

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

### ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

#### 9.1. Γενικά

Η απορρύπανση ή εξυγίανση αποσκοπεί στην ανάληψη ενεργειών και δράσεων για την αποκατάσταση των υπόγειων υδροφορέων που έχουν ρυπανθεί ή τον περιορισμό της επέκτασης της ρύπανσης σε άλλες περιοχές, μέσω της κίνησης του νερού. Η πλήρης αποκατάσταση των υπόγειων υδροφορέων και του εδάφους είναι αδύνατο να επιτευχθεί.

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από τη φύση, τη συγκέντρωση και ποσότητα του ρυπαντή, το είδος της πηγής ρύπανσης (σημειακή ή διάχυτη, συνεχής ή παροδική), το πάχος της ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης, το κόστος και τη διαθέσιμη τεχνολογία, καθώς και τη μελλοντική χρήση γης. Η επιτόπια παρακολούθηση (site monitoring) αποτελεί το πρώτο βήμα για την επιλογή της τεχνικής απορρύπανσης και περιλαμβάνει χημικές αναλύσεις δειγμάτων νερού και αερίων με σκοπό να καθορισθούν οι φυσικοχημικές ιδιότητες των ρυπαντών. Για σοβαρά επεισόδια ρύπανσης η παρακολούθηση διαρκεί για αρκετό καιρό (3 δεκαετίες) μετά την ολοκλήρωση των εργασιών απορρύπανσης.

Η απλούστερη και μη δαπανηρή “λύση” είναι η μηδενική λύση. Κατ’ αυτήν δεν αναλαμβάνονται δράσεις και μέτρα για την απορρύπανση, αλλά η εξασθένηση ή εξαφάνιση των ρύπων επαφίεται στους φυσικούς μηχανισμούς, όπως η προσρόφηση στην επιφάνεια των αργιλικών ορυκτών, η βιολογική αποδόμηση, η αραίωση κ.λπ. (βλ. παράγραφο 5.9). Επειδή όμως οι μηχανισμοί φυσικής απορρύπανσης δρουν σχετικά αργά, δεν συνιστάται η μέθοδος της μηδενικής λύσης.

Η εκσκαφή και απομάκρυνση του εδάφους μαζί με τον ρύπο είναι αποτελεσματική μέθοδος, αλλά απαιτεί μεγάλο κόστος και επιπλέον τίθεται πρόβλημα με την εξεύρεση κατάλληλης θέσης για την απόθεση του ρυπασμένου εδάφους.

Γενικά οι υγροί ρυπαντές που είναι ελαφρύτεροι από το νερό και δεν αναμειγνύονται με αυτό (LNAPLs, Light Non-Aqueous Phase Liquids) απομακρύνονται σχετικά εύκολα. Αντίθετα οι υγροί ρυπαντές που είναι βαρύτεροι από το νερό και συνεπώς καταβυθίζονται χωρίς να αναμειγνύονται (DNAPLs, Dense Non-Aqueous Phase Liquids) είναι δυσχερείς. Τέτοιοι ρυπαντές είναι τα βαριά πετρελαιοειδή, οι χλωριομένοι διαλύτες, εντομοκτόνα κ.ά.

Πρέπει να τονισθεί ότι η πρόληψη της ρύπανσης αποτελεί την αποτελεσματικότερη και οικονομικότερη μέθοδο αντιμετώπισης της ρύπανσης. Επίσης επιβάλλεται η λήψη άμεσων μέτρων από τη διαπίστωση της ρύπανσης πριν προκληθούν ανεπανόρθωτες βλάβες στους υπόγειους υδροφορείς.

Η εξάπλωση της ρύπανσης εξαρτάται από τα υδραυλικά χαρακτηριστικά (πορώδες, συντελεστής υδροπερατότητας), την παρουσία μικροοργανισμών, την παρουσία αργιλικών φακών κ.λπ.

## 9.2. Μέθοδοι απορρύπανσης

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

Ρυπαντές, όπως έχει προαναφερθεί είναι: υδρογονάνθρακες, αλκοόλες, υγρά καύσιμα, εστέρες, αιθέρες, νιτροαρωματικές ενώσεις, αλογονωμένες αρωματικές και αλιφατικές ενώσεις, μέταλλα (Cr, Ni, Cd, Zn, Pb, Hg).

Οι κυριότερες μέθοδοι απορρύπανσης είναι οι κάτωθι (Χριστούλας, 1991, Charbeneau et al., 1992, Καββαδάς, 1996, Καλλέργης, 2000, Αντωνόπουλος, 2001):

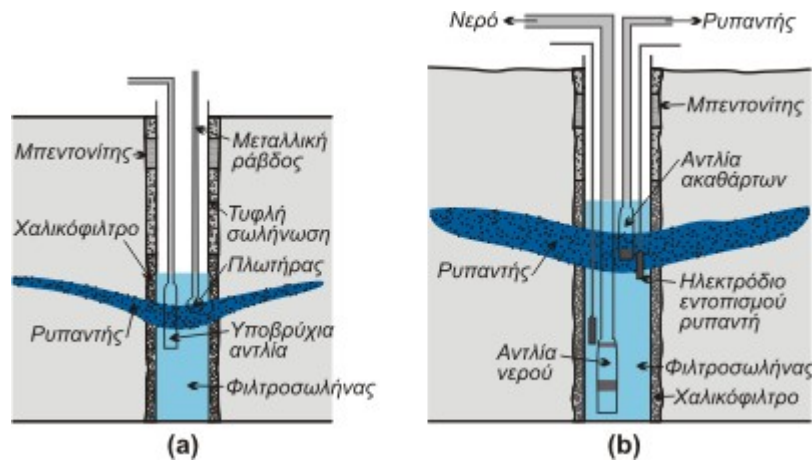
### **1. Η μέθοδος άντλησης και απορρύπανσης διαλυμένων ρυπαντών (*pump and treat*)**

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. 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 (Σχ. 9.1). Η πλέον αποτελεσματική διάταξη είναι αυτή στην οποία υπάρχουν δύο γεωτρήσεις άντλησης και μία γεώτρηση έκχυσης στο μέσο των δύο πρώτων, όλες σε ευθεία γραμμή (κεντροαξονική διάταξη).

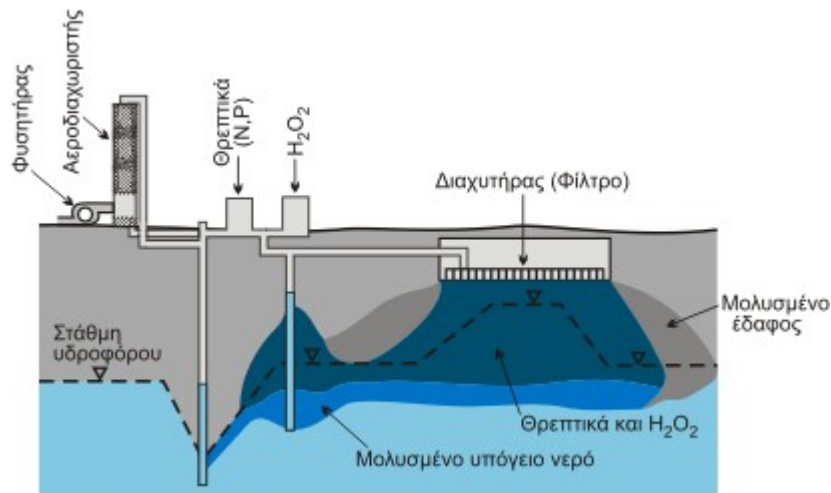
Η επεξεργασία του αντλούμενου ρυπασμένου νερού μπορεί να γίνει με προσρόφηση από ενεργό άνθρακα.



**Σχήμα 9.1:** Συστήματα “άντλησης-επεξεργασίας” για την ανάκτηση NAPL: (a) Απλή γεώτρηση, μία αντλία, (b) απλή γεώτρηση, ζεύγος αντλιών (Domenico-Schwartz, 1998 με τροποποιήσεις).

### 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 (Σχ. 9.2). Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μεταφορά της ρύπανσης στην ατμόσφαιρα.



**Σχήμα 9.2:** Μέθοδος βιοαποκατάστασης με αεροδιαχωρισμό (Καλλέργης 2000, με τροποποιήσεις).

### 3. Αεροδιασπορά (air sparging).

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

#### **4. Η βιολογική αποκατάσταση (bio-remediation)**

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 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$ , νιτρικά και θειϊκά άλατα). Για να γίνει αερόβια αποσύνθεση διαβιβάζεται αέρας, μέσω βαθιών γεωτρήσεων. Η μέθοδος έχει μικρό κόστος και για να είναι πιο αποτελεσματική χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους απορρύπανσης.

Στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται η τεχνητή δημιουργία συνθηκών που θα εξασφαλίσουν τα απαραίτητα υλικά για τροφή και παροχή ενέργειας στους μικροοργανισμούς (μηχανική βιοαποκατάσταση-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.

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

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 κατάπτωσης. Ο ρυπαντής λόγω υδραυλικής κλίσης κινείται προς τη γεώτρηση, απ' όπου γίνεται άντλησή του με δεύτερη

αντλία (Σχ. 9.2). Η πτώση της στάθμης πρέπει να γίνεται με τρόπο ώστε να μην ρυπανθεί ο υδροφόρος σε όλο το πάχος του.

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

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

Στον Πίνακα 9.1 παρουσιάζονται οι κυριότερες μέθοδοι και τεχνικές απορρόπησης των υδροφόρων και του εδάφους.

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. 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.

##### **- 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 αραιώση των ρύπων. Οι υδραυλικοί φραγμοί δημιουργούνται με τον συνδυασμό γεωτρήσεων άντλησης και εμπλουτισμού.

##### **- 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 (Καββαδάς, 1996):

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

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

**Πίν. 9.1:** Κυριότερες μέθοδοι και τεχνικές απορρύπανσης των υδροφόρων και του εδάφους (Καλλέργης, 2000).

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"> <li>- Ελαχιστοποίηση ή πρόληψη της ρύπανσης των υδροφόρων.</li> <li>- Μείωση του όγκου του ρυπαντή ή εξουδετέρωση του φυσικού ή χημικού του χαρακτήρα.</li> </ul>
2	Συστήματα υδρογεωτρήσεων: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Συστοιχίες ρηχών γεωτρήσεων</li> <li>- Βαθιές γεωτρήσεις</li> <li>- Υδραυλικός φραγμός</li> <li>- Σύνθετα συστήματα</li> <li>- Συστήματα αφαίρεσης μη αντιδρώντων ρυπαντών (υδρογονάνθρακες).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Έλεγχος της υδραυλικής κλίσης και μέσω αυτής της υπόγειας ροής με άντληση ή έκχυση νερού.</li> <li>- Απόληψη του μολυσμένου νερού ή/και του επιπλέοντος ρυπαντή (υδρογονάνθρακες).</li> </ul>
3	Συστήματα σύλληψης (interception systems): <ul style="list-style-type: none"> <li>- Στραγγιστήρια (συλλεκτήρια συστήματα στραγγιδίων-στραγγιστήρια εκτόνωσης)</li> <li>- Τάφρος συλλογής με άντληση ή με βαρυτική ροή.</li> </ul>	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"> <li>- πασσαλοσανίδες</li> <li>- κουρτίνες στεγανοποίησης</li> <li>- διαφράγματα από υδαρές υλικό.</li> </ul>	Διοχέτευση υλικού μικρής υδροπερατότητας στο υπέδαφος, όπως πασσαλοσανίδες (άμεση στεγανοποίηση), τσιμεντενέσεις, διοχέτευση ενέματος σε πηγάδια ή τάφρους (απαιτείται περίοδος στερεοποίησης).
6	Επιτόπια επεξεργασία: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Χημική</li> <li>- Βιολογική</li> </ul>	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:

**- Μέθοδοι βιολογικής απορρύπανσης**

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

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

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

Η βιολογική επεξεργασία μπορεί να διευκολυνθεί με αερισμό της ακόρεστης ζώνης (βιοαερισμός).

#### **- Θερμική επεξεργασία του εδάφους**

Η επεξεργασία γίνεται σε κλιβάνους ή με διοχέτευση υπέρθερμου ατμού στο έδαφος (steam stripping) για την εξάτμιση των πτητικών ρυπαντών.

Η αφαίρεση των πτητικών ουσιών από το έδαφος μπορεί να επιτευχθεί και με την ανόρυξη γεωτρήσεων εκτόνωσης, αλλά στην περίπτωση αυτή ρυπαίνεται η ατμόσφαιρα.

#### **- Χημική επεξεργασία**

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

#### **- Εφαρμογή υπό πίεση αέρα (vacuum extraction)**

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

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

#### **- Έπλυση του εδάφους**

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

#### **- Εκσκαφή του εδάφους**

Το ρυπασμένο έδαφος αφαιρείται και μεταφέρεται σε άλλη περιοχή για απόθεση ή ενταφιασμό μετά από επεξεργασία. Η επεξεργασία του ρυπασμένου εδάφους μπορεί να γίνει και επιτόπου 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.

### - Εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

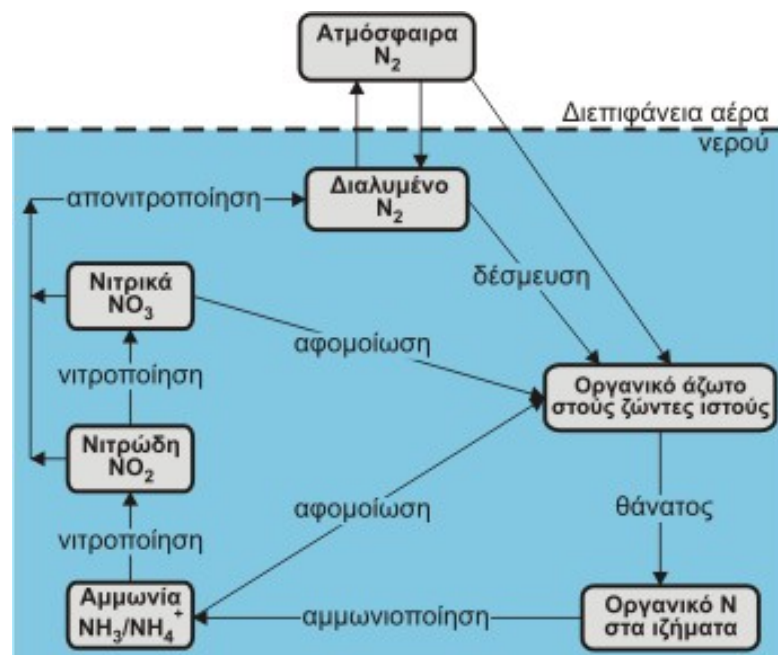
Για την εξαέρωση πτητικών υδρογονανθράκων εφαρμόζεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υψηλής συχνότητας. Η εξαέρωση επιτυγχάνεται από τη θέρμανση του εδάφους σε θερμοκρασίες 150 °C για χρονικό διάστημα δύο εβδομάδων.

### 9.3. 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 υδατικό περιβάλλον. Οι σχέσεις και οι μετασχηματισμοί τους δίνονται στο Σχήμα 9.3.

Τα νιτρικά η πιο οξειδωμένη μορφή του αζώτου και στα υδατικά διαλύματα είναι χημικά ανενεργά. Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών, εκφρασμένες σε άζωτο ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) 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.

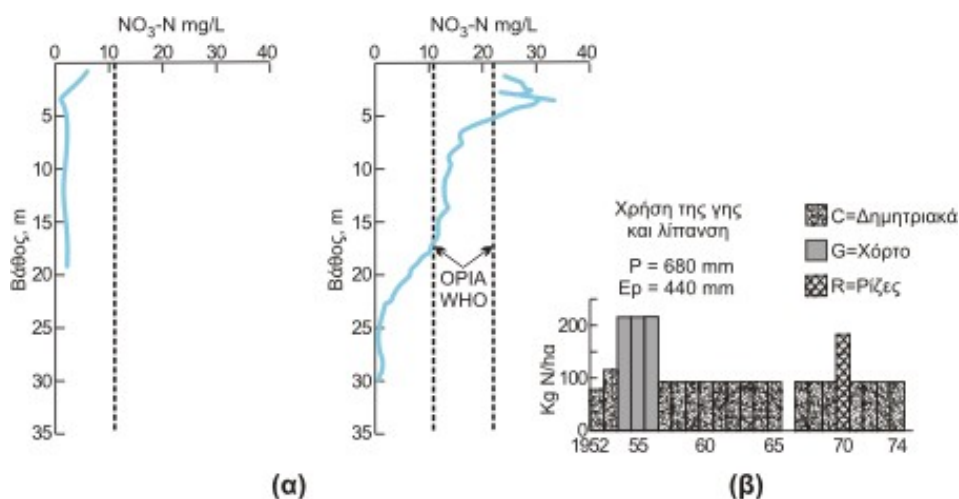
Η νιτρορρύπανση γεωργικής προέλευσης, είναι μια σημαντική αιτία ποιοτικής υποβάθμισης των υπόγειων νερών (Σχ. 9.4). Οι συγκεντρώσεις  $\text{NO}_3^-$  είναι μικρότερες όταν παρεμβάλλεται αργιλικό στρώμα στην ακόρεστη ζώνη και μειώνονται με το βάθος κάτω από τη στάθμη του υπόγειου νερού. Γενικά οι αβαθείς υδροφόροι ορίζοντες ρυπαίνονται από νιτρικά ιόντα σε μεγαλύτερο βαθμό από τους βαθύτερους υδροφόρους.



Σχήμα 9.3: Ο κύκλος του αζώτου στο νερό (Αντωνόπουλος, 2001).



Από το Σχ. 9.4 προκύπτει ότι οι συγκεντρώσεις νιτρικού αζώτου στον αγρό με το γρασίδι χωρίς λίπανση είναι <math>6\text{mg/L}</math>. Αντίθετα, οι συγκεντρώσεις του νιτρικού αζώτου στους αγρούς που λιπαίνονται υπερβαίνουν τα  $10\text{ mg/L}</math>. Η υπερβολική λίπανση μπορεί να προκαλέσει την έκπλυση των νιτρικών στο υπόγειο νερό.$



**Σχήμα 9.4:** Κατανομή νιτρικών στο έδαφος: α) για μεγάλη περίοδο αγρανάπαυσης χωρίς λίπανση και β) με λίπανση μετά από μικρής διάρκειας αγρανάπαυση (Young & Gray, 1978).

Για την αποκατάσταση εφαρμόζονται οι εξής τεχνικές (Καλλέργης, 2000):

#### 1) Φυσική απονίτρωση

Εφαρμόζεται διακοπή της λίπανσης ή μείωση αυτής εφαρμόζοντας τον Κώδικα Ορθής Γεωργικής Πρακτικής (Kariotis et al., 2001). 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 (Σχ. 9.5), σύμφωνα με την ΚΥΑ 19562/1906/99 (ΦΕΚ 1575B/5-8-1999), όπως το Αργολικό πεδίο, η λεκάνη Κωπαΐδας, η λεκάνη του Πηνεϊού 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 κατείσδυση και δίνεται από την σχέση (Yertsever, 1983):

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

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 κατεύθυνση (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 τους Λαμπράκη κ.ά (1998), Voudouris et al. (2004) 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 9.5:** Περιοχές επηρεασμένες από νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης (Daskalali & Voudouris, 2006).

## 2) Ιοντοανταλλαγή

Γίνεται ιοντοανταλλαγή μεταξύ των ιόντων  $\text{NO}_3^-$  και  $\text{Cl}^-$ , 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.

#### Εφαρμογή 9.1

Πόσο χρόνο χρειάζεται ένας υπόγειος υδροφορέας με πάχος  $D=25$  m, πορώδες  $n=10\%$ , κατείδυση  $I=95$  mm/έτος και αρχική συγκέντρωση νιτρικών  $C_0=74$  mg/L για να απορρυθπασθεί;

**Λύση:** Από τον τύπο  $t_r=Dn/I$  υπολογίζω τον χρόνο παραμονής του νερού στον υδροφόρο και ακολουθώντας εφαρμόζω τη σχέση  $t=-t_r/[\ln(C/C_0)]$ , όπου  $C=15$  mg/L (απορρύπανση). Αντικαθιστώντας τα δεδομένα στις ανωτέρω σχέσεις προκύπτει  $t_r=26,3$  και  $t=-t_r/[\ln(C/C_0)]=-26,3 / [\ln(15/74)]=16,4$  έτη.

#### Εφαρμογή 9.2 (από Αντωνόπουλο, 2001)

Να υπολογισθεί ο χρόνος που απαιτείται για τη μεταφορά των νιτρικών ιόντων από το κάτω όριο του ριζοστρώματος μέχρι τη στάθμη του υπόγειου νερού, που βρίσκεται σε βάθος  $D=10$  m. Η περιεχόμενη εδαφική υγρασία είναι  $0,15$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> και η ετήσια παροχή στράγγισης  $0,5$  m/yr.

**Λύση:** Ο όγκος του νερού που περιέχεται στο έδαφος μεταξύ ριζοστρώματος και της υπόγειας στάθμης είναι  $V=0,15$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> ·  $10$  m= $1,5$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. Με βάση την ετήσια παροχή στράγγισης απαιτούνται  $t=1,5$  (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) /  $0,5$  (m/yr)= $3$  yr για να φθάσουν τα νιτρικά στη στάθμη του υπόγειου νερού.  
Η ταχύτητα κίνησης των νιτρικών είναι  $v=0,5$  (m/yr) /  $0,15$  (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)= $10/3$  m/yr  
Ο απαιτούμενος χρόνος είναι  $t=10$  m /  $(10/3)$  m/yr=  $3$  yr.

## 9.4. Προστασία συστημάτων επιφανειακού νερού

*Σύστημα επιφανειακού νερού* είναι ένα διακεκριμένο και σημαντικό στοιχείο επιφανειακών υδάτων, όπως μια λίμνη, ένας ταμιευτήρας, ένα ρεύμα, ένας ποταμός ή μια διώρυγα, ένα τμήμα ρεύματος, ποταμού ή διώρυγας, μεταβατικά ύδατα και ένα τμήμα παράκτιων νερών. Μεταβατικά νερά είναι συστήματα επιφανειακών νερών κοντά στο

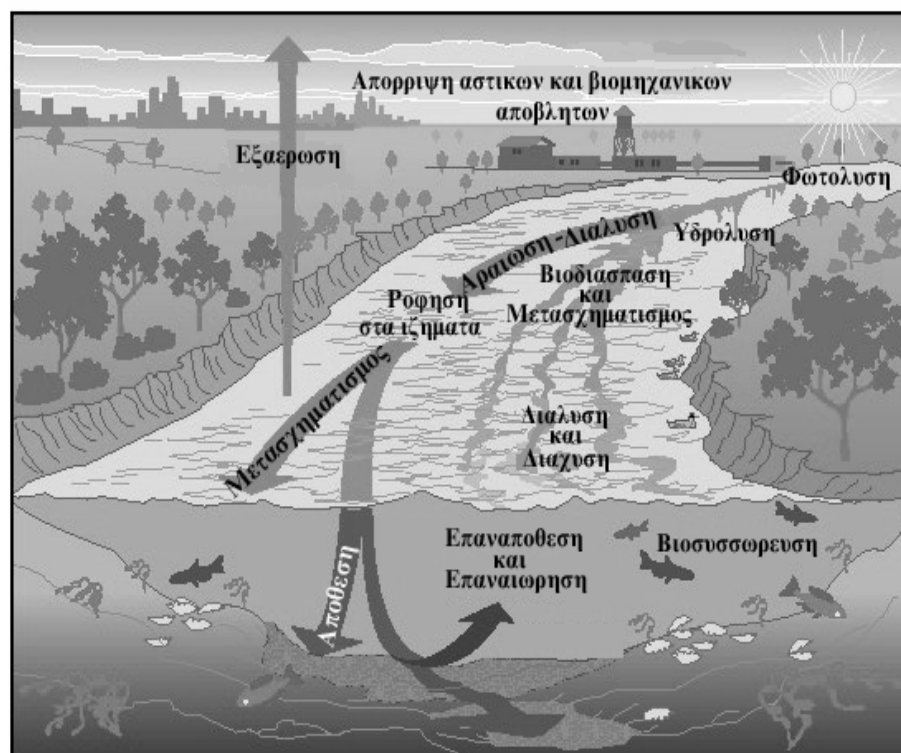
στόμιο ποταμών και τα οποία είναι εν μέρει υφάλμυρα, λόγω της ανάμειξης με παράκτια νερά, αλλά τα οποία επηρεάζονται ουσιαστικά από ρεύματα γλυκού νερού.

Οι κυριότεροι ρυπαντές των επιφανειακών νερών, όπως έχει προαναφερθεί, είναι (Σχ. 9.6): οι παθογόνοι μικροοργανισμοί, οι θρεπτικές ουσίες (φωσφόρος, άζωτο), τα απορρυπαντικά, οι υδρογονάνθρακες, η όξινη βροχή, τα βαρέα μέταλλα και τα τοξικά στοιχεία (Ag, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Se, Zn) και τα αιωρούμενα στερεά.

Τα βαρέα μέταλλα και τα τοξικά στοιχεία προέρχονται τόσο από φυσικές διεργασίες (αποσάθρωση πετρωμάτων), όσο και από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (λύματα, απόβλητα, λιπάσματα, μεταλλεία, κ.ά).

Για την αναγνώριση της ρύπανσης των επιφανειακών νερών και λιμνών (βλ. παράγραφο 5.4) χρησιμοποιούνται επιπλέον διάφοροι δείκτες, όπως: βιοτικοί (biotic index), δείκτες ποικιλότητας και βιολογικοί δείκτες (ψάρια).

Η πρόληψη είναι ο πλέον αποτελεσματικός τρόπος προστασίας των επιφανειακών νερών και του εδάφους. Αν αυτό δεν καταστεί δυνατόν, τότε λαμβάνονται μέτρα περιορισμού της ρύπανσης και απορρύπανσης. Στα προληπτικά μέτρα περιλαμβάνονται μια σειρά από Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέσω των οποίων επιδιώκεται η υγεία των πολιτών, η διατήρηση των υδατικών οικοσυστημάτων και η προστασία του περιβάλλοντος γενικότερα.



Σχήμα 9.6: Κατανομή ρύπων σε υδρόρευμα (www.usgs.gov).

Η αποκατάσταση των συστημάτων επιφανειακού νερού στηρίζεται στον έλεγχο ή διακοπή της πηγής ρύπανσης. Ο έλεγχος του ευτροφισμού στις λίμνες επιτυγχάνεται με τη μείωση του φορτίου των θρεπτικών (φωσφόρου, αζώτου), καθώς και των οργανικών.

Γενικά είναι πιο εύκολη η αντιμετώπιση των σημειακών πηγών ρύπανσης από τις διάχυτες. Η αποκατάσταση λιμνών που έγιναν ευτροφικές πρόσφατα είναι πιο εύκολη και από την αποκατάσταση παλιών ευτροφικών λιμνών (Καλλέργης, 2001).

Η απομάκρυνση των θρεπτικών μπορεί να γίνει με διακοπή των πηγών ρύπανσης ή με καθίζηση στον πυθμένα με τη χρήση ασβέστου ή αλάτων  $Al^{3+}$  ή  $Fe^{3+}$ . Για τη μείωση του αζώτου λαμβάνονται τα εξής μέτρα: μείωση της χρησιμοποιούμενης ποσότητας λιπασμάτων, δημιουργία αναβαθμών για καλλιέργεια, συλλογή του επιστρεφόμενου αρδευτικού νερού και επεξεργασία του πριν τη διάθεση στα υδρορεύματα.

Αυτοκαθαρισμός είναι οι διαδικασίες με τις οποίες ένα ρυπασμένο σώμα νερού επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Περιλαμβάνει τη σταθεροποίηση ή/και την αφαίρεση της ρύπανσης. Ο κυριότερος μηχανισμός αυτοκαθαρισμού είναι η αραίωση και η οξείδωση των βιοδιασπώμενων οργανικών στην υδάτινη φάση με τη βοήθεια αερόβιων μικροοργανισμών.

Μέρος των αιωρούμενων ρύπων απομακρύνεται με προσρόφηση και ιζηματογένεση, ενώ οι πτητικές οργανικές ενώσεις διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα. Οι εισαγόμενοι παθογόνοι μικροοργανισμοί συνήθως πεθαίνουν.

Ο φυσικός εμπλουτισμός του νερού με διαλυμένο οξυγόνο επαναφέρει το σύστημα από την κατάσταση ασφυξίας σε κανονικές συνθήκες, όπως πριν τη ρύπανση.

Η συστηματική παρακολούθηση και καταγραφή (monitoring) της ποιότητας των επιφανειακών νερών είναι απαραίτητη ειδικά σε περιοχές ευάλωτες στη ρύπανση.

Για την προστασία των επιφανειακών συστημάτων νερού επιπλέον απαιτούνται:

- η χωροθέτηση χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων και
- η απαγόρευση διάθεσης ανεπεξέργαστων λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων σε επιφανειακούς αποδέκτες.

## 9.5. Επεξεργασία του νερού

Η Οδηγία 2000/60 της Ε.Ε. για την πολιτική των νερών (άρθρο 7) συνιστά την προστασία των υδατικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πόσιμου νερού, έτσι ώστε να μειωθεί το επίπεδο επεξεργασίας καθαρισμού. Εντούτοις πολλές φορές για λόγους δημόσιας υγείας καθίσταται απαραίτητη η επεξεργασία του νερού.

Η επεξεργασία του πόσιμου νερού αποσκοπεί στην απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών, των μικροοργανισμών και των επιβλαβών ανόργανων και οργανικών ενώσεων.

Οι κυριότερες τεχνικές επεξεργασίας του νερού πριν τη χρησιμοποίησή του περιλαμβάνουν την απολύμανση, τη διήθηση σε φίλτρα άμμου, την προσρόφιση σε ενεργό άνθρακα, την αποσκλήρυνση, την ιοντοανταλλαγή σε ρητίνες ή ζεόλιθους, την αντίστροφη ώσμωση και τη χημική κατεργασία.

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής ή συνδυασμού τεχνικών είναι συνάρτηση της ποιότητας του νερού και της προοριζόμενης χρήσης του. Προφανώς υπεισέρχεται και ο παράγοντας κόστος, αν και σε ότι αφορά τη δημόσια υγεία δεν πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά οι κυριότερες τεχνικές επεξεργασίας του νερού.

**Η απολύμανση** είναι η πλέον απαραίτητη επεξεργασία σε υπόγεια και επιφανειακά νερά που προορίζονται για οικιακή κατανάλωση και έχει ως στόχο την καταστροφή ή αδρανοποίηση των περιεχόμενων παθογόνων μικροοργανισμών (βακτήρια, ιοί, πρωτόζωα). Θεωρείται δηλ. ως μια μορφή αποστείρωσης, η οποία γίνεται μετά τη διύλιση.

Τα κυριότερα απολυμαντικά μέσα είναι το ελεύθερο αέριο χλώριο ( $\text{Cl}_2$ ), τα υποχλωριώδη άλατα (υποχλωριώδες νάτριο και υποχλωριώδες ασβέστιο), το διοξείδιο του χλωρίου, οι χλωραμίνες, το όζον και η υπεριώδης ακτινοβολία.

Η απολυμαντική δράση εξαρτάται από το pH, τη θερμοκρασία, την παρουσία οργανικών ενώσεων και γενικά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού. Σε κάθε περίπτωση δημιουργούνται παραπροϊόντα και αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην επιλογή του μέσου απολύμανσης, ώστε να μην υπάρχουν επιβλαβείς συνέπειες στη δημόσια υγεία και στο περιβάλλον γενικότερα.

Το αέριο χλώριο χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό για την απολύμανση του νερού, γιατί το κόστος είναι χαμηλότερο από τις άλλες μεθόδους απολύμανσης (όζον, υπεριώδης ακτινοβολία, αποστειρωτική διήθηση μέσω μεμβρανών, ραδιενεργός ακτινοβολία κ.λπ.). Η υποβάθμιση των φυσικών ιδιοτήτων του νερού αναφορικά με την οσμή και τη γεύση, καθώς και η τοξικότητα που εμφανίζει το χλώριο σε μεγάλες ποσότητες έχει αποθαρρύνει πολλές ευρωπαϊκές χώρες στη χρήση του για απολύμανση. Με τη χλωρίωση παράγονται πολλά παραπροϊόντα που σχηματίζονται με την οξείδωση των οργανικών, που υπάρχουν στο νερό, από το χλώριο. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα τριαλογομένα παράγωγα του μεθανίου γιατί σχηματίζονται σε μεγαλύτερες ποσότητες και είναι τοξικά (Λέκκας, 1996).

Το χλώριο ανάλογα με τις τιμές του pH υπάρχει ως αέριο ( $\text{pH} < 2$ ), υποχλωριώδες οξύ ( $2 < \text{pH} < 6$ ), υποχλωριώδη ιόντα  $\text{OCl}^-$  ( $\text{pH} > 7,5$ ).

Το χλώριο ως ισχυρά οξειδωτικό αντιδρά με τις διάφορες ενώσεις που υπάρχουν στο νερό πριν αρχίσει η απολυμαντική του δράση καταναλώνοντας κάποια ποσότητα που λέγεται απαιτούμενο χλώριο. Ενεργό χλώριο στο νερό είναι το άθροισμα όλων των ενώσεων του χλωρίου που έχουν απολυμαντική δράση. Υπολειμματικό χλώριο είναι η ποσότητα του ενεργού χλωρίου που βρίσκεται σε μορφή υποχλωριώδους οξέος (HClO) και υποχλωριωδών ιόντων.

Η ποσότητα χλωρίου που απαιτείται για απολύμανση δεν μπορεί να προσδιορισθεί εκ των προτέρων γιατί εξαρτάται από το pH, τη θερμοκρασία και την παρουσία οργανικών ενώσεων στο νερό. Συνήθως η επεξεργασία της απολύμανσης αρχίζει με μια περιεκτικότητα 0,3 mg/L (Martz, 1971).

Το διοξείδιο του χλωρίου (ClO<sub>2</sub>) απολυμαίνει αποτελεσματικά το νερό και είναι ασφαλέστερο για την ανθρώπινη υγεία, αλλά το κόστος είναι 3-4 φορές υψηλότερο (Κατσογιάννης & Κουϊμτζής, 2005).

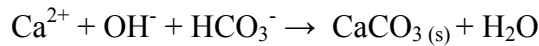
Τελευταία ως απολυμαντικό μέσο χρησιμοποιείται και το όζον (O<sub>3</sub>), το οποίο είναι ισχυρό οξειδωτικό και εκτός από τα βακτήρια και τους ιούς αποσυνθέτει τις χλωριωμένες και φαινολικές ενώσεις που βρίσκονται στο νερό και επιπλέον διασπά τα απορρυπαντικά. Το όζον χρησιμοποιείται κυρίως στην παραγωγή εμφιαλωμένων νερών, γιατί «εξωραΐζει» το νερό, απαλλάσσοντάς το από ανεπιθύμητες οσμές και γεύσεις.

Για την παραγωγή όζοντος με ιονισμό από τον ατμοσφαιρικό αέρα απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια. Η παραγωγή γίνεται στον τόπο χρησιμοποίησης, γιατί πρόκειται για ασταθή ένωση. Από κάθε m<sup>3</sup> ατμοσφαιρικού αέρα παράγονται περίπου 3 g O<sub>3</sub>. Η εισαγωγή όζοντος με τη βοήθεια εκτοξευτήρα υπό πίεση και αντίθετα προς τη φορά ροής γίνεται με ρυθμό 1 g όζον ανά m<sup>3</sup> νερού.

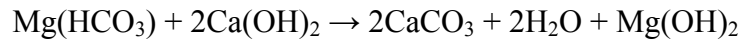
**Η αποσκλήρυνση** (softening) του νερού αποσκοπεί κυρίως στην απομάκρυνση των ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου και συνεπώς στην ελάττωση της σκληρότητας του νερού και γίνεται:

- Με χημικές διαδικασίες (προσθήκη Ca(OH)<sub>2</sub>, NaOH ή Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) για την απομάκρυνση πρώτα της ανθρακικής (παροδικής) και στη συνέχεια της μη ανθρακικής σκληρότητας (μόνιμης).
- Με αντίστροφη ώσμωση, με ηλεκτροδιάλυση ή με περιορισμένη εξάτμιση.
- Με χρήση ιοντοανταλλακτών (ρητίνες ή ζεόλιθοι), οι οποίοι περιέχουν ιόντα νατρίου και τα ανταλλάσσουν με ιόντα ασβεστίου και μαγνησίου.

Η καταβύθιση των ιόντων ασβεστίου και των όξινων ανθρακικών περιγράφεται από την αντίδραση:



Τα ιόντα  $\text{Mg}^{2+}$  απομακρύνονται ως  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  σύμφωνα με την αντίδραση:



Κατά τη διαδικασία της αποσκλήρυνσης παράγεται λάσπη, η διάθεση της οποίας γίνεται σε μη επενδυμένες δεξαμενές, τηρώντας τις περιβαλλοντικές προδιαγραφές.

Η εφαρμογή της **αντίστροφης ώσμωσης** γίνεται κυρίως στην αφάλμυρο ή θαλασσινού νερού για οικιακή χρήση. Η λειτουργία της στηρίζεται στην εφαρμογή πίεσης μεγαλύτερης από την αντίστοιχη ωσμωτική σε ένα υδατικό διάλυμα που περιέχει ανεπιθύμητες ουσίες και βρίσκεται σε επαφή μέσω ημιπερατής μεμβράνης με καθαρό νερό. Στις συνθήκες αυτές, καθαρό νερό από το υδατικό διάλυμα θα περάσει την ημιπερατή μεμβράνη και οι ανεπιθύμητες ουσίες θα απομονωθούν. Μπορεί να επιτευχθεί μείωση μέχρι 90% του T.D.S. και της σκληρότητας του νερού από την εφαρμογή της αντίστροφης ώσμωσης, γεγονός που το καθιστά άγευστο.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου σχετίζονται με τη συντήρηση των μεμβρανών και το κόστος λειτουργίας. Η εφαρμογή της σε συνδυασμό με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η βέλτιστη λύση σε περιοχές όπου υπάρχει έλλειψη πόσιμου νερού.

Η διαδικασία της **ιοντοανταλλαγής**, όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 5.7, χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση από το νερό ανόργανων φορτισμένων ιόντων και αλάτων  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{Mg}^{2+}$  (αποσκλήρυνση).

Σαν ιοντοανταλλάκτες χρησιμοποιούνται φυσικές ή συνθετικές ρητίνες και ζεόλιθος. Οι συνθετικές ρητίνες παρασκευάζονται με κατάλληλες αντιδράσεις πολυμερισμού και είναι γενικά πιο ανθεκτικοί ιοντοανταλλάκτες.

Οι φυσικοί ιοντοανταλλάκτες (ζεόλιθοι) χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων ρύπων, όπως του αμμωνίου. Κάθε ιοντοανταλλάκτης δείχνει συγκεκριμένη προτίμηση στα διαλυμένα ιόντα και χαρακτηρίζεται από μια σειρά εκλεκτικότητας.

Η **προσρόφηση** είναι η διεργασία κατά την οποία μια διαλυμένη ουσία προσροφάται σε μια επιφάνεια.

Η προσρόφηση **σε ενεργό άνθρακα** χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των διαλυμένων οργανικών ρύπων από το νερό.

Ο ενεργός άνθρακας παρασκευάζεται από τη θέρμανση ξύλου ή κάρβουνου σε χαμηλή θερμοκρασία και έλλειψη οξυγόνου και στη συνέχεια έκθεσή του σε οξειδωτική φλόγα υψηλής θερμοκρασίας για σύντομο χρονικό διάστημα (Ζαμπούλης κ.ά, 2003). Χρησιμοποιούνται δύο μορφές: 1) λεπτής σκόνης και 2) κόκκων.



Τα φίλτρα ενεργού άνθρακα συγκρατούν τα αιωρούμενα στερεά και βακτήρια έως 0,5 μm. Επιπλέον δεσμεύουν σε μεγάλο βαθμό το υπολειμματικό χλώριο και τις παράγωγες ενώσεις του, καθώς και επιβλαβείς ουσίες, όπως τα ανεπιθύμητα ιχνοστοιχεία. Έτσι βελτιώνουν την ποιότητα του νερού, χωρίς να μεταβάλλουν τη σύστασή του.

Μειονέκτημα των φίλτρων ενεργού άνθρακα είναι η απόφραξή του και η ανάπτυξη μικροοργανισμών στην επιφάνειά τους, που τα καθιστά επιβλαβή. Η αντιμετώπιση του προβλήματος της απόφραξης γίνεται με επιφανειακό καθαρισμό των κόκκων του με αέρα ή/ και νερό. Στην περίπτωση που οι διαθέσιμες θέσεις προσρόφησης καλυφθούν απαιτείται η αντικατάσταση του ενεργού άνθρακα ή επαναχρησιμοποίησή του αφού πρώτα αναγεννηθεί. Η αναγέννηση του ενεργού άνθρακα γίνεται θερμικά σε υψηλές θερμοκρασίες.

Άλλη μέθοδος απομάκρυνσης των οργανικών ουσιών είναι η οξείδωση με ισχυρά οξειδωτικά μέσα, όπως: O<sub>3</sub>, Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, KMnO<sub>4</sub> και ακτινοβολία U.V.

Η **απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών** γίνεται με καθίζηση, διήθηση από στρώμα άμμου ή από γη διατόμων, καθώς και με τη μέθοδο της θρόμβωσης / κροκίδωσης.

Στην περίπτωση του πόσιμου νερού χρησιμοποιούνται κυρίως φίλτρα άμμου για τη συγκράτηση των αιωρούμενων στερεών, χωρίς βέβαια να βελτιώνουν τα υπόλοιπα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού. Τα φίλτρα άμμου αποτελούνται από στρώματα άμμου καθορισμένης κοκκομετρικής σύστασης. Η απομάκρυνση των στερεών από το αμμόφιλτρο γίνεται με πλύσιμο σε ρεύμα νερού αντίθετης ροής, οπότε οι ρύποι και τα στερεά ξεπλένονται και απομακρύνονται.

Στην περίπτωση τεχνητού εμπλουτισμού μέσω γεωτρήσεων που απαιτείται νερό απαλλαγμένο από αιωρούμενα, χρησιμοποιούνται δεξαμενές καθίζησης, στις οποίες επιτυγχάνεται η καθίζηση με μηχανικές διαδικασίες. Η καθίζηση αυτή δεν είναι βέβαια αρκετή όταν το νερό προορίζεται για ύδρευση, οπότε είναι απαραίτητες οι εγκαταστάσεις διυλίσεως με αμμόφιλτρα και ενεργό άνθρακα.

Σε ατομικό επίπεδο δηλ. στα σπίτια μας, παρόλα τα μέτρα που λαμβάνονται για το νερό ύδρευσης, ενδείκνυται η χρήση φίλτρων νερού για τη συγκράτηση των αιωρούμενων στερεών ή φίλτρων ενεργού άνθρακα για τη συγκράτηση των αιωρούμενων σωματιδίων, των βακτηρίων και των ανεπιθύμητων οργανικών ενώσεων και ιχνοστοιχείων με την προϋπόθεση της τήρησης των προδιαγραφών (συντήρηση, αντικατάσταση κ.λπ.).

Οι μονάδες επεξεργασίας νερού περιλαμβάνουν τις εγκαταστάσεις **χλωρίωσης**, της **κροκίδωσης** (προσθήκη θεικού αργιλίου) για την απομάκρυνση των στερεών

σωματιδίων, της *καθίζησης* και της *διήθησης* μέσω φίλτρων, από τα οποία το νερό καθαρό πλέον, δίνεται στην κατανάλωση.

Η παρουσία του σιδήρου (**Fe**) και μαγγανίου (**Mn**), όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3, εντοπίζεται σε πολλά υπόγεια νερά της χώρας μας.

Μια σημαντική μέθοδος απομάκρυνσης του Fe και Mn από τα υπόγεια νερά αποτελεί η χημική καθίζηση. Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει την οξείδωση των αναγωγικών μορφών των μετάλλων αυτών, δηλ. του  $Fe^{2+}$  και  $Mn^{2+}$ , που αποτελούν διαλυτές μορφές προς τις περισσότερες αδιάλυτες μορφές τους  $Fe^{3+}$  και  $Mn^{4+}$ , δημιουργώντας οξείδια που καθιζάνουν ως ιζήματα.

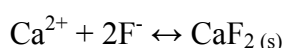
Η οξείδωση και των δύο ανωτέρω μετάλλων γίνεται κυρίως από το υπερμαγγανικό κάλιο, οξυγόνο ή χλώριο. Η οξείδωση του μαγγανίου με οξυγόνο απαιτεί  $pH > 9$  και κατά συνέπεια δεν μπορεί να αφαιρεθεί με απλό αερισμό και καθίζηση από τα φυσικά νερά που έχουν  $pH$  από 6,5-8, αλλά χρειάζεται χημική οξείδωση. Στα επιφανειακά νερά λόγω της παρουσίας οξυγόνου στον ατμοσφαιρικό αέρα τα ιόντα  $Fe^{2+}$  και  $Mn^{2+}$  οξειδώνονται άμεσα. Η οξείδωση με χλώριο πρέπει να αποφεύγεται λόγω της δημιουργίας ανεπιθύμητων παραπροϊόντων.

Έχουν προταθεί επίσης εργαστηριακές μέθοδοι απομάκρυνσης μαγγανίου με τη χρήση τόσο φίλτρων, όσο και με τη δράση οξειδωτικών βακτηρίων. Οι Ellis et al. (2000) εφάρμοσαν τη μέθοδο της οξείδωσης και του φιλτραρίσματος για την απομάκρυνση του σιδήρου και του μαγγανίου από υπόγειο νερό με ικανοποιητικά αποτελέσματα.

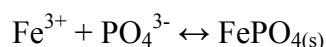
Η προέλευση του αρσενικού (**As**) είναι τα αρσενικούχα πετρώματα, η ηφαιστειακή δράση και οι ανθρώπινες δραστηριότητες (φυτοφάρμακα, βιομηχανικά απόβλητα, μεταλλουργία κ.ά).

Το Αρσενικό, το οποίο έχει ανιχνευθεί σε υπόγεια νερά της Βορείου Ελλάδας (Χαλάστρα, Χαλκιδική) απομακρύνεται με ιζηματοποίηση με προσθήκη  $Fe^{3+}$  ή  $Al^{3+}$ . Πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί μείωση της περιεκτικότητας του αρσενικού από 500  $\mu g/L$  σε 10  $\mu g/L$ , που είναι το όριο ποσιμότητας (ΕΚ 98/83, 3/11/1998), με προσθήκη κροκιδωτικών διαλυμάτων  $Fe^{3+}$  ή  $Al^{3+}$  (Μήτρακας κ.ά, 2002). Πάντως δεν συνιστάται η χρήση του νερού για πόσιμο ακόμα και μετά την επεξεργασία για την απομάκρυνση του αρσενικού, λόγω της τοξικής του δράσης.

Η απομάκρυνση του φθορίου γίνεται με ιζηματοποίηση προσθέτοντας  $Ca(OH)_2$  σύμφωνα με την αντίδραση:



Τα φωσφορικά απαντώνται ως ορθοφωσφορικά, ως μεταφωσφορικά και ως οργανικά φωσφορικά άλατα. Η απομάκρυνση γίνεται προσθέτοντας άλατα του σιδήρου ή του αργιλίου:



Τα φωσφορικά μπορούν να απομακρυνθούν και με τη μέθοδο της προσρόφησης, χρησιμοποιώντας διάφορα προσροφητικά υλικά (Δεληγιάννη κ.ά, 2006).

Το πυρίτιο απομακρύνεται κατά τη διαδικασία της χημικής ιζηματοποίησης του ασβεστίου και του μαγνησίου. Με διεργασίες προσρόφησης-καθίζησης η περιεκτικότητα του πυριτίου μπορεί να ελαττωθεί σημαντικά (<1 mg/L).

Τα θειϊκά απομακρύνονται με ιζηματοποίηση προσθέτοντας  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , απ' όπου προκύπτει γύψος ( $\text{CaSO}_4$ ).

Τα βαρέα μέταλλα ιζηματοποιούνται συνήθως ως υδροξείδια και η αναλυτική περιγραφή των μεθόδων γίνεται σε εξειδικευμένα βιβλία Χημικής Τεχνολογίας.

Τέλος, να σημειωθεί ότι, οι τεχνικές επεξεργασίας του νερού αναπτύχθηκαν και εφαρμόζονται τα τελευταία χρόνια, λόγω της ποιοτικής υποβάθμισης των νερών και η εξέλιξή τους γίνεται με ταχύτατους ρυθμούς.

## Ερωτήσεις

- 9.1. Ποιες είναι οι τεχνικές απορρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων;
- 9.2. Τι είναι η «μηδενική λύση»;
- 9.3. Τι μέτρα χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό της επέκτασης της ρύπανσης σε υπόγειους υδροφορείς;
- 9.4. Πως επιτυγχάνεται η απονίτρωση των υπόγειων υδροφορέων;
- 9.5. Πως επιτυγχάνεται η αποκατάσταση των συστημάτων επιφανειακού νερού;
- 9.6. Ποιες είναι οι τεχνικές απορρύπανσης του εδάφους;
- 9.7. Πως επιτυγχάνεται η αποσκλήρυνση του νερού;
- 9.8. Τι επεξεργασία υφίσταται το νερό ανθρώπινης κατανάλωσης;
- 9.9. Ποια η χρησιμότητα του φυσικού ζεόλιθου;
- 9.10. Πως επιτυγχάνεται η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών από το νερό;

## Ασκήσεις

- 9.1. Ένας υδροφόρος ορίζοντας έχει πάχος 40 m και πορώδες  $n=15\%$ . Ο υδροφόρος δέχεται μέσω της διαδικασίας της κατείσδυσης 95 mm νερού ανά έτος. Χημική ανάλυση της ποιότητας του υπόγειου νερού έδωσε αρχική συγκέντρωση νιτρικών  $C_0=90$  mg/L. Θεωρώντας ότι διακόπτεται η λίπανση, να υπολογισθεί ο χρόνος για να απορρυπανθεί ο υπόγειος αυτός υδροφορέας (συγκέντρωση απορρύπανσης  $C_{NO3}=15$  mg/L).