

ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ*

Γ. Α. ΚΑΛΛΕΡΓΗΣ¹

ΣΥΝΟΨΗ

Η τρωτότητα, απέναντι σε εξωτερική ρύπανση, αξιολογείται με βάση λιθοφασικά, υδρογεωλογικά και γεωχημικά κριτήρια καθώς και με τεχνικές GIS. Όταν η ρύπανση δεν μπορεί να προληφθεί, επιβάλλεται ο περιορισμός της, με δημιουργία φραγμών, σε συνδυασμό με απομάκρυνση του ρυπασμένου νερού, ενώ ακολουθεί η απορρύπανση. Προς τούτο, ανάλογα με τη μορφή της πηγής και το είδος της ρύπανσης, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές, οι οποίες παρατίθενται στη παρούσα εργασία. Από τις τεχνικές αυτές η πιο αποτελεσματική, για την απορρύπανση της κορεσμένης ζώνης, είναι ο συνδυασμός άντλησης - επεξεργασίας.

ABSTRACT

The vulnerability of aquifers against external pollution, is estimated with the use of lithofasic, hydrologic and geochemical criteria and GIS technics. When pollution prevention is not feasible, its control should include containment measures against farther spread of pollutants such as installation of physical and hydraulic barriers in combination with extraction of polluted water. Based on the nature and the source of the pollution, several technics have been developed, which are discussed in the present paper. The most efficient for clean up of the saturated zone is the pump and treat technic.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: ρύπανση, υδροφόροι, τρωτότητα, έλεγχος ρύπανσης, νιτρορρύπανση απορρύπανση

1. ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ

Στον Πίνακα Ι συνοψίζονται οι πιο πιθανές πηγές ρύπανσης των υδροφόρων.

Πίνακας 1. Οι πιο πιθανές πηγές ρύπανσης των υδροφόρων.

Πηγή	Πιθανός ρύπος
Εκχύσεις στο περιβάλλον από ατυχήματα	Ανόργανες και οργανικές χημικές ενώσεις
Όξινη βροχή	Οξειδία του θείου (SO _x) και αζώτου (NO _x)
Αγροτικές δραστηριότητες	Λιπάσματα, παρασιτοκτόνα, ζιζανιοκτόνα απολυμαντικά με υποκαπνισμό
Εκτροφή ζώων	Οργανικές ύλες, άζωτο, φώσφορος
Αποπαγοποίηση οδών	Χλωριούχα, νάτριο, ασβέστιο
Εκχυσή αποβλήτων σε βαθιές γεωτρήσεις	Ανόργανες και οργανικές ενώσεις, ραδιενεργά υλικά
Θέσεις διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων	βαρέα μέταλλα, απορρυπαντικά, καθαριστικά υγρά
Βιομηχανικοί σκουπιδοτόποι	Οργανικές και ανόργανες ενώσεις
ΧΥΤΑ αστικών απορριμμάτων	Βαρέα μέταλλα, αέρια, οργανικές ενώσεις, ανόργανες ενώσεις (ασβεστίου, χλωριούχες, νατρίου)
Επιφανειακή διάθεση υγρών και ημιστερεών βιομηχανικών αποβλήτων	Οργανικές και ανόργανες, ενώσεις, βαρέα μέταλλα, μικροβιολογικοί ρύποι
Επιφανειακή διάθεση λιμάτων και ιλύος	Οργανικές και ανόργανες ενώσεις, βαρέα μέταλλα μικροβιολογικοί ρύποι κ.λ.π.
Μεταλλευτικές δραστηριότητες	Ορυκτές ενώσεις, όξινα απόβλητα
Βροχόπτωση	Χλωριόντα, θειικά, οργανικές ενώσεις κλπ.
Διείδυση της θάλασσας (παράκτιοι υδροφόροι)	Ανόργανα άλατα
Σηπτικοί βόθροι, πεδία ή στρώματα στραγγίσης	Οργανικές ύλες, άζωτο, φώσφορος, βακτήρια κλπ.
Υπόγεια αποθήκευση	Οργανικά διαλυτικά, ενώσεις απομάκρυνσης - διάλυσης λιπαντικών, προϊόντα πετρελαίου κλπ.

* POLLUTION CONTROL AND CLEAN UP TECHNIQS OF CONTAMINATED AQUIFERS.

¹ Παν/μιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας, Ρίο 26110 Πάτρα, E-Mail: kallergisg@hol.gr

2. ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΑΠΕΝΑΝΤΙ ΣΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

Τρωτότητα είναι «η τάση ή το ενδεχόμενο ένας ρύπος, μετά την εισαγωγή του σε κάποια περιοχή πάνω από τον πιο ρηχό υδροφόρο, να φτάσει σε δοσμένη θέση στο υδροφόρο σύστημα». Αυτονόητο είναι ότι με αυτόν τον ορισμό, η τρωτότητα των υπόγειων νερών αναφέρεται στη ρύπανσή τους από «μη σημειακές πηγές» ή χωρικά κατανεμημένες σημειακές πηγές ρύπανσης (π.χ. συστήματα σηπτικών βόθρων) και δεν περιλαμβάνει οποιαδήποτε μεμονωμένη σημειακή πηγή ρύπανσης (π.χ. χωματερές, υπόγειες αποθήκες υγρών καυσίμων) ή οποιαδήποτε περίπτωση εκούσιας εισαγωγής ρύπου στο υδροφόρο σύστημα (π.χ. τεχνητός εμπλουτισμός υδροφόρων) ή ακόμη είσοδο ρύπου όχι επιφανειακός, αλλά υπογείως (π.χ. υπαλμύριση λόγω υπεράντλησης ή κινητοποίηση ιχνοστοιχείων που βρίσκονται στα ορυκτολογικά συστατικά των πετρωμάτων).

Εξαιρετικά ανθεκτικοί (π.χ. τα παρασιτοκτόνα) ή ευκίνητοι (π.χ. νιτρικά) ρύποι μπορεί να φθάσουν στον υδροφόρο, ακόμα και μετά παρέλευση δεκαετιών.

Η αξιολόγηση της «τρωτότητας», δηλαδή μιας μη μετρήσιμης έννοιας, που απλώς εκφράζει την πιθανότητα να λάβει χώρα ρύπανση, αποτελεί πρακτικά μια πρόγνωση, όπως π.χ. η πρόγνωση του καιρού, αλλά που αφορά διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στο υπέδαφος και σε πολύ μεγαλύτερη χρονική κλίμακα. Οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές αξιολόγησης της τρωτότητας ανήκουν σε μια από τις πιο κάτω τρεις κατηγορίες:

- α) Μαθηματικά μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούν εξισώσεις που προσεγγίζουν τη συμπεριφορά των ρύπων στο υπόγειο περιβάλλον.
- β) Τεχνική των σταθμισμένων δεικτών ή αριθμητικών βαθμολογήσεων (weighted index-numerical score), κατά την οποία συνδυάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την «τρωτότητα».
- γ) Στατιστικές μέθοδοι, με τις οποίες συγκρίνονται οι εξεταζόμενες περιπτώσεις, με περιοχές στις οποίες έχει λάβει χώρα ρύπανση.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η «τρωτότητα» μπορεί να αναφέρεται σε συγκεκριμένο ρύπο ή συγκεκριμένη πηγή ρύπανσης ή τάξη ρύπου («ειδική τρωτότητα»-«specific vulnerability») ή γενικώς χωρίς εξειδίκευση στα χαρακτηριστικά και τη συμπεριφορά συγκεκριμένου ρύπου («ιδιοτρωτότητα»-«intrinsic vulnerability»). Στην πράξη πάντως δεν είναι δυνατός πάντοτε ο σαφής διαχωρισμός των πιο πάνω δύο ειδών «τρωτότητας». Η διάκριση κατά συνέπεια περιοχών σε βαθμούς τρωτότητας είναι και δυσχερής και προσεγγιστική.

Κατά τη χρησιμοποίηση χωρικών μοντέλων, έχει γίνει χρήση δύο απλών δεικτών (Rao et al, 1985): του «παράγοντα επιβράδυνσης» («Retardation Factor») RF και του «παράγοντα απόσβεσης» της ρύπανσης AF («Attenuation Factor»), ως μέτρων του δυναμικού «έκπλυσης» («leaching potential»), σε συνδυασμό με ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (Liang-Khan, 1986).

Ο δείκτης RF είναι ένα μέτρο του σχετικού χρόνου που χρειάζεται μια δόση ρύπου (παρασιτοκτόνο στη συγκεκριμένη περίπτωση) για να φτάσει σε ορισμένο βάθος, σε σύγκριση με μη ροφούμενο ιχνηθέτη, ενώ ο δείκτης AF είναι το κλάσμα της μάζας του πιο πάνω ρύπου, το οποίο πιθανολογείται ότι θα φτάσει στο συγκεκριμένο βάθος. Ο υπολογισμός των δεικτών αυτών μπορεί να γίνει από τις εξισώσεις:

$$AF = \exp - \left[\frac{(0,693dRF\Theta)}{qt} \right] \quad \text{με } 0 \leq AF \leq 1 \quad (1), \text{ όπου:}$$

d = η κατακόρυφη απόσταση που υπολογίζεται να διανυθεί
 q = ο καθαρός ετήσιος εμπλουτισμός του υδροφόρου
 t = ο χρόνος υποδιπλασιασμού του ρύπου ($t = 0,693k$), όπου k = συντελεστής διάσπασης του ρύπου πρώτης τάξης και

$$RF = 1 + \frac{\rho C_s k}{\theta} \quad \text{με } 1 \leq RF \leq \infty \quad (2), \text{ όπου:}$$

ρ = το ειδικό βάρος του εδάφους
 C_s = η περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανικό άνθρακα
 k = συντελεστής ρόφησης του ρύπου (παρασιτοκτόνο)
 θ = κορεσμένο πορώδες.

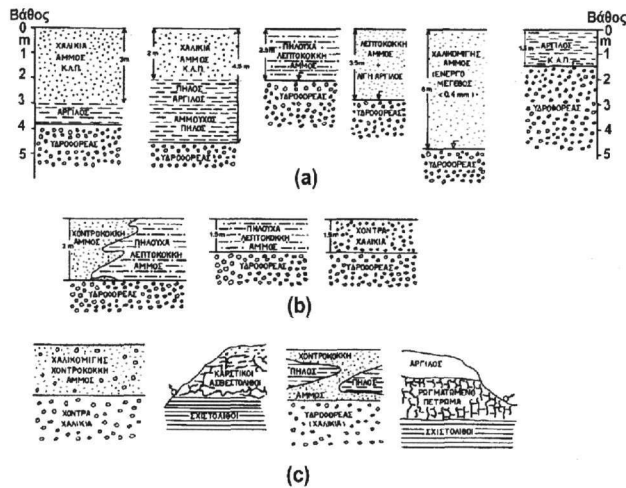
• Τεχνικές αξιολόγησης της τρωτότητας

Εκτός από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των ρύπων, μεγάλη σημασία, αναφορικά με τον κίνδυνο μόλυνσης των υπόγειων νερών, έχει ο τύπος του υδροφόρου (ελεύθερος, αρτεσιανός), το πάχος, η υδροπερατότητα

τα και η κοκκομετρική σύνθεση της ακόρεστης ζώνης και η ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού, ως αποτέλεσμα της υδροπερατότητας του υδροφόρου και του υδραυλικού φορτίου. Η ευαισθησία των υδροφόρων σε εξωτερική ρύπανση καθορίζεται από την ικανότητα **“αυτοκαθαρισμού”** τους, δηλαδή την ικανότητά τους να μην επιτρέπουν σε ρύπους, που προέρχονται από την επιφάνεια, να φθάσουν μέχρι την κορεσμένη ζώνη τους και να τη ρυπάνουν, δημιουργώντας πρακτικά ένα αποτελεσματικό **“φίλτρο”** ή **“φραγμό”** ανάμεσα στην κορεσμένη και την ακόρεστη ζώνη.

♦ **Αξιολόγηση με βάση λιθοφασικά κριτήρια**

Γενικώς η **“τρωτότητα”** των υδροφόρων στη ρύπανση από επιφανειακές πηγές ρύπανσης είναι μικρή, όταν το πάχος της ακόρεστης ζώνης είναι μεγάλο και η ταχύτητα ροής του νερού μικρότερη από 3m/24ωρο. Η ικανότητα αυτοκαθαρισμού των υλικών είναι μεγαλύτερη, όσο μικρότερη είναι η κοκκομετρία και μεγαλύτερη το πάχος του υλικού. Έτσι, **μεγάλη ικανότητα** αυτοκαθαρισμού έχουν τα υλικά με κοκκομετρικό μέγεθος < 2 μ. και μέσο πάχος > 1,5 m, ή μέσο κοκκομετρικό μέγεθος μεταξύ 2 μ. και 0,4 mm και μέσο πάχος > 6 m. (εικ.1.a): **Μέτριες** είναι οι συνθήκες προστασίας (εικ. 1.b), όταν το ενεργό μέγεθος των κόκκων της ακόρεστης ζώνης είναι μικρότερο από 0,4 mm και η ταχύτητα ροής του νερού μικρότερη από 3 m/ημέρα ή ο χρόνος παραμονής του νερού στον υδροφόρο ξεπερνά τις 30 ημέρες.



Εικ. 1. Αξιολόγηση της τρωτότητας υπεδάφους απέναντι σε εξωτερική ρύπανση (Dienemann, 1956, με τροποποιήσεις)

Ανύπαρκτη, τέλος, είναι η προστασία έναντι εξωτερικών πηγών ρύπανσης (εικ.1.c), όταν τα υλικά έχουν ελάχιστη ή καθόλου ικανότητα αυτοκαθαρισμού, δηλαδή, το ενεργό μέγεθος των κόκκων της ακόρεστης ζώνης είναι μεγαλύτερο από 0,4mm και η ταχύτητα ροής του νερού μεγαλύτερη από 3 m/ημέρα ή ο χρόνος παραμονής του υπόγειου νερού στην πιο πάνω περιοχή είναι μικρότερος από 30 ημέρες. Εδώ ανήκουν οι υδροφόροι με δευτερογενείς πορώδες (καρστικοί και μη) και οι υδροφόροι στους οποίους το υλικό, που φτάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους, αποτελείται από χαλκιμογιή χοντροκόκκη ή μόνο χοντροκόκκη άμμο, έστω και αν περιέχει φακούς πηλού ή αργίλου.

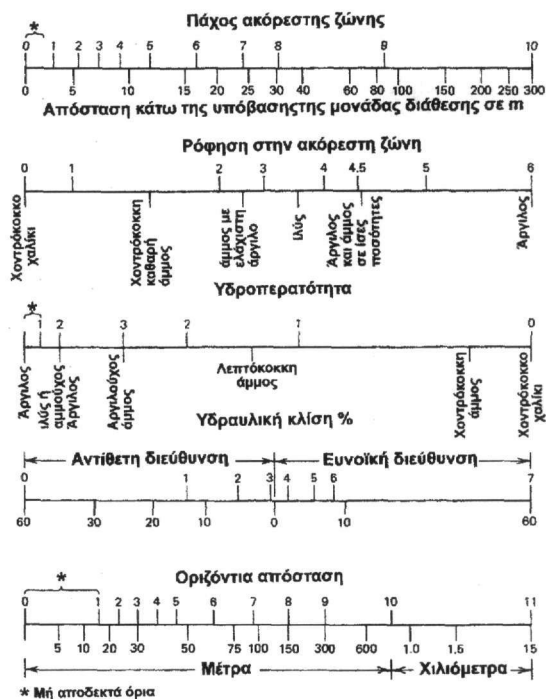
♦ **Αξιολόγηση με βάση υδρογεωλογικά κριτήρια**

O LeGrand, (1964) εισήγαγε την έννοια του δυναμικού ρύπανσης των υδροφόρων, με βάση: το βάθος της κορεσμένης ζώνης, τη προσρόφηση και απορρόφηση στην ακόρεστη ζώνη, την υδροπερατότητα του υδροφόρου, την υδραυλική κλίση της πλειζομετρικής επιφάνειας και την οριζόντια απόσταση από την πηγή ρύπανσης. Σύμφωνα με το διάγραμμα LeGrand (εικ. 2.) και ανάλογα με το σύνολο της βαθμολογίας της κρινόμενης θέσης, (πίνακας II) η τελευταία χαρακτηρίζεται ως πολύ καλά προστατευμένη δηλαδή **πολύ χαμηλής τρωτότητας**, (>12 β.), **μέτριας τρωτότητας**, (8-12 β.), **μεγάλης τρωτότητας**, (4-8 β.) και **πολύ μεγάλης τρωτότητας**, (<4 β.). Αναφορικά δε με την πιθανότητα μόλυνσης του υδροφόρου από εξωτερική πηγή ρύπανσης, σύμφωνα πάντα με το πιο πάνω διάγραμμα, αυτή θα πρέπει να θεωρείται ως **επικείμενη**, (<4 β), **πιθανή-δυνατή**, (4-8

β.), δυνατή αλλά όχι **πιθανή**, (8-12β.) και τέλος **αδύνατη**, (>12 β.)

♦ **Αξιολόγηση με βάση υδρογεωλογικά και γεωχημικά κριτήρια**

Η τεχνική αυτή βασίζεται σε στατιστική μελέτη πολλών περιπτώσεων (LeGrand, 1983) και έχει το πλεονέκτημα ότι λαμβάνονται υπόψη όχι μόνο οι υδρογεωλογικές συνθήκες και η απόσταση από την πηγή ρύπανσης, αλλά και το είδος της τελευταίας. Με τη τεχνική αυτή, είναι δυνατή η σύγκριση της τρωτότητας περισσότερων θέσεων και η επιλογή εκείνης, που δεν αναμένεται να ρυπάνει τον υδροφόρο, λόγω π.χ. διάθεσης αποβλήτων, καθώς επίσης και η επιλογή της βέλτιστης θέσης για την δημιουργία σκουπιδότοπων, επεξεργασίας αποβλήτων και την ανάπτυξη συστημάτων σηπτικών βόθρων. Στην πρόταση αυτή του LeGrand (1983) γίνεται σαφής διαχωρισμός ανάμεσα στην περιγραφή της θέσης, τη βαθμολόγηση και την ταξινόμηση.



Εικ. 2. Διάγραμμα εκτίμησης της τρωτότητας ελεύθερων αλλουβιακών υδροφόρων (LeGrand, 1964.).

♦ **Αξιολόγηση με τεχνικές GIS**

Λαμβανομένου υπόψη, ότι η πιθανότητα να υποστεί ένας υδροφόρος ρύπανση, από εξωτερική πηγή, σε δοσμένη γεωγραφική θέση, εξαρτάται από έναν μεγάλο αριθμό φυσικών και περιβαλλοντικών μεταβλητών, η χρησιμοποίηση του Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών GIS, δηλαδή μιας γεωγραφικής βάσης δεδομένων, αποτελεί μια καλή λύση αξιολόγησης της τρωτότητας μιας θέσης, απέναντι σε εξωτερική ρύπανση (Evans, 1987). Οι φυσικές και περιβαλλοντικές μεταβλητές που ελέγχουν την πιθανότητα ρύπανσης ενός υδροφόρου, είναι η, υδροπερατότητα του εδάφους, το βάθος της κορεσμένης ζώνης, η χρήση γης, η φυτοκάλυψη, η πυκνότητα του συστήματος αποχέτευσης, η μεταβιβασιμότητα του υδροφόρου κ.λπ.

Με τον κατάλληλο χειρισμό και σύνθεση όλων των πληροφοριών, δημιουργείται ένα “μοντέλο πρόγνωσης”, το οποίο δίνει τουλάχιστον μια ποιοτική εκτίμηση της πιθανότητας να δημιουργηθούν δυσμενείς επιπτώσεις στους υδροφόρους, για κάθε εξεταζόμενο τμήμα γης. Η πιο πάνω εκτίμηση (αξιολόγηση) παίρνει τη μορφή ενός αλγόριθμου για κάθε δεδομένο που χρησιμοποιήθηκε.

Μετά την εξαγωγή του “**δείκτη δραστικότητας**” (“drastic index”, από τα αρχικά των λέξεων Depth to water, Net Recharge Per Year, Aquifer Media, Soil Media, Topography, Impact of Vadose Zone Hydraulic Conductivity), από το σταθμισμένο αλγεβρικό άθροισμα των μερικών γινόμενων του αλγόριθμου, κάθε χαρακτηριστικού επί τον αντίστοιχο συντελεστή βαρύτητας, εξάγεται για κάθε εξεταζόμενη περιοχή ή υδρογεω-

λογικό σύστημα, το “δυναμικό ρύπανσης”. Όσο υψηλότερος είναι ο “δείκτης δραστηκότητας”, τόσο υψηλότερο είναι το δυναμικό ρύπανσης του υδροφόρου. Με βάση τις διάφορες τιμές του “δείκτη δραστηκότητας”, είναι δυνατή η κατασκευή ενός ψηφιακού χάρτη, από τον οποίο είναι δυνατός ο εντοπισμός περιοχών μικρότερης ή μεγαλύτερης ευαισθησίας (τρωτότητας) στην ρύπανση των υπόγειων νερών. Ο πιο πάνω χάρτης είναι δηλαδή ένας χάρτης ρυπαντικής επικινδυνότητας (hazard assessment map) της υδρογεωλογικής λεκάνης ενός υδροφόρου συστήματος.

- **Χάρτες τρωτότητας των υδροφόρων.**

Οι “χάρτες τρωτότητας” (“vulnerability maps”) των υδροφόρων, διαφέρουν από τους υδρογεωλογικούς χάρτες, από το γεγονός ότι δεν παρουσιάζουν τα υδρογεωλογικά στοιχεία των υδροφόρων συστημάτων, αλλά τα ειδικά χαρακτηριστικά αυτών των στοιχείων, σε σχέση με την τρωτότητα του υπόγειου νερού. Ο τελικός στόχος ενός τέτοιου χάρτη είναι ο διαχωρισμός μιας περιοχής σε πολλές μονάδες, ώστε να καταδειχτεί το διαφορετικό δυναμικό ρυπαντικής επιδεκτικότητας της κάθε μονάδας. Οι χάρτες τρωτότητας είναι εξαρτημένοι από το χρόνο και γι’ αυτό χρειάζονται συνεχείς αναβαθμίσεις και επικαιροποιήσεις, ώστε να προσαρμόζονται στις εκάστοτε μεταβολές του υδροφόρου συστήματος, αλλά και των ανθρώπινων παρεμβάσεων. Χάρτες τρωτότητας κατασκευάζονται κυρίως, αλλά όχι αποκλειστικά, με τη χρησιμοποίηση των διαφόρων παραμέτρων DRASTIC.

Πρακτικά ένας χάρτης τρωτότητας είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίθεσης πολλών επιμέρους χαρτών, που αποτελούν τα στρώματα (layers). Οι χάρτες τρωτότητας θα μπορούσαν να καταταγούν στους περιβαλλοντικούς χάρτες υπό την ευρύτερη έννοιά τους. Οι κλίμακες των χαρτών ποικίλουν ανάλογα με τη χρήση τους και κυμαίνονται από 1:5.000 μέχρι 1:1.000.000 (σπανιότερα και μέχρι 1:10.000.000).

3. ΝΙΤΡΟΡΥΠΑΝΣΗ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ

Έχει εκτιμηθεί, ότι, ανάλογα με το ύψος των ατμοσφαιρικών κατάκρημισμάτων και με την παραδοχή ότι η απονίτρωση χαμηλότερα από τη ζώνη ανάπτυξης του ριζικού συστήματος είναι μηδενική, συγκέντρωση στο υπόγειο νερό $\text{NO}_3\text{-N}$ 50 mg/l, που είναι και το όριο ποσιμότητας του νερού, αντιστοιχεί σε ποσότητα αζώτου που εφαρμόζεται κατά τη λίπανση ως εξής (Archer, 1992):

- Με ύψος βροχής 150 mm 17 kg N / εκτάριο
- Με ύψος βροχής 250 mm 28 kg N / εκτάριο
- Με ύψος βροχής 350 mm 40 kg N / εκτάριο.

Πρακτικώς, τα πιο πάνω ύψη ατμοσφαιρικών κατακρημισμάτων, αντιστοιχούν στο πλεόνασμα των χειμερινών βροχοπτώσεων, μετά την εξάτμιση και την κατακράτηση κομποστέγης.

Η γεωργία αποτελεί την κύρια πηγή της νιτρορρύπανσης των νερών, δοθέντος ότι εκτιμάται ότι το 60% του συνολικού αζώτου «μεταναστεύει» με τον ένα ή τον άλλο τρόπο στο νερό, ενώ σημαντική πηγή νιτρορρύπανσης αποτελούν και τα αστικά λύματα.

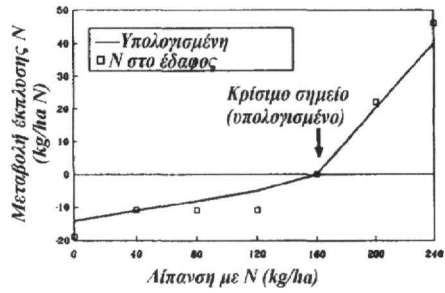
- ♦ **Μέθοδοι υπολογισμού της έκπλυσης του αζώτου**

Η ποσότητα των νιτρικών που κατεισδύει προς την ακόρεστη και εκείθεν προς την κορεσμένη ζώνη μπορεί να υπολογιστεί με τις εξής μεθόδους:

- **“Λυσιμέτρα”** συνήθως του τύπου “μονομπλόκ”. Το όριο ανίχνευσης είναι ≤ 1 mg/l N. Συνιστώνται σε αμμώδη εδάφη με ελεύθερη απορροή. Αντίθετα, δεν αποδίδουν καλά στα αργιλούχα, λόγω των ρωγμών που σχηματίζονται σε αυτά.
- **“Κεραμικά δοχεία”** (“ceramic cup”). Είναι η πιο φτηνή μέθοδος. Πρόκειται για διάτρητα, κοίλα κεραμικά δοχεία που θάβονται σε οποιοδήποτε βάθος στο έδαφος και συνδέονται με την επιφάνεια με σωληνίσκο με τη βοήθεια του οποίου δημιουργείται υποπίεση στο εσωτερικό του δοχείου. Έτσι το υπεδάφιο νερό ρέει προς το δοχείο και από εκεί στην επιφάνεια όπου και αναλύεται. Το όριο ανίχνευσης είναι της τάξης του 1 mg/l N. Δεν συνιστάται η μέθοδος προς χρήση στους μανδύες αποσάθρωσης των ανθρακικών πετρωμάτων. Το βάθος τοποθέτησης περιορίζεται στα 65-70 cm.
- **Δειγματοληψία εδάφους**. Το όριο ανίχνευσης είναι φτωχό (> 10 mg/l). Η εξαγωγή των $\text{NO}_3\text{-N}$ και $\text{NH}_4\text{-N}$ γίνεται συνήθως με χρησιμοποίηση 2M KCl ή 0,5M K_2SO_4 .
- **Συστήματα στράγγισης μεγάλης κλίμακας**. Συνιστώνται προς χρήση στα αργιλικά εδάφη. Τοποθετούνται στραγγιστήρια (ορύγματα πληρωμένα με χαλίκια) ή πλαστικά διαφράγματα, σε βάθος 1-2 m. Είναι η ακριβέστερη αλλά και η ακριβότερη μέθοδος.



Εικ.3. Πρόσληψη αζώτου, ανάλογα με το χρόνο σποράς (Lord, 1992).

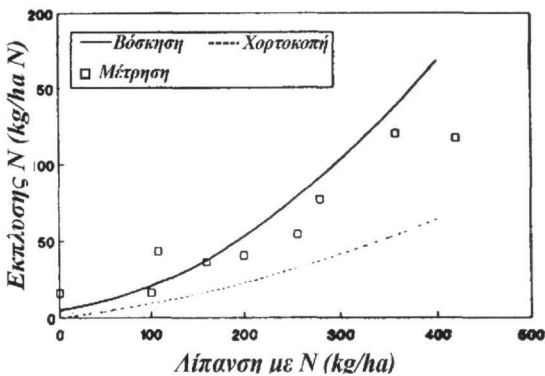


Εικ.4. Επίδραση της λίπανσης, με αζωτούχα λιπάσματα, κατά το φθινόπωρο, στον υπολογισμό του «δυναμικού έκπλυσης» (Lord, 1992).

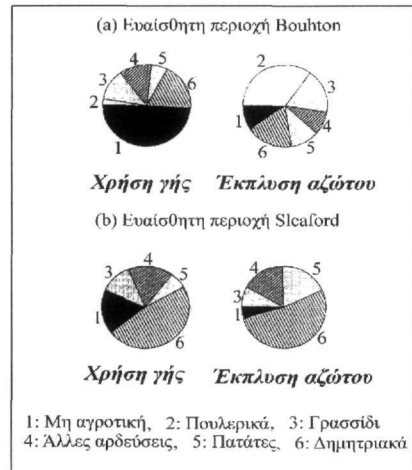
♦ Παράγοντες που επηρεάζουν την έκπλυση του N που περιέχεται στα λιπάσματα

Η έκπλυση του N, από τα λιπάσματα που, χρησιμοποιούνται για τη λίπανση των καλλιεργειών, είναι συνάρτηση: (i) της περιόδου εφαρμογής της λίπανσης (εικ.3. και 4.), (ii) του είδους της φυτοκάλυψης ή φυτοκαλλιέργειας και της διαχείρισής τους (εικ.5.), (iii) της χρήσης γης (εικ.6.), (iv) της απορροής (εικ.7.), (v) του πορώδους και της υδροπερατότητας του εδάφους (εικ.8.), (vi) της μεθόδου λίπανσης, και της ποσότητας του λιπάσματος που χρησιμοποιείται κατά τη λίπανση (εικ. 4. και 5.) και (vii) της μεθόδου άρδευσης και της ποσότητας του νερού που χρησιμοποιείται στην άρδευση. **Το άζωτο από την έκπλυση των λιπασμάτων εισδύει σε μεγαλύτερο βάθος το φθινόπωρο και την άνοιξη.**

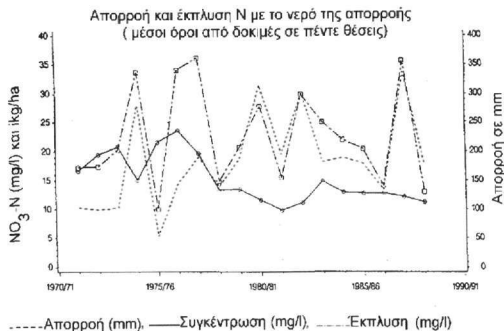
Η ποσότητα του αζώτου έκπλυσης είναι ανάλογη προς την ποσότητα του αζώτου που εφαρμόζεται (εικ. 4.). Έχει αναφερθεί, ότι όταν χρησιμοποιούνται <175 kg N/ha. Η συγκέντρωση αζώτου στο έδαφος σε βάθος περίπου 1,2 m κυμαίνεται από 1 μέχρι 9 mg/l και όταν η ποσότητα που χρησιμοποιείται είναι >175 kgN/ha. Η συγκέντρωση σε βάθος 3 m ανέρχεται σε 6-9 mg/l. Ο χρόνος εφαρμογής της λίπανσης παίζει μεγάλο ρόλο στο ρυθμό της έκπλυσης αζώτου. Θα πρέπει η λίπανση να εφαρμόζεται κατά την ανάπτυξη, ώστε να μεγιστοποιείται η χρήση του αζώτου από τα φυτά και να ελαχιστοποιείται η έκπλυση αζώτου.



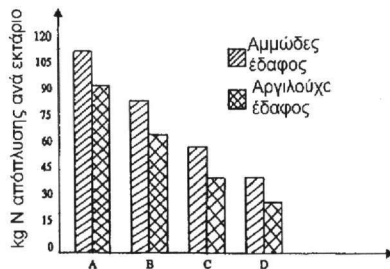
Εικ.5. Επίδραση της διαχείρισης του γρασιδιού και της λίπανσης, στο βαθμό έκπλυσης των υπολειμματικών, στο έδαφος, λιπασμάτων (Lord, 1992).



Εικ.6. Επίδραση των χρήσεων γης στην έκπλυση υπολειμματικών αζωτούχων λιπασμάτων (Lord, 1992).



Εικ.7. Μέση ετήσια συγκέντρωση νιτρικών, σε mg/l, στο νερό που απορρέει, σε σχέση με το ύψος της απορροής, σε mm και την έκπλυση αζώτου, σε kg/ha, από το νερό της απορροής (Simmelsgaard, 1991).



Εικ.8. Έκπλυση αζώτου κατά την αμιψιοπορία: Α: χρήση κοπριάς κατά το φθινόπωρο, Β: χρήση κοπριάς κατά το ήμισυ της άνοιξης και το ήμισυ του φθινοπώρου, C: χρήση κοπριάς κατά την άνοιξη και D: χρήση λιπασμάτων την άνοιξη (Mikkelsen, 1992).

Έχει παρατηρηθεί, ότι με την αλλαγή του χρόνου λίπανσης, σε αμμώχα εδάφη, με τη χρήση κοπριάς, από το φθινόπωρο στην άνοιξη, μειώθηκε η έκπλυση αζώτου από 110 kg/ha, σε 60 kg/ha

♦ **Μετασηματισμός του αζώτου στο έδαφος**

Ανάλογα με την πηγή, το άζωτο εισέρχεται στο υπέδαφος είτε ως οργανικό είτε ως ανόργανο. Το οργανικό άζωτο προέρχεται από ενώσεις, όπως τα αμινοξέα, οι αμίνες, οι πρωτεΐνες και οι χημικές ενώσεις. Το ανόργανο άζωτο προέρχεται από το αμμώνιο, τα νιτρικά και τα νιτρικά. Το άζωτο από τα λιπάσματα είναι ανόργανης μορφής συνήθως (NH_4^+ , NO_3^-).

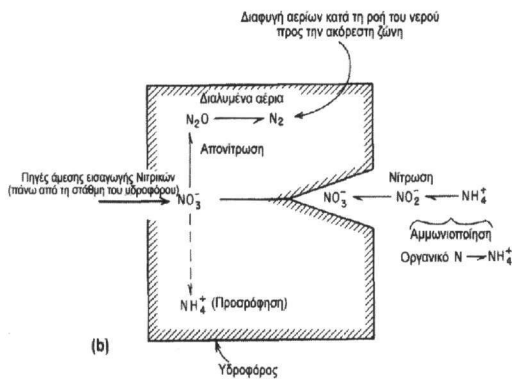
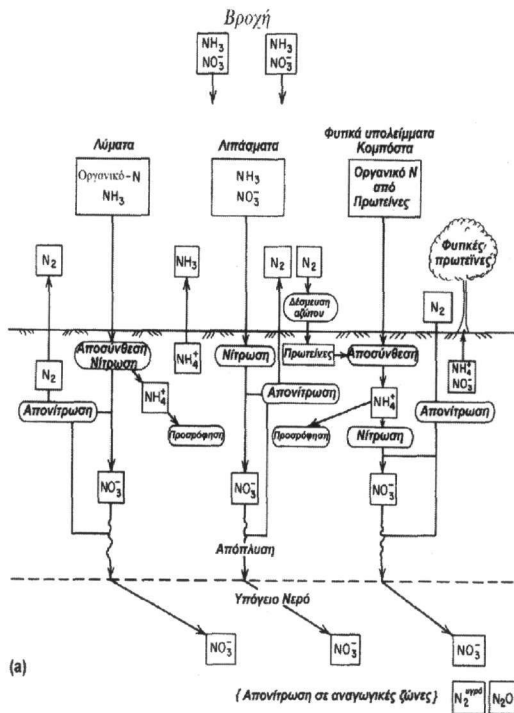
Αντίθετα το N από ανεπεξέργαστα ή μερικώς επεξεργασμένα λύματα και από κοπριές αποτελείται είτε από την οργανική είτε από την ανόργανη μορφή του.

Η επιφανειακή διάθεση λυμάτων και αποβλήτων, καθώς και η χρήση λιπασμάτων και κοπριάς, αποτελούν άμεσες πηγές αζώτου (εικ.9.b). Σε άλλες όμως περιπτώσεις, τα NO_3^- προέρχονται από τη μετατροπή οργανικού αζώτου ή NH_4^+ , που υπάρχουν, ή εισάγονται από τον άνθρωπο, στην εδαφική ζώνη. Έτσι, από το οργανικό άζωτο, δημιουργείται, αρχικά, με “αμμωνιοποίηση”, NH_4^+ (αναγωγή) και ακολούθως, με “νίτρωση”, NO_3^- (οξειδωση). Οι διαδικασίες αυτές λαβαίνουν χώρα στην ακόρεστη ζώνη, συνήθως δε στην εδαφική ζώνη, όπου αφθονούν το οξυγόνο και η οργανική ύλη, που χρειάζονται τα αζωτοβακτήρια. Στην εικ. 9.b. οι διεργασίες αυτές εμφανίζονται να λαβαίνουν χώρα έξω από τα σύνορα του υδροφόρου συστήματος. Τα NO_3^- είναι εξαιρετικά ευδιάλυτα στο νερό και βρίσκονται με ανιονική μορφή, με αποτέλεσμα να είναι εξαιρετικά ευκίνητα στο υπόγειο νερό. Κινούνται μαζί του χωρίς κανένα μετασηματισμό και εξασθένιση. Ιδιαίτερα κινητικά είναι τα NO_3^- σε υδροφόρους πλούσιους σε οξυγόνο (επιφανειακοί υδροφόροι σε πολύ υδροπερατά υλικά ή σε διερρηγμένα πετρώματα). Μείωση του pE (Eh) στο νερό, μπορεί να προκαλέσει απονίτρωση κατά την οποία τα NO_3^- ανάγονται σε N_2O ή N_2 (εικ. 9.a). Ανάλογα με το pE τα προϊόντα της αναγωγής των NO_3^- απαντούν εν διαλύσει στο υπόγειο νερό, ως N_2O ή N_2 .

Εάν το νερό κινηθεί ή βρεθεί στην ακόρεστη ζώνη, μέρος των N_2O ή N_2 μπορεί να χαθεί, με τη μορφή αερίου, στον εδαφικό αέρα. Στην εικ. 9.b παρουσιάζεται αναγωγική διεργασία, που οδηγεί τελικά στο σχηματισμό NH_4^+ , πέρα από τη διαδικασία της απονίτρωσης, αν και αφορά μικρό μόνο κλάσμα των NO_3^- .

Αν το NH_4^+ σχηματισθεί στην κορεσμένη ζώνη, το μεγαλύτερο μέρος του θα προσροφηθεί στα σωματίδια αργιλου ή ιλίου. Κατά τις ιοντικές ανταλλαγές, τον κύριο ρόλο διαδραματίζει η **ικανότητα κατιοντικής ανταλλαγής** των γεωλογικών σχηματισμών, εκφρασμένη σε αριθμό χιλιοστοϊσοδύναμων κατιόντων, που μπορούν να ανταλλαγούν σε μάζα ξηρού εδάφους, βάρους 100g. Η ικανότητα κατιοντικής ανταλλαγής προοδιορίζεται εργαστηριακά. Οι μετασηματισμοί του N στο υπέδαφος περιλαμβάνουν την:

- **αμμωνιοποίηση**, δηλαδή τη βιολογική μετατροπή του οργανικού N, σε $\text{NH}_4\text{-N}$,
- **νίτρωση**, δηλαδή τη βιολογική οξειδωση του $\text{NH}_4\text{-N}$, σε $\text{NO}_3\text{-N}$,
- **απονίτρωση**, δηλαδή τη βιολογική αναγωγή του $\text{NO}_3\text{-N}$, σε αέρια υποπροϊόντα, όπως το N_2O ή το N_2 ,
- **εξαέρωση** της αμμωνίας



Εικ.9. Πηγές και τρόπος εισόδου του αζώτου στο έδαφος(a) και είσοδος του αζώτου στη κορεσμένη ζώνη καθώς και οι μετασχηματισμοί που υφίσταται εκεί το άζωτο (Freeze-Cherry, 1979, με τροποποιήσεις).

Η διαδικασία μετασχηματισμού του N στο υπέδαφος περιλαμβάνει τη διάχυση των μορφών του αμμώνιου, τη διάχυση των μορφών των νιτρικών και την μετακίνηση οποιασδήποτε μορφής, μαζί με το νερό. Οι σχετικές αντιδράσεις είναι:

- **Εξαέρωση:** NH_3 (υγρή) + $H_2O \rightarrow NH_4 + OH$. Σε $pH > 7$ ευνοείται η παρουσία υγρής αμμωνίας. Σε $pH \leq 7$ επικρατεί η μορφή του NH_4^+ .
- **Νίτρωση:** $NH_4^+ + 1 \frac{1}{2} O_2 \rightarrow NO_2^- + 2H + 2H_2O$ και $NO_2^- + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow NO_3^-$ και από το συνδυασμό των δύο εξισώσεων: $NH_4 + 2O_2 \rightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O$.
- **Απονίτρωση:** $NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO^- \rightarrow N_2O^- \rightarrow N_2$

Κάτω από αναερόβιες συνθήκες και με την παρουσία οργανικού υποστρώματος, τα βακτήρια χρησιμοποιούν τα νιτρικά ως δέκτες ηλεκτρονίων. Όταν απουσιάζει το οξυγόνο, μερικοί μικροοργανισμοί οξειδώνουν το οργανικό υπόστρωμα σε CO_2 και H_2O , χρησιμοποιώντας τα νιτρικά, αντί οξυγόνου, ως δέκτη ηλεκτρονίων,

μετατρέποντας έτσι τα NO_3^- σε N_2 (αέριο), σύμφωνα με την αντίδραση: $5(\text{CH}_2\text{O}) + 4\text{NO}_2^- + 4\text{H}^+ \rightarrow 5\text{CO}_2 + 2\text{N}_2 + 7\text{H}_2\text{O}$.

Αντίθετα, όταν υπάρχει διαθέσιμο οξυγόνο, οι προαναφερθέντες μικροοργανισμοί οξειδώνουν το οργανικό υπόστρωμα σε CO_2 και H_2O κατά την αντίδραση: $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$.

Η προσρόφηση αποτελεί τον κύριο μηχανισμό αφαίρεσης από το υπέδαφος του $\text{NH}_4\text{-N}$. Κάτω από αναερόβιες συνθήκες, θετικά φορτισμένα ιόντα αμμωνίου (NH_4^+) προσροφώνται από αρνητικά φορτισμένα σωματίδια εδάφους. Η κατιοντική ανταλλαγή αποτελεί, επίσης, σημαντικό μηχανισμό προστασίας της κορεσμένης ζώνης από την είσοδο ιόντων NH_4^+ .

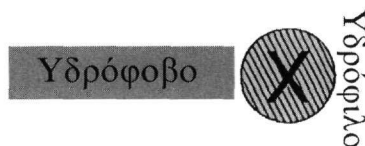
Αντίθετα, τα νιτρικά είναι πιο ευκίνητα από το NH_4^+ στο υπέδαφος. Όταν τα πρώτα φτάσουν στην κορεσμένη ζώνη, ταξιδεύουν μαζί με το υπόγειο νερό χωρίς σημαντικό μετασχηματισμό, επειδή έχουν ανιονική μορφή και είναι πολύ ευδιάλυτα. Ο μόνος τρόπος που μπορεί να αναπυχθούν οι διαδικασίες απονίτρωσης στην κορεσμένη ζώνη, είναι η μείωση του οξειδοαναγωγικού δυναμικού του υπόγειου νερού.

4. ΕΠΙΦΑΝΕΙΟΔΡΑΣΤΙΚΕΣ ΟΥΣΙΕΣ

♦ Απορρυπαντικά

Οι πρώτες επιφανειοδραστικές ουσίες είναι τα σαπούνια, που η χρήση τους είναι γνωστή από τους αρχαίους χρόνους.

Το 1946, έφτασε στο εμπόριο ένα συνθετικό υποκατάστατο των παραδοσιακών σαπουνιών, το γνωστό "tetrapropylenebenzine sulfonate" (TPS), το πρώτο ανιονικό επιφανειοδραστικό (απορρυπαντικό). Όμως το TPS, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά σαπούνια, τα οποία εύκολα βιοδιασπώνται, είναι ανθεκτικό στη βιοδιάσπαση. Λόγω των περιβαλλοντικών του δυσμενών επιπτώσεων, το TPS αντικαταστάθηκε το 1965 από το συνθετικό απορρυπαντικό «linear alkylbenzene sulfonate» (LAS), το οποίο είναι το κύριο ανιονικό βιοδιασπώμενο επιφανειοδραστικό. Ακολούθησε μια σειρά βελτιώσεων στην παρασκευή επιφανειοδραστικών. Οι επιφανειοδραστικές ουσίες είναι «αμφίφιλα» μόρια με υδρόφοβα και υδρόφιλα τμήματα (εικ. 10.). Το υδρόφοβο τμήμα είναι συνήθως υδρογονάνθρακας, είτε αρωματικός, είτε αλφατικός. Το υδρόφιλο υπόλοιπο μπορεί να φέρει είτε αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο (ανιονικό επιφανειοδραστικό) είτε θετικό (κατιονικό επιφανειοδραστικό) ή ακόμα και τα δύο, θετικό και αρνητικό ηλεκτρικά φορτία (επαμφοτερίζοντα επιφανειοδραστικά), σε μερικές δε περιπτώσεις και αλυσίδα πολυοξυεθυλαινίου (ανιονικό επιφανειοδραστικό). **Οι επιφανειοδραστικές εν γένει ουσίες έλκονται ισχυρά από τα φασικά όρια των επιφανειών.** Αυτό συνεπάγεται την ισχυρή προσρόφηση τους και μάλιστα με τη μορφή πολύπλοκων μιγμάτων, των διαφόρων τύπων επιφανειοδραστικών που κυκλοφορούν στο εμπόριο, στα αιωρούμενα υλικά των επιφανειακών νερών αλλά και στην ιλύ των αποβλήτων.



Εικ. 10. Τυπικό επιφανειοδραστικό μόριο, με ένα τμήμα του υδρόφοβο και το υπόλοιπο υδρόφιλο (G. Kloster, in M. Schwuger, ed., 1997, με τροποποιήσεις).

Πιθανές πηγές ρύπανσης του εδάφους και των υπόγειων νερών από επιφανειοδραστικές ουσίες είναι, γεωργική χρήση παρασιτοκτόνων, η χρήση ιλύος που προέρχεται από σταθμούς επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, η επαναχρησιμοποίηση λυμάτων για άρδευση, η έλλειψη ή το ελαττωματικό δίκτυο αποχέτευσης, η υπερχείλιση των σταθμών επεξεργασίας λυμάτων που προκαλείται από τις έντονες βροχοπτώσεις, το πλύσιμο ή τη απορρυπανση του εδάφους και, τέλος, από η κατασκευή στεγανής ελένδυσης στους ΧΥΤΑ.

Η διάσπαση των επιφανειοδραστικών στο έδαφος επιβραδύνεται. Η αλληλεπίδραση επιφανειοδραστικά και εδάφους, επηρεάζει το ισοζύγιο «εδαφικού νερού», τις ιδιότητες των συστατικών του εδάφους, αλλά και τη δομή του, επιπλέον δε τη δραστηριότητα και την πυκνότητα των πληθυσμών των μικροοργανισμών και την ανάπτυξη των φυτών. Το τελικό αποτέλεσμα της πιο πάνω αλληλεπίδρασης είναι η απόπλυση του κolloειδίου κλάσματος του εδάφους προς τα βαθύτερα στρώματα, μαζί με το διηθούμενο νερό.

Η έκπλυση του εδάφους με επιφανειοδραστικά, συνεπάγεται την προσρόφηση των τελευταίων και δυσχε-

ραίνεται έτσι η απορρύπανση του εδάφους, ενώ η απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από ρυπασμένο έδαφος γίνεται αμφίβολη, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για προσρόφηση ιονικών επιφανειοδραστικών.

Με τον ίδιο τρόπο που τα επιφανειοδραστικά καθορίζουν την κινητικότητα των περιβαλλοντικών χημικών στο έδαφος, δηλαδή των Mg^{2+} και Ca^{2+} και Pb^{2+} , στους μοντοριλλονίτες, όπου η κινητικότητα, των πιο πάνω ιόντων, αυξάνει σημαντικά στα πρώτα στάδια άφιξης των επιφανειοδραστικών, για να μειωθεί ο ρυθμός αυτός πολύ αργότερα, μπορεί να επηρεασθεί η μεταφορά των επιφανειοδραστικών από ιόντα άλλων οργανικών ενώσεων.

Η προσρόφηση επιφανειοδραστικών σε αργιλικά υλικά, μπορεί να οδηγήσει στην ανταλλαγή τους με παραιοτοκτόνα, δηλαδή το επιφανειοδραστικό συμπεριφέρεται ως ιοντοανταλλάκτης, οι δε ποσότητες που ανταλλάσσονται αντιστοιχούν στην ικανότητα κατιοντικής ανταλλαγής.

Η ρόφηση μη ιονικών οργανικών ρύπων από τη στερεά φάση του εδάφους, είναι ελάχιστη, δοθέντος ότι η τελευταία προσροφά επιλεκτικά νερό. Η πρόσληψή τους από το έδαφος συσχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τη συγκέντρωση οργανικής ύλης στο έδαφος.

Από το σύνολο των επιφανειοδραστικών που χρησιμοποιούνται, το 80% είναι ανιονικά, 15% μη ιονικά και 5% κατιονικά. Από αυτά, τα πιο ανθεκτικά στο περιβάλλον είναι τα ανιονικά και είναι αναποτελεσματική ακόμα και η βιολογική τους επεξεργασία σε εξειδικευμένες εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων. Στις τελευταίες, το μέγιστο ποσοστό απομάκρυνσης των ανιονικών επιφανειοδραστικών δεν ξεπερνά το 25%. Η παρουσία εξάλλου επιφανειοδραστικών στα υγρά απόβλητα, μειώνει εξαιρετικά την αποτελεσματική επεξεργασία των τελευταίων, λόγω μεγαλύτερης διασποράς των αιωρούμενων στερεών, ενώ μειώνεται σημαντικά η καθίζησή τους. Παράλληλα στις δεξαμενές αερισμού μειώνεται η πρόσληψη οξυγόνου κατά 80% και πλέον από τα αφρώδη συσσωματώματα, στο στάδιο της ενεργούς ιλύος.

♦ **Συνθετικοί ζεόλιθοι**

Στα μέσα της δεκαετίας του 70, οι συνθετικοί ζεόλιθοι υποκαθιστούν στην αγορά ένα σημαντικό τμήμα των ορυκτών ζεόλιθων. Οι συνθετικοί ζεόλιθοι, όπως και οι φυσικοί, είναι αργιλοπυριτικά άλατα των αλκαλικών γαιών. Οι τελευταίες αντιπροσωπεύονται από ανταλλάξιμο κατιόν συνήθως, Na^+ .

Τα παραδοσιακά απορρυπαντικά περιέχουν σημαντική ποσότητα ζεολιθών, οι οποίοι παίζουν το ρόλο αδιάλυτου στο νερό ανταλλάξιμου ιόντος το οποίο υποκαθιστά το διαλυτό σύμπλεγμα τριφωσφορικού νατρίου. Η κατιοντική ανταλλαγή, ανάμεσα στους ζεόλιθους και το έδαφος, οδηγεί στην απομάκρυνση από το τελευταίο των ιόντων των αλκαλικών γαιών, το έδαφος χαλαρώνει και έτσι ξεπλένεται πιο εύκολα. Οι ζεόλιθοι περιέχονται σε υψηλές συγκεντρώσεις στην ιλύ, μετά από πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια επεξεργασία αποβλήτων. Η ιλύς, όταν διατεθεί στο έδαφος ή χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα, προκαλεί εισαγωγή των ζεολιθών στο πρώτο. Οι τελευταίοι, υδρολύονται στο έδαφος ή στους υδροφόρους με αποτέλεσμα, να μην προκαλείται αξιόλογη ρύπανση, δοθέντος άλλωστε ότι ο χρόνος υποδιπλασιασμού τους είναι της τάξης των 1-2 μηνών. Το τελικό προϊόν της αποσύνθεσης των ζεόλιθων, σε υγρό περιβάλλον, είναι άμορφο, πρακτικά αδιάλυτο στο νερό, φωσφο-αργιλο-πυριτικό ασβέστιο.

5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

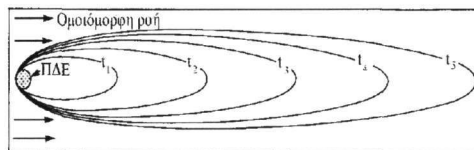
Η πρόληψη της ρύπανσης αποτελεί τον αποτελεσματικότερο και οικονομικότερο τρόπο αντιμετώπισης της ρύπανσης.

Μερικά αξιώματα που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη σχεδίαση της πολιτικής πρόληψης της ρύπανσης των υδροφόρων και του εδάφους είναι :

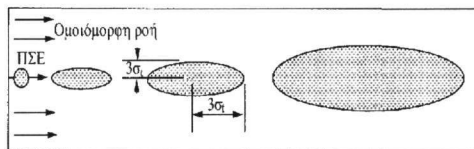
- Το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην αρχική εκπομπή των ρύπων στο περιβάλλον και της εμφάνισης της ρύπανσης στο νερό των υδρογεωτρήσεων, μπορεί να είναι τόσο μεγάλο, ώστε να έχει προκληθεί ανεπανόρθωτη βλάβη στην υδροδότηση από το υπόγειο νερό.
- Τα βλαπτικά αποτελέσματα της ρύπανσης του υπόγειου νερού μπορεί να διαρκούν πάρα πολύ, έτσι που συχνά μεταφέρονται και στις μελλοντικές γενιές.
- Μερικά απόβλητα είναι τόσο τοξικά, ώστε ακόμα και σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις, καμιά φορά μη ανιχνεύσιμες, προκαλούν σοβαρές βλάβες.
- Αν η λήψη διορθωτικών παρεμβάσεων αναβάλλεται μέχρι να προκύψουν χειροπιαστές αποδείξεις της πραγματικής βλάβης, θα έχει προκληθεί, κατά πάσα πιθανότητα, τόσο μεγάλη ρύπανση, ώστε η απορρύπανση θα είναι δυσχερής, δαπανηρή και βραδεία, εφόσον φυσικά είναι δυνατή.

♦ Το «πλούμιο» ρύπανσης

Η εκκίνηση για την κατανόηση της μεταφοράς της μάζας του ρύπου, στην κορεσμένη ζώνη, και τη διατύπωση των σχετικών εξισώσεων, είναι η βασική εξίσωση: «**εισροή ρύπου – εκροή ρύπου – μεταβολή της συγκέντρωσης ρύπου = μεταβολή της συγκέντρωσης ρύπου στο χρόνο**», σε μονάδες μάζας και χρόνου. Οι διαδικασίες μεταφοράς της μάζας του ρύπου μπορεί να περιγραφούν από τις εξισώσεις «διάχυσης», «ρευμάτων μεταφοράς» και «διασποράς».



(a)



(b)

Εικ.11. Επέκταση ρύπανσης σε ισότροπο υδροφόρο με τη μορφή “πλούμιων” από σημειακή πηγή (a) συνεχούς (ΠΔΕ) και (b) στιγμιαίας (ΠΣΕ) εκπομπής ρύπου (Freeze-Cherry, 1979).

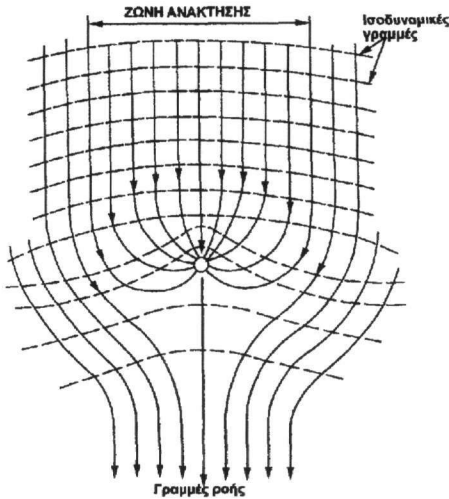
Ανάλογα με την επικρατούσα διαδικασία, διαμορφώνεται και η έκταση, η γεωμετρία και η κατανομή της συγκέντρωσης του ρύπου. Το γεωμετρικό σχήμα της ρύπανσης ονομάζεται «πλούμιο» (plume, εικ. 11.). Οι χημικές και βιολογικές διαδικασίες μειώνουν την έκταση του πλούμιου σε κλάσμα μόνο εκείνης που περιγράφεται από κάποια από τις προαναφερθείσες εξισώσεις μεταφοράς της μάζας.

Τα ρεύματα μεταφοράς αποτελούν την επικρατούσα διαδικασία μεταφοράς της μάζας κατά την διαμόρφωση του πλούμιου και ακολουθεί η υδροδυναμική διασπορά, με εξαίρεση τη διάδοση της ρύπανσης στις ρωγματομένες βραχομάζες. Η έκταση της μεταφοράς των ρύπων, με τα ρεύματα μεταφοράς, ελέγχεται από την κατανομή της υδροπερατότητας και του υδραυλικού φορτίου στο χώρο και από την ύπαρξη γεωρήσεων ή πηγαδιών άντλησης.

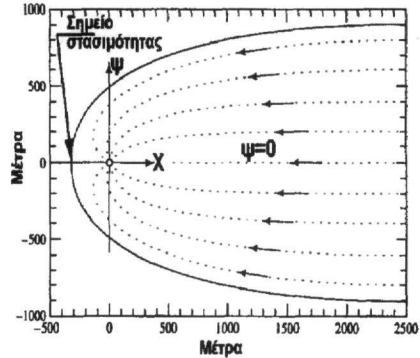
♦ Η “ζώνη ανάκτησης”

Για την αφαίρεση “πλούμιου” ρύπανσης από υδροφόρο, συχνά είναι απαραίτητη η κατασκευή υδρογεωτρήσεων άντλησης, κατά κανόνα κατάντη της πηγής ρύπανσης. Κάθε υδρογεώτρηση, κατά την άντλησή της, διαμορφώνει τον δικό της κώνο κατάπτωσης, που εκτείνεται στα όρια της περιμέτρου τροφοδοσίας της “ακτίνα επίδρασης”.

Η περιοχή που αποστραγγίζεται κατά την άντληση του πλούμιου, είναι γνωστή ως “capture zone” δηλαδή “ζώνη ανάκτησης” ή “απόληψης” ή “σύλληψης” ή “παγίδευσης”. Η “ζώνη ανάκτησης” μιας υδρογεώτρησης, κατά συνέπεια, είναι η περιοχή που τροφοδοτεί με ρυπασμένο νερό τη συγκεκριμένη υδρογεώτρηση (εικ. 12.) και περιλαμβάνει τόσο την ανάντη όσο και την κατάντη περιοχή, που αποστραγγίζονται από την υδρογεώτρηση. Όταν ο υδροφόρος είναι επίπεδος, ομοιογενής και ισότροπος, η “ζώνη ανάκτησης” θα είναι κυκλική και θα αντιστοιχεί στον κώνο κατάπτωσης της υδρογεώτρησης. Όταν όμως ο υδροφόρος είναι κεκλιμένος, όπως συμβαίνει συνήθως, η “ζώνη ανάκτησης” δεν συμπίπτει με τον κώνο κατάπτωσης. Η πρώτη είναι μια επιμηκυσμένη περιοχή, η οποία εκτείνεται ελαφρώς μεν προς τα κατάντη της γεώτρησης άντλησης και σημαντικά προς τα ανάντη. Η διαμόρφωση της ζώνης ανάκτησης, ελέγχεται, από το χρόνο, που χρειάζεται το νερό για να φθάσει από την ανάντη περιοχή, στη γεώτρηση άντλησης. Μετά από ικανό χρόνο άντλησης η ζώνη ανάκτησης μπορεί να φτάσει μέχρι τα όρια του “υπόγειου υδροκορίτη”, στην ανάντη περιοχή. Η απόσταση, μέχρι την οποία εκτείνεται ζώνη ανάκτησης προς τα κατάντη της αντλούμενης υδρογεώτρησης, κάτω από συνθήκες μόνιμης ροής, ορίζει τον υπόγειο υδροκορίτη, η τομή του οποίου με το οριζόντιο επίπεδο, αποτελεί το “σημείο στασιμότητας” (“stagnation point”, εικ. 13.).



Εικ.12. "Ζώνη ανάκτησης" σε κεκλιμένο υδροφόρο.



Εικ.13. "Σημείο στασιμότητας" και "ζώνη ανάκτησης" μιας υδρογεώτρησης.

Εκατέρωθεν του υδροκρήτη και του "σημείου στασιμότητας", η ροή του υπόγειου νερού κατευθύνεται κατά αντίστροφη φορά. Έχουν αναπτυχθεί αναλυτικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της έκτασης της ζώνης ανάκτησης.

♦ Μέτρα ελέγχου και περιορισμού της ρύπανσης

Τα μέτρα που πρέπει να λαμβάνονται, για τον έλεγχο και τον περιορισμό της ρύπανσης, εξαρτώνται, κάθε φορά, από τη φύση των ρύπων και το είδος της πηγής (στιγμαιαία ή συνεχής, σημειακή ή διάχυτη κ.λπ.). Κατ'αρχήν είναι απαραίτητη η οριοθέτηση, κατά κάποιο τρόπο, της έκτασης της ρύπανσης και του μετώπου προέλασής της.

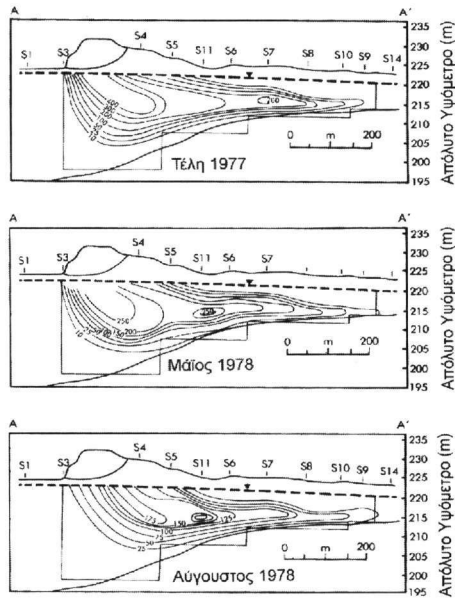
Τούτο μπορεί να γίνει με την κατάσχευση γεωτρήσεων δειγματοληψίας, σε διαφορετικά βάθη. Συνήθως, χρησιμοποιείται η συγκέντρωση χλωριόντων, για τον πιο πάνω σκοπό (εικ. 14.). Τα μέτρα που λαμβάνονται συνήθως είναι:

- (α) μέτρα ελέγχου της ρύπανσης.
- (β) μέτρα απορρύπανσης

Στα πρώτα ανήκει ο περιορισμός της μετανάστευσης της ρύπανσης. Στα δεύτερα ανήκουν η αφαίρεση και επεξεργασία του ρυπασμένου υπόγειου νερού. Οι πιο συνήθεις μέθοδοι περιορισμού της μετανάστευσης περιλαμβάνουν την στεγανοποίηση της επιφάνειας πιθανής εισόδου των ρύπων, την εγκατάσταση "φυσικών" φραγμών και την λειτουργία "υδραυλικών" φραγμών. Η επιφανειακή στεγανοποίηση αναφέρεται στην αδιαβροχοποίηση της επιφάνειας, ώστε να προληφθεί ή να σταματήσει η κατείδωση και σε μερικές περιπτώσεις η διήθηση.

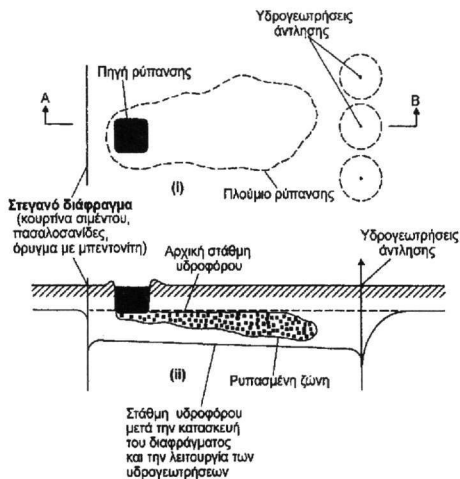
Οι φυσικοί και υδραυλικοί φραγμοί χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό της επέκτασης της ρύπανσης (εικ. 15.) Στους φυσικούς φραγμούς υπάγονται τα στεγανά διαφράγματα, οι πασσαλοσανίδες, τα υπόγεια διαφράγματα, οι τσιμεντενέσεις, οι τάφοι συλλογής κλπ. Η αποτελεσματικότητά τους είναι καλύτερη, όταν σε σχετικά μικρό βάθος υπάρχει στεγανό στρώμα. Σε βάθη μεγαλύτερα των 40 m δεν αποδίδουν καλά αποτελέσματα. Οι "υδραυλικοί" φραγμοί δημιουργούνται με τον συνδυασμό γεωτρήσεων άντλησης και εμπλουτισμού (εικ. 16.).

Ρυπασμένες επιφανειακές και υπόγειες θέσεις μπορούν να απορρυπανθούν με την αφαίρεση του ρευστού και της λάσπης επιφανειακά και με άντληση και εσχάρωση. Το ρυπασμένο έδαφος, στο οποίο υπάρχει πρόσβαση, πρέπει να αφαιρείται με εκσκαφή. Το ρυπασμένο υπόγειο νερό συνήθως αντλείται και στη συνέχεια υφίσταται επεξεργασία. Αντί χρησιμοποίησης γεωτρήσεων άντλησης, είναι δυνατή η αφαίρεση του υπόγειου νερού, με τη βοήθεια στραγγιστηρίων. Μετά την επεξεργασία, το νερό μπορεί να επανεισαχθεί στις γεωτρή-

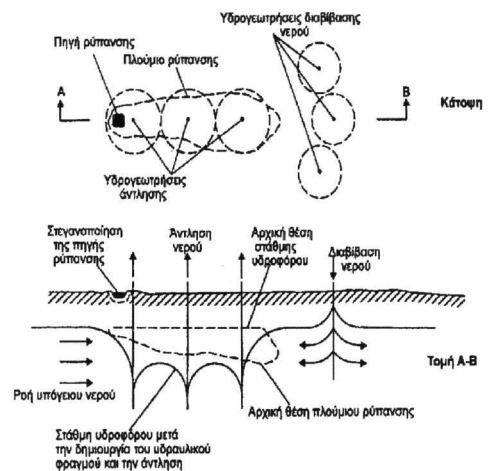


Εικ. 14. Παρακολούθηση της εξέλιξης πλούμιου χλωριόντων, που προέρχεται από το στράγγισμα XYTA (Waterloo Res. Inst. 1982, με τροποποιήσεις). S_1 - S_{14} πιεζόμετρα.

σεις, που συνιστούν τον υδραυλικό φραγμό ή να χρησιμοποιηθεί για τεχνητό εμπλουτισμό των υδροφόρων. Σπανιότερα το επεξεργασμένο νερό απορρίπτεται σε χείμαρρους ή ποτάμια, σε προσωρινή βεβαίως βάση.



Εικ. 15. Χρησιμοποίηση φυσικών φραγμών και άντλησης, για τον έλεγχο και τον περιορισμό της επέκτασης της ρύπανσης, προερχόμενης από επιφανειακή πηγή ρύπανσης (Tchobanoglous - Schroeder, 1985, με τροποποιήσεις).



Εικ. 16. Συνδυασμός άντλησης και έκχυσης νερού, για τον έλεγχο της διάδοσης «πλούμιου» ρύπανσης, προερχόμενου από επιφανειακή διάθεση αποβλήτων (Tchobanoglous - Schroeder, 1985, με τροποποιήσεις).

6. ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ

♦ Σχεδίαση προγραμμάτων απορρύπανσης

Η απορρύπανση περιλαμβάνει τη «θεραπεία» και τον «καθαρισμό» του ρυπανθέντος μέσου. Η αποκατάσταση συνίσταται, γενικά, στη μείωση της ρύπανσης στα επίπεδα που θέτουν οι στόχοι του επιτόπιου καθαρι-

σμού του μέσου, δηλαδή στη διατήρηση του υπόγειου νερού, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις συγκεκριμένες χρήσεις. Αν και ο στόχος της απορρύπανσης οφείλει να είναι η αποκατάσταση του μέσου στη προ της ρύπανσης κατάσταση, ο στόχος αυτός δεν είναι πάντοτε ρεαλιστικός, γιατί είναι πρακτικά αδύνατη η απομάκρυνση κάθε μορίου του ρύπου.

Οι στόχοι του καθαρισμού του εδάφους και του υδροφόρου, συνήθως, είναι διαφορετικοί και εν πάση περιπτώσει εξαρτώνται από τα σταθερότυπα που έχουν τεθεί για τη συγκεκριμένη θέση ή περίπτωση. Το έδαφος θα πρέπει να υποστεί «θεραπεία» τέτοια, ώστε να μην αποτελεί πλέον πηγή ρύπανσης του υπόγειου νερού. Αντίθετα, ο καθαρισμός του υδροφόρου (υπόγειου νερού), πρέπει να ακολουθεί τα σταθερότυπα του πόσιμου νερού.

Για το σωστό σχεδιασμό της απορρύπανσης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, ο τύπος και το πάχος της ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης, το είδος και η συγκέντρωση του ρύπου, καθώς και η παρούσα και η μελλοντική χρήση γης. Η τεχνική απορρύπανσης που θα επιλεγεί, εξαρτάται από το είδος της ρύπανσης, τον τύπο του εδάφους και του ιζήματος, την υδρογεωλογία, το μέγεθος του προβλήματος και την οικονομική ανάλυση της περίπτωσης.

Το πρώτο βήμα για την επιλογή της τεχνικής απορρύπανσης, είναι η «επιτόπια παρακολούθηση» (site monitoring) της ρύπανσης, ώστε να στοιχειοθετηθεί η αποτελεσματικότητα της άντλησης του ρυπασμένου νερού και του «πλουμίου», αλλά και να πιστοποιηθεί ότι δεν μεταναστεύουν από τη θέση ρύπανσης άλλες ποσότητες ρύπου.

Η «επιτόπια παρακολούθηση» περιλαμβάνει και την εκτέλεση χημικών αναλύσεων νερού αλλά και αερίων. Η διάρκεια της παρακολούθησης εξαρτάται από τις υπολειμματικές συγκεντρώσεις ρύπου. Θα πρέπει να διακόπτεται η παρακολούθηση όταν δεν εντοπίζεται πια στα δείγματα ο ρύπος. Η διάρκεια αυτή, για την περίπτωση της ρύπανσης από υδρογονάνθρακες, φτάνει τα δύο χρόνια (οκτώ τριμηνιαίες δειγματοληψίες). Για σοβαρά περιστατικά βιομηχανικής ρύπανσης η παρακολούθηση συνεχίζεται για αρκετές δεκαετίες μετά την ολοκλήρωση των εργασιών απορρύπανσης (συντά για 3 δεκαετίες).

Η διάρκεια των εργασιών απορρύπανσης μπορεί να διαρκεί περισσότερο, από όσο διαρκούν οι εργασίες διαπίστωσης του μεγέθους της ρύπανσης. Η εκσκαφή του εδάφους και η αφαίρεση του νερού, μπορεί να διαρκούν εβδομάδες έως μήνες, η αφαίρεση των αερίων του εδάφους μπορεί να διαρκεί μήνες έως χρόνια, ενώ η αφαίρεση ρύπων από το υπόγειο νερό μπορεί να διαρκεί χρόνια ή δεκαετίες.

Πρωταρχικής σημασίας, κατά την ανάπτυξη του προγράμματος απορρύπανσης, είναι ο καθορισμός του σκοπού της υδρογεωλογικής έρευνας, που θα γίνει. Μετά τον καθορισμό του σκοπού της έρευνας, θα πρέπει να γίνει αναγνώριση των υποτιθέμενων ρύπων και να καταγραφούν όλες οι παράμετροι που θα αναλυθούν. Ιδιαίτερα θα πρέπει να ληφθούν αξιόπιστες πληροφορίες για τις κυριότερες φυσικοχημικές ιδιότητες των ρύπων, οι οποίες θα πρέπει να ενσωματωθούν στο σχεδιασμό του προγράμματος απορρύπανσης. Μεταξύ αυτών των ιδιοτήτων συμπεριλαμβάνονται η φυσική κατανομή του ρύπου (π.χ. στον αέρα, στο έδαφος, στο υπόγειο και επιφανειακό νερό κ.λπ.), η χημική σύνθεση και το χημικό είδος (πηκτικά ή μη πηκτικά οργανικά, βαρέα μέταλλα, μη μεταλλικά ανόργανα κ.λπ.) και τέλος οι φυσικές ιδιότητες (πυκνότητα, πηκτικότητα, αναφλεξιμότητα, διαβρωτικότητα, ιξώδες, ρυθμίο φυσικής αποσύνθεσης ή φυσικού μετασχηματισμού κ.λπ.).

♦ *Μέθοδοι και τεχνικές απορρύπανσης*

Η ρύπανση του υπεδάφους συχνά οφείλεται σε μια σημειακή πηγή ή σε μια σειρά από σημειακές πηγές, εκπομπής ρύπων. Οι συγκεντρώσεις των ρύπων κοντά σε καθεμιά σημειακή πηγή, είναι, συνήθως, υψηλές και η αποκατάσταση, γενικά συνίσταται στην αφαίρεση του πολύ ρυπασμένου εδάφους, προκειμένου να υποστεί ξεχωριστή απορρύπανση, στη δέσμευση του ρύπου ή στη μεταφορά και διάθεση σε ασφαλή χωματερή.

Αυτή η διαδικασία, είναι το πρώτο βήμα για την πρόληψη της παραπέρα επέκτασης της ρύπανσης. Υπολείπεται όμως η απομάκρυνση των χημικών ενώσεων, που έχουν μεταφερθεί εκτός της αρχικής συγκεντρωμένης πηγής, με ρεύματα μεταφοράς, εξαέρωση και διασπορά, με συνέπεια την εκτεταμένη ρύπανση από σχετικά αραιές συγκεντρώσεις ρύπων. Η αφαίρεση του εδάφους, για την απομάκρυνση χαμηλών συγκεντρώσεων ρύπων, πρέπει να αποκλείεται, λόγω υψηλότερου κόστους και επειδή μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερη περιβαλλοντική βλάβη, από εκείνη που θα προέκυπτε αν έμενε στη θέση του.

Εξάλλου κάθε περίπτωση ρύπανσης έχει τις ιδιαιτερότητές της. Μια ακραία περίπτωση, όχι πάντως συνήθης, είναι εκείνη, κατά την οποία, η φυσική αφομοίωση του ρύπου μπορεί, να επιτευχθεί αποτελεσματικά από την ίδια τη φύση, λόγω υψηλής ικανότητας αυτοκαθαρισμού του υδροφόρου, όπως π.χ. η περίπτωση κηλίδας ρύπανσης από έναν μοναδικό, μη ροφούμενο ρύπο (π.χ. ακετόνη), σε σχετικά ομοιογενές πορώδες μέσο, το οποίο υπέρκειται υδροφόρου με υψηλή συγκέντρωση νιτρικών και άλλων θρεπτικών, π.χ. φωσφορικών, με

παρουσία στη στερεά φάση του υδροφόρου επαρκών θειικών.

Υπάρχουν, στην ακραία αυτή περίπτωση, όλες οι προϋποθέσεις ανάπτυξης βακτηρίων, τα οποία θα προκαλέσουν την αποσύνθεση της ακετόνης, σε τελικά ανόργανα προϊόντα, συμβατά με το περιβάλλον.

Στο άλλο όμως άκρο βρίσκεται η περίπτωση ενός ετερογενούς υδροφόρου, που αποτελείται από επάλληλα υδροπερατές και στεγανές ζώνες, αλλά και από ρωγματούμενες βραχομάζες και μεγάλες ασυνέχειες τεκτονικής προέλευσης, ο οποίος υδροφόρος ρυπαίνεται από ευδιάλυτους ρύπους, που αντέχουν στο βιολογικό μετασχηματισμό. Στην περίπτωση αυτή η απορύπανση πρακτικά είναι αδύνατη. Η μόνη λύση είναι η πρόληψη επέκτασης της ρύπανσης.

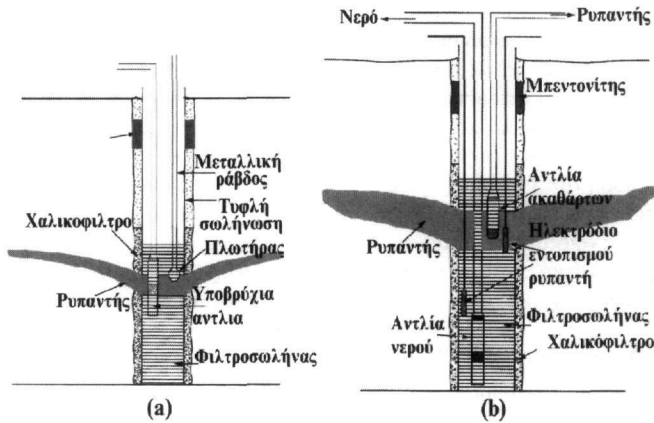
Ανάμεσα στις δύο αυτές ακραίες περιπτώσεις βρίσκονται πάρα πολλές άλλες, στις οποίες απαιτείται συνδυασμός της δράσης της ικανότητας αυτοκαθαρισμού και της ανθρώπινης παρέμβασης. Στον πίνακα II δίνονται συνοπτικά οι κυριότερες τεχνικές αντιμετώπισης της ρύπανσης των υδροφόρων και του εδάφους.

- Συμβατικές τεχνικές απορύπανσης
- ♦ Μέθοδος άντλησης-επεξεργασίας

Η μέθοδος χρησιμοποιείται είτε για την, συμπληρωματικά, πλήρη αφαίρεση ρύπων από το υπέδαφος, την απορύπανση του υπόγειου νερού από πλούμια διαλυμένων, στο υπόγειο νερό, ρύπων, από NAPL καθώς και από τα δυο είδη ρύπανσης, είτε για τον υδραυλικό έλεγχο πλούμιου, χωρίς αφαίρεση σημαντικών ποσοτήτων νερού. Στη πρώτη περίπτωση, η απορύπανση επιτυγχάνεται σε ορισμένο χρόνο, ενώ στη δεύτερη, το σύστημα λειτουργεί συνεχώς, προκειμένου να μην επεκταθεί η ρύπανση

Πίνακας II. Η σύνοψη των κυριότερων μεθόδων και τεχνικών αντιμετώπισης της ρύπανσης των υδροφόρων και του εδάφους.

α/α	Τεχνική	Στόχος-Περιγραφή
1	Έλεγχος της πηγής ρύπανσης με μείωση του όγκου του ρύπου και φυσική χημική εξουδετέρωσή του.	<ul style="list-style-type: none"> - Ελαχιστοποίηση ή πρόληψη της ρύπανσης των υδροφόρων. - Μείωση του όγκου του ρύπου ή εξουδετέρωση του φυσικού ή χημικού του χαρακτήρα.
2	Συστήματα υδρογεωτρήσεων: <ul style="list-style-type: none"> - Συστοιχίες ρηχών γεωτρήσεων (well points). - Βαθείς γεωτρήσεις - Υδραυλικός φραγμός - Σύνθετα συστήματα - Συστήματα αφαίρεσης μη αντιδρώντων ρύπων (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 ρύπου (υδρογονάνθρακες).
3	Συστήματα σύλληψης (interception systems): <ul style="list-style-type: none"> - Στραγγιστήρια (συλλεκτήρια συστήματα στραγγιδίων-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 υδρογεωτρήσεων 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 κατέαυσης, μέσω αποχέτευσης, επένδυσης - στεγανοποίησης ή/και εξουδετέρωση του ρύπου 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), τσιμεντένες, 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 ρύπου ή δημιουργούν περιβάλλον ευνοϊκό για την ανάπτυξη μικροοργανισμών, που χρησιμοποιούν τον ρύπου ως πηγή ενέργειας.
7	Επεξεργασία του υπόγειου νερού στην επιφάνεια ή στο υπέδαφος.	Αεροδιαχωρισμός οργανικών ρύπων, αεροδιασπορά, βιοαπορρύπανση, προσρόφηση από ενεργό άνθρακα. Για την αφαίρεση των μετάλλων και των ανόργανων ρύπων χρησιμοποιείται η χημική καθίζηση.



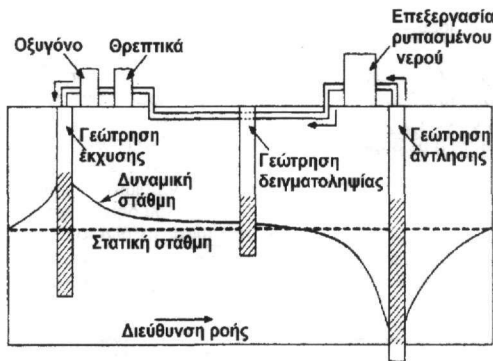
Εικ. 17 Συστήματα «άντλησης-επεξεργασίας» για την ανάκτηση NAPL.:

(α) Απλή γεώτρηση, μία αντλία, (β) απλή γεώτρηση, ζεύγος αντλιών (Domenico-Schwartz, 1998, με τροποποιήσεις).

Στη περίπτωση αυτή, όταν σταματήσει η λειτουργία των γεωτρήσεων άντλησης, η ρύπανση επανεμφανίζεται, γιατί το μεγαλύτερο μέρος του ρύπου έχει παραμείνει στο έδαφος. Ο χρόνος t που απαιτείται για την πλήρη απορρύπανση πλούμιου όγκου V , δίνεται από τη σχέση, $t = V / \sum Q_i$, όπου Q_i η παροχή άντλησης κάθε μιας γεώτρησης. Στη περίπτωση όμως ρόφησης του ρύπου από το πορώδες μέσον η πιο πάνω εξίσωση γίνεται,

$$t = \frac{VR_f}{\sum Q_i}, \text{ όπου } R_f \text{ ο συντελεστής επιβράδυνσης. Ανάλογα με τη περίπτωση, μπορεί να χρησιμοποιηθούν}$$

αντλία νερού (διαλυμένος ρύπος) ή αντλία ακαθάρτων ή και πηλαντλία, ή ακόμα αντλία νερού και αντλία ακαθάρτων (εικ. 17.). Το ρυπασμένο νερό αντλείται στην επιφάνεια και ακολούθως αφαιρούνται οι ρύποι, σε κατάλληλο σύστημα επεξεργασίας, έτσι ώστε να είναι δυνατή η επανεισαγωγή του «αναγεννημένου» νερού στον υδροφόρο (εικ.18.) ή η διοχέτευσή του σε γειτονικό υδροόρεμα, ή ο ψεκασμός του εδάφους με αυτό.



Εικ. 18. Αρχή λειτουργίας κλειστού συστήματος επιτόπιας «βιοαπορρύπανσης» υδροφόρου, με επιτόπια επεξεργασία του ρυπασμένου νερού και επιστροφή του στον υδροφόρο (U.S. EPA, 1994, από Clark, 1996, με τροποποιήσεις).

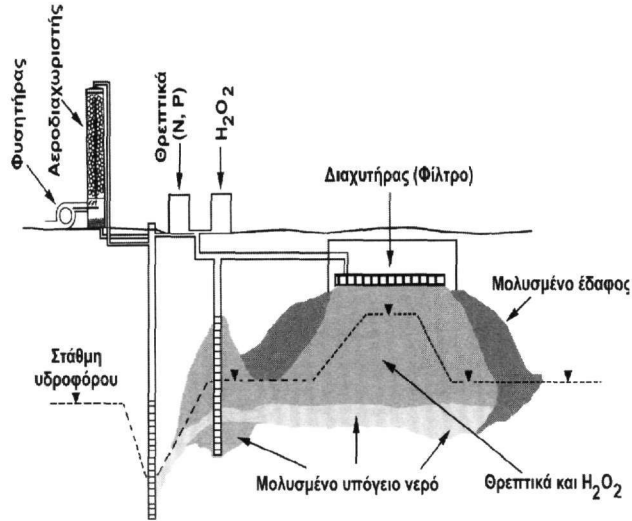
Ένα θέμα, που έχει προβληματίσει, είναι ο απαιτούμενος χρόνος για την απορρύπανση. Θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό του, το πάχος του υδροφόρου, η έκτασή του που έχει ρυπανθεί (για τον υπολογισμό του όγκου του ρυπασμένου υδροφόρου), το ενεργό πορώδες (για τον υπολογισμό του όγκου του ρυπασμένου νερού) και κατά συνέπεια και του χρόνου που απαιτείται για την αντικατάστασή του, με άντληση, καθώς και η ταχύτητα Darcy. Οι συντελεστές «υστέρησης» («επιβράδυνσης») κυμαίνονται από 1,5-2, μέχρι 10-40, ανάλογα με τη φύση του υδροφόρου και το είδος του ρύπου. Όταν ο συντελεστής υστέρησης έχει μεγάλες

τιμές, ακόμα και 100 χρόνια άντλησης δεν πρόκειται να επιφέρουν ουσιαστικό αποτέλεσμα. Η μέθοδος δίνει καλά αποτελέσματα, ως προς τη μείωση της συγκέντρωσης πτητικών οργανικών στο υπόγειο νερό, αλλά είναι λιγότερο αποτελεσματική στην απομάκρυνση διαλυμένων συστατικών.

Στην ομάδα «Άντλησης-Επεξεργασίας» εντάσσονται οι πιο κάτω τεχνικές:

(α) Άντληση και προσρόφηση από κοκκώδη ενεργό άνθρακα

Το ρυπασμένο υπόγειο νερό οδηγείται, μετά από άντλησή του, σε δοχείο (κάνιστρο) που περιέχει ενεργό άνθρακα. Συνήθως χρησιμοποιούνται περισσότερα του ενός δοχεία με ενεργό άνθρακα. Η μέθοδος είναι αποτελεσματική, κυρίως, όταν ο ρύπος είναι υγρό καύσιμο ή διαλυτικό μέσο. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι το υψηλό κόστος και η μη εκλεκτική προσροφητική ικανότητα του οργανικού άνθρακα, που έχει ως συνέπεια την προσρόφηση οποιασδήποτε διαλυμένης ουσίας π.χ. αβεσιτίου, οπότε μειώνεται η αποτελεσματικότητά του.



Εικ. 19. Επιτόπια «βιοαπορρύπανση» με «αεροδιαχωρισμό» (U.S. N.R.C. 1983, με τροποποιήσεις)

(β) Αεροδιαχωρισμός (Air Stripping)

Πρόκειται για σύστημα αποτελούμενο από διαχωριστή αερίων, που μπορεί να είναι πύργος διαχωρισμού ή δοχείο αερισμού κ.λπ., στον οποίο προκαλείται εξάτμιση των διαλυμένων στο νερό πτητικών υδρογονανθράκων, σύμφωνα με το Νόμο του Henry, λόγω διαβίβασης ρεύματος αέρα, από φυσητήρα, με μεγάλη ταχύτητα (εικ. 19.). Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι, ότι μεταφέρεται η ρύπανση στην ατμόσφαιρα.

(γ) Αεροδιασπορά (Air Sparging)

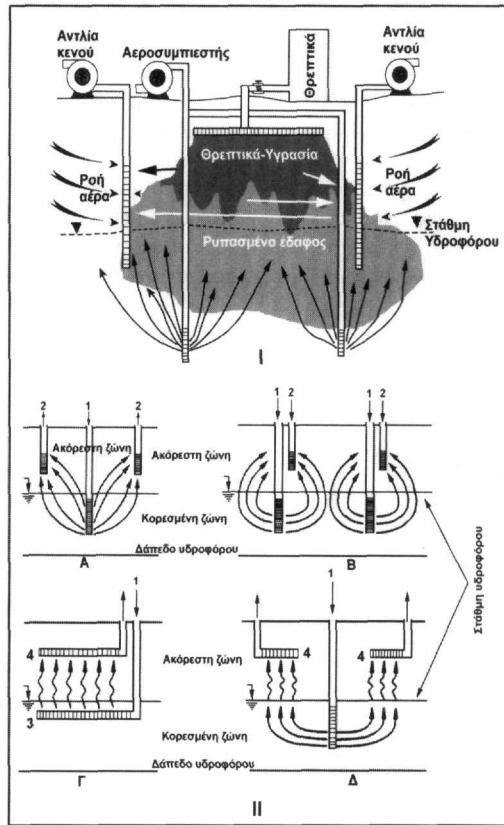
Πρόκειται για νέα σχετικά τεχνική, που συνήθως συνδυάζεται με αερισμό του εδάφους. Η μέθοδος συνίσταται στη διαβίβαση αέρα, από αεροσυμπιεστή υψηλής απόδοσης, μέσα από πλαστικό κατακόρυφο σωλήνα, στην κορεσμένη και την ακόρεστη ζώνη (εικ. 20.). Ο ρύπος, συνήθως πτητικός υδρογονάνθρακας, εξαερώνεται και εξέρχεται στην επιφάνεια μαζί με τις φυσαλίδες του αέρα. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ταυτόχρονη απορρύπανση κορεσμένης και ακόρεστης ζώνης.

(δ) Διαχωρισμός – υδρογονανθράκων-νερού

Αν επιπλέον υδρογονάνθρακες στην επιφάνεια του υδροφόρου (μοντέλο μηδενικής ανάμιξης), τότε τοποθετείται, είτε ζεύγος αντλιών σε υδρογεώτρηση, από την οποία αντλείται ο ρύπος, από την επιφάνεια του υδροφόρου και νερό από μεγαλύτερο βάθος, είτε μια αντλία στην επιφάνεια του υδροφόρου για την άντληση του ρύπου. Ακολούθως, τα προϊόντα της άντλησης οδηγούνται στον αεροδιαχωριστή, (Air-Stripper), αφού περάσουν προηγουμένως από διαχωριστή πετρελαίου νερού, όπου συγκρατείται ο ελεύθερος ρύπος, ο οποίος δεν πρέπει να φθάσει στον αεροδιαχωριστή.

- Μη συμβατικές τεχνικές απορρύπανσης.
- ♦ Επιτόπια βιολογική απορρύπανση

Οι περιορισμοί της συμβατικής τεχνολογίας απορρύπανσης των υδροφόρων και οι κίνδυνοι της συμβατι-



Εικ. 20. Επιτόπια «βιοαπορρύπανση», με «αεροδιασπορά».

I: Δύο αντλίες κενού κυκλοφορούν τον αέρα που διαβιβάζεται με αεροσυμμιεστή, ενώ από σύστημα διήθησης διαβιβάζονται θρεπτικά για την ανάπτυξη αερόβιων βακτηρίων (U.S. N.R.C. 1993, με τροποποιήσεις).

II: Διατάξεις αεροδιασποράς: Α. Απόμακρη διάταξη γεωτρήσεων αεροδιασποράς και άντλησης, Β. Συτοιχίες ξενών γεωτρήσεων αεροδιασποράς και άντλησης, Γ. Αεροδιασπορά με οριζόντια έργα, Δ. Συνδυασμός οριζόντιων και κατακόρυφων έργων (U.S. EPA, από Palmer, 1996, με τροποποιήσεις).

1: γεωτρήσεις αεροδιασποράς, 2: γεωτρήσεις άντλησης, 3: οριζόντιες γεωτρήσεις αεροδιασποράς, 4: οριζόντιες γεωτρήσεις άντλησης.

κής τεχνολογίας απορρύπανσης του εδάφους, σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος τους, οδήγησαν στην ανάπτυξη εναλλακτικών τεχνολογιών απορρύπανσης, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνεται (εικ.19., 20. και 21.) και η «βιολογική απορρύπανση» ή «βιοαπορρύπανση» (“bioremediation”). Η επιτόπια «βιοαπορρύπανση» χρησιμοποιεί μικροοργανισμούς προκειμένου, να καταστρέψουν ή να ακινητοποιήσουν επιτόπου τους ρύπους. Η μέθοδος έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική, για την αντιμετώπιση ορισμένων ειδών ρύπανσης, όπως π.χ. αυτή από υδρογονάνθρακες και είναι ταχύτερη, ασφαλέστερη και μικρότερου κόστους από τις συμβατικές τεχνικές απορρύπανσης.

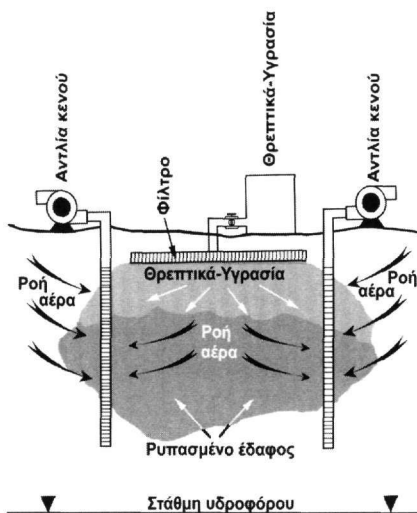
Σε λίγες μόνο περιπτώσεις, στη θέση της ρύπανσης απαντούν, σε επαρκείς ποσότητες, όλα τα απαραίτητα υλικά, που χρησιμοποιούν τα βακτήρια, ως πηγή ενέργειας και τροφή, ώστε να υποβληθούν σε «βιοαπορρύπανση», χωρίς εξωτερική παρέμβαση του ανθρώπου. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως «ειδική βιοαπορρύπανση» (“intrinsic bioremediation”). Πιο συχνά, όμως, η «βιοαπορρύπανση» απαιτεί την τεχνητή δημιουργία συνθηκών ή συστήματος που θα εξασφαλίσουν τα απαραίτητα υλικά, για τροφή και παροχή ενέργειας, στους μικροοργανισμούς. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως “μηχανική βιοαπορρύπανση” (“Engineered bioremediation”). Η τελευταία, (εικ.20. και 21.), συνίσταται, στην επιτάχυνση των επιθυμητών αντιδράσεων «βιοαπορρύπανσης», με τη διευκόλυνση ανάπτυξης περισσότερων μικροοργανισμών και με τη βελτιστοποίηση του περιβάλλοντος, στο οποίο οι μικροοργανισμοί υποχρεούνται να κάνουν τις απορρυπαντικές αντιδράσεις.

Βασικό κριτήριο για την εφαρμογή ή όχι της «βιοαπορρύπανσης» είναι το είδος του ρύπου, δηλαδή κατά πόσο ο τελευταίος είναι επιδεκτικός βιοδιάσπασης από τους μικροοργανισμούς που ενδημούν ή εισάγονται στη θέση της ρύπανσης. Τέτοιοι ρύποι είναι:

- Υδρογονάνθρακες και τα παράγωγά τους (πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, υγρά καύσιμα, αλκοόλες, κετόνες, εστέρες, αιθέρες).
- Αλογονωμένες αλιφατικές ενώσεις.
- Αλογονωμένες αρωματικές ενώσεις.
- Πολυχλωρωμένα διφαινύλια.
- Νιτροαρωματικές ενώσεις.
- Μέταλλα (Cr, Ca, Ni, Pb, Hg, Cd, Zn κ.ά.).

Η καταλληλότητα κάθε περίπτωσης για «βιοαπορρύπανση», δεν εξαρτάται μόνο από την ικανότητα βιοδιάσπασης του ρύπου, αλλά και από τις γεωλογικές συνθήκες της θέσης και τα χημικά της χαρακτηριστικά. Ευνοϊκές συνθήκες για την «ειδική βιοδιάσπαση» αποτελούν η σταθερή ροή του υπόγειου νερού σε όλες τις εποχές, η παρουσία ορυκτολογικών συστατικών στα πετρώματα του υδροφόρου που δεν ευνοούν τις μεταβολές του pH και οι υψηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου, νιτρικών, θειικών ή Fe^{3+} . Ευνοϊκές συνθήκες για την «Μηχανική βιοδιάσπαση» αποτελούν η υδροπερατότητα και γενικότερα η περατότητα του υπεδάφους στα ρευστά, η ομοιογένειά του και η σχετικά χαμηλή υπολειμματική συγκέντρωση της μη υδατικής φάσης των ρύπων (<10 gr/kg στερεού).

Λόγω της επείγουσας ανάγκης για τη «βιοαπορρύπανση», είναι προτιμότερη η επιλογή της «μηχανικής» απέναντι στην «ειδική» βιοαπορρύπανση. Η πρώτη είναι πολύ ταχύτερη από τη δεύτερη. Δοθέντος ότι πολλοί υδρογονάνθρακες, ιδιαίτερα του πετρελαίου, απαιτούν οξυγόνο για την αποσύνθεσή τους, έχει δοθεί από την «μηχανική βιοδιάσπαση» έμφαση στην παροχή οξυγόνου. Αν πρόκειται για απορρύπανση εδάφους της ακόρεστης ζώνης, τότε η οξυγόνωση γίνεται με χρησιμοποίηση ζεύγους αντλιών κενού, για τη διοχέτευση αέρα (που περιέχει οξυγόνο) και φρεατών ή γαλαριών ή τάφρων, για τη διοχέτευση υγρασίας ή/και θρεπτικών.



Εικ. 21. Επιτόπια «μηχανική βιοαπορρύπανση» ακόρεστης ζώνης. Οι αντλίες κενού κυκλοφορούν αέρα για την παροχή οξυγόνου. Η στοά (φίλτρο) διήθησης παρέχει νερό για την αναπλήρωση της υγρασίας και θρεπτικά (N, P) για την ανάπτυξη των αερόβιων βακτηρίων (U.S. N.R.C., 1993, με τροποποιήσεις).

Τα συστήματα «βιοαπορρύπανσης» του υδροφόρου, συνήθως συνίστανται από ζεύγη γεωτρήσεων έκχυσης και άντλησης, για την κυκλοφορία οξυγόνου και θρεπτικών, διαλυμένων στο νερό ή από ζεύγος αεροσυμπιεστών, για τη διοχέτευση αέρα (εικ. 21.). Η «ειδική βιοαπορρύπανση» εφαρμόζεται, όταν ο ρυθμός της φυσικής βιοδιάσπασης του ρύπου είναι ταχύτερος από τον ρυθμό μετανάστευσής του. Ο ρυθμός φυσικής βιοδιάσπασης εξαρτάται από το είδος και τη συγκέντρωση του ρύπου, το είδος και την πυκνότητα της μικροβιακής κοινότητας και από τις υδρογεωλογικές συνθήκες.

Βασικοί περιορισμοί της μεθόδου είναι η εξάντληση του οξυγόνου από τα βακτήρια και ο μικρός πληθυ-

σμός των τελευταίων, λόγω περιορισμένων ποσοτήτων θρεπτικών, χαμηλού pH ή της παρουσίας τοξικών υλικών. Κυριότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η πιθανότητα απόφραξης (clogging) του υδροφόρου ή των γεωτρήσεων, λόγω συγκέντρωσης του συνόλου των μικροοργανισμών σε μία θέση. Η απόφραξη των γεωτρήσεων ή των διαχυτήρων μπορεί να προκαλέσει επιβράδυνση της «βιοαπορρύπανσης» ή περιορισμό της σε θέσεις που δε φθάνουν τα θρεπτικά. Για την αντιμετώπιση της απόφραξης χρησιμοποιούνται τα πρωτόζωα, τα οποία καταστρέφουν τα βακτήρια. Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης της απόφραξης, είναι η εναλλαγή διαβίωσης θρεπτικών και υποστρώματος ή η χρησιμοποίηση ως πηγής οξυγόνου του υπεροξειδίου του υδρογόνου.

Συχνά η «βιοαπορρύπανση» συνδυάζεται με άλλες τεχνικές, ταυτόχρονα και συμπληρωματικά, όπως εκσκαφή και αφαίρεση βαριά ρυπασμένου εδάφους κοντά στην πηγή ρύπανσης και (ακολούθως) βιοαπορρύπανση. Ο συνδυασμός αυτός, ελαττώνει την πιθανότητα άμεσης ρύπανσης του υδροφόρου. Όταν κηλίδες ρύπου επιπλέουν στον υδροφόρο, προηγείται άντλησή του πριν τη βιοαπορρύπανση των υπολειμματικών υλικών. Η βιοαπορρύπανση μπορεί συχνά να ακολουθεί την επεξεργασία του υπόγειου νερού, με τη χρήση συστήματος «άντλησης-επεξεργασίας», ώστε να μειωθεί η έκταση του «πλούμιου». Συχνά, τέλος, προηγείται η «τεχνική» της «ειδικής» βιοαπορρύπανσης.

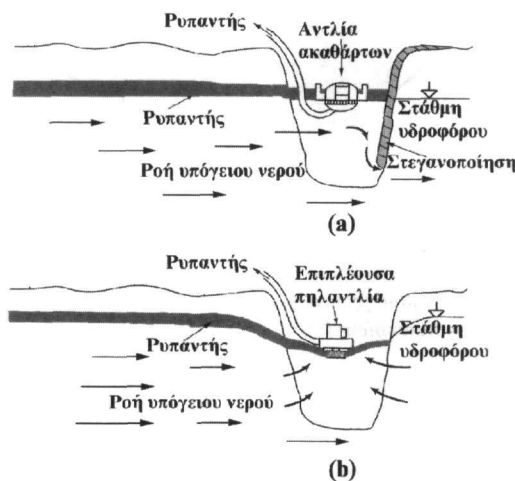
Αν και επί του παρόντος η «βιοαπορρύπανση» περιορίζεται στην απορρύπανση υδρογονανθράκων, οι μικροοργανισμοί έχουν την ικανότητα βιοδιάσπασης σχεδόν όλων των οργανικών ρύπων, αλλά και πολλών ανόργανων. Οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν τους ρύπους για την ανάπτυξή τους και την αναπαραγωγή τους. Οι οργανικοί ρύποι αποτελούν για τους μικροοργανισμούς πηγή άνθρακα αλλά και ηλεκτρονίων (ενέργειας), μέσω οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων που προκαλούνται από τους μικροοργανισμούς. Ο ρύπος παίζει το ρόλο του «δότη ηλεκτρονίων» ενώ οι μικροοργανισμοί του «δέκτη ηλεκτρονίων».

♦ Υδραυλικός κερματισμός

Στοχεύει στην ανάπτυξη δευτερογενούς υδροπερατότητας, σε συμπαγή πετρώματα με μικρή υδροπερατότητα, τόσο στην κορεσμένη όσο και την ακόρεστη ζώνη, ώστε να διευκολυνθεί η ροή του ρευστού που χρησιμοποιείται για την απορρύπανση. Μετά τον κερματισμό, ακολουθεί κάποια από τις άλλες τεχνικές απορρύπανσης.

♦ Συστήματα παγίδευσης

Τα «συστήματα παγίδευσης» (Interceptor Systems) χρησιμοποιούνται για ανάκτηση NAPL, από μικρό βάθος, με τη κατασκευή ανοιχτής τάφρου, στεγανοποιημένης κατάντη, ή κλειστής τάφρου ή ακόμα και στραγγιστήριου (εικ.22.). Στα συστήματα αυτά μπορεί να αντληθεί κατά κύριο λόγο NAPL και μικρή ποσότητα νερού (ανοιχτή, στεγανή ανάντη τάφρος), ή μεγάλη ποσότητα νερού μαζί με NAPL, (ανοιχτή τάφρος και έλεγχος του NAPL μέσα σ' αυτή).



Εικ. 22. Τάφροι παγίδευσης για τον έλεγχο της επέκτασης ρύπανσης από NAPL: (α) έλεγχος με στεγανοποίηση κατάντη και αντλία ακαθάρτων, (β) ανάκτηση νερού και ρύπου με επιπλέουσα πηλαντλία (Domenico-Schwartz, 1998, με τροποποιήσεις)

♦ Υδρογεωτρήσεις απορρύπανσης

Ίσως, η πιο δημοφιλής τεχνική αφαίρεσης “πλούμιου” ρύπανσης, από ρυπασμένο υδροφόρο, είναι, η κατάσχευή ενός αριθμού υδρογεωτρήσεων άντλησης. Το μείζον όμως πρόβλημα, είναι, ο καθορισμός του αριθμού, της διάταξης και της απόστασης ανάμεσα στις υδρογεωτρήσεις απορρύπανσης. Ο καθορισμός της βέλτιστης απόστασης των υδρογεωτρήσεων, επιδρά στην αποτελεσματικότητα της απορρύπανσης ρυπανθέντος υδροφόρου. Η βέλτιστη απόσταση r , εφόσον οι υδρογεωτρήσεις απορρύπανσης, μέσω της άντλησής τους διαταχθούν γραμμικά (ευθύγραμμη), είναι συνάρτηση του κατά πόσον ο αριθμός τους είναι περιττός ή άρτιος (Ahmad 1995). Όσο αυξάνεται ο αριθμός των υδρογεωτρήσεων, πέρα από τη βέλτιστη τιμή του, το μολυσμένο νερό ρέει στο χώρο ανάμεσα στις υδρογεωτρήσεις άντλησης, χωρίς να αντλείται από τις τελευταίες. Όταν η απόσταση ανάμεσα στις υδρογεωτρήσεις μειώνεται κάτω από τη βέλτιστη τιμή, πολλές γραμμές ροής διέρχονται, χωρίς λόγο, από τις υδρογεωτρήσεις που βρίσκονται στην αρχή της ευθύγραμμης διάταξης. Μόνο η βέλτιστη διάταξη των υδρογεωτρήσεων εξασφαλίζει πλήρη άντληση του ρυπανθέντος όγκου υπόγειου νερού, δηλαδή όλες οι γραμμές ροής, που διέρχονται ανάμεσα στις θέσεις των υδρογεωτρήσεων, “συλλαμβάνονται” από αυτές. Έτσι η θέση y , αριθμού υδρογεωτρήσεων n , διατεταγμένων ευθύγραμμη και σε ίσες αποστάσεις, δίνεται από τις σχέσεις $y=nd/2$ για περιττό αριθμό υδρογεωτρήσεων και $y=(n-1)d/2$ για άρτιο αριθμό υδρογεωτρήσεων. Ο “**συντελεστής βέλτιστης απόστασης**” (Optimum well-spacing factor) d υπολογίστηκε (Ahmad, 1995) με τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων και με $n \leq 31$, όπως στο πίνακα III, όπου n_a άρτιος και n_p περιττός αριθμός υδρογεωτρήσεων. Ακολούθως, για τον υπολογισμό της πραγματικής απόστασης r ανάμεσα στις υδρογεωτρήσεις, η τιμή του συντελεστή d πολλαπλασιάζεται με το πηλίκο Q/bv , όπου Q η παροχή άντλησης καθεμιάς γεώτρησης, b το πάχος του υδροφόρου και v η ταχύτητα Darcy. Δηλαδή, $r=d(Q/bv)$.

Από τα πιο πάνω προκύπτει, ότι η βέλτιστη απόσταση r είναι συνάρτηση του συνολικού αριθμού των υδρογεωτρήσεων, του κατά πόσον ο αριθμός αυτός είναι άρτιος ή περιττός, του πάχους του υδροφόρου b , της τοπικής ταχύτητας ροής του υπόγειου νερού και της παροχής άντλησης καθεμιάς υδρογεώτρησης. Συνιστάται ο αριθμός των υδρογεωτρήσεων να είναι άρτιος.

Πίνακας III. Υπολογισμός του συντελεστή βέλτιστης απόστασης γεωτρήσεων απορρύπανσης ανάλογα με τον αριθμό τους (Ahmad, 1995).

n_p	3	5	7	9	11	13	15	17
d_p	0,4024	0,415	0,4462	0,452	0,4615	0,4659	0,4698	0,4723
d_a	0,3193	0,388	0,4171	0,4332	0,4439	0,4516	0,4573	0,4617
n_a	2	4	6	8	10	12	14	16
n_p	19	21	23	25	27	29	31	
d_p	0,4746	0,4762	0,4775	0,4787	0,4797	0,4808	0,4808	
d_a	0,4653	0,4682	0,4707	0,4727	0,4745	0,476	0,4765	
n_a	18	20	22	24	26	28	30	

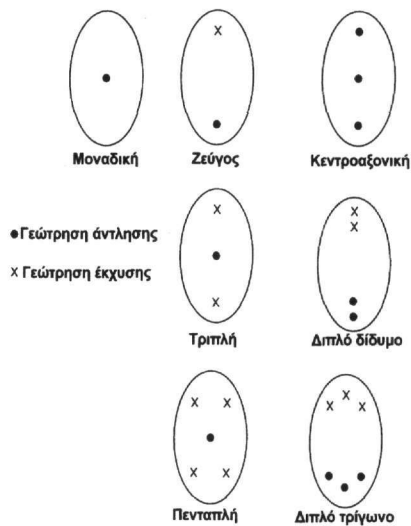
Ο συνδυασμός άντλησης-έκχυσης δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα, ιδιαίτερα όταν οι γεωτρήσεις άντλησης-έκχυσης διατάσσονται κατάλληλα, ως προς το «πλούμιου».

Έχουν προταθεί επτά διατάξεις γεωτρήσεων (εικ. 23.), οι οποίες θεωρούνται ως πλέον αποτελεσματικές για την απορρύπανση.

Η λιγότερο αποτελεσματική λύση είναι εκείνη, που προβλέπει «μοναδική» γεώτρηση άντλησης, η οποία πάντως πρέπει να τοποθετείται στο κέντρο βάρους του «πλούμιου». Το «ζεύγος», αποτελούμενο από μια γεώτρηση άντλησης και μια γεώτρηση έκχυσης, **δίνει καλύτερα αποτελέσματα, από τη χρησιμοποίηση μιας μοναδικής γεώτρησης άντλησης**, λόγω της αύξησης της υδραυλικής κλίσης προς την κατεύθυνση της γεώτρησης άντλησης. Το ζεύγος πάντως οδηγεί στην άντληση μεγαλύτερης ποσότητας νερού, με μικρότερη συγκέντρωση ρύπου, που πρέπει να υποστεί επεξεργασία. Όταν η υδραυλική κλίση είναι μεγάλη, η «**τριπλή διάταξη**» υπερέρχει του ζεύγους επειδή δημιουργείται υδραυλικός φραγμός, από την κατάντη γεώτρηση έκχυσης. Αν αποτύχει άλλωστε η γεώτρηση άντλησης, η κατάντη γεώτρηση έκχυσης (εμπλουτισμού), μπορεί να την αντικαταστήσει. Η «**πενταπλή διάταξη**» χρησιμοποιείται κυρίως για την αντιμετώπιση ρύπανσης από υδρογονάνθρακες, ιδιαίτερα δε, για δευτερευόντως αφαίρεση του ρυπασμένου νερού, μετά από κατάκλυση με νερό. Το σύστημα «**διπλού κελιού**», «διπλό δίδυμο», αποτελούμενο από ένα εσωτερικό κελί άντλησης και ένα εξωτερικό

κό κελί έκχυσης, δημιουργεί υδραυλικό φραγμό, με αποτέλεσμα τη γρήγορη απομάκρυνση (άντληση) του «πλούμιου», ιδιαίτερα όταν το εσωτερικό κελί σχεδιάζεται αρκετά ευρύ. Η ποσότητα έκχυσης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την παροχή άντλησης. Έτσι η ποσότητα του ρυπασμένου νερού, που χρειάζεται επεξεργασία, μειώνεται. Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει δύο γεωτρήσεις άντλησης και δύο γεωτρήσεις έκχυσης που διατάσσονται κατά μήκος γραμμής, που διχοτομεί το «πλούμιο». Η ποσότητα έκχυσης συνήθως είναι ίση με την παροχή άντλησης, πλην της περίπτωσης του διπλού κελιού. Στη «**μοναδική**» και την «**κεντροαξονική**» διάταξη δεν προβλέπεται έκχυση. Όταν η φυσική ροή στον υδροφόρο είναι μικρή, δεν είναι αποτελεσματική η διάνοια «**μοναδικής**» γεώτρησης άντλησης στο κατάντη όριο του «πλούμιου», διότι θα χρειαστεί πολύς χρόνος μέχρι το «πλούμιο» να φτάσει στη γεώτρηση. Αντιθέτως, όταν η φυσική ροή είναι μεγάλη, τότε η γεώτρηση άντλησης πρέπει να τοποθετείται στο κατάντη όριο του «πλούμιου».

Με τη διάταξη «**διπλού κελιού**», ο «**χρόνος απορρύπανσης**», δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται μέχρι ο λόγος $C_{max}/C_{πηγής}$ - όπου C_{max} η μέγιστη συγκέντρωση ρύπου στον υδροφόρο και $C_{πηγής}$ η συγκέντρωση του ρύπου στην πηγή ρύπανσης - να γίνει $<0,00005$, σε ολόκληρο τον υδροφόρο, ανέρχεται σε μερικά χρόνια. Εξ ίσου σχεδόν καλά αποτελέσματα δίνει και η διάταξη «**διπλού τριγώνου**». Οι χρόνοι απορρύπανσης στο πείραμα των Satkin-Bedient, ανάλογα με τη θέση της «μοναδικής» γεώτρησης άντλησης, ήταν της τάξης των 3,19 μέχρι και πάνω από 4 χρόνια.



Εικ.23. Διατάξεις ελέγχου και περιορισμού της ρύπανσης, με γεωτρήσεις άντλησης και άντλησης – έκχυσης (Sat-king-Bedient, 1988).

Το πλεονέκτημα της μείωσης του χρόνου απορρύπανσης, με τη χρησιμοποίηση γεωτρήσεων έκχυσης, ενδεχομένως αντισταθμίζεται από την αύξηση του όγκου του νερού έκχυσης. Πάντως ο χρόνος απορρύπανσης, όταν χρησιμοποιούνται γεωτρήσεις μόνο άντλησης («**μοναδική**» και «**κεντροαξονική**» διάταξη), είναι σημαντικά μεγαλύτερος από το χρόνο απορρύπανσης των διατάξεων που περιλαμβάνουν γεωτρήσεις άντλησης και έκχυσης, με μοναδική ίσως εξαίρεση την «**πενταπλή διάταξη**». Δε φαίνεται πάντως να υπάρχει διαφορά στο χρόνο απορρύπανσης των διαφόρων διατάξεων που περιλαμβάνουν και έκχυση, όταν η μεταβιβασιμότητα είναι της τάξης του 10^{-4} m²/s. Η διάταξη «**διπλού κελιού**», επιτυγχάνει τον υψηλότερο βαθμό (99,9%) μείωσης της συγκέντρωσης του ρύπου.

Γενικώς, η αποτελεσματικότητα των διαφόρων διατάξεων εξαρτάται από τη θέση των γεωτρήσεων, την παροχή άντλησης και τέλος από τη μεταβιβασιμότητα, την υδραυλική κλίση και το συντελεστή διασποράς του υδροφόρου. Όταν όλοι οι άλλοι παράγοντες παραμένουν σταθεροί, ο χρόνος απορρύπανσης συνδέεται με αντίστροφη σχέση με την παροχή άντλησης.

Η μείωση του χρόνου απορρύπανσης, συνεπάγεται και μείωση του όγκου του νερού που χρειάζεται επεξεργασία. Όταν η υδραυλική κλίση είναι γενικώς μικρή, την καλύτερη απόδοση έχουν οι διατάξεις «**τριπλή**», «**ζεύγος**» και «**διπλό κελύφος**», αλλά απαιτούν επιτόπια επεξεργασία και επανεισαγωγή. Όταν η υδραυλική κλίση είναι μεγάλη και η προκαλούμενη από την άντληση πτώση στάθμης είναι επίσης μεγάλη, την καλύτερη απόδοση έχει η «**τριπλή**» διάταξη. Αντιθέτως, καμία διάταξη δεν είναι αποτελεσματική, όταν η υδραυλική

κλίση και ο συντελεστής διασποράς είναι υψηλοί και η προκαλούμενη πτώση στάθμης μικρή. Η «κεντροαξονική» διάταξη είναι αποτελεσματική (μείωση $C_{\max}/C_{\text{πηγής}}$ 99%), τόσο σε υψηλή όσο και σε χαμηλή υδραυλική κλίση, αλλά δημιουργείται το πρόβλημα διάθεσης του αντλούμενου νερού.

Όταν επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση του χρόνου απορρύπανσης, θα πρέπει να συνδυάζονται η «κεντροαξονική» και η διάταξη «διπλού τριγώνου». Στις περισσότερες περιπτώσεις πάντως επαρκεί η «τριπλή» διάταξη.

- **Απορρύπανση της ακόρεστης ζώνης**

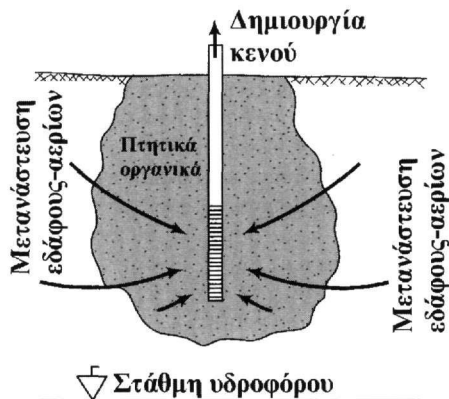
Η απορρύπανση της ακόρεστης ζώνης επιτυγχάνεται με χρησιμοποίηση μιας ή περισσότερων από τις πιο κάτω τεχνικές:

- ♦ **Απομάκρυνση «εδάφους-ατμών» (SVE method)**

Είναι η πιο αποτελεσματική τεχνική απορρύπανσης της ακόρεστης ζώνης από πτητικές οργανικές ενώσεις, όπως οι ρύποι τύπου NAPL, ή ακόμα από διαλυμένους στο εδαφικό νερό ρύπους ή από ρύπους ροφημένους στα στερεά σωματίδια της ακόρεστης ζώνης. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί φουσητήρες κενού, σε συνδυασμό με γεωτρήσεις «εκτόνωσης», δηλαδή αφαίρεσης εδάφους-αερίου, ώστε να δημιουργηθεί ροή αέρα μέσω της ρυπασμένης ζώνης (Εικ. 24.). Ο ρύπος εξαερώνεται, σε συγκεντρώσεις που καθορίζονται από την πίεση των ατμών του ρύπου. Τα πτητικά που βγαίνουν από τη γεώτρηση, ακολούθως απομακρύνονται. Ο αέρας ακολούθως καθαρίζεται στην επιφάνεια με ενεργό άνθρακα ή οδηγείται σε καύση. Η θεωρητική «παροχή» απορρύπανσης, R_{air} , δίνεται από τη σχέση $R_{\text{air}} = CQ$ όπου C η συγκέντρωση του ρύπου σε αέρια φάση και Q η παροχή του αερίου.

- ♦ **Βιοαερισμός (Bioventing):**

Συνίσταται στον αερισμό της ακόρεστης ζώνης, προκειμένου να διευκολυνθεί η επιτόπια βιολογική διεργασία και να επιταχυνθεί με αυτόν τον τρόπο η βιοαπορρύπανση. Είναι η πιο φτηνή και αποτελεσματική μέθοδος απορρύπανσης της ακόρεστης ζώνης από οποιουδήποτε οργανικούς ρύπους και διαφέρει από την μέθοδο SVE - η οποία είναι αποτελεσματική για την απορρύπανση της ακόρεστης ζώνης από οργανικές ενώσεις μικρού, κυρίως, μοριακού βάρους, με εξαέρωσή τους - στο ότι διευκολύνει τη βιοδιάσπαση αερόβια βιοδιασπόμενων οργανικών ενώσεων. Η διάταξη βιοαερισμού περιλαμβάνει την κατασκευή γεώτρησης μέσα από την οποία διαβιβάζεται αέρας σε μικρές ποσότητες (γεώτρηση αερισμού).



Εικ. 24. Δημιουργία κενού για την απομάκρυνση πτητικών οργανικών από την ακόρεστη ζώνη. Τροποποίηση σχεδίου του Schwartz (1988).

- ♦ **Έκπλυση του εδάφους**

Η αφαίρεση των ρύπων γίνεται με κατάκλυση με νερό, με παράλληλη χρήση επιφανειοδραστικών ουσιών ή με έκχυση ατμών. Τα ρευστά της έκπλυσης ακολούθως αντλούνται.

♦ **Εξαέρωση με χρήση υψίσουχων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (RF method)**

Χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς για την αφαίρεση από την ακόρεστη ζώνη πτητικών υδρογονανθράκων. Τα υψίσουχα ηλεκτρομαγνητικά κύματα προκλήθηκαν από πηγή ισχύος 40 kw και διαβιβάζονταν στο υπέδαφος μέσω κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων (τρεις σειρές από δεκατρία ηλεκτρόδια η κάθε μια), επί δώδεκα ημέρες. Η θέρμανση του υπεδάφους στους 150 °C, είχε ως αποτέλεσμα την εξαέρωση των πτητικών υδρογονανθράκων και την συλλογή τους, μέσω φραγμού υδρατμών. Στη συνέχεια, μετά από υγροποίηση, οι απομεινάντες αέριοι υδρογονάνθρακες προσροφήθηκαν σε ενεργό άνθρακα (Downey, 1990).

♦ **Εκσκαφή**

Πρόκειται για φυσική αφαίρεση του ρυπασμένου εδάφους, είτε για την απομάκρυνσή του εκτός της περιοχής, είτε για την επεξεργασία του επιτόπου με «βιοαπορρύπανση», καύση, αερισμό ή άλλη τεχνική. Ο ενταφιασμός του δεν συνιστάται, γιατί απλώς μεταθέτει το πρόβλημα σε άλλη περιοχή, εκτός εάν προηγηθεί επεξεργασία, η οποία θα κατεβάσει τη συγκέντρωση του ρύπου σε αποδεκτά για ταφή (π.χ. υγρά καύσιμα) επίπεδα. Πριν την επαναπλήρωση της εκσκαφής, απαιτείται δειγματοληψία και ανάλυση για την επιβεβαίωση της αφαίρεσης του ρύπου.

Συχνά η εκσκαφή συνδυάζεται με:

- **τη διάθεση του εδάφους σε χωματερή.** Η μέθοδος απορροπώνει τη θέση που σημειώθηκε η ρύπανση όχι όμως και την ακόρεστη ζώνη. Η ρύπανση μεταβιβάζεται απλώς στη χωματερή.
- **τον αερισμό της ακόρεστης ζώνης,** ο οποίος επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση, οριζόντια, στο υπέδαφος, στη ρυπασμένη ακόρεστη ζώνη, διάτρητων σωλήνων οι οποίοι συνδέονται με αεροσυμπιεστή ή φυσήτρια, που βρίσκεται στην επιφάνεια. Έτσι τα αέρια του εδάφους απομακρύνονται από το έδαφος, που περιβάλλει τους σωλήνες.
- **την βιοαπορρύπανση (εικ. 20.)**
- **τη μετάθεση του εδάφους και επιτόπιο αερισμό.** Το έδαφος που αφαιρείται τοποθετείται σε γειτονικό γήπεδο και υπόκειται σε αερισμό, όπως περιγράφεται πιο πάνω. Η μέθοδος αποδίδει σε υλικά υψηλής υδροπερατότητας.
- **τον αερισμό βιολογικά βελτιωμένου εδάφους.** Το έδαφος που αφαιρείται, απλώνεται πάνω σε συνθετικό στεγανό υλικό και μέχρι μισό μέτρο πάχος. Ακολούθως, προστίθεται περιοδικώς λίπασμα και το έδαφος ανακατεύεται περιοδικώς, τουλάχιστον κάθε τρεις μήνες. Πάνω από τη στεγανή επένδυση τοποθετείται αμμόφιλτρο, πάχους περίπου 15-20 cm. Η επένδυση περιβάλλεται περιμετρικά από αναβαθμό, ώστε να αποφευχθεί απορροή. Το έδαφος έτσι αερίζεται και επιτυγχάνεται επιτάχυνση της «βιοαπορρύπανσης», η οποία διεγείρεται από την προσθήκη του λιπάσματος, που περιέχει θρεπτικά. Ο συνδυασμός εξάτμισης και βιοαπορρύπανσης, προκαλεί καταστροφή και εξαέρωση των ρύπων.
- **θερμική επεξεργασία,** με την οποία εξαερώνονται οι πτητικοί υδρογονάνθρακες. Το έδαφος οδηγείται σε θερμαινόμενο κλίβανο, όπου θερμαίνεται μέχρι θερμοκρασία 250-300° C, οπότε οι πτητικοί και ημιπτητικοί υδρογονάνθρακες εξαερώνονται. Ακολούθως, οι ατμοί, μαζί με σωματίδια αργίλου και γενικώς εδάφους, περνούν από διαχωριστήρα, όπου τα στερεά σωματίδια συλλέγονται και μεταφέρονται πίσω στον κλίβανο. Στη συνέχεια, οι ατμοί περνούν από καυστήρα, όπου καταστρέφονται οι πτητικοί υδρογονάνθρακες, σε υψηλές θερμοκρασίες, 800-1050 °C. Τα αέρια υποπροϊόντα της καύσης εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα. Η απόδοση του συστήματος κυμαίνεται από 5 μέχρι 30 t/hr.
- **αφαίρεση αερίων από το έδαφος:** Γίνεται με γεωτρήσεις «εκτόνωσης». Πρόκειται για αποτελεσματική τεχνική, στην περίπτωση ρύπανσης παχιάς ακόρεστης ζώνης από υδρογονάνθρακες που προέρχονται από υπόγεια αποθήκευσή τους σε σταθμούς ή εγκαταστάσεις υγρών καυσίμων. Υπάρχει πάντως το πρόβλημα της ρύπανσης της ατμόσφαιρας, σε περίπτωση εκπομπής των αερίων χωρίς προηγούμενη επεξεργασία.

♦ **Απορρύπανση εξοπλισμού**

Ένα σημαντικό μέρος των εργασιών απορρύπανσης αποτελεί η απορρύπανση του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται. Ο καθαρισμός π.χ. του γεωτρήσανου απαιτεί την εκτόξευση με πίεση ζεστού νερού, σε συνδυασμό με τη χρησιμοποίηση κατάλληλων βουρτσών. Είναι δυνατή η χρησιμοποίηση ρευστού σαπουνιού, αρχικά σε συνδυασμό με βούρτσες, αλλά θα πρέπει να ακολουθήσει το ξέπλυμα με εκτόξευση καθαρού πόσιμου νερού και στη συνέχεια το στέγνωμα πριν την αποθήκευση.

Συχνά, χρησιμοποιείται η τεχνική εφαρμογής ατμού με υψηλή πίεση για τον καθαρισμό βαρέων μηχανημάτων και γεωτρήσανων, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η αναγκαία ποσότητα νερού πλύσης. Η τεχνική όμως

αυτή έχει δύο βασικούς περιορισμούς: την αδυναμία παραγωγής μεγάλης ποσότητας ατμού στο πεδίο και επαρκούς πίεσης για την απομάκρυνση από τον εξοπλισμό πλαστικής αργίλου ή/και υπολειμμάτων. Έχουν χρησιμοποιηθεί όμως και πιο σύνθετες τεχνικές, για την απορρύπανση εξαρτημάτων γεωτρύπανου, χειροκίνητων δειγματοληπτών εδάφους κ.λπ., όπως:

- εμβάπτιση και τρίψιμο με βούρτσα, σε μίγμα απορρυπαντικού και νερού,
- Ξέπλυμα με καθαρό νερό,
- Ξέπλυμα με ισοπροπυλική αλκοόλη, μεθανόλη ή ακετόνη,
- πολλαπλό ξέπλυμα με απεσταγμένο νερό.

Η απορρύπανση των μεταλλικών δειγματοληπτών γίνεται, συνήθως, (δειγματοληψία ανόργανων) με το πλύσιμο με υγρό σαπούνι, ξέβγαλμα με αραιό διάλυμα οξέος (π.χ. 10% νιτρικό ή υδροχλωρικό) και ακολούθως με ξέβγαλμα με απεσταγμένο ή απιονισμένο νερό. Αν ο δειγματολήπτης έχει χρησιμοποιηθεί για τη δειγματοληψία οργανικών, η απορρύπανσή του γίνεται με πλύσιμο, αρχικά, με νερό απιονισμένο ή απεσταγμένο ή με αντλούμενο υπόγειο νερό, ακολούθως ξέβγαλμα με διαλυτικό μέσο (ακετόνη, εξάνιο, ισοπροπυλική αλκοόλη, καθαρή μεθανόλη ή συνδυασμός) και στη συνέχεια με ξέβγαλμα με απιονισμένο νερό.

Για την αφαίρεση λιπαντικών από τον εξοπλισμό, χρησιμοποιούνται συνήθως διαλυτικά, όπως ακετόνη και εξάνιο. Το σύνθημα όμως πρόβλημα της απορρύπανσης του εξοπλισμού είναι η παραγωγή επικινδύνων υγρών αποβλήτων, αλλά και η καταστροφή τιμημάτων του εξοπλισμού, που αποτελούνται από πλαστικό ή ελαστικό.

Πρακτικά ο καλύτερος τρόπος απορρύπανσης εξοπλισμού είναι αρχικά το ξέπλυμα με νερό (απιονισμένο, απεσταγμένο ή φυσικό καθαρό), ακολούθως το πλύσιμο και βούρτσισμα με ειδικά απορρυπαντικά και τέλος το ξέπλυμα δύο ή τρεις φορές με απορρυπαντικό.

Στον πίνακα IV παρουσιάζονται οι διαθέσιμες σήμερα τεχνικές απορρύπανσης του εξοπλισμού. Τα υλικά πάντως που χρησιμοποιούνται για την απορρύπανση του εξοπλισμού, είτε είναι επικίνδυνα, είτε παράγουν επικίνδυνα απόβλητα και κατά συνέπεια αποτελούν “έν δυνάμει” πηγές ρύπανσης, συνδεδεμένες με τις διαδικασίες απορρύπανσης (ρύπανση του νερού ύδρευσης ή του νερού που χρησιμοποιείται για απόσταξη ή για απιονισμό, διαλυτικά μέσα ή αραιωμένα οξέα, αερολύματα, πτητικά οργανικά, αντιψυκτικά, όπως η αιθυλική γλυκόλη, ρευστά που χρησιμοποιούνται στα υδραυλικά συστήματα, υδρογονάνθρακες, ορυκτέλαια κ.λπ.).

Πίνακας IV Τεχνικές Απορρύπανσης εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στις εργασίες απορρύπανσης (G. Nielsen, 1991, με τροποποιήσεις).

Φυσική Απορρύπανση	Χημική Απορρύπανση
Εκτόξευση αέρα	Πλύσιμο με νερό
Εκτόξευση νερού	Πλύσιμο με καθαρό νερό και ξέβγαλμα με απιονισμένο ή απεσταγμένο νερό
Χρήση ξηρού πάγου	Πλύσιμο με διάλυμα ειδικού απορρυπαντικού, σε συνδυασμό με ξέπλυμα με απιονισμένο ή απεσταγμένο νερό
Καθαρισμός με φρέον σε υψηλή πίεση	Καθαρισμός με ατμό με πίεση
Καθαρισμός με υπερήχους	Πλύσιμο με ζεστό νερό με πίεση
Καθαρισμός κενού	Ξέπλυμα, σε συνδυασμό με οξέα και απιονισμένο - απεσταγμένο νερό
Φυσική απομάκρυνση - βούρτσισμα	Συνδυασμένο ξέπλυμα με διαλυτικά μέσα (φυτοφαρμάκων) και απιονισμένο-απεσταγμένο νερό

• **Απονίτρωση υπόγειων νερών**

Διάφορες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για την απονίτρωση των υπόγειων νερών, τα οποία περιέχουν συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων, που ξεπερνούν τα όρια ποσιμότητας. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι:

♦ **Φυσική απονίτρωση**

Η διακοπή της λίπανσης, αποτελεί τον πιο αποτελεσματικό τρόπο απορρύπανσης των υδροφόρων, από τη νιτρορρύπανση γεωργικής προέλευσης.

Ο υπολογισμός του χρόνου t που απαιτείται για την απορρύπανση μέσω της διακοπής της λίπανσης των εδαφών με αζωτούχα λιπάσματα μπορεί να γίνει από τη σχέση: $t = t_i / [\ln (C_i/C_0)]$, όπου $t_i = b\theta/I$ ο χρόνος

παραμονής του ρυπασμένου νερού στον υδροφόρο, b το πάχος του τελευταίου, θ το πορώδες του, και I ο εμπλουτισμός του υδροφόρου, ενώ C_t είναι η συγκέντρωση των νιτρικών μετά πάροδο χρόνου t από τη διακοπή των λιπάνσεων, δηλαδή η σκοπούμενη συγκέντρωση των νιτρικών μετά τη διακοπή της λίπανσης και C_0 η αρχική αυξημένη συγκέντρωση των νιτρικών. Εργασίες των Λαμπράκη et al (1998) από διάφορες περιοχές της Πελοποννήσου, αναφέρουν ως χρόνο φυσικής απονίτρωσης των ελεύθερων υδροφόρων, μερικές δεκαετίες (30-60 χρόνια), ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υδροφόρου, τον βαθμό νιτρορρύπανσής του και τον ρυθμό εμπλουτισμού του.

♦ *Ιοντική Ανταλλαγή.*

Ως ιοντοανταλλάκτες χρησιμοποιούνται συνήθως συνθετικές ρητίνες. Η ιοντοανταλλαγή λαμβάνει χώρα ανάμεσα στα NO_3^- και στα Cl^- , όταν το νερό διέρχεται από τις ρητίνες. Οι ρητίνες αυτές (ανιοντοανταλλάκτες) είναι είτε ασθενείς είτε ισχυρές βάσεις (αμίνες οι οποίες είναι παράγωγα του NH_4^+ ή ενώσεις του NH_4^+). Οι εν λόγω ρητίνες παρουσιάζουν υψηλή επιλεκτικότητα σε $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ και μέτρια επιλεκτικότητα σε $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$. Η μέθοδος είναι φτηνή και αποτελεσματική. Η αναγέννηση των ρητινών γίνεται με τη χρήση NaCl . Οι πιο συνηθισμένες τεχνικές που εφαρμόζονται είναι:

- **απλού στρώματος** (single-bed process) όπου χρησιμοποιείται ανιονική ρητίνη, ισχυρά βασική, η οποία αναγεννάται με NaCl .
- **διπλού στρώματος** (two-bed process), όπου χρησιμοποιείται ισχυρά όξινη ρητίνη σε συνδυασμό με ελαφρά βασική αμμωνία, η οποία αναγεννάται με HCl .
- **αντίστροφη Όσμωση.** Το νερό διέρχεται από ημιπερατή μεμβράνη, ενώ τα νιτρικά δεν διέρχονται από αυτήν. Οι συνηθείς μεμβράνες που χρησιμοποιούνται είναι τα πολυαμίδια, η οξυκυταρίνη και άλλα πολυμερή. Το νερό, προς απονίτρωση, υποβάλλεται, στο θάλαμο της αντίστροφης όσμωσης, σε πιέσεις που ξεπερνούν την αντίστοιχη οσμωτική του πίεση. Η μέθοδος δεν εφαρμόζεται αποκλειστικά για την απονίτρωση, αλλά συλλογικά για την αφαλάτωση ή τη μείωση του TDS, δοθέντος ότι η αντίστροφη όσμωση έχει υψηλή επιλεκτικότητα σε ορισμένα μόνο ιόντα. Το μείζον πρόβλημα είναι η απόφραξη των μεμβρανών κυρίως από τα ανθρακικά ιόντα.

♦ *Ηλεκτροδιάλυση.*

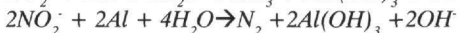
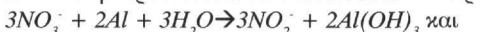
Κατά τη μέθοδο αυτή τα ιόντα διέρχονται επιλεκτικά, μέσω ημιπερατών μεμβρανών, από ένα διάλυμα σε ένα άλλο διάλυμα, κάτω από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται στη μονάδα. Οι μεμβράνες χρησιμοποιούνται σε ζεύγη (βαθμίδες), τοποθετημένες εναλλάξ σε θαλάμους για κατιόντα (π.χ. Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) και ανιόντα (π.χ. Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- και HCO_3^-). Όταν ηλεκτρικό ρεύμα περάσει από τη διάταξη των μεμβρανών, τα ιόντα διέρχονται επιλεκτικά από την αντίστοιχη ανιοντική ή κατιοντική μεμβράνη. Έτσι στους αντίστοιχους θαλάμους, που εναλλάσσονται μεταξύ τους, η ιοντική συγκέντρωση είναι υψηλότερη (σαλαμούρα) ή χαμηλότερη (απιονισμένο νερό), από την αρχική συγκέντρωση του νερού. Το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι η απόφραξη των μεμβρανών και η υψηλή κατανάλωση ενέργειας.

Απονίτρωση με φύκη.

Συνίσταται στη δημιουργία βιομάζας από φύκη, τα οποία τρέφονται από τα νιτρικά. Η μέθοδος είναι φτηνή και αποτελεσματική σε δεξαμενή μικρού βάθους, όπου οδηγούνται οι επιστροφές άρδευσης.

Χημική απονίτρωση.

Κατ' αυτήν προστίθεται Al στο πλούσιο σε νιτρικά νερό, σε pH μεταξύ 9 και 10,5, οπότε:



Αν το τελικό προϊόν είναι η αμμωνία, τότε ακολουθεί αεροδιαχωρισμός (Air-stripping), ώστε να διοχετευθεί η αμμωνία στην ατμόσφαιρα.

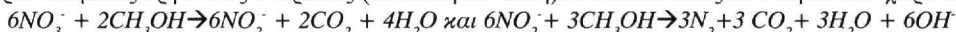
Χρησιμοποίηση των NO_3^- ως δεκτών ηλεκτρονίων.

Κατά την επιτόπια βιοαπορρύπανση υδρογονανθράκων, διαβιβάζεται στο υπέδαφος νερό πλούσιο σε NO_3^- , προκειμένου να χρησιμοποιηθεί από τα βακτήρια ως δέκτης ηλεκτρονίων.

♦ Βιολογική απονίτρωση

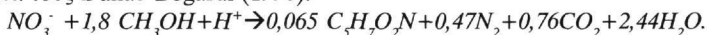
Η μέθοδος στηρίζεται στην αρχή της βιοχημικής μετατροπής των νιτρικών σε αποδεκτά υποπροϊόντα. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται μικροοργανισμοί, οι οποίοι χρησιμοποιούν τα C και N ως θρεπτικά και το ελεύθερο O₂, το οποίο προστίθεται, ως δέκτη ηλεκτρονίων από τα αερόβια μικρόβια, τα οποία με αυτό τον τρόπο καταναλώνουν το ελεύθερο οξυγόνο. Όταν απουσιάζει το ελεύθερο οξυγόνο μερικοί μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν ως δέκτη ηλεκτρονίων τα νιτρικά, κάτω από ανοξικές συνθήκες. Στην περίπτωση αυτή τα νιτρικά ανάγονται σε αέριο άζωτο. Οι σχετικοί μικροοργανισμοί είναι δυνητικά αναερόβιοι. Συχνά προστίθεται οργανικός άνθρακας (με τη μορφή της μεθανόλης), ώστε να επιταχυνθεί η απονίτρωση.

Τα βακτήρια χρησιμοποιούν αντί του οξυγόνου, που απουσιάζει σε αναερόβιες συνθήκες, τα νιτρικά, ως τελικό δέκτη ηλεκτρονίων, οπότε τα νιτρικά ανάγονται σε αέριο N₂. Πηγή ενέργειας για τα βακτήρια αποτελεί ο προστιθέμενος οργανικός άνθρακας (αναπνοή-σύνθεση). Οι διαδικασίες που λαβαίνουν χώρα είναι:

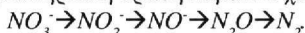


Η βακτηριακή σύνθεση έχει ως εξής: $3NO_3^- + 14CH_3OH + CO_2 + 3H^+ \rightarrow 3C_3H_7O_2N + H_2O$, οπότε παράγεται βακτηριακός ιστός.

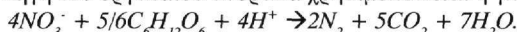
Κατά τους Dahab-Bogardi (1990):



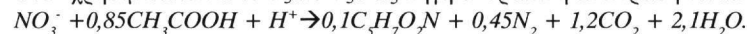
Η βακτηριακή δράση λαβαίνει χώρα σε τέσσερις διακριτές φάσεις ως εξής:



Η πηγή ενέργειας (οργανικός άνθρακας), προέρχεται από το θάνατο, στο έδαφος, φυτικών και ζωικών οργανισμών ή από την προσθήκη μεθανόλης, κυτταρίνης, οξικού οξέος, αιθανόλης, γλυκόζης ή μελάσας. Όταν ως πηγή του οργανικού άνθρακα χρησιμοποιείται η γλυκόζη, η αντίδραση απονίτρωσης είναι:



Όταν χρησιμοποιείται το οξικό οξύ ως πηγή άνθρακα η αντίδραση είναι:



Τέλος έχουν αναπτυχθεί δύο τεχνικές βιολογικής απονίτρωσης στην Ευρώπη (Richard, 1988): η **ετεροτροφική Nitrazu** που χρησιμοποιεί ως πηγή άνθρακα οξικό οξύ και αιθανόλη και η **Biodenit** που χρησιμοποιεί την αιθανόλη ως πηγή άνθρακα. Και οι δύο τεχνικές χρησιμοποιούν ετερότροφα βακτήρια, δηλαδή βακτήρια που χρησιμοποιούν την οργανική ουσία ως δότη ηλεκτρονίων, σε αντίθεση με τα αυτότροφα βακτήρια που χρησιμοποιούν ως δότες ηλεκτρονίων το υδρογόνο και το ανηγμένο θείο.

♦ Επιτόπια Βιοαπονίτρωση.

Οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί, αναφέρονται, κυρίως, στην απονίτρωση των λιμάτων σε συστήματα σηπτικών βόθρων ή στη ρύπανση από διάθεση αποβλήτων. Η μέθοδος συνίσταται στο συνδυασμό άντλησης και διοχέτευσης στο ρυπασμένο υδροφόρο υποστρώματος. Έχουν αναπτυχθεί τέσσερις βασικές διατάξεις ως εξής:

- i) **Γεώτρηση άντλησης εμπλουτισμού**, που εμπλουτίζει με υπόστρωμα το ρυπασμένο υδροφόρο και σε ένα μεταγενέστερο στάδιο και αφού δοθεί ο απαραίτητος χρόνος για τη βιοαπορρύπανση, αντλεί απονιτρωμένο νερό.
- ii) **Ζεύγος γεωτρήσεων εμπλουτισμού άντλησης σε διαφορετικές αποστάσεις**, οι οποίες κατασκευάζονται σε διαφορετικές θέσεις που απέχουν μεταξύ τους 10-20 μ.
- iii) **Ζεύγος γεωτρήσεων εμπλουτισμού άντλησης σε διαφορετικά βάθη**, οι οποίες κατασκευάζονται η μία κοντά στην άλλη, αλλά σε διαφορετικά βάθη. Από τη μία γεώτρηση διαβιβάζεται το ρυπασμένο με νιτρικά νερό και από την άλλη γεώτρηση αντλείται το απονιτρωμένο νερό.
- iv) **Σύστημα Μαργαρίτας**. Μία γεώτρηση άντλησης περιβάλλεται από γεωτρήσεις εμπλουτισμού, μικρότερης διαμέτρου, από τις οποίες διαβιβάζεται στον υδροφόρο το οργανικό υπόστρωμα και θρεπτικά.

Στις τρεις πρώτες πιο πάνω περιπτώσεις, απαιτείται η χρησιμοποίηση μιας ή περισσότερων επιπλέον γεωτρήσεων, για τη συνεχή ανακύκλωση του νερού, ώστε να επιταχυνθεί η απονίτρωση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

APPELO, C., D. POSTMA, Geochemistry, groundwater and pollution, 1994, 536 p., Balkema A. Publ.

CANTER, L., Nitrates in Groundwater, 1997, 263 p. Lewis Publishers.

DIENEMANN, W., Erfahrung bei der Streckung von Schutzgebieten für Trink-wassergewinnungsanlagen an Hand von Richtlinien d. DVGW v. Januar 1953, 1955, Zeit. dtsh. geol. Ges. και A. Thurner; Hydrogeologie, 1967, S. 214-218, Springer Verlag.

- DOMENICO, P., F. SCHWARTZ, Physical and Chemical Hydrogeology, 1998, 506 p., John Willey and Sons Inc.
- ESLINGER, E., U. OKO, J. SMITH, H. HOLLIDAY, Introduction to Environmental Hydrogeology 1994 SEPM, Short Course No 32.
- FETTER, C., Contaminant Hydrogeology, 1992, 458 p., Macmillan Publ. Co.
- FREEZE, R., J. CHERRY; Groundwater, 1979, 604 p., Prentice Hall, Inc.
- KHANBILVARDI, R., J. FILLOS, Groundwater, Hydrology, Contamination and Remediation, 1986, 521 p. Sc. Publ. Co.
- KHANBILVARDI, R., J. FILLOS, Pollution, Risk Assessment and Remediation in Groundwater Systems, 1987, 451 p. Sc. Publ. Co.
- LEGRAND, H., A standardized system for evaluating waste disposal sites, 1983, 49 pp. NWWA.
- M. SCHWUGER, Detergents in the Environment, 1997, 317 p. Marcel Dekker Inc.
- PALMER, CH., Contaminant Hydrogeology, 1996, 235 p. Lewis Publ.
- TCHOBANOGLOUS, G., E. SCHROEDER, Water Quality, 1985, 768 p. Addison-Wesley Publ. Co.
- U.S.N.R.C., Groundwater Contamination, 1984, 179 p. Nat. Ac. Press.
- U.S.N.R.C., Groundwater Vulnerability Assessment, 1993, 204 p. Nat. Acad. Press.
- U.S.N.R.C., In situ Bioremediation, 1993, 207 p. Nat. Acad. Press