρατούντα ιόντα στην επιστρεφόμενη αρδευτική ροή είναι Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- .

Το νερό αυτό αποτελεί σημαντική πηγή ρύπανσης των υπόγειων νερών, ειδικά στις περιοχές, όπου εφαρμόζεται εντατική άρδευση. Τα φυτοφάρμακα (εντομοκτόνα, ζιζανιοκτόνα, παρασιτοκτόνα) που χρησιμοποιούνται εντατικά στη γεωργία τις τελευταίες δεκαετίες αποτελούν σημαντικούς ρύπους για τα υπόγεια νερά. Τα στερεά απόβλητα κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων (κοπριές) είναι πλούσια σε νιτρικά και διαλυμένα άλατα και αποτελούν πιθανές πηγές ρύπανσης των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων.

11.3.7 Μόλυνση από νεκροταφεία

Άλλες πιθανές αιτίες ρύπανσης του υπόγειου νερού είναι: τα ρευστά από τα νεκροταφεία, ο εμπλουτισμός από ρυπασμένα επιφανειακά νερά, η ρίψη NaCl για την αποπαγοποίηση των δρόμων (2-10 tn ανά km)[7], η διείσδυση της θάλασσας, τα διασταλάζοντα υγρά από τις χωματερές κ.ά. Η αποσύνθεση των πτωμάτων στα νεκροταφεία γίνεται προοδευτικά και δημιουργεί ρευστά με υψηλό ρυπαντικό φορτίο, που αν αναμειχθούν με τα νερά της βροχής και κατεισδύσουν στους υδροφόρους ορίζοντες προκαλούν επικίνδυνες μολύνσεις.

Η ποιοτική σύσταση των ρύπων από τα νεκροταφεία χαρακτηρίζεται από αυξημένες συγκεντρώσεις χλωριόντων, θειϊκών, ενώσεων αζώτου (NO_3^- , NH_4^+ , NO_2^-), και παθογόνων μικροοργανισμών. Η ποσότητα των υγρών στραγγισμάτων από νεκροταφεία ανέρχεται σε 400 L/έτος/τάφο.

Το υπέδαφος ενός νεκροταφείου πρέπει να εκπληρώνει τις κάτωθι προϋποθέσεις:

- α) Να είναι χαλαρό και όχι βραχώδες, ώστε να είναι εύκολος ο ενταφιασμός
- β) Ο υποκείμενος υδροφόρος ορίζοντας να είναι σε μεγάλο βάθος.
- γ) Το έδαφος πρέπει να είναι υδροπερατό και καλά αεριζόμενο, ώστε η αποσύνθεση να γίνεται γρήγορα. Στα αργιλικά εδάφη η διατήρηση των πτωμάτων είναι μακρόχρονη.
- δ) Δεν πρέπει να λιμνάζουν νερά, γι' αυτό πρέπει να κατασκευάζεται επιφανειακό δίκτυο αγωγών για την αποχέτευση των ομβρίων υδάτων.
- ε) Το ανάγλυφο της περιοχής να είναι σχετικά ομαλό και η εδαφική επιφάνεια επίπεδη, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος κατολισθήσεων και ερπυσμού του εδαφικού μανδύα.

ζ) Απαιτείται η κατασκευή ενός περιφερειακού στραγγιστηρίου βάθους >2 m.

η) Σε όλη την έκταση του νεκροταφείου πρέπει να κατασκευάζεται ένα δίκτυο στράγγισης 2,5 m βαθύτερα από τον πυθμένα των μελλοντικών τάφων, ώστε να συλλέγονται τα μολυσμένα νερά.

θ) Η δένδροφύτευση του χώρου του νεκροταφείου συμβάλλει στην αποσύνθεση των αζωτούχων ενώσεων.

ι) Η χωροθέτηση του νεκροταφείου πρέπει να εξετάζεται σχολαστικά σε σχέση με πηγές ύδρευσης, υδρορεύματα, οικισμούς, νοσοκομεία, δημόσιους χώρους κ.λπ. Η διαδικασία για την ίδρυση νέων κοιμητηρίων καθορίζεται με υπουργική απόφαση (Αριθ. 26882/5769, Εφ. της Κυβερνήσεως, τεύχος 4, Αρ. φύλλου 838/23-10-998) και απαιτείται μελέτη γεωλογικής καταλληλότητας, υδρογεωτεχνική μελέτη και μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

11.3.8 Ρύπανση από ραδιενεργές ουσίες

Η πηγή προέλευσης της ρύπανσης που χαρακτηρίζει την κατηγορία αυτή είναι η βιομηχανία που σχετίζεται με την ατομική ενέργεια και τις κάθε μορφής πυρηνικές τεχνολογίες[7]. Εξ ορισμού η ρύπανση αυτή αφορά σε ραδιενεργές ουσίες που βρίσκονται στο υπόγειο νερό και που, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες κατηγορίες, είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία ακόμα και σε πολύ μικρές τιμές των συγκεντρώσεών τους. Τα όρια ραδιενέργειας εξαρτώνται από το είδος της ακτινοβολίας (α , β , γ), το είδος του ραδιενεργού στοιχείου, τον χρόνο ημιζωής του, τον χρόνο του βιολογικού κύκλου.

Οι πιο σημαντικές πηγές της κατηγορίας αυτής είναι: α) η ύπαρξη στο υπόγειο νερό ραδιενεργών ουσιών ή στοιχείων φυσικής προέλευσης, β) αστοχίες δοκιμών ατομικών όπλων και γ) ειρηνικές χρήσεις της ατομικής ενέργειας. Γενικά για το περιβάλλον ο μεγαλύτερος κίνδυνος προέρχεται από τους πυρηνικούς αντιδραστήρες και τις αντίστοιχες βιομηχανίες.

Ειδικά για τα υπόγεια νερά το υπ' αριθμόν ένα πρόβλημα αποτελεί η διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων στο έδαφος. Η διάθεση αυτή πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη μελέτη και προσοχή ώστε να μη συνιστά πηγή κινδύνων για τις ανθρώπινες δραστηριότητες στο μέλλον. Πάντως το θέμα της ρύπανσης από ραδιενεργές ουσίες δεν ενδιαφέρει άμεσα την Ελλάδα, τουλάχιστο προς το παρόν, και έτσι δεν εξετάζεται παραπέρα στο παρόν κείμενο.

11.3.9 Ρύπανση από φυσικές διεργασίες

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται περιστατικά ρύπανσης υπόγειων νερών που η πηγή προέλευσής τους μπορεί να είναι μια από τις εξής: α) διείσδυση θαλασσινού νερού, β) ρύποι της ατμόσφαιρας, γ) επαγωγικός εμπλουτισμός υδροφορέων με ακάθαρτα επιφανειακά νερά, δ) θερμική ρύπανση και ε) τεχνητός εμπλουτισμός.

Η διείσδυση θαλασσινού νερού αποτελεί έναν τύπο ρύπανσης που θα μπορούσε να ανήκει και σε προηγούμενη κατηγορία αφού προκαλείται κυρίως από υπεραντλήσεις παράκτιων υδροφορέων και συνεπώς είναι ανθρωπογενούς προέλευσης. Επειδή όμως διάφορα κλιματικά και γεωλογικά φαινόμενα και μεταβολές σε παλιότερες γεωλογικές περιόδους είχαν ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση αλάτων σε σχηματισμούς που σήμερα αποτελούν εκμεταλλεύσιμους υδροφορείς και γενικά το φαινόμενο της διείσδυσης θαλασσινού νερού σε παράκτιους υδροφορείς είναι ένα μάλλον φυσικό φαινόμενο, γίνεται αποδεκτή η ταξινόμησή του στην κατηγορία αυτή. Πρόκειται ίσως για τον σημαντικότερο τύπο ρύπανσης φυσικής προέλευσης ειδικά για την Ελλάδα που έχει ένα τεράστιο μήκος ακτών κατά μήκος των οποίων έχουν αναπτυχθεί πολλοί οικισμοί, χωριά ή και πόλεις.

Η ρύπανση των υπόγειων νερών από ρύπους που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα γίνεται μέσω των σταγόνων της βροχής. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις αποτελούν ρύποι κυρίως ανθρωπογενούς προέλευσης, όπως οι αέριες εκπομπές βιομηχανιών, τα καυσαέρια καθώς και διάφορες μορφές αστικών πηγών (καυστήρες θέρμανσης κατοικιών κτλ.).

Ακόμα, ο επαγωγικός εμπλουτισμός από επιφανειακούς αποδέκτες, όπως ποτάμια ή λίμνες, που συνδέονται υδραυλικά μ' αυτούς, έχει ως συνέπεια τη μεταφορά ρύπων από τα επιφανειακά στα υπόγεια νερά. Οι ρύποι αυτοί είναι συνήθως οργανικές και ανόργανες ενώσεις αλλά μπορεί να είναι και βακτήρια ή ιοί. Ο τύπος αυτής της ρύπανσης εμφανίζει έξαρση κυρίως σε περιοχές με βαριά βιομηχανία.

Τέλος η θερμική ρύπανση (ανεπιθύμητη αύξηση της θερμοκρασίας) των υπόγειων νερών καθώς και η ρύπανση από τεχνητό εμπλουτισμό των υδροφορέων είναι δύο τύποι ρύπανσης μικρής συνήθως έκτασης και δεν σχολιάζονται περισσότερο εδώ.

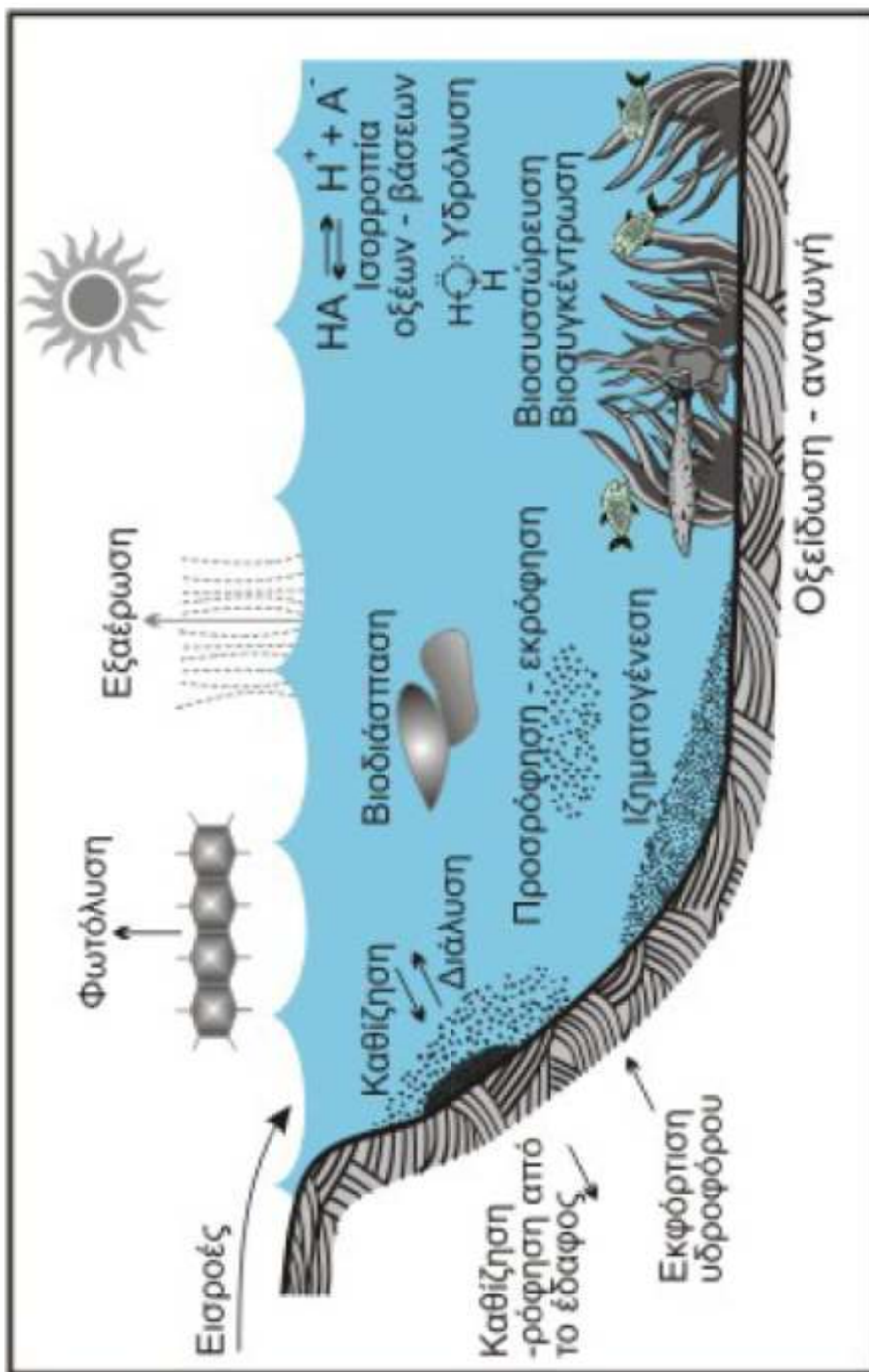
Σχετικά με τη ρύπανση των υπόγειων νερών πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι τα τεράστια προβλήματα που προκαλούνται απ' αυτήν στις περισσότερες περιοχές του πλανήτη μας σήμερα έχουν οδηγήσει την επιστήμη σε συστηματικές έρευνες πεδίου που συνδυάζουν τόσο την υδρογεωλογική διερεύνηση όσο και τη χημική ανάλυση των τόσων πολλών κατηγοριών ρύπων που εμφανίζονται στο υπόγειο νερό. Φυσική συνέπεια αυτής της δραστηριοποίησης είναι η δημιουργία ενός νέου κλάδου που ονομάζεται χημική υδρογεωλογία και που έχει ως βασικό στόχο τη μελέτη της εμφάνισης, κατανομής και εξέλιξης των χημικών ουσιών σε συστήματα υδροφορέων. Τα αποτελέσματα τέτοιων συνδυασμένων ερευνών υδρογεωλόγων και χημικών καταδεικνύουν την πολυπλοκότητα του προβλήματος, που οφείλεται στον τεράστιο αριθμό ρύπων, όπως πιο πάνω αναφέρθηκε, αλλά και στην έντονη ετερογένεια των γεωλογικών σχηματισμών που αποτελούν τους υδροφορείς.

Το πιο βασικό ίσως ερώτημα που τίθεται σήμερα στον επιστημονικό αυτό κλάδο είναι ποια θα είναι η ορθολογική κλίμακα μελέτης των φαινομένων για τις προσεχείς δεκαετίες. Σχετικές λοιπόν έρευνες δείχνουν ότι η κλίμακα αυτή δεν μπορεί να είναι άλλη από τη μικροκλίμακα, δηλαδή την κλίμακα τοπικών συστημάτων υδροφορέων που δεν ξεπερνά τις λίγες εκατοντάδες μέτρων.

Στον παρακάτω Πίνακα III αναφέρονται οι κυριότεροι τρόποι ρύπανσης των νερών, το είδος των ρύπων και η επίδραση της ρύπανσης στο περιβάλλον, και στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται ένα παραστατικό διάγραμμα, όπου αποτυπώνονται οι κυριότερες διαδικασίες μεταφοράς των ρύπων στο υδατικό περιβάλλον.

Πίνακας III: Πηγές ρύπανσης των επιφανειακών και υπόγειων νερών.

Πηγή	Είδος ρύπου	Επίδραση
Χημικές βιομηχανίες Μεταλλουργεία	Cu, Pb, Zn, Cd, Hg Co, Cr, Ag, As, CN	Συσσώρευση στις τροφικές αλυσίδες
Χημικές βιομηχανίες Βιομηχανίες τροφίμων Φαρμακευτικές βιομηχανίες Χαρτοποιεία	Φαινόλες, Αμμωνία Απορρυπαντικά, Τίνες χαρτιού	Ελαττώνουν το οξυγόνο Φαινόμενα ευτροφισμού Τοξικά προϊόντα (αμμωνία, φαινόλες) Ελάττωση της οικολογικής ποικιλότητας
Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ)	Βαρέα μέταλλα, Αέρια Οργανικές ενώσεις, Ανόργανες ενώσεις	Ρύπανση υπόγειων υδροφόρων
Αγροτικές δραστηριότητες	Λιπάσματα, Εντομοκτόνα Παρασιτοκτόνα	Αύξηση νιτρικών ιόντων Καρκινογένεσεις
Κτηνοτροφικές δραστηριότητες Σφαγεία	Άζωτο, Φωσφόρος Βακτήρια, Μύκητες	Ρύπανση και μόλυνση υπόγειων και επιφανειακών νερών
Όξινη βροχή Πυρηνικοί σταθμοί	Οξείδια S και N Ραδιενέργεια στο νερό	Καταστροφή καλλιεργιών, δασών κ.λπ. Γενετικές αλλοιώσεις Συσσώρευση στις τροφικές αλυσίδες
Διύλιστήρια Διαρροές υδρογονανθράκων Μεταλλευτικές Δραστηριότητες	Υδρογονάνθρακες Πετρέλαιο, Ασφάλτος Αιωρούμενα στερεά, Ορυκτές ενώσεις Όξινα απόβλητα	Καταστροφή πανίδας και χλωρίδας Εμποδίζουν την οξυγόνωση του νερού Ρύπανση αέρα και υπόγειων νερών Καθιζήσεις εδάφους
Ενεργειακοί σταθμοί Βιομηχανίες	Θερμό νερό	Θανάτωση των αυγών των ψαριών Ελάττωση του O ₂ , αύξηση του ρυθμού μεταβολισμού των οργανισμών
Διεύδυση της θάλασσας	Άλατα	Καταστροφή παράκτιων υδροφόρων οριζόντων



Σχήμα 9: Μεταφορά ρυπαντών στο υδατικό περιβάλλον (Καλλέργης, 2001).

12 ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

12Α. ΔΙΑΛΥΜΕΝΟΙ ΡΥΠΟΙ

Γενικά διακρίνονται δύο μεγάλες κατηγορίες διαλυμένων ουσιών-ρύπων:

- *συντηρητικές ή αδρανείς* (conservative) και
- *ενεργές ή δραστικές* (reactive).

Συντηρητικές είναι αυτές που δεν αντιδρούν με το έδαφος και/ή με το γειτονικό υπόγειο νερό ή δεν υφίστανται βιολογικές ή ραδιενεργές διασπάσεις. Περιλαμβάνουν τους υδρόφοβους ρύπους (NAPL). Το ιόν του χλωρίου είναι αντιπροσωπευτικό παράδειγμα συντηρητικού ιόντος. Στην περίπτωση συντηρητικού ρυπαντή, αυτός ακολουθεί την κίνηση του υπόγειου νερού και μεταφέρεται κατόπιν επεκτείνοντας τη ρύπανση.

Οι βασικές διαδικασίες για τη διάδοση των αδρανών ρύπων στο χώρο είναι:

- ✓ **Μεταφορά (Μεταγωγή)**
- ✓ **Μοριακή Διάχυση**
- ✓ **Διασπορά**
- ✓ **Υδροδυναμική Διασπορά**

Μεταφορά (ή ρεύματα μεταφοράς) είναι η διαδικασία κατά την οποία το κινούμενο νερό μεταφέρει τους διαλυμένους ρύπους. Ο όρος διάχυση χρησιμοποιείται για την εξάπλωση του ρύπου σε στάσιμα νερά, ενώ ο όρος διασπορά χρησιμοποιείται για κινούμενα νερά.

Στην περίπτωση των δραστικών ουσιών, υπάρχουν φυσικές και χημικές διαδικασίες που προκαλούν μια επιβράδυνση (retardation) της κίνησης του ρύπου, έτσι ώστε δεν μετακινείται όπως προβλέπει ο ρυθμός μεταφοράς του. Οι ανωτέρω διαδικασίες μπορεί να συμβαίνουν ταυτόχρονα στο πορώδες μέσο.

12Α.1 ΜΕΤΑΦΟΡΑ- ΔΙΑΧΥΣΗ- ΔΙΑΣΠΟΡΑ

12Α.1.1 Μεταφορά

Κατά τη **μεταφορά** (advection) ο ρυπαντής ακολουθεί την κίνηση του υπόγειου νερού στις ίδιες τροχιές, η οποία ως γνωστόν υπακούει στο νόμο του Darcy δηλ. κίνηση από θέσεις υψηλού σε θέσεις χαμηλού υδραυλικού φορτίου:

$$v_x = ki/S_y \quad [7]$$

όπου:

v_x =μέση γραμμική ταχύτητα,

k =υδραυλική αγωγιμότητα,

i =υδραυλική κλίση και

S_y =ενεργό πορώδες.

Σε περιπτώσεις ρυπαντών μεγάλου ειδικού βάρους, τότε παρατηρείται απόκλιση στη ροή του υπόγειου νερού από εκείνη του ρυπαντή. Αρνητικά φορτισμένα ιόντα μπορούν να κινούνται ταχύτερα από το νερό, στο οποίο βρίσκονται διαλυμένα.

Η μάζα του ρύπου (m) που μεταφέρεται από μια επιφάνεια κάθετα στη διεύθυνση ροής με διατομή A , δίνεται από τη σχέση:

$$m = v_x A C S_y \quad [7]$$

όπου

C = η συγκέντρωση του ρύπου,

v_x = η μέση γραμμική ταχύτητα και

S_y = το ενεργό πορώδες.

Κατά τη μεταφορά η συγκέντρωση του ρυπαντή μένει σταθερή σε ένα συγκεκριμένο όγκο νερού, λόγω της αρχής διατήρησης της μάζας.

12Α.1.2 Μοριακή Διάχυση

Η **μοριακή διάχυση** (molecular diffusion) συμβαίνει στη μικροκλίμακα των πόρων και οφείλεται στη διαφορά συγκέντρωσης του ρύπου από θέση σε θέση (χημικό δυναμικό). Η διάχυση είναι η διαδικασία κατά την οποία ιοντικά ή μοριακά συστατικά διαλυμένα στο νερό κινούνται από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης σε περιοχές χαμηλής συγκέντρωσης. Η διάχυση μιας διαλυμένης ουσίας (ρύπου) περιγράφεται από τον πρώτο νόμο του **Fick**. Ο νόμος αυτός περιγράφει τη ροή μάζας (F) λόγω διάχυσης δηλ. την ποσότητα του ρύπου που περνά από τη μοναδιαία διατομή ενός πορώδους μέσου, στη μονάδα του χρόνου:

$$F=-D(dc/dx) \quad [10]$$

όπου:

F=η ποσότητα του ρύπου (kg) ανά μονάδα επιφανείας στη μονάδα του χρόνου

D=ο συντελεστής διάχυσης (επιφάνεια /χρόνος)

C=η συγκέντρωση των ρύπων (μάζα /όγκος)

dC/dx=η βαθμίδα συγκέντρωσης δηλ. η μεταβολή της συγκέντρωσης (dC) δια της αντίστοιχης μεταβολής της απόστασης (dx).

Ο συντελεστής διάχυσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το ιξώδες του υγρού και τη μέση ακτίνα των μορίων που διαχέονται. Με εξαίρεση το ιόν H^+ και το ανιόν OH^- , ο συντελεστής D για τα υπόλοιπα ιόντα στο νερό κυμαίνεται από 5×10^{-6} έως $20 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$. Οι τιμές αυτές ισχύουν για διαλύματα σε ανοικτούς αγωγούς. Στην περίπτωση πορωδών μέσων, όπου οι ουσίες διανύουν μεγαλύτερες αποστάσεις οι συντελεστές χρειάζονται διόρθωση και για το λόγο αυτόν πολλαπλασιάζονται με ένα συντελεστή λ ($D^*=\lambda D$) [10], ο οποίος παίρνει τιμές μεταξύ 0,01 και 0,5.

12Α.1.3 Διασπορά

Κατά τη **διασπορά** (dispersion) οι ταχύτητες του νερού, κατά την κίνησή του στους πόρους του εδαφικού σχηματισμού, ποικίλλουν αποκλίνοντας σημαντικά από τη μέση μακροσκοπική ταχύτητα. Η διασπορά διακρίνεται σε μηχανική και υδροδυναμική. Η μηχανική διασπορά διακρίνεται σε **διαμήκη** (ή **επιμήκη**) και σε **εγκάρσια**[10]:

Η **διαμήκης διασπορά** οφείλεται:

α) στο ότι η ταχύτητα ροής είναι μεγαλύτερη στο κέντρο των πόρων, όπως συμβαίνει στο κινούμενο νερό των ποταμών,

β) στο ότι οι πόροι δεν έχουν όλοι την ίδια διάμετρο με αποτέλεσμα να δημιουργούνται διαφορές μεταξύ των ταχυτήτων και

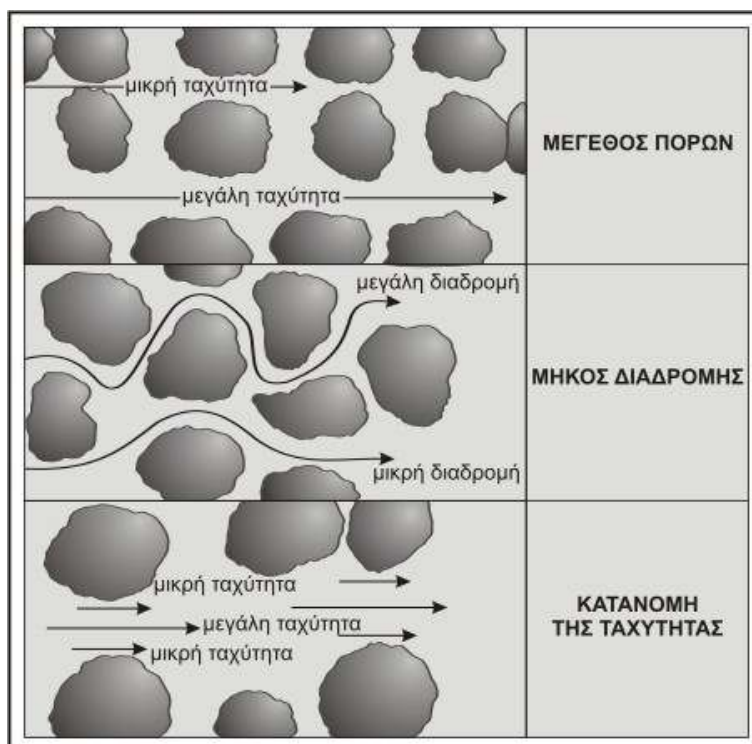
γ) κάποια ποσότητα του κινούμενου υγρού κάνει μεγαλύτερες αποστάσεις. Έτσι οι ρύποι διασπείρονται τόσο κατά μήκος της κίνησης του υπόγειου νερού, όσο και εγκάρσια προς αυτήν (Βλ Σχήμα 10).

Η μηχανική διασπορά (D') είναι ίση με το γινόμενο της μέσης γραμμικής ταχύτητας ροής (v_{χ}) επί έναν παράγοντα που καλείται δυναμική διασπορικότητα και έχει διαστάσεις μήκους (dynamic dispersivity, α_L):

$$D' = v_{\chi} \cdot \alpha_L \quad [7]$$

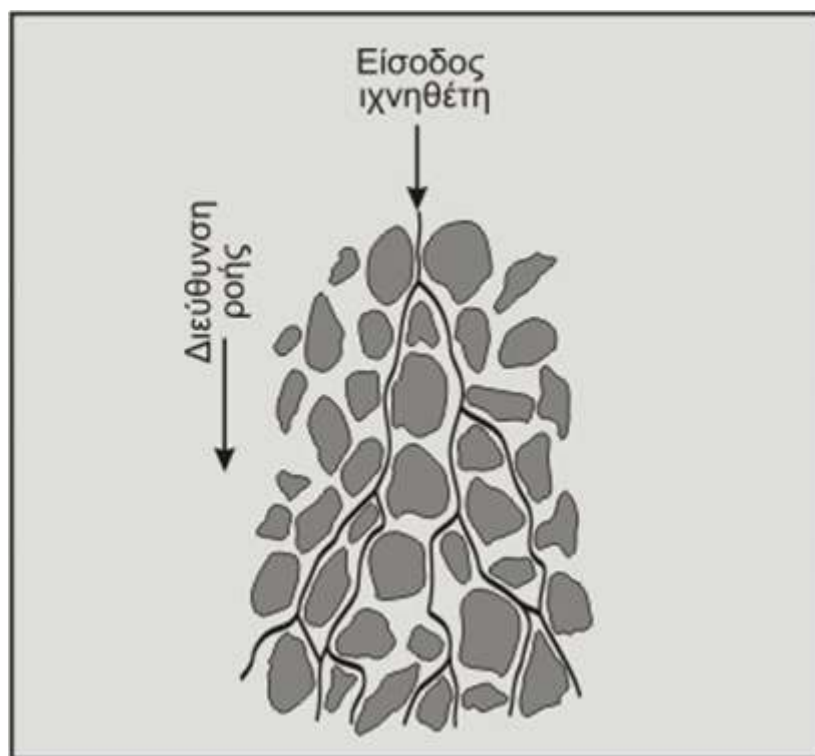
Ο Neuman (1990) μελετώντας τη συσχέτιση μεταξύ της φαινομενικής επιμήκους δυναμικής διασπορικότητας (α_L) και του μήκους του δρόμου ροής (L), διατύπωσε την κάτωθι σχέση, που ισχύει για αποστάσεις μικρότερες των 3.500 m:

$$\alpha_L = 0,0175 L^{1,46} \quad [7]$$



Σχήμα 10: Παράγοντες που προκαλούν τη διαμήκη μηχανική διασπορά.

Η **εγκάρσια** (πλευρική) **διασπορά** προκαλείται από το γεγονός ότι, καθώς κινείται το υγρό σε ένα πορώδες μέσο, η ροή του διακόπτεται από την παρουσία των κόκκων και διακλαδίζεται, επεκτεινόμενη πλευρικά (Βλ Σχήμα 11).



Σχήμα 11: Πλευρική διασπορά ρύπου σε υδροφόρο από ένα σημείο έκχυσης.

12Α.1.4 Υδροδυναμική διασπορά

Η **υδροδυναμική διασπορά** (hydrodynamic dispersion) είναι το αποτέλεσμα της μηχανικής διασποράς και της μοριακής διάχυσης. Η υδροδυναμική διασπορά προκαλεί αραίωση της διαλυμένης ουσίας λόγω μηχανικής ανάμιξης, καθώς και λόγω μοριακής διάχυσης που οφείλεται στη θερμοκινητική ενέργεια των σωματιδίων του ρύπου. Ο κύριος άξονας της ανάμιξης συμπίπτει με τη διεύθυνση της ροής του υπόγειου νερού, καθόσον η διαμήκης συνιστώσα είναι μεγαλύτερη από την εγκάρσια (πλευρική).

12A.1.5 Διάδοση δραστικών ρύπων

Όταν ο ρυπαντής είναι ενεργός (μη συντηρητικός) αντιδρά με το υπόγειο νερό με αποτέλεσμα τη μείωση της μάζας του και η ταχύτητά του είναι μικρότερη από την ταχύτητα του υπόγειου νερού, προκαλώντας επιβράδυνση της ρύπανσης[7]. Όπως έχει προαναφερθεί, η επιφάνεια κυρίως των αργιλικών ορυκτών έχει ηλεκτρικά φορτία. Για την εξισορρόπηση του φορτίου προσροφώνται φορτισμένα άτομα (π.χ. φωσφορικά ιόντα). Η προσρόφηση μπορεί να είναι σχετικά ασθενής αν προκαλείται από δυνάμεις van der Waals ή ισχυρή αν αναπτυχθούν χημικοί δεσμοί μεταξύ της επιφάνειας του κόκκου και του ιόντος. Τα αργιλικά ορυκτά είναι ισχυροί προσροφητές αν έχουν μεγάλη ειδική επιφάνεια και σημαντικά ηλεκτρικά φορτία. Επειδή δε τα περισσότερα αργιλικά ορυκτά έχουν πλεόνασμα αρνητικού φορτίου στην επιφάνειά τους, ευνοείται η προσρόφηση κατιόντων. (Με τον όρο προσρόφηση εννοούμε την συγκράτηση αερίων ή υγρών πάνω στην επιφάνεια των στερεών). Τα δισθενή κατιόντα προσροφώνται πιο εύκολα από ότι τα μονοσθενή ιόντα. Μερικά γνωστά ανιόντα όπως HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- είναι πολύ μεγάλα για να προσροφηθούν. Η ποσότητα της προσροφημένης ουσίας από το έδαφος είναι ευθέως ανάλογη της χημικής δραστικότητας της. Η προσρόφηση μεταξύ των ρυπαντών και των αργιλικών ορυκτών των κόκκων του υδροφορέα γίνεται μέχρι σημείου κορεσμού και όχι απεριόριστα.

12B. ΔΙΑΔΟΣΗ ΜΗ ΑΝΑΜΕΙΞΙΜΩΝ (ΜΗ ΔΙΑΛΥΜΕΝΩΝ) ΡΥΠΩΝ

Οι μη αναμειξίμοι ρύποι με το νερό διακρίνονται στους:

- DNAPLs, που έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα από αυτό, και στους
- LNAPLs, που έχουν μικρότερη πυκνότητα από το νερό (υγρά καύσιμα: πετρέλαιο, βενζίνη, κηροζίνη).

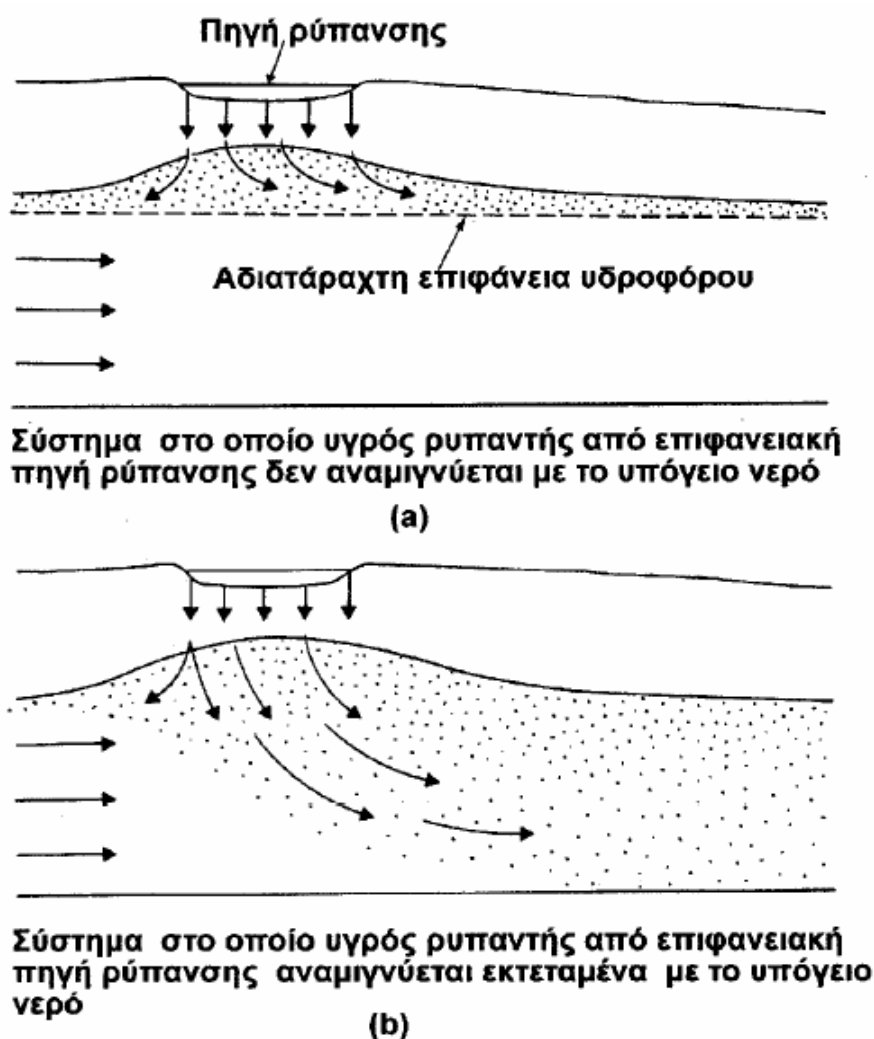
Γενικά υπάρχουν δύο μοντέλα, που αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικές συμπεριφορές κατά την κίνηση του ρύπου προς το υπόγειο νερό. Τα μοντέλα αυτά είναι το μοντέλο μηδενικής και το μοντέλο πλήρους ανάμειξης (Βλ. Σχήμα 12).

Στην ακόρεστη ζώνη επικρατεί η κατακόρυφη κίνηση και ο ρύπος μεταφέρεται από το κατεισδύον νερό στο υπέδαφος. Οι ρύποι με μεγαλύτερη πυκνότητα από το νερό (DNAPL) κινούνται κατακόρυφα και στην κορεσμένη ζώνη

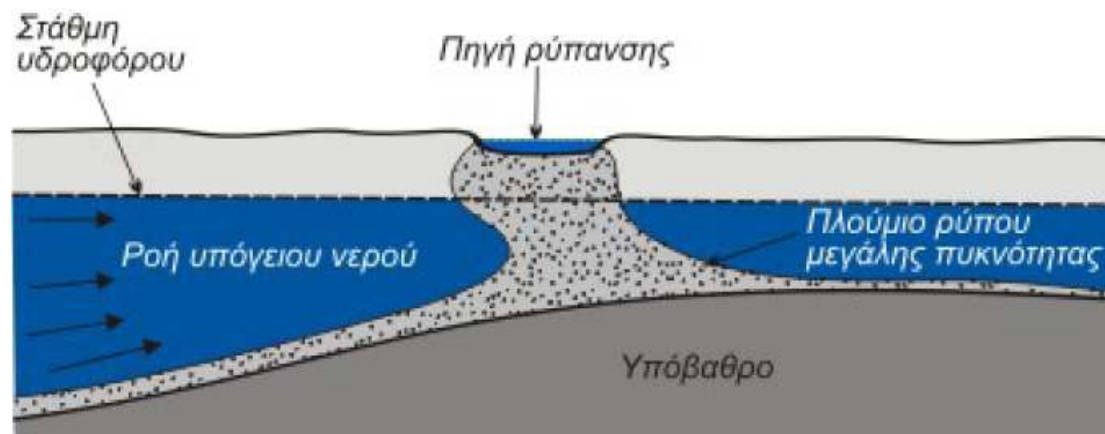
μέχρι το στεγανό υπόβαθρο. Στη συνέχεια επεκτείνονται πλευρικά με μοριακή διάχυση, ακολουθώντας την κλίση του υποβάθρου (Βλ. Σχήμα 13).

Αντίθετα οι ρύποι με μικρότερη πυκνότητα από το νερό (LNAPL) κινούνται κατακόρυφα στην ακόρεστη ζώνη και θα εισέλθουν στην κορεσμένη ζώνη, μόνο όταν το βάρος τους υπερβεί την τριχοειδή πίεση.

Στην περίπτωση μη αναμειξιμων υγρών π.χ. πετρέλαιο, η μετανάστευση από επιφανειακή πηγή ρύπανσης γίνεται κατακόρυφα, εξ' ολοκλήρου στην ακόρεστη ζώνη, ακολουθώντας το μοντέλο της μηδενικής ανάμειξης (Βλ. Σχήμα 14).



Σχήμα 12: Δύο μοντέλα ανάμειξης υπόγειου νερού με υγρό ρυπαντή που προέρχεται από επιφανειακή πηγή ρύπανσης: (a) μοντέλο μηδενικής ανάμειξης και (b) μοντέλο πλήρους ανάμειξης.



Σχήμα 13: Πλούμιο ρύπου μεγάλης πυκνότητας.

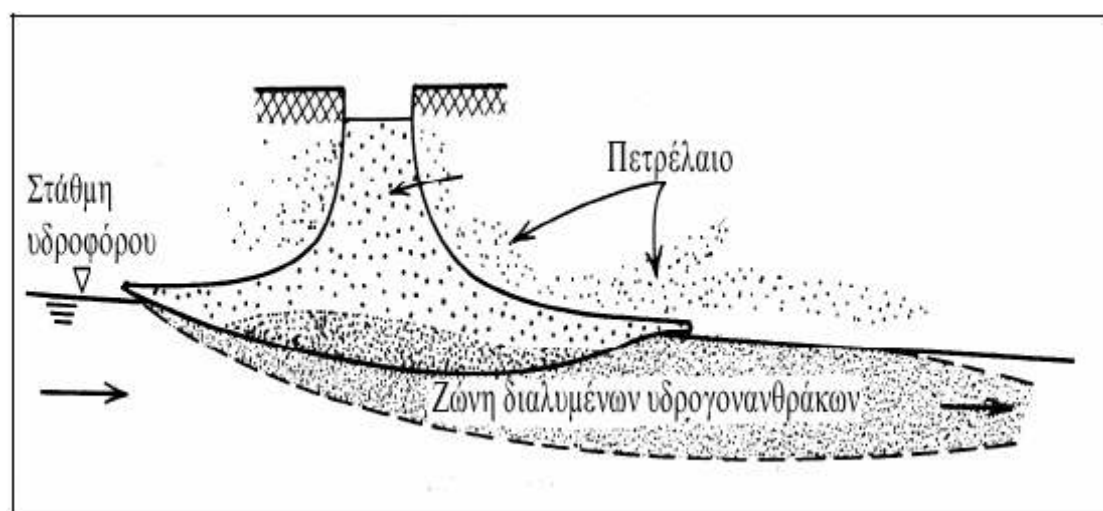
Στη στάθμη του υπόγειου νερού σταματά η καθοδική κίνηση. Η πλευρική εξάπλωση λαμβάνει χώρα μέχρι ότου κάποιο τμήμα της ακόρεστης ζώνης κορεσθεί και αποκατασταθεί ισορροπία. Ο εδαφικός όγκος (V) που απαιτείται για την ακινητοποίηση κάποιου όγκου πετρελαίου (V_p) ισούται με:

$$V = V_p / n S_o \quad [7]$$

όπου:

n=το πορώδες και

S_o= ο υπολειμματικός κορεσμός που εκφράζει τον κορεσμό κάτω από τον οποίο το πετρέλαιο δεν μπορεί να κινηθεί στο πορώδες του πετρώματος.



Σχήμα 14: Πλούμιο ρύπου μικρής πυκνότητας.

13. ΕΔΑΦΟΣ

13.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Έδαφος χαρακτηρίζεται το λεπτό επιφανειακό, γαιώδες στρώμα που λειτουργεί ως υπόβαθρο για την ανάπτυξη των ζώντων οργανισμών και προέρχεται από την αποσάθρωση των πετρωμάτων του στερεού φλοιού της γης.

Βέβαια στις επιστήμες που ασχολούνται με το περιβάλλον όταν εξετάζεται το έδαφος εξετάζεται και το υπέδαφος ως φυσική συνέχεια. Αυτό γιατί η διασπορά πολλών ρύπων(κυρίως βαρέων μετάλλων) καθορίζεται απ' τα χαρακτηριστικά του εδάφους και του υπεδάφους.

13.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Το επιφανειακό έδαφος είναι ένα σύμπλοκο μίγμα ανόργανων υλικών, οργανικής ύλης που αποσυντίθεται ή σχηματίζει σύμπλοκα χουμικά οξέα, νερού, αέρα και ζωντανών μικροοργανισμών. Τα εδάφη είναι ένα ανοικτό περιβαλλοντικό τμήμα που βρίσκεται σε συνεχή ανταλλαγή με την ατμόσφαιρα, την υδρόσφαιρα και τη βιόσφαιρα. Τα εδάφη διαμορφώνονται σε στιβάδες που καλούνται ορίζοντες (horizons), και οι οποίοι έχουν διαφορετική υφή και σύσταση[15].

(α) 0-ορίζοντας: ανώτατο στρώμα εδάφους με φυτά, οργανικά υπολείμματα, πεσμένα φύλλα δένδρων και μερικώς αποσυντιθέμενη οργανική ύλη.

(β) A-ορίζοντας: τα πρώτα 30-50 εκατοστά του μέτρου εδάφους (topsoil) με χουμικά οξέα, μερικά ανόργανα ορυκτά, ζωντανούς οργανισμούς, οργανική ύλη, με τη μεγαλύτερη βιολογική δραστηριότητα από όλες τις άλλες στιβάδες.

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

(δ) B-ορίζοντας: το υπέδαφος είναι ορίζοντας εμπλουτισμού όπου συγκεντρώνονται τα χουμικά οξέα, ο άργιλος (πηλός), σίδηρος και αργίλιο μετά το στράγγισμα από τις επάνω ζώνες.

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

(ζ) R-ορίζοντας: βραχώδες έδαφος (bedrock) που δεν επηρεάζεται από διάβρωση.

Η σύσταση των εδαφών είναι αποτέλεσμα του μίγματος των ανόργανων και οργανικών υλικών, του μεγέθους των σωματιδίων, της οργανικής ύλης που ενσωματώθηκε με τη βιοαποικοδόμηση, του αέρα και του νερού που έχει εγκλωβισθεί στο έδαφος. Τα εδάφη συνήθως αποτελούνται από μίγματα αργίλου, λάσπης (ιλύς) και άμμου και η υφή τους χαρακτηρίζεται από τα μεγέθη των σωματιδίων των τριών αυτών υλικών. Ένα από τα πλέον παραγωγικά εδάφη είναι το παχύ άμμο-αργιλώδες χώμα (κοπρογή, loam) που αποτελείται από 40% λάσπη, 40% άμμο και 20% άργιλο. Τα κυριότερα στοιχεία στο επιφανειακό έδαφος είναι: οξυγόνο (υπό μορφή οξειδίων), πυρίτιο, αργίλιο, σίδηρος, ασβέστιο, νάτριο, κάλιο και μαγνήσιο. Μερικά από τα κλασικά οξείδια του εδάφους είναι: SiO_2 , Fe_3O_4 , MnO_2 , και τα ορυκτά KAlSi_3O_8 , $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$.

Τα εδάφη εκτός από τη σύσταση χαρακτηρίζονται από την υφή, το πορώδες, την υδροσκοπικότητα, την ειδική θερμότητα (ποσότητα ενέργειας για την ανύψωση της θερμοκρασίας κατά 1°C , ανά μονάδα μάζας εδάφους), τη θερμική αγωγιμότητα, την απορροφητική ικανότητα, την οξύτητα και τις βιολογικές τους ιδιότητες.

Η γένεση των εδαφών συντελείται με τριών ειδών διεργασίες, όπως την αποσύνθεση βράχων, την αύξηση της οργανικής ύλης με την αποσυνθετική δράση βακτηρίων και τη μετανάστευση ανόργανων αλάτων στα διάφορα τμήματα με την δράση του νερού.

Το νερό παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των εδαφών και στη μεταφορά θρεπτικών υλικών που απαιτούνται για την ανάπτυξη των φυτών. Τα εδάφη με μεγαλύτερο ποσοστό οργανικής ύλης συγκρατούν περισσότερο νερό. Επίσης, υπάρχει αρκετή αλληλεπίδραση νερού με τον άργιλο του εδάφους. Όταν όμως το νερό εγκλωβισθεί και ξεπεράσει ορισμένα επίπεδα οι μικροοργανισμοί διάσπασης της οργανικής ύλης ενεργοποιούνται, το οξυγόνο χρησιμοποιείται ταχύτατα για την αναπνοή τους και η συνεκτικότητα των κολλοειδών σωματιδίων που συγκρατεί το έδαφος μειώνεται. Το έδαφος διασπάται, το οξυγόνο που απαιτούν οι ρίζες των φυτών μειώνεται και αρχίζει η αποσύνθεση της φυτικής ύλης. Η περίσσεια νερού στο έδαφος έχει ως αποτέλεσμα τη μετακίνηση διαλυτών αλάτων σιδήρου και μαγγανίου που σε μεγάλες συγκεντρώσεις είναι τοξικά στα φυτά.

Τα μακροθρεπτικά συστατικά (macronutrients) αποτελούν ακρογωνιαίο λίθο στην ανάπτυξη της χλωρίδας και των χερσαίων ζώων. Επιπλέον, τα μικροθρεπτικά συστατικά (micronutrients), όπως: σίδηρος, βόριο, χαλκός, μαγγάνιο, μολυβδαίνιο,

μαγγάνιο, ψευδάργυρος, νάτριο και βανάδιο, είναι απαραίτητα σε πολύ μικρές ποσότητες για τη φωτοσύνθεση και σε ενζυμικές λειτουργίες βιολογικών οργανισμών. Υψηλότερες συγκεντρώσεις των μετάλλων αυτών είναι τοξικές για τους έμβιους οργανισμούς που ζουν στο έδαφος.

13.3. ΟΙ ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΑΙΤΙΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Το έδαφος, μαζί με τα υδάτινα συστήματα, είναι ο κυριότερος αποδέκτης της ανθρωπογενούς ρύπανσης. Οι βιομηχανικές, βιοτεχνικές και εμπορικές δραστηριότητες ρυπαίνουν σε μεγάλο βαθμό το έδαφος[16]. Τα υγρά και στερεά απόβλητα αρχικά εναποτίθενται και επεξεργάζονται σε χερσαίες εγκαταστάσεις. Γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα, λιπάσματα και φυτοφάρμακα ρυπαίνουν καλλιεργημένες εκτάσεις. Ατυχήματα και διαρροές πετρελαίου, απόβλητα ορυχείων και λατομείων είναι μερικές άλλες αιτίες ρύπανσης εδαφών. Το έδαφος γίνεται αποδέκτης και των ατμοσφαιρικών ρύπων που κατακρημνίζονται με αργούς ρυθμούς ανάλογα με τις συνθήκες και τη γεωμορφολογία των περιοχών. Οι οργανικοί και ανόργανοι ρύποι που περιέχονται στο νερό, απορροφούνται από το έδαφος και μεταφέρονται στα διάφορα εδαφικά περιβαλλοντικά διαμερίσματα με τη βροχή και στα υπόγεια νερά.

Οι συντελεστές κατανομής ρύπων μεταξύ εδαφών και νερού, εδάφους και ατμόσφαιρας, παίζουν σημαντικό ρόλο για τον τελικό διασκορπισμό, μεταφορά, επανεξάτμιση και συσσώρευση ρύπων στα εδάφη. Οι συντελεστές κατανομής προκαθορίζουν και την τοξικότητα ρύπων στα φυτά και τα χερσαία ζώα, τη διάσπαση από φυσικές διεργασίες μέσα στο έδαφος και την βιοαποικοδόμηση τους μέσω των εδαφικών μικροοργανισμών. Αυτά είναι τα βασικά προβλήματα της περιβαλλοντικής τοξικολογίας σε σχέση με τους τοξικούς και επικίνδυνους χημικούς ρύπους στα εδάφη. Μελέτες για τις συγκεντρώσεις τους και τους μηχανισμούς τοξικότητας χρησιμεύουν για την εκτίμηση του κινδύνου για το περιβάλλον των ζωντανών οργανισμών και την υγεία του ανθρώπου.

Ορισμένες από τις βασικές αιτίες ρύπανσης των εδαφών είναι:

- τα λιπάσματα και φυτοφάρμακα των γεωργικών εκμεταλλεύσεων
- τα υγρά και στερεά απόβλητα των κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων
- τα υγρά και στερεά απόβλητα των χημικών βιομηχανιών

- τα αστικά και νοσοκομειακά απόβλητα που διατίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής και αποτέφρωσης σε υψηλές θερμοκρασίες
- η ρύπανση από την εκμετάλλευση του πετρελαίου, λιπαντικών υλών και ελαστικών των τροχοφόρων οχημάτων
- η ρύπανση από απόβλητα μεταλλευτικών και λατομικών επιχειρήσεων
- η ρύπανση από βαρέα μέταλλα που προέρχονται από χημικές βιομηχανίες, καύση στερεών και υγρών ορυκτών καυσίμων και άλλες διεργασίες εμπλουτισμού ή καθαρισμού μεταλλευμάτων.

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

Στην περίπτωση των **λιπασμάτων** (νιτρικό και θειικό αμμώνιο, ουρία, φωσφορικά άλατα, άλατα καλίου) το έδαφος εμπλουτίζεται με θρεπτικά συστατικά για τα φυτά, αλλά αυτά δεν προσθέτουν τίποτα στην περίπτωση των χουμικών και των απαραίτητων εδαφικών ιχνοστοιχείων. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της οργανικής ύλης, η πορώδης υφή του εδάφους αλλοιώνεται και η συγκράτηση του νερού στο έδαφος μειώνεται. Με τη μείωση του νερού αυξάνεται η απώλεια θρεπτικών συστατικών και μειώνεται η γονιμότητα του εδάφους. Η προσπάθεια των γεωργών να αυξήσουν την απόδοση (χωρίς τη σωστή διαχείριση του προβλήματος) οδηγεί στην αύξηση της τοξικότητας των νιτρικών και άλλων λιπασμάτων στο έδαφος και στα νερά.

Παρόμοια προβλήματα ρύπανσης δημιουργούν ορισμένα από τα **φυτοφάρμακα** και οι μεταβολίτες τους στο έδαφος. Η συσσώρευση των υπολειμμάτων φυτοφαρμάκων σε γεωργικές εκτάσεις έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση τοξικών φαινομένων στους χερσαίους οργανισμούς, στους γαιοσκώληκες, στους νηματώδεις και στους μικροοργανισμούς, πράγματα που με το χρόνο υποβαθμίζουν την υφή και την ποιότητα των εδαφών. Ιδιαίτερα προβλήματα προκαλούν τα φυτοφάρμακα που βιοαποικοδομούνται με αργούς ρυθμούς (μη βιοδιασπάσιμα) ή εκείνα που κατά τη διάσπασή τους παράγουν τοξικούς μεταβολίτες.

Τα **βαρέα μέταλλα** είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας ρύπανσης των εδαφών. Αν και οι χαμηλές συγκεντρώσεις μετάλλων μπορούν να γίνουν αποδεκτές από ορισμένα φυτά χωρίς να προκαλούν τοξικές βλάβες, οι υψηλές συγκεντρώσεις

μετάλλων έχουν αρνητικές επιδράσεις στην ενζυμική λειτουργία σε χερσαία ζώα και στους γαιοσκώληκες, νηματώδεις και μικροοργανισμούς των εδαφών. Οι γαιοσκώληκες αποτελούν ιδανικά πειραματόζωα και χρησιμοποιούνται σε πειράματα περιβαλλοντικής τοξικολογίας και οικοτοξικολογίας ως ευαίσθητοι βιοδείκτες για βαρέα μέταλλα, φυτοφάρμακα και άλλους τοξικούς ρύπους. Για τις τοξικολογικές αυτές δοκιμασίες έχουν δημιουργηθεί ειδικά πρωτόκολλα πειραματικών τεχνικών.

Τα τοξικά απόβλητα από βιομηχανικές εγκαταστάσεις, λόγω των τοξικών και επικίνδυνων ουσιών που περιέχουν (αλογονομένες ουσίες, πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, τοξικοί διαλύτες, βαρέα μέταλλα, κλπ) προκαλούν διάφορα προβλήματα ρύπανσης στο έδαφος και στα βιολογικά συστήματα. Τα απόβλητα και η διαχείριση τους αποτελεί μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα σε πολλές αναπτυγμένες χώρες, ιδιαίτερα για την ποιότητα των εδαφών και τις τοξικές δράσεις σε ζωντανούς οργανισμούς.

Σημαντικό πρόβλημα ρύπανσης εδαφών αποτελούν το **πετρέλαιο**, τα προϊόντα διύλισης, τα λιπαντικά και οι διάφοροι διαλύτες που είναι προϊόντα της χημικής βιομηχανίας πετρελαίου. Η ρύπανση από πετρέλαιο και τα προϊόντα του προκύπτει κατά τις χερσαίες μεταφορές, τις διαρροές από εργοστάσια, τις βιοτεχνίες και τις αποθήκες τους, τις παλαιές εγκαταστάσεις διυλιστηρίων, τα πρατήρια υγρών καυσίμων και τα διάφορα ατυχήματα σε εγκαταστάσεις άντλησης πετρελαίου. Η τοξικότητα του πετρελαίου λόγω της ύπαρξης αδιάλυτων υδρογονανθράκων, πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (ΠΑΥ) και πτητικών αρωματικών ενώσεων καθιστά τη ρύπανση επικίνδυνη για τους χερσαίους οργανισμούς, τη χλωρίδα και τους μικροοργανισμούς του εδάφους.

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

14 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

14.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η απορρύπανση εδαφών και υπόγειων υδροφορέων αλλά και η προστασία τους από τη ρύπανση αποτελούν αντικείμενα με ιδιαίτερο ενδιαφέρον από γεωτεχνική άποψη. Τα θέματα απορρύπανσης αφορούν την ανάληψη ενεργειών για την περιβαλλοντική αποκατάσταση εδαφών και υδροφορέων που έχουν ήδη ρυπανθεί, ενώ τα θέματα προστασίας αφορούν τη λήψη μέτρων για να αποφευχθεί η περαιτέρω επέκταση της ρύπανσης από περιοχές που έχουν ρυπανθεί προς άλλες περιοχές (π.χ. μέσω της κίνησης του υπόγειου νερού)[17]. Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμένες κατηγορίες θεμάτων απορρύπανσης και προστασίας εδαφών και υπόγειων υδροφορέων:

1. Καθαρισμός εδαφών που έχουν ρυπανθεί από την ανεξέλεγκτη ταφή χημικών αποβλήτων, όπως παραπροϊόντων της διύλισης πετρελαιοειδών (νάφθα, φαινόλες, χλωριωμένοι διαλύτες, κρεοζότο, ΒΤΕΧ1 κλπ), τοξικών αποβλήτων (διοξίνη, τετραχλωράνθρακας, PCB2), γεωργικών φαρμάκων (π.χ. DDT, Aldrin, μαλαθείο, PCP3), βαρέων μετάλλων (υδράργυρος, μόλυβδος, κάδμιο) κλπ.

2. Καθαρισμός εδαφών που έχουν ρυπανθεί από τυχαίες διαρροές υδρογονανθράκων (π.χ. σε διυλιστήρια πετρελαιοειδών, δεξαμενές καυσίμων βιομηχανιών αλλά και κατοικιών), τυχαίες διαρροές επικίνδυνων και τοξικών ουσιών από τους ταμιευτήρες αποθήκευσής τους ή σε ατυχήματα κατά τη μεταφορά τους κλπ.

3. Καθαρισμός εδαφών που έχουν ρυπανθεί από την απόθεση αστικών ή βιομηχανικών αποβλήτων σε παλαιότερες εποχές χωρίς να ληφθούν ειδικά μέτρα προστασίας έναντι διαρροής του υγρού στραγγίσματος (leachate) στο υπέδαφος.

4. Προστασία από τη ρύπανση υδροφορέων που γειτνιάζουν με περιοχές που έχουν ρυπανθεί μέσω κάποιας από τις παραπάνω αιτίες.

5. Προστασία υδροφορέων από την υφαλμύρυνση (δηλαδή την αύξηση της περιεκτικότητας σε άλατα) λόγω υπερεκμετάλλευσης, ανάμειξης με το θαλάσσιο νερό, έντονης εξάτμισης, κλπ.

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

1. Η διαπίστωση ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι τέτοιος που προκαλεί σημαντικούς κινδύνους στη δημόσια υγεία ή γενικότερα “μή-αποδεκτή υποβάθμιση του περιβάλλοντος”. Τα τελευταία χρόνια, τα μέγιστα όρια της αποδεκτής υποβάθμισης του περιβάλλοντος έχουν μειωθεί σημαντικά (κυρίως λόγω της ευαισθητοποίησης των κοινωνικών φορέων) με συνέπεια τη μεγάλη αύξηση των περιοχών στις οποίες υπάρχει ανάγκη απορρύπανσης ή/και προστασίας.

2. Η ανάγκη βελτίωσης της ποιότητας του περιβάλλοντος σε μια περιοχή, έστω και εάν ο βαθμός ρύπανσης δεν προκαλεί σημαντικά προβλήματα δημόσιας υγείας.

3. Η ανάγκη αύξησης της εμπορικής αξίας των ακινήτων σε μια περιοχή.

4. Η ανάγκη ανάπτυξης μιας περιοχής σε συνδυασμό με την έλλειψη “καθαρών” χώρων για τη δημιουργία βιομηχανιών, οικισμών κλπ. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται και περιπτώσεις όπου διατίθενται μεν “καθαροί” χώροι για ανάπτυξη αλλά το κόστος τους υπερβαίνει το μικτό κόστος ανάπτυξης (αγορά συν απορρύπανση) άλλων χώρων στους οποίους επιβάλλεται απορρύπανση.

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

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

Μια τρίτη μέθοδος αντιμετώπισης είναι η **αφαίρεση** (με εκσκαφή) **του εδάφους** που έχει ρυπανθεί και η μεταφορά και απόρριψή του σε ελεγχόμενους

αποδέκτες με σύγχρονα συστήματα προστασίας από την επέκταση της ρύπανσης (συστήματα στεγάνωσης του πυθμένα, συστήματα συλλογής και απομάκρυνσης του υγρού στραγγίσματος, συστήματα κάλυψης κλπ). Αν και η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε ορισμένες περιπτώσεις (κυρίως σε περιπτώσεις εντοπισμένης ρύπανσης) παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα όπως:

1. Η πιθανή διαφυγή ρύπων κατά την εκσκαφή και μεταφορά των εδαφικών υλικών προς τους χώρους απόρριψης (κυρίως με τη μορφή σκόνης και υγρού στραγγίσματος).

2. Νομικοί περιορισμοί ως προς τη δυνατότητα μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων από ορισμένους δρόμους.

3. Πολύ μεγάλο κόστος, ιδίως στις περιπτώσεις που οι ποσότητες των εδαφικών υλικών που πρέπει να αφαιρεθούν είναι μεγάλες.

4. Δεν αποτελεί λύση του προβλήματος, αλλά απλή μεταφορά του σε άλλη θέση.

5. Η έλλειψη κατάλληλων χώρων επαρκούς χωρητικότητας για την απόρριψη των ρυπανθέντων υλικών αλλά και το υψηλό κόστος κατασκευής των μέτρων προστασίας από την επέκταση της ρύπανσης στους χώρους αυτούς.

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

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

1. Μεθόδους απορρύπανσης εδαφών, που είναι:

1.1 Η βιολογική αποκατάσταση (bio-remediation) μέσω της αποδόμησης των οργανικών ρύπων, είτε επιτόπου είτε μετά από εκσκαφή και αναμόχλευση.

1.2 Η έκπλυση του εδάφους με χημικές ουσίες (soil washing, chemical extraction, leaching).

1.3 Η θερμική επεξεργασία είτε επιτόπου είτε μετά από μεταφορά σε ειδικούς κλιβάνους όπου επιβάλλεται απλή θέρμανση (heating), καύση (incineration) ή επεξεργασία με ατμό (steam stripping).

1.4 Η απορρύπανση με εφαρμογή υποπίεσης (vacuum extraction) ή απλού αερισμού (soil venting).

2. Μεθόδους απορρύπανσης υπογείων υδάτων, που είναι:

2.1 Η βιολογική αποκατάσταση (bio-remediation) μέσω της αποδόμησης των οργανικών ρύπων.

2.2 Η μέθοδος άντλησης και απορρύπανσης (pump and treat) διαλελυμένων και αιωρούμενων ρύπων.

2.3 Η μέθοδος άντλησης επιπλεόντων ρύπων (free product recovery), όπως ελαφρών πετρελαιοειδών.

2.4 Η αφαίρεση πτητικών ρύπων με εφαρμογή υποπίεσης (vacuum extraction).

2.5 Η αφαίρεση βαρέων μετάλλων με εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος (electroreclamation).

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

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

1. Μέθοδοι εγκιβωτισμού (containment) του εδάφους, που είναι:

1.1 Τα συστήματα κάλυψης της επιφάνειας.

1.2 Τα περιμετρικά κατακόρυφα διαφράγματα.

1.3 Τα οριζόντια διαφράγματα βάσης.

1.4 Τα συστήματα σταθεροποίησης του εδάφους που έχει ρυπανθεί με χημικές μεθόδους (τσιμέντο, άσβεστο, πολυμερή, ασφαλτικά κλπ) ή με θερμικές μεθόδους (vitrification).

2. Υδραυλικές μέθοδοι αναστροφής της κίνησης του υπόγειου νερού.

Οι μέθοδοι αυτές εξετάζονται αναλυτικά στα επόμενα εδάφια.

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

14.2 ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

Τα υπόγεια νερά αποτελούν το μεγαλύτερο και το πιο ευαίσθητο σύστημα γλυκών νερών στην Ευρωπαϊκή Ένωση αλλά και κύρια πηγή εφοδιασμού του κοινού με πόσιμο νερό σε πολλές περιοχές[18]. Η Οδηγία 2006/118/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 12ης Δεκεμβρίου 2006 έχει σαν στόχο την

προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση, και κυρίως αυτή που προέρχεται από ορισμένες επικίνδυνες ουσίες οι οποίες μπορεί να είναι τοξικές, ανθεκτικές ή βιο-συσσωρεύσιμες.

Λαμβανομένων υπόψη των αναγκών να επιτευχθούν αξιόπιστα επίπεδα προστασίας των υπογείων υδάτων, έχουν καθορισθεί ποιοτικά πρότυπα και αναπτυχθεί μεθοδολογίες με βάση μια κοινή προσέγγιση, ώστε να θεσπιστούν κριτήρια για την αξιολόγηση της χημικής κατάστασης των συστημάτων υπογείων νερών.

Τα κράτη μέλη θα πρέπει να ορίσουν για πρώτη φορά ανώτερες αποδεκτές τιμές για όλους του ρύπους και δείκτες ρύπανσης οι οποίοι, σύμφωνα με το χαρακτηρισμό που καθορίζεται δυνάμει του άρθρου 5 της οδηγίας 2000/60/EK, χαρακτηρίζουν συστήματα ή ομάδες συστημάτων υπόγειων νερών ως διατρέχοντα τον κίνδυνο να μην επιτύχουν καλή χημική κατάσταση των υπογείων νερών.

Για να επιτευχθεί ο στόχος πρόληψης ή περιορισμού της εισαγωγής ρύπων στα υπόγεια ύδατα, ο οποίος θεσπίζεται σύμφωνα με το άρθρο 4, παράγραφος 1, σημείο β), στοιχείο i), της 2000/60/EK, τα κράτη μέλη διασφαλίζουν ότι το πρόγραμμα μέτρων που καταρτίζεται σύμφωνα με το άρθρο 11 της εν λόγω οδηγίας περιλαμβάνει:

(α) Όλα τα μέτρα που απαιτούνται με σκοπό την πρόληψη της εισαγωγής οποιασδήποτε επικίνδυνης ουσίας στα υπόγεια νερά.

(β) Για τους ρύπους που απαριθμούνται στο Παράρτημα VIII της οδηγίας 2000/60/EK και οι οποίοι δεν θεωρούνται επικίνδυνοι καθώς επίσης και για οποιαδήποτε άλλο μη επικίνδυνο ρύπο που δεν περιλαμβάνεται στο εν λόγω παράρτημα, ο οποίος όμως, κατά τα κράτη μέλη, αποτελεί πραγματικό ή δυνητικό κίνδυνο ρύπανσης, όλα τα μέτρα που απαιτούνται για τον περιορισμό της εισαγωγής στα υπόγεια νερά, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι η εισαγωγή αυτή δεν οδηγεί σε υποβάθμιση, ούτε προκαλεί σημαντική και διατηρούμενη ανοδική τάση συγκεντρώσεων ρύπων στα υπόγεια ύδατα. Τα μέτρα αυτά λαμβάνουν υπόψη, τουλάχιστον, την καθιερωμένη βέλτιστη περιβαλλοντική πρακτική και τις βέλτιστες διαθέσιμες τεχνικές που ορίζονται στη σχετική νομοθεσία.

Για τον καθορισμό ζωνών προστασίας ακολουθείται η πιο κάτω διαδικασία:

- Το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης ετοιμάζει φάκελο για κάθε γεώτρηση με όλα τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της.

- Το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων, οριοθετεί τις Ζώνες Προστασίας τις οποίες αποστέλλει στην Υπηρεσία Περιβάλλοντος. Ο καθορισμός των Ζωνών ακολουθεί μια διαδικασία που προβλέπει διαβούλευση με τα εμπλεκόμενα τμήματα και Υπηρεσίες (Επαρχιακές Διοικήσεις, Πολεοδομία, Υπηρεσία Περιβάλλοντος, Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης).
- Η Υπηρεσία Περιβάλλοντος ετοιμάζει τη σχετική γνωστοποίηση και την υποβάλλει για έγκριση και υπογραφή στον Υπουργό Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος και στη συνέχεια δημοσιεύει την Γνωστοποίηση στην Επίσημη Εφημερίδα της Δημοκρατίας.

Οι ζώνες προστασίας υδρογεωτρήσεων χρησιμοποιούνται από το Τμήμα πολεοδομίας και οικήσεως και τις επαρχιακές διοικήσεις για την ορθή χωροθέτηση και αδειοδότηση των διαφόρων αναπτύξεων που εμπíμπτουν στις ζώνες αυτές. Η συστηματική εφαρμογή του Διατάγματος ξεκίνησε μετά από συσκέψεις που έγιναν με τα εμπλεκόμενα τμήματα το 2006. Μέχρι σήμερα έχουν καθορισθεί Ζώνες Προστασίας για αρκετές γεωτρήσεις, ενώ υπάρχει αρκετός ακόμα αριθμός που θα πρέπει να προστατευθούν με το καθορισμό Ζωνών Προστασίας.

14.3 ΖΩΝΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

14.3.1 Ζώνη I ή Ζώνη Άμεσης Προστασίας

Η Ζώνη είναι ακτίνας 10-50 μέτρων, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα και πρέπει να περιφράσσεται. Στη Ζώνη αυτή απαγορεύεται κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα, εκτός από τις εργασίες προμήθειας νερού από τη γεώτρηση[18]. Επιπλέον απαγορεύεται η διέλευση οχημάτων και η διάβαση πεζών.

14.3.2 Ζώνη II ή Ελεγχόμενη Ζώνη

Η Ζώνη καθορίζεται από το όριο της Ζώνης Άμεσης Προστασίας μέχρι μια γραμμή από την οποία το υπόγειο νερό θα χρειάζεται τουλάχιστον 50 μέρες (συνήθως είναι σε ακτίνα μικρότερη των 100 μέτρων) για να φθάσει στο σημείο της γεώτρησης.

Σκοπός της είναι η προστασία των υπόγειων νερών από μικροβιολογικής άποψης. Στη Ζώνη αυτή απαγορεύονται οι ακόλουθες δραστηριότητες:

- Ανάπτυξη κτηνοτροφικής δραστηριότητας, ιχθυοτροφείων, χρήση κοπριάς.
- Χρήση φυτοφαρμάκων, ζιζανιοκτόνων, παρασιτοκτόνων και λιπασμάτων.

14.4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ

Σε προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι διάφορες κατηγορίες πηγών ρύπανσης αλλά και οι αντίστοιχες ταξινομήσεις των πολυπληθών ουσιών που χαρακτηρίζονται ως ρύποι όταν, ανάλογα με τη συγκέντρωσή τους στο υπόγειο νερό, το καθιστούν ακατάλληλο για χρήση. Τα σημερινά δεδομένα των αναγκών της ανθρωπότητας ειδικά, αλλά και του φυσικού περιβάλλοντος του πλανήτη γενικότερα, δεν επιτρέπουν την πολυτέλεια της κατάργησης υδατικών πόρων που έχουν ρυπανθεί και την αναζήτηση νέων εναλλακτικών πηγών, πρακτική που εφαρμοζόταν στο παρελθόν. Έτσι προέκυψε μια ολόκληρη τεχνολογία που συνδυαζόμενη με μια σειρά μεθοδολογιών, έχει ως στόχο αυτό που χαρακτηρίζεται γενικά ως έλεγχος της ποιότητας των υπόγειων νερών, και που πρακτικά διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

α. Έλεγχος των πηγών ρύπανσης. Πρόκειται για την αντιμετώπιση προβλημάτων που αφορούν στις επιπτώσεις στην ποιότητα του υπόγειου νερού από νέες εγκαταστάσεις που ενέχουν τον κίνδυνο ρύπανσης (διάθεση λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων, ταφή ραδιενεργών ουσιών κτλ.). Βασικός στόχος των σχετικών μελετών, που αφορούν μεθοδολογίες εκτίμησης των επιπτώσεων και τεχνικές ελαχιστοποίησής τους, είναι η όσο το δυνατό μικρότερη επιβάρυνση των υπόγειων υδατικών συστημάτων από τις αντίστοιχες δραστηριότητες.

Περιορισμός της ρύπανσης είναι η παρεμπόδιση της εισόδου των ρύπων στο υπόγειο νερό ή της μετακίνησης της ζώνης (κηλίδας) ακάθαρτου νερού σε περιοχές του υδροφορέα από τις οποίες γίνονται αντλήσεις και συνεπώς και η εκμετάλλευσή του.

Σχετικά με το πρόβλημα ελέγχου των πηγών ρύπανσης πρωταρχικός στόχος είναι η μείωση του συνολικού ρυπαντικού φορτίου που μετά τη διάθεση στο έδαφος εισέρχεται στο υπόγειο νερό. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μια σειρά επεξεργασιών

που περιλαμβάνουν φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες. Πέραν όμως της πρωτογενούς, όπως λέγεται, αυτής επεξεργασίας λαμβάνονται και πρόσθετα μέτρα για την παρεμπόδιση εισόδου των ακάθαρτων νερών στους υδροφορείς. Ένα τέτοιο σύστημα, που χαρακτηρίζεται ως έλεγχος της πηγής, αποσκοπεί στη μείωση του διηθούμενου όγκου των αποβλήτων. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι η υδατομόνωση της επιφάνειας του εδάφους με διάφορα αδιαπέρατα υλικά, ειδικές διαμορφώσεις στην τοπογραφία του χώρου διάθεσης με στόχο τον έλεγχο τόσο της επιφανειακής απορροής όσο και της διήθησης των διασταλαζόντων ρύπων, εγκαταστάσεις αποστράγγισης κτλ.

β. Εξυγίανση υδροφορέων. Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται όλα εκείνα τα διαπιστωμένα επεισόδια ρύπανσης υπόγειων υδατικών πόρων, όπου διάφορες δραστηριότητες στο παρελθόν έχουν προκαλέσει σοβαρά προβλήματα υποβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων νερών, ώστε να καθίσταται τελείως αναγκαία η εφαρμογή κάποιας τεχνικής εξυγίανσης του υδροφορέα, εφόσον επιδιώκεται η συνέχεια της εκμετάλλευσής του.

Όσον αφορά στην κατηγορία των περιστατικών που επιβάλλουν την εξυγίανση υδροφορέων που έχουν ήδη υποστεί ρύπανση οι επικρατούσες τεχνικές ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

- α) φυσικές μέθοδοι ελέγχου και
- β) επιτόπου μέθοδοι εξυγίανσης.

Η θεραπεία (εξυγίανση) ενός υδροφορέα-παρόλο αναφέρεται ειδικά στη διαδικασία ανάκτησης της αρχικής ποιότητας καθαρού νερού. Αφού καταργηθεί λοιπόν η πηγή ρύπανσης, η τεχνική που συνήθως ακολουθείται έχει ως στόχο την ανανέωση του ακάθαρτου με καθαρό νερό. Θα πρέπει να τονιστεί ότι για έναν μεγάλο αριθμό προβλημάτων ρύπανσης δεν αρκεί μια μόνο τεχνική, απ' αυτές που περιγράφονται αμέσως παρακάτω, αλλά συνδυασμός δύο ή περισσότερων για μια πιο αποτελεσματική αντιμετώπιση κάθε περιστατικού.

Η παγκόσμια ευαισθητοποίηση για την προστασία των διαθέσιμων υδατικών πόρων έχει οδηγήσει στον καθορισμό αυστηρών μηχανισμών ελέγχου νέων εγκαταστάσεων που υπάρχει η πιθανότητα να υποβαθμίσουν την ποιότητα των υπόγειων νερών. Αντίθετα, η έλλειψη του ανάλογου προγραμματισμού και της πρόβλεψης κατά τις προηγούμενες δεκαετίες οδήγησε στη δημιουργία χιλιάδων περιστατικών ρύπανσης, κυρίως στις αναπτυγμένες τεχνολογικά χώρες. Το χειρότερο στοιχείο για τις περιπτώσεις αυτές είναι ότι, εξαιτίας του γεγονότος ότι το υπόγειο

νερό κινείται αργά και κυρίως κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, έτσι ώστε η εμφάνισή του σε πηγές ή πηγάδια να γίνεται μετά από μεγάλα χρονικά διαστήματα, είναι εξαιρετικά δύσκολη η εκτίμηση της εξάπλωσης της ρύπανσης και κατά συνέπεια ο έλεγχός της. Έτσι, το μεγαλύτερο βάρος στις ερευνητικές προσπάθειες σήμερα δίνεται τόσο σε τεχνικές μετρήσεων πεδίου όσο και σε μεθοδολογίες διαχείρισης, που συνίστανται από θεωρητικά μοντέλα προσομοίωσης σε συνδυασμό με μοντέλα ανάλυσης συστημάτων και βελτιστοποίησης αλλά και από τεχνολογίες καθαρισμού και επεξεργασίας των ακάθαρτων νερών.

Για να ολοκληρωθεί η παρουσίαση της ταξινόμησης των διάφορων μεθοδολογιών ελέγχου της ποιότητας των υπόγειων νερών θα πρέπει να αναφερθεί ότι η επιλογή της καταλληλότερης εξαρτάται και από τον χαρακτηρισμό του περιστατικού ρύπανσης που είναι είτε οξύ είτε χρόνιο. Οξέα περιστατικά ρύπανσης είναι αυτά που προέρχονται από διαρροές ή διαθέσεις ρύπων σε μεγάλες ποσότητες μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα. Κλασικό παράδειγμα αποτελούν τα διάφορα οδικά ή σιδηροδρομικά ατυχήματα, και ατυχήματα ή καταστροφές σε εργοστάσια και βιομηχανίες όπου οι ρύποι είναι κατά κανόνα πετρελαιοειδή και χημικά προϊόντα. Χρόνια φαινόμενα ρύπανσης είναι όλα εκείνα που προέρχονται από τις υπόλοιπες πηγές ρύπανσης, σημειακές ή κατανεμημένες, και περιλαμβάνουν από νιτρικά και βακτήρια μέχρι μέταλλα και συνθετικές οργανικές ουσίες.

14.5 ΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ

Στην κατηγορία αυτή μπορούν να ενταχθούν δύο τύποι ελέγχου της ποιότητας των υπόγειων ροών που έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό ότι ο γενικός τους στόχος επιτυγχάνεται μέσω των μηχανισμών κίνησης και μεταφοράς του νερού και κατά συνέπεια και των ρύπων που μεταφέρονται μ' αυτό, ξεκινώντας από τη διήθηση του επιφανειακού νερού στην ακόρεστη ζώνη και φθάνοντας στην κίνησή του σε βαθείς, περιορισμένους υδροφορείς. Οι δύο αυτοί τύποι θα μπορούσαν να χαρακτηρισθούν με βάση την επέμβαση ή μη του ανθρώπου στους παραπάνω μηχανισμούς ως[11]:

- α) φυσικές διεργασίες καθαρισμού και
- β) ανθρωπογενείς διαδικασίες ελέγχου των υπόγειων ροών.

14.5.1 Φυσικές διεργασίες καθαρισμού

Οι φυσικές διεργασίες καθαρισμού του υπόγειου νερού αφορούν κυρίως περιπτώσεις αβαθών φρεατίων υδροφορέων που έχουν υποστεί ρύπανση. Εδώ μπορούμε να διακρίνουμε τέσσερις μορφές φυσικών διεργασιών:

Η **πρώτη μορφή** έχει να κάνει με τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των εδαφών μέσα από τα οποία κινούνται οι υγροί ρύποι. Μια μεγάλη λοιπόν εκτόνωση του ρυπαντικού φορτίου γίνεται στην πρώτη φάση του φαινομένου που αφορά στη διάβαση των ρύπων από την ακόρεστη ζώνη. Χημικές και βιολογικές αντιδράσεις στη ζώνη αυτή οδηγούν στην αποδόμηση των ρύπων, στην καθίζηση, την προσρόφηση και την οξειδωσή τους. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος της ακόρεστης ζώνης τόσο πιο μεγάλος είναι και ο βαθμός της απορρύπανσης που επιτυγχάνεται μέσα σ' αυτήν. Ακόμα πιο βαθιά, και ειδικότερα κάτω από τον φρεάτιο ορίζοντα, η περιεκτικότητα του γεωλογικού σχηματισμού σε ορυκτά καθίσταται πιο κρίσιμη καθώς διεργασίες, όπως η ανταλλαγή ιόντων ή η προσρόφηση, επιτυγχάνονται σχετικά πιο εύκολα με την παρουσία διάφορων τύπων αργίλων, υδροξειδίων και οργανικής ύλης.

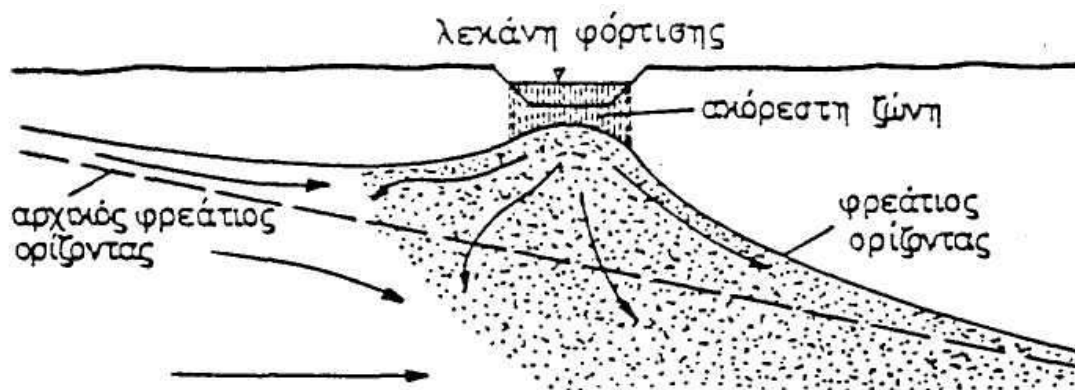
Η **δεύτερη μορφή** φυσικής διεργασίας ελέγχου της ποιότητας περιλαμβάνει τις φυσικές διαδικασίες που τείνουν να απομακρύνουν ή να υποβαθμίσουν έναν ρύπο κατά μήκος της υπόγειας ροής του νερού από περιοχές ή σημεία φόρτισης σε περιοχές ή σημεία εκφόρτισης. Οι διαδικασίες αυτές αναφέρονται στη διήθηση, προσρόφηση, ιοντοανταλλαγή, διασπορά, οξειδωση και μικροβιακή αποδόμηση, καθώς και στην αραίωση.

Η **τρίτη μορφή** έχει σχέση με την υδροδυναμική των υπόγειων ροών και πιο ειδικά με τις υδραυλικές συνθήκες που επικρατούν, τα διάφορα στρώματα που συναντώνται στη διάρκεια της ροής, την υδραυλική επικοινωνία των στρωμάτων αυτών με γειτονικούς υδροφορείς κτλ[11].

Τέλος, στην **τέταρτη μορφή** τον πρώτο ρόλο παίζει ο τύπος του ρύπου. Αυτός περιλαμβάνει όλα τα φυσικά, χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του και ειδικότερα τον βαθμό ισορροπίας του κάτω από διαφορετικές συνθήκες.

Από τη γενικότερη άποψη, τόσο οι φυσικές διεργασίες όσο και οι ανθρωπογενείς διαδικασίες ελέγχου, που περιγράφονται πιο κάτω, εξαρτώνται κυρίως από το υδρογεωλογικό περιβάλλον των σχηματισμών που αποτελούν τους υδροφορείς. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει και η θέση του φρεατίου ορίζοντα, όχι μόνο γιατί αποτελεί το διαχωριστικό όριο μεταξύ ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης

αλλά γιατί προσδιορίζει και το πάχος της ακόρεστης. Στις περισσότερες επίσης περιπτώσεις ο φρεάτιος ορίζοντας επηρεάζεται και από τυχόν αντλήσεις. Έτσι ο κώνος πτώσης που σχηματίζεται μεταβάλλει τοπικά τόσο την υδραυλική κλίση όσο και την ταχύτητα της υπόγειας ροής.



Σχήμα 15: Διήθηση από λεκάνη εμπλουτισμού.

14.5.2 Ανθρωπογενείς διαδικασίες ελέγχου

Οι τύποι του φυσικού ελέγχου των ροών που χαρακτηρίζονται ως ανθρωπογενείς αποτελούν μια πολύ συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνική προστασίας και εξυγίανσης των υδροφορέων από ένα πολύ μεγάλο αριθμό ρύπων. Τα σχετικά έργα που απαιτούνται διαχωρίζονται σε τέσσερις ευρύτερες κατηγορίες:

- α) αδιαπέρατα διαφράγματα,
- β) διαπερατές κλίνες επεξεργασίας,
- γ) συστήματα πηγαδιών και
- δ) βιολογικές τεχνικές αποκατάστασης.

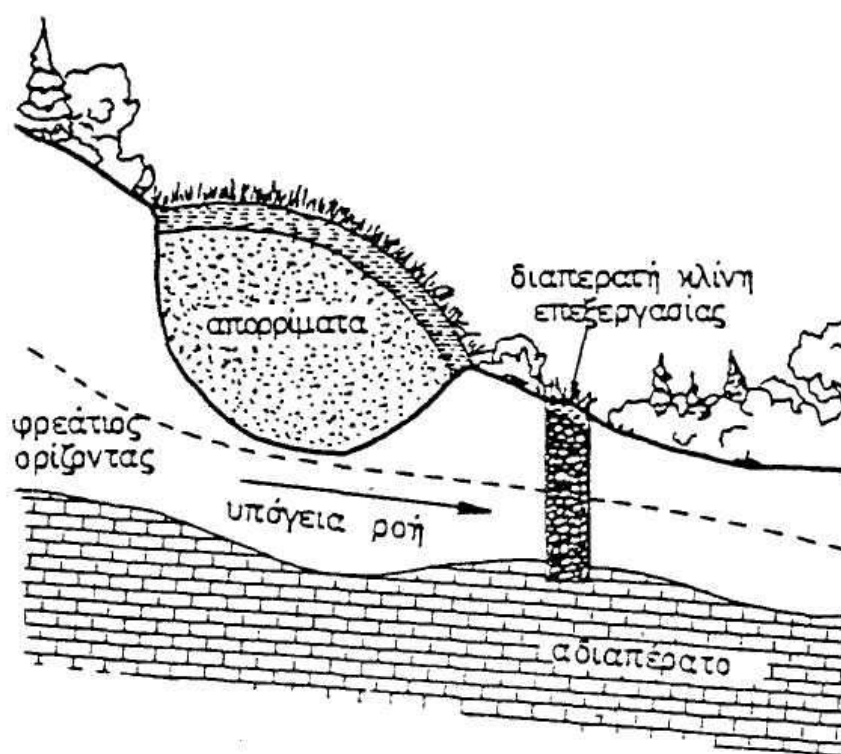
Λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των τεχνικών αυτών αλλά και της εκτεταμένης εφαρμογής τους υπάρχει πλούσια διαθέσιμη βιβλιογραφία για επιμέρους στοιχεία και λεπτομέρειες. Αμέσως παρακάτω δίνονται συνοπτικά ορισμένα μόνο χαρακτηριστικά κάθε κατηγορίας.

α. Τα αδιαπέρατα διαφράγματα χρησιμοποιούνται κυρίως για να εκτρέψουν τη φυσική υπόγεια ροή, έτσι ώστε είτε η ροή να μην περάσει από μια περιοχή διάθεσης ρύπων είτε να περιορισθεί τοπικά η ζώνη ρύπανσης που δημιουργήθηκε από

μια τέτοια διάθεση. Ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται έχουμε διαφράγματα που διαμορφώνονται με έγχυση πολτών σε επιφανειακές τάφρους, κουρτίνες τσιμεντενέσεων, τοίχους μεταλλικών πασσαλοσανίδων κτλ. Η αποτελεσματικότητα των διαφραγμάτων αυτών εξαρτάται τόσο από τους ρύπους όσο και από τα αντίστοιχα πετρώματα. Π.χ. αν πρόκειται για μια επιφανειακή ρύπανση σε αβαθή αλλουβιακό υδροφορέα ένας τοίχος από μπετονίτη θα ήταν η πρώτη επιλογή, ενώ αν η ρύπανση αφορά βαθύτερα στρώματα βράχου τότε η λύση των μεταλλικών πασσαλοσανίδων είναι η πιο ενδεδειγμένη.

β. Οι διαπερατές κλίνες επεξεργασίας χρησιμοποιούνται ως εναλλακτική λύση των φυσικών διαφραγματικών τοίχων για περιπτώσεις ρύπανσης υπόγειων νερών σε σχετικά μικρά βάθη από την επιφάνεια του εδάφους[11]. Λειτουργικά έχουμε και πάλι ένα διάφραγμα από διαπερατό όμως υλικό (έτσι ώστε να μη διαταράσσεται η ροή) που έχει την ιδιότητα να "συγκρατεί" με φυσικό ή χημικό τρόπο τους ρύπους, εμποδίζοντας την είσοδό τους στους κινούμενους στα κατάντι του διαφράγματος όγκους του υπόγειου νερού. Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των κλινών είναι σχετικά λίγα: ασβεστόλιθος, ενεργός άνθρακας, γλαυτονιτική πράσινη άμμος και συνθετικές ρητίνες ιοντοανταλλαγής. Τα κατασκευαστικά στοιχεία που πρέπει να μελετηθούν, ανάλογα με τον τύπο των ρύπων και τις τοπικές υδραυλικές συνθήκες της ροής, αφορούν το σχήμα και το μέγεθος της τάφρου που σκάβεται για να γεμίσει με το αντίστοιχο υλικό πλήρωσης. Χαρακτηριστικός στόχος μιας τέτοιας μελέτης είναι να μη διαταραχθεί η ροή, δηλαδή η υδραυλική κλίση στην τάφρο να παραμείνει ίδια μ' αυτήν της τοπικής ροής. (Βλ Σχήμα 16).

γ. Η χρήση συστημάτων πηγαδιών, κυρίως άντλησης, για τον έλεγχο της ποιότητας των υπόγειων νερών αποτελεί την πιο διαδεδομένη πρακτική κι αυτό οφείλεται τόσο στην αποτελεσματικότητά της όσο και στο ότι η απαιτούμενη θεωρητική υποδομή (η θεωρία της υπόγειας υδραυλικής) είναι τόσο σαφής και κατανοητή όσο και απλή στην εφαρμογή της. Η διαφορά με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες, που παθητικά μόνο επεμβαίνουν στο φαινόμενο, είναι ότι με τον υδροδυναμικό έλεγχο, όπως ονομάζεται η τεχνική αυτή, η εκτροπή της υπόγειας ροής είναι ενεργή και ελεγχόμενη. Τα συστήματα πηγαδιών που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως τόσο πολύπλοκα και εξαρτώνται τόσο πολύ από το ειδικό πρόβλημα, ώστε θα ήταν ουτοπική η οποιαδήποτε προσπάθεια ταξινόμησής τους. Στο σημείο λοιπόν αυτό θα αναφερθούμε συνοπτικά σε γενικές αρχές:



Σχήμα 16: Εφαρμογή της μεθόδου κλινών επεξεργασίας.

Η πιο γενική ταξινόμηση εφαρμογών με συστήματα πηγαδιών περιλαμβάνει τρεις παραλλαγές: γ1) αντλήσεις για τον υποβιβασμό της στάθμης των υπόγειων νερών, γ2) αντλήσεις που στοχεύουν στον περιορισμό (ακινητοποίηση ή παρεμπόδιση της κίνησης προς μια συγκεκριμένη διεύθυνση) της κηλίδας ακάθαρτου νερού και γ3) αντλήσεις και επεξεργασία του νερού.

Στην πρώτη ομάδα (γ1) εφαρμογών που έχει ως στόχο τον υποβιβασμό της στάθμης κάτω από περιοχές διάθεσης ρύπων, έτσι ώστε να εμποδιστεί η επαφή διηθούμενων ρύπων και κινούμενου καθαρού νερού, χρησιμοποιούνται είτε συστήματα βαθιών πηγαδιών είτε συστήματα πολλών μικρών και αβαθών κατακόρυφων σωληνώσεων που συνεργάζονται με κοινό αντλητικό συγκρότημα (συστήματα well-points). Τόσο σ' αυτήν όσο και στις άλλες δύο κατηγορίες συστημάτων πηγαδιών πρωταρχικό ρόλο στη μελέτη και την εφαρμογή της λύσης έχει το υδρογεωλογικό περιβάλλον, η καλή γνώση του οποίου αποτελεί την απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχία της μεθόδου.

Στη δεύτερη ομάδα (γ2), όπου στόχος είναι ο έλεγχος της κίνησης (διαχείρισης) της κηλίδας ακάθαρτου νερού, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο πηγάδια άντλησης αλλά και φόρτισης.

Η τρίτη ομάδα εφαρμογών (γ3) για τον έλεγχο των υπόγειων νερών με πηγάδια περιλαμβάνει συστήματα πηγαδιών που αντλούν ακάθαρτο νερό το οποίο στη συνέχεια επεξεργάζεται (καθαρίζεται) και προσφέρεται για χρήση. Πρόκειται για την πιο κοινή διαδικασία αντιμετώπισης προβλημάτων ρύπανσης υπόγειων νερών μικρής κλίμακας και, επειδή είναι δοκιμασμένη, αποτελεί συνήθως και την πρώτη επιλογή λύσης ακόμα και σε περιπτώσεις εκτεταμένης ρύπανσης. Παρολαυτά, σε ορισμένες εφαρμογές, έχουν διαπιστωθεί λειτουργικά προβλήματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της τεχνικής αυτής, κυρίως όταν οι ρύποι είναι αδιάλυτες στο νερό ουσίες, όπως υδρογονάνθρακες, διάφοροι οργανικοί διαλύτες, απορρυπαντικά κλπ.

δ. Η κατηγορία των τεχνικών αποκατάστασης της ποιότητας των υπόγειων νερών με βιολογικές διεργασίες αφορά ρύπους που είναι βιοαποδομήσιμοι. Παρόλο που είναι τεχνικές επιτόπου καθαρισμού, εντάσσονται στις φυσικές μεθόδους ελέγχου, και όχι στην παρακάτω ταξινόμηση των μεθόδων επιτόπου εξυγίανσης, γιατί με σχετικά απλές ανθρώπινες επεμβάσεις επιταχύνεται ένα φυσικό φαινόμενο, το φαινόμενο της αποδόμησης. Η επιτάχυνση του ρυθμού αποδόμησης των οργανικών ρύπων (κυρίως υδρογονανθράκων) γίνεται χρησιμοποιώντας μικρόβια σε συνδυασμό με την προσθήκη αέρα αλλά και θρεπτικών υλών στο έδαφος. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αποδόμησης είναι η μετατροπή των οργανικών ρύπων σε βιομάζα και αβλαβή υποπροϊόντα μικροβιακού μεταβολισμού. Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνική, που δεν είναι ιδιαίτερα δαπανηρή, ενώ ταυτόχρονα είναι αποτελεσματική, τουλάχιστο σε ό,τι αφορά την προστασία του περιβάλλοντος από τους συγκεκριμένους ρύπους για τους οποίους εφαρμόζεται.

14.5.3 Μέθοδοι επιτόπου εξυγίανσης

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται συνοπτικά οι σύγχρονες μέθοδοι και τεχνικές επιτόπου καθαρισμού των υπόγειων νερών[13]. Σ' αυτές συμπεριλαμβάνονται όλες εκείνες οι τεχνικές που αφορούν τη χημική επεξεργασία των ακάθαρτων νερών καθώς και οι μέθοδοι μικροβιακών διεργασιών. Η απόφαση να γίνει χημική επιτόπου επεξεργασία των υπόγειων νερών παίρνεται μόνον όταν είναι

γνωστός ο τύπος των ρύπων και συγχρόνως έχουν εκτιμηθεί τόσο η έκταση όσο και ο βαθμός της ρύπανσης. Η τεχνική γενικά περιλαμβάνει την εγκατάσταση ενός αριθμού πηγαδιών φόρτισης στο μέτωπο ή στο εσωτερικό μιας κηλίδας ακάθαρτου νερού. Στη συνέχεια, ένας παράγοντας καθαρισμού (χημική ουσία) εισάγεται με πίεση στον υδροφορέα μέσα από τα πηγάδια φόρτισης. Είναι προφανές ότι (εκτός από τις περιπτώσεις όπου έχει διαπιστωθεί ότι οι ταχύτητες της υπόγειας ροής είναι πολύ μικρές) η εφαρμογή οποιασδήποτε από τις επιτόπου τεχνικές προαπαιτεί την ακινητοποίηση της κηλίδας, κάτι που επιτυγχάνεται με ένα σύστημα πηγαδιών άντλησης ή φόρτισης, όπως αναφέρθηκε καινωρίτερα.

α) Μια από τις παλιότερες τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία είναι ο καθαρισμός του εδάφους με έκπλυση με διαλύτες και συλλογή των εκπλυμάτων. Η έκπλυση για επιφανειακούς αβαθείς υδροφορείς, γίνεται απευθείας από το έδαφος και η πιο οικονομική και αποτελεσματική λύση είναι να χρησιμοποιηθεί ως βασικός διαλύτης το νερό. Το αντλούμενο νερό στη συνέχεια υφίσταται κάποια συγκεκριμένη επεξεργασία και, ανάλογα με τον τελικό βαθμό καθαρισμού του, χρησιμοποιείται επιτόπου ή μεταφέρεται σε άλλους χώρους για επαναδιάθεση. Στις περιπτώσεις όπου ο ρύπος είναι υδατοδιαλυτός το νερό είναι προφανώς ο μοναδικός διαλύτης. Τυπικά παραδείγματα αποτελούν διαλύματα θειικού, υδροχλωρικού, νιτρικού, φωσφορικού και ανθρακικού οξέος που εισάγονται στον υδροφορέα για να διαλύσουν τα αντίστοιχα άλατα. Η ανακύκλωση με επαναφόρτιση μέρους των αντληθέντων εκπλυμάτων-ενώ το υπόλοιπο υφίσταται την κανονική επεξεργασία-αποτελεί μια παραλλαγή της τεχνικής σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει άφθονο επιφανειακό νερό για την εφαρμογή της τεχνικής.

β) Μια άλλη επιτόπου τεχνική είναι αυτή της εξουδετέρωσης /αποτοξικοποίησης, που συνίσταται στην επιφανειακή εφαρμογή ή τη φόρτιση με πηγάδια μιας ουσίας που εκμηδενίζει την κινητικότητα των ρύπων ή τους καταστρέφει πλήρως. Η εφαρμογή της περιορίζεται σε απόβλητα βιομηχανιών γιατί αυτά έχουν συνήθως την ικανότητα να διασπώνται σε μη τοξικά παράγωγα προϊόντα που αποικοδομούνται και, τελικά, μετατρέπονται σε αδιάλυτα ιζήματα. Αντίθετα η τεχνική δεν αποτελεί ενδεδειγμένη λύση για ρύπανση που προέρχεται από αστικά λύματα, όπου διαρκώς παράγονται προϊόντα αναερόβιας αποσύνθεσης που θα απαιτούσαν μεγάλα χρονικά διαστήματα ουδετεροποίησης.

γ) Τέλος, η τεχνική της μικροβιακής αποικοδόμησης, αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία που εξαρτάται σημαντικά από τον τύπο του ρύπου και κατά συνέπεια

περιλαμβάνει ένα σύνολο διαφορετικών και εξειδικευμένων, κατά περίπτωση, χειρισμών. Από τα δεδομένα της διεθνούς βιβλιογραφίας φαίνεται ότι οι επιτόπου μέθοδοι εξυγίανσης, σαν αυτές που περιγράφηκαν πιο πάνω, αλλά και ακόμα νεώτερες, με περιορισμένες ως τώρα εφαρμογές, βρίσκονται σε μια δυναμική φάση ανάπτυξης και, με δεδομένα τόσο το μεγάλο χρονικό ορίζοντα όσο και το υψηλό κόστος των υπόλοιπων τεχνικών, φαίνεται ότι αποτελούν την ελπίδα για το μέλλον στον τομέα του ελέγχου της ποιότητας των υπόγειων νερών.

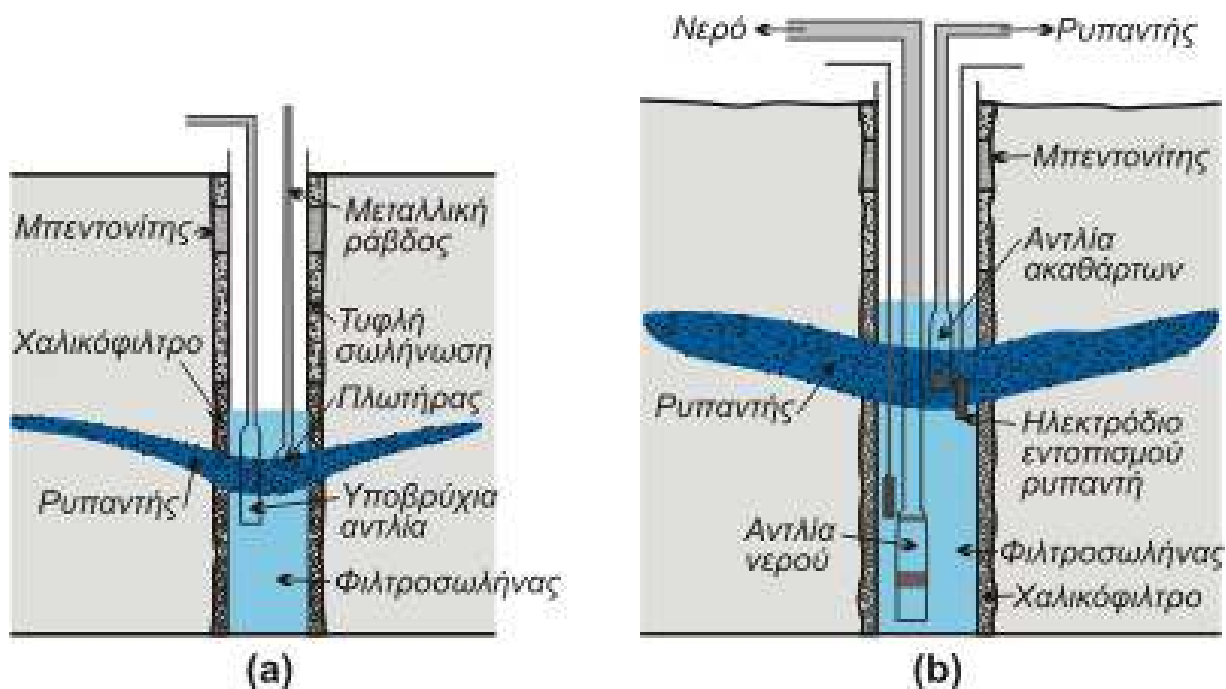
14.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ

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:

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

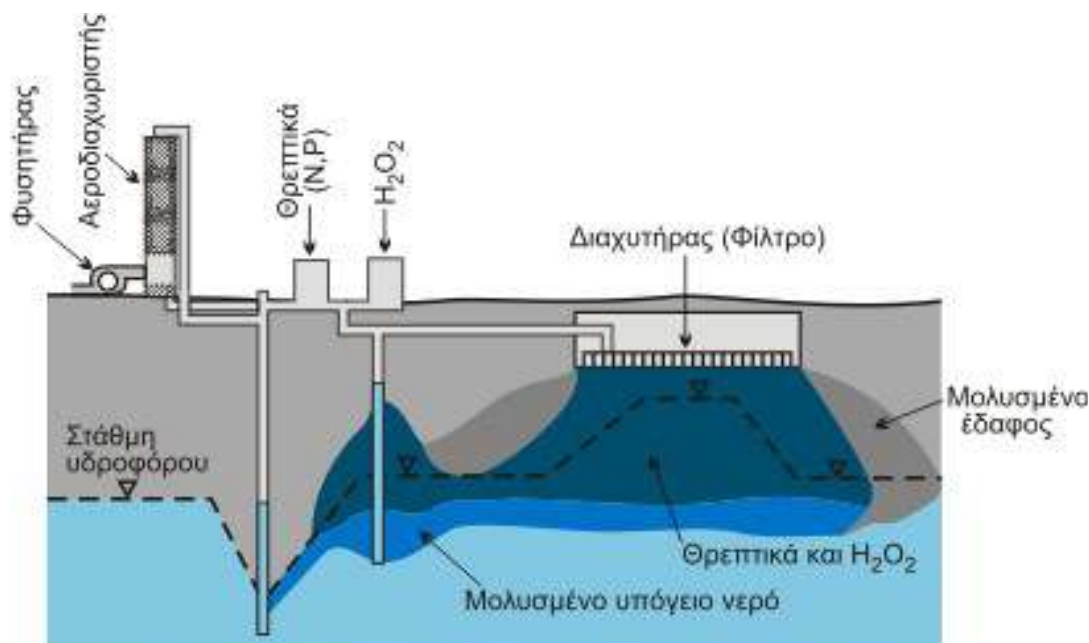
Κατά την εφαρμογή της μεθόδου στην περίπτωση διαλυμένων ρυπαντών που αναμειγνύονται με το υπόγειο νερό, γίνεται άντληση του υπόγειου νερού με σύστημα γεωτρήσεων και στη συνέχεια οδηγείται σε μονάδα επεξεργασίας[19]. Μετά την επεξεργασία είναι δυνατή η επανεισαγωγή του επεξεργασμένου νερού στον υδροφόρο, ή η διάθεση στο έδαφος, ή τέλος η διοχέτευσή του σε γειτονικό υδρόρευμα. Η βέλτιστη απόσταση των γεωτρήσεων απορρύπανσης είναι συνάρτηση της ταχύτητας ροής του υπόγειου νερού, του πάχους του υδροφόρου, της μεταβιβαστικότητας, του συνολικού αριθμού γεωτρήσεων και της παροχής άντλησης καθεμιάς εξ' αυτών. Ο συνδυασμός γεωτρήσεων άντλησης-έκχυσης (εμπλουτισμού) δίνει καλύτερα αποτελέσματα, ιδιαίτερα όταν διατάσσονται κατάλληλα (Βλ. Σχήμα 17). 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 (κεντροαξονική διάταξη). Η επεξεργασία του αντλούμενου ρυπασμένου νερού μπορεί να γίνει με προσρόφηση από ενεργό άνθρακα.



Σχήμα 17: Συστήματα “άντλησης-επεξεργασίας” για την ανάκτηση NAPL: (a) Απλή γεώτρηση, μία αντλία, (b) απλή γεώτρηση, ζεύγος αντλιών.

14.6.2. Αεροδιαχωρισμός (air stripping)

Η μέθοδος εφαρμόζεται κύρια για την απορρύπανση από επιπλέοντες πτητικούς ρυπαντές (βενζίνη, πτητικοί υδρογονάνθρακες κ.λπ.). Στον αεροδιαχωριστή προκαλείται εξάτμιση των πτητικών ουσιών σύμφωνα με τον νόμο Henry, λόγω διαβίβασης αέρα από φυσητήρα (Βλ. Σχήμα 18). Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μεταφορά της ρύπανσης στην ατμόσφαιρα[19].



Σχήμα 18: Μέθοδος βιοαποκατάστασης με αεροδιαχωρισμό.

14.6.3 Αεροδιασπορά (air sparging)

Η θέρμανση δι' ατμού αέρα (Αεροδιασπορά) είναι μια διαδικασία όπου ο αέρας εγχέεται άμεσα στη διαποτισμένη υπο επιφάνεια:

- ❖ εξατμίζει τους μολυσματικούς παράγοντες από την υγρή φάση στη φάση ατμού για επεξεργασία ή και αφαίρεση στη ζώνη αναφοράς
- ❖ βιοδιασπά τους μολυσματικούς παράγοντες στη διαποτισμένη ζώνη μέσω της (διοχέτευσης) εισαγωγής του οξυγόνου [13].

Αυτός ο μηχανισμός που αποτελεί τον αποτελεσματικότερο τρόπο αφαίρεσης μολυσματικών παραγόντων εξαρτάται από: χημικές ιδιότητες, τη διανομή μολυσματικών παραγόντων, τη διάρκεια της έγχυσης αέρα, και τις εδαφολογικές ιδιότητες.

Τα σημαντικότερα συστατικά ενός χαρακτηριστικού συστήματος θέρμανσης δι' ατμού αέρα περιλαμβάνουν ένα φρεάτιο εγχύσεως αέρα, έναν αεροσυμπιεστή ή έναν ανεμιστήρα για να παρέχουν τον αέρα, τα σημεία ελέγχου και τα φρεάτια, και ένα προαιρετικό σύστημα εξαγωγής ατμού.

Τα φρεάτια εγχύσεων αέρα είναι γενικά κάθετα και είναι καλυμμένα στα σημεία που βρίσκονται κάτω από το επίπεδο μόλυνσης. Τα φρεάτια είναι

εμποτισμένα στα βάθη κάτω από τη στάθμη νερού για να αποτρέψουν τον αέρα μέσω ενός πακέτου άμμου στη ζώνη αναφοράς. Εάν το μέσο είναι ομοιογενής άμμος, η ροή αέρος θα είναι σχετικά ομοιόμορφη γύρω από το φρεάτιο εγχύσεως αέρα, με συνέπεια την καλή μαζική μεταφορά. Αντίθετα, ένα ετερογενές μέσο μπορεί να οδηγήσει στην ανομοιόμορφη ροή αέρος, κάτι που μειώνει έτσι την αποτελεσματικότητα θέρμανσης δι' ατμού αέρα .

Στην πράξη όλες οι περιοχές έχουν κάποιο βαθμό εδαφολογικής ετερογένειας και η ανομοιόμορφη ροή αέρα είναι κοινή. Στις καταστάσεις όπου η μολυσμένη υποεπιφάνεια είναι κάτω από τα κτίρια, ή άλλες δομές μέσω των οποίων η εγκατάσταση είναι αδύνατη, οριζόντια ή κεκλιμένα φρεάτια αέρα εγχύσεων μπορεί να πρέπει να εξεταστούν. Οι συμπιεστές ή οι ανεμιστήρες απαιτούνται για να παρέχουν αέρα στα φρεάτια εγχύσεων.

Η επιλογή ενός συμπιεστή ή ενός ανεμιστήρα εξαρτάται από την περιοχή, συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που υπαγορεύουν τη ροή αέρα, και την πίεση. Τα σημεία ελέγχου και ο σχετικός εξοπλισμός απαιτούνται για να παρέχουν τις πληροφορίες για τους ρυθμούς ροής και την πίεση του αέρα των συμπιεστών, και τις συγκεντρώσεις μολυσματικών παραγόντων στα υπόγεια νερά, το χώμα, και το ρεύμα του αέρα των αποβλήτων ώστε να αναλυθεί η πρόοδος της επανόρθωσης. Σε μερικά συστήματα θέρμανσης δι' ατμού αέρα, μια προαιρετική έξοδος ατμού εγκαθίσταται για να μεταφέρει το μολυσμένο ατμό από τη ζώνη αναφοράς για επεξεργασία ή για εκπομπή στην ατμόσφαιρα.

Τα μοναδικά κριτήρια σχεδίου για την τεχνολογία θέρμανσης δι' ατμού αέρα είναι εμφανή κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής, του σχεδίου συστημάτων, και του ελέγχου συστημάτων και είναι τα εξής:

-Καθορισμός του προσιτού διαστήματος βασισμένο στον προϋπολογισμό περιοχών

-Αξιολόγηση της διανομής αέρα, έλεγχος προβλημάτων με τη διανομή αέρα

-Καθορισμός του συστήματος ροής αέρα.

-Έλεγχος των ιδιαίτερων σημείων δειγματοληψίας υπόγειων νερών.

Μια πειραματική δοκιμή θέρμανσης δι' ατμού αέρα έχει βελτιωθεί σημαντικά για να αξιολογήσει έναν μικρό αριθμό βασικών παραμέτρων που θα έδειχναν εάν η θέρμανση δι' ατμού αέρα είναι εφικτή. Αυτό διαφέρει από την παραδοσιακή προσέγγιση όπου η πειραματική δοκιμή χρησιμοποιήθηκε για να προσπαθήσει να καθορίσει τις παραμέτρους σχεδίου για κλίμακα πραγματικού μεγέθους (SCALE-

UP). Η έρευνα κατέδειξε ότι μια βραχυπρόθεσμη πειραματική δοκιμή να μην δεν είναι επαρκής για να παρέξει έναν καλό δείκτη της μακροπρόθεσμης απόδοσης ενός συστήματος θέρμανσης δι' ατμού, αλλά μπορεί να μας πληροφορήσει για το αν υπάρχουν δυσκολίες με τη διανομή του αέρα και επομένως με την επιτυχή θέρμανση δι' ατμού αέρα.

Το ίδιο το σχέδιο συστημάτων επίσης έχει βελτιωθεί, αναγνωρίζοντας το γεγονός ότι η διανομή αέρα μπορεί να είναι προβληματική και δύσκολο να περιγραφεί με οποιοδήποτε βαθμό εμπιστοσύνης.

Ο έλεγχος συστημάτων ολοκληρώνεται με την χρήση μεμονωμένων ροόμετρων σε κάθε φρεάτιο εγχύσεως αέρα, και αξιοποίηση ιδιαίτερων σημείων ελέγχου των υπόγειων υδάτων για να μετρηθεί η μόλυνση σε διάφορα επίπεδα. Η θέρμανση δι' ατμού αέρα έχει καταδειχθεί ότι είναι πολύ αποτελεσματική στη μείωση μολυσματικών παραγόντων, καθώς και τους υδρογονάνθρακες πετρελαίου και για τους χλωριωμένους διαλύτες. Ένας συνδυασμός αεριοποίησης και βιο-διάσπασης επιτρέπει την αφαίρεση πολλών ενώσεων στα όρια ανίχνευσης. Ιστορικά, πολλές περιοχές έχουν παρουσιάσει μια σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων μολυσματικών ρύπων μετά από τη θέρμανση δι' ατμού αέρα. Η αιτία αυτού οφείλεται πρώτιστα στις φτωχές τεχνικές ελέγχου που αρχικά έδειξαν ότι οι περιοχές ήταν καθαρές. Οι βελτιωμένες τεχνικές ελέγχου όπως η δειγματοληψία από τα σημεία ελέγχου υπόγειων νερών μπορεί να επιλύσουν αυτό το πρόβλημα. Εντούτοις, συνιστάται οι περιοχές να συνεχίζουν να επιλέγονται για επανέλεγχο για τουλάχιστον ένα έτος μετά από τη διακοπή θέρμανσης δι' ατμού αέρα.

Το προσωπικό και οι ανάγκες κατάρτισης για την τεχνολογία θέρμανσης δι' ατμού αέρα είναι πολύ σημαντικά. Χρειάζεται ένας τεχνικός ικανός για τις εβδομαδιαίες ανάγκες του συστήματος, που να ελέγχει τους ρυθμούς ροής αέρα και την κατάλληλη λειτουργία του συμπιεστή.

Οι απαιτήσεις υγείας και ασφάλειας είναι επίσης ελάχιστες, εκτός αν οι υπό την επιφάνεια δομές ή τα κτίρια είναι μέσα στη ζώνη της επιρροής του συστήματος θέρμανσης δι' ατμού αέρα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μέριμνα πρέπει να ληφθεί ώστε οι ατμοί να μην ωθούνται σε αυτές τις δομές, δημιουργώντας ενδεχομένως εκρηκτικά ή τοξικά περιβάλλοντα. Ενώ η θέρμανση δι' ατμού αέρα έχει διάφορα πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες ανταγωνιστικές τεχνολογίες, δεν είναι και η ίδια χωρίς περιορισμούς. Απαριθμημένα κατωτέρω είναι διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της θέρμανσης δι' ατμού αέρα.

14.6.3.1 Πλεονεκτήματα της θέρμανσης δι' ατμού αέρα

1) Δεδομένου ότι εύκολα χρησιμοποιείται ο διαθέσιμος εμπορικός εξοπλισμός (δηλ. το περίβλημα, οι συμπιεστές ή οι ανεμιστήρες πολυβινυλικού χλωριδίου [PVC], κ.λπ.), η θέρμανση δι' ατμού αέρα είναι μια τεχνολογία απλού και χαμηλού κόστους. Ο εξοπλισμός είναι εύκολο να εγκατασταθεί και προκαλεί ελάχιστη διαταραχή στις περιοχές.

3) Δεν υπάρχει κανένα ρεύμα αποβλήτων που παράγεται το οποίο να απαιτεί επεξεργασία, επειδή το ρεύμα αέρα βγαίνοντας μπορεί να διασκορπιστεί άμεσα στην ατμόσφαιρα.

4) Σε τόπους όπου μόλυνση ζώνης κηλίδων έχει δημιουργηθεί λόγω μιας κυμαινόμενης στάθμης νερού, η θέρμανση δι' ατμού αέρα είναι αποτελεσματική στην αντιμετώπιση της ζώνης κηλίδων δεδομένου ότι ο αέρας κινείται κάθετα προς τα πάνω μέσω αυτής της περιοχής.

5) Η τεχνολογία είναι αποτελεσματική στην αντιμετώπιση της μόλυνσης της περιοχής της πηγής, καθόσον περιορίζει την πλευρική μετανάστευση των διαλυμένων μολυσματικών παραγόντων.

14.6.3.2 Μειονεκτήματα της θέρμανσης δι' ατμού αέρα

1) Η τεχνολογία δεν είναι κατάλληλη για μολυσματικούς παράγοντες με χαμηλές τιμές των σταθερών του νόμου Henry ή χαμηλής αστάθειας εκτός αν η ένωση είναι aerobically βιοδιασπώμενη. Οι μολυσματικοί ημιπτητικοί (Semivolatiles) παράγοντες με τη χαμηλή αεροβική βιοδιασπασιμότητα δεν αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά με τη θέρμανση δι' ατμού αέρα

2) Οι γεωλογικές συνθήκες περιοχών όπως η στρωματοποίηση, η ετερογένεια, και η ανισοτροπία, θα αποτρέψουν την ομοιόμορφη ροή αέρα μέσω του μέσου για να μειώσουν την αποτελεσματικότητα της θέρμανσης δι' ατμού αέρα.

3) Το ελεύθερο προϊόν (μη υδατικά υγρά [NAPL]) σε μεγάλες ποσότητες μπορεί να έρθει σε επαφή με τον εγχυμένο αέρα. Το ότι τα πυκνά μη-υδατικά υγρά (DNAPLs) μπορεί να βυθιστούν στο κατώτατο σημείο του υδροφόρου στρώματος, αποτελεί μειονέκτημα.

4) Υπάρχει μια δυνατότητα για τη μετανάστευση των εξατμισμένων μολυσματικών παραγόντων στα κτίρια και άλλες δομές.

5) Η ροή αέρα είναι αποτελεσματική πάνω από μια καθορισμένη τιμή, απαιτώντας ενδεχομένως έναν μεγάλο αριθμό φρεατίων για να υπάρξει επαρκής ροή αέρα μέσω της μολυσμένης περιοχής.

14.6.4. Η βιολογική αποκατάσταση (bio-remediation)

Η μέθοδος της βιολογικής αποκατάστασης (bio-remediation) για την απορρύπανση υπόγειων υδροφορέων βασίζεται στις ίδιες αρχές με την ανάλογη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την απορρύπανση των εδαφών πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα[17]. Η κύρια διαφορά οφείλεται στο ότι κάτω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα είναι δυσχερής ο αερισμός (δηλαδή η παρουσία οξυγόνου), και συνεπώς υπάρχει κίνδυνος να συμβεί αναερόβια αποσύνθεση, η οποία καταλήγει στην παραγωγή μεθανίου και υδροθείου, που προσδίδουν άσχημη οσμή στο νερό. Για το λόγο αυτό, στις περιπτώσεις που προβλέπεται να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της βιολογικής αποκατάστασης υπόγειων υδροφορέων, χρησιμοποιείται τεχνητός αερισμός με την εισπίαση αέρα μέσω βαθειών γεωτρήσεων.

Επιπλέον, κατά την εφαρμογή της μεθόδου στους υδροφορείς είναι δυσχερής ο έλεγχος των λοιπών συνθηκών που απαιτούνται για τη δράση των μικροοργανισμών (θερμοκρασία, pH, παροχή θρεπτικών ουσιών κλπ), με αποτέλεσμα η αποδοτικότητα της μεθόδου να είναι μικρή. Έτσι, η μέθοδος αυτή σπανίως χρησιμοποιείται για την απορρύπανση υδροφορέων ή χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με κάποια άλλη μέθοδο απορρύπανσης.

Ανήκει στις μη-συμβατικές (εναλλακτικές) τεχνικές επεξεργασίας που εφαρμόζονται επιτόπου και στηρίζεται στην αποδόμηση των οργανικών ουσιών με τη δράση μικροοργανισμών (βακτήρια, μύκητες). Βασικό κριτήριο για την εφαρμογή της μεθόδου αποτελεί η επιδεκτικότητα του ρυπαντή στη βιοδιάσπαση από τους μικροοργανισμούς που ενδημούν ή εισάγονται στη θέση της ρύπανσης.

Οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν ως καταλύτες κατάλληλα ένζυμα που παράγουν οι ίδιοι. Η δράση των μικροοργανισμών εξαρτάται από το είδος και την πυκνότητα της μικροβιακής κοινότητας, καθώς και τις συνθήκες που ευνοούν ή αναστέλλουν την ανάπτυξή τους (τοξικότητα, pH, θερμοκρασία κ.ά).

Η βιοαποκατάσταση εφαρμόζεται σήμερα στην απορρύπανση των υδρογονανθράκων, αν και οι μικροοργανισμοί μπορούν να διασπάσουν όλους τους οργανικούς ρυπαντές. Το τελικό προϊόν είναι ανόργανες ουσίες (CO₂, H₂O, H₂S,

CH₄, νιτρικά και θειϊκά άλατα). Για να γίνει αερόβια αποσύνθεση διαβιβάζεται αέρας, μέσω βαθιών γεωτρήσεων.

Σε περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται η τεχνητή δημιουργία συνθηκών που θα εξασφαλίσουν τα απαραίτητα υλικά για τροφή και παροχή ενέργειας στους μικροοργανισμούς (μηχανική βιοαποκατάσταση-engineered bioremediation). Αν η βιοαποκατάσταση γίνεται χωρίς την παρέμβαση του ανθρώπου ονομάζεται ειδική βιοαποκατάσταση-intrinsic bioremediation). Η μηχανική είναι ταχύτερη από την ειδική. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η πιθανή απόφραξη (clogging) 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.

Η χημική επεξεργασία με κατάλληλα μέσα αποτελεί μια επιπλέον μέθοδο που εφαρμόζεται in situ, αλλά σε περίπτωση αποτυχίας επιβάλλεται η απομάκρυνση εκτός του ρύπου και των χημικών ουσιών, που χρησιμοποιήθηκαν.

14.6.4.1 Περιγραφή της μεθόδου

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

Η βιολογική αποδόμηση των οργανικών ενώσεων γίνεται μέσω της δράσης μικρο-οργανισμών (βακτηριδίων, μυκήτων, κλπ) οι οποίοι αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας τον άνθρακα ή/και την ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τον μεταβολισμό (αποσύνθεση) των οργανικών ουσιών. Οι μικρο-οργανισμοί αποσυνθέτουν τις οργανικές ενώσεις χρησιμοποιώντας ως καταλύτες κατάλληλα

ένζυμα (πρωτεΐνες) τα οποία παράγουν οι ίδιοι. Το τελικό προϊόν της αποσύνθεσης των οργανικών ουσιών μέσω των μικρο-οργανισμών είναι ανόργανες ουσίες (διοξείδιο του άνθρακα και νερό) που συνήθως θεωρούνται λιγότερο επιβλαβείς από τις αρχικές ενώσεις, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις ατελούς αποσύνθεσης παράγονται και άλλες απλές ενώσεις όπως μεθάνιο, υδρόθειο, νιτρικά και θειικά άλατα.

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

1. Η παρουσία κατάλληλων μικρο-οργανισμών, δηλαδή μικρο-οργανισμών που παράγουν ένζυμα κατάλληλα για τον μεταβολισμό της συγκεκριμένης οργανικής ουσίας.

2. Η παρουσία οργανικών ουσιών οι οποίες με την αποσύνθεσή τους θα παράσχουν την απαιτούμενη ενέργεια στους μικρο-οργανισμούς για να αναπτυχθούν.

3. Η παρουσία θρεπτικών ουσιών (nutrients), όπως το άζωτο, ο φωσφόρος, το κάλιο, το θείο κλπ. που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των μικρο-οργανισμών.

4. Η παρουσία δεκτών ηλεκτρονίων (electron acceptors), δηλαδή ατόμων ή ριζών τα οποία δέχονται τα ηλεκτρόνια που προκύπτουν κατά την οξείδωση των οργανικών ουσιών.

5. Η παρουσία κατάλληλων συνθηκών για την ανάπτυξη των μικρο-οργανισμών και συγκεκριμένα: κατάλληλη υγρασία, θερμοκρασία και pH, και η απουσία ορισμένων χημικών ουσιών σε συγκεντρώσεις που είναι τοξικές για τους μικρο-οργανισμούς (και τους καταστρέφουν).

Συνεπώς, οι τεχνολογίες βιολογικής αποκατάστασης έχουν σκοπό να εξασφαλίσουν και να ενισχύσουν με ελεγχόμενο τρόπο τις ανωτέρω απαιτήσεις, ώστε να συντελεσθεί η αποσύνθεση των οργανικών ουσιών που αποτελούν το ρυπαντικό φορτίο του εδάφους ή του υπόγειου νερού. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη αφενός μεν η κατανόηση της λειτουργίας των μηχανισμών βιολογικής αποσύνθεσης των οργανικών ουσιών, αφετέρου δε η ανάπτυξη της σχετικής τεχνολογίας, ώστε με τεχνικές επεμβάσεις να διατηρούνται οι βέλτιστες συνθήκες δράσης των μικρο-οργανισμών. Οι μηχανισμοί βιολογικής αποσύνθεσης των οργανικών ενώσεων περιγράφονται αναλυτικότερα στα επόμενα.

14.6.4.2 Μικρο-οργανισμοί και οργανικές ενώσεις

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

(α) Σε περίπτωση παρουσίας πολλών οργανικών ενώσεων, αρχικώς διασπώνται οι απλούστερες ενώσεις επειδή είναι ευκολότερη η ανάπτυξη μικρο-οργανισμών που παράγουν ένζυμα για τη διάσπαση των απλών ενώσεων[17].

(β) Για τη διάσπαση των σύνθετων οργανικών ουσιών που παράγονται από τον άνθρωπο, απλώς απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος, ώστε αφενός μεν να διασπασθούν προηγουμένως οι απλούστερες ενώσεις, αφετέρου δε να συμβεί προσαρμογή των μικρο-οργανισμών, δηλαδή να παραγάγουν τα κατάλληλα ένζυμα που διασπούν τις πλέον σύνθετες ενώσεις.

(γ) Η αποσύνθεση των οργανικών ουσιών γίνεται σε διαδοχικές φάσεις με τη δράση διάφορων μικρο-οργανισμών. Έτσι, μια ομάδα μικρο-οργανισμών διασπά την αρχική οργανική ένωση σε κάποια απλούστερη, η οποία στη συνέχεια διασπάται εκ νέου από άλλους μικρο-οργανισμούς και η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου τελικώς παραχθούν πολύ απλές ενώσεις (CO₂, H₂O, CH₄ κλπ).

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

$$c = c_0 e^{-kt} \quad [13]$$

όπου:

c_0 είναι η αρχική συγκέντρωση (για $t = 0$) και

k είναι η σταθερά της διάσπασης που δίνεται από τη σχέση:

$$k = \frac{0.693}{t_{1/2}} \quad [13]$$

όπου

$t_{1/2}$ είναι ο λεγόμενος χρόνος ημιζωής, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για τη διάσπαση του ημίσεως των μορίων της οργανικής ένωσης.

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, δοθέντος αρκετού χρόνου (και προφανώς με τις κατάλληλες λοιπές συνθήκες) θα αναπτυχθούν μικρο-οργανισμοί που μπορούν να διασπάσουν και τις πλέον σταθερές συνθετικές οργανικές ενώσεις. Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει τυπικές τιμές του χρόνου ημιζωής ορισμένων από τις οργανικές ενώσεις που συνήθως υπάρχουν στα βιομηχανικά απόβλητα.

Πίνακας IV: Τυπικοί χρόνοι ημιζωής οργανικών ενώσεων κατά την βιολογική αποδόμηση.

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

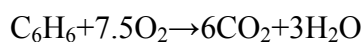
Λόγω της εξάρτησης του ρυθμού των βιολογικών διασπάσεων από τις συνθήκες του περιβάλλοντος (θερμοκρασία, υγρασία, pH κλπ), οι παραπάνω χρόνοι ημιζωής είναι ενδεικτικοί και αναφέρονται σε μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο κάτω από “συνήθειες” συνθήκες περιβάλλοντος, ενώ σε πραγματικές συνθήκες μπορεί να διαφέρουν σημαντικά. Πάντως από τις τιμές του πίνακα καθίσταται σαφές ότι ορισμένες οργανικές ενώσεις είναι πολύ πιο εύκολα διασπασίμες από άλλες.

14.6.4.3 Θρεπτικές ουσίες (nutrients)

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

14.6.4.4 Δέκτες ηλεκτρονίων

Κατά τον βιολογικό μεταβολισμό, οι διασπώμενες οργανικές ενώσεις χάνουν ηλεκτρόνια τα οποία μεταφέρονται σε κάποιον δέκτη ηλεκτρονίων[17]. Κατά την αερόβια διάσπαση, ο τελικός αποδέκτης των ηλεκτρονίων είναι το οξυγόνο. Έτσι, π.χ. η αερόβια αποσύνθεση (οξειδωση) του βενζολίου παρουσιάζεται από τη σχέση:



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

Όπως φαίνεται από την ανωτέρω χημική αντίδραση, η αερόβια οξειδωση των οργανικών ενώσεων αφαιρεί οξυγόνο από το σύστημα. Εάν το οξυγόνο δεν αναπληρωθεί (π.χ. με μηχανική ανάμειξη και αερισμό των υλικών, τεχνητή κυκλοφορία αέρα κλπ), τελικώς το σύστημα θα μετατραπεί σε αναερόβιο, θα αναπτυχθούν αναερόβιοι μικρο-οργανισμοί και η αποσύνθεση θα δώσει και μεθάνιο (CH₄) αντί του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Η αερόβια οξειδωση δίνει τα πλέον αβλαβή προϊόντα και συνεπώς είναι προτιμότερη. Έτσι, στα συστήματα απορρύπανσης μέσω της βιολογικής αποσύνθεσης θα πρέπει να γίνεται κατάλληλος

μηχανικός αερισμός (με αναμόχλευση, ανάδευση κλπ), ώστε η συγκέντρωση του οξυγόνου να διατηρείται σε ικανοποιητικό επίπεδο.

14.6.4.5 Υγρασία

Η παρουσία υγρασίας είναι απαραίτητη για τη δράση των μικρο-οργανισμών. Το ιδανικό ποσοστό υγρασίας στο έδαφος είναι 15-30%. Εάν η υγρασία μειωθεί κάτω από το 15%, η δράση των μικρο-οργανισμών αναστέλλεται. Επίσης, αν η υγρασία αυξηθεί πάνω από το 30% (όπου ο βαθμός κορεσμού του εδάφους είναι σχεδόν 100%) δεν γίνεται ικανοποιητικός αερισμός του εδάφους και το διαθέσιμο οξυγόνο μειώνεται. Κατά συνέπεια, για τη βέλτιστη δράση των μικρο-οργανισμών, η υγρασία του εδάφους θα πρέπει να ρυθμίζεται με βάση τα ανωτέρω.

Είναι προφανές από τα παραπάνω ότι δεν είναι εύκολη η βιολογική αποσύνθεση των οργανικών ρύπων του υπόγειου νερού κάτω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα λόγω έλλειψης οξυγόνου, εκτός εάν γίνεται κυκλοφορία αέρα με τεχνητά μέσα (π.χ εισπίαση αέρα μέσω γεωτρήσεων). Κατά συνέπεια, η βιολογική αποσύνθεση των οργανικών ρύπων στο υπόγειο νερό γίνεται συνήθως υπό αναερόβιες συνθήκες και καταλήγει στην παραγωγή μεθανίου, υδροθείου (το οποίο δίνει άσχημη οσμή στο νερό), κλπ.

14.6.4.6 Θερμοκρασία

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

14.6.4.7 pH

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

14.6.4.8 Τοξικότητα

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

14.6.5 Η μέθοδος άντλησης επιπλεόντων ρυπαντών

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

διυλιστηρίων αλλά παρουσιάζεται και σε βιομηχανικές ακόμη και σε αστικές περιοχές.

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

Η απορρύπανση από επιπλέοντες ρυπαντές γίνεται με το σύστημα της διπλής άντλησης του επιπλέοντος ρυπαντή (dual pump free product recovery). Αρχικά γίνεται άντληση υπόγειου νερού, οπότε διαμορφώνεται ένας κώνος πτώσης. Ο ρυπαντής λόγω υδραυλικής κλίσης κινείται προς τη γεώτρηση, απ' όπου γίνεται άντλησή του με δεύτερη αντλία (Βλ. Σχήμα 19). Η πτώση της στάθμης πρέπει να γίνεται με τρόπο ώστε να μην ρυπανθεί ο υδροφορέας σε όλο το πάχος του.

Η μέθοδος συνίσταται στην άντληση νερού από τον υδροφορέα μέσω γεώτρησης, ώστε να δημιουργηθεί ένας κώνος μείωσης της στάθμης του υδροφορέα. Ο επιπλέον ρύπος παρακολουθεί την επιφάνεια του κώνου πτώσης και, λόγω της υδραυλικής κλίσης που δημιουργείται, κινείται προς τη γεώτρηση, απ' όπου αντλείται με μια δεύτερη αντλία (skimmer pump).

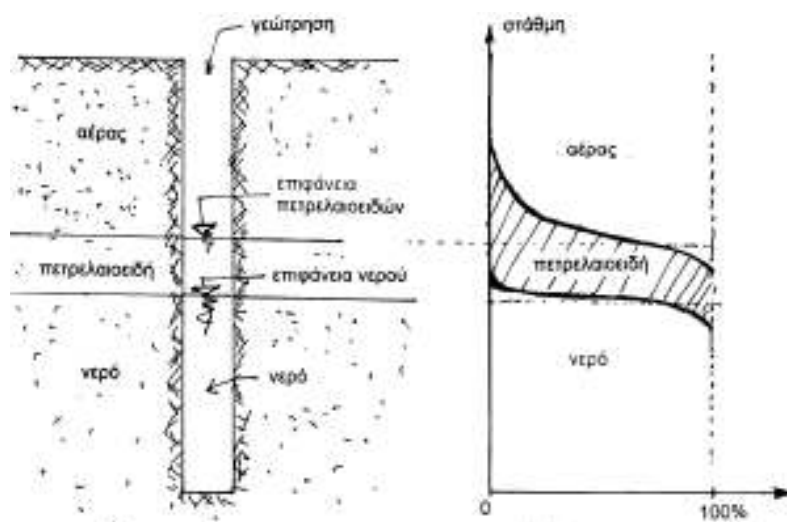
Είναι προφανές ότι λόγω της παρουσίας δυο αντλιών, η απόδοση της μεθόδου εξαρτάται από τη ρύθμιση των παροχών τους (και ιδίως από την παροχή της αντλίας νερού), δηλαδή από την επιτυγχανόμενη πτώση της στάθμης του υδροφορέα. Εκ πρώτης όψεως φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πτώση της στάθμης του

υδροφορέα, τόσο αυξάνει η παροχή άντλησης του επιπλέοντος ρύπου και συνεπώς αυξάνει η απόδοση της μεθόδου.

Όμως, θα πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι αυξάνοντας την πτώση της στάθμης του υδροφορέα, τα επιπλέοντα πετρελαιοειδή ρυπαίνουν τον υδροφορέα καθ' ύψος σε όλη την έκταση του κώνου πτώσης και αυξάνεται η ποσότητα του ρύπου που συγκρατείται στους πόρους του υδροφορέα, χωρίς να μπορεί να ανακτηθεί με τη μέθοδο της άντλησης και να απαιτεί τη χρήση άλλων μεθόδων (όπως η εφαρμογή υποπίεσης, η θέρμανση κλπ). Για το λόγο αυτό, η ρύθμιση της πτώσης της στάθμης θα πρέπει να γίνεται με προσοχή.

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

Παρακάτω παρουσιάζεται μια μέθοδος υπολογισμού των βέλτιστων παροχών άντλησης και της επιτυγχάνομενης πτώσης της στάθμης του υδροφορέα



Σχήμα 19

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

$$s = H - \sqrt{H^2 - \frac{Q_w}{\pi k_w} \ln\left(\frac{R}{r_w}\right)} \quad [17]$$

όπου:

H είναι το πάχος του υδροφορέα που επηρεάζεται από την άντληση
 k_w είναι ο συντελεστής αγωγιμότητας του υδροφορέα για διήθηση νερού
 r_w είναι η ακτίνα της γεώτρησης άντλησης και

$$R = 1.5 \sqrt{\frac{T_w t}{S_w}} \quad [17]$$

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

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

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

$$Q_o = \frac{2 \pi k_o d s}{\ln(R/r_w)} \quad [17]$$

όπου:

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

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

Γνωρίζουμε επίσης ότι ισχύει:

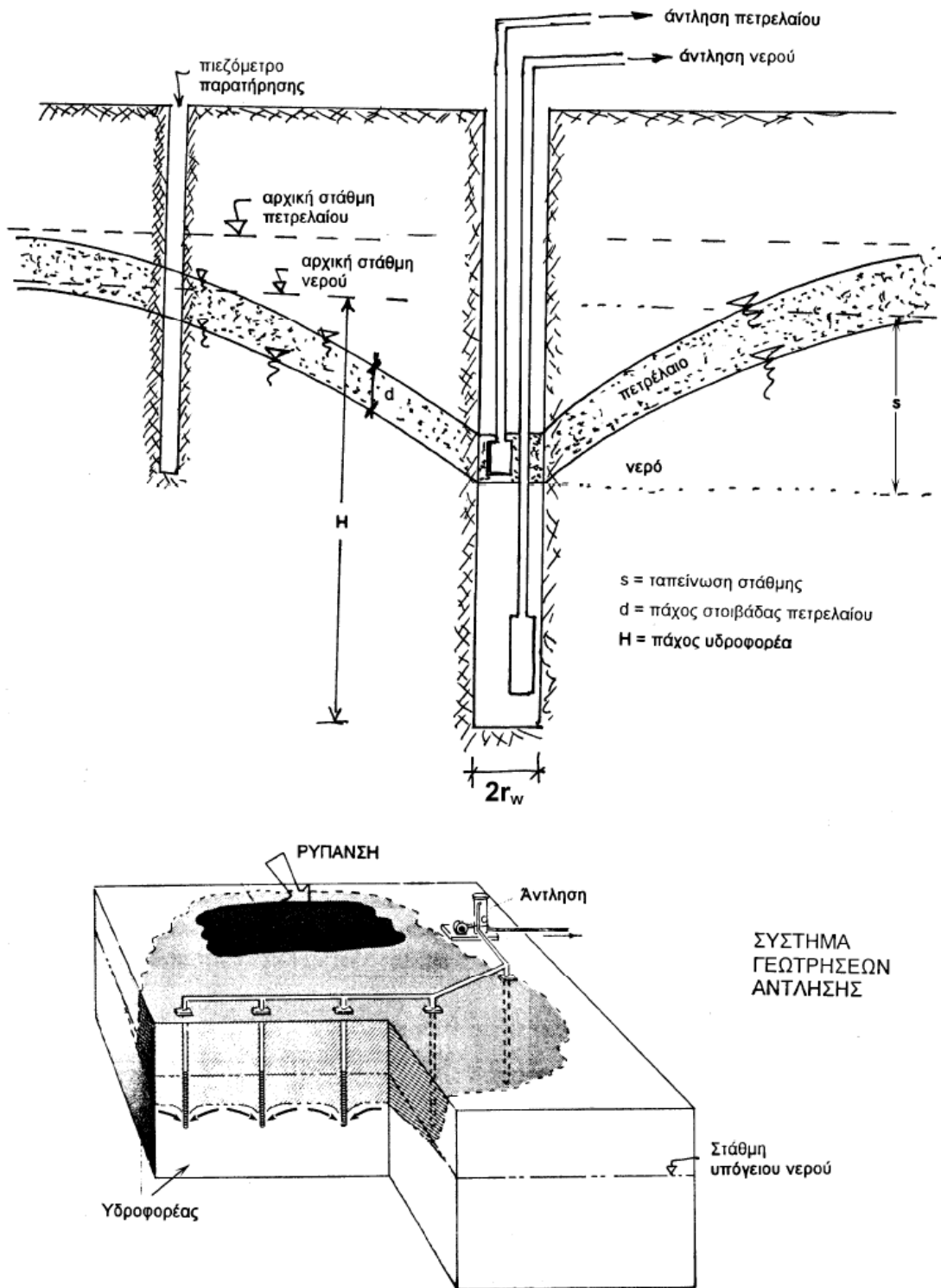
$$k_o = k_w \left(\frac{\rho_o / \rho_w}{\mu_o / \mu_w} \right) \quad [17]$$

όπου

ρ_o, ρ_w είναι οι πυκνότητες του πετρελαίου και του νερού και

μ_o, μ_w οι συντελεστές ιξώδους (viscosity) του πετρελαίου και του νερού.

Η παραπάνω σχέση έχει προκύψει με την παραδοχή σταθερού πάχους d της στοιβάδας του πετρελαίου.



Σχήμα 20: Μέθοδος διπλής άντλησης για απορρύπανση από επιπλέοντες ρύπους (π.χ. πετρελαιοειδή).

14.6.6 Μέθοδος εξυγίανσης με συγκλίνοντα φράγματα και διόδους

14.6.6.1 Περιγραφή των διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων.

Τα διαπερατά αντιδρώντα φράγματα (PRBs) είναι μια νέα τεχνολογία εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπογείων υδάτων[20]. Αποτελούν μια in situ παθητική ζώνη επεξεργασίας που περιέχει αντιδρόν υλικό, το οποίο αποικοδομεί, μετατρέπει ή ακινητοποιεί τους ρυπαντές καθώς το υπόγειο ύδωρ ρέει δια μέσου αυτού. Τα φράγματα αυτά τοποθετούνται υπό το έδαφος ως μόνιμες ή αντικαταστάσιμες κατασκευές κάθετα στη κατεύθυνση της ροής και της ζώνης ρύπανσης και εκμεταλλεύονται την φυσική ροή του υπογείου ύδατος για την παθητική του εξυγίανση καθώς δεν απαιτείται καμία εξωτερική πηγή ενέργειας. Η θέση τους μπορεί να είναι πλησίον της ζώνης ρύπανσης για την αποφυγή εξάπλωσης του ρύπου, ή στα κατάντη της πηγής ρύπανσης.

Οι τύποι των υπόγειων διαπερατών φραγμάτων είναι:

- α) Η Ενεργή Τάφρος Υψηλής Διαπερατότητας (Permeable reactive trench).
- β) Τα Συστήματα Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων (Funnel and Gate).
- γ) Τα Συστήματα Τάφρου και Διόδου (Trench and Gate) όπου έχουμε συνδυασμό των(α) και (β).

14.6.6.2 Περιγραφή συγκλινόντων φραγμάτων και διοδίων.

Η προσθήκη των αδιαπέραστων φραγμάτων (funnel walls) σ' ένα υπόγειο σύστημα συμβάλει: α) στην αύξηση του ποσού του ύδατος που ρέει δια μέσου της διόδου, και β) στη δημιουργία της ζώνης εγκλεισμού κοντά στο φράγμα. Στην περίπτωση επιλογής ενός Συστήματος Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων, είναι απαραίτητο να ευρίσκονται σε ισορροπία μερικά κριτήρια:

1. Πρέπει το Σύστημα να είναι έτσι εγκατεστημένο ώστε όλο το ρυπασμένο ύδωρ να περνάει από την δίοδο.
2. Ο χρόνος συγκράτησης του ρυπασμένου ύδατος στην δίοδο πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή μείωση στις συγκεντρώσεις των ρύπων.
3. Το μέγεθος των φραγμάτων και ο αριθμός των διοδών πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος. Η πιο απλή διαμόρφωση

ενός Συστήματος Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων είναι μία δίοδος με φράγματα που εκτείνονται αριστερά και δεξιά από αυτή.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης μονές ή πολλαπλές δίοδοι με φράγματα, περιβάλλοντας μερικώς ή ολικώς τη ζώνη ρύπανσης. Σε περίπτωση ζώνης ρύπανσης μεγάλου πλάτους είναι δυνατόν να κατασκευαστούν φράγματα με δύο ή περισσότερες διόδους. Μια άλλη διάταξη είναι με την τοποθέτηση των Φραγμάτων σε σχήμα U. Η διάταξη των Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων εξαρτάται επίσης από το αν η ζώνη ρύπανσης εκτείνεται καθ' όλο το πάχος του υδροφόρου. Αν συμβαίνει αυτό, όπως στην περίπτωση της ρύπανσης με DNAPL, το αντιδρόν κελί καταλαμβάνει όλο το πάχος του υδροφορέα. Αν η ζώνη ρύπανσης καταλαμβάνει μόνο το ανώτερο μέρος του υδροφορέα, για παράδειγμα όταν οι ρύποι είναι LNAPL, ή ένα πτητικό υγρό στην ακόρεστη ζώνη, τότε μια εγκατάσταση που εκτείνεται μόνο στο ανώτερο μέρος του υδροφορέα θα είναι αρκετή.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που ενδιαφέρει στα 'Συστήματα Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων είναι η γεωμετρία τους. Στον όρο αυτό περιλαμβάνονται οι διαστάσεις των αδιαπέραστων τοίχων και των διόδων, η θέση και ο αριθμός των διόδων, η γωνία μεταξύ των πλευρών των φραγμάτων, και ο προσανατολισμός του Συστήματος Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων ως προς την υδραυλική κλίση της περιοχής.

Δύο αντικρουόμενοι παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν στην αξιολόγηση των διαμορφώσεων των Συστημάτων Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων:

α) η εκροή από τη δίοδο πρέπει να μεγιστοποιείται ώστε η ζώνη εγκλεισμού να γίνεται πιο ευρεία, και

β) ο χρόνος συγκράτησης του ρυπασμένου υπόγειου ύδατος στη δίοδο να είναι όσον το δυνατόν μεγαλύτερος, για καλύτερη απόδοση του Συστήματος.

Οι ανωτέρω δύο παράγοντες, δηλαδή η εκροή και ο χρόνος συγκράτησης είναι αντιστρόφως ανάλογοι. Τίθεται επομένως το ερώτημα ποια θα είναι η βέλτιστη διάταξη και η γεωμετρία ενός 'Συστήματος Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων' σ' ένα δεδομένο πρόβλημα εξυγίανσης υπόγειου υδροφορέα. Το ερώτημα αυτό μπορεί να απαντηθεί με τη χρήση μοντέλου υπογείων υδάτων για την προσομοίωση των διαφόρων περιπτώσεων.

14.6.6.3 Εύρεση βέλτιστης διάταξης των συγκλινόντων φραγμάτων και διόδων.

Γενικά ισχύει ότι για ένα δεδομένο μήκος αδιαπέραστων τοίχων, η πιο αποτελεσματική διαμόρφωση σε ένα ισότροπο υδροφορέα είναι το φράγμα με πλευρές σε γωνία 180 μοιρών και προσανατολισμένες κάθετα στην υδραυλική κλίση της περιοχής. Το ερώτημα βέβαια είναι αν ισχύει το συμπέρασμα αυτό σ' ένα οποιοδήποτε υπόγειο υδροφορέα.

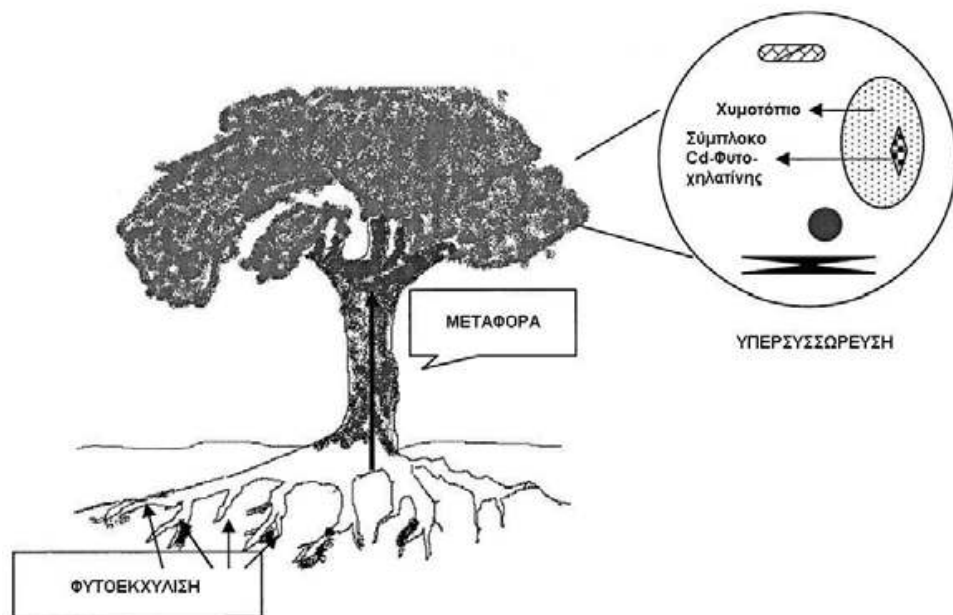
Πρέπει να προσομοιωθεί η υπόγεια ροή και η μεταφορά ρύπων σε ένα εικονικό ελεύθερο υδροφορέα και να εξεταστούν διάφορα πιθανά σενάρια ως προς τη μορφή των 'Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων'. Συγκρίνοντας κατόπιν όλα τα σενάρια για τον ελεύθερο υδροφορέα, με βάση την αποτελεσματικότητά τους για τον περιορισμό της ζώνης ρύπανσης, την εξυγίανση της περιοχής και το κόστος τους, προκύπτει ότι η βέλτιστη λύση είναι η εγκατάσταση φράγματος σε ευθεία γραμμή και κάθετα στην υδραυλική κλίση της υπόγειας ροής.

14.6.7 Αφαίρεση βαρέων μετάλλων με εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος

Τα βαρέα μέταλλα απομακρύνονται κυρίως με την προσρόφιση 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 οδεύουν και συλλέγονται στην άνοδο.

14.6.8 Φυτοεξυγίανση (Phytoremediation)

Είναι ένα είδος τεχνολογίας που χρησιμοποιεί τα φυτά για την εξυγίανση του εδάφους, της επιφάνειας του νερού και των υπόγειων υδάτων που περιέχουν τοξικά μέταλλα και άλλα οργανικά στοιχεία[21]. Αναλυτικότερα παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 21: Τα στάδια που εμπλέκονται στην Φυτοεξυγίανση από βαρέα μέταλλα.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αυξηθεί οι ανθρώπινες δραστηριότητες που επιβαρύνουν το περιβάλλον με βαρέα μέταλλα. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η χρήση τεχνολογιών και μεθόδων για την εξυγίανση περιοχών, οι οποίες είναι μολυσμένες με τοξικά μέταλλα. Οι στρατηγικές της βιοεξυγίανσης έχουν προταθεί σαν ελκυστικές και εναλλακτικές, λόγω του χαμηλού κόστους τους και της υψηλής αποδοτικότητάς τους.

Η Φυτοεξυγίανση είναι μία τεχνολογία που βασίζεται στη χρήση φυτών για την εξυγίανση μολυσμένων εδαφών, επιφανειακών και υπόγειων υδάτων η οποία εκμεταλλεύεται τη φυσική ιδιότητα πολλών φυτικών ειδών να απορροφούν, να συσσωρεύουν και σε μερικές περιπτώσεις να μεταβολίζουν συστατικά του εδάφους και του νερού. Μερικά φυτά έχουν την ικανότητα να συσσωρεύουν σε μεγάλες συγκεντρώσεις ακόμη και μέταλλα που δεν τους είναι χρήσιμα για την ανάπτυξη τους.

Είναι γνωστό ήδη από τις αρχές του 20ου αιώνα ότι περί τα 200 είδη που ανήκουν σε 45 οικογένειες όχι μόνο αντέχουν, αλλά συσσωρεύουν και τεράστιες ποσότητες βαρέων μετάλλων στα υπέργεια μέρη τους, τα λεγόμενα φυτά υπερσυσσωρευτές. Κλασικό παράδειγμα είναι το *Thlaspi caerulescens* (*Brassicaceae*), που συσσωρεύει Cd και Zn στους βλαστούς του (έως 40 mg Zn όταν 500 μg θεωρούνται τοξικά).

Η ιδέα της φυτοεξυγίανσης, με τη χρήση φυτών υπερσυσσωρευτών μετάλλων, για τον καθαρισμό χερσαίων και υδάτινων οικοσυστημάτων που έχουν ρυπανθεί, αναπτύχθηκε μόλις την τελευταία 25ετία. Επειδή όμως οι περισσότεροι υπερσυσσωρευτές είναι μικρά φυτά και βραδείας ανάπτυξης, η δυνατότητα ευρείας χρήσης τους δυσχεραίνεται. Γι' αυτό έχει ενταθεί η μελέτη των βιοχημικών, φυσιολογικών και μοριακών μηχανισμών αντοχής, με απώτερο σκοπό τη μεταφορά γονιδίων αντοχής σε φυτά που παράγουν μεγαλύτερη βιομάζα.

Η χρήση της μεθόδου ενδείκνυται ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ρύπανσης του εδάφους και του νερού με βαρέα μέταλλα και ραδιενεργά στοιχεία αλλά και με οργανικές ενώσεις, όπως χλωριωμένους διαλύτες, πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, πολυχλωριωμένα διφαινύλια, εκρηκτικές ουσίες, απορρυπαντικά, θρεπτικά συστατικά (π.χ. φωσφορικά, νιτρικά), που προκαλούν ευτροφισμό επιφανειακών υδάτων.

Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί την καλλιέργεια φυτών για την εξυγίανση μολυσμένων εδαφών, επιφανειακών και υπογείων υδάτων. Εφαρμόζεται κυρίως σε περιπτώσεις, όπου η ρύπανση είναι:

- ευρείας έκτασης (σε επιφάνεια)
- βρίσκεται στα ανώτερα στρώματα του εδάφους (μέχρι 1 m βάθος) ή του υδροφόρου ορίζοντα (μέχρι 3 m βάθος) και
- έχει σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα ρυπαντών, έτσι ώστε η εκσκαφή του μολυσμένου εδάφους ή η άντληση του μολυσμένου νερού και η ακόλουθη επεξεργασία τους να καθίσταται αντιοικονομική.

14.6.8.1 Η επιτυχία της εξαρτάται κυρίως από τους παρακάτω παράγοντες :

Επιλογή του κατάλληλου φυτικού είδους. Τα φυτά αυτά πρέπει να είναι ανθεκτικά στις τοξικές συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων, να παράγουν μεγάλη βιομάζα και να έχουν την ικανότητα να απορροφούν και να μεταφέρουν τα μέταλλα από το ριζικό σύστημα στην υπέργεια βιομάζα.

Η διαθεσιμότητα των μετάλλων. Τα μέταλλα είναι απαραίτητα να βρίσκονται σε μη υπολειμματική μορφή, έτσι ώστε να είναι δυνατή η απορρόφηση τους από τη ρίζα και η μεταφορά τους στο βλαστό. Για να αυξηθεί η διαθεσιμότητα των μετάλλων και κατά συνέπεια η πρόσληψη τους από τα φυτά, έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε

μελέτες χηλικοί παράγοντες(chelating agents) όπως π.χ. EDTA, κιτρικό οξύ, μαλικό οξύ και νιτρώδες αμμώνιο).

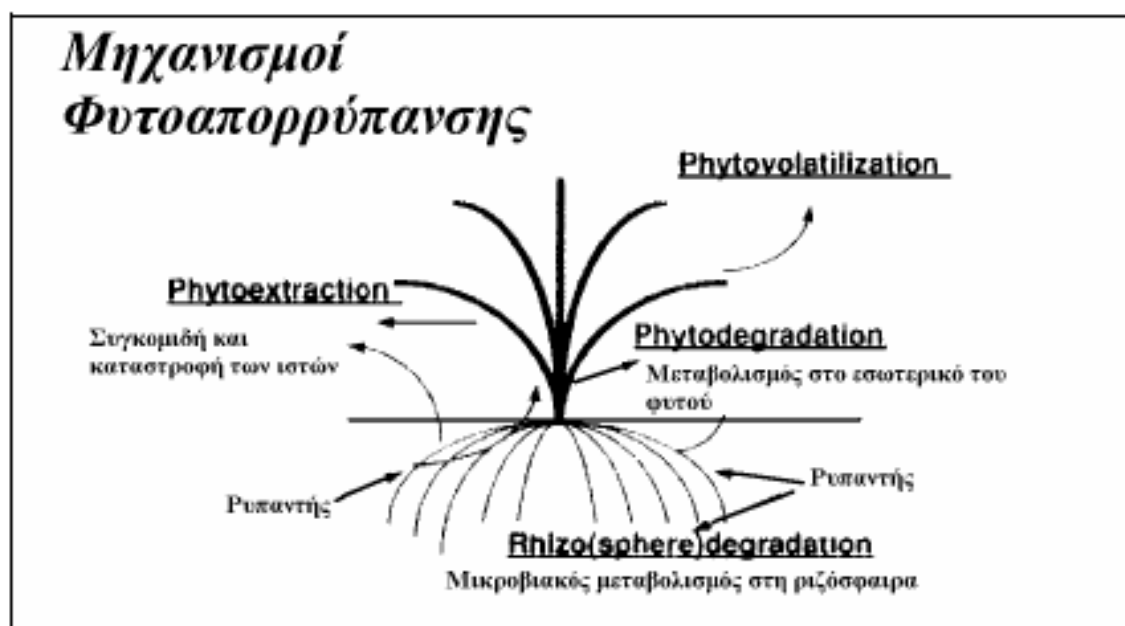
14.6.8.2 Τεχνικές της φυτοεξυγίανσης

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία της Φυτοεξυγίανσης γενικά μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

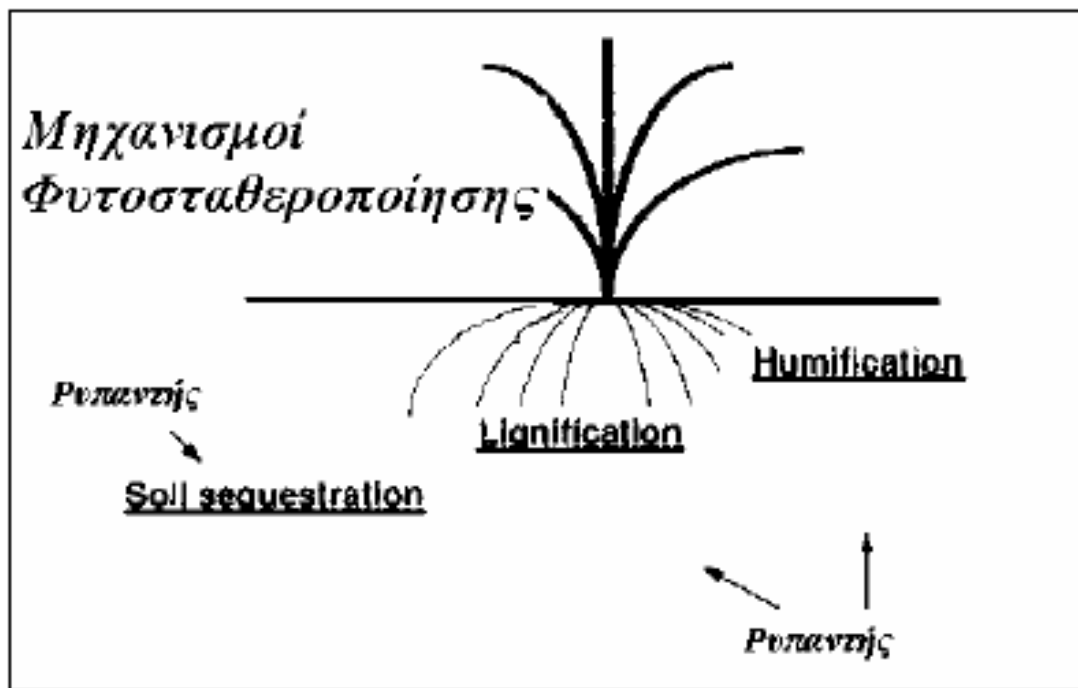
1. Φυτοαπορρύπανση (Phytodecontamination)
2. Φυτοσταθεροποίηση (Phytostabilization)

Η φυτοαπορρύπανση, περιλαμβάνει μηχανισμούς, με τη βοήθεια των οποίων, η συγκέντρωση του ρυπαντή στο έδαφος, το νερό και την ατμόσφαιρα μειώνεται σε αποδεκτά επίπεδα. Στο Σχήμα 22 παρουσιάζονται οι μηχανισμοί που είναι δυνατόν να εφαρμοστούν κατά τη διαδικασία της φυτοαπορρύπανσης[22].

Η φυτοσταθεροποίηση, (Βλ. Σχήμα 23), περιλαμβάνει μηχανισμούς οι οποίοι έχουν ως στόχο την αδρανοποίηση και απομόνωση του ρυπαντή ώστε να παρεμποδιστεί η μετανάστευση του (migration) από το έδαφος στο υπόγειο νερό ή στην ατμόσφαιρα. Η φυτοσταθεροποίηση βασίζεται στην ικανότητα των φυτών να εκκρίνουν ουσίες, μέσω των ριζών τους, οι οποίες ευνοούν μηχανισμούς όπως η χουμοποίηση (humification) - δέσμευση του ρυπαντή στα χουμικά συστατικά του εδάφους, η λιγνιτοποίηση (lignification) -δέσμευση στα κυτταρικά τοιχώματα των ριζών και δέσμευση στα εδαφικά σωματίδια (soil sequestration).



Σχήμα 22: Μηχανισμοί που εμπλέκονται στην διαδικασία της φυτοαπορρύπανσης.



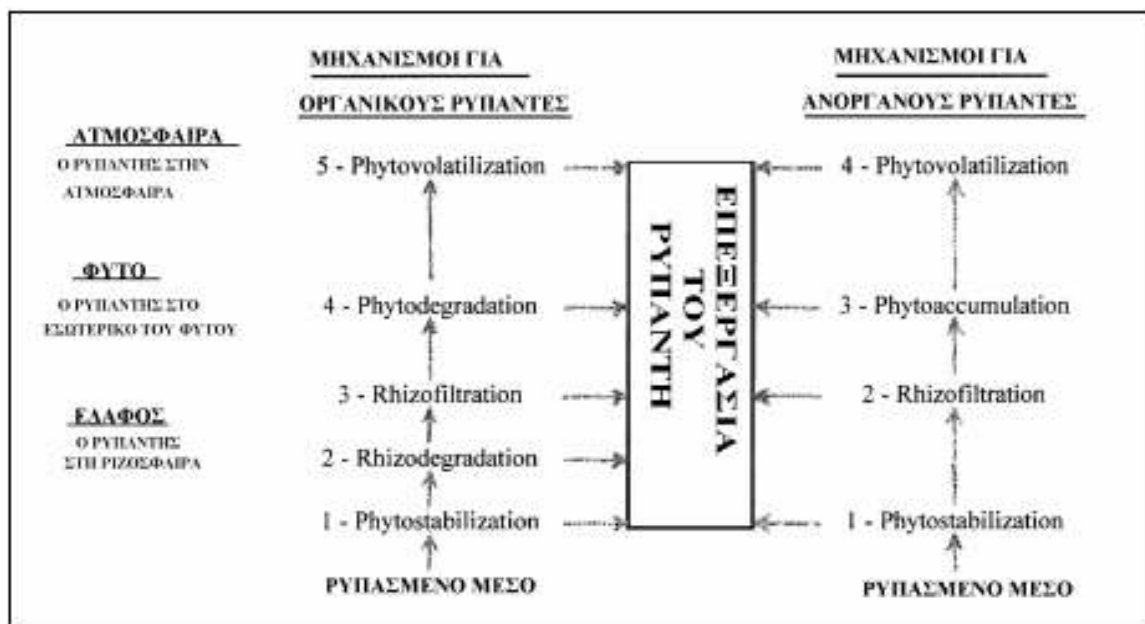
Σχήμα 23: Μηχανισμοί που εμπλέκονται στην διαδικασία της φυτοσταθεροποίησης.

Μια άλλη κατάταξη της τεχνολογίας της φυτοεξυγίανσης πραγματοποιείται ανάλογα με τους ρυπαντές στόχους:

Φυτοεξυγίανση Οργανικών ρυπαντών

Φυτοεξυγίανση Ανόργανων ρυπαντών

Στο Σχήμα 24, παρουσιάζονται οι μηχανισμοί εξυγίανσης για οργανικούς και ανόργανους ρυπαντές στο σύστημα έδαφος-φυτό-ατμόσφαιρα.



Σχήμα 24: Μηχανισμοί εξυγίανσης στο σύστημα έδαφος- φυτό- ατμόσφαιρα.

Σύμφωνα με την υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος των Η.Π.Α οι ορισμοί για τους διάφορους μηχανισμούς της Φυτοεξυγίανσης έχουν ως εξής:

14.6.8.3 Φυτοεξαγωγή-Phytoextraction

Η φυτοεξαγωγή (ή φυτοεκχύλιση ή φυτοσυσσώρευση-phytoaccumulation), αναφέρεται στη πρόσληψη μετάλλων και τη μεταφορά τους στα υπέργεια τμήματα του φυτού. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις ρυπασμένων εδαφών με βαρέα μέταλλα. Στηρίζεται στη χρησιμοποίηση φυτών τα οποία έχουν την ικανότητα να συσσωρεύουν υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων στη βιομάζα τους, ως και 100 φορές περισσότερο σε σχέση με άλλα φυτά.

14.6.8.4 Φυτοδιάσπαση -Phytodegradation

Η φυτοδιάσπαση (ή φυτομετατροπή ή φυτομετασχηματισμός-phytotransformation), περιλαμβάνει διαδικασίες οι οποίες οδηγούν στη διάσπαση/αποδόμηση του ρυπαντή[21]. Η διάσπαση του ρυπαντή είναι δυνατόν να πραγματοποιείται είτε εντός του φυτού, μέσω μεταβολικών διεργασιών είτε εξωτερικά στην περιοχή της ρίζας μέσω της παραγωγής ενζύμων. Μετά την διάσπαση του ρυπαντή, πραγματοποιείται η ενσωμάτωση του στους φυτικούς ιστούς. Σε μερικές περιπτώσεις τα τελικά προϊόντα της διάσπασης, ελευθερώνονται στο περιβάλλον, γεγονός που εξαρτάται από το είδος του φυτού και τον ρυπαντή (βλπ. Φυτοεξαέρωση) Ο μηχανισμός της φυτοδιάσπασης χρησιμοποιείται σε ρυπασμένα εδάφη, επιφανειακά και υπόγεια ύδατα. Στην περίπτωση των υπόγειων υδάτων, θα πρέπει το ριζικό σύστημα του φυτού να βρίσκεται σε επαφή με τον υδροφόρα, διαφορετικά είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί άντληση και τοποθέτηση του νερού σε δεξαμενές στις οποίες υπάρχουν κατάλληλα φυτικά είδη.

14.6.8.5 Φυτοεξαέρωση –Phytovolatilization

Κατά τη φυτοεξαέρωση, μέταλλα και οργανικές ουσίες, οι οποίες προσλαμβάνονται από τα φυτά, μετατρέπονται σε πτητικές μορφές και ελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα[21]. Μέσω αυτού του μηχανισμού επιτυγχάνεται η εξυγίανση ρυπασμένων εδαφών και υπόγειων υδάτων χωρίς να είναι απαραίτητη η συγκομιδή του φυτικού υλικού.

14.6.8.6 Ριζοδιάσπαση-Rhizodegradation

Η ριζοδιάσπαση (ή φυτοδιέγερση-phytostimulation, ή βιοεξυγίανση μέσω της ριζόσφαιρας-rhizosphere biodegradation), αναφέρεται στην διάσπαση οργανικών ρυπαντών στο έδαφος, μέσω μικροβιακών πληθυσμών που αναπτύσσονται στην περιοχή του ριζικού συστήματος (ριζόσφαιρα)[13]. Οι μικροοργανισμοί (μύκητες, βακτήρια), διασπούν ή μετασχηματίζουν οργανικές ουσίες και τις χρησιμοποιούν ως θρεπτικό υπόστρωμα για την ανάπτυξη τους. Η παρουσία των φυτών ευνοεί τη διαδικασία της εξυγίανσης δεδομένου ότι μέσω των ριζών εκκρίνονται ουσίες και μεταφέρεται οξυγόνο και νερό, στοιχεία απαραίτητα για τη μικροβιακή ανάπτυξη.

14.6.8.7 Ριζοδιήθηση-Rhizofiltration

Η ριζοδιήθηση (ή ριζοδιύλιση-rhizoextraction) περιλαμβάνει τη ρόφηση στις φυτικές ρίζες ρυπαντών οι οποίοι βρίσκονται σε υδατικά διαλύματα. Τα φυτά αναπτύσσονται σε θερμοκήπια με τη μέθοδο της υδροπονίας, δηλαδή οι ρίζες τους βρίσκονται εντός υδατικού διαλύματος αντί του εδάφους.

14.6.8.8 Φυτοσταθεροποίηση-phytostabilization

Περιλαμβάνει τη συσσώρευση και την κατακρήμνιση των μετάλλων και χρησιμοποιείται για να μειώσει την κινητικότητα των μετάλλων στο έδαφος έτσι ώστε να αποφευχθεί η μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα ή η είσοδος τους στην τροφική αλυσίδα[21].

14.6.8.9 Συγκομιδή, επεξεργασία και διάθεση των φυτών

Μετά τη φυτοεξυγίανση των μολυσμένων περιοχών τα φυτά πρέπει να κοπούν και το φυτικό τους σύστημα να ξεριζωθεί. Η επεξεργασία, που θα ακολουθεί στη συνέχεια εξαρτάται από την τοξικότητα των βιοσυσσωρευμένων ουσιών. Η πιο συνηθισμένη επεξεργασία είναι η θερμική αποδόμηση ή η ελεγχόμενη αποτέφρωση, ιδιαίτερα στην περίπτωση των βαρέων μετάλλων. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στην παραγόμενη στάχτη, η οποία καταλαμβάνει πολύ μικρό όγκο. Στην περίπτωση της συσσώρευσης ραδιενεργών

στοιχείων από τα φυτά είναι απαραίτητη η διάθεσή τους μαζί με άλλα ραδιενεργά απόβλητα σε ειδικά σχεδιασμένους χώρους υγειονομικής ταφής.

Οι τεχνολογίες φυτοεξυγίανσης έχουν αρχίσει να αναγνωρίζονται ως οικονομικώς αποδοτικές μέθοδοι για την εξυγίανση περιοχών μολυσμένων με τοξικά μέταλλα, με μικρότερο κόστος των συμβατικών τεχνολογιών, όπως οι στρατηγικές εδαφολογικής αντικατάστασης και σταθεροποίησης.

Λόγοι που ευνοούν την εφαρμογή της Φυτοεξυγίανσης είναι μεταξύ άλλων:

Η επέκταση της επιστημονικής γνώσης σχετικά με το μεταβολισμό επικίνδυνων ρυπαντών και ιδιαίτερα των οργανικών ενώσεων.

Η εύρεση νέων φυτικών ειδών που έχουν τη δυνατότητα να παρουσιάζουν ανθεκτικότητα σε διάφορους ρυπαντές.

Η χρησιμοποίηση της γενετικής μηχανικής στη δημιουργία νέων μεταβολικών δυνατοτήτων για τα είδη χρησιμοποιούμενα φυτά.

Τα **πλεονεκτήματα** που προσφέρει η φυτοεξυγίανση είναι τα εξής:

- Καθαρίζει τα επιβαρημένα από τα βαρέα μέταλλα εδάφη.
- Η βιομάζα ανακυκλώνεται εύκολα και τα βαρέα μέταλλα εκχυλίζονται εύκολα.
- Μειώνεται το κόστος όσον αφορά την απομάκρυνση των μολυσμένων εδαφών.
- Μείωση της υδάτινης μόλυνσης από τα απορριπτόμενα μολυσμένα εδάφη.
- Μειώνει τις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στον αέρα.

Η φυτοεξυγίανση έχει και ορισμένα **μειονεκτήματα**.

Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται οι ιδιαίτερα αργοί ρυθμοί φυτοεξυγίανσης, οι οποίοι συμπεριλαμβάνουν μερικές συνεχόμενες περιόδους καλλιέργειας των φυτών μέχρι να εξυγιανθεί τελείως το περιβάλλον από τους ρυπαντές.

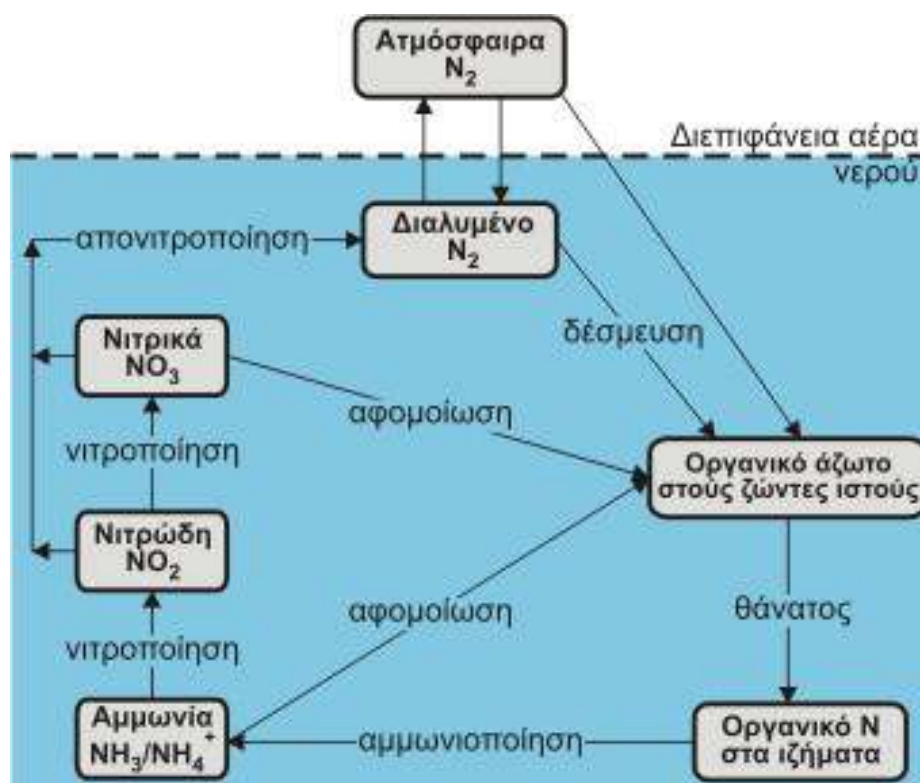
- Η φυτοεξυγίανση φέρνει μόνο αποτελέσματα, όταν το βάθος της μόλυνσης δε ξεπερνά το 1m στο έδαφος και τα 3m στον υδροφόρο ορίζοντα.
- Μειονεκτήματα αποτελεί η δυνατότητα να μεταδοθούν οι τοξικές ουσίες στην τροφική αλυσίδα μετά από πιθανή βρώση των φυτών από ζώα.
- Οι κλιματικές ή οι υδρολογικές συνθήκες στην μολυσμένη περιοχή μπορεί να μην επιτρέπουν την καλλιέργεια και ανάπτυξη των κατάλληλων για την φυτοεξυγίανση φυτών.

14.6.9 Απονίτρωση υπόγειων νερών

Η αμμωνία, τα νιτρικά, τα νιτρώδη, τα οργανικά σύμπλοκα του αζώτου και το αέριο άζωτο είναι οι πιο σημαντικές μορφές του αζώτου στο υδάτινο περιβάλλον. Οι σχέσεις και οι μετασχηματισμοί τους δίνονται στο Σχήμα 25[7].

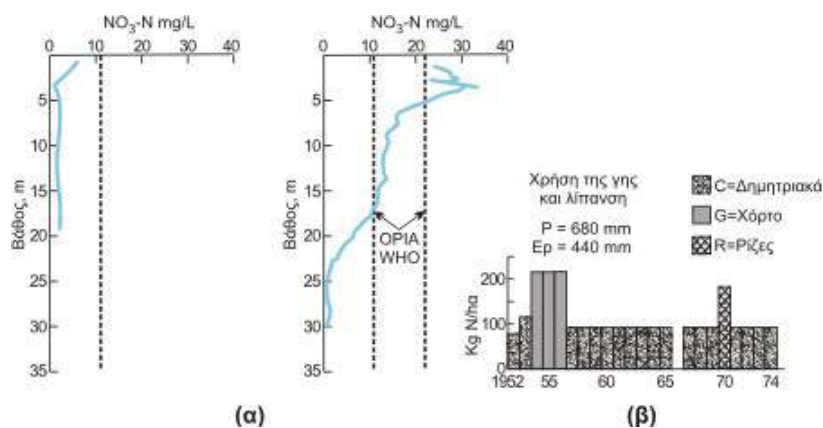
Τα νιτρικά η πιο οξειδωμένη μορφή του αζώτου στα υδατικά διαλύματα είναι χημικά ανενεργά. Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών, εκφρασμένες σε άζωτο σε μη ρυπασμένα επιφανειακά νερά κυμαίνονται σε τιμές μικρότερες του 1 mg/L. Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 1 mg/L υποδηλώνουν ανθρωπογενείς επιδράσεις, όπως αστικά λύματα και απορροή από αστικές και γεωργικές εκτάσεις.

Η νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης, είναι μια σημαντική αιτία ποιοτικής υποβάθμισης των υπόγειων νερών. Οι συγκεντρώσεις NO_3^- είναι μικρότερες όταν παρεμβάλλεται αργιλικό στρώμα στην ακόρεστη ζώνη και μειώνονται με το βάθος κάτω από τη στάθμη του υπόγειου νερού. Γενικά οι αβαθείς υδροφόροι ορίζοντες ρυπαίνονται από νιτρικά ιόντα σε μεγαλύτερο βαθμό από τους βαθύτερους υδροφόρους



Σχήμα 25: Ο κύκλος του αζώτου στο νερό

Από το Σχήμα 26 προκύπτει ότι οι συγκεντρώσεις νιτρικού αζώτου στον αγρό με γρασίδι χωρίς λίπανση είναι $<6\text{mg/L}$. Αντίθετα, οι συγκεντρώσεις του νιτρικού αζώτου στους αγρούς που λιπαίνονται υπερβαίνουν τα 10 mg/L . Η υπερβολική λίπανση μπορεί να προκαλέσει την έκπλυση των νιτρικών στο υπόγειο νερό.



Σχήμα 26: Κατανομή νιτρικών στο έδαφος: α) για μεγάλη περίοδο αγρανάπαυσης χωρίς λίπανση και β) με λίπανση μετά από μικρής διάρκειας αγρανάπαυση.

Για την αποκατάσταση εφαρμόζονται οι εξής τεχνικές:

1) **Φυσική απονίτρωση.** Εφαρμόζεται διακοπή της λίπανσης ή μείωση αυτής εφαρμόζοντας τον Κώδικα Ορθής Γεωργικής Πρακτικής. Οι κώδικες ορθής γεωργικής πρακτικής (ΚΥΑ 16190/1335/97, ΦΕΚ 519B/25-6-1997) αποβλέπουν στη μείωση της νιτρορύπανσης γεωργικής προέλευσης και περιλαμβάνουν κανόνες σχετικά με τις χρονικές περιόδους κατά τις οποίες δεν ενδείκνυται η διασπορά λιπασμάτων στο έδαφος, τη διασπορά λιπασμάτων σε επικλινή ή σε κορεσμένα εδάφη, κοντά σε υδάτινα ρεύματα κ.λπ. Επιπλέον περιλαμβάνουν την κατάρτιση σχεδίων λίπανσης ανά αγρόκτημα, την τήρηση αρχείων για τη χρήση των λιπασμάτων και τη διαχείριση της χρήσης γης. Σε περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί ευπρόσβλητες ζώνες (Βλ. Σχήμα 31), σύμφωνα με την ΚΥΑ 19562/1906/99 (ΦΕΚ 1575B/5-8-1999), όπως το Αργολικό πεδίο, η λεκάνη Κωπαΐδας, η λεκάνη του Πηνειού Ηλείας και η πεδιάδα Θεσσαλίας συντάσσονται σχέδια δράσης, ώστε να μειωθεί η ρύπανση των νερών. Ο χρόνος απορρύπανσης εξαρτάται από την αρχική συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων, το πάχος και το πορώδες του υδροφόρου ορίζοντα και την κατείδυση και δίνεται από την σχέση:

$$t = -\frac{t_r}{\ln\left(\frac{C}{C_0}\right)} \quad [7]$$

όπου:

t_r = ο χρόνος παραμονής του ρυπασμένου νερού στον υδροφόρο ορίζοντα, που είναι ίσος με $t_r = Dn/I$

D = το πάχος του υδροφόρου

n = το πορώδες

I = η κατείδυση (ετήσιος εμπλουτισμός του υδροφόρου)

C_0 = η αρχική συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων και

C = η συγκέντρωση απορρύπανσης (~15 mg/L) σε χρόνο t μετά τη διακοπή της λίπανσης.

Σύμφωνα με μελέτες ο χρόνος απορρύπανσης από νιτρορύπανση, μετά την πλήρη διακοπή της λίπανσης, σε ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες από διάφορες περιοχές της Πελοποννήσου ανέρχεται σε 16-60 χρόνια.



Σχήμα 27: Περιοχές επηρεασμένες από νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης

2) Ιοντοανταλλαγή

Γίνεται ιοντοανταλλαγή μεταξύ των ιόντων NO_3^- και Cl^- , όταν το νερό περνάει από συνθετικές ρητίνες. Εφαρμόζεται κυρίως η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης συνολικά για αφαλάτωση και απονίτρωση. Κατ' αυτήν το νερό περνώντας από μια ημιπερατή μεμβράνη, κατακρατούνται τα νιτρικά ιόντα. Μειονέκτημα είναι η απόφραξη των μεμβρανών.

3) Ηλεκτροδιάλυση

Εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση και τα ιόντα διέρχονται επιλεκτικά μέσω ημιπερατών μεμβρανών.

4) Χημική απονίτρωση

Προστίθεται αργίλιο σε υδατικό διάλυμα πλούσιο σε νιτρικά ιόντα και μέσω μιας σειράς αντιδράσεων παράγεται ελεύθερο άζωτο ή αμμωνία. Αν το τελικό προϊόν είναι η αμμωνία, γίνεται αεροδιαχωρισμός και ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

5) Βιολογική απονίτρωση

Χρησιμοποιούνται μικροοργανισμοί, οι οποίοι καταναλώνουν το άζωτο ως θρεπτική ουσία. Άλλη τεχνική είναι η δημιουργία βιομάζας από φύκη, που τρέφονται με νιτρικά.

14.6.10 Περιορισμός της επέκτασης της ρύπανσης

Για τον περιορισμό της επέκτασης της ρύπανσης χρησιμοποιούνται:

Μέθοδοι εγκιβωτισμού (διαφράγματα)

Τα διαφράγματα κατασκευάζονται από υλικά στεγανοποίησης (μπετονίτη, τσιμέντο), από σιδερένιους πασσάλους ή από γεωμεμβράνες[7]. Τα διαφράγματα μπορεί να τοποθετηθούν υπόγεια ή και επιφανειακά για να εμποδίσουν τη διήθηση της βροχής. Αρχικά είναι απαραίτητη η οριοθέτηση της ρυπασμένης περιοχής και αυτό γίνεται με γεωτρήσεις δειγματοληψίας σε διαφορετικά βάθη.

14.6.10.1 Υδραυλικές μέθοδοι αναστροφής της κίνησης του υπόγειου νερού

Περιλαμβάνουν ρύθμιση της στάθμης ώστε να αποφευχθεί εκφόρτιση των ρυπασμένων νερών σε υδάτινους αποδέκτες (λίμνες, ποτάμια) ή αραίωση των ρύπων. Οι υδραυλικοί φραγμοί δημιουργούνται με τον συνδυασμό γεωτρήσεων άντλησης και εμπλουτισμού.

14.6.10.2 Μέθοδος σταθεροποίησης του εδάφους (soil stabilization, solidification)

Η εφαρμογή της μεθόδου βασίζεται στην ανάμειξη του ρυπασμένου εδάφους με κάποιο υλικό, ώστε το μείγμα (κονίαμα) να στερεοποιηθεί. Με αυτόν τον τρόπο τα ρυπαντικά φορτία εγκλωβίζονται μέσα στην στερεοποιημένη εδαφική μάζα. Επιπλέον η σταθεροποιημένη εδαφική μάζα έχει μικρή υδροπερατότητα και έτσι δεν ευνοείται

η κίνηση του υπόγειου νερού και κατά συνέπεια η επέκταση της ρύπανσης. Τα κυριότερα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη σταθεροποίηση των εδαφών είναι:

- το τσιμέντο
- η άσβεστος (CaO)
- συνθετικές ουσίες (πολυμερή)
- ασφαλτικά υλικά

Στις μεθόδους απορρύπανσης ανήκουν και οι μέθοδοι διάθεσης των λυμάτων στο έδαφος (άρδευση, διήθηση).

Πίνακας V: Κυριότερες μέθοδοι και τεχνικές απορρύπανσης των υδροφόρων και του εδάφους

α/α	Τεχνική	Στόχος-Περιγραφή
1	Έλεγχος της πηγής ρύπανσης με μείωση του όγκου του ρυπαντή και φυσική χημική εξουδετέρωσή του.	<ul style="list-style-type: none"> - Ελαχιστοποίηση ή πρόληψη της ρύπανσης των υδροφόρων. - Μείωση του όγκου του ρυπαντή ή εξουδετέρωση του φυσικού ή χημικού του χαρακτήρα.
2	Συστήματα υδρογεωτρήσεων: <ul style="list-style-type: none"> - Συστοιχίες ρηχών γεωτρήσεων - Βαθιές γεωτρήσεις - Υδραυλικός φραγμός - Σύνθετα συστήματα - Συστήματα αφαίρεσης μη αντιδρώντων ρυπαντών (υδρογονάνθρακες). 	<ul style="list-style-type: none"> - 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 (interception systems): <ul style="list-style-type: none"> - Στραγγιστήρια (συλλεκτήρια συστήματα στραγγιδιών-στραγγιστήρια εκτόνωσης) - Τάφρος συλλογής με άντληση ή με βαρυτική ροή. 	Τα συστήματα σύλληψης, είναι εκσκαφές στην κορεσμένη ζώνη, εξοπλισμένες με σωλήνα. Η εκσκαφή μπορεί να είναι ανοιχτή (interceptor trench) ή πληρωμένη με χαλίκι, πάνω από το σωλήνα (collector drain). 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): <ul style="list-style-type: none"> - πασσαλοσανίδες - κουρτίνες στεγανοποίησης - διαφράγματα από υδαρές υλικό. 	Διοχέτευση υλικού μικρής υδροπερατότητας στο υπέδαφος, όπως πασσαλοσανίδες (άμεση στεγανοποίηση), τιμεντενέσεις, διοχέτευση ενέματος σε πηγάδια ή τάφρους (απαιτείται περίοδος στερεοποίησης).
6	Επιτόπια επεξεργασία: <ul style="list-style-type: none"> - 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.

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

14.6.10.3 Έπλυση του εδάφους

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

14.6.10.4 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 και περιλαμβάνει αερισμό, βιοαπορρύπανση, θερμική επεξεργασία κ.λπ. Η επαναπλήρωση της εκσκαφής γίνεται με το επεξεργασμένο εδαφικό υλικό ή από υγιές υλικό μεταφερόμενο από αλλού.

14.6.10.5 Εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Για την εξαέρωση πτητικών υδρογονανθράκων εφαρμόζεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υψηλής συχνότητας. Η εξαέρωση επιτυγχάνεται με την θέρμανση του εδάφους σε θερμοκρασίες 150 °C για χρονικό διάστημα δύο εβδομάδων.

15. Ο ΑΣΩΠΟΣ Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ

Ο Ασωπός ποταμός πηγάζει από τον Ελικώνα και τον Κιθαιρώνα, διασχίζει τη Βοιωτία και την Αττική και συγκεκριμένα το Συκάμινο, τον Ορωπό, το Σχηματάρι και τα Οινόφυτα σχηματίζοντας συχνά μικρούς καταρράκτες, ενώ εκβάλλει στον Ευβοϊκό Κόλπο. Σήμερα λέγεται Βουργένης και Ωρωπός[23]. Ο ποταμός τα τελευταία χρόνια έχει μολυνθεί από τα ακατέργαστα λύματα που διοχετεύουν οι βιομηχανίες που βρίσκονται στην περιοχή.

Η υπόθεση της ρύπανσης του Ασωπού ποταμού ξεκίνησε πριν από σαράντα περίπου χρόνια, όταν με Προεδρικό Διάταγμα του 1969, επιτράπη η εγκατάσταση

βιομηχανιών στην ευρύτερη περιοχή των Οινοφύτων. Η απόφαση αυτή δεν καθόριζε τον τρόπο λειτουργίας τους, ούτε έθετε όρια στις βιομηχανικές δραστηριότητες. Δέκα χρόνια μετά, το 1979, με Διανομαρχιακή Απόφαση επετράπη η ρίψη αποβλήτων στον Ασωπό, με την προϋπόθεση να ελέγχονται για τις ποσότητες χρωμίου που περιέχουν. Βέβαια η περιοχή είχε ήδη εξελιχθεί βιομηχανικά με πολλά εργοστάσια να έχουν συγκεντρωθεί στην ευρύτερη περιοχή και με χιλιάδες εργαζομένους να μετοικούν για να βρίσκονται κοντά σε τόπο εργασίας τους. Ύστερα από πολλά χρόνια αδιαφορίας κατά την δεκαετία του '90 το ΥΠΕΧΩΔΕ αποφάσισε να γίνουν κάποιες ενέργειες απορρύπανσης οι οποίες δεν ολοκληρώθηκαν ποτέ. Την ίδια μοίρα είχε και η πρόταση που πάρθηκε στο πλαίσιο ειδικής μελέτης του ΕΜΠ για την αντιμετώπιση του προβλήματος, δηλαδή η πρόταση για τη δημιουργία ενός αγωγού που θα οδηγούσε τα λύματα σε μια Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας των Βιομηχανικών Αποβλήτων και των αστικών λυμάτων του Αυλώνα, στην περιοχή Στενό. Μόλις το Νοέμβριο του 2004 ανιχνεύθηκαν για πρώτη φορά υψηλές συγκεντρώσεις χρωμίου στο πόσιμο νερό. Από τον Ιανουάριο του 2007, με πρωτοβουλία του Δήμου Οινοφύτων, άρχισαν συστηματικές αναλύσεις και παρακολούθηση των νερών.

Το χρώμιο που είχε αρχικά παρατηρηθεί όλο και αυξανόταν . Μετά από ανάλυση που έγινε στο Γενικό Χημείο του Κράτους αποδείχθηκε ότι τα νερά περιείχαν εξασθενές χρώμιο.

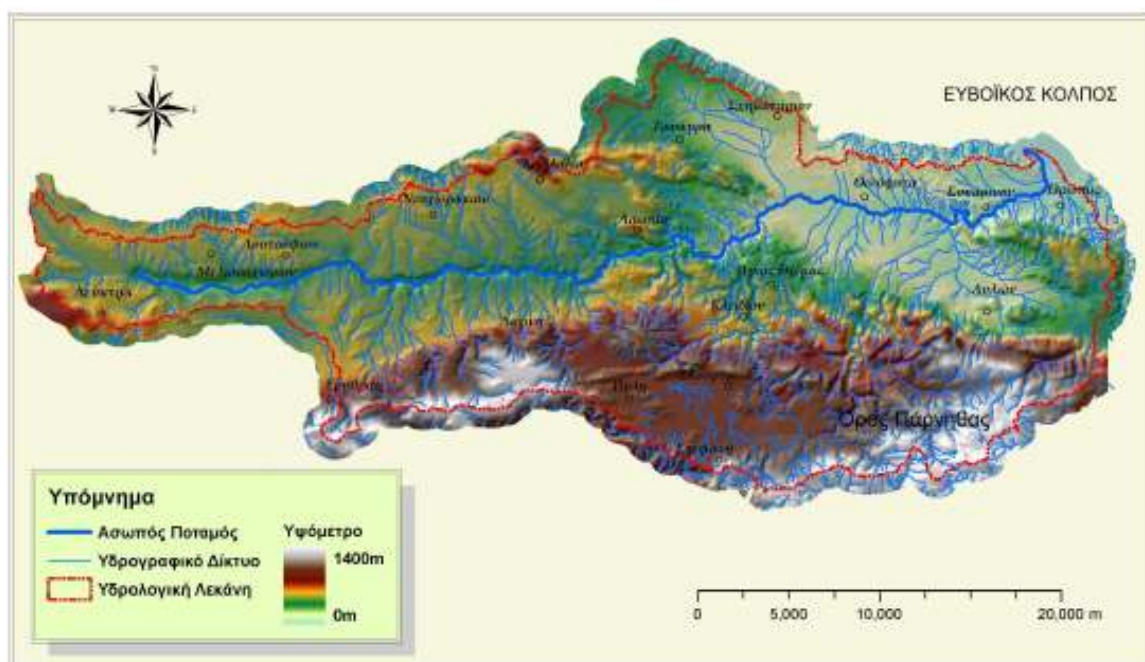
15.1 ΤΑ ΑΙΤΙΑ ΜΟΛΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΑΣΩΠΟΥ

Για να κατανοήσουμε καλύτερα την σοβαρότητα του προβλήματος της μόλυνσης του Ασωπού, θα πρέπει πρώτα να μελετήσουμε διεξοδικά τα αίτια που έχουν οδηγήσει στην τωρινή κατάσταση.

Μετά από λεπτομερείς έρευνες που έγιναν, στην περιοχή μελέτης διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν οι ακόλουθες πηγές ρύπανσης:

- **Σημειακές πηγές ρύπανσης:** Αυτές οφείλονται κυρίως στην ανεξέλεγκτη διάθεση βιομηχανικών αποβλήτων[24], αλλά και αστικών λυμάτων, σε επιφανειακούς και υπόγειους αποδέκτες. Σημειώνεται ότι η κύρια πηγή ρύπανσης των υπογείων υδάτων της ευρύτερης του Ασωπού περιοχής θεωρείται η βιομηχανική δραστηριότητα, που αναπτύχθηκε στην περιοχή Οινοφύτων-Σχηματαρίου περιστασιακά, άναρχα και χωρίς παραγωγικές υποδομές και υποδομές προστασίας του περιβάλλοντος. Για τον λόγο αυτό, ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην προέλευση

των τοξικών ρύπων, οι οποίοι εντοπίστηκαν και συνεχίζουν να εντοπίζονται σε υψηλές συγκεντρώσεις σε υδατικά και εδαφικά δείγματα.



Σχήμα 28 Γεωμορφολογικός χάρτης της λεκάνης του Ασωπού

- **Διάχυτες πηγές ρύπανσης-Επιφανειακές απορροές:** Στην περιοχή μελέτης υπάρχει έντονη αγροτική δραστηριότητα που περιλαμβάνει αροτραίες και δενδρώδεις καλλιέργειες. Συγκεκριμένα, καλλιεργούνται συνολικά 351.400 στρέμματα εκ των οποίων το 45% είναι αρδευόμενα και το 55% ξηρικά, στοιχεία που έχουν δοθεί από την Εθνική Στατιστική Υπηρεσία[23]. Γενικά, στην περιοχή μελέτης παρατηρείται έντονη γεωργική δραστηριότητα στο ανάντη τμήμα του Ασωπού. Η παραγωγή της περιοχής είναι κυρίως σιτηρά (σκληρό σιτάρι), βρώμη, βαμβάκι και ορισμένες κατηγορίες κτηνοτροφικών φυτών (κριθάρι για σανό) και κηπευτικά σε ποσοστό 6,6%. Έτσι, αναμένεται να προκαλείται ρύπανση του ποταμού Ασωπού από την επιφανειακή απορροή των όμβριων νερών στις καλλιεργούμενες εκτάσεις.

- **Φυσικές πηγές ρύπανσης:** Εκτός από τις σημειακές και τις διάχυτες πηγές ρύπανσης από τις βιομηχανικές, αστικές και αγροτικές δραστηριότητες, η μελέτη του ΙΓΜΕ επιβεβαίωσε ότι υπάρχουν φυσικές πηγές ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή μελέτης (σιδηρονικελιούχα κοιτάσματα και οφιόλιθοι), οι οποίες περιορίζονται εκτός της στενής περιοχής της λεκάνης του Ασωπού, νότια στην ορεινή περιοχή της Πάρνηθας και βόρεια στην περιοχή του όρους Κτυπάς.

15.2 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ

Με βάση τη μελέτη του ΙΓΜΕ τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των υπόγειων νερών εξετάστηκαν και ταξινομήθηκαν σε δύο διαφορετικές ενότητες, στα κύρια ιόντα και στα ιχνοστοιχεία. Για την κατανομή των **κύριων ιόντων** διαπιστώθηκαν τα ακόλουθα:

- Στην περιοχή μεταξύ Αυλώνα, Αγ. Θωμά και Ασωπού ποταμού υπάρχουν νερά πρόσφατης τροφοδοσίας πλούσια σε οξυανθρακικά ιόντα, με χαμηλό σύνολο διαλελυμένων αλάτων (TDS). Ανατολικότερα και εκατέρωθεν της κοίτης του Ασωπού οι συγκεντρώσεις των TDS αυξάνουν σταδιακά και ο υδροχημικός τους τύπος μεταβαίνει σε Mg-HCO₃.

- Τα υπόγεια νερά είναι στην πλειονότητά τους βεβαρημένα σε νιτρικά ιόντα με συγκεντρώσεις διπλάσιες περίπου από τα θεσμοθετημένα όρια του πόσιμου νερού των 50 mg/L. Επίσης, αυξημένη είναι και η συγκέντρωσή τους σε χλωρίοντα, ενώ κατά μήκος του Ασωπού παρατηρήθηκε και αύξηση σε φωσφορικά ιόντα. Επιπλέον, σε ορισμένες περιοχές καταγράφηκαν και αυξημένες τιμές νιτρωδών και αμμωνιακών ιόντων[24].

- Η προέλευση των νιτρικών ιόντων είναι κυρίως αγροχημική (αζωτούχα λιπάσματα), ενώ η παρουσία νιτρωδών και αμμωνιακών ιόντων αποδίδεται σε αστικές και βιομηχανικές εστίες ρύπανσης.

- Σε βιομηχανικές εστίες ρύπανσης αποδίδονται και οι αυξημένες τιμές των χλωριόντων και των φωσφορικών ιόντων. Η αύξηση των χλωριόντων στους προσχωματικούς παράκτιους υδροφορείς του Ωρωπού και της Αυλίδας αποδίδεται στο μηχανισμό της υφαλμύρωσης. Για την κατανομή των διαφόρων **ιχνοστοιχείων και μετάλλων** διαπιστώθηκαν τα ακόλουθα:

- Καταγράφηκαν αυξημένες τιμές διαφόρων μετάλλων και ιχνοστοιχείων, όπως το ολικό και το εξασθενές χρώμιο, το νικέλιο και ο σίδηρος και σε περιορισμένες αναλύσεις το αρσενικό και ο μόλυβδος. Τα ιχνοστοιχεία που ανιχνεύτηκαν παρουσιάζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις κατά μήκος και εκατέρωθεν του Ασωπού, στην περιοχή του Ωρωπού, καθώς και στην περιοχή της Αυλίδας.
- Ολικό χρώμιο: Οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται στην περιοχή της Αυλίδας (180 ppb) και ακολουθούν οι περιοχές εκατέρωθεν του Ασωπού (40-

107 ppb) μέχρι την ευρύτερη περιοχή του Ωρωπού (17-85 ppb), καθώς και η περιοχή νοτιοανατολικά του Ασωπού μέχρι την ευρύτερη περιοχή του Αυλώνα (20-118 ppb). Οι παραπάνω μετρήσεις επιτρέπουν την εκτίμηση ότι στις περισσότερες περιπτώσεις οι αυξημένες αυτές τιμές του ολικού χρωμίου είναι αποτέλεσμα βιομηχανικής ρύπανσης. Αυξημένες τιμές χρωμίου παρατηρήθηκαν και σε γεώτρηση η οποία βρίσκεται πλησίον της κοίτης του Ασωπού βόρεια του Αγ. Θωμά (163 ppb).

Επισημαίνεται ότι οι αυξημένες συγκεντρώσεις του ολικού χρωμίου καταγράφηκαν στην περιοχή νότια και νοτιοανατολικά του Ασωπού, η οποία ταυτίζεται με τη βασική διεύθυνση της ροής των υπόγειων νερών στον καρστικό υδροφόρο και όχι ανάντη αυτής, όπως η περιοχή βορειοδυτικά του Ασωπού δηλ. η περιοχή Οινόης – Σχηματαρίου.

- Οι συγκεντρώσεις του εξασθενούς χρώμιο Cr(VI) παρουσιάζουν κατανομή ανάλογη με αυτή του ολικού χρωμίου. Οι μέγιστες τιμές που μετρήθηκαν ανέρχονται σε 156 ppb σε γεώτρηση που βρίσκεται πλησίον της κοίτης του Ασωπού, βόρεια του Αγ. Θωμά. Ανάλογες τιμές παρουσιάζουν και οι γεωτρήσεις και τα φρέατα στην περιοχή της Αυλίδας (140 ppb). Υψηλές τιμές καταγράφηκαν και σε γεώτρηση πλησίον της κοίτης του Ασωπού (104 ppb), καθώς επίσης και στην ευρύτερη περιοχή του Αυλώνα (μέχρι 108 ppb). Οι αυξημένες συγκεντρώσεις του εξασθενούς χρωμίου που προαναφέρθηκαν εκτιμάται με βεβαιότητα ότι είναι στην πλειοψηφία τους αποτέλεσμα βιομηχανικής ρύπανσης. Παρόλα αυτά, σημειώνεται ότι είναι πιθανή και η παρουσία χρωμίου φυσικής προέλευσης, αλλά τα διαθέσιμα στοιχεία δεν επιτρέπουν τον ασφαλή χαρακτηρισμό του.
- Η κατανομή του Ολικού Σιδήρου (Fe) παρουσιάζει ανάλογα χαρακτηριστικά με τις προηγούμενες κατανομές, αλλά και με σαφείς διαφοροποιήσεις. Υψηλές τιμές παρατηρήθηκαν δυτικά του Ωρωπού στην ευρύτερη περιοχή της Χρυσοπηγής (μέχρι 1900 ppb) σε συγκεκριμένη περιοχή του Αυλώνα (2500 ppb), νότια των Οινοφύτων καθώς και μεταξύ Σχηματαρίου και Αυλίδας (2000 ppb). Η αυξημένη συγκέντρωση στην περιοχή του Αυλώνα φαίνεται επιπροσθέτως να επηρεάζεται από την παρουσία του σιδηρονικελιούχου κοιτάσματος το οποίο εμφανίζεται επιφανειακά, νότια του Αυλώνα, ενώ οι αυξημένες τιμές στις υπόλοιπες περιοχές εκτιμάται ότι στην

πλειοψηφία τους είναι αποτέλεσμα βιομηχανικής ρύπανσης, αφού συνοδεύονται και με άλλους ρυπαντικούς δείκτες και αυξημένες συγκεντρώσεις μετάλλων.

- Αυξημένες τιμές Νικελίου (Ni) παρατηρούνται εκατέρωθεν της κοίτης του Ασωπού (μέχρι 54 ppb) καθώς και νοτιοδυτικά της Οινόης, ενώ δεν παρατηρήθηκαν στις περιοχές της Αυλίδας και του Ωρωπού οι οποίες αντίθετα έδειξαν υψηλές συγκεντρώσεις χρωμίου και άλλων ιόντων. Η συγκεκριμένη κατανομή του νικελίου αποτελεί χαρακτηριστικό δείκτη ρύπανσης και η παρουσία του εκτιμάται με βεβαιότητα ότι σχετίζεται άμεσα με βιομηχανικές εστίες ρύπανσης που λαμβάνουν χώρα εντός της ευρύτερης βιομηχανικής ζώνης του Ασωπού.
- Ολικός Οργανικός Άνθρακας (TOC): Η παρουσία και κατανομή του Ολικού Οργανικού Άνθρακα αποτελεί δείκτη ρύπανσης των υπόγειων νερών από οργανικές ενώσεις. Οι μετρήσεις έδειξαν υψηλές τιμές, έως και 7.5 mg/L στα νερά του Ασωπού, καθώς και αυξημένες τιμές σε γεωτρήσεις εκατέρωθεν της κοίτης του και επίσης σε γεωτρήσεις οι οποίες έδειξαν αντίστοιχα υψηλές συγκεντρώσεις και άλλων ρυπογόνων μετάλλων και ιόντων. Η κατανομή του και ειδικότερα η σύσταση των επιμέρους οργανικών ενώσεων που συμμετέχουν, χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης σύμφωνα με τις προδιαγραφές και υποδείξεις της Οδηγίας 2000/60 της Ε.Ε.
- Άλλα μέταλλα (αρσενικό και μόλυβδος): Αυξημένες τιμές συγκεντρώσεων αρσενικού και μολύβδου παρατηρήθηκαν σε μεμονωμένες γεωτρήσεις πλησίον του Ασωπού καθώς και στις περιοχές Σχηματαρίου, Οινοφύτων και Αυλώνα. Οι υψηλές αυτές τιμές αποδίδονται στην πλειοψηφία τους σε σημειακές και διάχυτες εστίες βιομηχανικής ρύπανσης.

15.3 ΛΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Το ζήτημα του Ασωπού και η έκταση του προβλήματος έγιναν αντιληπτά τον Μάρτιο του 2006, όπου ύστερα από την επίσκεψη μελών της Επιτροπής Περιβάλλοντος της Βουλής προτάθηκαν μια σειρά από λύσεις. Η δημιουργία ενός γραφείου Περιβάλλοντος στην περιοχή Οινοφύτων- Σχηματαρίου σε συνδυασμό με την πρόσληψη επιστημόνων που θα εξειδικεύονταν σε ζητήματα ρύπανσης των

υδάτων ήταν μέρος των βασικών θέσεών τους. Επιπλέον, η έναρξη του καθαρισμού της κοίτης του ποταμού θεωρήθηκε επιβεβλημένη, όπως και ο εκσυγχρονισμός της μελέτης για την επεξεργασία των βιομηχανικών και οικιστικών αποβλήτων του δήμου Αυλώνας και των δήμων που συγκροτούν τον Ωρωπό. Ο έλεγχος και η επιθεώρηση της περιοχής καθημερινά και η αλλαγή του υπάρχοντος νομοθετικού πλαισίου αναφορικά με τα πρόστιμα ήταν στοιχεία στα οποία δόθηκε μεγάλη σημασία[23]. Στα μέτρα αυτά προστέθηκαν ο χωροτεχνικός σχεδιασμός της περιοχής και η δημιουργία Κεντρικού Βιολογικού Καθαρισμού μαζί με την κατασκευή κλειστού αγωγού που θα διοχετεύει τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα.

Οι προτάσεις μας όσο αφορούν την λύση του συγκεκριμένου προβλήματος αποτελούνται από δύο σκέλη. Αρχικά προτείνουμε την μέθοδο της απορρύπανσης διαλυμένων ρυπαντών. Σε αυτή γίνεται άντληση του υπόγειου νερού με σύστημα γεωτρήσεων και στη συνέχεια οδηγείται σε μονάδα επεξεργασίας. Μετά την επεξεργασία γίνεται η επανεισαγωγή του επεξεργασμένου νερού στον υδροφόρο, ή 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, της μεταβιβαστικότητας, του συνολικού αριθμού γεωτρήσεων και της παροχής άντλησης της καθεμιάς. Οι περιορισμοί στη μέθοδο αυτή συνίστανται στην αποτελεσματικότητά της που εξαρτάται από τη γεωλογία του υδροφορέα και το είδος των ρυπαντών. Επίσης, είναι μια χρονοβόρα διαδικασία που χρειάζεται δεκαετίες μέχρι και αιώνες για την απομάκρυνση των ρύπων και συχνά αποτυγχάνει να αντληθούν όλα τα μολυσμένα ύδατα. Είναι αρκετά δαπανηρή και δεν λειτουργεί πάντα, καθώς ορισμένοι ρυπαντές κολλούν στα πετρώματα με αποτέλεσμα να μην καθίσταται εύκολη η διαδικασία αφαίρεσης τους.

Στο δεύτερο σκέλος πραγματοποιείται η αφαίρεση του χρωμίου. Αυτή γίνεται κυρίως με την προσρόφηση των ιόντων τους στην επιφάνεια των αργιλικών ορυκτών, κάτι που θεωρείται φυσική απορρύπανση. Επιπλέον, για την αφαίρεση των βαρέων μετάλλων εφαρμόζεται τάση μέσω ηλεκτροδίων και τα ιόντα των μετάλλων οδεύουν και συλλέγονται στην άνοδο.

Μια προταση όμως που θα συμβάλλει στην μειωση της μόλυνσης του Ασωπού αλλά και στην αισθητική βελτιωση της περιοχής είναι η εφαρμογή της τεχνολογίας της φυτοεξυγίανσης. Η τεχνολογία της Φυτοεξυγίανσης ανόργανων ρυπαντών εστιάζεται κυρίως στην επεξεργασία βαρέων μετάλλων και

ραδιονουκλιδίων. Η Φυτοεξυγίανση βαρέων μετάλλων στηρίζεται στη χρησιμοποίηση φυτών τα οποία έχουν την ικανότητα να συσσωρεύουν υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων στη βιομάζα τους ως και 100 φορές περισσότερο σε σχέση με άλλα φυτά Βλ.Σχήμα 24. Τα φυτά αυτά ονομάζονται υπερσυσσωρευτές (hyperaccumulators). Στον πίνακα VI παρουσιάζεται ο αριθμός των γνωστών μέχρι σήμερα υπερσυσσωρευτών για 8 βαρέα μέταλλα καθώς και οι φυτικές οικογένειες στις οποίες ανήκουν.

Πίνακας VI Αριθμός γνωστών υπερσυσσωρευτών για 8 βαρέα μέταλλα και οι οικογένειες στις οποίες απαντώνται πιο συχνά.

Βαρέα μέταλλα	No.	Οικογένεια
Κάδμιο (Cd)	1	Brassicaceae
Κοβάλτιο (Co)	26	Lamiaceae, Scrophulariaceae
Χαλκός (Cu)	24	Cyperaceae, Lamniaceae, Poaceae, Scrophulariaceae
Μαγγάνιο (Mn)	11	Apocynaceae, Cunoniaceae, Proteaceae
Νικέλιο (Ni)	290	Brassicaceae, Violaceae, Cunoniaceae, Proteaceae
Σελήνιο (Se)	19	Fabaceae
Θάλλιο (Tl)	1	Brassicaceae

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ



Το έδαφος, μαζί με τα υδάτινα συστήματα, είναι ο κυριότερος αποδέκτης της ανθρωπογενούς ρύπανσης. Οι βιομηχανικές, βιοτεχνικές και εμπορικές δραστηριότητες ρυπαίνουν σε μεγάλο βαθμό το έδαφος και κατά συνέπεια τον υδροφόρο ορίζοντα



Η ρύπανση των υπόγειων νερών προκαλείται από την εδάφια διάθεση των λυμάτων των σταθμών επεξεργασίας αστικών λυμάτων και σηπτικών δεξαμενών, τις εκκλύσεις από τους σκουπιδότοπους, και τις ποικίλες γεωργικές πρακτικές. Δραστηριότητες που εμπλουτίζουν ή ρυπαίνουν υδάτινους αποδέκτες, συνδέονται με ανθρώπινες χρήσεις.



Τα ακάθαρτα νερά χαρακτηρίζονται από τη μεγάλη τους περιεκτικότητα σε οργανικά συστατικά και συνήθως αποχετεύονται σε θαλάσσιους, λιμναίους ή ποτάμιους αποδέκτες ή και απορροφητικούς βόθρους, ρυπαίνοντας έτσι και τα υπόγεια νερά. Οι πιο σπουδαίοι μικροοργανισμοί στα υπόγεια νερά είναι τα παθογόνα βακτήρια, οι μύκητες και διάφορα άλλα παράσιτα, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές ασθένειες στον άνθρωπο όπως τύφο, χολέρα, ηπατίτιδα.



Η ρύπανση στην πλειονότητα των περιπτώσεων γίνεται αισθητή μετά από αρκετά χρόνια. Τα ρυπαντικά σωματίδια εξαπλώνονται στην ευρύτερη περιοχή ενώ για μικρότερα χρονικά διαστήματα η ρύπανση περιορίζεται μόνο στα τοπικά πλαίσια της πηγής. Απαραίτητη η ανάγκη για εξυγίανση του εδάφους και των υπόγειων πηγών στις περιοχές αυτές.



Η πιο κλασσική μέθοδος είναι αυτή της άντλησης. Απαιτούνται τεράστια ποσά άντλησης για την διασφάλιση από τον κίνδυνο της ρύπανσης. Αυτό φυσικά έχει ως αντίκτυπο την πτώση της στάθμης των υπόγειων υδάτων. Αν οι επηρεαζόμενες περιοχές είναι πολύ κοντά στη θάλασσα, αυτό θα εντείνει περισσότερο το φαινόμενο της υφαλμύρωσης. Το νερό που αντλείται θα πρέπει να υποστεί τουλάχιστον μια

πρωτογενή επεξεργασία για να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια. Η επεξεργασία αυτή σημαίνει οικονομικό κόστος.



Μια από τις σημαντικότερες μεθόδους απορρύπανσης είναι η βιολογική αποκατάσταση. Βασίζεται στην αποδόμηση των οργανικών ουσιών και την τελική μετατροπή τους σε αβλαβείς ουσίες μέσω της δράσης μικρόοργανισμών. Οι μικροοργανισμοί αποσυνθέτουν τις οργανικές ενώσεις χρησιμοποιώντας ως καταλύτες κατάλληλα ένζυμα (πρωτεΐνες) τα οποία παράγουν οι ίδιοι. Το τελικό προϊόν της αποσύνθεσης των οργανικών ουσιών μέσω των μικροοργανισμών είναι ανόργανες ουσίες (διοξείδιο του άνθρακα και νερό) που θεωρούνται λιγότερο επιβλαβείς από τις αρχικές ενώσεις.



Τα διαπερατά αντιδρώντα φράγματα (PRBs) αποτελούν μια *in situ* παθητική ζώνη επεξεργασίας που περιέχει αντιδρόν υλικό, το οποίο αποικοδομεί, μετατρέπει ή ακινητοποιεί τους ρυπαντές καθώς το υπόγειο νερό ρέει δια μέσου αυτού. Για να λειτουργήσει σωστά η μέθοδος αυτή θα πρέπει να μπορεί η θέση τους να είναι πλησίον της ζώνης ρύπανσης για την αποφυγή εξάπλωσης του ρύπου. Το σύστημα να είναι έτσι εγκατεστημένο, ώστε όλο το ρυπασμένο νερό να περνάει από την δίοδο. Το μέγεθος των φραγμάτων και ο αριθμός των διόδων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος, ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος.



Η τεχνολογία Αεροδιασποράς (Air sparging) είναι η πιο κατάλληλη να αντιμετωπίσει το μολυσμένο διαποτισμένο υπέδαφος και τα ρηγά υπόγεια νερά. Είναι μια τεχνολογία απλού και χαμηλού κόστους, όπου ο αέρας εγχέεται άμεσα στη διαποτισμένη υποεπιφάνεια, εξατμίζει τους μολυσματικούς ρύπους από την υγρή φάση στη φάση ατμού, και τους βιοδιασπά μέσω της εισαγωγής οξυγόνου χωρίς να επιτρέπει την μετανάστευση τους. Η τεχνολογία δεν είναι αποτελεσματική σε μολυσματικούς ρύπους με χαμηλή αεροβική διασπασιμότητα. Την απόδοση της επηρεάζουν οι γεωλογικές συνθήκες των περιοχών όπως η στρωματοποίηση, η ετερογένεια, και η ανισοτροπία που αποτρέπουν την ομοιόμορφη ροή αέρα.



Μια άλλη μέθοδος είναι η φυτοεξυγίανση, που βασίζεται στη διαπίστωση ότι τα φυτά έχουν τη δυνατότητα να προσλαμβάνουν και να διασπών τοξικές οργανικές ουσίες τόσο από το έδαφος όσο και από την ατμόσφαιρα, και επομένως μπορούν υπό προϋποθέσεις να χρησιμοποιηθούν για την οικονομική αντιμετώπιση του προβλήματος της ρύπανσης. Η Φυτοεξυγίανση αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, η οποία συνδυάζει το χαμηλό κόστος οργάνωσης και λειτουργίας με τη δυνατότητα επεξεργασίας των ρυπαντών. Κάποια από τα σημαντικά μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η δυσκολία πρόβλεψης της απόδοσης της, η εφαρμογή της σε σχετικά περιορισμένο βάθος ρύπανσης, η μεγάλη χρονική διάρκεια που απαιτείται για την ολοκλήρωση της, η εξάρτηση της από τις φυσικοχημικές και περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής.



Η ψευδαίσθηση της αφθονίας στο θέμα του νερού έχει καταστρεπτικές συνέπειες για το περιβάλλον και την οικονομία. Είναι απαραίτητο να μην επαναληφθούν οι λανθασμένες προσεγγίσεις του παρελθόντος αλλά να υπάρξει καινούρια πολιτική.



Όσο αφορά την περίπτωση του Ασωπού η Φυτοεξυγίανση μπορεί να αποτελέσει αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, η οποία συνδυάζει το χαμηλό κόστος οργάνωσης και λειτουργίας με τη δυνατότητα επεξεργασίας των ρυπαντών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9D%CE%B5%CF%81%CF%8C>
2. <http://encyclopedia.pblogs.gr/2010/00/nero-h2o.html>
3. <http://www.zunal.com/introduction.php?w=131274>
4. <http://estia.hua.gr:8080/dspace/bitstream/123456789/236/1/Ptychiaki20.pdf>
5. Χολέβα Ε., Η γνώμη των κατοίκων του δήμου Νεσσώνος για το πόσιμο νερό., Πτυχιακή Εργασία, Αθήνα 2007
6. Ευθύμιος Νταρακάς, Ποιοτικά χαρακτηριστικά και διεργασίες επεξεργασίας νερού, Επ. Καθηγητής, Θεσσαλονίκη 2010
7. Βουδούρης Κ., Θέματα Υδρογεωλογίας Περιβάλλοντος, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2006
8. ΠΙΣΣΑΝΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ , ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ “ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΓΙΟΦΥΡΟΥ” ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2012
9. Ευθύμιος Νταρακάς, Ποιοτικά χαρακτηριστικά και διεργασίες επεξεργασίας νερού, Επ. Καθηγητής, Θεσσαλονίκη 2010
10. Καραϊσκάκης Γ., Φυσικοχημεία, Εκδόσεις Τραυλός, Πάτρα 1998
11. ΛΑΤΙΝΟΠΟΥΛΟΣ Π., ΘΕΟΔΟΣΙΟΥ Ν., ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ, Διδακτικές σημειώσεις, ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
12. http://www.waterinfo.gr/eedyp/Paros_papers/antonopoulos_b.pdf
13. <http://www.aueb.gr/users/koundouri/resees/uploads/envbackstudy.pdf>
14. http://ikaros.teipir.gr/mecheng/OPS/files/Env_Biom/Tomos%20B_Kef_13.pdf
15. http://www.chem.uoa.gr/courses/organiki_1/oikotoxikologia/oiktx_K05.pdf
16. <http://www.lifesos.eu/index.php/el/pollution>
17. Καββαδάς Μιχ. Αναπλ.καθ.Ε.Μ.Π. Σεπτ.2007.(Τεχνολογίες απορρύπανσης και προστασίας εδαφών και υπόγειων υδροφορέων)
18. <http://www.moa.gov.cy/moa/environment/environment.nsf/All/5247B614CE83A9D2C225791800379902?OpenDocument>

- 19.** ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΒΑΓΙΩΝΑΣ, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Θεσσαλονίκη, Οκτώβριος 2009
- 20.** <http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=7124>
- 21.** ΣΟΦΙΑ ΓΕΡΑΣΙΜΟΠΟΥΛΟΥ ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΔΜΙΟΥ (Cd) ΣΕ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΥΤΩΝ NICOTIANA TABACUM ΚΑΙ NICOTIANA GLAUCA. ,ΗΡΑΚΛΕΙΟ, 2009
- 22.** ΣΑΧΙΝΙΔΗΣ ΣΥΜΕΩΝ, ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΟΤΕΡΑ ΤΟΥ ΜΟΛΥΒΔΟΥ, ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ. ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΦΥΤΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ, ΑΘΗΝΑ ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2012
- 23.** <http://www.aueb.gr/users/koundouri/resees/uploads/envbackstudy.pdf>
- 24.** <http://library.tee.gr/digital/m2519.pdf>
- 25.** Grasso D. (1993) “Hazardous Waste Site Remediation”, CRC Press, USA, Section J, pp.1-77.
- 26.** King, R.B., Long G.M., Sheldon, J.K. (1998) “Practical Environmental Bioremediation. The Field Guide”, CRC Press, USA.
- 27.** Kuo, J. (1999) “Practical Design Calculations for Groundwater and Soil remediation”. Lewis Publishers, USA.
- 28.** LaGrega, M.D., Buckingham, P.L., Evans, J.C. (1994) “Hazardous Waste Management”, McGraw-Hill, Chapter 10, pp. 555-640.
- 29.** Pankow, J.F. (1991) “Aquatic Chemistry Concepts”, Lewis Publishers, USA.
- 30.** Suthersan S.S. (1997) “Remediation Engineering. Design Concepts”, CRC Press, USA.
- 31.** Αλιβάνης, Κ. (1999): Περιβαλλοντικές επιπτώσεις χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων στα γεωλογικά χαρακτηριστικά και τους υδατικούς πόρους. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ
- 32.** Antonopoulos, V. & Papazafiriou, Z. (1990): Simultaneous one-dimensional water flow and mass transport of conservative solutes in porous media. Water Res. Manag. 4(1): 47-62.

33. Αντωνόπουλος, Β. (2000): Μεταφορά μάζας και προσρόφιση ρύπων και ουσιών σε πορώδη εδαφικά υλικά. Πρακτικά 8ου Συνεδρίου της ΕΥΕ. Αθήνα.
34. Αντωνόπουλος, Β. (2001): Ποιότητα και Ρύπανση υπόγειων νερών. Εκδ. Ζήτη. Θεσσαλονίκη.
35. Αϊνατζή Ουρανία, Πατεράκη Αιμιλία, ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, *ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΕΛΛΑΦΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ*, Κοζάνη, Φεβρουάριος 2010
36. Βουδούρης, Κ., Γιαννάτος, Γ., Διαμαντοπούλου, Π., Ζάννης, Π., Παπακωνσταντίνου, Κ. (2002): Αποτελέσματα του πιλοτικού προγράμματος τεχνητού εμπλουτισμού του υπό πίεση υδροφορέα της βιομηχανικής περιοχής Πατρών, μέσω βαθιών γεωτρήσεων. Πρακτικά 6^{ου} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου. Ξάνθη, 47-58
37. Burgess, D.B., Fletcher, S.W. (1998): Methods used to delineate groundwater source protection zones in England and Wales. Groundwater pollution, Aquifer recharge and Vulnerability. Geological Society, London, Special publications, 130, 199-210.
38. Γεωργιάδης, Θ., Καλλέργης, Γ., Φερεντίνος, Γ. (2004). Φυσικό περιβάλλον και ρύπανση. Τόμος Α' «Το χερσαίο περιβάλλον ως αποδέκτης αποβλήτων». Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
39. Δημαράς Άγγελος, Μαστρογιάννης Φίλιππος, Διπλωματική εργασία, Αποτίμηση του κόστους ρύπανσης του Ασωπού ποταμού, Αθήνα, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2010
40. Daskalaki, P., Voudouris, K. (2006): Groundwater quality in porous aquifers in Greece: a synoptic review. Las aguas subterráneas en los países mediterráneos. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y aguas subterráneas No 17, 135-142. Madrid.
41. De Smedt, F. & Wierenga, P.J. (1979): Mass transfer in porous media with immobile water. Journal of Hydrology, 41: 59-67.
42. Ellis, K.V. (1989): Surface water pollution and its control. McMillan, 373 p.
43. Ellis, D., Bouchard, C., Lantagne, G. (2000): Removal of iron and manganese from groundwater by oxidation and microfiltration. Desalination, Vol. 130, 255-264.

44. Καλλέργης, Γ. (2001): Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη ρύπανση νερών και εδαφών. Πρακτικά ημερίδας «Υδρογεωλογία και Περιβάλλον». ΕΕΥ. Αθήνα, 7-74.
45. Μήτρακας, Μ. (2001): Ποιοτικά χαρακτηριστικά και επεξεργασία νερού. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
46. Νικολαΐδης, Ν. (2005): Υδατική Χημεία. Εκδόσεις Ζήτη. Θεσσαλονίκη.
47. Water, Air & Soil Pollution, 2003, 144: 419-440. Ζανάκη Κ., 1996: "Έλεγχος Ποιότητας Νερού" Εκδ. "ΙΩΝ" Αθήνα, ISBN 960-405-501-1
48. Κάγκαλου Ι., 1997: "Σημειώσεις Λιμνολογίας" ΤΕΙ Ηπείρου, Ηγουμενίτσα
49. Καρατάγλης Στ., 1992: "Φυσιολογία Φυτών" Εκδ. ART of TEXT, Θεσσαλονίκη, ISBN 960-312-009-X
50. Κουσουρής Θ., 1998: "Μονογραφίες Θαλάσσιων Επιστημών - Το Νερό στη Φύση, στην Ανάπτυξη, στην Προστασία του Περιβάλλοντος" Εκδ. Εθνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών, Αθήνα
51. Αντωνόπουλος Β. 2001, καθ.Α.Π.Θ. εκδ. Ζήτη, Θεσ/νικη σελ.355,(Ποιότητα και Ρύπανση Υπογείων νερών)
52. Αντωνόπουλος Β. 1999(Υδρολογία της Ακόρεστης Ζώνης του Εδάφους) σελ.275
53. Χριστούλας Δ. 1991,(Ρύπανση των υδάτων και αντιρρυπαντική τεχνολογία)Αθήνα.
54. «Κυριότερες μέθοδοι απορρύπανσης» Χριστούλας 91',Καββαδάς 96',Αντωνόπουλος 01'
55. Καινοτόμες Μέθοδοι Εξυγίανσης Ρύπανσης Εδαφών και υπογείων υδάτων. Τεχνολογία φυτοεξυγίανσης Ζαμπετάκης Α./ Μάνιος Θ./ Καρατζάς Γ. Heleco '05 ΤΕΕ Αθήνα 2005
56. Φιλιππίδης, Α. (2005): Εξυγίανση και προστασία των υδάτων της λίμνης Κορώνειας με φυσικό ζεόλιθο. Πρακτικά 13ου Σεμιναρίου για την Προστασία του Περιβάλλοντος. Θεσσαλονίκη. Εργ. Ελέγχου Ρύπανσης Περιβάλλοντος, Τμήμα Χημείας, ΑΠΘ, 73-84.
57. Χριστούλας, Δ. (1991): Ρύπανση των υδάτων και αντιρρυπαντική τεχνολογία. Εκδ. Συμεών.Αθήνα.

58. Λ. Ζαμπετάκης, Θ. Μανίος, Γ. Καρατζάς, Καινοτομικές μέθοδοι εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπόγειων υδάτων. Η τεχνολογία της Φυτοεξυγίανσης.
59. www.epa.gov/oust/pubs/tum_ch7.pdf air sparging
60. www.europa.eu
61. www.greenpage.gr
62. www.unccd.int
63. www.isric.nl/GLASOD.htm
64. www.greenpeace.org
65. www.wwf.gr