

Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΝΕΡΩΝ  
(ΛΙΜΝΕΣ & ΠΟΤΑΜΙΑ) ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΣΤΑΜΑΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δ. ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΡΑΣ

ΠΑΤΡΑ – 2008

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	2
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
2. ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ.....	7
2.1. Γενικά .....	7
2.2. Κατηγορίες ρύπανσης .....	10
2.3. Φυσικοχημικές ιδιότητες των ρύπων .....	11
2.4. Πηγές ρύπανσης του νερού.....	12
2.5. Υδατικά συστήματα και πηγές ρύπανσης τους .....	27
2.6. Μεταφορά της ύλης στο υδάτινο περιβάλλον .....	28
2.7. Συμπεριφορά ρύπων σε υδατικά συστήματα.....	29
2.8. Ανθρωπογενείς επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού.....	33
2.9. Επιπτώσεις – Ανίχνευση της ρύπανσης .....	35
2.10. Τα προβλήματα ρύπανσης του νερού .....	35
2.11. Προβλήματα ποιότητας και ρύπανσης στα νησιά του Αιγαίου .....	38
3. ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΝΕΡΩΝ.....	41
3.1. Απαιτούμενο οξυγόνο σε φυσικά νερά .....	41
3.2. Παράμετροι οργανικής ρύπανσης των νερών.....	41
3.2.1. Διαλυμένο οξυγόνο – DO (Dissolved Oxygen) .....	41
3.2.2. Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο – BOD (Biochemical Oxygen Demand) ...	42
3.2.3. Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο – COD (Chemical Oxygen Demand) .....	43
3.2.4. Ολικός οργανικός άνθρακας – TOC (Total Organic Carbon) .....	44
3.3. Ενώσεις αζώτου στα φυσικά νερά .....	44
3.4. Φωσφορικά σε επιφανειακά νερά .....	45
3.5. Απορρυπαντικά .....	46
3.6. Ευτροφισμός – Άνθηση του νερού .....	47
3.6.1. Γενικά.....	47
3.6.2. Αιτία – Πηγές θρεπτικών συστατικών .....	48
3.6.3. Συνέπειες του ευτροφισμού .....	49
3.6.4. Στρατηγικές ελέγχου του ευτροφισμού .....	50
3.6.5 Μοντέλα ελέγχου του ευτροφισμού .....	51
3.7. Θερμική αλλοίωση των νερών .....	51

3.8. Αιωρούμενα στερεά .....	52
3.9. Μηχανισμοί αυτοκαθαρισμού στα νερά του φυσικού περιβάλλοντος.....	52
3.10. Προστασία συστημάτων επιφανειακού νερού.....	54
4. ΡΥΠΑΝΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ .....	56
4.1. Εισαγωγή.....	56
4.2. Πηγές ρύπων και διαδικασίες ρύπανσης των υπόγειων υδάτων .....	58
4.3. Ρύπανση των υπόγειων νερών από τα φυτοφάρμακα .....	60
4.4. Ρύπανση από τα μη αναμίξιμα στο νερό υγρά .....	61
4.5. Εισροή ρύπων από την επιφάνεια του εδάφους.....	62
4.6. Ο ρόλος της ακόρεστης ζώνης στην ρύπανση των υπόγειων νερών .....	63
4.7. Χημικοί και βιολογικοί ρύποι και η υπεδαφική συμπεριφορά τους.....	63
4.8. Εκτίμηση της ρύπανσης .....	64
4.9. Μετρήσεις ποιότητας – δειγματοληψία υπόγειου νερού.....	65
4.10. Διάδοση της ρύπανσης στους υδροφορείς .....	70
4.11. Μεταφορά-Διασπορά-Διάχυση .....	71
4.12. Διάδοση δραστικών ρύπων .....	72
4.13. Διάδοση μη αναμίξιμων ρύπων .....	73
4.14. Μοντέλα συναγωγής – διασποράς – ρόφησης .....	74
4.15. Εξασθένηση της ρύπανσης .....	76
4.16. Αλληλεπίδραση ρυπαντών και εδάφους – Φυσική απορρύπανση .....	77
4.17. Τρωτότητα των υπόγειων υδροφόρων .....	79
4.18. Η ειδική περίπτωση καρστικών πεδίων .....	81
4.19. Προστασία υπόγειων νερών σε καρστικές περιοχές.....	81
4.20. Εμπλουτισμός υδροφόρων οριζόντων.....	82
4.21. Υφαλμύριση υπόγειων νερών .....	83
5. ΜΟΛΥΝΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ.....	85
5.1 Κυριότερες πηγές και αιτίες μόλυνσεως .....	85
5.2. Μόλυνση των υδροφόρων από μικροοργανισμούς .....	86
5.3. Περιορισμός της μόλυνσεως.....	87
5.4. Υπόγεια κατανομή της μόλυνσεως .....	88
5.5. Εκτίμηση της δυνατότητας προκλήσεως της μόλυνσης.....	88
5.6. Ποιοτικός έλεγχος του υπόγειου νερού.....	89
6. ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ .....	90
6.1. Εισαγωγή.....	90

6.2. Εγκιβωτισμός.....	90
6.3. Απομάκρυνση του ρύπου .....	92
6.4. Επεξεργασία του ρύπου στη θέση του .....	93
6.5. Επιλογές διαχείρισης .....	94
6.6. Συστήματα άντλησης των ρύπων από τον υδροφορέα .....	94
6.7. Εξυγίανση με βιολογικές μεθόδους.....	96
<b>7. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ</b>	
<b>ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ .....</b>	<b>98</b>
7.1. Εισαγωγή.....	98
7.2. Βιολογική αποκατάσταση (bio-remediation) .....	99
7.3. Η μέθοδος άντλησης και απορρύπανσης διαλυμένων ρυπαντών (pump and treat).....	100
7.4. Απορρύπανση με άντληση επιπλεόντων ρύπων.....	101
7.5. Απορρύπανση με εφαρμογή υποπίεσης (vacuum extraction) .....	102
7.6. Απορρύπανση υδροφορέων από βαρέα μέταλλα .....	103
7.7. Αεροδιαχωρισμός (air stripping) .....	103
7.8. Αεροδιασπορά (air sparging).....	104
7.9. Απονίτρωση των υπόγειων νερών .....	105
7.10. Προστασία από την επέκταση της ρύπανσης.....	108
<b>8. ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ..</b>	<b>110</b>
8.1. Χαρακτηριστικά ποιότητας νερού .....	110
8.2. Μικροβιολογικός έλεγχος του νερού .....	112
8.3. Σχεδιασμός εγκαταστάσεων επεξεργασίας νερού .....	113
8.4. Κροκίδωση (coagulation) – Συσσωμάτωση (flocculation).....	114
8.5. Ιζηματοποίηση.....	116
8.6. Καθίζηση-επίπλευση .....	116
8.7. Διήθηση .....	117
8.8. Απομάκρυνση οργανικών ενώσεων από το νερό με προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα .....	117
8.9. Απολύμανση.....	118
8.10. Αποσκλήρυνση.....	119
8.11. Αντίστροφη όσμωση και ηλεκτροδιάλυση.....	120
8.12. Ιοντοεναλλαγή .....	121
8.13. Επικαθίσεις.....	121

8.14. Διάβρωση .....	123
8.15. Διύλιση του νερού .....	124
8.16. Απομάκρυνση σιδήρου και μαγγανίου .....	124
8.17. Απομάκρυνση $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ και $\text{HCL}_3^-$ .....	125
8.18. Απομάκρυνση $\text{SO}_4^{2-}$ .....	125
8.19. Απομάκρυνση $\text{PO}_4^{3-}$ .....	126
8.20. Απομάκρυνση $\text{F}^-$ .....	126
8.21. Απομάκρυνση $\text{S}^{2-}$ .....	126
8.22. Απομάκρυνση πυριτίου .....	126
8.23. Απομάκρυνση βαρέων μετάλλων .....	127
8.24. Απομάκρυνση φυσικών οργανικών ενώσεων με ιζηματοποίηση .....	127
8.25. Καθαρισμός του νερού με μεμβράνες .....	127
9. ΔΙΑΘΕΣΗ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ .....	128
9.1. Διάθεση λυμάτων σε ποταμούς .....	128
9.2. Επεξεργασία δημοτικών και βιομηχανικών λυμάτων .....	129
9.3. Στάδιο προεπεξεργασίας .....	131
9.4. Πρωτοβάθμια επεξεργασία .....	132
9.5. Δευτεροβάθμια επεξεργασία .....	132
9.6. Τριτοβάθμια επεξεργασία .....	133
10. ΔΙΚΑΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΥΔΑΤΩΝ .....	134
10.1. Προστασία υδάτων .....	134
10.2. Προστασία από τα απόβλητα .....	135
10.3. Κανονισμοί ποιότητας εκροών (ΚΠΕ) .....	136
11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	141
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	141
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	154

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα της πτυχιακής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Διονύσιο Παναγιωτάρα, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου αυτή την εργασία, για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια της και κυρίως για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ενδιαφέρον αντικείμενο.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Καθηγήτριες κ. Θεοδώρα Νταλκαράνη και κ. Μαρία Θεοδωροπούλου για την προσεκτική ανάγνωση και την αξιολόγηση της πτυχιακής μου εργασίας καθώς και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η εισαγωγή στη μελέτη και τη τεχνολογία ελέγχου της ρύπανσης των επιφανειακών υδάτων και ειδικότερα των λιμνών και των ποταμών, καθώς επίσης και των υπόγειων υδατικών πόρων, οι οποίοι αποτελούν την σημαντικότερη πηγή νερού για τη κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών.

Η εντατική χρησιμοποίηση των υδατικών πόρων και η μεγάλη παραγωγή αποβλήτων από τη σύγχρονη κοινωνία επέφερε την υποβάθμιση της ποιότητας του νερού.

Σκοπός της μελέτης και του ελέγχου της υδατικής ρύπανσης είναι η διαφύλαξη της υγείας των ανθρώπων και των υδατικών οικοσυστημάτων.

Η μελέτη τη υδατικής ρύπανσης, στη σημερινή εποχή, γίνεται με τη βοήθεια οικολογικών μαθηματικών ομοιωμάτων και ο σχεδιασμός των διαδικασιών καθαρισμού τόσο των λυμάτων όσο και του νερού πραγματοποιείται με μαθηματικές προσομοιώσεις των εισερχόμενων φυσικών, χημικών και βιολογικών φαινομένων.

Η παρούσα εργασία αποτελείται ουσιαστικά από τρία μέρη. Το πρώτο μέρος επικεντρώνεται στα είδη ρύπανσης, στις πηγές προέλευσης των διάφορων ρύπων καθώς και των διάφορων δραστηριοτήτων που επιβαρύνουν τα υδατικά συστήματα. Γίνεται αναφορά στη συμπεριφορά και τη μεταφορά των ρύπων, στις δυσμενείς επιπτώσεις που προκαλούν τόσο στα νερά και τα οικοσυστήματα όσο και στον άνθρωπο και τέλος περιγράφονται οι τρόποι που μπορεί να ανιχνευτεί η ρύπανση έτσι ώστε να παρθούν τα διάφορα μέτρα είτε εξασθένησης της είτε εξάλειψης της. Στο δεύτερο μέρος αναλύονται οι μέθοδοι αποκατάστασης και εξυγίανσης, οι τεχνολογίες απορρύπανσης και προστασίας των επιφανειακών νερών και των υπόγειων υδροφορέων καθώς επίσης και η επεξεργασία και διάθεση των λυμάτων και των αποβλήτων στους φυσικούς υδάτινους αποδέκτες. Τέλος, το τρίτο μέρος έχει να κάνει με τη νομοθεσία που έχει θεσπιστεί από τους αρμόδιους φορείς η οποία αποσκοπεί στην προστασία και διατήρηση καλών επιπέδων ποιότητας των υδάτων.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό είναι μοναδικός φυσικός πόρος, τόσο διότι είναι απαραίτητο για την επιβίωση του ανθρώπου και των άλλων οργανισμών, όσο και διότι, σε μακροχρόνια κλίμακα, θεωρητικά η συνολική διαθέσιμη ποσότητα νερού σε κάθε περιοχή, είναι περίπου σταθερή.

Η ξέφρενη ανάπτυξη της τεχνολογίας τη τελευταία πενήτηκονταετία είχε και έχει σαν επακόλουθο εκτεταμένες οικολογικές καταστροφές που προέρχονται από τη ρύπανση και τη μόλυνση του περιβάλλοντος.

Λέγοντας περιβάλλον εννοούμε το έδαφος, το υπέδαφος, τα υπόγεια νερά, τα επιφανειακά νερά (λίμνες, ποτάμια), τη θάλασσα, την ατμόσφαιρα, τα φυτά, τα ζώα τους φυσικούς πόρους και τα δημιουργήματα του πολιτισμού. Η αλληλεπίδραση τους διαμορφώνουν οικοσυστήματα. Τα οικοσυστήματα είναι σύνολα ζώντων οργανισμών που ζουν σε μια συγκεκριμένη περιοχή καθώς και ο βιότοπος στον οποίο κατοικούν και αναπτύσσονται. Παράδειγμα οικοσυστημάτων είναι τα δάση, τα έλη, οι λίμνες κλπ.

Το παραδοσιακό μοντέλο διαχείρισης των υδατικών πόρων και οποιοδήποτε άλλου φυσικού πόρου, στηρίζεται στην τεχνοκρατική αντίληψη, σύμφωνα με την οποία σημασία έχει η οικονομική ανάπτυξη και η τεχνολογική πρόοδος και συνεπώς κάθε φυσικός πόρος αποτελεί μία από τις συνιστώσες της ανάπτυξης αυτής. Το αποτέλεσμα της μακροχρόνιας εφαρμογής του μοντέλου αυτού εκδηλώνεται τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες περιοχές, με την ανεπάρκεια νερού, η οποία οφείλεται στην αύξηση των απαιτήσεων σε νερό και την υποβάθμιση της ποιότητας του.

Οι επιφανειακοί υδατικοί πόροι, ποτάμια, λίμνες, θάλασσες, δέχονται μεγάλες ποσότητες ρύπων τυχαία ή με την παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα που έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της ποιοτικής κατάστασης τους. Η ποιότητα του νερού των υδάτινων συστημάτων στα κατάντη επηρεάζεται τόσο από τις υδροδυναμικές συνθήκες μεταφοράς και ανάμιξης του νερού, αλλά και από τις επικρατούσες χημικές, βιολογικές και φυσικές συνθήκες.

Ο όρος «ποιότητα του νερού» δεν συνιστά από μόνος του μία συγκεκριμένη αξία διότι υπόκειται εννοιολογικά και πρακτικά σε συνεχείς μεταβολές και συνεπώς πρέπει να θεωρείται και να μελετάται σε σχέση με τα οικολογικά συστήματα και τις διαφορετικές χρήσεις του νερού. Μόνο μία λεπτομερής ανάλυση των ποσοτικών και ποιοτικών



απαιτήσεων των διαφορετικών χρήσεων του νερού, μπορεί να οδηγήσει στην εκτίμηση της ποιότητας και της επάρκειας ή της ανεπάρκειας των διαθέσιμων υδατικών πόρων.

Η ποιότητα του νερού είναι ένα χαρακτηριστικό του, που αναφέρεται στη χημική του σύνθεση με τα διαλυμένα και αιωρούμενα υλικά, στην ενεργειακή του κατάσταση με τη μορφή της θερμότητας και της ραδιενεργού ακτινοβολίας και στα βιολογικά υλικά που περιέχει στον όγκο του. Οι ουσίες που περιέχονται στο νερό είναι πάρα πολλές και μπορεί να είναι ανόργανες, οργανικές, ραδιοακτινοβόλουσες, μέταλλα και ιχνοστοιχεία. Η ποιότητα του νερού προσδιορίζεται σε σχέση με ορισμένες παραμέτρους, που είναι είτε ουσίες, είτε ομάδες ουσιών, είτε χαρακτηριστικά του νερού (φυσικά, χημικά και βιολογικά). Ο χαρακτηρισμός του νερού σε καλής ή κακής ποιότητας γίνεται σε σχέση με τις τιμές των παραμέτρων αυτών και τη χρήση του νερού.

Υπάρχει μεγάλη αλληλεξάρτηση μεταξύ των κατηγοριών χρήσης του νερού και της ποιότητας του. Οι διάφορες χρήσεις του νερού επηρεάζουν διαφορετικά την ποιότητα του. Η αστική χρήση με τις διαδικασίες διάθεσης των λυμάτων και με την επιφανειακή απορροή που ακολουθεί τις βροχές και καταιγίδες επηρεάζει την ποιότητα του νερού των αποδεκτών. Η γεωργική χρήση του νερού επηρεάζει τους αποδέκτες με το νερό στράγγισης των αρδευτικών εκτάσεων, με τα αγροχημικά και με τα εκπλύματα των στερεών αποβλήτων των γεωργικών εκμεταλλεύσεων. Από την άλλη πλευρά η χρήση του νερού επηρεάζεται από τη διαθέσιμη ποιότητα του. Η αστική χρήση έχει απαιτήσεις καλής ποιότητας νερού, ιδιαίτερα όταν το νερό θα χρησιμοποιηθεί και για πόσιμο. Επίσης οι δημόσιες χρήσεις, το πότισμα ζώων και η άρδευση έχουν ορισμένες απαιτήσεις ποιότητας νερού. Άλλες χρήσεις που εξαρτώνται από την ποιότητα του νερού είναι η αναψυχή π.χ. αγωνίσματα στα οποία υπάρχει επαφή του σώματος με το νερό, αλλά και αισθητικής απόλαυσης. Επίσης η υδρόβια ζωή εξαρτάται από την ποιότητα του νερού, όπως των ψαριών, των ενδαιτημάτων των υγροτόπων και των υδατοκαλλιεργειών. Τέλος υπάρχουν ορισμένες χρήσεις που δεν εξαρτώνται από την ποιότητα του νερού, όπως είναι η χρήση του νερού για την παραγωγή ενέργειας, η ναυσιπλοΐα και ορισμένα αγωνίσματα όπως η ιστιοπλοΐα.

Στις διαδικασίες που αφορούν τις ποιοτικές μεταβολές του νερού των υδατικών συστημάτων περιλαμβάνονται οι φυσικές διαδικασίες μεταφοράς μάζας με μετακίνηση (advection and convection), η διάχυση (diffusion) μοριακή και τυρβώδης, η διασπορά (dispersion) και η ανάμιξη (mixing). Οι υδρολογικές διαδικασίες που επηρεάζουν τη μεταφορά μάζας είναι η εξάτμιση (evaporation), η ακτινοβολία (radiation) ενέργειας, η

καθίζηση των αιωρούμενων σωματιδίων (particle settling) και η διάβρωση του πυθμένα των ποταμών. Επίσης σημαντικό ρόλο στις ποιοτικές διαφοροποιήσεις έχουν οι φυσικοχημικές και βιολογικές διαδικασίες μετασχηματισμού των ποιοτικών παραμέτρων.

Η συνεχής υποβάθμιση της ποιότητας ζωής που οφείλεται στη ρύπανση του περιβάλλοντος καθιστά αναγκαία τη λήψη μέτρων για τον περιορισμό της και την αποκατάσταση των ήδη ρυπασμένων περιοχών. Τα μέτρα προστασίας αφορούν τη διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των νερών, την ανάπτυξη τεχνολογιών και δημιουργία εγκαταστάσεων για τον καθαρισμό και αξιοποίηση των αποβλήτων αστικής και βιομηχανικής προέλευσης.

Οι τεχνολογίες αντιμετώπισης των ρύπων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στις τεχνολογίες απορρύπανσης που έχουν στόχο την αντιμετώπιση της ρύπανσης που έχει εισαχθεί ή εισάγεται στο περιβάλλον από διάφορους ανθρωπογενείς παράγοντες και στις αντιρρυπαντικές τεχνολογίες οι οποίες στοχεύουν στην αποφυγή ή στην ελαχιστοποίηση της δημιουργίας των ρύπων. Τα τελευταία χρόνια γίνονται μεγάλες προσπάθειες για την ανάπτυξη και εφαρμογή αντιρρυπαντικών τεχνολογιών με σκοπό την αντικατάσταση ρυπογόνων τεχνολογιών.

Από τους υδατικούς πόρους του πλανήτη μόνο το 1% είναι διαθέσιμο για κατανάλωση από τον άνθρωπο. Σε πολλές χώρες και περιοχές της γης υπάρχουν έντονα προβλήματα έλλειψης νερού. Περισσότεροι από 1.2 δισεκατομμύρια άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση σε ασφαλούς ποιότητας πόσιμο νερό. Στην Ευρώπη το 20% των επιφανειακών υδάτων απειλείται σοβαρά από ρύπανση. Τα υπόγεια νερά παρέχουν περίπου το 65% του συνόλου του πόσιμου νερού της Ευρώπης, ενώ το 60% των Ευρωπαϊκών πόλεων κάνει υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδατικών πόρων και το 50% των υδροτόπων βρίσκονται σε επικίνδυνη κατάσταση λόγω της υπερεκμετάλλευσης των υπόγειων νερών.

Η ρύπανση και η μόλυνση των υδατικών πόρων απασχολεί επί δεκαετίες τη διεθνή κοινότητα. Η μόλυνση του νερού από παθογόνους μικροοργανισμούς είναι το κύριο πρόβλημα στις περισσότερες υπανάπτυκτες και αναπτυσσόμενες χώρες, ενώ η χημική ρύπανση του νερού έχει ανακύψει σαν εξίσου σοβαρή απειλή σ' όλες τις χώρες με γεωργική και βιομηχανική ανάπτυξη.

Η μελέτη της ποιότητας του νερού των υδατορευμάτων έχει απασχολήσει πολλούς ξένους και έλληνες επιστήμονες από το τέλος του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου και μετά, οπότε εμφανίστηκαν και τα πρώτα προβλήματα ρύπανσης. Ιδιαίτερα όμως κατά

την τελευταία τριακονταετία και επειδή τα προβλήματα αυτά συνεχώς εντείνονται ή αλλάζουν μορφή και η ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης αυξάνεται, το ζήτημα δεν περιορίζεται στα πλαίσια της επιστημονικής έρευνας, αλλά έγινε υπόθεση εθνική και διεθνής και η έρευνα βρίσκεται στην υπηρεσία διεθνών και εθνικών οργανισμών και φορέων θεσμοθέτησης, διαχείρισης και ελέγχου των υδατικών πόρων.

Για το περιορισμό της ρύπανσης, όλες οι χώρες εισάγουν και εφαρμόζουν νομοθετικά μέτρα, παρόλα αυτά όμως το πρόβλημα της ρύπανσης παραμένει οξύτατο ειδικά σε περιοχές και οικοσυστήματα με χρόνια επιβάρυνση.

## 2. ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

### 2.1. Γενικά

Η ανάπτυξη και συντήρηση της ζωής οφείλεται σε ένα κύριο παράγοντα, το νερό. Το νερό καλύπτει τα  $\frac{3}{4}$  της επιφάνειας της γης ενώ το άλλο  $\frac{1}{4}$  καλύπτεται από στεριά. Ανάλογα με τη περιεκτικότητά του σε άλατα χαρακτηρίζεται ως γλυκό όταν περιέχει λιγότερο από 1g αλάτων/l και ως αλμυρό όταν περιέχει περισσότερο από 1g αλάτων/l. Το 97% του νερού, βρίσκεται στις θάλασσες και τους ωκεανούς και είναι αλμυρό και άρα ακατάλληλο για χρήση. Μόλις το 3% βρίσκεται στα ποτάμια, στις λίμνες και στο εσωτερικό της γης σε υγρή μορφή, στην ατμόσφαιρα σε αέρια μορφή και είναι γλυκό νερό.

Το νερό που βρίσκεται στη φύση διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες: το ατμοσφαιρικό νερό (από βροχή ή χιόνι), τα επιφανειακά νερά και τα υπόγεια νερά. Τα **επιφανειακά νερά** είναι τα νερά των ποταμών, των λιμνών και των θαλασσών. Περιέχουν προσμίξεις ατμοσφαιρικού νερού, ποικιλία αλάτων (ανθρακικά άλατα ασβεστίου, μαγνησίου, νατρίου, καλίου, θειικά και χλωριούχα άλατα διαφόρων στοιχείων κ.ά.), μικρές ποσότητες ραδιενεργών ουσιών (στο θαλάσσιο νερό) και οργανικές ουσίες που οφείλονται σε γεωργικές δραστηριότητες και σε ρύπανση από βιομηχανικά και αστικά απόβλητα. Τα **υπόγεια νερά** είναι τα νερά των πηγαδιών, των πηγών και γενικότερα τα νερά που είναι αποταμιευμένα στο υπέδαφος. Περιέχουν διάφορα άλατα, τα οποία εξαρτώνται από την ορυκτολογική σύσταση των πετρωμάτων μέσα από την οποία το ατμοσφαιρικό και το επιφανειακό νερό διηθείται και αποταμιεύεται στους υπόγειους ταμειυτήρες.

Οι πιο χαρακτηριστικές φυσικοχημικές ιδιότητες του νερού είναι: η μεγάλη θερμοχωρητικότητα, η επιφανειακή τάση που είναι μεγαλύτερη όλων των υγρών, η πολύ μικρή ηλεκτρολυτική διάσταση, η διηλεκτρική σταθερά που είναι μεγαλύτερη όλων των υγρών, η συμπεριφορά του κατά τη πήξη και κυρίως η διαλυτική του ικανότητα. Η μεγάλη διαλυτική ικανότητα του νερού επιτρέπει την εύκολη ρύπανση του. Το νερό είναι ο μεγαλύτερος διαλύτης άρα κάθε φορά που έρχεται σε επαφή με κάποιο άλλο σώμα αντιμετωπίζει κίνδυνο ρύπανσης και μόλυνσης του.

Το νερό μετά από κάθε χρήση (οικιακή, γεωργική, βιομηχανική) είναι πλούσιο σε ρυπογόνες ουσίες που το καθιστούν αφενός ακατάλληλο προς περαιτέρω χρήση, αφετέρου ρυπαντή των λιμνών, των ποταμών, των θαλασσών και των υπόγειων υδάτων στα οποία καταλήγει.

**Ρύπανση (pollution)** θεωρείται οποιαδήποτε υποβάθμιση της φυσικής ποιότητας του νερού. Σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60 της Ε.Ε για την πολιτική των νερών, ρύπανση ορίζεται η συνεπεία ανθρώπινων δραστηριοτήτων, άμεση ή έμμεση εισαγωγή, στον αέρα, το νερό ή το έδαφος, ουσιών ή θερμότητας που μπορούν να είναι επιζήμια για την υγεία του ανθρώπου ή την ποιότητα των υδατικών οικοσυστημάτων ή των χερσαίων οικοσυστημάτων που εξαρτώνται άμεσα από υδατικά οικοσυστήματα, συντελούν στη φθορά υλικής ιδιοκτησίας, ή επηρεάζουν δυσμενώς ή παρεμβαίνουν σε λειτουργίες αναψυχής ή σε λοιπές νόμιμες χρήσεις του περιβάλλοντος. Αν αυτή μπορεί να γίνει αντιληπτή άμεσα τότε ονομάζεται **άμεση ρύπανση**. Ένα παράδειγμα άμεσης ρύπανσης είναι η περίπτωση ενός ποταμού ή μιας λίμνης, όπου καταλήγουν τοξικά απόβλητα και προκαλείται άμεσος κι αιφνίδιος θάνατος ψαριών. **Έμμεση ρύπανση** είναι η μορφή ρύπανσης, που δεν αντιλαμβανόμαστε εύκολα, επειδή δεν είναι ορατή. Για παράδειγμα, όταν καταλήγουν σε ένα ποτάμι ή σε μια λίμνη ή στη θάλασσα λύματα ή απόβλητα, σε ποσότητες που δεν μπορούν τα υδατικά οικοσυστήματα να καθαρίσουν, είναι πολύ πιθανό να προκληθούν σταδιακά αλλαγές στα είδη που υπάρχουν σε αυτό. Ορισμένα είδη αναπτύσσονται υπερβολικά, ενώ άλλα περιορίζονται ή εξαφανίζονται (ευτροφισμός). Σε πιο προχωρημένο επίπεδο ρύπανσης, μπορεί το διαλυμένο στο νερό οξυγόνο να μειωθεί και να αρχίσει η παραγωγή άλλων αερίων, επικίνδυνων για τις μορφές ζωής (υδρόθειο, αμμωνία κ.ά.).

**Μόλυνση (contamination)** είναι μια ειδική κατηγορία ρύπανσης, που οφείλεται σε μικροοργανισμούς. Όταν καταλήγουν σε ποτάμια, λίμνες ή στη θάλασσα βρώμικα νερά από κατοικίες, νοσοκομεία, χώρους απόρριψης σκουπιδιών κλπ, μπορεί να προκαλέσουν διάφορες μορφές ρύπανσης: για παράδειγμα, ρύπανση εξαιτίας της παρουσίας χημικών, βλαβερών ουσιών, αλλά και μόλυνση εξαιτίας της παρουσίας μικροβίων και γενικότερα παθογόνων οργανισμών στα απόβλητα.

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

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

- 1) Οργανικές ουσίες, που υφίστανται βιολογική οξειδωση, με αποτέλεσμα την αποξυγόνωση του νερού.
- 2) Όξινες και αλκαλικές χημικές ουσίες, που αλλάζουν το pH των νερών.

- 3) Οξειδωτικές και αναγωγικές ουσίες, όπως αέριο χλώριο  $\text{Cl}_2$ , αλκοόλες  $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ , υδροθείο  $\text{H}_2\text{S}$ , αέριο θείο  $\text{S}_2$ , οξειδία του θείου  $\text{SO}_3$ ,  $\text{NH}_3$ , οξειδία του αζώτου  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  κτλ, που προκαλούν αποξυγόνωση, δυσάρεστη οσμή και γεύση, ευτροφισμό και διαταραχή της μικροβιακής ισορροπίας.
- 4) Δηλητηριώδεις χημικές ουσίες, όπως κυανιούχα  $\text{CN}^-$ , αρσενικό, φθωριούχα, φωσφορικά, βαρέα μέταλλα κτλ, η παρουσία των οποίων έχει αποτέλεσμα την βιοσυσσώρευση και δηλητηρίαση ψαριών και ζώων.
- 5) Μη διαλυτές επιπλέουσες ουσίες, όπως τασιενεργά που δημιουργούν αφρούς, λίπη και έλαια που προκαλούν αισθητικά προβλήματα και δυσοσμία.
- 6) Οργανικοί διαλύτες (βενζόλιο  $\text{C}_6\text{H}_6$ , τολουόλιο  $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ , χλωροφόρμιο  $\text{CHCl}_3$  κτλ) και μόρια  $\text{PCB}_5$  και  $\text{PAH}_5$  τα οποία είναι τοξικά και προξενούν προβλήματα βιοσυσσώρευσης, καρκινογένεση και θάνατο στους ζώντες οργανισμούς.
- 7) Φυτοφάρμακα, τα οποία είναι ιδιαίτερα τοξικά και επικίνδυνα για όλους τους ζώντες οργανισμούς με την εισαγωγή τους στο βιολογικό κύκλο.
- 8) Παθογόνοι μικροοργανισμοί (βακτήρια και ιοί), που προκαλούν προβλήματα μόλυνσης και ασθενειών σε ζώα, φυτά και ανθρώπους.
- 9) Αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία είναι δυνατόν να προκαλέσουν θολότητα, διαταραχή του βιολογικού κύκλου των υδρόβιων οργανισμών και σε ορισμένες περιπτώσεις προσρόφηση και μεταφορά τοξικών μορίων.
- 10) Ραδιενεργά υλικά, που ενοχοποιούνται για βιοσυσσώρευση, τοξικότητα, μεταλλάξεις και καρκινογένεση.

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

Το νερό χαρακτηρίζεται από ορισμένες παραμέτρους (Ph, θερμοκρασία, χρώμα, οσμή, γεύση, ολικά στερεά, αγωγιμότητα, οξύτητα κτλ), οι επιτρεπτές τιμές των οποίων καθορίζονται ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζεται.

Τα φυσικά νερά θεωρούνται «ζωντανοί οργανισμοί», στα οποία λαμβάνουν χώρα αρκετές βιολογικές και φυσικοχημικές διεργασίες, όπως διεργασίες διαλυτοποίησης – ιζηματοποίησης, προσρόφησης – εκρόφησης χημικών ουσιών στην επιφάνεια ταμιευτήρων και αιωρούμενων σωματιδίων, οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, σύνθεση οργανικής ύλης από ανόργανα συστατικά.

Με την αύξηση του βιοτικού επιπέδου, αυξάνεται και η ανάγκη του πληθυσμού για πόσιμο νερό. Κατά κύριο λόγο, η ανάγκη αυτή καλύπτεται από τα επιφανειακά νερά

(λίμνες και ποτάμια). Ένα νερό χαρακτηρίζεται πόσιμο όταν η περιεκτικότητά του σε ξένες ουσίες είναι κάτω από τα επιτρεπτά όρια, όπως αυτά ορίζονται από τις εκάστοτε ισχύουσες υγειονομικές διατάξεις.

## 2.2. Κατηγορίες ρύπανσης

Η ρύπανση του νερού χαρακτηρίζεται συνήθως από μία ή περισσότερες ακόλουθες καταστάσεις (Χρίστουλας, 1991):

- **Περιεκτικότητα σε στερεά.** Τα στερεά αποτελούν σημαντικό και πολύπλευρο παράγοντα ρύπανσης. Τα αιωρούμενα και κolloειδή δημιουργούν ανεπιθύμητες καταστάσεις όπως η θολότητα η οποία βλάπτει την αισθητική των υδάτινων σωμάτων, είναι επικίνδυνη για τους κολυμβητές, εμποδίζει τη διέλευση του ηλιακού φωτός προκαλώντας μείωση της παραγωγής φυτοπλαγκτού. Επίσης επηρεάζουν τους υδρόβιους οργανισμούς και παρέχουν προστασία στους παθογόνους μικροοργανισμούς. Τα καθιζάνοντα στερεά σχηματίζουν πυθμενική ίλυ επηρεάζοντας την ωτοκία των ψαριών καθώς φράζουν τα πυθμενικά στρώματα χαλικιού. Στο αρδευτικό νερό, τα στερεά δημιουργούν προβλήματα απόθεσης στις δεξαμενές και αγωγούς, φράζουν το επιφανειακό στρώμα του εδάφους εμποδίζοντας τη διείσδυση του νερού και του ατμοσφαιρικού αέρα και τέλος εμποδίζουν την φωτοσύνθεση. Τα επιπλέοντα στερεά επηρεάζουν δυσμενώς την αισθητική των υδάτινων σωμάτων και επηρεάζουν τη μεταφορά της ύλης.

- **Χρώμα.** Για να είναι το νερό αισθητικά ευχάριστο πρέπει να είναι απαλλαγμένο από χρώμα. Το χρώμα στα υδάτινα σώματα εμποδίζει τη διέλευση του φωτός και συνεπώς τη φωτοσύνθεση. Οφείλεται σε έγχρωμες ανόργανες και οργανικές ουσίες.

- **Οσμή και γεύση.** Η οσμή του νερού προέρχεται από την αποσύνθεση οργανικής ύλης, από ζωντανά άλγη, από προϊόντα μεταλλικής διάβρωσης και από ποικιλία χημικών βιομηχανικής προέλευσης (φαινόλες). Οφείλονται σε πτητικές ύλες με πολύ μικρές συγκεντρώσεις μη ανιχνεύσιμες. Δοκιμές γεύσης από ομάδα δοκιμαστών γίνονται μερικές φορές για να διαπιστωθεί αν το πόσιμο νερό είναι γευστικά αποδεκτό από τους καταναλωτές.

- **Τοξικότητα.** Μεγάλη ποικιλία τοξικών ρύπων καταλήγει στα υδάτινα σώματα με τα αποχετευόμενα υγρά απόβλητα, ιδιαίτερα τα βιομηχανικά, τις επιφανειακές και υπόγειες ροές και την αερομεταφερόμενη ατμοσφαιρική ρύπανση, με δυσμενείς συνέπειες για τους ζώντες οργανισμούς.

- **Παθογένεια.** Παθογόνοι μικροοργανισμοί με προέλευση περιπτώματα ανθρώπων ή ζώων που πάσχουν ή είναι φορείς της σχετικής ασθένειας βρίσκονται στα λύματα και σε ρυπασμένα υδάτινα σώματα προκαλώντας δυσάρεστες συνέπειες όπως τύφο, δυσεντερία, χολέρα, ηπατίτιδα.
- **Θερμική ρύπανση.** Προκαλείται από την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού εξαιτίας της αποχέτευσης θερμού νερού από ενεργειακούς σταθμούς και άλλα εργοστάσια με άσχημη επίδραση στη λειτουργία των υδατικών συστημάτων.
- **Ευτροφισμός.** Υπερβολική ανάπτυξη αλγών (φυτοπλαγκτόν) στα επιφανειακά νερά από την υπερβολική τροφοδοσία των νερών με θρεπτικά συστατικά. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί σοβαρή διαταραχή του υδατικού οικοσυστήματος με διάφορες δυσμενείς συνέπειες, μεταξύ των οποίων είναι η υπερβολική ανάπτυξη ορισμένων ειδών σε βάρος όλων των άλλων, η μείωση ή και εξαφάνιση της ποικιλίας ειδών με θανάτωση ή μετανάστευση τους, καθώς και η πλήρης ή μερική αποξυγόνωση των νερών.
- **Αποξυγόνωση.** Η αποσύνθεση της οργανικής ύλης και η νιτροποίηση του αμμωνιακού αζώτου προκαλούν ταπείνωση της στάθμης του διαλυμένου οξυγόνου κάτω από την τιμή κορεσμού. Είναι τυπική μορφή ρύπανσης που προκαλεί η αποχέτευση λυμάτων στα υδάτινα σώματα με καταστροφικές συνέπειες για τους υδρόβιους οργανισμούς (θάνατος από ασφυξία).

### 2.3. Φυσικοχημικές ιδιότητες των ρύπων

Οι κυριότερες φυσικοχημικές ιδιότητες των ρύπων είναι (Βουδούρης, 2000):

- **Η διαλυτότητα.** Είναι η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να διαλυθεί σε ορισμένη ποσότητα διαλύτη σε ορισμένες συνθήκες. Τα ευδιάλυτα μεταφέρονται πιο εύκολα από τα επιφανειακά νερά.
- **Πτητικότητα.** Είναι η ικανότητα που έχουν τα μόρια τους να διαφεύγουν από την επιφάνεια του υγρού και να μεταβαίνουν στην αέρια φάση.
- **Προσροφητικότητα.** Εκφράζει την ικανότητα προσρόφησης μιας ουσίας από τα σωματίδια του εδάφους.
- **Βαθμός αποσύνθεσης.** Είναι ο χρόνος που απαιτείται για να αποσυντεθεί μια ουσία (παρασιτοκτόνο) σε άλλες ενώσεις.
- **Ο συντελεστής κατανομής.** Περιγράφει τον τρόπο κατανομής ενός ρύπου μεταξύ δύο μέσων, π.χ. στερεού-υγρού, ατμών-υγρού.
- **Πίεση των ατμών.** Είναι η πίεση που ασκούν οι ατμοί ενός υγρού, όταν το υγρό βρίσκεται σε ισορροπία με τους ατμούς του και εκφράζεται με το νόμο του Raoult. Η



σταθερά Henry συνδέει τη μερική πίεση μιας πτητικής ουσίας σε ισορροπία πάνω από διάλυμα, με τη συγκέντρωση της στο διάλυμα (νόμος Henry). Από αυτήν προκύπτει ότι η διαλυτότητα αερίου εντός υγρού υπό σταθερή θερμοκρασία είναι ανάλογη με την πίεση του αερίου σε ισορροπία με το υγρό.

- **Δείκτης βιοσυγκέντρωσης.** Εκφράζει την ποσότητα μιας ουσίας που μπορεί να συσσωρεύει στους υδρόβιους μηχανισμούς.

- **Τοξικότητα.** Είναι η πρόκληση δυσμενών επιπτώσεων στα οικοσυστήματα, όταν εκτεθούν στους ρύπους. Η έκθεση γίνεται μέσω της αναπνοής, της διατροφής και της επιδερμίδας. Η τοξικότητα εκφράζεται με τη μέση θανατηφόρα δόση (LD50), που είναι η δόση (mg/kg σωματικού βάρους) στην οποία επιβιώνει μόνο το 50% των οργανισμών που εκτίθενται σε αυτή για ορισμένο χρονικό διάστημα. Όταν η έκθεση γίνεται με την αναπνοή, η τοξικότητα εκφράζεται με τη μέση θανατηφόρο συγκέντρωση (LC50), που είναι η συγκέντρωση του ρύπου σε ορισμένο όγκο αέρα που εισπνέεται, στην οποία επιβιώνει μόνο το 50% των οργανισμών.

Τοξικοί ρύποι στα επιφανειακά νερά είναι: βαρέα μέταλλα (Hg, Cd, Pb, Cr κ.ά.), οργανικές ενώσεις (παρασιτοκτόνα και ζιζανιοκτόνα, απορρυπαντικά, πολυχλωριωμένα διφαινύλια PCBs, διοξίνες), τοξικά αέρια (Cl<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>), τοξικά ανιόντα (CN<sup>-</sup>), οξέα και αλκάλια. Συσσωρεύονται κυρίως στο λίπος (PCBs), στα οστά (Pb, F), στα νεφρά (Cd) και στο πλάσμα του αίματος.

## 2.4. Πηγές ρύπανσης του νερού

Οι πηγές ρύπανσης ταξινομούνται ανάλογα με:

### α) Γεωμετρία

- i) Σημειακές (ΧΥΤΑ, χωματερές, βόθροι, υπόγειες δεξαμενές).
- ii) Γραμμικές (δρόμοι, αύλακες).
- iii) Διάχυτες (νιτρορύπανση, όξινη βροχή).

### β) Ρυθμός εκπομπής

- i) Συνεχούς εκπομπής.
- ii) Στιγμιαίας εκπομπής.

Οι σπουδαιότερες πηγές ρύπανσης, οι οποίες ρυπαίνουν κατ' αρχήν τα επιφανειακά νερά και στη συνέχεια τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Ακάθαρτα νερά πόλεων και οικισμών.
- Βιομηχανικά απόβλητα.

- Νερά απορροής εντατικώς καλλιεργούμενων εκτάσεων.
- Θαλάσσια διείσδυση.
- Όξινη βροχή από ρυπασμένη ατμόσφαιρα.

**Οικιακά λύματα** (domestic sewage), ονομάζονται γενικά τα υγρά απόβλητα των κατοικιών, ιδρυμάτων ή άλλων εγκαταστάσεων μιας περιοχής, που είναι συνδεδεμένες με τις λειτουργίες της πόλης (ζαχαροπλαστεία, μαγειρεία, πλυντήρια). Αποτελούνται κατά μεγάλο ποσοστό από νερό, που περιέχει οργανικά και ανόργανα προϊόντα. Η δυσάρεστη οσμή τους οφείλεται στο οργανικό υλικό που υφίσταται αναερόβια βακτηριακή δράση. Το χρώμα των αποβλήτων είναι ενδεικτικό της ηλικίας και της προέλευσης τους. Τα οργανικά υλικά στα λύματα είναι συνήθως: χαρτιά, ούρα, κόπρανα, σαπούνια, απορρυπαντικά, υπολείμματα τροφών, έλαια, λίπη. Τα ανόργανα συστατικά είναι: αμμωνία, άλατα του αμμωνίου, άργιλος κ.ά. Η ποσότητα των παραγόμενων λυμάτων ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή και από χώρα σε χώρα. Η μέση ημερήσια παραγόμενη ποσότητα κυμαίνεται από 150-500 L/άτομο.

Οι πόλεις προκαλούν ρύπανση των νερών με τα αέρια και τα στερεά, αλλά προπάντων με τα υγρά απόβλητα τους. Τα αστικά λύματα προέρχονται από τις αποχετεύσεις των διάφορων χρήσεων και αποτελούν τον κύριο όγκο των υγρών αποβλήτων μιας πόλης. Περιέχουν ως επί το πλείστον οργανικές ύλες και ορισμένα ανόργανα άλατα, όπως τα νιτρικά, αμμωνιακά και φωσφορικά. Τα υγρά απόβλητα των βιομηχανικών και βιοτεχνικών μονάδων περιέχουν κατά κανόνα ρύπους ανάλογους με τα αστικά λύματα και ορισμένες φορές έχουν επιπλέον διάφορα μέταλλα, όπως ο μόλυβδος και ο υδράργυρος, τοξικές οργανικές ενώσεις κ.λ.π. Οι αστικές δραστηριότητες επιβαρύνουν με ρύπανση και τα όμβρια νερά, τα οποία όταν διέρχονται από τους δρόμους της πόλης φορτίζονται με μια μεγάλη ποικιλία ρύπων σε μικρές συγκεντρώσεις όπως μόλυβδος και κάδμιο.

Η σύνθεση των αστικών λυμάτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες μεταξύ των οποίων είναι ο χωρισμός ή όχι του συστήματος των υπονόμων, η εισροή ή όχι βιομηχανικών λυμάτων, η γεωγραφική θέση του οικισμού, η οικονομία και ο τρόπος ζωής των κατοίκων και χρονικοί παράγοντες. Η τυπική σύνθεση των αστικών λυμάτων και το επίπεδο στο οποίο μειώνεται μετά την πρωτοβάθμια και την προχωρημένη επεξεργασία δίνεται στον Πίνακα 2.4 (Feigin, 1991).

Τα κάθε είδους υγρά απόβλητα των πόλεων καταλήγουν στους υγρούς αποδέκτες που είναι επιφανειακοί ή υπόγειοι. Τα επιφανειακά νερά, δηλαδή οι ποταμοί, οι λίμνες, οι λιμνοθάλασσες, οι κλειστοί θαλάσσιοι κόλποι και οι ανοιχτές θάλασσες είναι

περισσότερο ή λιγότερο ευαίσθητα στη ρύπανση, ανάλογα με τη δυνατότητα ανανέωσης τους. Καθοριστικό ρόλο σ' αυτό παίζει η ποσότητα οξυγόνου που είναι διαλυμένο στο νερό. Σε αντίθεση με την ατμόσφαιρα, όπου η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι σχεδόν πάντα κανονική και ανεξάρτητη από τη ρύπανση, τα νερά απειλούνται συχνά με αποξυγόνωση. Γενικά τα νερά έχουν χαμηλή συγκέντρωση κορεσμού σε οξυγόνο και αυτή γίνεται μικρότερη με την άνοδο της θερμοκρασίας. Όταν υπάρχουν οργανικές ύλες στον υδάτινο αποδέκτη, το διαλυμένο οξυγόνο καταναλώνεται λόγω της αερόβιας αναπνοής μικροοργανισμών που τις αποσυνθέτουν. Γι' αυτό το λόγο οι οργανικές ύλες αποτελούν πολύ σοβαρό ρύπο για τα νερά, διότι προκαλούν αποξυγόνωση. Οι συνέπειες είναι καταστροφικές για τους περισσότερους υδρόβιους οργανισμούς που κινδυνεύουν από ασφυξία. Έτσι η ρύπανση με αστικά λύματα ή άλλα απόβλητα που περιέχουν οργανικό φορτίο μπορεί να απειλήσει με καταστροφή ένα υδατικό οικοσύστημα.

Ανάλογα αποτελέσματα για τα επιφανειακά νερά έχει και η ρύπανση με ανόργανα άλατα που περιέχουν άζωτο και φώσφορο. Τέτοια ρυπαντικά φορτία περιέχονται συνήθως στα αστικά λύματα (περιπτώματα, απορρυπαντικά κλπ.), σε ορισμένα βιομηχανικά απόβλητα, καθώς και στις γεωργικές απορροές (περίσσεια λιπασμάτων). Το σημαντικότερο πρόβλημα που δημιουργούν το άζωτο και ο φώσφορος είναι ο ευτροφισμός που συνίσταται στην υπερβολική ανάπτυξη αλγών (φυτοπλαγκτού) στα επιφανειακά νερά λόγω υπερβολικής τροφοδοσίας τους με θρεπτικά συστατικά. Πολλές λίμνες και κλειστοί κόλποι παρουσιάζουν προβλήματα ευτροφισμού με σημαντικές μεταβολές στο οικοσύστημα τους.

Σε μικρούς οικισμούς οι σηπτικές δεξαμενές και οι απορροφητικοί βόθροι είναι οι πιο κοινοί τρόποι διάθεσης των οικιακών λυμάτων. Η συλλογική συγκέντρωση των λυμάτων και η μεταφορά τους σε εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού έχει σαν σκοπό την κατάλληλη επεξεργασία-καθαρισμό των λυμάτων για να επαναχρησιμοποιηθούν ή να διατεθούν ακίνδυνα σ' ένα υδατικό αποδέκτη ή στο έδαφος απαλλαγμένα από τα βλαβερά συστατικά. Ως "βλαβερά" συστατικά των λυμάτων θεωρούνται: α) τα αιωρούμενα στερεά, β) τα οργανικά συστατικά, γ) οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και τα θρεπτικά στοιχεία (N, P).

**Βιομηχανικά απόβλητα** ονομάζονται τα υγρά απόβλητα διαφόρων βιομηχανιών που δεν περιέχουν απόβλητα από χώρους εξυπηρέτησης του προσωπικού με απόδεκτη πολλές φορές επιφανειακά νερά και θάλασσες. Τα βιομηχανικά απόβλητα αποτελούν μια από τις κυριότερες πηγές ρύπανσης του περιβάλλοντος, ιδιαίτερα στις

αναπτυσσόμενες χώρες. Είναι αποτέλεσμα της χρήσης νερού στη βιομηχανία, που έχει εμπλουτισθεί με διάφορα συστατικά σε μικρές ή μεγάλες συγκεντρώσεις και διακρίνονται σε βιολογικά και μη βιολογικά.

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

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

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που δημιουργούν οι βιομηχανίες στο περιβάλλον είναι η απόρριψη ζεστού νερού που χρησιμοποιείται σε διάφορα στάδια της παραγωγικής δραστηριότητας (διεργασίες θέρμανσης – ψύξης), με αιτία τη ρύπανση των επιφανειακών νερών.

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

Μέχρι πριν αρκετά χρόνια η διάθεση των βιομηχανικά ρυπασμένων νερών σε ποτάμια, λίμνες δεν δημιουργούσε πρόβλημα λόγω της ικανότητας αυτοκαθαρισμού του κινούμενου νερού. Δυστυχώς όμως, η δυνατότητα αυτή είναι περιορισμένη και αφορά συγκεκριμένο ρυθμό απόρριψης λυμάτων ή απόνευρων. Σήμερα όμως σε όλα τα υδάτινα συστήματα το σημείο κορεσμού έχει ξεπεραστεί.

Ο όρος **τοξικά** (toxic) χρησιμοποιείται για απόβλητα που περιέχουν ουσίες που προκαλούν σοβαρές βλάβες ή και θάνατο σε ανθρώπους ή ζώα. Η παρουσία τους στο περιβάλλον οφείλεται κυρίως στις βιομηχανίες και στην αλόγιστη και ανεξέλεγκτη χρήση φυτοφαρμάκων στις γεωργικές καλλιέργειες.

Γενικά, τα επικίνδυνα απόβλητα κατατάσσονται στις κάτωθι τέσσερις κατηγορίες (Καββαδάς, 1996):

1) Ανόργανα απόβλητα σε διάλυση ή αιώρηση που περιέχουν βαρέα μέταλλα (μόλυβδο, υδράργυρο), αρσενικό, κάδμιο και κυανίδια.

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

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

4) Απόβλητα με μορφή παχύρρευστων υγρών, ιλύος και στερεών. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται απόβλητα διυλιστηρίων και απόβλητα καθαρισμού των δεξαμενών πλοίων μεταφοράς πετρελαιοειδών.

Τα βαρέα μέταλλα και τα μεταλλοειδή, θεωρούνται από τους πιο επικίνδυνους ρύπους γιατί δεν αποδομούνται αλλά παραμένουν στο περιβάλλον για μεγάλο χρονικό διάστημα, εισερχόμενα σε γεωχημικούς κύκλους. Η δυναμική αυτή παρουσία των βαρέων μετάλλων σε βιογεωχημικούς κύκλους αν διαταραχθεί, προκαλεί ανωμαλίες σε διάφορες βιολογικές δραστηριότητες με αποτέλεσμα ασθένειες ή ακόμα και θανάτους ζώντων οργανισμών.

Τα παρασιτοκτόνα, που είναι χημικές ενώσεις για την απομάκρυνση των φυτικών και ζωικών οργανισμών που εμφανίζονται στις γεωργικές καλλιέργειες (ζιζανιοκτόνα, μυκητοκτόνα, εντομοκτόνα), προκαλούν δηλητηριάσεις, βλάβες και καταστροφές σε διάφορα όργανα (ήπαρ, νεφρά, δέρμα κτλ), μεταλλάξεις και καρκινογενέσεις ακόμη και άμεσους θανάτους.

Οι φαινόλες είναι πολικές πτητικές ενώσεις μέτριας διαλυτότητας στο νερό. Παρουσιάζουν μεγάλη ικανότητα βιοσυσσώρευσης, εισέρχονται με μεγάλη ευκολία στη τροφική αλυσίδα και δημιουργούν βλάβες στα ζώα και τον άνθρωπο, όπως βλάβες στο ήπαρ, λευχαιμία κ.ά.

Οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (P.H.A.), είναι ενώσεις με εξαιρετικά έντονη καρκινογόνο και μεταλλαξιογόνο δραστηριότητα και αποτελούν την πιο επικίνδυνη κατηγορία ρυπαντών του περιβάλλοντος. Πηγή τους είναι η πετροχημική βιομηχανία. Επίσης ίχνη τους ανιχνεύονται στα καυσαέρια και στην τέφρα.

Τα πολυχλωριωμένα παράγωγα αρωματικών ουσιών (P.C.B.), έχουν μεγάλη βιοσυσσώρευση και μακροχρόνια παραμονή στο περιβάλλον. Σε συνεργασία με τα φυ-

τοφάρμακα και τα βαρέα μέταλλα προκαλούν διαταραχές και μεταλλάξεις στους ζώντες οργανισμούς.

Τα βιομηχανικά απόβλητα υποβάλλονται σε επεξεργασία για να απαλλαγούν από τους ρυπαντές και να διατεθούν εν συνεχεία στο περιβάλλον ή να επαναχρησιμοποιηθούν.

Βασική αρχή των αντιρρυπαντικών τεχνολογιών αντιμετώπισης των τοξικών ουσιών είναι η *in situ*, δηλαδή επί τόπου στη πηγή εξουδετέρωση τους.

Τα υπόγεια νερά είναι επίσης πολύ ευαίσθητα στη ρύπανση και έχουν περιορισμένη δυνατότητα αυτοκαθαρισμού. Η κατάληξη αστικών λυμάτων στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα έχει ως κύριο αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών αλάτων, με αποτέλεσμα τα υπόγεια νερά να γίνονται τοξικά για τον άνθρωπο και τους ζωικούς οργανισμούς. Η ρύπανση τους με βιομηχανικά απόβλητα μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες συγκεντρώσεις μετάλλων ή άλλων τοξικών ουσιών στα υπόγεια νερά.

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

**Τα απόβλητα μεταλλευτικής δραστηριότητας** (mining waste) παράγονται κατά την εξόρυξη ορυκτών πόρων σε ανθρακωρυχεία, μεταλλεία και αποτελούνται από ένα ετερογενές μίγμα νερού και κονιορτοποιημένου ορυκτού και πιθανά περιέχουν και βαρέα μέταλλα, ως παραπροϊόντα. Με τις διαδικασίες αποκάλυψης των μεταλλευμάτων αφαιρείται ο προστατευτικός εδαφικός μανδύας και έτσι οι πιθανοί ρύποι οδηγούνται κατευθείαν στους υδροφόρους ορίζοντες. Συχνά οι μεταλλευτικές εργασίες επεκτείνονται κάτω από την επιφάνεια του υπόγειου νερού και απαιτείται στράγγιση. Το νερό αυτό είναι πλούσιο σε μέταλλα, γνωστό ως όξινο νερό μεταλλείου. Οι εκσκαφές μετά το πέρας της εκμετάλλευσης χρησιμοποιούνται συνήθως σαν χώροι απόθεσης απορριμμάτων με πιθανή ρύπανση των υπόγειων νερών. Οι αποθέσεις τους, λό-

γω της μικρής διατμητικής αντοχής είναι ασταθείς και παρουσιάζουν μεγάλες καθιζήσεις. Στην Ελλάδα το πρόβλημα εντοπίζεται στην παραγόμενη τέφρα των λιγνιτωρυχείων (Μεγαλόπολη, Πτολεμαΐδα). Σε περιπτώσεις που τα παραγόμενα απόβλητα των ορυχείων ή διάφορα παραπροϊόντα (εξόρυξη λατομικών ορυκτών) δεν είναι επικίνδυνα, μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως δομικά υλικά για επιχωματώσεις κ.λπ.

**Απόβλητα γεωργο-κτηνοτροφικής δραστηριότητας.** Τα σπουδαιότερα μέσα της σύγχρονης γεωργίας που είναι τα χημικά λιπάσματα και τα φυτοφάρμακα αποτελούν πηγές ρύπανσης. Τα στερεά απόβλητα κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων (κοπρίες), τα οποία είναι πλούσια σε νιτρικά και διαλυμένα άλατα, αποτελούν επίσης πηγές ρύπανσης.

Τα χημικά λιπάσματα, τα φυτοφάρμακα και τα στερεά απόβλητα των ζώων που εφαρμόζονται στο έδαφος παρασύρονται από τα απορρέοντα νερά των βροχοπτώσεων και των χιονοπτώσεων προς τα στραγγιστικά δίκτυα και από εκεί στους ποταμούς. Το νερό που κινείται μέσα από το έδαφος παρασύρει τις πλεονάζουσες ποσότητες των χημικών ουσιών προς το στραγγιστικό δίκτυο. Από τα κυριότερα θρεπτικά στοιχεία το άζωτο είναι εκείνο που κινείται ταχύτερα με το νερό στράγγισης, ενώ τα φωσφορικά δεσμεύονται από το έδαφος και φθάνουν στα ποτάμια ουσιαστικά με τη διάβρωση. Τα φυτοφάρμακα που εφαρμόζονται στο έδαφος ή στην επιφάνεια των φυτών, γενικά δεσμεύονται από τα εδαφικά υλικά και φθάνουν στα υδατορεύματα με τη διάβρωση των εδαφών.

Το νερό που επιστρέφει από τις αρδεύσεις διηθείται παρασέρνοντας διαλυμένες ουσίες στα υπόγεια νερά. Έτσι στοιχεία που περιέχονται στα λιπάσματα οδηγούνται στο υπόγειο νερό, ειδικά σε περιπτώσεις διαπερατών εδαφικών σχηματισμών. Οι πλέον επικίνδυνοι ρύποι είναι τα νιτρικά ιόντα, τα οποία έχουν μεγάλη ευκινησία και μετακινούνται εύκολα από την ακόρεστη ζώνη στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Στην ακόρεστη ζώνη οι διαλυμένες ουσίες κινούνται κατακόρυφα προς την υπόγεια στάθμη και στην κορεσμένη ζώνη η υδραυλική κλίση προκαλεί την οριζόντια κίνηση του υπόγειου νερού και των ρύπων που περιέχονται σε αυτό. Η αλόγιστη χρήση λιπασμάτων με αποτέλεσμα την αύξηση των νιτρικών ιόντων έχει οδηγήσει σε πλήρη υποβάθμιση πολλούς υδροφόρους ορίζοντες, κυρίως φρεάτιους σε πολλές περιοχές της χώρας μας. Σημαντικές ποσότητες νερού από αυτές που χρησιμοποιούνται για άρδευση (περίπου το 10%) επιστρέφουν και τροφοδοτούν τον υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα (irrigation return flow). Το νερό αυτό είναι εμπλουτισμένο σε άλατα, τα οποία προστίθενται με τη διαδικασία της διάλυσης κατά την άρδευση και απ' τα άλατα των

λιπασμάτων. Επικρατούντα ιόντα στην επιστρεφόμενη αρδευτική ροή είναι  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ . Για να διατηρηθούν οι αποδόσεις των καλλιεργειών σε ικανοποιητικά επίπεδα τα άλατα εκπλύνονται εφαρμόζοντας μεγαλύτερες ποσότητες νερού με αποτέλεσμα τα άλατα να φτάνουν στα υπόγεια νερά και με τη στράγγιση στα επιφανειακά νερά. Το νερό αυτό αποτελεί σημαντική πηγή ρύπανσης των υπόγειων και επιφανειακών αποδεκτών, ειδικά στις περιοχές όπου εφαρμόζεται εντατική άρδευση, σε ξηρές και ημίξηρες κλιματικές συνθήκες, αυξάνοντας την αλατότητα τους

**Φυσικές πηγές.** Η ρύπανση από τις φυσικές πηγές προκαλείται από τα απορρέοντα νερά των βροχών, τη διαρροή του υπόγειου νερού, τα στραγγιστικά δίκτυα των ελών και βάλτων και την υδρόβια ζωή των ποταμών, την επίδραση ευδιάλυτων πετρωμάτων (γύψος, ορυκτό αλάτι κ.ά.), την έντονη εξάτμιση που προκαλεί ανύψωση του υπόγειου νερού και απόθεση αλάτων, την οξειδωση των πετρωμάτων και τη διείσδυση της θάλασσας. Με το νερό της απορροής από τις βροχές μεγάλης έντασης εκπλύνονται μεγάλες ποσότητες οργανικού και ανόργανου υλικού και διαβρώνονται τα εδάφη και οι όχθες των ποταμών. Με τη διαρροή του υπόγειου νερού μεταφέρεται μια ποικιλία χημικών συστατικών από το εδαφικό νερό και από τους γεωλογικούς σχηματισμούς. Σε περιόδους μικρών παροχών η συγκέντρωση των διαλυμένων αλάτων στα υδατορεύματα αυξάνει και μπορεί να καταστεί επιζήμια σε διάφορους χρήστες του νερού και ιδιαίτερα όταν περιλαμβάνονται τοξικά υλικά για τον άνθρωπο και τα ζώα. Τα στραγγιστικά των ελών έχουν υψηλή συγκέντρωση χρώματος, οργανικών και ανόργανων υλικών και συνήθως χαμηλό pH και διαλυμένο οξυγόνο. Οι υδρόβιοι οργανισμοί με το θάνατο τους συνεισφέρουν στη ρύπανση των υδατορευμάτων. Στο Σχήμα 2.1 δίνονται οι βασικές πηγές ρύπανσης των υδατορευμάτων.

Μια άλλη μορφή ρύπανσης των επιφανειακών και των υπόγειων νερών είναι η **μόλυνση**, δηλαδή η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών. Αυτή οφείλεται κατά κανόνα σε αστικά ή σε κτηνοτροφικά λύματα. Η ανίχνευση των παθογόνων μικροοργανισμών στο νερό γίνεται έμμεσα, μέσω της μέτρησης των κολοβακτηριδίων, τα οποία γενικά δεν είναι παθογόνα, αλλά βρίσκονται σε μεγαλύτερες ποσότητες και αποτελούν ένδειξη της πιθανής μόλυνσης των νερών.

Άλλες πιθανές αιτίες ρύπανσης του υπόγειου νερού είναι: τα ρευστά από την απόσυνθεση των πτωμάτων στα νεκροταφεία τα οποία έχουν υψηλό ρυπαντικό φορτίο, που αν αναμειχθούν με τα νερά της βροχής και κατεισδύσουν στους υδροφόρους ορίζοντες προκαλούν επικίνδυνες μολύνσεις, ο εμπλουτισμός από ρυπασμένα επιφα-



νειακά νερά, η ρίψη NaCl για την αποπαγοποίηση των δρόμων (2-10 tn ανά km), η διείδυση της θάλασσας, τα διασταλάζοντα υγρά από τις χωματερές κ.ά.

α) Η ρύπανση στα επιφανειακά νερά μπορεί να είναι οξεία τοξική, χρόνια ή λανθάνουσα. Η οξεία ρύπανση εκδηλώνεται θεαματικά (μαζικοί θάνατοι ψαριών σε λίμνες, ποτάμια κλπ.) αλλά η χρόνια είναι πλέον επικίνδυνη γιατί δεν γίνεται έγκαιρα αντιληπτή και συχνά όταν η ανάσχεση είναι δυσχερής ή αδύνατη.

β) Η ρύπανση στα υπόγεια νερά συντελείται με τη διείδυση των αποβλήτων στους υδροφόρους ορίζοντες και προκαλείται από οργανικά, ανόργανα, βιολογικά, φυσικά ή ραδιενεργά στοιχεία, μπορεί δε να είναι γραμμική, σημειακή ή εκτεταμένη υπόγεια ρύπανση.

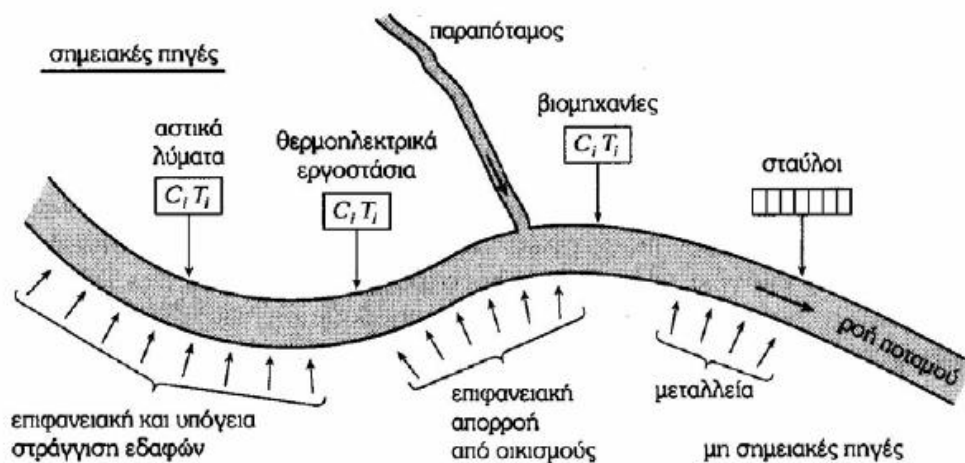
Οι πηγές ρύπανσης ανάλογα με τον τρόπο που παροχετεύουν τα απόβλητα τους στους αποδέκτες μπορούν να διακριθούν σε "σημειακές πηγές", στις οποίες τα απόβλητα παροχετεύονται στον αποδέκτη από τις εξόδους των υπονόμων ή των στραγγιστικών αγωγών, και σε "μη σημειακές ή κατανεμημένες στο χώρο πηγές", στις οποίες οι ρύποι που είναι διάσπαρτοι στη γη μεταφέρονται με την επιφανειακή απορροή του νερού, που προέρχεται από τις βροχοπτώσεις, των υλικών που ξεπλένονται και παρασύρονται από τον αέρα και την επιφάνεια του εδάφους με τη διάβρωση και με την κίνηση του υπόγειου νερού στους αποδέκτες (Σχήμα 2.1). Τα υλικά που μεταφέρονται μ' αυτό τον τρόπο είναι ιζήματα, απόβλητα ζώων, λιπάσματα, φυτοφάρμακα, θρεπτικά στοιχεία, οργανικά απόβλητα, βαρέα μέταλλα και μικροβιακοί ρύποι. Η ρύπανση από τη διαρροή των υπόγειων νερών εξαρτάται από τη γεωλογία και την τοπογραφία, τα είδη βλάστησης και τις κλιματικές συνθήκες. Στις μη σημειακές πηγές περιλαμβάνονται οι περισσότερες πηγές της γεωργικής δραστηριότητας και ιδιαίτερα ο εμπλουτισμός των υδατορευμάτων προς τα κατάντη με ολικά διαλυμένα άλατα από την επιστροφή του νερού άρδευσης.

Για τη διατήρηση ή βελτίωση της ποιότητας του νερού απαιτείται ο έλεγχος των σημειακών και μη σημειακών πηγών. Ο έλεγχος των σημειακών πηγών είναι εύκολος αν κατασκευαστούν τα κατάλληλα έργα στις εξόδους ιών προς τους αποδέκτες. Υπάρχουν δύο κατηγορίες μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την ποσοτική και ποιοτική εκτίμηση της ρύπανσης των επιφανειακών νερών από μη σημειακές πηγές. Η μία είναι μια έμμεση προσέγγιση, που χρησιμοποιεί δεδομένα μετρήσεων των ποιοτικών παραμέτρων στα ποτάμια, ρέματα ή λίμνες από τα οποία εκτιμάται η σπουδαιότητα των μη σημειακών πηγών. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να δίνει γενικές ενδείξεις για την ποιότητα και την ποσότητα της μη σημειακής ρύπανσης, αλλά περιορίζεται στην

ποιότητα του νερού του αποδέκτη και όχι των πηγών ή των αιτιών της ρύπανσης. Οι παρατηρήσεις των ποιοτικών παραμέτρων του νερού του αποδέκτη έχουν μικρή αξιοπιστία, επειδή οι τιμές των παραμέτρων αυτών επηρεάζονται από μία ποικιλία πηγών ρύπανσης και από τις πολυάριθμες φυσικές και χημικές διαδικασίες που γίνονται στο ποτάμι.

Η άλλη είναι μια άμεση προσέγγιση, που συγκεντρώνεται απ' ευθείας στις μη σημειακές πηγές, με δειγματοληψίες σε μικρές, ομογενείς λεκάνες και με μαθηματική περιγραφή των γεγονότων που προκαλούν τη ρύπανση από τις μη σημειακές πηγές. Η διαδικασία αυτή απαιτεί τον ποσοτικό προσδιορισμό 1) της χρήσης της γης και διαχείρισης της και τα παράγωγα απόβλητα (οργανικά υλικά, θρεπτικά στοιχεία, φυτοφάρμακα, ιζήματα κτλ), 2) την αλληλεξάρτηση των αποβλήτων από τη βροχόπτωση και την απορροή και 3) τη μεταφορά των αποβλήτων με την απορροή στους αποδέκτες.

**Σχήμα 2.1.** Βασικές πηγές ρύπανσης των υδατορευμάτων (Αντωνόπουλος, 1991).



Μια από τις πηγές ρύπανσης είναι και η όξινη βροχή. Αυτής της μορφής η ρύπανση έχει επίδραση σε λίμνες και ποτάμια λόγω της μικρότερης αραιώσης έναντι αυτής στις ανοιχτές θάλασσες. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι (εκτός από την απευθείας οξίνιση από το νερό της βροχής) μέσω των οποίων τα όξινα χημικά στοιχεία εισχωρούν στις λίμνες και επηρεάζουν το υδάτινο οικοσύστημα. Οι λίμνες και τα ποτάμια μπορούν να θεωρηθούν ως το «άντρο» της γης, όπου η βροχή πέφτει στη γη, αποστραγίζεται από τα αποχετευτικά συστήματα και τελικά αυτά κατευθύνονται προς τις λίμνες. Επιπλέον η όξινη βροχή εκπλένει τα θρεπτικά στοιχεία από το έδαφος και μεταφέρει τα τοξικά μέταλλα που έχουν απελευθερωθεί -από την έκπλυση του εδάφους-

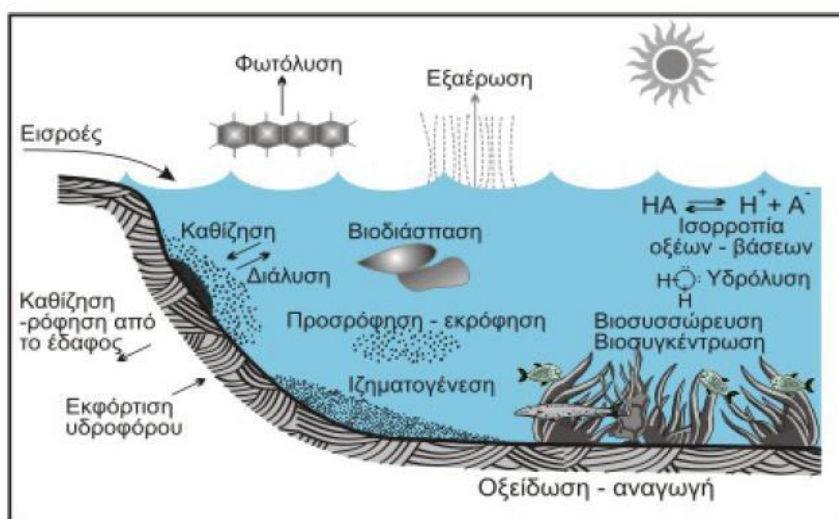
στις περιοχές των λιμνών. Η οξίνιση των λιμνών επιβαρύνεται ιδιαίτερα κατά τη περίοδο της άνοιξης που συντελείται ένα όξινο «ξέσπασμα». Το ραγδαίο λιώσιμο των πάγων την άνοιξη, που οφείλεται στην ξαφνική αλλαγή της θερμοκρασίας, απελευθερώνει οξέα και διάφορα χημικά στοιχεία στο έδαφος. Έτσι το λιωμένο χιόνι, εμπλουτισμένο με τα όξινα αυτά στοιχεία διατρέχει ποταμούς και χείμαρρους καταλήγοντας στις λίμνες. Η εισαγωγή των οξέων στις λίμνες με τους παραπάνω τρόπους προκαλεί ξαφνική και δραστική μεταβολή στο pH και το υδατικό οικοσύστημα δεν έχει χρόνο να προσαρμοστεί σ' αυτή τη ραγδαία μεταβολή. Από έρευνες που έχουν γίνει σ' ευρωπαϊκές λίμνες οι επιστήμονες κατέληξαν στον πίνακα 2.1, για την επίδραση της οξίνισης στο υδατικό οικοσύστημα.

**Πίνακας 2.1.** Επιδράσεις οξίνισης στο υδατικό οικοσύστημα (Κανελλοπούλου, 2000).

pH	ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ
< 6	* Βασικοί τύποι τροφής πεθαίνουν. Π.χ. έντομα που αποτελούν τροφή για ψάρια του γλυκού νερού δεν επιβιώνουν σ' αυτές τις τιμές pH.
< 5,5	* Τα ψάρια δεν αναπαράγονται. * Τα νεογνά αδυνατούν να επιβιώσουν. * Τα πλήρως αναπτυγμένα ψάρια στερούνται τα θρεπτικά στοιχεία. * Τα ψάρια πεθαίνουν από ασφυξία.
< 5,0	* Τα ψάρια πεθαίνουν.
< 4,0	* Πολύ διαφορετικοί τύποι ζωής.

Στον Πίνακα 2.2 αναφέρονται οι κυριότεροι τρόποι ρύπανσης των νερών, το είδος των ρύπων και η επίδραση της ρύπανσης στο περιβάλλον και στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται ένα παραστατικό διάγραμμα, όπου αποτυπώνονται οι κυριότερες διαδικασίες μεταφοράς των ρύπων στο υδατικό περιβάλλον.

**Σχήμα 2.2.** Μεταφορά ρυπαντών στο υδατικό περιβάλλον (Καλλέργης, 2001).

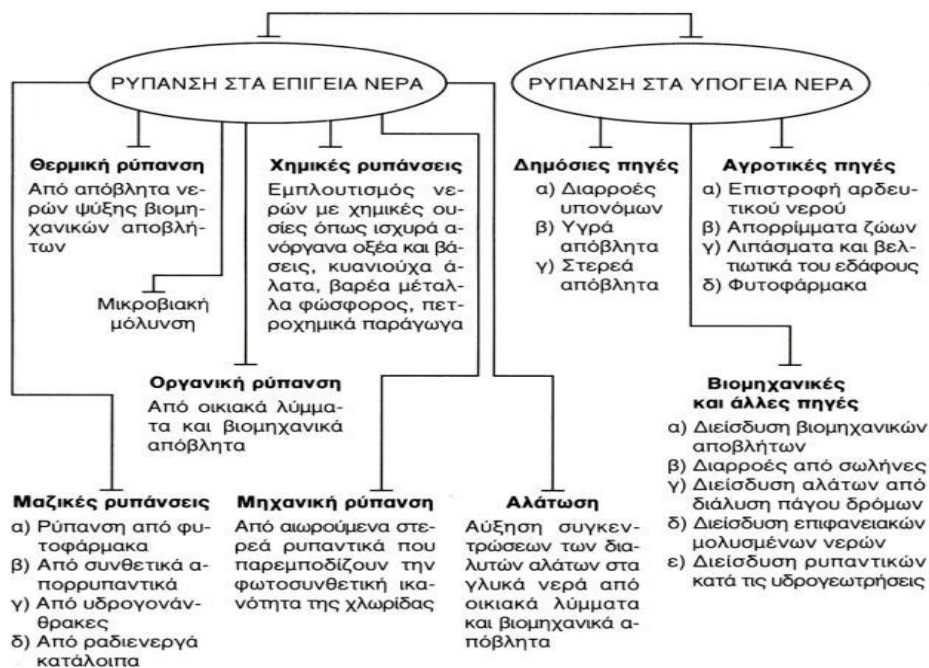


**Πίνακας 2.2.** Πηγές ρύπανσης των επιφανειακών και υπόγειων νερών (Βουδούρης, 2000).

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

Όλες οι κατηγορίες ρύπανσης, ανά πηγή προέλευσης, μπορεί να ταξινομηθούν σε ένα γενικό πλάνο, έτσι όπως φαίνεται στο Πίνακα 2.3. Στο Πίνακα 2.4 δίνεται η τυπική σύνθεση των αστικών λυμάτων και το επίπεδο στο οποίο μειώνεται μετά την πρωτοβάθμια και την προχωρημένη επεξεργασία (Feigin, 1991). Στο Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται οι τυπικές τιμές, το εύρος των τιμών που έχουν καταγραφεί και οι μονάδες μετρήσεις των περισσότερων ποιοτικών παραμέτρων στα υπόγεια και επιφανειακά νερά (McCutcheon, 1991).

**Πίνακας 2.3.** Γενικό πλαίσιο ταξινόμησης των ειδών ρύπανσης κατά κατηγορία και πηγή προέλευσης (Κανελλοπούλου, 2000).



**Πίνακας 2.4.** Τυπική σύνθεση αστικών λυμάτων (Feigin, 1991).

Συστατικό	Συγκέντρωση, mg/L			Επεξεργασία	
	Μέγιστη	μέση	ελάχιστη	πρωτοβάθμια	Τριτοβάθμια
Στερεά ολικά	1300	700	200		
διαλυμένα	1000	500	260	500	
αιωρούμενα	350	220	100	100	1-5
BOD <sub>5</sub>	350	200	100	135	2-9
COD	1000	500	250	335	
TOC	290	160	80		
Αζώτο ολικό	85	40	20	40	6-13
αμμωνιακό	50	25	10	30	0-17
οργανικό	35	15	5		
νιτρικό	1.5	0.2	0	<0.1	0-20
Φώσφορος	36	10	4	8	0.2
Χλώριο	650	150	10		80-250
Ασβέστιο+Μαγνήσιο	150	80	25		40-60
Νάτριο	460	120	10		90-220
Κάλιο	25	10	5		10-30
Αλκαλικότητα	400	200	50	150	
Λίπη	150	100	35		
ολικά κολοβακτήρια, MPN/100 ml	>10 <sup>7</sup>	20-5x10 <sup>6</sup>	5x10 <sup>3</sup>		
pH	9	7.2	7		

**Πίνακας 2.5.** Εύρος και συγκεντρώσεις των ποιοτικών παραμέτρων στα επιφανειακά και υπόγεια νερά (McCutcheon, 1991).

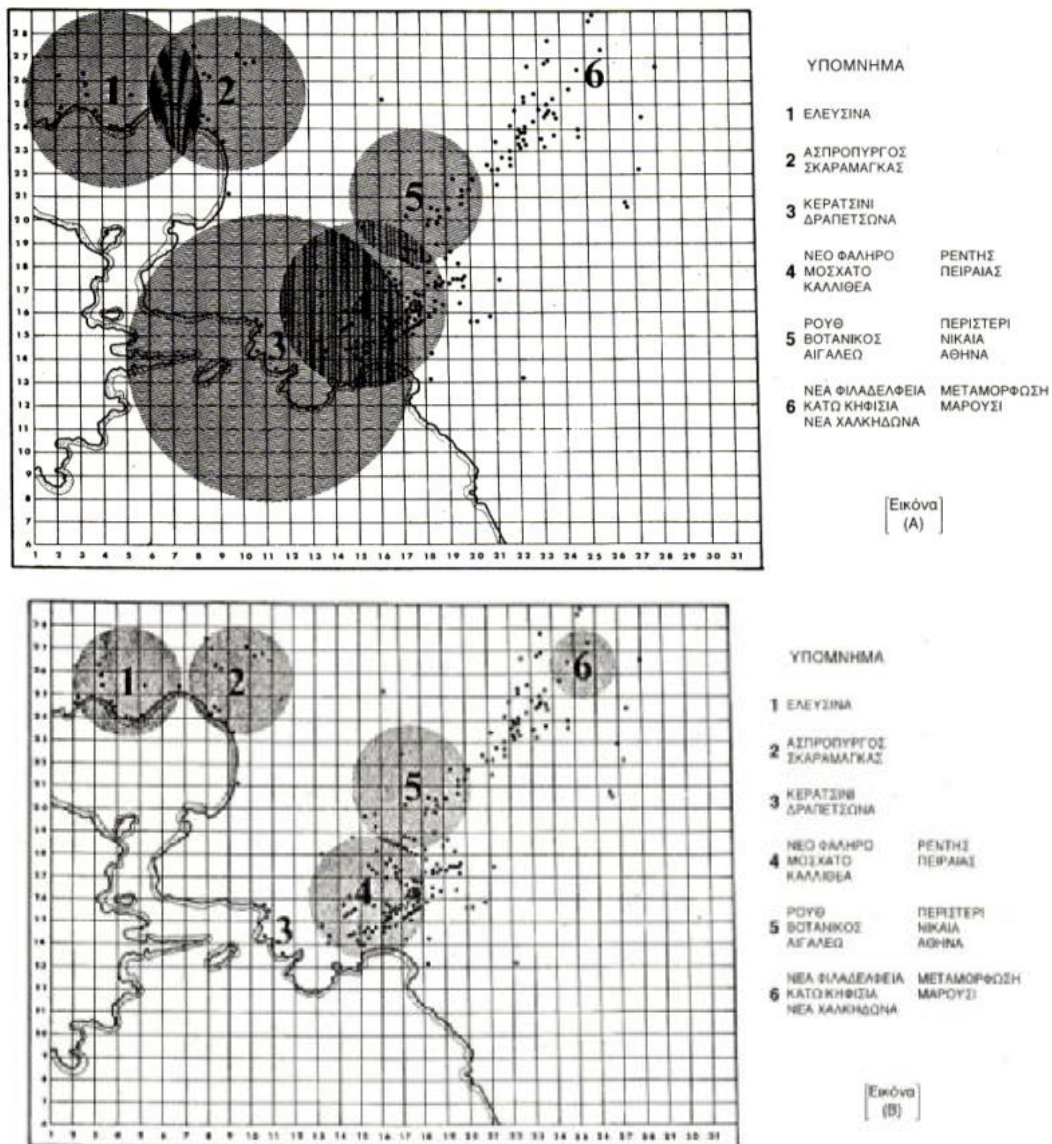
Ποιοτική παράμετρος	Τυπική τιμή	Εύρος τιμών	Μονάδες
Θερμοκρασία	Μεταβλητή	0 - 30	°C
pH	4.5 - 8.5	1 - 9	pH
Διαλυμένο οξυγόνο (O <sub>2</sub> )	3 - 9	0 - 19	mg/l
Οργανικό άζωτο	0.1 - 9	< 0.2 - 20	mg/l
Ολικό άζωτο (N)	0.1 - 10	0.004 - > 100	Mg/l
Αμμωνία (NH <sub>3</sub> -N)	0.01 - 10	< 0.01 - 45	mg N/l
Νιτρώδη (NO <sub>2</sub> -N)	0.01 - 0.5	< 0.002 - 10	mg N/l
Νιτρικά (NO <sub>3</sub> -N)	0.23	0.01 - 250	mg N/l
Ολικός φώσφορος (P)	0.02 - 6	0.01 - 30	mg P/l
Ορθοφωσφορικά (PO <sub>4</sub> )	0.01 - 0.5	< 0.01 - 14	mg P/l
Ολικός οργανικός C	1 - 10	0.01 - 40	mg C/l
Διαλυμένος οργανικός C	1 - 6	0.3 - 32	mg C/l
Διοξείδιο του άνθρακα (CO <sub>2</sub> )	0 - 5	0 - 50	mg CO <sub>2</sub> /l
Αλκαλικότητα (CaCO <sub>3</sub> )	150	5 - 250	mg CaCO <sub>3</sub> /l
Σκληρότητα (CaCO <sub>3</sub> )	47 - 54	1 - 1000	mg CaCO <sub>3</sub> /l
Χρώμα	1 - 10	0 - 500	μονάδες χρώματος
Θολότητα		0 - 3	NTU
Αγωγιμότητα	70	40 - 1500	μS/cm at 25°C
Διαλυμένα στερεά		5 - 317	mg/l
Αιωρούμενα στερεά	73 - 89	0.3 - 50000	Mg/l
Ολικά στερεά	10 - 110	20 - 1000	Mg/l
Κυανιούχα	1 - 4		Mg/l
Φαινόλες	< 1	< 1 - 6	Mg/l
Χλωριούχα (Cl <sup>-</sup> )	8	0 - 158000	Mg/l
Διττανθρακικά (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (CaCO <sub>3</sub> )	58.4	0 - 4467	Mg/l
Θειικά (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	8.3 - 11.2	0.13 - 3930	Mg/l

Ποιοτική παράμετρος	Τυπικές τιμές	Εύρος τιμών	Μονάδες	Ποιοτική παράμετρος	Τυπικές τιμές	Εύρος τιμών	Μονάδες
Αντιμόνιο (Sb)	1	0.26 - 5.1	μg/l	Αργίλιο (Al)	50	7 - 4400	μg/l
Αργυρος (Ag)	0.3	0.03 - 2	μg/l	Ασβέστιο (Ca)	13 - 15	0 - 954	mg/l
Αρσενικό (As)	2	< 0.1 - 1100	μg/l	Βόριο (B)	18	0.7 - 840	μg/l
Βρόμιο (Br)	20	0.5 - 4400	μg/l	Κάλιο (K)	1.3-2.3	0.02 - 189	mg/l
Ιώδιο (I)	2 - 7	0.2 - 100	μg/l	Καίσιο (Cs)	0.035	0.004 - 0.2	μg/l
Κάδμιο (Cd)	0 - 5	0.09 - 130	μg/l	Λίθιο (Li)	12	0.01 - 400	μg/l
Κοβάλτιο (Co)	0.2	< 0.001 - 15	μg/l	Μαγγάνιο (Mg)	4	0 - 379	mg/l
Μόλυβδος (Pb)	1	< 0.01 - 55	μg/l	Μαγνήσιο (Mn)	8.2	0.1 - 2200	μg/l
Μολυβδαίνιο (Mo)	0.5	0 - 145	μg/l	Νάτριο (Na)	5.1 - 6.3	0.7 - 1220	mg/l
Νικέλιο (Ni)	2.2	0.001 - 530	μg/l	Πυρίτιο (SiO <sub>2</sub> )	10 - 14	0.15 - 101	mg/l
Ουράνιο (U)	0.04	0.016 - 47	μg/l	Σίδηρος (Fe)	0.04	0.01 - 2000	mg/l
Υδράργυρος (Hg)	1	< 0.1 - 5	μg/l	Χρώμιο (Cr)	1	< 0.01 - 84	μg/l
Χαλκός (Cu)	10	0.05 - > 100	μg/l				
Ψευδάργυρος (Zn)	30	0 - < 5000	μg/l				

Στο σχήμα 2.3 καταγράφονται οι μεγαλύτερες εστίες βιομηχανικών αποβλήτων στην Αττική.





**Σχήμα 2.3.** Απεικόνιση της κατανομής του όγκου των υγρών βιομηχανικών αποβλήτων [Εικόνα (A)] και των φορτίων BOD<sub>5</sub> [Εικόνα (B)] στην Αττική. Το εμβαδόν των κύκλων σε κάθε περιοχή είναι ανάλογο του όγκου και των φορτίων των αποβλήτων (Πρόγραμμα Ελέγχου Ρυπάνσεως Περιβάλλοντος Αθήνας, Τεχνική Έκθεση, Τόμος II, Αθήνα 1980).

## 2.5. Υδατικά συστήματα και πηγές ρύπανσης τους

**Ποτάμια και ρέματα:** Στα υδατορεύματα η ρύπανση που προκαλείται σε ένα σημείο προκαλεί προβλήματα σ' αυτούς που ζουν κατόντη (ανθρώπους και οργανισμούς) ενώ όλες οι δραστηριότητες που συμβαίνουν στην υδρολογική λεκάνη μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα σε άλλες περιοχές της λεκάνης. Τα υδατορεύματα συνδέονται υδρολογικά, οικολογικά, γεωλογικά και κοινωνικοοικονομικά με τις λίμνες, τους υγροτόπους, τις θάλασσες και τα υπόγεια νερά. Τα υδατορεύματα υποφέρουν κυρίως από ιζήματα και θρεπτικά στοιχεία, ακολουθούν τα παθογόνα, τα φυτοφάρμακα, η οργανική ρύπανση και κατά συνέπεια η χαμηλή οξυγόνωση. Οι αιτίες της ρύπανσης είναι η απορροή από γεωργικές εκτάσεις αλλά και οι σημειακές αστικές πηγές, τα μεταλλεία και η επιφανειακή απορροή αστικοποιημένων περιοχών.

**Λίμνες και ταμιευτήρες:** Οι λίμνες είναι πιο ευαίσθητες στη ρύπανση γιατί το νερό τους ανανεώνεται πολύ αργά. Ακόμα και κάτω από τις φυσικές συνθήκες οι λίμνες βρίσκονται υπό την επίδραση των διαδικασιών του ευτροφισμού, λόγω της εναπόθεσης των φερτών υλικών και των οργανικών υλικών. Τα μέταλλα και τα θρεπτικά στοιχεία είναι από τις κοινές αιτίες ρύπανσης των λιμνών. Οι πηγές της ρύπανσης των λιμνών είναι οι φορτίσεις από τα υδατορεύματα που εκβάλλουν στις λίμνες, η επιφανειακή απορροή των γεωργικών εκτάσεων, οι ατμοσφαιρικές αποθέσεις και οι αστικές εκροές λυμάτων και απορροϊκών νερών.

**Εκβολές ποταμών (δέλτα):** Τα δέλτα των ποταμών είναι οι περιοχές όπου τα ποτάμια εκβάλλουν στη θάλασσα. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από διαφορετικό βαθμό αλατότητας, σύνθετες μετακινήσεις νερών που επηρεάζονται από τις παλίρροιες και τα ρεύματα των ποταμών. Είναι υψηλής παραγωγικότητας συστήματα και μεγάλης ποικιλότητας ενδιστοιχημάτων από φυτά, οστρακοειδή, ψάρια και ζώα. Πολλά είδη ενδιστοιχούν μόνιμα στα οικοσυστήματα αυτά, ενώ άλλα, όπως οι γαρίδες χρησιμοποιούν τα πλούσια σε θρεπτικά στοιχεία νερά των δέλτα για την αναπαραγωγή και μετά φεύγουν στη θάλασσα. Τα δέλτα υποφέρουν από τις ποικίλες δραστηριότητες που αναπτύσσονται στην υδρολογική λεκάνη. Δέχονται ρύπους που μεταφέρουν τα υδατορεύματα από τις αγροτικές περιοχές και από τους οικισμούς. Η ρύπανση οφείλεται σε θρεπτικά στοιχεία, σε παθογόνα, σε οργανικά υλικά και κατά συνέπεια σε μείωση του διαλυμένου οξυγόνου και στα ιζήματα.

**Υγρότοποι:** Είναι περιοχές που κατακλύζονται ή κορένονται με επιφανειακά ή υπόγεια νερά σε μία συχνότητα και διάρκεια, ικανή για να υποστηρίξουν μία επικρατούσα ποικιλία φυτών που έχουν προσαρμόσει τη ζωή τους σε κορεσμένες εδαφικές



συνθήκες. Στους υγροτόπους περιλαμβάνονται γενικά βάλτοι, έλη, παρόχθιες λιμναίες και θαλάσσιες περιοχές και άλλες παρόμοιες περιοχές.

Στο παρελθόν οι υγρότοποι θεωρούνταν εκτάσεις μη παραγωγικές, άχρηστες και πηγές κουνουπιών, εντόμων και οσμών που έπρεπε να αποστραγγιστούν και να βελτιωθούν ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άλλες ωφέλιμες χρήσεις. Τα τελευταία όμως χρόνια έχει αναγνωριστεί η μοναδική αξία και σπουδαιότητα των υγροτόπων. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία υγροτόπων που εξαρτάται από τη διαφοροποίηση στην τοπική και περιφερειακή υδρολογία, τα φυτά, τη χημεία του νερού, τα εδάφη, την τοπογραφία και το κλίμα.

## **2.6. Μεταφορά της ύλης στο υδάτινο περιβάλλον**

Βασική συνιστώσα της μελέτης της ρύπανσης των υδάτινων σωμάτων αποτελεί η μελέτη της μεταφοράς της ύλης. Ως δείκτες ποιότητας ενός υδάτινου σώματος εξετάζονται οι συγκεντρώσεις των ρύπων στις διάφορες θέσεις του ή ακόμα οι μέσες συγκεντρώσεις σε διατομές, σε πεπερασμένα στοιχεία όγκου και στο σύνολο του υδάτινου σώματος. Ακόμη και στην περίπτωση κατά την οποία η ποιότητα του νερού δεν χαρακτηρίζεται από τη συγκέντρωση ρύπων αλλά από παράγωγα μεγέθη, όπως συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου και φυτοπλαγκτού, ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων τους προϋποθέτει τη γνώση της διασποράς των ρύπων που επηρεάζουν τους δείκτες αυτούς, δηλαδή της διασποράς της οργανικής ύλης (BOD) και των θρεπτικών (N, P).

Το πρόβλημα της μεταφοράς του ρύπου στον υδάτινο αποδέκτη, είναι η εύρεση της συνάρτησης  $C = C(x, y, z, t, q_m)$ , όπου  $C$  είναι η συγκέντρωση του ρύπου στην θέση  $x, y, z$  σε χρόνο  $t$  και  $q_m = q_m(t)$  είναι η ταχύτητα εισροής του ρύπου (μάζα/χρόνος) σε μια ή περισσότερες θέσεις του αποδέκτη. Οι ρύποι θεωρούνται ως ύλες διαλυμένες στο νερό.

Η μεταφορά της ύλης στο υδάτινο περιβάλλον πραγματοποιείται με δυο μηχανισμούς, το μηχανισμό της μεταγωγής και το μηχανισμό της διάχυσης. Μεταγωγή είναι η μεταφορά της ύλης εξαιτίας της κίνησης του υδάτινου μέσου. Διάχυση είναι η κίνηση των σωματιδίων της ύλης σε σχέση με το νερό, έστω και αν αυτό ηρεμεί, από την περιοχή των υψηλότερων προς τη περιοχή των χαμηλότερων συγκεντρώσεων.

Παράγοντας που επηρεάζει πολύ σοβαρά τη διασπορά των ρύπων και γενικότερα τη λειτουργία των υδατικών οικοσυστημάτων είναι η θερμοκρασιακή στρωμάτωση σχετικώς βαθιών θαλασσών και λιμνών. Το καλοκαίρι, ένα επιφανειακό στρώμα νε-

ρού με πάχος μερικών μέτρων, αποκτά υψηλή θερμοκρασία και σχετικώς χαμηλή πυκνότητα. Το στρώμα αυτό ονομάζεται επιλίμνιο ή ζώνη κυκλοφορίας. Τα στοιχεία της μάζας του κινούνται εύκολα κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση κάτω από την επίδραση του ανέμου και των άλλων δυνάμεων και τείνει να διατηρεί υψηλό βαθμό μίξης. Κάτω από το επιλίμνιο, βρίσκεται το μεσολίμνιο ή θερμοκλινές, το οποίο χαρακτηρίζεται από ταχεία ταπείνωση της θερμοκρασίας και συνεχώς ταχεία αύξηση της πυκνότητας. Κάτω από το μεσολίμνιο, βρίσκεται το υπολίμνιο το οποίο χαρακτηρίζεται από χαμηλή θερμοκρασία που ελαφρά ταπεινώνεται με το βάθος και μπορεί να φτάσει τους 4 °C, δηλαδή τη θερμοκρασία της μέγιστης πυκνότητας. Η κυκλοφορία στο υπολίμνιο είναι συχνά φτωχή. Η άνω στρωμάτωση πυκνότητας αποτελεί σοβαρό εμπόδιο για τη κατακόρυφη μίξη, η οποία περιορίζεται κυρίως στο επιλίμνιο. Έτσι τα λύματα που εκβάλλουν σε μεγάλα βάθη αναμιγνύονται με σχετικά πυκνό κρύο νερό, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό πεδίου λυμάτων βυθισμένου πολύ κάτω από την επιφάνεια. Εξαιτίας της πολύ φτωχής κατακόρυφης κυκλοφορίας, οι συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου στο υπολίμνιο μπορεί να είναι χαμηλές ενώ οι συγκεντρώσεις των αέριων προϊόντων της αποσύνθεσης υψηλές.

Το φθινόπωρο, οι επιφανειακές μάζες ψύχονται, γίνονται πυκνότερες και βυθίζονται ενώ θερμότερες και αραιότερες μάζες νερού ανέρχονται στην επιφάνεια. Η αναστροφή αυτή ονομάζεται φθινοπωρινή αναστροφή και τείνει να εδραιώσει σταθερή θερμοκρασία και πυκνότητα σε όλο το βάθος του νερού. Η οικολογική σημασία της είναι μεγάλη, επειδή έχει ως αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό με οξυγόνο και την αναδιανομή των τροφών. Τροφές που είχαν βυθιστεί σε χαμηλά στρώματα ανέρχονται προς την επιφάνεια, όπου χρησιμοποιούνται για φωτοσύνθεση.

Κατά τη μελέτη της μεταφοράς της ύλης σε δεξαμενές επεξεργασίας του φυσικού νερού ή λυμάτων υιοθετείται ένα από τα δυο ακραία ιδεατά καθεστώτα μίξης, δηλαδή εμβολοειδής ροή ή πλήρης μίξη.

## **2.7. Συμπεριφορά ρύπων σε υδατικά συστήματα**

Οι βασικοί μηχανισμοί αδρανοποίησης των ρύπων που αφορούν τόσο την ακόρεστη όσο και τη κορεσμένη ζώνη ενός υδροφόρου συστήματος είναι: **αραίωση, διήθηση, προσρόφηση, χημική αλλοίωση ή εξουδετέρωση**. Οι βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς των ρύπων είναι τα **ρεύματα μεταφοράς** και η **υδροδυναμική διασπορά (μηχανική ανάμιξη και μοριακή διάχυση)**.

Το σύνολο της εσωτερικής ικανότητας των αντιδράσεων αυτών του φυσικού περιβάλλοντος συνιστά την λεγόμενη ικανότητα **καθαρισμού** ή **ικανότητα εξασθένησης** (του ρυπαντικού φορτίου). Ο βαθμός εξασθένησης που υπάρχει ανάμεσα στη πηγή της ρύπανσης και το υδατικό σύστημα ή τον υδροφόρα προσδιορίζει τη σχετική δυνατότητα ρύπανσης.

Είναι προφανές ότι κάθε ρύπος επηρεάζει, επιβαρύνει, αλλά και αντιμετωπίζεται διαφορετικά από το συγκεκριμένο υδρογεωλογικό περιβάλλον. Η είσοδος, παραμονή και επικινδυνότητα του ρύπου ή του μολυντή σε ένα υδατικό σύστημα συνδέονται και εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του γεωλογικού περιβάλλοντος και από τα χαρακτηριστικά του ίδιου του ρύπου.

Η δράση των μηχανισμών αδρανιοποίησης των ρύπων επιτελείται μέσα σε ένα πλέγμα χημικών, φυσικών και βιολογικών αντιδράσεων. Περιγράφοντας αναλυτικά τους μηχανισμούς αυτούς, επισημαίνονται οι: **γεωχημικές διαδικασίες** (αντιδράσεις οξέων – βάσεων, προσρόφηση – απελευθέρωση, οξειδωση – αναγωγή, διάλυση – κατακάθιση, συσσωμάτωση), **φυσικές διαδικασίες** (ροές και βραδείες μετακινήσεις, διασπορά, εξάτμιση, διήθηση, διακίνηση αερίων, ραδιενεργή φθορά), **βιοχημικές διαδικασίες** (οργανική αποδόμηση, κυτταρική σύνθεση, διαπνοή), **βιοφυσικές διαδικασίες** (διήθηση και μεταφορά παθογόνων μικροοργανισμών).

Κάθε τμήμα ή περιοχή του φυσικού περιβάλλοντος εμφανίζει κάποιους από τους μηχανισμούς αυτούς σε διαφορετικούς βαθμούς δραστηριότητας. Τέτοιες περιοχές είναι η ζώνη του εδαφικού καλύμματος, η ακόρεστη ζώνη και η κορεσμένη ζώνη.

Αναλυτικότερα, οι βασικές διαδικασίες που επηρεάζουν την εξέλιξη και τη μεταφορά των ρύπων στο εσωτερικό ενός υπόγειου υδατικού συστήματος παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά (Στουρνάρας, 2000):

**Προσρόφηση - Απελευθέρωση:** Πολλές στερεές ουσίες του εδάφους ερχόμενες σε επαφή με το υπόγειο νερό έχουν τη τάση να απελευθερώνουν ορισμένα από τα συστατικά τους και να δημιουργούν υδατικά διαλύματα και παράλληλα να κινητοποιούν διαχωρισμένα ή μη συστατικά από φάσεις υδατικών διαλυμάτων και να τα «προσδένουν» στην επιφάνεια των στερεών σωματιδίων με διαμοριακές ανταλλαγές. Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται από ισορροπία ανάμεσα στις ποσότητες των δυο πλευρών. Μια αύξηση της συγκέντρωσης του υδατικού διαλύματος αυξάνει τη ποσότητα που προσροφάται και μια μείωση έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση της απε-

λευθέρωσης. Ουσίες ισχυρώς προσροφούμενες είναι τα αργιλικά ορυκτά, οι ζεόλιθοι, υδροξειδία σιδήρου, μαγνησίου και πυριτίου και οργανικές ενώσεις.

Μέσα στα πλαίσια αυτά, χαρακτηριστική είναι η δράση των ριζικών συστημάτων των φυτών, μικροοργανισμών και μικροβιακών συγκεντρώσεων. Οι συνεχείς αντιδράσεις προσρόφησης – απελευθέρωσης, προκαλούν μια καθυστέρηση στη μεταφορά του ρύπου σε σχέση με τη κίνηση του περιβάλλοντος υπόγειου νερού, φαινόμενο που χαρακτηρίζεται από την έννοια του **συντελεστή υστέρησης (retardation factor)**, ο οποίος εκφράζει το λόγο της ταχύτητας του υπόγειου νερού προς τη ταχύτητα του ρύπου.

**Διάλυση - Κατακάθιση:** Η συγκέντρωση διαλυμένων συστατικών στο υπόγειο νερό είναι συνάρτηση της διάλυσης και των διαδικασιών της υδρόλυσης. Ανάλογα με τη συμπεριφορά τους οι συγκεντρώσεις αυτές διακρίνονται σε ηλεκτρολύτες (άλατα, οξέα, βάσεις) και μη ηλεκτρολύτες (πολωμένες και μη πολωμένες συνθέσεις). Η ικανότητα του νερού για διάλυση αυξάνεται από ανόργανα και οργανικά οξέα και από την αύξηση της θερμοκρασίας. Η διάλυση και η κατακάθιση συχνά ελέγχονται από το pH και το Eh. Τα ηλεκτρολυτικά στοιχεία συνήθως διακρίνονται σε ιόντα. Οι πολωμένες οργανικές συνθέσεις, όπως η ζάχαρη, το αλκοόλ και τα αέρια σχηματίζουν αληθινά διαλύματα, μέσα στα οποία υπάρχουν με τη μορφή των μορίων. Μη πολωμένες συνθέσεις (προϊόντα πετρελαίου κλπ.) συνήθως δεν διαλύονται στο νερό.

Στη διάρκεια της διαδρομής του υπογείου νερού, τα διαλυμένα συστατικά μπορούν να κατακαθίσουν όταν η εξάτμιση και η διαπνοή αυξάνουν την συγκέντρωσή τους πάνω από τα αντίστοιχα όρια κορεσμού ή όταν αναμιγνύονται υπόγεια νερά διαφορετικής χημικής σύστασης. Πολλές φορές τα καθιζάνοντα συστατικά κινητοποιούν προς την κατεύθυνση της κατακάθισης άλλα ιόντα, μεγαλύτερης συγκέντρωσης.

**Οξείδωση - Αναγωγή:** Ουσίες με διαλυτότητες, που εξαρτώνται από τις τιμές pH και Eh μπορούν να καθιζάνουν στην επαφή με νερά διαφορετικών τιμών στις παραπάνω παραμέτρους (π.χ. υπόγειο νερό ελεύθερο οξυγόνου, που περιέχει ιόντα σιδήρου, αναμιγνυόμενο με νερό που περιέχει οξυγόνο). Παράλληλα οι συνθήκες Eh μπορούν να μεταβάλλονται κατά μήκος των γραμμών ροής του υπόγειου νερού.

Διαδικασίες κατανάλωσης οξυγόνου, όπως μικροβιακή αποσύνθεση της οργανικής ύλης, μπορούν να επιτρέψουν την εμφάνιση ζωνών αναγωγής, που χαρακτηρίζονται από την παρουσία ιόντων σιδήρου, μαγνησίου, αμμωνίας, νιτρικών και θειούχων. Σε τέτοιες ζώνες αναγωγής, τα βαρέα μέταλλα καθιζάνουν σαν ενώσεις του θείου, όταν το θείο είναι παρόν. Σε υπόγειες διαδρομές, όταν η προμήθεια οξυγόνου υπερβαίνει

την κατανάλωση του, τα αναγόμενα ανόργανα συστατικά οξειδώνονται και καθιζάνουν τα ελάχιστα διαλυτά οξείδια και υδροξείδια σιδήρου και μαγνησίου.

**Βιοχημικές διαδικασίες:** Οι οργανικές ενώσεις αποσυνθέτονται από μικροοργανισμούς, οι οποίοι, από την αποσύνθεση αυτή, παραλαμβάνουν άνθρακα και υδρογόνο, απαραίτητα για την κυτταρική τους σύνθεση. Η αναγκαία ενέργεια για τον μεταβολισμό αυτόν προέρχεται από την αποσύνθεση ουσιών, πλούσιων σε ενέργεια, σε απλούστερες ενώσεις και τελικά σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Οι αντιδράσεις αυτές εμφανίζονται τόσο σε αερόβιο όσο και σε αναερόβιο περιβάλλον, στο τελευταίο με μικρότερες ταχύτητες. Σε περιβάλλον αναερόβιο, οι μικροοργανισμοί παραλαμβάνουν το αναγκαίο οξυγόνο από την αναγωγή οξυγονούχων ενώσεων, ιδιαίτερα νιτρικών και θειικών.

Οι κατευθύνσεις των μικροβιακών αντιδράσεων ελέγχονται από τις θερμοδυναμικές σχέσεις των συστημάτων. Οι μικροβιακές αντιδράσεις εμφανίζουν μεγάλη σημασία, από υδρογεωχημικής πλευράς στη διαδικασία οξειδωσης – αναγωγής που αφορά το θείο, το άζωτο, το σίδηρο, το μαγνήσιο και τον άνθρακα.

**Ροές ρύπων:** Πρόκειται για μετακινήσεις ρύπων και μολυντών, που προκαλούνται από την ίδια τη ροή του υπογείου νερού. Από πλευράς μηχανισμών μεταφοράς ρύπων, ταυτίζονται με τα «ρεύματα μεταφοράς». Με τη διαδικασία αυτή μεταφέρονται ουσίες που δεν αντιδρούν, τόσο μεταξύ τους, όσο και με το περιβάλλον ροής. Οι ταχύτητες ροής των ρύπων εξαρτώνται από τις ταχύτητες ροής του υπόγειου νερού, από μερικά mm μέχρι μερικά m την ημέρα, προκειμένου για πορώδη μέσα. Στα μέσα ασυνεχειών οι ταχύτητες φτάνουν μέχρι 8.000 m/day και στα καρστικά μέσα μέχρι 26.000 m/day.

**Διασπορά:** Ο βαθμός διασύνδεσης των πόρων και των ασυνεχειών ή καρστικών αγωγών προκαλεί μια διασπορά των συγκεντρώσεων των ρύπων και μια απόκλιση από τις τυπικές και προδιαγεγραμμένες γραμμές ροής. Η διασπορά αυτή επιτείνεται από τις μεταβολές της ταχύτητας ροής του νερού ή των ρύπων στα διάφορα πεδία ροής. Το φαινόμενο είναι γνωστό σαν «υδροδυναμική διασπορά». Είναι το κοινό όνομα δυο διαφορετικών μηχανισμών, της «μηχανικής ανάμιξης» και της «μοριακής διάχυσης», εμφανίζεται τόσο στην κατεύθυνση ροής όσο και κάθετα προς αυτήν ακόμα και αντίθετα προς αυτή.

Η διασπορά γενικεύεται και αποκτά τις μέγιστες τιμές της στις περιπτώσεις ανάμιξης του προσβεβλημένου υπόγειου νερού, με άλλο καθαρό. Στην περίπτωση αυτή η

διασπορά και οι μεταβολές της εκφράζονται αποκλειστικά από τις «συγκεντρώσεις» και «αραιώσεις» με τη καθαρά χημική έννοια.

**Υστέρηση:** Είναι το αθροιστικό αποτέλεσμα μιας σειράς φυσικών ή χημικών μηχανισμών που προκαλούν καθυστέρηση στη μετακίνηση των ρύπων μέσα στο υπόγειο υδάτινο περιβάλλον. Μπορεί να θεωρηθεί σαν το αποτέλεσμα διαδοχικών προσροφήσεων και απελευθερώσεων. Μπορεί ακόμα να αφορά διαλύσεις, διηθήσεις, χημικές αντιδράσεις και βιοχημικούς μετασχηματισμούς. Η υστέρηση αυτή μπορεί να είναι σε σχέση με την ταχύτητα ροής του νερού ή να φτάνει μέχρι τέλειας ακινησίας του ρύπου.

Τα αντίστοιχα υδατικά διαλύματα διακρίνονται σε δυο κατηγορίες, τα **συντηρητικά (conservative)** και τα **δραστικά (reactive)**. Τα πρώτα είναι αδρανή απέναντι στο νερό και το περιβάλλον ροής γενικότερα. Τα δεύτερα μπορούν να υποστούν χημικές ή βιολογικές μεταβολές που μειώνουν την συγκέντρωση του διαλύματος και την ευκολία μετακίνησης του.

**Διήθηση:** Το φαινόμενο της διήθησης είναι ένα σύνθετο και χημικό φαινόμενο. Περιλαμβάνει τη μετακίνηση των μεγαλύτερων σωματιδίων, λόγω μηχανικού εντατικού πεδίου και προσρόφηση των μικρότερων. Η μετακίνηση των υλικών εν αιωρήσει περιορίζεται από το μέγεθος τους και από το μέγεθος των πόρων ή ασυνεχειών.

**Διακίνηση αερίων:** Η διακίνηση αερίων ανάμεσα στα υπόγεια νερά και την ατμόσφαιρα γίνεται μέσω της ακόρεστης ζώνης. Η διακίνηση αυτή επηρεάζεται από τις θερμοκρασιακές και βαρομετρικές μεταβολές, ενώ στην κορεσμένη ζώνη επηρεάζεται μόνο από την κατανομή της υπόγειας ροής. Το οξυγόνο της ακόρεστης ζώνης επηρεάζει τη διακίνηση και στις δυο φάσεις, ενώ δεν είναι σπάνια η παραγωγή αερίων στην κορεσμένη ζώνη, που επιστρέφουν στην ατμόσφαιρα (άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα, πτητικά στοιχεία και συστατικά).

## **2.8. Ανθρωπογενείς επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού**

Οι δραστηριότητες του ανθρώπου που μπορεί να προκαλέσουν άμεσες ή έμμεσες μεταβολές της φυσικής ποιότητας του νερού, διακρίνονται στις εξής τέσσερις κατηγορίες (Αντωνόπουλος, 2001):

α) Μεταβολές στον υδρολογικό κύκλο οι οποίες τροποποιούν την ικανότητα αραίωσης και ανάμιξης του νερού των υδατικών συστημάτων και του υδατικού ισοζυγίου. Οι υδρολογικές μεταβολές στην υδρολογική λεκάνη αρχίζουν με την καταστροφή των δασών. Η κατασκευή φραγμάτων στα ποτάμια μπορεί να τροποποιήσει την ποιότητα

του νερού με την καθίζηση των υλικών, την αύξηση του χρόνου διαδρομής και την εξάτμιση. Οι επιπτώσεις είναι η μικρή περιεκτικότητα σε αιωρούμενα στερεά του νερού των εκρών, η μείωση σε θρεπτικά στοιχεία (λόγω του ευτροφισμού μέσα στους ταμιευτήρες) και σε ορισμένες περιπτώσεις στην αύξηση της αλατότητας που εξαρτάται από το ισοζύγιο του νερού. Επίσης η μείωση του ωφέλιμου όγκου των ταμιευτήρων από την εναπόθεση των ιζημάτων. Η υδροληψία νερού επηρεάζεται από το βάθος τοποθέτησης της, έτσι που το νερό που εκρέει μπορεί να είναι θερμότερο, υπερκορεσμένο με οξυγόνο, ψυχρότερο ή με έλλειμμα στο οξυγόνο σε σχέση με το νερό που φτάνει στον ταμιευτήρα.

Η εκτροπή του νερού από ένα υδατικό διαμέρισμα σε ένα άλλο μπορεί να προκαλέσει δυσμενή αποτελέσματα ιδιαίτερα στην αλατότητα, ως αποτέλεσμα της εξάτμισης ή της μείωσης της αραίωσης. Η εκτροπή μπορεί επίσης να επηρεάσει τη μεταφορά των ρύπων.

Μια άλλη δραστηριότητα που μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του νερού προς τα κατάντη είναι η καταστροφή και επαναδημιουργία των υγροτόπων, λόγω της ικανότητας τους να αποθηκεύουν ρύπους και θρεπτικά στοιχεία.

Άλλες τροποποιήσεις του υδρολογικού κύκλου που επηρεάζουν την ποιότητα του νερού προκαλούνται από την υπεράντληση των παραθαλάσσιων υδροφορέων και την εισροή του θαλάσσιου νερού στους υδροφορείς γλυκού νερού, ή με τη διάνοιξη των εκβολών για τη ναυσιπλοΐα με την οποία προκαλούνται τα ίδια προβλήματα.

β) Προαγωγή ή μείωση των φυσικών βιογεωχημικών κύκλων όπως της αποσάθρωσης, της πρωτογενούς παραγωγικότητας και της μηχανικής διάβρωσης. Η υλοτόμηση των δασών, οι πυρκαγιές, η κατασκευή δρόμων, η επέκταση της γεωργίας και η έκλυση αστικών οργανικών λυμάτων είναι ορισμένες επεμβάσεις αυτής της κατηγορίας, όπως και η καταστροφή των υγροτόπων που επηρεάζουν σημαντικά την ικανότητα του περιβάλλοντος να αποθηκεύει και αποδομεί τους ρύπους και τα θρεπτικά στοιχεία.

γ) Άμεση και έμμεση απόρριψη ουσιών στα υδάτινα σώματα. Παραδείγματα τέτοιων δραστηριοτήτων είναι η διασπορά αλάτων για αντιπαγετική προστασία, λίπανση στις γεωργικές εκτάσεις με N, P, K, οι καύσεις άνθρακα και πετρελαίου και οι δραστηριότητες βιομηχανιών μετάλλου.

δ) Άμεση ή έμμεση έκλυση συνθετικών οργανικών και ανόργανων ουσιών. Αυτή η δραστηριότητα είναι αρκετά πρόσφατη και περιλαμβάνει την παραγωγή και χρήση πλαστικών υλικών, τετρααιθυλιούχο μόλυβδο, ραδιενεργά απόβλητα κτλ. Επειδή αυ-

τά τα προϊόντα δεν είναι φυσικά δεν μπορεί να οριστούν επιτρεπτά επίπεδα για το περιβάλλον.

## **2.9. Επιπτώσεις – Ανίχνευση της ρύπανσης**

Γενικά η ρύπανση του επιφανειακού και υπόγειου νερού έχει σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και ανιχνεύεται με έναν ή συνδυασμό περισσότερων τρόπων, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι (Βουδούρης, 2000):

- Από την περιεκτικότητα σε διαλυμένα άλατα.
- Από την περιεκτικότητα σε παθογόνους μικροοργανισμούς.
- Από τα αιωρούμενα στερεά.
- Από την περιεκτικότητα σε διαλυμένο οξυγόνο.
- Από το φαινόμενο του ευτροφισμού – άνθηση του νερού.
- Από την περιεκτικότητα σε τοξικά μέταλλα και ενώσεις.
- Από τη θερμική αλλοίωση.
- Από την περιεκτικότητα σε ραδιενεργές ουσίες.
- Υφαλμύριση των παράκτιων υδροφόρων οριζόντων.

## **2.10. Τα προβλήματα ρύπανσης του νερού**

Τις τελευταίες δεκαετίες, η φυσική ποιότητα των υδάτινων συστημάτων έχει μεταβληθεί από την επίδραση των ποικίλων ανθρωπίνων δραστηριοτήτων και χρήσεων του νερού. Οι πιο πολλές περιπτώσεις ρύπανσης έχουν δημιουργηθεί βαθμιαία με την πάροδο του χρόνου και έγιναν αντιληπτές και μετρήσιμες μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα.

Τα πρώτα προβλήματα κακής ποιότητας νερού με επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου άρχισαν να εμφανίζονται τον 18ο αιώνα. Αργότερα, από τα μέσα του 20ού αιώνα παράλληλα με τη βιομηχανική ανάπτυξη έχουν εμφανιστεί πολλά προβλήματα ποιότητας του νερού με ταχύτατη διαδοχή. Η υπερφόρτιση των υδάτινων οικοσυστημάτων εξαπλώθηκε ταχύτατα σε πολλά μέρη του κόσμου. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται με χρονολογική σειρά η εμφάνιση των σοβαρότερων προβλημάτων ποιότητας νερού στην Ευρώπη (Meybeck et al., 1990).

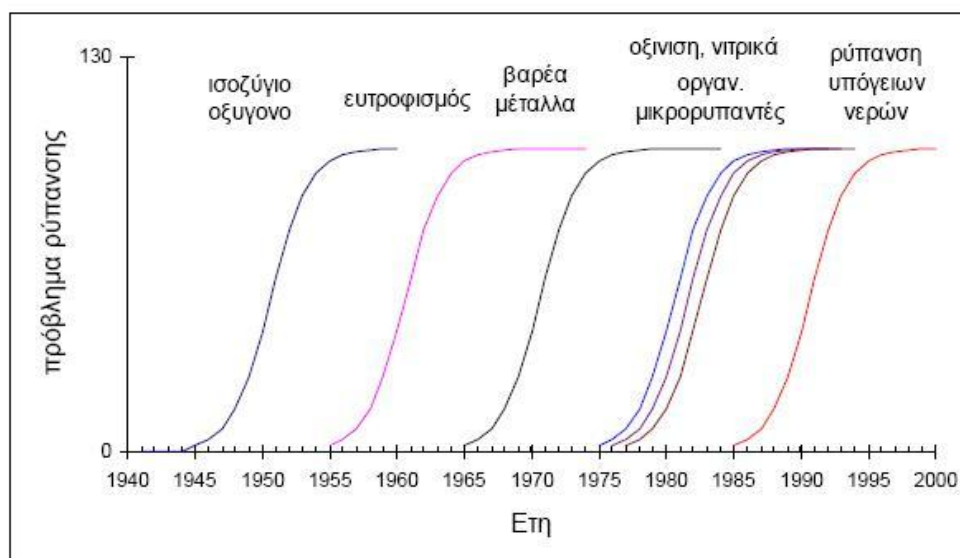
Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 50 εμφανίστηκε σοβαρή εποχιακή μείωση του διαλυμένου οξυγόνου σε αρκετούς σημαντικούς ποταμούς που προκάλεσε μια γενική υποβάθμιση της ποιότητας τους. Η αιτία ήταν η υπερφόρτιση τους με βιοαποικοδομήσιμα οργανικά απόβλητα από τους παρόχθιους οικισμούς και βιομηχανίες. Το



πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με την εγκατάσταση βιολογικών σταθμών επεξεργασίας των λυμάτων και το αποτέλεσμα ήταν η βαθμιαία αποκατάσταση της ποιότητας του νερού των ποταμών.

Στην επόμενη δεκαετία του 60, διαπιστώθηκε ότι η απομάκρυνση των οργανικών υλικών από τα λύματα μείωσε μεν την αποδόμηση τους και τη ζήτηση οξυγόνου στα υδάτινα συστήματα, αλλά δεν αντιμετωπίστηκαν τα δευτερεύοντα προβλήματα του ευτροφισμού των λιμνών και ταμιευτήρων που ευνοούνται από το φώσφορο και το άζωτο των λυμάτων. Ο έλεγχος του ευτροφισμού επιτεύχθηκε με τη μείωση του φωσφόρου, ενός από τα βασικά θρεπτικά συστατικά, αν και η αποκατάσταση των λιμνών και ταμιευτήρων είναι μία βραδεία διαδικασία και για την πλήρη αποκατάστασή τους απαιτείται αρκετός χρόνος.

**Σχήμα 2.4.** Αλληλοδιαδοχή εμφάνισης των κυριότερων προβλημάτων ρύπανσης του νερού στην Ευρώπη (Meybeck et al., 1990).



Κατά τη δεκαετία του 70 αυξήθηκαν βαθμιαία οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στα ιζήματα και στο νερό των ποταμών και λιμνών σε επίπεδα συναγερμού. Η βιοσυσσώρευση τους στα ψάρια είχε ως αποτέλεσμα την ανάγκη επέμβασης στις πηγές τους, ιδιαίτερα των πιο επιβλαβών μετάλλων, όπως ο υδράργυρος και ο μόλυβδος. Την ίδια περίοδο η ρύπανση του περιβάλλοντος εισέρχεται σε μια νέα φάση από την παραγωγή και χρήση πολλών συνθετικών ουσιών, οι οποίες εκλύονται στο περιβάλλον. Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχουν παντού στα υπόγεια και επιφανειακά νερά που αποτελούν πηγές νερού. Οι επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων και η

οικοτοξικολογία άρχισαν να μελετούνται εντατικά και η έρευνα για τον έλεγχο, μείωση ή περιορισμό τους αποτελούν την κύρια προσπάθεια των επόμενων ετών.

Αλλά προβλήματα που εμφανίστηκαν αυτή την περίοδο είναι η ατμοσφαιρική μεταφορά των αερίων των εκλύσεων από τις καύσεις των υδρογονανθράκων, η οξίνιση των λιμνών και των ποταμών και η μεταφορά τους στα υπόγεια νερά.

Από τα πρώτα χρόνια της δεκαετίας του 80 παρατηρήθηκε ότι τα νιτρικά στα υπόγεια και επιφανειακά νερά σε πολλές περιπτώσεις υπερβαίνουν τα συνιστώμενα όρια. Η αιτία είναι η εκτεταμένη χρήση των αζωτούχων λιπασμάτων και των στερεών αποβλήτων (ζώων και λάσπης βιολογικών σταθμών).

Από την ανασκόπηση αυτή γίνεται φανερό ότι τα προβλήματα παθογένειας, ελλείμματος οξυγόνου, ευτροφισμού και βαρέων μετάλλων με την έρευνα και την ανάπτυξη τεχνικών είναι υπό έλεγχο. Τα προβλήματα όμως των νιτρικών, των συνθετικών οργανικών ουσιών και οξίνισης απαιτούν μια νέα και διαφορετική διαχείριση των περιβαλλοντικών προβλημάτων.

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

Αυτοί οι κίνδυνοι για τον άνθρωπο και το περιβάλλον αναγνωρίστηκαν από τον Ο.Η.Ε. και το 1975, στα πλαίσια του προγράμματος του για το περιβάλλον (UNEP), ιδρύθηκε το Παγκόσμιο Περιβαλλοντικό Σύστημα Επιμελητείας (GEMS). Πολλά διεθνή προγράμματα ελέγχου εφαρμόστηκαν από την UNEP, τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO), τον Παγκόσμιο Οργανισμό Μετεωρολογίας (WMO), τον Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας (FAO), τον Οργανισμό Εκπαίδευσης, Επιστήμης και Πολιτισμού (UNESCO) και άλλους διεθνείς και διακυβερνητικούς οργανισμούς. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ποιότητα και τη συμφωνία των στοιχείων που λαμβάνονται (ίδιες μεθοδολογίες μέτρησης), γεγονός που αυξάνει την αξία και την εγκυρότητα των

μετρήσεων, έτσι ώστε τα στοιχεία αυτά να καταστούν χρήσιμα δεδομένα για την εκτίμηση της κατάστασης του περιβάλλοντος.

Παρόμοια δράση ανέλαβε η ΕΟΚ (1977), θεσπίζοντας κοινή διαδικασία ανταλλαγής πληροφοριών σχετικά με την ποιότητα των γλυκών επιφανειακών νερών. Η απόφαση έχει τροποποιηθεί το 1986. Οι τρεις βασικοί στόχοι της απόφασης είναι: 1) να χαρακτηριστεί ο βαθμός ρύπανσης των ποταμών της Κοινότητας και να χαραχθούν κατευθυντήριες γραμμές για τον έλεγχο της ρύπανσης και των οχλήσεων, 2) να παρακολουθούνται οι μακροπρόθεσμες τάσεις και οι βελτιώσεις που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της εφαρμογής της εθνικής και κοινοτικής νομοθεσίας και 3) να καταστεί δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που διενεργούνται στους σταθμούς δειγματοληψίας ή μετρήσεων.

Τα κράτη μέλη μετρούν 19 συγκεκριμένες φυσικές, χημικές, μικροβιολογικές και βιολογικές παραμέτρους σε 126 σταθμούς, που βρίσκονται κυρίως στους μεγάλους ποταμούς της Ευρώπης και διαβιβάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων στην Επιτροπή, κάθε χρόνο. Η Ελλάδα άρχισε να αναφέρει δεδομένα το 1982 από 6 σταθμούς. Οι παράμετροι αυτές είναι (Αντωνόπουλος, 2001):

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

Χημικές: Χλωριόντα, Νιτρικά, Αμμώνιο, Διαλυμένο οξυγόνο, BOD<sub>5</sub>, COD, Ολικός Φώσφορος, Τασιενεργές ουσίες, Ολικό Κάδμιο και Υδράργυρος.

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

Βιολογικές: Βιολογικοί δείκτες.

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

## **2.11. Προβλήματα ποιότητας και ρύπανσης στα νησιά του Αιγαίου**

Οι υδατικοί πόροι των νησιών του Αιγαίου Πελάγους παρουσιάζουν ορισμένες ιδιαιτερότητες που συνοψίζονται στα εξής: α) χαμηλές ετήσιες βροχοπτώσεις, β) ανάγλυφο του εδάφους που δεν ευνοεί την διήθηση και προκαλεί μεγάλη επιφανειακή απορροή, γ) περιορισμένης έκτασης υπόγεια υδροφόρα στρώματα, δ) γεωλογική δο-

μή από υδατοστεγούς σχηματισμούς και ε) γειννίαση των υπόγειων υδροφορέων με τη θάλασσα με αποτέλεσμα την διείσδυση του αλμυρού νερού.

Η υποβάθμιση της ποιότητας των υδατικών πόρων στα νησιά έχει και αυτή τις ιδιαίτερες της που αφορούν τους εξής παράγοντες: α) μη ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων, β) σε μεγάλο βαθμό διείσδυση της θάλασσας στα υπόγεια υδροφόρα στρώματα, γ) μικροί οικισμοί και εποχιακή αύξηση του πληθυσμού δημιουργώντας τοπικά προβλήματα από την παραγωγή και διάθεση των λυμάτων, δ) ανεξέλεγκτες χωματερές και διάθεση λυμάτων, ε) διάσπαρτες γεωργοκτηνοτροφικές μονάδες μικρής δυναμικότητας, στ) περιορισμένες βιομηχανικές μονάδες και όπου υπάρχουν τοπικού ενδιαφέροντος, ζ) περιορισμένη γεωργική παραγωγή, η οποία αναπτύσσεται σε ορισμένες μικρές περιοχές σε ορισμένα νησιά προκαλώντας τοπικά προβλήματα και η) ανταγωνισμός για την εξασφάλιση των αναγκαίων ποσοτήτων νερού.

Ο συνδυασμός των παραπάνω δείχνει ότι τα προβλήματα ποιότητας και ρύπανσης των υδατικών πόρων στα νησιά του Αιγαίου είναι σημαντικά και εντοπίζονται κυρίως στα υπόγεια νερά που αποτελούν την κύρια πηγή νερού. Κυρίως είναι προβλήματα υπαλμύρωσης, υποβάθμισης και μείωσης των αποθεμάτων λόγω της μη ορθολογικής διαχείρισης τους και προκαλούνται από τη μεταβολή των υδραυλικών χαρακτηριστικών και καταστάσεων στους υδροφορείς. Αυτές οι υδραυλικές μεταβολές προκαλούν την διείσδυση της θάλασσας και την διαρροή υφάλμυρου νερού από παρακείμενα ή επάλληλα υδροφόρα στρώματα. Στους ίδιους λόγους μπορούν να αποδοθούν και ειδικά προβλήματα από βαριά μέταλλα, νιτρικά και φυτοφάρμακα για τα οποία στις περισσότερες περιπτώσεις δεν έχουν ερευνηθεί και άρα δεν έχουν πιστοποιηθεί.

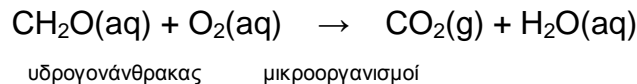
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ότι οι υδατικοί πόροι των νησιών του Αιγαίου Πελάγους υφίστανται μεγάλες πιέσεις ποιοτικής και ποσοτικής υποβάθμισης. Οι ανάγκες σε νερό εξασφαλίζονται κατά κύριο λόγο από τα υπόγεια νερά, γεγονός που σημαίνει ότι η αναφορά στην ποιότητα και τη ρύπανση των υδατικών πόρων στα νησιά του Αιγαίου αφορά κυρίως τα υπόγεια νερά. Η υποβάθμιση των πηγών νερού οφείλεται κυρίως στην υπερεκμετάλλευση και τη δημιουργία υδραυλικών συνθηκών που ευνοούν την υπαλμύρωση και εισροή ρυπασμένων νερών στους υδροφορείς. Η μείωση των πιέσεων από τα αστικά στερεά και υγρά απόβλητα θα επιτευχθεί με την κατασκευή συλλογικών αποχετευτικών συστημάτων, την επεξεργασία και την ασφαλή διάθεση τους και συγχρόνων χώρων υγειονομικής ταφής στερεών αποβλήτων. Οι διάσπαρτες οικιστικές μονάδες στα νησιά και η εποχιακή εγκατάσταση πληθυσμού

είναι ένα πρόβλημα που θα πρέπει να λυθεί με την υποχρέωση για την εγκατάσταση ατομικών συστημάτων επεξεργασίας των λυμάτων. Η ρύπανση από γεωργικές δραστηριότητες εντοπίζεται στις μικρές πεδινές εκτάσεις που είναι επίσης και οι περιοχές με τους υδροφορείς. Ο εντοπισμός των ευπρόσβλητων στην ρύπανση περιοχών των υπόγειων νερών θα βοηθήσει στην ορθολογική διαχείριση για την μείωση της ρύπανσης των υπόγειων νερών.

### 3. ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΝΕΡΩΝ

#### 3.1. Απαιτούμενο οξυγόνο σε φυσικά νερά

Η πιο κοινή ουσία που οξειδώνεται από το διαλυμένο οξυγόνο στα νερά είναι η οργανική ύλη που έχει βιολογική προέλευση, όπως νεκρή φυτική ύλη και απόβλητα ζωικής προέλευσης. Αν παραστήσουμε μια οργανική ένωση με τον εμπειρικό τύπο  $\text{CH}_2\text{O}$ , τότε η αντίδραση οξειδωσης θα είναι (Κουίμτζής, 1998):



Κατά παρόμοιο τρόπο, διαλυμένο οξυγόνο στο νερό καταναλώνεται για την οξειδωση της διαλυμένης αμμωνίας και του αμμωνιακού ιόντος σε νιτρικά ιόντα.

#### 3.2. Παράμετροι οργανικής ρύπανσης των νερών

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούμε για να εκτιμήσουμε την έκταση της οργανικής ρύπανσης των νερών είναι: η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (DO), το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), και ο ολικός οργανικός άνθρακας (TOC).

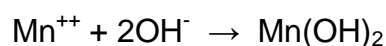
##### 3.2.1. Διαλυμένο οξυγόνο – DO (Dissolved Oxygen)

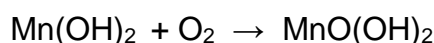
Το DO είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους ποιότητας των νερών καθώς είναι απαραίτητο για την υδάτινη ζωή. Η διαλυτότητα του οξυγόνου στο νερό είναι σχετικά μικρή και ελαττώνεται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Η μέση συγκέντρωση  $\text{O}_2$  σε φυσικά μη ρυπασμένα επιφανειακά νερά είναι περίπου 9-10 ppm. Νερά ποταμών και λιμνών που έχουν υποστεί θερμική αλλοίωση περιέχουν λιγότερο οξυγόνο.

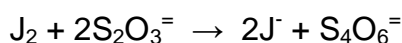
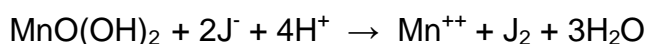
Ο προσδιορισμός του διαλυμένου οξυγόνου στα νερά (mg/l) γίνεται χημικά (κατά Winkler) ή ηλεκτροχημικά με χρήση κατάλληλου γαλβανικού στοιχείου. Μεγάλες τιμές διαλυμένου οξυγόνου που φτάνουν τις τιμές κορεσμού δείχνουν νερά καθαρά, ενώ μικρές τιμές φανερώνουν νερά έντονα ρυπασμένα με οργανικές ουσίες.

Η χημική μέθοδος βασίζεται στην προσθήκη στο δείγμα ιόντων  $\text{Mn}^{++}$ , σε αλκαλικό περιβάλλον, τα οποία οξειδώνονται από το ελεύθερο οξυγόνο του νερού, σύμφωνα με τις αντιδράσεις (Κουίμτζής, 1998):





Η ποσότητα του μαγγανίου που οξειδώθηκε προσδιορίζεται ιωδιομετρικά:



Από την κατανάλωση του  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ , υπολογίζεται το διαλυμένο οξυγόνο.

### 3.2.2. Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο – BOD (Biochemical Oxygen Demand)

Με τον όρο βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο, εννοείται η ποσότητα του οξυγόνου η οποία καταναλώνεται από τους μικροοργανισμούς για να αποδομήσουν οξειδωτικά τις οργανικές ενώσεις που υπάρχουν στο νερό σε διάστημα 5 ημερών χωρίς φως και σε θερμοκρασία 20 °C. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται το επίπεδο ρύπανσης των αποδεκτών. Αν οι ουσίες αυτές είναι τοξικές και νεκρώνουν τους μικροοργανισμούς, τότε τα αποτελέσματα δεν ανταποκρίνονται στο πραγματικό φορτίο.

Οι τιμές BOD μας δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για την ολική φόρτιση των νερών με οργανικές ενώσεις, καθώς επίσης και για την απόδοση των συστημάτων βιολογικού καθαρισμού. Στον πίνακα 3.1 δίνονται οι τιμές BOD<sub>5</sub> για διάφορα νερά.

**Πίνακας 3.1.** Τιμές BOD και COD σε διάφορα νερά και απόβλητα (Κουϊμτζής, 1998).

Προέλευση	COD με K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (O <sub>2</sub> mg/l)	BOD (O <sub>2</sub> mg/l)
Νερά ποταμών χωρίς ρύπανση	-	< 1
Νερά ποταμών που έχουν ρυπανθεί	-	> 10
Νερά αποβλήτων μετά την κατεργασία	-	10-20
Νερά οικιακών ή βιομηχ. αποβλήτων	-	300-5000
Επιτρεπτά όρια στη Β. Ελλάδα (1978)	90	30
Επιτρεπτά όρια στη Β. Ελλάδα (1983)	250	80
Ακατέργαστα λύματα (οικιακά)	420	360
Βιομηχανία γάλακτος	700-5600	500-4200
Βιομηχανία κυτταρίνης	800	300
Βιομηχανία ζάχαρης	2000	1800
Βιομηχανία κονσερβ. λαχανικών	-	100-300
Βαφεία	-	300-600
Σφαγεία (αίμα μόσχου)	234000	167000
Οινοπνευματοποιία	90000	50000

Το BOD προσδιορίζεται κυρίως με τις παρακάτω μεθόδους: την ογκομετρική, την ηλεκτροχημική, τη βαρομετρική και τη μέθοδο αραίωσης.

Η μέθοδος αραίωσης είναι η απλούστερη και εφαρμόζεται κατά κανόνα στον έλεγχο των ρυπασμένων νερών. Βασίζεται στον προσδιορισμό του διαλυμένου οξυγόνου DO πριν και μετά την αποδόμηση των οργανικών ενώσεων σε διάστημα πέντε ημερών, ύστερα από κατάλληλη αραίωση του δείγματος. Το δείγμα αραιώνεται με αποσταγμένο νερό που έχει εμπλουτισθεί με οξυγόνο, ώστε μετά την επώαση να περιέχει τουλάχιστον 2 mg/l οξυγόνου, όπου είναι και η ακριβής περιοχή μετρήσεων. Συνοπτικά το δείγμα αραιώνεται όσο πρέπει, μετρούμε το διαλυμένο οξυγόνο και στη συνέχεια επωάζεται για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Ξαναμετρούμε το διαλυμένο οξυγόνο. Ο υπολογισμός του BOD γίνεται βάσει της σχέσης (Κουϊμτζής, 1998):

$$\text{BOD mg/l} = (D_1 - D_2)/A$$

όπου,  $D_1$  = είναι το αρχικά διαλυμένο  $O_2$  σε mg/l,

$D_2$  = είναι το τελικά διαλυμένο  $O_2$  και

$A$  = είναι ο συντελεστής αραίωσης

Η τιμή του BOD για το νερό αραίωσης πρέπει να είναι αμελητέα (μικρότερη από 0.5 mg/l). Εάν η τιμή  $D_2$  είναι μικρότερη του 1.0 mg/l, ο προσδιορισμός επαναλαμβάνεται διότι η αραίωση ήταν ανεπαρκής. Επίσης επαναλαμβάνουμε τον προσδιορισμό εάν η τιμή  $D_1 - D_2 < 2$  mg/l διότι η αραίωση ήταν πολύ μεγάλη.

Τα συγκριτικά αποτελέσματα έχουν αξία μόνο αν οι προσδιορισμοί γίνονται κάτω από ίδιες ακριβώς συνθήκες. Οι παράμετροι που επιδρούν είναι: το είδος και ο αριθμός των υπαρχόντων μικροοργανισμών, το είδος των περιεχομένων οργανικών ουσιών, η προσφορά θρεπτικών υλών για τους μικροοργανισμούς, η προσφορά του οξυγόνου, η διάρκεια του προσδιορισμού, διάρκεια δράσης μικροοργανισμών επί των οργανικών ουσιών, η θερμοκρασία, ο φωτισμός και οι παρεμποδίσσεις των βιολογικών διεργασιών λόγω της παρουσίας δηλητηριωδών ή παρεμποδιστικών ουσιών. Όταν αναφερόμαστε π.χ. σε προσδιορισμό 5 ημερών το δηλώνουμε με έναν δείκτη, δηλ. BOD<sub>5</sub>.

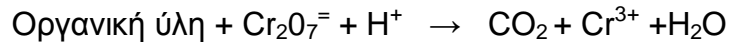
Η τιμή BOD στα απόβλητα δεν είναι μια χαρακτηριστική σταθερή παράμετρος αλλά είναι εξαρτημένη παράμετρος από το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ της ρύπανσης του νερού με την οργανική ύλη και του προσδιορισμού.

### **3.2.3. Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο – COD (Chemical Oxygen Demand)**

Το COD παριστά της ποσότητα του οξυγόνου (mg/l) που καταναλώνεται για τη χημική οξειδωση των οργανικών ενώσεων, οι οποίες περιέχονται στα νερά. Για ένα δείγμα αποβλήτων η τιμή του COD είναι μεγαλύτερη από το BOD, γιατί με τη χημική



οξειδωση οξειδώνονται όλες οι οργανικές ενώσεις ακόμα και αυτές που δεν αποδομούνται βιολογικά. Η συγκέντρωση των οργανικών ενώσεων προσδιορίζεται με την οξειδωση τους από το  $K_2Cr_2O_7$  σε όξινο περιβάλλον. Είναι δεκτό να γίνει και με υπερμαγγανικό κάλιο. Η χημική οξειδωση περιγράφεται με την αντίδραση:



και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του οργανικού φορτίου των αποβλήτων, καθώς και για να διαπιστωθεί αν περιέχονται στα νερά μη βιοαποδομήσιμες οργανικές ενώσεις, σε συνδυασμό με τη βιολογική οξειδωση.

Οι τιμές COD έχουν ιδιαίτερη αξία για απόβλητα που περιέχουν τοξικές ουσίες, έτσι ώστε δεν είναι δυνατό να προσδιορισθεί το BOD επειδή νεκρώνονται οι μικροοργανισμοί. Έτσι μόνο με το COD ή τον προσδιορισμό του ολικού άνθρακα, μπορεί να προσδιορισθεί η ολική φόρτιση σε οργανικές ενώσεις ενός τοξικού αποβλήτου.

Για να έχουμε συγκρίσιμα αποτελέσματα είναι απαραίτητο να ακολουθούμε την ίδια πάντοτε μέθοδο και τεχνική.

#### **3.2.4. Ολικός οργανικός άνθρακας – TOC (Total Organic Carbon)**

Η τιμή του TOC εκφράζει την ολική φόρτιση των νερών σε οργανικές ενώσεις. Τα αποτελέσματα εκφράζονται σε mg C/l νερού.

Οι τιμές TOC μας δίνουν πληροφορίες για το σύνολο των ενώσεων του άνθρακα, ανεξάρτητα από τις βαθμίδες οξειδωσης τους. Ο προσδιορισμός του TOC βασίζεται στη μετατροπή της ποσότητας του άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα. Για το σκοπό αυτό μικρή ποσότητα δείγματος εισάγεται σε ειδικό σωλήνα γεμάτο αδρανές αέριο. Ο σωλήνας θερμαίνεται και το νερό εξατμίζεται. Στη συνέχεια διαβιβάζεται ρεύμα οξυγόνου και η οργανική ύλη οξειδώνεται σε διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο και προσδιορίζεται με ειδικό φασματοφωτόμετρο υπερέθρου. Όταν στο εξεταζόμενο δείγμα υπάρχουν ανθρακικά άλατα, τότε το δείγμα κατεργάζεται με υδροχλωρικό οξύ για την διάσπαση τους, πριν γίνει ο προσδιορισμός του TOC.

#### **3.3. Ενώσεις αζώτου στα φυσικά νερά**

Η πιο αναγομένη μορφή είναι η αμμωνία και το αμμωνιακό ιόν. Η πιο οξειδωμένη μορφή είναι τα νιτρικά ιόντα,  $NO_3^-$ . Σε διαλύματα οι πιο σημαντικές μορφές είναι τα νιτρώδη  $NO_2^-$  και το μοριακό άζωτο. Οι διεργασίες νιτροποίησης ( $NH_3$  και  $NH_4^+$  οξειδώνονται σε  $NO_3^-$ ) και απονιτροποίησης ( $NO_3^-$  και  $NO_2^-$  ανάγονται σε μοριακό άζωτο) είναι επίσης σημαντικές στα εδάφη και στα φυσικά νερά.

Πρόσφατα έχει εκφραστεί μεγάλο ενδιαφέρον λόγω της αυξανόμενης συγκέντρωσης των νιτρικών στο πόσιμο νερό, κυρίως σε νερά πηγών σε αγροτικές περιοχές. Η κύρια πηγή των  $\text{NO}_3^-$  είναι τα εκπλύματα λόγω βροχοπτώσεων από γεωργικές εκτάσεις, που καταλήγουν στους φυσικούς αποδέκτες (λίμνες, ποτάμια, θάλασσες). Περίσσεια νιτρικών ιόντων σε απόβλητα που καταλήγουν στις λίμνες προκαλούν μια υπέρμετρη αύξηση των φυκών, που ρυπαίνουν τα νερά με την αποδόμησή τους. Μεγάλες συγκεντρώσεις νιτρικών στο πόσιμο νερό μπορούν να προκαλέσουν μεθαιμογλοβιναιμία και πιθανώς καρκίνο του στομάχου.

Τεράστια χρηματικά ποσά ξοδεύονται σε διάφορες χώρες της Ευρώπης προκειμένου να επιτευχθεί η ελάττωση του επιπέδου των νιτρικών στο πόσιμο νερό και να μη ξεπεραστεί το ανώτατο όριο των 50 ppm, όπως αυτό καθορίστηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή.

Τα νιτρικά ιόντα που περιέχονται στις τροφές και το πόσιμο νερό μετατρέπονται στο στομάχι σε νιτρώδη ιόντα, που ακολούθως αντιδρούν με τις αμίνες και σχηματίζουν N-νιτροζαμίνες, ενώσεις που προκαλούν καρκίνο σε πειραματόζωα. Εάν η ομάδα τους είναι η μεθυλομάδα, τότε προκύπτει η ένωση N-νιτροζοδιμεθυλαμίνη ή NDMA. Η ένωση αυτή σχηματίζεται στο στομάχι και υπάρχει στο πόσιμο νερό, σε τροφές και ποτά. Είναι διαλυτή στο νερό καθώς και σε οργανικά υγρά και είναι καρκινογόνος ένωση για τον ανθρώπινο οργανισμό.

Η NDMA μπορεί να σχηματισθεί ως παραπροϊόν λόγω χρήσης αμινών σε βιομηχανικές διεργασίες, όπως η κατασκευή ελαστικών αυτοκινήτου, επεξεργασία δερμάτων και παραγωγή παρασιτοκτόνων. Τα επίπεδα NDMA στα υπόγεια νερά που χρησιμοποιούνται για πόσιμο νερό είναι σε μερικές περιοχές υψηλά, επειδή βρίσκονται πλησίον βιομηχανικών πηγών της ένωσης αυτής.

### **3.4. Φωσφορικά σε επιφανειακά νερά**

Οι πηγές φωσφορικών ως ρυπαντές των νερών, είναι τα απορρυπαντικά, τα ανθρώπινα λύματα, γεωργικές καλλιέργειες και τα αγροκτήματα. Γενικά μεγάλες ποσότητες τριφωσφορικού νατρίου (STP),  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ , προστίθενται συνήθως στα περισσότερα συνθετικά απορρυπαντικά. Το νερό έκπλυσης που περιέχει STP καταλήγει στους φυσικούς αποδέκτες, όπου αντιδρά αργά με το νερό και μετατρέπεται σε φωσφορικά ιόντα  $\text{PO}_4^{3-}$ .

Τα πολυφωσφορικά υδρολύονται εύκολα προς μη τοξικά μονοφωσφορικά, τα οποία δεν αποτελούν απειλή για τον άνθρωπο και τα ζώα, προκαλούν όμως εμπλουτισμό των νερών με θρεπτικά συστατικά.

Για περιβαλλοντικούς λόγους τα φωσφορικά χρησιμοποιούνται σήμερα σε περιορισμένη έκταση ως πρόσθετα στα απορρυπαντικά. Αντικαταστάθηκαν στο μεγαλύτερο μέρος με νιτρολοτριξικό νάτριο, το οποίο σήμερα δεν χρησιμοποιείται, λόγω του αργού ρυθμού αποδόμησης του στο πόσιμο νερό. Σήμερα χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα στα απορρυπαντικά το κιτρικό, ανθρακικό και πυριτικό νάτριο καθώς και ενώσεις που ονομάζονται ζεόλιθοι.

Τα φωσφορικά ιόντα μπορούν ν' απομακρυνθούν από τα αστικά λύματα και τα βιομηχανικά απόβλητα με την προσθήκη  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , οπότε σχηματίζεται αδιάλυτο φωσφορικό ασβέστιο με τη μορφή  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ , οπότε και απομακρύνεται.

### 3.5. Απορρυπαντικά

Τα πρώτα απορρυπαντικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι σάπωνες που είναι άλατα λιπαρών οξέων με νάτριο ή κάλιο. Οι σάπωνες ως φυσικά προϊόντα, είναι βιοαποδομήσιμοι και δε δημιουργούν προβλήματα ρύπανσης του περιβάλλοντος. Τα διαλύματα τους όμως είναι αλκαλικά, διασπώνται σε όξινο περιβάλλον και αντιδρούν με τα κατιόντα ασβεστίου και μαγνησίου που είναι συστατικά των φυσικών νερών. Επομένως οι σάπωνες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σκληρά νερά. Έτσι από το 1940 άρχισε η αντικατάσταση των σαπώνων από τα «συνθετικά» απορρυπαντικά.

Στην δεκαετία όμως 1950-1960 παρουσιάστηκαν σοβαρά προβλήματα στο υδατικό περιβάλλον που προκλήθηκαν από τη χρήση απορρυπαντικών. Αυτό αποδόθηκε στη χαμηλή βιοαποδομητική ικανότητα των ABS (Alkyl Benzene Sulfonate) απορρυπαντικών. Όπως αποδείχθηκε, τα απορρυπαντικά αυτά παρεμπόδιζαν τη βιολογική δραστηριότητα και προκαλούσαν υπερβολικό αφρισμό των νερών δημιουργώντας σοβαρό αισθητικό πρόβλημα.

Τα προβλήματα αυτά λύθηκαν το 1960 με αλλαγή της χημικής δομής των απορρυπαντικών με σκοπό να γίνουν αυτά περισσότερο βιοαποδομήσιμα. Έτσι, παρασκευάστηκαν απορρυπαντικά τύπου LAS (Linear Alkylbenzene Sulfonate). Τα προβλήματα της ρύπανσης του περιβάλλοντος περιορίστηκαν αρκετά, όπως η τοξικότητα για τα ψάρια, καθώς και τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των τασενεργών ουσιών στα νερά, αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν εξαιτίας της εκτεταμένης χρήσης των νέων αυτών απορρυπαντικών. Ο ρύπος ο οποίος μπορεί να περιέχει και τοξικές ενώσεις,

μεταφέρεται με τα νερά μακριά από το σημείο εκβολής και μπορεί να προκαλέσει θανάτους σε μεγάλα ζώα που θα πίνουν το νερό αυτό. Ακόμη απλώνεται σε μεγάλες εκτάσεις στην επιφάνεια των νερών και εμποδίζει την κανονική οξυγόνωση κ.ά.

Γενικά τα απορρυπαντικά που χρησιμοποιούνται σήμερα δεν αποτελούν άμεσο κίνδυνο για τον άνθρωπο και τα ζώα. Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση σε απορρυπαντικά οδήγησε σε μια όλο και μεγαλύτερη χρησιμοποίηση ενζύμων στη παρασκευή απορρυπαντικών τόσο για οικιακή όσο και για βιομηχανική χρήση. Κατά ένα βαθμό τα ένζυμα μπορούν να πάρουν τη θέση του χλωρίου και των φωσφορικών, ενώσεις που προκαλούν δυσάρεστες επιπτώσεις στο περιβάλλον.

### **3.6. Ευτροφισμός – Άνθηση του νερού**

#### **3.6.1. Γενικά**

Η παραγωγικότητα της τροφικής αλυσίδας (αυτότροφοι οργανισμοί-ετερότροφοι οργανισμοί-αποσυνθέτες), ρυθμίζεται από τα θρεπτικά συστατικά (ενώσεις C, N, P, S κ.ά.). Ανάμεσα σ' αυτά καθοριστικό ρόλο παίζουν τα άλατα του αζώτου και του φωσφόρου μιας και βρίσκονται σε μικρές ποσότητες στα νερά. Ο εμπλουτισμός των νερών σε θρεπτικά συστατικά αζώτου και φωσφόρου ανατρέπει τη φυσιολογική ροή της τροφικής αλυσίδας και δημιουργεί εκρηκτική αύξηση των αλγών. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ευτροφισμός**. Η απότομη αύξηση των φυτικών οργανισμών σε μια λίμνη, λόγω μεγάλης προσφοράς θρεπτικών συστατικών, ονομάζεται και άνθηση του νερού (water bloom).

Ο ευτροφισμός εμφανίζεται συχνότερα σε στάσιμα νερά, όπως οι λίμνες και όχι σε κινούμενα (ποτάμια και εκβολές). Στα νερά των ποταμών και λιμνών εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τα άλατα του φωσφόρου, σε αντίθεση με τη θάλασσα, όπου ως περιριστικός παράγοντας θεωρούνται οι ενώσεις του αζώτου.

**Σχήμα 3.1.** Ανατροπή της ισορροπίας της υδροχαρούς ζωής λόγω ευτροφισμού (Κουϊμτζής, 1998).



Ανάλογα με τη συγκέντρωση των θρεπτικών συστατικών οι λίμνες κατατάσσονται σε 4 βαθμίδες τροφισμού (Κουϊμτζής, 1998):

**1) Ολιγοτροφικές:** Είναι καθαρές λίμνες, φτωχές σε θρεπτικά συστατικά και ελάχιστη παραγωγή φυτοπλαγκτού. Στο τέλος της στρωματοποίησης, ο βαθμός κορεσμού του διαλυμένου  $O_2$  στο πυθμένα ανέρχεται στο 70%.

**2) Μεσοτροφικές:** Είναι λίμνες με μικρή προσφορά σε θρεπτικά συστατικά και μέτρια παραγωγή φυτοπλαγκτού. Ο βαθμός κορεσμού  $O_2$  κυμαίνεται μεταξύ 30-70%.

**3) Ευτροφικές:** Είναι λίμνες πλούσιες σε θρεπτικά συστατικά. Η παραγωγή του φυτοπλαγκτού είναι μεγάλη και η ορατότητα μικρή. Ο βαθμός κορεσμού του διαλυμένου  $O_2$  στο πυθμένα κυμαίνεται από 0-30%.

**4) Πολυτροφικές:** Είναι λίμνες με πολύ μεγάλη και συνεχή προσφορά σε θρεπτικά συστατικά. Το καλοκαίρι παρατηρείται παντελής έλλειψη  $O_2$  και κατά διαστήματα εκλύεται  $H_2S$  ή άλλες δύσσομες ουσίες. Η ορατότητα είναι ελάχιστη.

### 3.6.2. Αιτία – Πηγές θρεπτικών συστατικών

Οι κυριότερες πηγές του συνεχώς αυξανόμενου εμπλουτισμού των νερών σε θρεπτικά συστατικά αζώτου και φωσφόρου είναι οι αγροτικές, οι βιομηχανικές δραστηριότητες και τα οικιακά απόβλητα. Πιο συγκεκριμένα ο ευτροφισμός επιταχύνεται από τη χρήση λιπασμάτων και απορρυπαντικών και ακόμη τη διάθεση λυμάτων και απόβλητων που περιέχουν μεγάλες ποσότητες νιτρικών και φωσφορικών αλάτων.

Η αναστροφή αυτής της τάσης μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση απορρυπαντικών ελεύθερων σε φωσφορικά άλατα, με τη εδαφική επεξεργασία των λυμάτων, με τη μεί-

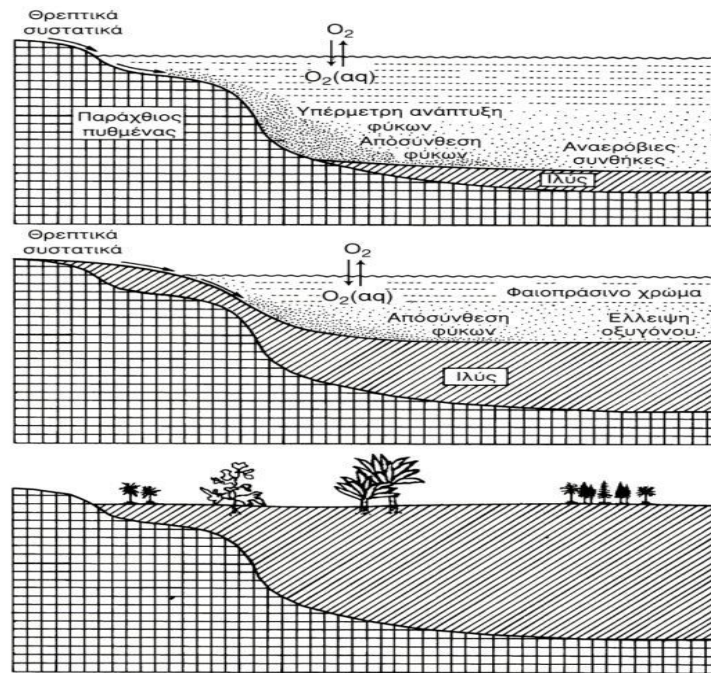
ωση της υπερβολικής χρήσης φωσφορικών λιπασμάτων, με τη χρήση προηγμένης τεχνολογίας στην επεξεργασία των βιομηχανικών αποβλήτων.

### 3.6.3. Συνέπειες του ευτροφισμού

Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τις οικολογικές και τις οικονομικές. Οι **οικολογικές συνέπειες** στους υδρόβιους οργανισμούς είναι οι εξής: αυξημένη πρωτογενής παραγωγικότητα φυτοπλαγκτού, αυξημένη δευτερογενής παραγωγικότητα οργανισμών, εμποδίζεται η εξάλειψη των επιβλαβών ουσιών λόγω βιοσυσσώρευσης και μεταφοράς τους στο πυθμένα, αύξηση των βακτηρίων, μείωση διαπερατότητας και συνθήκες ελλειπούς φωτισμού λόγω εκρηκτικής αύξησης των αλγών, ελάττωση του διαλυμένου  $O_2$  και ανάπτυξη αναερόβιων ζωνών και παραγωγή  $H_2S$  στο νερό και στο πυθμένα, θάνατοι ψαριών, μείωση του χρόνου ανάπτυξης των ψαριών και των οργανισμών που χρησιμοποιούνται για τη τροφή τους, τα είδη των αλγών (κυανοφύκη) που αναπτύσσονται είναι ακατάλληλα ως τροφή του ζωοπλαγκτού και παράλληλα καταπνίγουν την ανάπτυξη άλλων οργανισμών, εξαφανίζονται πολλά είδη άγριων πουλιών. Οι **οικονομικές συνέπειες** είναι οι ακόλουθες: ακατάλληλο νερό για πόση, παρασκευή ποτών και ψάρεμα, η κατανάλωση νερού πλούσιου σε  $NO_3^-$  προκαλεί καρκίνο και έλκος, αύξηση των δαπανών για το καθαρισμό της πλούσιας σε άλγη επιφάνειας του νερού ώστε να γίνει πόσιμο, ακατάλληλο νερό για μπάνιο λόγω θολερότητας, φυκών που επιπλέουν και ανάπτυξη μικροοργανισμών και καλαμιών, αλλεργικά προβλήματα, η εικόνα του νερού είναι χαμηλής αισθητικής, μείωση παραγωγής ψαριών, εμπόδια στη ροή των αρδευτικών και αποχετευτικών καναλιών, αυξημένος κίνδυνος καταστροφών από πλημμύρες λόγω υπερχειλίσης, εμποδίζεται η ναυσιπλοΐα, απώλεια νερού λόγω αυξημένης εξάτμισης, προβλήματα στις υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις.

Εάν ο ευτροφισμός δεν διακοπεί, είναι δυνατό μετά από πολλά χρόνια μια λίμνη να μετατραπεί σε έλος και στη συνέχεια σε στεριά (σχήμα 3.2).

**Σχήμα 3.2.** Μετατροπή μιας λίμνης σε στεριά λόγω ευτροφισμού (Κουϊμτζής, 1998).



### 3.6.4. Στρατηγικές ελέγχου του ευτροφισμού

Οι μέθοδοι για την ελάττωση, το σταμάτημα ή την αντιστροφή της διαδικασίας του ευτροφισμού είναι: μείωση των θρεπτικών συστατικών με έλεγχο των πηγών, απομάκρυνση των θρεπτικών συστατικών από το νερό, μετατροπή τους σε λιγότερο διαθέσιμες μορφές, μείωση της ικανότητας σύνθεσης βιομάζας.

Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να επιτευχθούν ελέγχοντας τις ακόλουθες παραμέτρους: ισορροπία θρεπτικών συστατικών, χρόνος παραμονής, ιζηματοποίηση, εσωτερική ανάμιξη, χημεία των μη θρεπτικών συστατικών, ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι, η αποκατάσταση μιας λίμνης βασίζεται στον έλεγχο του φορτίου των θρεπτικών συστατικών.

Οι τεχνικές αποκατάστασης είναι δύο ειδών, προληπτικές (έλεγχος των εκροών, απομάκρυνση-απενεργοποίηση θρεπτικών συστατικών με διακοπή των πηγών ρύπανσης ή με καθίζηση στον πυθμένα με τη χρήση ασβέστου ή αλάτων  $Al^{3+}$  ή  $Fe^{3+}$ , πρακτικές χρήσης της γης, τροποποίηση προϊόντων) και θεραπευτικές (εμποδίζοντας τα πλούσια σε θρεπτικά συστατικά νερά να εισέλθουν στη λίμνη αλλάζοντας την κατεύθυνση τους, αραίωση ευτροφικών νερών με άλλα φτωχότερα σε θρεπτικά συστατικά, εκβάθυνση των ρηχών λιμνών, απομάκρυνση της ιλύος από τον πυθμένα, ανάληψη του πλούσιου σε θρεπτικά συστατικά υπολίμνιου στρώματος, πρόσθεση διάφορων χημικών ουσιών που καταβυθίζουν τα θρεπτικά συστατικά ή τα μετατρέπουν

σε λιγότερο βιολογικά διαθέσιμες μορφές, τεχνητός αερισμός στο υπολίμνιο στρώμα της λίμνης).

Οι πρώτες είναι περισσότερο οικολογικά αποδεκτές καθώς έχουν μόνιμα αποτελέσματα. Επιδρούν μειώνοντας την εισαγωγή θρεπτικών συστατικών στο νερό. Προσφέρουν μια μακροπρόθεσμη βελτίωση. Στις δεύτερες απομακρύνονται τα θρεπτικά συστατικά από το νερό με πιο άμεσα αποτελέσματα, ωστόσο δεν αντιμετωπίζουν την πηγή του προβλήματος με αποτέλεσμα να μην είναι ικανές για αποκατάσταση μεγάλης διάρκειας αλλά για βελτίωση της εξωτερικής εικόνας.

### **3.6.5. Μοντέλα ελέγχου του ευτροφισμού**

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στον ευτροφισμό είναι (Κουϊμτζής, 1998):

**1) Μοντέλα που αφορούν στη γραμμή διαχωρισμού των υδάτων (φορτίο θρεπτικών συστατικών (watershed models).** Το αντικείμενο αυτών των μοντέλων είναι η εκτίμηση του φορτίου των θρεπτικών συστατικών που καταλήγει σε μια λίμνη με τη ταυτοποίηση και τη ποσοτική ανάλυση τους, με στόχο τη μείωση του φορτίου. Παρέχουν πληροφορίες για τις πηγές θρεπτικών συστατικών.

**2) Μοντέλα των υδρόβιων οργανισμών (water body models).** Βασίζονται στη μελέτη της ισορροπίας των θρεπτικών συστατικών. Συχνά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ποιότητας του νερού ή για να καταγράψουν το πως «ανταποκρίνεται» μια λίμνη στη μείωση του θρεπτικού φορτίου.

**3) Μοντέλα διαχείρισης.** Χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά για τον προσδιορισμό της βέλτιστης στρατηγικής ελέγχου του ευτροφισμού. Δίνουν πληροφορίες σχετικά με την απαραίτητη μείωση του φωσφόρου ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα νερού.

### **3.7. Θερμική αλλοίωση των νερών**

Μια από τις μορφές ρύπανση των νερών είναι και η θερμική τους αλλοίωση. Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για τις περιπτώσεις όπου μεγάλες ποσότητες αποβλήτων υψηλής θερμοκρασίας αποβάλλονται στους φυσικούς αποδέκτες.

Η θερμική αλλοίωση αναφέρεται κυρίως στα νερά ποταμών ή λιμνών, που χρησιμοποιούνται στους πύργους ψύξης θερμοηλεκτρικών και πυρηνικών εγκαταστάσεων. Το νερό αντλείται από τον παρακείμενο ποταμό ή λίμνη και επιστρέφει στο ίδιο μέρος θερμότερο.

Η αύξηση της θερμοκρασίας των νερών δημιουργεί τα παρακάτω προβλήματα:



1) Μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου. Αυτό οφείλεται τόσο στην ελάττωση της διαλυτότητας του οξυγόνου και στο ότι το αποβαλλόμενο θερμό νερό, ως ελαφρότερο, παραμένει στην επιφάνεια και εμποδίζει την διάχυση του οξυγόνου στα κατώτερα στρώματα.

2) Αυξάνονται οι ταχύτητες των χημικών αντιδράσεων και ο ρυθμός του μεταβολισμού.

3) Ελαττώνεται η ικανότητα αντίστασης των υδροχαρών οργανισμών και των ψαριών στις ασθένειες και τις τοξικές ουσίες και επηρεάζονται διάφορες βιολογικές λειτουργίες τους (μείωση του χρόνου επώασης των αβγών). Υπέρμετρη αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί και το θάνατο των υδρόβιων οργανισμών.

4) Πολλαπλασιάζονται υπέρμετρα τα βακτηρίδια που καταναλώνουν την υπόλοιπη ποσότητα του οξυγόνου. Το νερό αποκτά δυσάρεστη οσμή και γεύση.

Τα προβλήματα που δημιουργεί η θερμική αλλοίωση των νερών έγιναν γρήγορα αντιληπτά και πάρθηκαν τα κατάλληλα μέτρα. Οι προδιαγραφές που καθορίζονται για τα βιομηχανικά απόβλητα περιλαμβάνουν και ανώτατες επιτρεπτές θερμοκρασίες.

### **3.8. Αιωρούμενα στερεά**

Οι φυσικοί αποδέκτες δέχονται μεγάλες ποσότητες στερεών, τα οποία προέρχονται κυρίως από τη φυσική αποσάθρωση του εδάφους και των διαφόρων πετρωμάτων καθώς και από τα υγρά απόβλητα. Ένα ποσοστό από στερεά σωματίδια αιωρούνται δημιουργώντας διάφορα προβλήματα όπως: μειώνουν τη διαπερατότητα του φωτός με συνέπεια τον περιορισμό της φωτοσύνθεσης, είναι επιβλαβή στην υδροχαρή βιοκοινωνία ιδιαίτερα στους ζωικούς οργανισμούς, περιορίζουν τις διάφορες χρήσεις των νερών, σε ορισμένες περιπτώσεις είναι φορείς τοξικών ουσιών, οι οποίες είναι ροφημένες σε αυτά.

Τα παραπάνω προβλήματα συνετέλεσαν, ώστε να καθιερωθούν και ανώτατα επιτρεπτά όρια για την παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων στα νερά. Παράλληλα, σ' όλα τα συστήματα καθαρισμού των νερών (στο πόσιμο νερό, στα λύματα και απόβλητα κ.ά.) λαμβάνονται ιδιαίτερα μέτρα για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών.

### **3.9. Μηχανισμοί αυτοκαθαρισμού στα νερά του φυσικού περιβάλλοντος**

Η φύση έχει την ικανότητα μέσω κύκλων του αζώτου, άνθρακα και θείου να αφομοιώνει τη ρύπανση που δημιουργείται στον υδάτινο κόσμο της. Βέβαια είναι αδύνατον

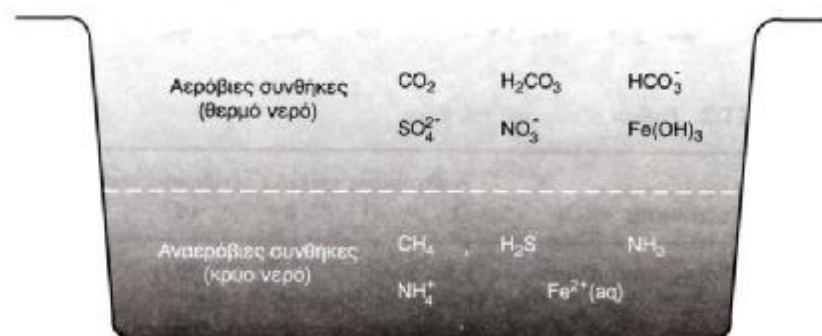
να αφομοιώσουν την ανεξέλεγκτη σε όγκο και ποιότητα ρύπανση. Αυτοκαθαρισμός είναι οι διαδικασίες με τις οποίες ένα ρυπασμένο σώμα νερού επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Περιλαμβάνει τη σταθεροποίηση ή/και την αφαίρεση της ρύπανσης.

Τα νερά του φυσικού περιβάλλοντος διαθέτουν ικανότητα αυτοκαθαρισμού, η οποία οφείλεται στη δράση των μικροοργανισμών (βακτήρια, άλγη, χλωρίδα, ζωοπλαγκτόν, θρεπτική πανίδα, ψάρια). Χάρη στις ζώσες αυτές κοινότητες, η βιολογική ισορροπία των επιφανειακών ρευμάτων διατηρείται σχεδόν σταθερή δια μέσου δυο διαδικασιών: της αποδόμησης των οργανικών ουσιών και της αποσύνθεσης των προϊόντων της αποδόμησης σε νέα ζώσα οργανική ύλη.

Η διαδικασία της αποδόμησης συνίσταται στην ανοργανοποίηση των οργανικών ουσιών με τους μηχανισμούς των ζυμώσεων, αερόβιων ή αναερόβιων, κατά τη διάρκεια των οποίων τα μεγαλύτερα οργανικά μόρια αποσυντίθενται μέχρι τα απλούστερα συστατικά αυτών. Κατά την αερόβια ζύμωση, τα βακτήρια καταναλώνουν διαλυμένο οξυγόνο και οι οργανικές ενώσεις ανοργανοποιούνται βιολογικά, οξειδωμένες προς προϊόντα κεκορεσμένα με οξυγόνο και στη συνέχεια σταθερά και αβλαβή. Όταν εξαφανιστούν τα αερόβια βακτήρια, επικρατούν τα αναερόβια. Οι ζυμώσεις τρέπονται σε αναερόβιες και μη οξειδωτικές και παράγονται αναγωγικά προϊόντα ως επί το πλείστον κάκοσμα αέρια ( $H_2S$ ,  $CH_3SH$ ,  $CH_3SCH_3$ ), χαρακτηριστικά των σηπτικών καταστάσεων. Αναερόβιες συνθήκες λαμβάνουν χώρα σε λιμνάζοντα νερά όπως τα έλη και ο πυθμένας σε βαθιές λίμνες.

Δεν είναι ασυνήθιστο το φαινόμενο εκείνο, να επικρατούν συγχρόνως αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες σε διαφορετικά στρώματα της ίδιας της λίμνης την ίδια χρονική περίοδο, κυρίως το καλοκαίρι οπότε έχουμε στρωματοποίηση της λίμνης.

**Σχήμα 3.3.** Στρωματοποίηση μιας λίμνης το καλοκαίρι, με τις χαρακτηριστικές μορφές των στοιχείων που περιέχουν (Κουίμτζής, 1998).



Οι συνθήκες στη πάνω στιβάδα της λίμνης είναι αερόβιες και τα στοιχεία βρίσκονται με την πιο οξειδωμένη μορφή τους. Κοντά στον πυθμένα, όπου το  $O_2$  καταναλώνεται για την αποδόμηση της οργανικής ύλης, επικρατούν αναερόβιες συνθήκες και τα στοιχεία βρίσκονται με την πιο αναγομένη μορφή τους.

Έτσι η διατήρηση υγιών συνθηκών στα επιφανειακά νερά εξαρτάται από τη παρουσία ορισμένων ειδών μικροχλωρίδας και πανίδας και από την περιεκτικότητα των νερών σε διαλυμένο οξυγόνο.

Η δεύτερη διαδικασία αυτοκαθαρισμού, η ανασύνθεση, συνίσταται στην χρησιμοποίηση των προϊόντων της ανοργανοποίησης από τους χλωροφυλλικούς οργανισμούς μέσω των οποίων ανασυντίθεται και επανέρχεται στο κύκλο της ζώσας ύλης.

Έκτος από τις οργανικές ουσίες μέσα στα επιφανειακά νερά υπόκεινται σε αποδόμηση και πολλές ανόργανες χημικές ουσίες ή και ομάδες αυτών (φαινόλες, υδρογονάνθρακες, κυανιούχα άλατα, απορρυπαντικά, φαρμακευτικά προϊόντα κ.ά.). Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στην «ειδική ικανότητα αυτοκαθαρισμού».

Μολονότι η ικανότητα αυτοκαθαρισμού των ρευμάτων, καθολική και ειδική, απορρέει από φυσικούς παράγοντες, υπάρχει δυνατότητα να ενισχυθεί αυτή από διάφορες επεμβάσεις που αποσκοπούν είτε στη βελτίωση των φυσικών χαρακτήρων του απόδεδκτη είτε στην προστασία των βασικών δράσεων του αυτοκαθαρισμού.

### **3.10. Προστασία συστημάτων επιφανειακού νερού**

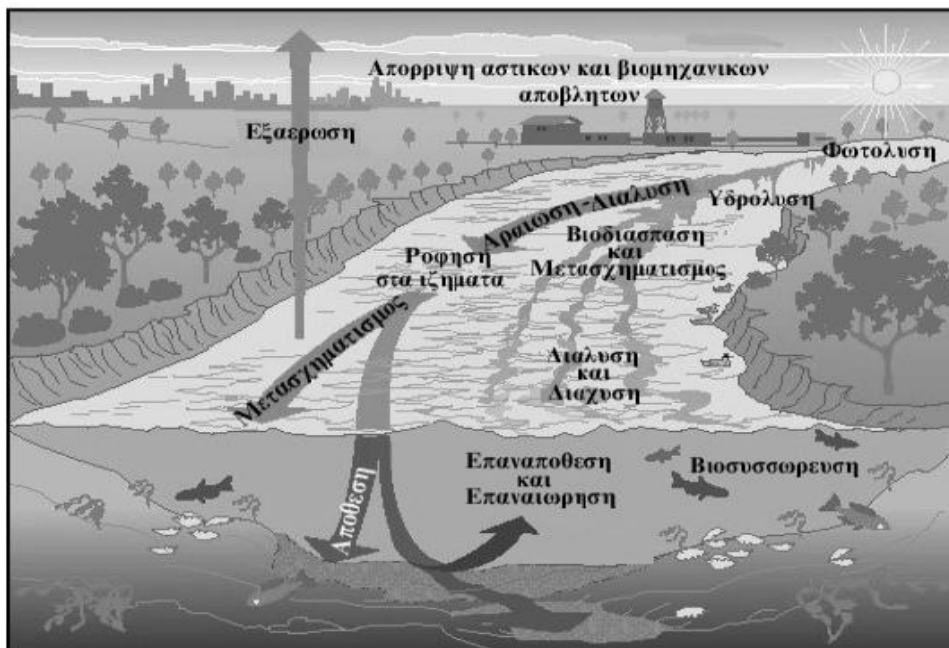
**Σύστημα επιφανειακού νερού** είναι ένα διακεκριμένο και σημαντικό στοιχείο επιφανειακών υδάτων, όπως μια λίμνη, ένας ταμιευτήρας, ένα ρεύμα, ένας ποταμός ή μια διώρυγα, ένα τμήμα ρεύματος, ποταμού ή διώρυγας, μεταβατικά ύδατα και ένα τμήμα παράκτιων νερών. Μεταβατικά νερά είναι συστήματα επιφανειακών 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: οι παθογόνοι μικροοργανισμοί, οι θρεπτικές ουσίες, τα απορρυπαντικά, οι υδρογονάνθρακες, η όξινη βροχή, τα βαρέα μέταλλα, τα τοξικά στοιχεία και τα αιωρούμενα στερεά.

Για την αναγνώριση της ρύπανσης των επιφανειακών νερών και λιμνών 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 3.4.** Κατανομή ρύπων σε υδρόρευμα ([www.usgs.gov](http://www.usgs.gov)).



Η αποκατάσταση των συστημάτων επιφανειακού νερού στηρίζεται στον έλεγχο ή διακοπή της πηγής ρύπανσης. Γενικά είναι πιο εύκολη η αντιμετώπιση των σημειακών πηγών ρύπανσης από τις διάχυτες. Η αποκατάσταση λιμνών που έγιναν ευτροφικές πρόσφατα είναι πιο εύκολη από την αποκατάσταση παλιών ευτροφικών λιμνών.

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.

## 4. ΡΥΠΑΝΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

### 4.1. Εισαγωγή

Η αυξανόμενη ρύπανση των επιφανειακών νερών οδήγησε σε μεγαλύτερη συνειδητοποίηση των περιπτώσεως ρύπανσης του εδάφους και των υπόγειων νερών. Τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και περισσότερο ορατή η μεγάλη σπουδαιότητα και οι επιπτώσεις της ρύπανσης εδάφους-υπόγειων νερών σε παγκόσμια κλίμακα. Παράλληλα με τη συλλογή στοιχείων σχετικά με τους ρύπους και τις πηγές ρύπανσης των υπόγειων νερών, πρέπει να γίνει μια καλύτερη έρευνα σχετικά με τις πιθανές συνέπειες των ρύπων στο οικοσύστημα και τη δημόσια υγεία, σε συνδυασμό με τη πρόβλεψη μεταφοράς και συμπεριφοράς των ρύπων στα υπόγεια νερά.

Η διαμόρφωση της ποιότητας του νερού στο έδαφος και τους υπόγειους υδροφορείς εξαρτάται από τη μεταφορά μάζας των διαφόρων ουσιών και στοιχείων που την καθορίζουν. Η ποιότητα του υπόγειου και εδαφικού νερού αναφέρεται στη χημική του σύνθεση, με τα διαλυμένα και αιωρούμενα υλικά, στην ενεργειακή του κατάσταση και στους μικροοργανισμούς. Η διαμόρφωση της σύστασης του νερού είναι αποτέλεσμα φυσικών, χημικών, βιολογικών διαδικασιών και ανθρώπινης επέμβασης, είτε με την απευθείας εισαγωγή χημικών και βιολογικών ουσιών στα υπόγεια νερά, είτε έμμεσα επεμβαίνοντας στις φυσικές διαδικασίες που επηρεάζουν το σύστημα των υπόγειων νερών. Η χημική σύσταση του φυσικού υπόγειου νερού εξαρτάται μόνο από τις φυσικές διαδικασίες και είναι αποτέλεσμα της υδρογεωλογικής και γεωχημικής ιστορίας του.

Το νερό, είτε προέρχεται από τις βροχοπτώσεις ή από τα υγρά απόβλητα που εφαρμόζονται στο έδαφος είναι ο κύριος παράγοντας μεταφοράς ουσιών μέσα στο έδαφος. Το επιφανειακό νερό διηθείται στο έδαφος και δια μέσου της ακόρεστης ζώνης κινείται προς τους υπόγειους υδροφορείς, όπου διακλαδίζεται προς διάφορες διευθύνσεις ανάλογα με τις συνθήκες ροής που επικρατούν στον υδροφορέα. Το ρυπασμένο νερό ακολουθεί τις καθορισμένες διαδικασίες κίνησης του υπόγειου νερού. Με την παρέλευση του χρόνου η ένταση της ρύπανσης του νερού είτε μειώνεται μέσα στον υδροφορέα ή το ρυπασμένο νερό οδηγείται προς ένα φρεάτιο ή ευκαιριακά εξέρχεται στα επιφανειακά υδάτινα συστήματα (ποτάμια, λίμνες, θάλασσα).

Οι πιο σημαντικοί ρύποι των υπόγειων νερών είναι οι παθογόνοι μικροοργανισμοί, οι ανόργανοι και οι οργανικοί ρύποι.

Μόλυνση υπόγειων νερών με παθογόνους μικροοργανισμούς μπορεί να συμβεί σε περιπτώσεις ιδιωτικών πηγών ή κακώς κατασκευασμένων σηπτικών βόθρων. Λόγω της ικανότητας διήθησης του εδάφους, η πλειονότητα των παθογόνων μικροοργανισμών που βρίσκονται στα λύματα, περιλαμβανομένων βακτηρίων, ιών, πρωτοζώων και παρασιτικών σκουληκιών, απομακρύνεται συστηματικά. Οι ιοί εξαιτίας του μικρού τους μεγέθους, εισχωρούν σε μεγαλύτερη έκταση στην υδατική φύση. Η απομάκρυνση τους γίνεται με προσρόφηση. Ωστόσο, οι προσροφημένοι ιοί δεν απονεκρώνονται και μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα υγείας στη συνέχεια.

Τα ρυπασμένα υπόγεια νερά, παρουσιάζουν αυξημένα επίπεδα ιόντων χλωρίου, νατρίου και θειικών. Υψηλά επίπεδα νιτρικών και αμμωνίας έχουν αναφερθεί ανάλογα με τα δυναμικά οξειδοαναγωγής. Αυξημένα επίπεδα νιτρικών της τάξης των 50-100 mg NO<sub>3</sub>/l είναι συνήθη σε ρυπασμένα υπόγεια νερά. Εκπλύματα αστικών σκουπιδιών σε χωματερές μπορεί να περιέχουν συγκεντρώσεις σε νάτριο, κάλιο, αμμωνία, χλωριούχα και διοξειδίο του άνθρακα/ανθρακικά.

Οι συγκεντρώσεις των μετάλλων σε ρυπασμένο έδαφος και υπόγεια νερά φτάνουν σε υψηλές τιμές κοντά σε σκουπιδότοπους συγκεκριμένων αποβλήτων, σε συνθήκες χαμηλού pH και χαμηλού οξειδοαναγωγικού δυναμικού. Έχουν αναφερθεί υψηλές τιμές αρσενικού (56 mg/l) σε ρυπασμένο υπόγειο νερό με χαμηλό οξειδοαναγωγικό δυναμικό. Σε αντίθεση με τους περισσότερους οργανικούς ρύπους και τους μικροοργανισμούς, πολλά μέταλλα τείνουν να συσσωρεύονται στην ανώτερη στοιβάδα του εδάφους, γεγονός που επιδεινώνει τις επιπτώσεις στο οικοσύστημα του εδάφους.

Όπως τα χλωριούχα και τα σχετιζόμενα με αυτά ανόργανα ιόντα, έτσι και οι οργανικοί ρύποι μεταφέρονται συχνά εύκολα μέσω του εδάφους. Ενώσεις όπως οι χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες (χλωροφόρμιο, τετραχλωρομεθάνιο, τριχλωροαιθυλένιο, διχλωροβενζόλια) και αρωματικοί υδρογονάνθρακες (βενζόλιο, αλκυλοβενζόλια, ναφθαλίνιο), έχουν αναφερθεί κοντά σε ρυπασμένες περιοχές. Εξαιτίας της υψηλής διαλυτότητας τους στο νερό και της ανθεκτικότητας τους σε βιολογική και χημική αποδόμηση, τα πτητικά αυτά χημικά παραμένουν για πολλά χρόνια στα υπόγεια νερά ενώ εξατμίζονται ταχύτατα στα επιφανειακά νερά. Η κύρια διεργασία ελέγχου της συμπεριφοράς αυτών των πτητικών, μη πολικών ενώσεων στο έδαφος, είναι η ρόφηση.

Εκτός από αυτές τις ενώσεις, στο υπόγειο νερό μπορεί να υπάρχει και μια μεγάλη ομάδα ενώσεων, πολικών και χλωριωμένων. Γνωστές τέτοιες ενώσεις, που εύκολα μεταφέρονται στο υπόγειο νερό είναι ο δισ (-2-χλωριοϊσοπρόπυλο) αιθέρας και η τριφθορομεθυλανιλίνη. Ακόμα έχει αναφερθεί ρύπανση των υπόγειων νερών από μη

πολικά παρασιτοκτόνα, όπως η ρύπανση με ατραζίνη και το 1,2-διβρωμο-3-χλωροπροπάνιο. Σε ρυπασμένα αναερόβια υπόγεια νερά βρέθηκαν οργανικά σουλφίδια όπως το διπροπυλοδισουλφίδιο, σε συγκεντρώσεις 1 mg/l σε εκπλύματα χωματερής και χλωριωμένα διαλκυλοσουλφίδια, τα οποία θεωρούνται προϊόντα αντίδρασης των αλκυλοβρωμιδίων με το υδρόθειο.

Η εκτίμηση της ρύπανσης των υπόγειων νερών και της επικινδυνότητας γίνεται με τη χρησιμοποίηση μαθηματικών μοντέλων που περιγράφουν τη μεταφορά μάζας, τους μετασχηματισμούς και τις αλληλοεπιδράσεις με τα στερεά του εδάφους στην κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη. Λόγω της πληθώρας δεδομένων που απαιτούνται για την εφαρμογή των μοντέλων αυτών, την τελευταία δεκαετία, αναπτύσσονται απλοποιημένες διαδικασίες εκτίμησης της πιθανότητας ρύπανσης των υπόγειων νερών που μπορούν να εφαρμοστούν σε μεγάλη χωρική κλίμακα και για διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Απλά μοντέλα δείκτες που χρησιμοποιούνται την τελευταία δεκαετία για τον προσδιορισμό των ευπρόσβλητων περιοχών των υπόγειων νερών είναι το DRASTIC, οι παράγοντες εξασθένησης και επιβράδυνσης (AF, Rf) και ο δείκτης έκπλυσης (LI). Με τους δείκτες αυτούς μπορούν να παραχθούν χάρτες ευπρόσβλητικότητας των υπόγειων νερών που αποτελούν τη βάση για τη διαχείριση χρήσεων γης και εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων ώστε να μειωθούν οι κίνδυνοι επέκτασης της υποβάθμισης των υπόγειων νερών.

#### **4.2. Πηγές ρύπων και διαδικασίες ρύπανσης των υπόγειων υδάτων**

Οι χωματερές και οι χώροι συλλογής υγρών αποβλήτων είναι τα περισσότερα φανερά σημεία ρύπανσης των υπόγειων νερών. Άλλες πηγές ρύπανσης, που σχετίζονται με τη βιομηχανία, περιλαμβάνουν διαρροές χημικών από περιοχές αποθήκευσης, διαρροές λόγω ατυχημάτων και συμπύκνωση ατμών από συστήματα ανάκτησης διαλυτών. Οι μη βιομηχανικές πηγές ρύπανσης, περιλαμβάνουν τα εκπλύματα των δρόμων, της χωματερές, τους σκουπιδοτόπους και τα αστικά λύματα. Τα προϊόντα του νοικοκυριού περιέχουν πολλές διαλυτές οργανικές ενώσεις που καταλήγουν στους σηπτικούς βόθρους και στα δίκτυα των υπονόμων και πιθανώς στον υδροφόρο ορίζοντα. Εμπορικές επιχειρήσεις όπως συντήρησης και επισκευής αυτοκινήτων, εκτυπώσεις και στεγνό καθάρισμα συμβάλλουν σε πολλές περιπτώσεις στη ρύπανση των υπόγειων νερών.

Η άρδευση σε ξηρά και ημίξηρα κλίματα είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά και εναπόθεση των ανόργανων ενώσεων και αλάτων στην ακόρεστη ζώνη. Λόγω της εξατμισο-

διαπνοής, αυξάνει η συγκέντρωση των αλάτων στο εδαφικό νερό με αποτέλεσμα το νερό που διηθείται βαθιά να περιέχει διαλυμένα άλατα σε συγκεντρώσεις δύο και τρεις φορές μεγαλύτερες από αυτές του εφαρμοζόμενου νερού. Στα διαπερατά εδάφη, η περίσσεια νερού που περνά τη ζώνη παρασέρνει τα διαλυμένα υλικά (ιδιαίτερα τα ιόντα χλωρίου, θειικών, νιτρικών και νατρίου) στα υπόγεια νερά. Η επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση του νερού για άρδευση είναι μία σοβαρή διαδικασία συσσώρευσης των αλάτων στα επιφανειακά και τα υπόγεια νερά. Με την εφαρμογή των λιπασμάτων στο έδαφος, που συνήθως περιέχουν ανόργανα στοιχεία, προκαλείται αύξηση των λιπασματικών στοιχείων στο εδαφικό διάλυμα. Ποιοτικά οι πιο επιβλαβείς ρύποι για την υγεία του ανθρώπου, από τη γεωργία, είναι τα νιτρικά ιόντα, τα οποία με μεγάλη ευκολία μεταφέρονται με το νερό που διηθείται βαθιά δια μέσου της ακόρεστης ζώνης του εδάφους και της υπόγειας ροής στους υπόγειους υδροφορείς. Η άρδευση και η εφαρμογή των λιπασμάτων ανόργανου αζώτου φαίνεται ότι συντελούν στην ταχύτερη αύξηση των νιτρικών σε πολλές αγροτικές περιοχές. Αλλά αύξηση τους μπορεί να παρατηρηθεί και σε μη αρδευόμενες περιοχές με οργανικά εδάφη. Σ' αυτή την περίπτωση τα νιτρικά απελευθερώνονται κατά την ανοργανοποίηση των φυτικών υπολειμμάτων και των ζωικών αποβλήτων που ενσωματώνονται στο έδαφος. Τα στερεά απόβλητα (κοπριές) των ζώων είναι επίσης σημαντικές πηγές νιτρικών και διαλυμένων αλάτων.

Η μεταβολή της υδραυλικής ισορροπίας λόγω της άντλησης και υπεράντλησης των υπόγειων νερών είναι η αιτία για την εισροή νερών χαμηλής ποιότητας, υφάλμυρων ή εμπλουτισμένων με ιχνοστοιχεία και βαριά μέταλλα από διπλανούς, επάλληλους υδροφορείς και από τη θάλασσα. Είναι η αιτία της υφαλμύρωσης των παραθαλάσσιων υδροφορέων.

Τα φυτοφάρμακα που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα στη γεωργία για την προστασία των καλλιεργειών από τα έντομα, μύκητες και βακτήρια και την καταπολέμηση των ζιζανίων αποτελούν σημαντικό κίνδυνο ρύπανσης των υπογείων νερών.

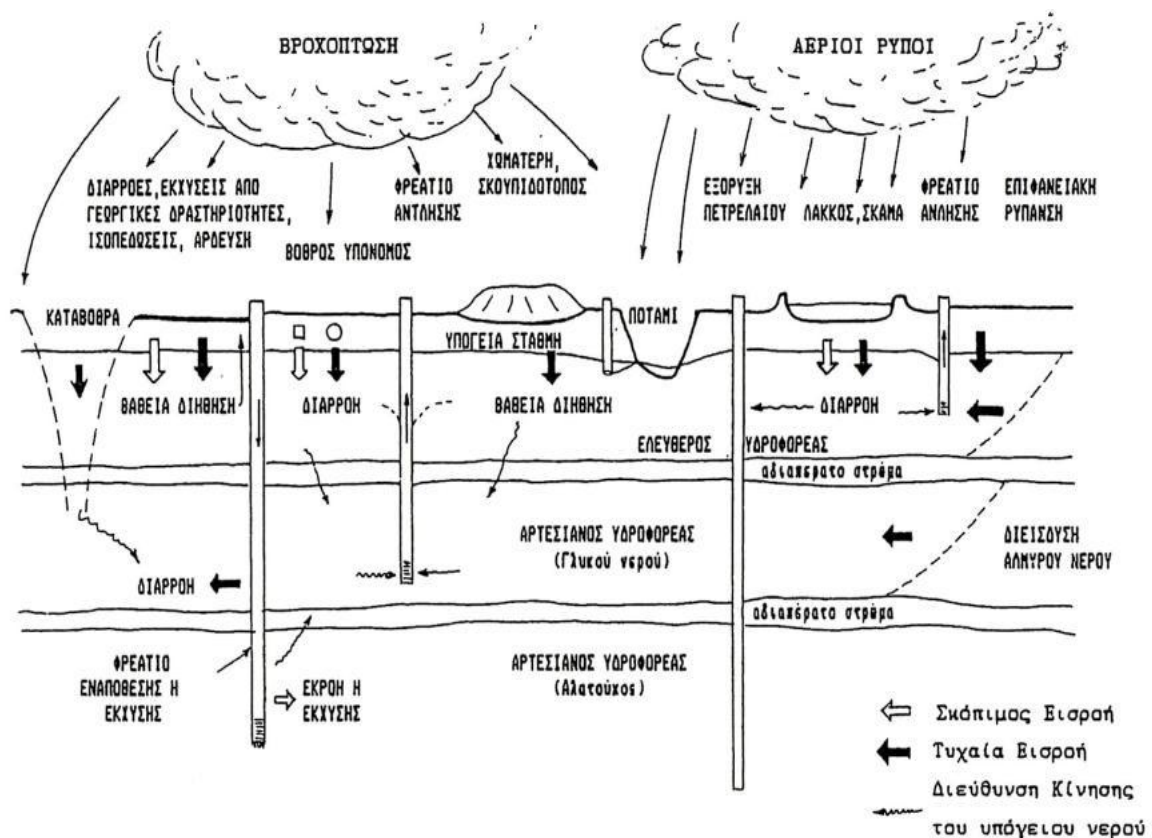
Το υπόγειο νερό χρησιμοποιείται ως πόσιμο σε μεγάλο ποσοστό. Σπάνια υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία, εκτός από τη χλωρίωση, γιατί θεωρείται ότι είναι απαλλαγμένο από ακαθαρσίες που υπάρχουν στα επιφανειακά νερά.

Η έλλειψη παρακολούθησης δεκάδων χιλιάδων περιοχών, όπου υπάρχει πιθανότητα ρύπανσης, μαζί με τη έλλειψη πλήρους ανάλυσης της ποιότητας του νερού σε πηγάδια και πηγές, αποκλείει την πιθανότητα αξιόπιστου προσδιορισμού της έκτασης και σοβαρότητας της υποβάθμισης του υπόγειου νερού και των κινδύνων για την α-



νθρώπινη υγεία. Τμήματα σε σημαντικούς υδροφόρους ορίζοντες έχουν υποβαθμιστεί και μπορεί να χαθούν για πάντα ως πηγές πόσιμου νερού. Το σημαντικότερο είναι ότι κάποιο τμήμα του πληθυσμού μπορεί να έχει εκτεθεί σε χημική ρύπανση για άγνωστο χρονικό διάστημα. Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες πηγές ρύπανσης και διαδικασίες που οδηγούν στη ρύπανση των υπόγειων νερών.

**Σχήμα 4.1.** Κυριότερες πηγές και διαδικασίες ρύπανσης των υπόγειων νερών (Αντωνόπουλος, 2001).



#### 4.3. Ρύπανση των υπόγειων νερών από τα φυτοφάρμακα

Στα φυτοφάρμακα περιλαμβάνονται τα ζιζανιοκτόνα, μυκητοκτόνα, εντομοκτόνα και οι ρυθμιστικές της ανάπτυξης ουσίες. Παρότι οι οργανικές ουσίες που χρησιμοποιούνται σαν φυτοφάρμακα είναι ταχείας αποδόμησης, σημαντικές ποσότητες αυτών και των προϊόντων της διάσπασης τους έχουν καταγραφεί στα υπόγεια νερά. Σημαντικό ρόλο για τη σοβαρότητα της ρύπανσης από τα αγροχημικά αποτελεί η τοξικότητα, η ποσότητα και ο χρόνος παραμονής της ουσίας στο έδαφος καθώς και ο τρόπος εφαρμογής τους στο έδαφος.

Με τον όρο εμμόνη των φυτοφαρμάκων μετράται ο χρόνος που απαιτείται για την αποδόμηση των ουσιών σε αβλαβή προϊόντα. Η αποδόμηση εξαρτάται από τη περιεχόμενη εδαφική υγρασία, τη χαμηλή συγκέντρωση οξυγόνου, τη θερμοκρασία, την περιεχόμενη οργανική ουσία και το pH. Όλα τα παράγωγα των φυτοφαρμάκων, εμπεριέχουν σημαντικούς κινδύνους για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία, επειδή διασπώνται σε τοξικές ουσίες και παραμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα στο περιβάλλον. Τέτοιοι κίνδυνοι είναι η καταστροφή ωφέλιμων ειδών, η ανάπτυξη ανοσίας, η βιοσυσσώρευση στη τροφική αλυσίδα, η εμμόνη στα διάφορα οικοσυστήματα και η μεταφορά τους στα συστήματα των υδάτινων πόρων.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση φυτοφαρμάκων στο πόσιμο νερό είναι 0,1 mg/l, ωστόσο θεωρείται ότι παραβιάζεται σε πολλά υπόγεια νερά που χρησιμοποιούνται στις δημόσιες χρήσεις.

Η παρακολούθηση και ανάλυση των προβλημάτων ρύπανσης των υπόγειων νερών από τα φυτοφάρμακα είναι δύσκολη και πολύπλοκη λόγω του μεγάλου αριθμού ουσιών που χρησιμοποιούνται στη γεωργία και των τοξικών παραγώγων τους, την αναγκαιότητα να χρησιμοποιούνται πολύ μικρές συγκεντρώσεις λόγω της υψηλής τοξικότητάς τους και τις απαιτήσεις σωστού χειρισμού για να αποφευχθούν επιμολύνσεις και απώλειες της ουσίας. Στα προβλήματα ρύπανσης των υπόγειων νερών από τα φυτοφάρμακα περιλαμβάνονται ο προσδιορισμός των φυτοφαρμάκων που μεταφέρονται προς τα υπόγεια νερά, οι διαδικασίες μεταφοράς τους και η συσχέτιση των συγκεντρώσεών τους που εμφανίζονται στα φρεάτια με τα εφαρμοζόμενα στο έδαφος και το βαθμό έκπλυσης τους.

Οι τυπικές δόσεις εφαρμογής των φυτοφαρμάκων στη γεωργία είναι περίπου 0.5-5.0 kg/ha – έτος της δραστικής ουσίας.

#### **4.4. Ρύπανση από τα μη αναμίξιμα στο νερό υγρά**

Τα μη αναμίξιμα με το νερό υγρά (NAPLs), είναι ρύποι, που η παρουσία τους στην ακόρεστη ζώνη παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Τα NAPLs διακρίνονται σε LNAPLs (υγρά καύσιμα των υδρογονανθράκων, όπως βενζίνη, πετρέλαιο θέρμανσης, κηροζίνη) που είναι τα μη αναμίξιμα με το νερό υγρά με πυκνότητα μικρότερη από το νερό και σε DNAPLs (χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες όπως τετραχλωράνθρακες, το 1,1,1 τριχλωροαιθάνιο, οι χλωροφαινόλες, τα χλωροβενζόλια, τα τετραχλωροαιθυλένια και τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια) που έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη από το νερό. Η σημασία των NAPLs στα υπόγεια νερά οφείλεται στην

εμμονή τους κάτω από το έδαφος και την ικανότητα που έχουν να ρυπαίνουν μεγάλους όγκους νερού λόγω της μικρής δυνατότητας απομάκρυνσης του. Η μετακίνηση των ουσιών αυτών στο έδαφος εξαρτάται από την ποσότητα που ελευθερώνεται στο έδαφος, τις φυσικές ιδιότητες και τη δομή του εδάφους δια μέσου του οποίου μετακινούνται.

#### **4.5. Εισροή ρύπων από την επιφάνεια του εδάφους**

Μεγάλη ποικιλία επικίνδυνων ουσιών για τον άνθρωπο και το περιβάλλον φτάνει στα υπόγεια υδροφόρα στρώματα από την επιφάνεια του εδάφους. Οι ουσίες αυτές φτάνουν στα υπόγεια νερά με πολλούς και διαφορετικούς τρόπους εφαρμογής όπως με απευθείας έγχυση στα φρεάτια τα οποία επικοινωνούν με τους υδροφορείς γλυκού νερού, με τη βαθιά διήθηση των υγρών που χύνονται πάνω στο έδαφος δια μέσου της ακόρεστης ζώνης του εδάφους, με την έκπλυση των διαλυμένων ουσιών από την επιφάνεια τους εδάφους με το νερό της βροχόπτωσης, με τις διαρροές από τις ρωγμές των υπονόμων μεταφοράς των λυμάτων και των συστημάτων κλειστών αγωγών και με τη διήθηση και διαρροή των ρυπασμένων επιφανειακών νερών (ποταμών, λιμνών, ελών, στραγγιστικών τάφρων) στο έδαφος.

Τα πλημμυρικά νερά που μεταφέρουν χημικά και μικροβιακά ρυπαντικά φορτία είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα, επειδή με την αύξηση της στάθμης του νερού πλημμυρίζουν τα φρεάτια και προκαλούν την εισροή και διαρροή του ακατάλληλου νερού στο φρεάτιο. Σε ορισμένες περιοχές όπου τα φρεάτια χρησιμοποιούνται για την στράγγιση των χαμηλότερων τμημάτων μπορεί να προκληθεί ρύπανση των υπόγειων νερών από το νερό στράγγισης.

Οι σηπτικές δεξαμενές εμπεριέχουν αξιοσημείωτους κινδύνους τόσο για ρύπανση του υπόγειου νερού όσο και για τη μόλυνση του από βακτήρια και χημικούς ρύπους παρόλο που σχεδιάζονται για τον καθαρισμό των λυμάτων που χύνονται σ' αυτές. Οι σπουδαιότερες επισημάνσεις για την εκτίμηση των κινδύνων μόλυνσης από τις σηπτικές δεξαμενές είναι οι εξής (Αντωνόπουλος, 2001): 1) η μετακίνηση του διηθούμενου νερού που περιέχει χημικούς και βακτηριακούς ρύπους είναι κατακόρυφη μέχρι να φτάσει την υπόγεια στάθμη, 2) η απόσταση μετακίνησης των βακτηρίων σε ξηρά, ημίξηρα εδάφη είναι μικρή, περίπου 1.5 m και 3) οι χημικοί ρύποι μετακινούνται μακρύτερα και ταχύτερα από ότι οι μικροοργανισμοί στο υπόγειο νερό.

#### 4.6. Ο ρόλος της ακόρεστης ζώνης στην ρύπανση των υπόγειων νερών

Ο κίνδυνος για την ρύπανση ενός υπόγειου υδροφορέα (vulnerability) εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ακόρεστης ζώνης, δηλαδή τους στρώματος που παρεμβάλλεται μεταξύ της υπόγειας στάθμης και της επιφάνειας του εδάφους και αποτελεί την πρώτη γραμμή άμυνας για τα ελεύθερα υδροφόρα στρώματα, επειδή βρίσκεται σε στρατηγική θέση και λόγω της δυναμικής που έχει στη μείωση και εξασθένηση των ρύπων.

Η εκτίμηση του βαθμού μείωσης των ρύπων στην ακόρεστη ζώνη είναι δύσκολη και οφείλεται στη πολυπλοκότητα της ροής του νερού δια μέσου του πορώδους και τη μεταφορά των ρύπων δια μέσου της ζώνης αυτής.

#### 4.7. Χημικοί και βιολογικοί ρύποι και η υπεδαφική συμπεριφορά τους

Οι βασικοί ρύποι κατατασσόμενοι σε κατηγορίες είναι οι εξής (Στουρνάρας, 2000):

- **Βαρέα μέταλλα** ονομάζονται αυτά που έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη από  $5 \text{ g/cm}^3$ . Προέρχονται από φυσικές διεργασίες και ανθρώπινες δραστηριότητες. Από τις πρώτες, δυο είναι οι κυριότερες πηγές τροφοδοσίας του νερού με βαρέα μέταλλα, η χημική αποσάθρωση και η απόπλυση εδαφών. Από πλευράς ανθρώπινης χρήσης, τα βαρέα μέταλλα χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία ή σαν καταλύτες χημικών αντιδράσεων και διαδικασιών. Χρησιμοποιούνται επίσης σε λιπάσματα και φυτοφάρμακα. Είναι προφανής επομένως η μεγάλη διαθέσιμη ποσότητα τους και η ευκολία διασκορπισμού τους στο φυσικό περιβάλλον.

- **Οργανικές χημικές ενώσεις.** Αρχικώς εισέρχονται στο υδάτινο περιβάλλον στα πλαίσια των γεωχημικών κύκλων και προέρχονται από διάφορες πηγές. Πιο διαδεδομένες είναι οι διάφορες μορφές των υδρογονανθράκων. Από πλευράς ανθρώπινης δραστηριότητας, τα οικιακά και βιομηχανικά λύματα και κατάλοιπα είναι πλούσια σε ενώσεις αυτής της μορφής. Τα λιπάσματα και τα φυτοφάρμακα, συμπληρώνουν τη μεγάλη αλυσίδα αυτών των ενώσεων στο περιβάλλον.

- **Πολυφασικά και μη αναμιγνυόμενα οργανικά ρευστά.** Προσβάλλουν το έδαφος και κατά συνέπεια το υπόγειο νερό από διαρροές δεξαμενών ή άλλων εγκαταστάσεων. Η μετέπειτα συμπεριφορά τους εξαρτάται από τις επιμέρους ιδιότητες του καθενός. Έρχονται σε άμεση επαφή με τα υπόγεια νερά ή διαλύονται σε διηθούμενα νερά.

- **Άλλοι ρυπαντές.** Ο καπνός στις καμινάδες οικιών και εγκαταστάσεων περιέχει διοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου και σε μικρότερες ποσότητες χλώριο και φθόριο. Διαλυόμενα στο νερό της βροχής μπορούν να εισχωρήσουν στο έδαφος και στο

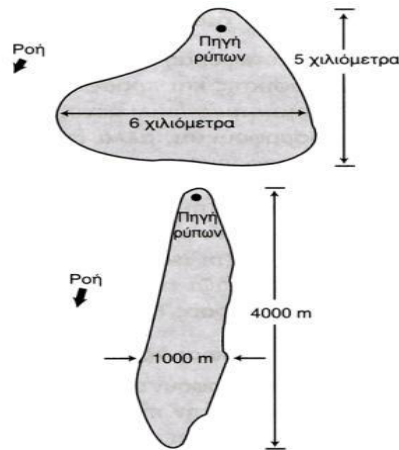
υπόγειο νερό. Η χρήση ανόργανων λιπασμάτων αυξάνει την ποσότητα διαλυτών αλάτων στο έδαφος. Παρόμοια αποτελέσματα έχει και η χρήση οργανικών λιπασμάτων. Ειδικές περιπτώσεις ρυπαντών είναι οι εξατμίσεις των αυτοκινήτων, ο μόλυβδος από τα φυσίγγια στους τόπους κυνηγιού, η εισπίεση στο έδαφος ζεστού νερού γεγονός που αυξάνει τη διαλυτότητα των πετρωμάτων και επομένως την επιβάρυνση του υπόγειου νερού.

- **Βακτήρια και ιοί.** Η προέλευση τους είναι πολλαπλή και η εμφάνιση τους εξαρτάται από την ενεργοποίηση των μηχανισμών αντιμετώπισης των μολυντών και από το χρόνο ζωής του κάθε μικροοργανισμού, σε συνδυασμό με τις παραμέτρους τις υπόγειας ροής (διεύθυνση, ταχύτητα).

#### **4.8. Εκτίμηση της ρύπανσης**

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εκτίμηση της ρύπανσης είναι η γνώση του συστήματος ροής. Ένα πρόγραμμα παρακολούθησης χωρίς επαρκείς υδρογεωλογικές πληροφορίες, μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα.

Οι ταχύτητες ροής του υπόγειου νερού κυμαίνεται από μερικά εκατοστά μέχρι μερικά μέτρα το χρόνο. Επειδή η ροή των υπόγειων νερών είναι περίπου γραμμική, τα διαλυμένα χημικά θα ακολουθήσουν τις γραμμές ροής και θα σχηματίσουν καθορισμένα πλούμια (plumes). Τα πλούμια αυτά του ρυπασμένου υπόγειου νερού έχουν ανιχνευτεί σε αποστάσεις που κυμαίνονται από μερικά μέτρα μέχρι αρκετά χιλιόμετρα από τη πηγή ρύπανσης. Το σχήμα και το μέγεθος τους εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, όπως το γεωγραφικό υπόβαθρο, η ροή του υπόγειου νερού σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ο τύπος και η συγκέντρωση των ρύπων καθώς και τα χαρακτηριστικά της πηγής ρύπανσης. Στο σχήμα 4.2 απεικονίζονται δυο πλούμια σε διαφορετικές γεωλογικές τοποθεσίες και τα χρονικά διαστήματα που χρειάστηκαν για να αναπτυχθούν.



**Σχήμα 4.2.** Επίδραση της γεωλογίας στη μορφή των πλουμίων διάφορων ρύπων.

- α) πλούμιο χλωριούχων Inel, Idaho, USA. Υδροφορέας: Βασάλτης, Χρόνος: 16 έτη.
- β) πλούμιο χρωμίου Long Island, USA. Υδροφορέας: άμμος και χαλίκια, Χρόνος: 13 έτη. (Αντωνόπουλος, 2001).

#### 4.9. Μετρήσεις ποιότητας – δειγματοληψία υπόγειου νερού

Για να καθορίσουμε την ποιότητα του νερού πρέπει να έχουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων των φυσικών, των χημικών και των βιολογικών συστατικών του. Τα όρια καταλληλότητας του νερού εξαρτώνται από την χρησιμοποίηση του. Έτσι, άλλης ποιότητας νερό απαιτείται για τις ανάγκες του ανθρώπου, άλλης για τις βιομηχανικές ανάγκες και άλλης για τις αρδευτικές ανάγκες. Μια πλήρης χημική ανάλυση δείγματος νερού προσδιορίζει τις συγκεντρώσεις των ανόργανων συστατικών που περιέχει το νερό. Οι οργανικές και ραδιενεργές ουσίες επιδρούν στην ποιότητα του νερού στις περιπτώσεις που αυτό έχει μολυνθεί από τον άνθρωπο. Τα διαλυμένα άλατα που έχουν κανονική αλατότητα, παρουσιάζονται ως ιόντα. Ορισμένα ιχνοστοιχεία παρουσιάζονται και αναφέρονται. Η χημική ανάλυση περιλαμβάνει επίσης μετρήσεις του pH και της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Μια φυσική ανάλυση καθορίζει ορισμένες ιδιότητες του νερού, όπως είναι η θερμοκρασία, το χρώμα, η θολότητα, η οσμή και η γεύση. Μια βιολογική ανάλυση έχει σκοπό τον εντοπισμό των βακτηριδίων, που καθορίζουν την ποιότητα του νερού για ανθρώπινη χρήση.

Η δειγματοληψία των δειγμάτων υπόγειου νερού πρέπει να είναι αντιπροσωπευτική της περιοχής που μελετάται, καλύπτοντας όλους τους γεωλογικούς σχηματισμούς,

που φιλοξενούν υδροφόρους ορίζοντες, ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση της ποιότητας. Αντιπροσωπευτική δειγματοληψία πρέπει να γίνεται και κατά βάθος, ακόμα και αν ο υδροφόρος ορίζοντας είναι ενιαίος. Το νερό του δείγματος πρέπει να είναι φρέσκο, δηλ. μετά από άντληση της γεώτρησης για ικανοποιητικό χρόνο (τουλάχιστον μιας ώρας), ώστε να ανανεωθεί. Η συλλογή του νερού πρέπει να γίνεται σε φιάλες 1½ λίτρου από πολυαιθύνιο, αφού πρώτα ξεπλυθεί καλά με το ίδιο νερό που θα αναλυθεί. Οι γυάλινες φιάλες πρέπει να αποφεύγονται, γιατί έχει παρατηρηθεί προσρόφηση και ανταλλαγή ιόντων. Τα δείγματα φυλάσσονται σε ψυγείο με θερμοκρασία 4 °C, μέχρι να μεταφερθούν στο εργαστήριο. Έτσι επιτυγχάνεται η αναστολή ανεπιθύμητων βιολογικών και χημικών αντιδράσεων. Τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης είναι περισσότερο αξιόπιστα, όταν ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δειγματοληψίας και ανάλυσης είναι μικρός.

Πριν αναλυθεί το δείγμα πρέπει να διηθείται από ηθμό 0,45 μ και να οξινίζεται μέρος του δείγματος (½L), όταν πρόκειται να αναλυθούν μέταλλα. Με τη διήθηση απομακρύνονται τα αιωρούμενα συστατικά. Η οξίνιση γίνεται για να κρατηθούν τα μέταλλα σε διάλυση και γι' αυτό προστίθεται ποσότητα 5 ml HCl (0.5 N).

Τα προγράμματα καταγραφής ποιότητας και δειγματοληψίας των υπόγειων νερών πρέπει να μελετούνται σωστά για να μειωθεί το κόστος εφαρμογής τους και να επιτυγχάνεται ο επιδιωκόμενος σκοπός που είναι η αναπαράσταση της πραγματικής κατάστασης των υπόγειων νερών τόσο στο χώρο, όσο και στις χρονικές μεταβολές τους.

Υπάρχουν πολλοί λόγοι για ένα τέτοιο πρόγραμμα όπως ο προσδιορισμός της ποιότητας των νερών και η χημική σύνθεση τους σε μια περιοχή, ενός φρεατίου ή ακόμα και της περιοχής επίδρασης του, ο προσδιορισμός της έκτασης της ρύπανσης των υπόγειων νερών από μια γνωστή πηγή ρύπανσης και η εκτίμηση του κινδύνου ή της πιθανότητας ρύπανσης των υπόγειων νερών.

Τα δείγματα μπορούν να συλλέγονται είτε απ' ευθείας με τις *in situ* μεθόδους, όπως είναι με τους στραγγιστικούς αγωγούς, με τα λυσίμετρα και τα φρεάτια για τις κορεσμένες περιοχές και με δειγματολήπτες κενού για τις ακόρεστες περιοχές, είτε με έμμεσες μεθόδους, όπως με δείγματα εδάφους. Η μεγάλη διαφορά μεταξύ των δυο αυτών μεθόδων είναι ότι με τη μέθοδο των δειγμάτων εδάφους καταστρέφεται η φυσική κατάσταση του εδάφους και δεν μπορούν να επαναληφθούν οι διαδικασίες δειγματοληψίας στην ίδια περιοχή. Άλλη διαφορά βρίσκεται στη διαδικασία δειγματοληψίας του υγρού με τις δυο μεθόδους. Το υγρό κατά τις *in situ* δειγματοληψίες παίρνεται με την εφαρμογή τάσης περίπου 60 kPa, ενώ η αφαίρεση του νερού από τα εδαφικά

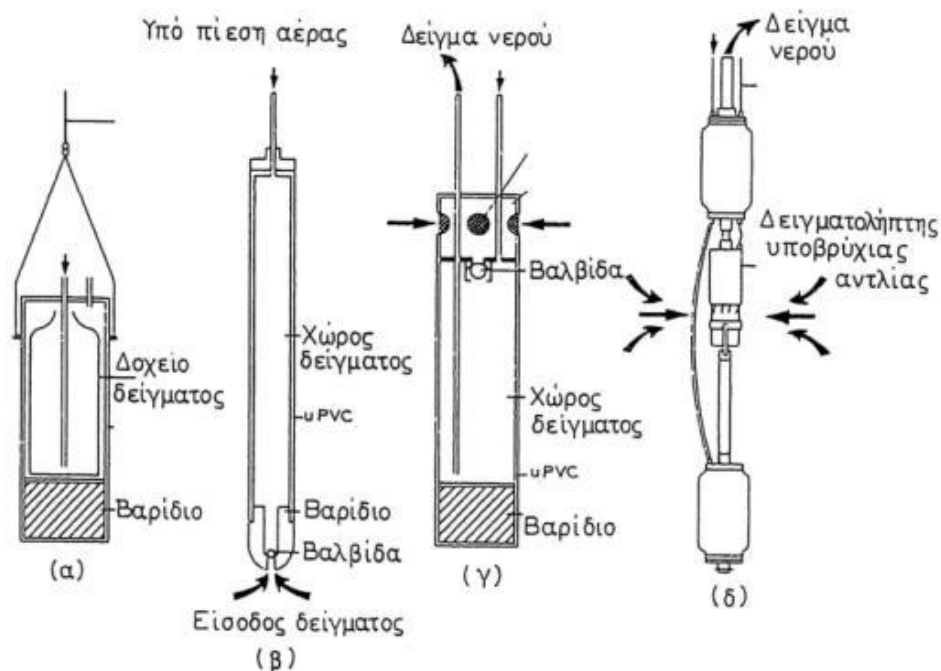
δείγματα απαιτεί μύζηση μεγαλύτερη από 60 kPa, με αποτέλεσμα να υπάρχει διαφορά συγκέντρωσης σε ορισμένους ρύπους και ουσίες στα δείγματα του υγρού που παίρνονται.

Στην επιλογή της κατάλληλης συσκευής σημαντικό λόγο έχουν οι παρακάτω παράγοντες: το βάθος και ο όγκος δειγματοληψίας, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, η χημική και βιολογική σύνθεση του υγρού, η κατάσταση κίνησης της υγρασίας, οι απαιτήσεις διάρκειας και καταλληλότητας του δειγματολήπτη, οι κλιματικές συνθήκες, οι απαιτήσεις εγκατάστασης και χειρισμού, η διαθεσιμότητα και το κόστος κατασκευής. Υπάρχουν 3 τύποι δειγματοληπτών: οι δειγματολήπτες κενού (suction cup) γνωστοί και ως λυσίμετρα, οι δειγματολήπτες φίλτρου (filter tip) και οι δειγματολήπτες δίσκου με εφαρμογή κενού (vacuum-plate). Οι πιο διαδεδομένοι δειγματολήπτες είναι τα λυσίμετρα (Αντωνόπουλος, 2001).

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζονται διαγραμματικά τέσσερις από τις συσκευές δειγματοληψίας των υπόγειων νερών και στον πίνακα 4.1 τα χαρακτηριστικά των συσκευών. Στα σχήματα 4.4 και 4.5 παρουσιάζονται διαγραμματικά δύο περιπτώσεις χρήσης των δειγματοληπτών για την καταγραφή της ρύπανσης και την προστασία των υπόγειων νερών.

Σπουδαίο στάδιο κατά τη διαδικασία της δειγματοληψίας των υπόγειων νερών είναι η σωστή συντήρηση των δειγμάτων από τη στιγμή της δειγματοληψίας μέχρι το χρόνο ανάλυσης. Η διύλιση του δείγματος, αμέσως μετά τη λήψη του είναι κρίσιμη διαδικασία, γιατί έτσι περιορίζονται οι πιθανότητες αλλοίωσης της σύνθεσης του δείγματος λόγω της προσκόλλησης και καθίζησης των διαλυμένων συστατικών στα αιωρούμενα στερεά. Με τη σωστή συντήρηση αναστέλλονται οι χημικές και βιολογικές διαδικασίες. Στον πίνακα 4.2 δίνονται ορισμένες τεχνικές συντήρησης των δειγμάτων για ορισμένες παραμέτρους.

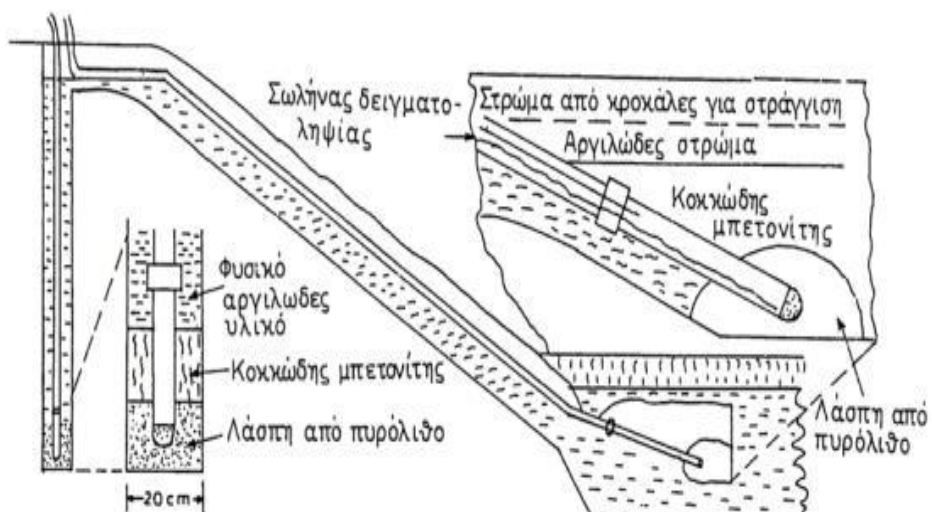




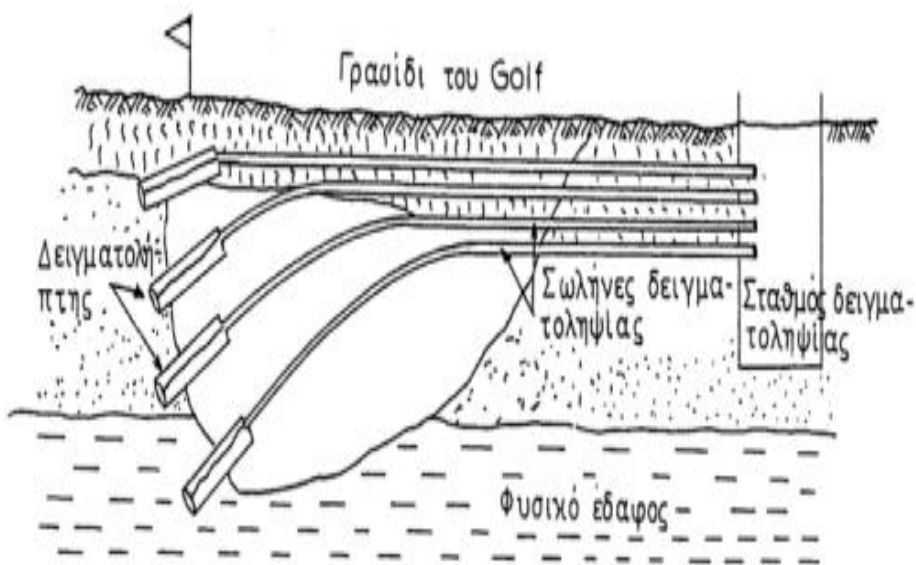
**Σχήμα 4.3.** Συσκευές δειγματοληψίας υπόγειων νερών (α. συσκευή τύπου Bailer, β. συσκευή με αέριο υπό πίεση, γ. συσκευή εισαγωγής αερίου και δ. συσκευή με βυθισμένη αντλία (Αντωνόπουλος, 2001).

**Πίνακας 4.1.** Χαρακτηριστικά των συσκευών δειγματοληψίας (Αντωνόπουλος, 2001).

Συσκευή	Ελάχιστη διάμετρος φρεατίου	Μέγιστο βάθος δειγματοληψίας	Τυπικό δείγμα	Υλικό κατασκευής	Πιθανότητα χημικής αλλαγής	Ευκολία χρήσης, συντήρησης
Bailers	½"	Απεριόριστο	μεταβλητό	οτιδήποτε	μικρή-μέση	εύκολη
Σύριγγα	1 ½"	Απεριόριστο			ελάχιστη-μικρή	εύκολη
Αντλίες ανύψωσης κενού	½"	8.5 m	μεταβλητό	χωρίς περιορισμό	υψηλή-μέση	εύκολη
Δειγματολήπτες με αέρια	1"	100 m	0.2 grpm	Teflon, PVC, πολυαιθυλένιο	μέση-υψηλή	εύκολη
Αντλίες με ελαστικούς θύλακες	1 ½"	125 m	0.5 grpm	ανοξειδωτο 304, Teflon, PVC, Viton	ελάχιστη-μικρή	εύκολη
Αντλίες Βυθισμένες	2"	70 m	0.5 grpm	ανοξειδωτο 304, Teflon, Viton	ελάχιστη-μικρή	εύκολη
Αντλίες με έλικα	2"	40 m	0.3 grpm	ανοξειδωτο 304, Teflon	μικρή - μέση	μέσης δυσκολίας
Αντλίες με εμβολο	1 ½"	175 m	0.25 grpm	ανοξειδωτο 304, Teflon	μικρή-μέση	Εύκολη - μέσης δυσκολίας



**Σχήμα 4.4.** Εγκατάσταση δειγματοληπτών για την καταγραφή των εκπλυμάτων σε σκουπιδότοπο. Η εγκατάσταση γίνεται κάτω από αργιλικό επίστρωμα και σε βάθος 1 m και περιφερειακά του σκουπιδότοπου (Αντωνόπουλος, 2001).



**Σχήμα 4.5.** Εγκατάσταση δειγματοληπτών κάτω από γήπεδο γκολφ. Σκοπός είναι ο έλεγχος των εκπλυμάτων των λιπασμάτων και των φυτοφαρμάκων, λόγω της άρδευσης του γρασιδιού (Αντωνόπουλος, 2001).

**Πίνακας 4.2.** Τεχνικές συντήρησης των δειγμάτων για ορισμένες παραμέτρους (P για πολυαιθυλένιο, G για γυαλί) (Hί), (Herzog et al. 1991).

Παράμετρος	Δοχείο	Συντηρητικό	Μέγιστος χρόνος
Βακτήρια	P,G	Ψύξη, 4 °C, 0.008% Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6 ώρες
Οξύτητα και Αλκαλικότητα	P,G	Ψύξη, 4 °C,	14 ημέρες
Αμμωνία, COD, Άζωτο οργανικό και Kjeldahl	P,G	Ψύξη, 4 °C, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> για pH<2	28 ημέρες
BOD	P,G	Ψύξη, 4 °C,	48 ώρες
Νιτρικά, νιτρώδη	P,G	Ψύξη, 4 °C,	48 ώρες
Νιτρικά, νιτρώδη, Φώσφορος ολικός	P,G	Ψύξη, 4 °C, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> για pH<2	28 ημέρες
Ορθοφωσφορικά	P,G	Άμεση διύλιση, Ψύξη, 4 °C,	48 ώρες
Φαινόλες	G	Ψύξη, 4 °C, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> για pH<2	28 ημέρες
Χρώμιο	P,G	Ψύξη, 4 °C,	24 ώρες
Εντομοκτόνα	G,Teflon	Ψύξη, 4 °C, pH 5-9	7 ημέρες πριν την εκχύλιση και 40 ημέρες μετά.
Οργανικές ενώσεις	G,Teflon	Ψύξη, 4 °C, 0.008% Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7 ημέρες πριν την εκχύλιση και 40 ημέρες μετά.

#### 4.10. Διάδοση της ρύπανσης στους υδροφορείς

Γενικά διακρίνονται δύο μεγάλες κατηγορίες διαλυμένων ουσιών-ρύπων (Βουδούρης, 2000):

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

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

Οι βασικές διαδικασίες για τη διάδοση των αδρανών ρύπων στο χώρο είναι: **Μεταφορά, Διασπορά και Μοριακή Διάχυση.**

Μεταφορά (ή ρεύματα μεταφοράς) είναι η διαδικασία κατά την οποία το κινούμενο νερό μεταφέρει τους διαλυμένους ρύπους. Ο όρος διάχυση χρησιμοποιείται για την εξάπλωση του ρύπου σε στάσιμα νερά, ενώ ο όρος διασπορά χρησιμοποιείται για κινούμενα νερά. Στην περίπτωση των δραστικών ουσιών, υπάρχουν φυσικές και χημικές διαδικασίες (προσρόφηση, ιοντοανταλλαγή, χημικές αντιδράσεις κ.ά.), που προκα-

λούν μια επιβράδυνση (retardation) της κίνησης του ρύπου, έτσι ώστε δεν μετακινείται όπως προβλέπει ο ρυθμός μεταφοράς του.

Οι ανωτέρω διαδικασίες μπορεί να συμβαίνουν ταυτόχρονα στο πορώδες μέσο.

#### **4.11. Μεταφορά – Διασπορά – Διάχυση**

Κατά τη **μεταφορά** (advection) ο ρυπαντής ακολουθεί την κίνηση του υπόγειου νερού στις ίδιες τροχιές, η οποία υπακούει στο νόμο του Darcy δηλ. κίνηση από θέσεις υψηλού σε θέσεις χαμηλού υδραυλικού φορτίου. Σε περιπτώσεις ρυπαντών μεγάλου ειδικού βάρους, τότε παρατηρείται απόκλιση στη ροή του υπόγειου νερού από εκείνη του ρυπαντή. Αρνητικά φορτισμένα ιόντα μπορούν να κινούνται ταχύτερα από το νερό, στο οποίο βρίσκονται διαλυμένα. Κατά τη μεταφορά η συγκέντρωση του ρυπαντή μένει σταθερή σε ένα συγκεκριμένο όγκο νερού, λόγω της αρχής διατήρησης της μάζας.

Κατά τη **διασπορά** (dispersion) οι ταχύτητες του νερού, κατά την κίνηση του στους πόρους του εδαφικού σχηματισμού, ποικίλουν αποκλίνοντας σημαντικά από τη μέση μακροσκοπική ταχύτητα. Η διασπορά διακρίνεται σε μηχανική και υδροδυναμική. Η επιμήκης **μηχανική διασπορά** (mechanical dispersion) οφείλεται (Βουδούρης, 2000):  
α) στο ότι η ταχύτητα ροής είναι μεγαλύτερη στο κέντρο των πόρων, όπως συμβαίνει στο κινούμενο νερό των ποταμών,  
β) στο ότι οι πόροι δεν έχουν όλοι την ίδια διάμετρο με αποτέλεσμα να δημιουργούνται διαφορές μεταξύ των ταχυτήτων και  
γ) κάποια ποσότητα του κινούμενου υγρού κάνει μεγαλύτερες αποστάσεις. Έτσι οι ρύποι διασπείρονται τόσο κατά μήκος της κίνησης του υπόγειου νερού, όσο και εγκάρσια προς αυτήν.

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

Η **μοριακή διάχυση** (molecular diffusion) συμβαίνει στη μικροκλίμακα των πόρων και οφείλεται στη διαφορά συγκέντρωσης του ρύπου από θέση σε θέση (χημικό δυναμικό). Η διάχυση είναι η διαδικασία κατά την οποία ιοντικά ή μοριακά συστατικά διαλυμένα στο νερό κινούνται από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης σε περιοχές χαμηλής συγκέντρωσης. Η διάχυση μιας διαλυμένης ουσίας (ρύπου) περιγράφεται από τον πρώτο νόμο του **Fick**. Ο νόμος αυτός περιγράφει τη ροή μάζας ( $F$ ) λόγω διάχυ-

σης δηλ. την ποσότητα του ρύπου που περνά από τη μοναδιαία διατομή ενός πορώδους μέσου, στη μονάδα του χρόνου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι ανωτέρω μηχανισμοί δρουν ταυτόχρονα και είναι δύσκολο να γίνει διαχωρισμός τους. Η υδροδυναμική διασπορά και η μεταφορά είναι οι κυρίαρχες διαδικασίες διάδοσης των ρύπων στα πορώδη μέσα, όπως οι υδροφόροι. Σε συνηθισμένες συνθήκες ροής καθορίζουν το σχήμα και την εξάπλωση του πλούμιου (θυσάνου) ρύπανσης.

Η επίδραση της υδροδυναμικής διασποράς γίνεται μελετώντας τη συμπεριφορά του  $Cl^-$ , που είναι συντηρητικό (αδρανές) ιόν. Στην περίπτωση πολύ μικρών ταχυτήτων ροής (λεπτόκοκκους προσχωματικούς υδροφορείς) η υδροδυναμική διασπορά είναι πρακτικά ίση με τη μοριακή διάχυση. Σε συνθήκες πλήρους ακινησίας του υπόγειου νερού επικρατεί η μοριακή διάχυση. Αντίθετα, σε αδρομερείς προσχωματικούς υδροφορείς, όπου επικρατούν μεγάλες ταχύτητες ροής, η μηχανική διασπορά είναι σημαντική.

#### 4.12. Διάδοση δραστικών ρύπων

Όταν ο ρυπαντής είναι ενεργός (μη συντηρητικός) αντιδρά με το υπόγειο νερό με αποτέλεσμα τη μείωση της μάζας του και η ταχύτητα του είναι μικρότερη από την ταχύτητα του υπόγειου νερού, προκαλώντας επιβράδυνση της ρύπανσης.

Θεωρώντας:  $C$  = η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στην υγρή φάση μετά την επίτευξη ισορροπίας (g/L)

$C^*$  = η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας που είναι προσροφημένη στη στερεά φάση, ανά μονάδα μάζας ξηρού εδάφους (g/g).

Ο λόγος  $C^*/C$  ονομάζεται **συντελεστής κατανομής  $K_d$**  (distribution coefficient) και καθορίζει την κατανομή ενός ρυπαντή μεταξύ στερεάς (εδάφους) και υγρής φάσης (Βουδούρης, 2000).

Εξαρτάται από το pH και την ικανότητα ανταλλαγής ιόντων. Αν  $K_d=0$  ο ρυπαντής δεν αντιδρά με το υπόγειο νερό, κινείται με την ταχύτητα του υπόγειου νερού και δεν παρατηρείται επιβράδυνση της μετανάστευσης της ρύπανσης. Όταν δεν γίνεται προσρόφηση τότε  $K_d=0$ . Θεωρητικά μια χημική ουσία μπορεί να προσροφηθεί από τους κόκκους των ιζημάτων και  $K_d>0$ . Οι ρύποι που προσροφώνται εύκολα είναι τα βαρέα μέταλλα και οι οργανικές ουσίες.

Η γραφική παράσταση της συνάρτησης  $C^* = f(C)$  ονομάζεται **ισόθερμη προσρόφησης**. Η πλέον απλή και ευρύτατα χρησιμοποιούμενη είναι η γραμμική ισόθερμη ισορ-

ροπίας του **Freundlich**. Αν η συσχέτιση προσρόφησης παρασταθεί σε λογαριθμικό χαρτί τότε προκύπτει ευθεία γραμμή, η κλίση της οποίας δίνει τον συντελεστή κατανομής. Η τιμή του συντελεστή κατανομής  $K_d$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του **παράγοντα επιβράδυνσης  $R_f$**  (retardation factor) ( $R_f \geq 1$ ), ο οποίος εκφράζει το λόγο της ολικής συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας (ρυπαντής) που έχει προσροφηθεί στη στερεά φάση (έδαφος) προς τη συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στην κινούμενη υγρή φάση. Αν η διαλυμένη ουσία αντιδρά με το υπόγειο νερό, κινείται με μικρότερη ταχύτητα, ο ρυθμός της οποίας καθορίζεται από την **εξίσωση επιβράδυνσης** (Βουδούρης, 2000):

$$V_c = V_w / R_f$$

όπου:  $V_c$  είναι η μέση ταχύτητα του ρυπαντή,  $V_w$  είναι η μέση γραμμική ταχύτητα του υπόγειου νερού και  $R_f$  είναι ο παράγοντας επιβράδυνσης. Η εξίσωση της επιβράδυνσης προβλέπει τη θέση του μετώπου ενός ρυπαντή και ο λόγος  $V_c/V_w$  εκφράζει πόσες φορές κινείται το υπόγειο νερό σχετικά με τον προσροφούμενο ρυπαντή (Domenico & Schwartz, 1998), το αντίστροφο δηλ. του παράγοντα επιβράδυνσης εκφράζει την ταχύτητα μετανάστευσης του μετώπου της ρύπανσης.

Οι διάφορες ουσίες παρουσιάζουν διαφορετικό βαθμό προσρόφησης από τα εδαφικά υλικά. Ο ρυπαντής που δεν αντιδρά με το νερό κινείται με την ταχύτητα ροής και προηγείται των ρυπαντών που προσροφώνται.

Η επιβράδυνση του μετώπου ρύπανσης εξαρτάται από την ταχύτητα του υπόγειου νερού, το πορώδες, την πυκνότητα και τον συντελεστή κατανομής  $K_d$ . Η επιβράδυνση της ρύπανσης για χαμηλές συγκεντρώσεις είναι μεγαλύτερη από υψηλές συγκεντρώσεις. Με άλλα λόγια οι χαμηλές συγκεντρώσεις κινούνται αργότερα από τις υψηλές συγκεντρώσεις.

#### **4.13. Διάδοση μη αναμίξιμων ρύπων**

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

Στην ακόρεστη ζώνη επικρατεί η κατακόρυφη κίνηση και ο ρύπος μεταφέρεται από το κατεισδύον νερό στο υπέδαφος. Οι ρύποι που έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα από το νερό (DNAPL) κινούνται κατακόρυφα και στην κορεσμένη ζώνη μέχρι το στεγανό υπόβαθρο. Στη συνέχεια επεκτείνονται πλευρικά με μοριακή διάχυση, ακολουθώντας την κλίση του υποβάθρου. Αντίθετα οι ρύποι με μικρότερη πυκνότητα από το νερό

(LNAPL) κινούνται κατακόρυφα στην ακόρεστη ζώνη και θα εισέλθουν στην κορεσμένη ζώνη, μόνο όταν το βάρος τους υπερβεί την τριχοειδή πίεση.

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

#### 4.14. Μοντέλα συναγωγής – διασποράς – ρόφησης

Τα μαθηματικά μοντέλα μεταφοράς περιλαμβάνουν τα φαινόμενα της συναγωγής, διασποράς και ρόφησης και προσφέρουν μια δυνατότητα προσομοίωσης για μη αποδομήσιμες διαλυμένες οργανικές ενώσεις. Για οργανικούς ρύπους που προσροφούνται, αλλά δεν αντιδρούν χημικά και βιολογικά, η εξίσωση μεταφοράς εκφράζεται σαν (Κουϊμτζής, 1998):

$$- u \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\rho_b}{\varepsilon} \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

Όπου,  $u$ =μέση γραμμική ταχύτητα (m/sec),  $c$ = συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στην υδατική φάση ( $g/m^3$ ),  $x$ = απόσταση στη διεύθυνση ροής (m),  $D$ = συντελεστής διασποράς ( $m^2/sec$ ),  $\rho_b$ = πυκνότητα του εδάφους ( $g/m^3$ ),  $\varepsilon$ = πορώδες εδάφους (-),  $s$ = μάζα της διαλυμένης ουσίας προσροφημένης ανά μονάδα ξηρής μάζας εδάφους ( $g/g$ ) και  $t$ = χρόνος (sec).

Για μια διαλυμένη ουσία που προσροφάται αλλά δεν αντιδρά κάτω από συνθήκες εμβολικής ροής (Κουϊμτζής, 1998):

$$- u \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\rho_b}{\varepsilon} \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

Αν η μεταφερόμενη μάζα της διαλυμένης ουσίας προς τις προσροφούσες επιφάνειες είναι γρήγορη, σχετικά με τη ταχύτητα της (τοπική ισορροπία) και η ισορροπία προσρόφησης είναι γραμμική, τότε (Κουϊμτζής, 1998):

$$\frac{\partial S}{\partial C} = K_d$$

Όπου  $K_d=0$  συντελεστής κατανομής ( $m^3/g$ ). Σ' αυτή τη περίπτωση, η εξίσωση μεταφοράς είναι (Κουϊμτζής, 1998):

$$- u \frac{\partial C}{\partial x} = \left( 1 + \frac{\rho_b K_d}{\varepsilon} \right) \frac{\partial C}{\partial t}$$



Ο όρος  $(1+\rho_b K_d/\varepsilon)$ , είναι γνωστός σαν παράγοντας επιβράδυνσης.

Η σημασία του φαινομένου της διασποράς, μπορεί να υπολογιστεί από το μέγεθος του συντελεστή διασποράς  $D$ . Η τιμή του  $D$ , προσδιορίζεται με πειράματα μεταφοράς ιχνηλάτη (tracer) στο πεδίο. Στην υδρολογία, ο συντελεστής διασποράς είναι συχνά περίπου ανάλογος με τη ταχύτητα,  $D=\alpha \cdot u$ , όπου  $\alpha$ = συντελεστής διασποράς (m) και κυμαίνεται από 0.1-100m. Η συγκέντρωση ενός ρύπου μπορεί να προσδιοριστεί από την ακόλουθη εξίσωση (Κουϊμτζής, 1998):

$$\hat{F} = \frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left( \frac{1 - \theta}{2(\theta/Pe)^{1/2}} \right) + \exp(Pe) \operatorname{erfc} \left( \frac{1 + \theta}{2(\theta/Pe)^{1/2}} \right) \right\}$$

Όπου  $\theta=ut/x$  και  $Pe=ux/D$  (αριθμός Peclet).

Η συμπεριφορά μιας ουσίας, που επηρεάζεται και από τη προσρόφηση και από τη διασπορά, μπορεί να προβληθεί από την εξίσωση (Κουϊμτζής, 1998):

$$-u_r u \frac{\partial C}{\partial x} + u_r D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

Το αξιοσημείωτο συμπέρασμα είναι ότι η συγκέντρωση που αντιστοιχεί για μια ουσία που προσροφάται με συντελεστή επιβράδυνσης  $t_r=(u_r)^{-1}$  είναι ακριβώς ίδια για μια ουσία που δεν προσροφάται και που κινείται με μια ταχύτητα ίση με  $u_r$  φορές την πραγματική μέση ταχύτητα του υγρού.

Τα παραπάνω απλοποιημένα μοντέλα συναγωγής – διασποράς – ρόφησης περιορίζονται μόνο για ομοιόμορφη – μονοδιάστατη ροή.

Η εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων για την επίλυση προβλημάτων ρύπανσης των υπόγειων νερών περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (Sun, 1995, Αντωνόπουλος, 2001): προσδιορισμός του σκοπού και των έργων μελέτης, συλλογή στοιχείων υπαίθρου, επιλογή του μοντέλου, ρύθμιση του μοντέλου, πρόβλεψη και έλεγχος. Για την επίλυση του μοντέλου απαιτείται ο καθορισμός των εξής υδροχημικών παραμέτρων: του συντελεστή υδροδυναμικής διασποράς, του συντελεστή διάχυσης και της τιμής του λόγου οριζόντιας και κατακόρυφης ανισορροπίας

Το πακέτο MT3D της εταιρείας Paradopoulos & Associates, Inc. χρησιμοποιείται ευρύτατα για την προσομοίωση της διασποράς ρύπων. Στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση της μερικής διαφορικής εξίσωσης, που περιγράφει τη διασπορά ρύπων στα υπόγεια νερά, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους πιθανούς μηχανισμούς (διασπορά, διάχυση, χημικές διαδικασίες απορρόφησης κλπ.).



#### 4.15. Εξασθένηση της ρύπανσης

Λόγω της μεγάλης ικανότητας αυτοκαθαρισμού του εδάφους και λόγω μιας σειράς διαδικασιών στην ακόρεστη ζώνη παρατηρείται μείωση του ρυπαντικού φορτίου και αναγέννηση του ρυπασμένου νερού. Το σύνολο των διαδικασιών αυτών συνιστά την ικανότητα εξασθένησης του ρυπαντικού φορτίου. Στην ακόρεστη ζώνη υπάρχει περίσσεια οργανικής ύλης και οξυγόνου και παρατηρούνται κυρίως αερόβιες αντιδράσεις με αποτέλεσμα τη μείωση του BOD, τη μετατροπή του αζώτου και της αμμωνίας σε νιτρικά ιόντα με τη δράση βακτηρίων. Η ακόρεστη ζώνη φιλτράρει επίσης το νερό, λόγω της βραδείας κίνησης που έχει στη ζώνη αυτή και απομακρύνει τα βακτήρια και τους παθογόνους μικροοργανισμούς. Το έδαφος που αποτελεί το ανώτερο στρώμα της ακόρεστης ζώνης εμφανίζει αυξημένη βιολογική δραστηριότητα που συμβάλλει στη μείωση της ρύπανσης. Ο ρυθμός εξασθένησης της ρύπανσης κατά τη μεταμόσχευση αυτής στην κορεσμένη ζώνη εκφράζει τη μεταβολή της συγκέντρωσης του ρύπου στη μονάδα του χρόνου και εξαρτάται από το είδος του ρύπου και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα. Τα νιτρικά όταν φθάσουν στην κορεσμένη ζώνη κινούνται με το υπόγειο νερό, χωρίς να υφίστανται εξασθένηση. Τα κυανίδια μπορεί να αποδομηθούν υπό αερόβιες συνθήκες σε αμμωνία, άζωτο ή νιτρικά άλατα. Τα φωσφορικά προσροφώνται και κατακρημνίζονται κατά την κίνηση τους στην ακόρεστη ζώνη μαζί με ιόντα Ca, Fe, Al. Τα μεταλλικά ιόντα δεσμεύονται στα αργιλικά ορυκτά, τα υδροξείδια και το οργανικό υλικό.

Αποδόμηση των οργανικών ουσιών γίνεται σε αερόβιες συνθήκες στα όρια των πλουμιών ρύπανσης. Επίσης οι μικροβιακοί οργανισμοί των υπόγειων νερών έχουν τη δυνατότητα δέσμευσης ανόργανων στοιχείων (N, C, P, S) και ορισμένων ιχνοστοιχείων για τη σύνθεση των κυττάρων τους (Αντωνόπουλος, 2001).

Οι κυριότεροι **μηχανισμοί εξασθένησης της ρύπανσης** είναι:

- **Η προσρόφηση.** Κατά την προσρόφηση ο ρύπος ενσωματώνεται πάνω στην επιφάνεια του εδαφικού κόκκου της ακόρεστης ζώνης. Η χημική ρόφηση συμβαίνει όταν ο ρύπος ενσωματώνεται στα αργιλικά ορυκτά ή σε ίζημα με χημική αντίδραση. Η προσρόφηση αποτελεί τον σημαντικότερο μηχανισμό εξασθένησης του ρυπαντικού φορτίου. Όλοι οι ρύποι έχουν την ικανότητα να προσροφώνται, εκτός των ιόντων Cl<sup>-</sup> και σε μικρότερο βαθμό των NO<sub>3</sub><sup>-</sup> και SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

- **Η αραιώση.** Οι ρύποι κινούμενοι στο πορώδες μέσο, λόγω της υδροδυναμικής διασποράς, αραιώνονται με συνέπεια τη μείωση της συγκέντρωσης τους με βάση την απόσταση που διανύει ο ρύπος.

- **Η διήθηση.** Παίζει σημαντικό ρόλο στην ακόρεστη ζώνη απ' όπου περνούν οι ρύποι προς τους υποκείμενους υδροφόρους ορίζοντες, απομακρύνοντας τα αιωρούμενα υλικά.

- **Βιολογικές αντιδράσεις.** Περιλαμβάνουν μικροβιακές διασπάσεις με αποτέλεσμα την καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών, κυτταρικές συνθέσεις, οργανικές αποδομήσεις κλπ. Η μικροβιολογική δράση είναι πιο ενεργή στην εδαφική ζώνη και στο επίπεδο της στάθμης του υπόγειου νερού. Η μείωση του BOD γίνεται πιο γρήγορα σε αερόβιες συνθήκες. Οι οργανικοί ρυπαντές κατά την κίνηση στο υπέδαφος υφίστανται βραδεία ή ταχεία αποδόμηση με αποτέλεσμα την εξασθένηση της ρυπανσης.

- **Χημικές αντιδράσεις.** Λαμβάνουν χώρα και στην ακόρεστη και στην κορεσμένη ζώνη και περιλαμβάνουν αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, εξουδετερώσεις, ιοντοανταλλαγή, οργανικές αντιδράσεις, διάλυση αερίων, καθίζηση.

- **Φωτοχημικές αντιδράσεις.** Επιταχύνονται από την ηλιακή ακτινοβολία και συμβάλλουν στη διάσπαση πολλών οργανικών ενώσεων, όταν βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια σωμάτων νερού (λίμνες, ποταμοί). Τα συνθετικά πολυμερή (πλαστικά) διασπώνται με υπεριώδη ακτινοβολία.

Λόγω των ανωτέρω διαδικασιών ο ρυπαντής υφίσταται μετασχηματισμούς που μειώνουν τη συγκέντρωσή του, μέχρι και πλήρους εξαφάνισης. Ο ρυθμός εξασθένησης εξαρτάται από το είδος του ρύπου και τις τοπικές υδρογεωλογικές και περιβαλλοντικές συνθήκες.

#### **4.16. Αλληλεπίδραση ρυπαντών και εδάφους – Φυσική απορρύπανση**

Οι ρυπαντικές ουσίες ρυπαίνουν τα υπόγεια νερά με διάφορους τρόπους όπως (Βουδούρης, 2000):

- Με απευθείας κατείσδυση στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες από ρυπαντές που αποτίθενται επιφανειακά ή ενταφιάζονται σε μικρό βάθος.

- Με διήθηση στο υπέδαφος από ρυπαντές που απορρίπτονται στα επιφανειακά νερά (ποτάμια, χείμαρροι).

Οι ρυπαντές μεταφέρονται στο σύστημα ροής των υπόγειων νερών με την επίδραση της υδραυλικής κλίσης και την υδροδυναμική διασπορά. Η διάδοση των ρύπων επηρεάζεται από τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες (πυκνότητα, ιξώδες, θερμοκρασία κ.λπ.), που καθορίζουν την κινητικότητα και τη διάχυση τους. Οι ρυπαντές κινούμενοι στην ακόρεστη ζώνη, υφίστανται τη διαδικασία του φυσικού αυτοκαθαρισμού με απο-

τέλεσμα τη μείωση ή και εξουδετέρωση του ρυπαντικού τους φορτίου. Η φυσική αυτή διαδικασία απορρύπανσης είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των ρυπαντών με το έδαφος και περιλαμβάνει τους εξής μηχανισμούς:

- **Προσρόφηση** (adsorption) είναι η διαδικασία κατά την οποία μια χημική ουσία προσκολλάται (δεσμεύεται) στην επιφάνεια των στερεών σωμάτων (αργιλικά ορυκτά).
- **Απορρόφηση** (absorption) είναι η διαδικασία εκείνη κατά την οποία η χημική ουσία περνάει στο εσωτερικό των στερεών σωμάτων (Appelo & Postma, 1994). Η προσρόφηση και η απορρόφηση είναι δύο μορφές της ρόφησης (sorption).
- **Ιοντοανταλλαγή** (ion exchange) είναι η διαδικασία κατά την οποία ανταλλάσσονται ιόντα μεταξύ των ρυπαντών και του εδαφικού υλικού.

Σχετικά με τις ανωτέρω διαδικασίες πρέπει να σημειωθούν οι εξής παρατηρήσεις:

- 1) Οι μηχανισμοί της προσρόφησης και της ιοντοανταλλαγής δεν είναι ευδιάκριτοι και πολλές φορές συμβαίνουν ταυτόχρονα. Γενικά στους εδαφικούς ορίζοντες λαμβάνει χώρα η ιοντοανταλλαγή, ενώ στα βαθύτερα γεωλογικά στρώματα υπερισχύει η προσρόφηση.
- 2) Η προσρόφηση γίνεται λόγω της ύπαρξης μεταβλητών επιφανειακών φορτίων, ενώ η ιοντοανταλλαγή λόγω της ύπαρξης μόνιμων επιφανειακών φορτίων (Νικολαΐδης, 2005).
- 3) Κατά την προσρόφηση προκαλείται μείωση των συνολικών διαλυμένων στερεών (T.D.S.), ενώ αυτό δεν συμβαίνει κατά την ιοντοανταλλαγή (Καββαδάς, 1996).
- 4) Οι ανωτέρω μηχανισμοί επηρεάζονται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος (θερμοκρασία, υγρασία, pH, πίεση, παρουσία καταλυτών κ.ά.), την ορυκτολογική σύσταση του εδάφους και τη χημική σύσταση των ρυπαντών.
- 5) Δεν έχουν απεριόριστες δυνατότητες μείωσης του ρυπαντικού φορτίου, γιατί υπόκεινται σε κορεσμό με συνέπεια την εξασθένηση της δράσης τους.

Παράλληλα με τους ανωτέρω δύο μηχανισμούς φυσικής απορρύπανσης λαμβάνουν χώρα, ανεξάρτητα της παρουσίας εδαφικών κόκκων και άλλες βιολογικές και χημικές διεργασίες (υδρόλυση, νιτροποίηση, βιοχημική οξείδωση κ.ά.) με αποτέλεσμα τη μείωση του ρυπαντικού φορτίου. Οι διεργασίες αυτές πραγματοποιούνται και στα επιφανειακά νερά.

#### 4.17. Τρωτότητα των υπόγειων υδροφόρων

Κάθε ρύπος ή μολυντής ανεξάρτητα από τη φύση του και το τρόπο διάθεσης του στο περιβάλλον, αργά ή γρήγορα, άμεσα ή έμμεσα, καταλήγει σ' ένα υδάτινο αποδέκτη. Η ρύπανση ή μόλυνση ενός υδατικού συστήματος διαφέρει από την άφιξη του ρύπου ή του μολυντή σε υδροληπτικό έργο, δεδομένου ότι ανάμεσα στο σημείο εισόδου και το υδροληπτικό έργο μεσολαβεί η δράση των μηχανισμών εξουδετέρωσης, εξασθένησης ή αδρανοποίησης των ρύπων και των μολυντών. Τρωτότητα ή ρυπαντική επιδεκτικότητα ή ευαλωσιμότητα υπόγειων νερών ή υδροφορέων είναι η ευαισθησία ή η επιδεκτικότητα απέναντι στους ρύπους.

Η έννοια της τρωτότητας βασίζεται στην παραδοχή ότι το φυσικό περιβάλλον μπορεί να προστατεύσει σε κάποιο βαθμό το υπόγειο νερό. Συνεπώς κάποιες περιοχές είναι πιο ευάλωτες από κάποιες άλλες. **Η τρωτότητα (vulnerability) σχετίζεται με την ευκολία με την οποία ένας ρύπος, που εισάγεται στην επιφάνεια του εδάφους, μπορεί να φθάσει στον υδροφορέα κάτω από συγκεκριμένες πρακτικές διαχείρισης των χρήσεων γης σε μια περιοχή, με καθορισμένα χαρακτηριστικά του ρύπου και της ευαισθησίας του υδροφορέα** (Στουρνάρας, 2000). Έτσι η τρωτότητα του υπόγειου νερού είναι συνάρτηση τόσο των χαρακτηριστικών του υδροφόρου συστήματος, όσο και της απόστασης από την πηγή ρύπανσης, των χαρακτηριστικών του ρύπου και άλλων παραγόντων που μπορεί πιθανά να αυξήσουν το ρυπαντικό φορτίο του συγκεκριμένου ρυπαντή. Η τρωτότητα των υπόγειων νερών είναι μια σχετική, μη μετρήσιμη και αδιάστατη ιδιότητα. Αντίθετα ευαισθησία του υδροφορέα (aquifer sensitivity) είναι η ευκολία με την οποία ένας ρύπος μεταναστεύει από την επιφάνεια του εδάφους στον υδροφορέα και είναι χαρακτηριστικό των γεωλογικών συνθηκών, της ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης και ανεξάρτητη των χρήσεων γης και των χαρακτηριστικών του ρύπου. Με βάση τους ανωτέρω ορισμούς προκύπτει ότι, η τρωτότητα δεν ταυτίζεται με την ευαισθησία.

Η έννοια της τρωτότητας εισήχθη για πρώτη φορά από τον Margat το 1968 στη Γαλλία για να εκφράσει τον βαθμό προστασίας που προσφέρει το φυσικό περιβάλλον εναντίον της ρύπανσης των υπόγειων νερών. Έκτοτε ο ορισμός της τρωτότητας άλλαξε. Οι Olmer & Rezac (1974) ορίζουν την τρωτότητα «ως τον βαθμό έκθεσης των υπόγειων νερών σε κίνδυνο υποβάθμισης από φυσικές ουσίες». Οι Villumsen et al. (1983) θεωρούν την ποιότητα των υπόγειων νερών ως δείκτη τρωτότητας και δίνουν έμφαση στη δυναμική των διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν αυτή. Οι Bachmat & Collin (1987) όρισαν την τρωτότητα ως «την ευαισθησία της ποιότητας

των υπόγειων νερών σε επιπτώσεις από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως καταδεικνύεται από τις αλλαγές της ποιότητας των υπόγειων νερών».

Το U.S Environmental Protection Agency – EPA (1991) προτείνει δύο τύπους επιδεκτικότητας σε μόλυνση των υδροφόρων οριζόντων από λοιμώδη στοιχεία. Τον όρο «**ευαισθησία υδροφορέα**» που βασίζεται αποκλειστικά στα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα και τον όρο «**τρωτότητα υδροφορέα**» στον οποίο συνυπάρχουν τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά, οι χρήσεις γης, τα χαρακτηριστικά του μολυντή και το φορτίο μόλυνσης.

Η έννοια της τρωτότητας, δεν συνδέεται αποκλειστικά με τη ρύπανση, μόλυνση ή γενικότερα την επιβάρυνση της ποιότητας του υπόγειου νερού, παρά το γεγονός ότι με την έννοια αυτή έγινε γνωστός ο όρος. Μπορεί επίσης να αναφέρεται και σε φαινόμενα που αφορούν την ποσότητα του νερού, όπως ευπαθείς, σε λειψυδρίες, υδροφορίες κτλ.

Η τρωτότητα διακρίνεται σε: ειδική (specific) που αναφέρεται σε συγκεκριμένο ρυπαντή ή ομάδα ρυπαντών και σε γενική ή ιδιοτρωτότητα (intrinsic) που σχετίζεται αποκλειστικά με τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα και του υπερκείμενου εδάφους, χωρίς εξειδίκευση σε κάποιο ρυπαντή. Σύμφωνα με τους Rao and Alley (1996) η ευαισθησία του υδροφορέα (aquifer sensitivity) ταυτίζεται με τη γενική τρωτότητα (intrinsic vulnerability).

Συμπερασματικά η έννοια της τρωτότητας πρέπει να αντιμετωπίζεται σε τρία στάδια (Στουρνάρας, 1997):

- 1) Το στάδιο της δυναμικής εισόδου του ρύπου στο υδατικό σύστημα, που συνδέεται με τις υδρογεωλογικές συνθήκες και τη συμπεριφορά του ρύπου.
- 2) Το στάδιο της παραμονής του ρύπου στο υδατικό σύστημα που συνδέεται με τις φυσικοχημικές ιδιότητες του ρύπου και τις υδρογεωλογικές και υδραυλικές συνθήκες του υδροφορέα.
- 3) Το στάδιο της άφιξης του ρύπου στο υδροληπτικό έργο, αν γίνεται εκμετάλλευση του υδροφόρου ορίζοντα.

Σε πολλές χώρες συντάσσονται χάρτες τρωτότητας σε κλίμακα νομού ή περιφερειακή κλίμακα ή σε ολόκληρη τη χώρα, στους οποίους φαίνονται οι περιοχές με αυξημένη ή μη πιθανότητα ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων.

Η **διακινδύνευση ενός υδροφορέα** (risk pollution) R στη ρύπανση είναι συνάρτηση της τρωτότητας του (vulnerability) και της πιθανότητας (hazard) εκδήλωσης ενός

επεισοδίου ρύπανσης σε μια περιοχή. Η συνάρτηση υπολογισμού της διακινδύνευσης είναι η κάτωθι:

$$R = V \times H$$

όπου: R= η διακινδύνευση, V= η τρωτότητα του υδροφορέα και H= η πιθανότητα να συμβεί ένα επιβλαβές επεισόδιο σε μια περιοχή σε κάποια χρονική περίοδο (Βουδούρης, 2000).

Έτσι επιπλέον από τους χάρτες τρωτότητας σε μια περιοχή κατασκευάζονται και χάρτες διακινδύνευσης των υπόγειων νερών στη ρύπανση.

#### **4.18. Η ειδική περίπτωση καρστικών πεδίων**

Σαν καρστικός υδροφορέας θεωρείται ένα δίκτυο διασυνδεδεμένων ασυνεχειών και αγωγών (καρστικό πεδίο), αναπτυγμένο σ' ένα πιο συμπαγές και λιγότερο περατό διακλασμένο πέτρωμα.

Σε αντίθεση με τα πορώδη μέσα, στα μέσα ασυνεχειών οι ταχύτητες ροής είναι σημαντικές και ακόμα πιο σημαντικές στα καρστικά πεδία. Έτσι κάποιοι μηχανισμοί αντιμετώπισης των ρύπων όπως προσρόφηση, διήθηση και οι υπόλοιπες διαδικασίες αντίδρασης (άρα και των ρύπων) του υπόγειου νερού δεν διαθέτουν τον αναγκαίο χρόνο να ενεργοποιηθούν, ενώ αντίθετα ενεργοποιείται στο έπακρο ο μηχανισμός αραιώσης, με τελικό αποτέλεσμα τα καρστικά νερά να είναι περισσότερο ευπρόσβλητα τόσο στη διαδικασία εισόδου του ρύπου μέσα σ' αυτά όσο και στη διαδικασία διακίνησης στο εσωτερικό ενός καρστικού συστήματος.

#### **4.19. Προστασία υπόγειων νερών σε καρστικές περιοχές**

Λόγω της υψηλής τρωτότητας των καρστικών περιοχών, οι ανθρώπινες δραστηριότητες απειλούν να ρυπαίνουν τους υπόγειους υδατικούς πόρους πολύ πιο εύκολα από περιπτώσεις άλλου τύπου υδροφορέων.

Το καρστικό υπόγειο νερό απαιτεί προστασία για τρεις κύριους λόγους (Στουρνάρας, 2000):

1. Σε καρστικές περιοχές το υπόγειο νερό είναι η μόνη πηγή υδατικής τροφοδοσίας.
2. Το καρστικό υπόγειο νερό είναι ιδιαίτερα τρωτό σε ρύπανση.
3. Η ανεκτή διαχείριση του υπόγειου νερού απαιτεί πρόληψη της ρύπανσης.

Για τη διατήρηση της ποσότητας και ποιότητας του καρστικού υπόγειου νερού, πρέπει να ληφθούν υπ' όψη οι ακόλουθοι παράγοντες (Στουρνάρας, 2000): η φυσική

τροφοδοσία, τα κατακρημνίσματα και οι διαρροές της επιφανειακής απορροής πρέπει να είναι καλής ποιότητας, επικίνδυνες και τοξικές ουσίες πρέπει να παραμένουν μακριά από τα καρστικά συστήματα, η φυσική προστασία, προερχόμενη από το κάλυμμα της βλάστησης, το εδαφικό στρώμα και άλλα υπερκείμενα στοιχεία πρέπει να διατηρείται ή να βελτιώνεται.

Ένα σχέδιο προστασίας υπόγειων νερών περιλαμβάνει δύο αδιαχώριστα στοιχεία: ένα χάρτη επιφανειακής ζωνοποίησης και ένα κώδικα πρακτικής. Το απαιτούμενο πλαίσιο για τη δημιουργία των σχεδίων προστασίας υπόγειων νερών είναι ο κίνδυνος ρύπανσης του υπόγειου νερού και η διαχείριση του κινδύνου αυτού. Ο κίνδυνος ρύπανσης εξαρτάται από: την επικινδυνότητα που προκαλείται από τη ρυπαντική δραστηριότητα, τις επιπτώσεις του ρυπαντικού φορτίου και την πιθανότητα ρύπανσης. Η ανάλυση των στοιχείων αυτών θα πρέπει ν' ακολουθείται από μια απόκριση στο κίνδυνο με τη χρήση επαρκών μετρήσεων. Οι μετρήσεις αυτές σχεδιάζονται να προλάβουν ή να ελαχιστοποιήσουν τις επιπτώσεις και την πιθανότητα ρύπανσης.

#### **4.20. Εμπλουτισμός υδροφόρων οριζόντων**

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

Ο **φυσικός εμπλουτισμός** επιτυγχάνεται:

- Με απευθείας κατέισδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.
- Διήθηση από τα επιφανειακά νερά.
- Υπόγεια τροφοδοσία από γειτονική λεκάνη.

Εκτός από τη φυσική τροφοδοσία για την ενίσχυση του υδατικού ισοζυγίου των υπόγειων νερών εφαρμόζεται ο **τεχνητός εμπλουτισμός** (groundwater recharge). Ο τεχνητός εμπλουτισμός συνίσταται στην αύξηση του ρυθμού ανανέωσης του υπόγειου νερού των υδροφόρων οριζόντων με χρησιμοποίηση περίσσειας φυσικού ή επεξεργασμένου νερού με κατασκευή κατάλληλων διατάξεων (π.χ. κατάκλυση κλπ). Η εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού μέσω πηγαδιών και γεωτρήσεων έχει εφαρμοσθεί με ικανοποιητικά αποτελέσματα τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα (Bouwer, 1996, Κουμαντάκης κ.ά, 1999, Βουδούρης κ.ά, 2002, Πουλοβασίλης 1980). Η μέθοδος είναι απλή και η τροφοδοσία γίνεται ταχύτερα, αλλά απαιτεί καλής ποιότητας νερό, γιατί διαφορετικά εγκυμονούνται κίνδυνοι αποκροκίδωσης του εδάφους αν το νερό του εμπλουτισμού περιέχει πολύ νάτριο λόγω ανταλλαγής με ιόντα ασβεστίου. Επίσης αν το νερό περιέχει βακτήρια μπορεί να δημιουργηθούν εστίες μόλυνσης.

Ο τεχνητός εμπλουτισμός των υδροφόρων οριζόντων αντιπροσωπεύει μια προσωρινή αποθήκευση ποσότητας επιφανειακού υδατικού δυναμικού στο υπέδαφος μέχρι τη ξηρά περίοδο, οπότε η ποσότητα αυτή μπορεί ν' ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί για τη κάλυψη αυξημένων αναγκών που συμπίπτει με το χρόνο διακοπής της τροφοδοσίας των υδροφόρων αυτών οριζόντων. Μερικά πλεονεκτήματα του είναι: προληπτική ή διορθωτική αντιμετώπιση της διείδυσης του θαλασσινού νερού, επιτυγχάνεται καθαρισμός του νερού με τη διαδικασία της διηθήσεως, περιορισμένο δίκτυο επιφανειακής μεταφοράς νερού, αποτρέπεται η παραμονή στάσιμων νερών στην επιφάνεια με όλες τις επιπτώσεις στο περιβάλλον και την υγεία, αποφυγή απαλλοτριώσεων σε επιφανειακές συγκεντρώσεις νερού (ταμιευτήρες).

Το μειονέκτημα σ' όλη τη διαδικασία είναι η διαταραχή του υδρολογικού ισοζυγίου της περιοχής με τη «στέρηση» κάποιου τμήματος ή όλης της απορροής. Το γεγονός αυτό μπορεί να προκαλέσει επιπτώσεις στην ευρύτερη περιοχή στη χρήση γης ή υδατικών πόρων ή και στο περιβάλλον γενικότερα αν τα έργα εμπλουτισμού δεν είναι ενταγμένα σε συγκεκριμένο ορθολογικό διαχειριστικό και αναπτυξιακό πρόγραμμα.

#### **4.21. Υφαλμύριση υπόγειων νερών**

Η διείδυση του αλμυρού νερού στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, που προκαλείται από την επίδραση του ανθρώπου, αυξάνει την αλατότητα του υπόγειου νερού. Οι διειδύσεις είναι το αποτέλεσμα μια ποικιλίας επιδράσεων. Ένα πρόβλημα για το υπόγειο νερό είναι αυτό των διειδύσεων σε παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες. Το αλμυρό νερό μπορεί να προέλθει από δύο αρχικές πηγές: από το θαλασσινό νερό και από το νερό των πετρωμάτων. Νερό του πετρώματος είναι αυτό που απομένει στα ιζηματογενή πετρώματα από την εποχή της αποθέσεως των (απολιθωμένο νερό). Η άντληση π.χ. προκαλεί μια πλευρική και ανοδική κίνηση του θαλασσινού νερού στις παράκτιες περιοχές.

Η εντατική άντληση των υπόγειων νερών με ρυθμό, που δεν επιτρέπει την ανανέωση τους, προκαλεί την εισβολή αλμυρού νερού από τη θάλασσα στους υδροφορείς. Όταν η στάθμη του υπόγειου νερού υποχωρήσει κάτω από την στάθμη του θαλάσσιου νερού με το οποίο συνδέεται, τότε αντί να έχουμε ροή από τον υπόγειο υδροφορέα στη θάλασσα, έχουμε αντιστροφή του φαινομένου και νερό από την θάλασσα εισέρχεται στο υπόγειο νερό. Αλμυρό νερό αναμένεται να εισβάλλει σε μεγαλύτερη έκταση σε παράκτιες περιοχές, εξαιτίας της ανόδου της στάθμης της θάλασσας (έως



και εβδομήντα εκατοστά μέσα στις επόμενες δεκαετίες) λόγω της κλιματικής αλλαγής ή της μείωσης των βροχοπτώσεων.

Όταν εμφανίζονται διεισδύσεις σε παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες, δεν είναι εύκολος ο έλεγχος τους. Οι μικρές ταχύτητες του υπόγειου νερού, η διαφορά πυκνότητας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού και η έκπλυση, σημαίνουν ότι απαιτούνται χρόνια για την απομάκρυνση της μόλυνσης κάτω από φυσικές συνθήκες. Για τον έλεγχο των διεισδύσεων υπάρχουν πολλοί μέθοδοι (Στουρνάρας, 2000):

1. Τροποποίηση της άντλησης. Αποκλεισμός της υπεράντλησης που παρουσιάζει διεισδύσεις και επιτρέπει σχηματισμό σταθερής θέσης της διαχωριστικής επιφάνειας.
2. Οι τεχνικές φορτίσεις είναι μια δεύτερη μέθοδος που για πολλές περιπτώσεις είναι οικονομική σε ότι αφορά το κεφάλαιο και το ετήσιο κόστος για μεγάλα συστήματα.
3. Οι μέθοδοι αντλήσεως δημιουργούνται από μια σειρά γεωτρήσεων παράλληλων προς την ακτή.
4. Οι μέθοδοι των ράχων είναι η αντίστροφη της μεθόδου των αντλήσεων. Γλυκό νερό φορτίζει μια σειρά γεωτρήσεων, ώστε να δημιουργεί μια ανύψωση πάνω από τη στάθμη της θάλασσας.
5. Κατασκευή υπόγειων φραγμάτων, τα οποία περιορίζουν την εισροή του θαλασσινού νερού. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει πολλά οικονομικά και τεχνικά προβλήματα και εφαρμόζεται σε περιοχές με μικρά βάθη και στενά ανοίγματα προς τη θάλασσα.

Ωστόσο καμία από τις παραπάνω μεθόδους δεν κατάφερε να λύσει το βασικό πρόβλημα της υπεράντλησης που είναι υπεύθυνο για τις διεισδύσεις. Αυτό που επιτυγχάνουν είναι να διαχωρίσουν αρχικά το γλυκό από το αλμυρό νερό και ο υδροφόρος ορίζοντας να προστατεύεται όσο χρόνο μπορεί να καλύψει τις ανάγκες της αντλήσεως.

## 5. ΜΟΛΥΝΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ

### 5.1. Κυριότερες πηγές και αιτίες μόλυνσεως

Ο τεχνικά προκαλούμενος υποβιβασμός του της ποιότητας του υπόγειου νερού ονομάζεται μόλυνση. Η μόλυνση περιορίζει τις χρήσεις του υπόγειου νερού και δημιουργεί κινδύνους στην υγεία του ανθρώπου εξαιτίας τοξικών ουσιών και της μεταδόσεως ασθενειών. Η μεγαλύτερη μόλυνση προέρχεται από τη διάθεση των απορριμάτων και έτσι μια μεγάλη ποικιλία από μολυσματικές πηγές και αιτίες μεταβάλλουν την ποιότητα του υπόγειου νερού. Οι πηγές και αιτίες μόλυνσεως συνδέονται στενά από την χρησιμοποίηση του νερού από τον άνθρωπο. Τα στοιχεία που μολύνουν το υπόγειο νερό είναι οργανικά, ανόργανα, βιολογικά, φυσικά και ραδιενεργά.

Αντίθετα με τη μόλυνση του επιφανειακού νερού, η μόλυνση του υπόγειου νερού είναι δύσκολο ν' ανακαλυφθεί και ακόμα δυσκολότερο να τεθεί υπό έλεγχο.

Οι κυριότερες πηγές μόλυνσεως διακρίνονται σε 4 κύριες κατηγορίες:

- **Δημόσιες** (διαρροές από σπασμένους υπονόμους, υγρά απόβλητα από οικιακές και βιομηχανικές χρήσεις και καταιγίδες όπου τα νερά αυτά χρησιμοποιούνται για τον εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων, στερεά απόβλητα από σκουπιδοτοπους).
- **Βιομηχανικές** (βιομηχανικά απόβλητα από τις χρήσεις του νερού για ψύξη, καθαρισμό, κατασκευή και επεξεργασία των προϊόντων, καταστροφή δεξαμενών και αγωγών που αποθηκεύουν και μεταφέρουν καύσιμα ή χημικές ουσίες, απόβλητα από την επεξεργασία του πετρελαίου και του φυσικού αερίου).
- **Αγροτικές** (επιστροφή αρδευτικού νερού το οποίο έχει αυξημένη αλατότητα 3-10 φορές από αυτή του χρησιμοποιούμενου νερού, απορρίμματα ζώων, λιπάσματα και βελτιωτικά του εδάφους, φυτοφάρμακα).
- **Διάφορες άλλες πηγές και αιτίες** (μη στεγανοί αγωγοί όπου το μολυσμένο νερό ρέει επιφανειακά σε βιομηχανικές περιοχές, διαρροές από σωλήνες και βαλβίδες, πλύσιμο αεροσκαφών, αυτοκινήτων και ανατροπές αυτοκινήτων που μεταφέρουν υγρά καύσιμα, αποθηκευμένα στερεά υλικά όπως συμβαίνει συνήθως σε βιομηχανικές, αγροτικές περιοχές και εργοτάξια, με στεγανούς βόθρους και διάφορους νερόλακκους, από τους αυτοκινητόδρομους που το χειμώνα ρίχνουν αλάτι για τους παγους, διείσδυση θαλασσινού νερού σε παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες όταν γίνεται υπεράντληση, από τις υδρογεωτρήσεις, από τα μολυσμένα επιφανειακά νερά τα οποία τροφοδοτούν τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες είτε από φυσική διήθηση

είτε από αντλήσεις γεωτρήσεων που βρίσκονται κοντά σε μολυσμένα ποτάμια, νεκροταφεία).

## **5.2. Μόλυνση των υδροφόρων από μικροοργανισμούς**

Οι πιο σημαντικοί μικροοργανισμοί στα υπόγεια νερά είναι τα παθογόνα βακτήρια, οι μύκητες και τα παράσιτα. Κυριότερη πηγή μικροβιακής μόλυνσης είναι τα λύματα, λόγω των εντερικών περιττωμάτων. Οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία είναι οι ασθένειες τύφος, γαστρεντερίτιδα, διάρροια, χολέρα, ηπατίτιδα κ.ά. Κατά την επεξεργασία των λυμάτων απομακρύνεται σημαντικός αριθμός παθογόνων μικροοργανισμών (97-100% με δευτεροβάθμια επεξεργασία).

Η επιβίωση των βακτηρίων στο υπόγειο νερό επηρεάζεται από τις κλιματικές συνθήκες, τη θερμοκρασία, την υγρασία, το pH, την πίεση και τη συγκέντρωση θρεπτικών. Επιπλέον το πάχος και η φύση της ακόρεστης ζώνης ελέγχουν καθοριστικά την ανάπτυξη μικροβίων. Η ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού καθορίζει τον χρόνο παραμονής αυτών στον υδροφόρο. Στην ακόρεστη ζώνη επικρατούν αερόβιες συνθήκες, ενώ στην κορεσμένη αναερόβιες συνθήκες.

Στα επιφανειακά στρώματα αφθονεί η οργανική ύλη από την οποία εξασφαλίζουν τροφή τα μικρόβια, ενώ στα βαθύτερα στρώματα απουσιάζει η οργανική ύλη. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μη επιβίωση αυτότροφων μικροβίων στα βαθύτερα εδαφικά στρώματα.

Οι σπουδαιότερες μικροβιολογικές παράμετροι για την ανθρώπινη υγεία είναι (Λέκκας, 1984):

α) Οργανισμοί-δείκτες (κολοβακτηρίδια, στρεπτόκοκκοι)

β) Παθογόνοι μικροοργανισμοί (σαλμονέλα, εντερομύκητες)

Η μεταφορά αυτών επηρεάζεται από την ταχύτητα κίνησης του υπόγειου νερού, τις ιδιότητες και το φορτίο του πορώδους μέσου. Η μεταφορά βακτηρίων στους υδροφορείς γίνεται με ελεύθερη μετακίνηση στα διάκενα, με διακοπτόμενη μετακίνηση κατά την οποία προσκολλώνται, αποκολλώνται και μετακινούνται εναλλάξ και τέλος με χημιοτακτισμό (chemo tactic), κατά τον οποίο τα μικρόβια κινούνται εκλεκτικά από θέσεις με υψηλή συγκέντρωση σε κάποια χημική ουσία σε θέσεις με χαμηλή συγκέντρωση.

### 5.3. Περιορισμός της μόλυνσης

Πολύπλοκοι μηχανισμοί που περιλαμβάνουν διύλιση, προσρόφηση, χημικές μεθόδους, μικροβιολογικές αποσυνθέσεις και διαλύσεις συντελούν στον περιορισμό της μόλυνσης. Το μέγεθος του περιορισμού της μόλυνσης εξαρτάται από το είδος του μολυντή και τις τοπικές υδρογεωλογικές συνθήκες.

1) Διύλιση. Τα επιφανειακά μολυσμένα νερά κατερχόμενα σε βαθύτερα στρώματα διυλίζονται και έτσι ένας μεγάλος αριθμός από ανεπιθύμητα υλικά (διάφορες μορφές σιδήρου, μαγγανίου και στερεά προϊόντα χημικών αντιδράσεων) συγκρατείται από το έδαφος.

2) Προσρόφηση. Είναι ο κυριότερος μηχανισμός του περιορισμού της μόλυνσης του υπόγειου νερού. Η άργιλος, διάφορα μεταλλικά οξειδία και υδροξείδια και οι οργανικές ύλες λειτουργούν σαν υλικά προσροφήσεως. Οι περισσότεροι μολυντές μπορούν να προσροφηθούν κάτω από ευνοϊκές συνθήκες με εξαίρεση τα χλωριούχα και σε μικρότερο βαθμό τα νιτρικά και θειικά άλατα. Η ικανότητα προσροφήσεως εξαρτάται από το τύπο του μολυντή και από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών και του νερού που βρίσκονται διαλυμένες οι μολυντικές ουσίες.

3) Χημικές μέθοδοι. Όταν υπάρχουν κατάλληλα ιόντα που βρίσκονται διαλυμένα στο υπόγειο νερό σε σημαντικές συγκεντρώσεις μπορούν να συμβούν χημικές καθιζήσεις. Οι κυριότερες χημικές αντιδράσεις που έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ιζήματος γίνονται μεταξύ ενώσεων που περιέχουν ασβέστιο, μαγνήσιο, δικορβονικά και θειικά άλατα ή διάφορα ιχνοστοιχεία όπως αρσενικό, βάριο, κάδμιο, χαλκό, κυάνιο, υδράργυρο, μόλυβδο, ράδιο και ψευδάργυρο. Σε ξηρές περιοχές όπου η υγρασία του εδάφους κοντά στην επιφάνεια είναι ελάχιστη, η χημική καθίζηση αποτελεί τον κύριο μηχανισμό προστασίας του υπόγειου νερού. Στην ζώνη πάνω από τη στάθμη του υπόγειου νερού, η οξειδωση των οργανικών ουσιών συντελεί σημαντικά στη προστασία του νερού.

4) Μικροβιολογική αποσύνθεση. Οι περισσότεροι παθογόνοι μικροοργανισμοί του εδάφους δεν αναπτύσσονται στο έδαφος και αυτοκαταστρέφονται. Οι παθογόνοι μικροοργανισμοί συγκρατούνται πάρα πολύ όταν υπάρχουν ενδιαστρώσεις αργίλου και ιλύος, έστω και αν η διαδρομή του υπόγειου νερού είναι πολύ μικρή.

5) Αραιώση. Κατά τη κίνηση των διάφορων μολυντών στα πορώδη μέσα, παρατηρείται μια διασπορά αυτών που έχει ως συνέπεια την ελάττωση της συγκέντρωσής τους. Στην ακόρεστη ζώνη η αραιώση είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι στη κορεσμένη ζώνη του υδροφορέα.

#### **5.4. Υπόγεια κατανομή της μόλυνσεως**

Η κατανομή της μόλυνσεως στο υπόγειο νερό μπορεί να έχει διάφορες μορφές. Παρουσιάζεται είτε με τη μορφή απομονωμένων μαζών που μοιάζουν σαν κηλίδες πάνω σ' ένα χάρτη, είτε με τη μορφή μιας εκτεταμένης και συνεχούς μάζας. Όσο απομακρυνόμαστε από τη πηγή μόλυνσεως, το μέγεθος της μόλυνσης του υπόγειου νερού ελαττώνεται. Η έκταση της μόλυνσης εξαρτάται από το είδος των μολυντών εξαιτίας του διαφορετικού βαθμού αραίωσης των διάφορων μολυντών.

Το σχήμα και το μέγεθος της μολυσμένης μάζας εξαρτάται από τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής, από τις συνθήκες ροής του υπόγειου νερού, από τον τύπο και τη συγκέντρωση των μολυντών, από τη συχνότητα διαθέσεως των αποβλήτων και από τις μεταβολές που επιφέρει ο άνθρωπος στις συνθήκες των υπόγειων νερών (αντλήσεις).

Αν οι ταχύτητα κινήσεως του υπόγειου νερού είναι σχετικά μεγάλη, το σχήμα τις μολυσμένης μάζας είναι επιμήκες. Αντίθετα αν η ταχύτητα είναι μικρή, οι μολυντές τείνουν να εξαπλωθούν ομοιόμορφα γύρω από τη πηγή μόλυνσης. Ακανόνιστες μορφές παρουσιάζονται όταν υπάρχει ανομοιομορφία στην περατότητα ή η περιοχή αντλείται.

Όταν οι μηχανισμοί αραίωσης αντισταθμίζονται από τη συνεχή προσθήκη μολυντών, τότε παρατηρείται σταθερότητα της μόλυνσης. Η μόλυνση του υπόγειου νερού, σε αντίθεση με του επιφανειακού, παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα (δεκαετίες ή ακόμα και αιώνες). Ο εντοπισμός της μολυσμένης μάζας είναι κατά πολύ δυσκολότερος, χρονοβόρος και πιο δαπανηρός απ' ό,τι του επιφανειακού νερού. Ο έλεγχος της μόλυνσης, επιτυγχάνεται αρχικά ελέγχοντας τη πηγή μόλυνσης και στη συνέχεια με φυσική παγίδευση και αν είναι δυνατόν αφαίρεση του μολυσμένου υπεδάφικου νερού.

#### **5.5. Εκτίμηση της δυνατότητας προκλήσεως της μόλυνσης**

Ο LE GRAND (1964) ανέπτυξε μια εμπειρική μέθοδο για την εκτίμηση της δυνατότητας προκλήσεως της μόλυνσης σε περιοχές που διατίθενται απόβλητα. Οι φυσικοί παράγοντες που έλαβε υπόψη του είναι: το βάθος της ελεύθερης επιφάνειας του νερού η ικανότητα προσροφήσεως στην ακόρεστη ζώνη, η περατότητα του υδροφόρου ορίζοντα, η κλίση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού και η οριζόντια απόσταση από τη πηγή της μόλυνσης. Από τον συνδυασμό των τιμών των παραπάνω παραμέτρων

καθόρισε τις εξής δυνατότητες μόλυνσης: επικείμενη, δυνατή ή πιθανή, δυνατή αλλά όχι πιθανή, πολύ απίθανη, αδύνατη.

Παρόλο που η διαδικασία είναι ατελής, μας δίνει ποσοτικές εκτιμήσεις και επιτρέπει σχετικές συγκρίσεις της δυνατότητας μόλυνσης με διάφορες θέσεις διάθεσης απόβλητων.

## **5.6. Ποιοτικός έλεγχος του υπόγειου νερού**

Για την προστασία του υπόγειου νερού από τη μόλυνση, είναι απαραίτητη η σύνταξη ενός προγράμματος ποιοτικού ελέγχου του νερού, που να καθορίζει τους τρόπους επίβλεψης των συνεχών μετρήσεων, παρατηρήσεων και εκτιμήσεων.

Οι μέθοδοι ελέγχου εκτός από τη δειγματοληψία και αναλύσεις της ποιότητας του υπόγειου νερού μπορεί να περιλαμβάνουν: καθορισμό της στάθμης του υπόγειου νερού και των διευθύνσεων ροής, μετρήσεις της υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη, γεωφυσικές διασκοπήσεις, υπολογισμούς των αποβλήτων και άλλων υλικών που συντελούν στην υπόγεια μόλυνση, έλεγχο των σωληνώσεων και δεξαμενών και έλεγχο της μόλυνσης της ατμόσφαιρας.

Μια μεθοδολογία που έχει προταθεί για τον έλεγχο της ποιότητας του υπόγειου νερού, περιλαμβάνει με χρονική σειρά τα εξής (Λέκκας, 1984): 1) Καθορισμό της ελεγχόμενης περιοχής, 2) εντοπισμό των πηγών και αιτιών μόλυνσης, 3) εντοπισμό των μολυντών στις πηγές και αιτίες, 4) καθορισμό της χρησιμότητας του νερού σε σχέση με τη θέση του, τη ποσότητα του και την χρήση του, 5) καθορισμό των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής, 6) εκτίμηση της υπάρχουσας ποιότητας του νερού, 7) εκτίμηση του βαθμού της διείσδυσης των μολυντών από την επιφάνεια του εδάφους, 8) εκτίμηση της ταχύτητας κινήσεως των μολυντών μέχρι τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, 9) εκτίμηση της αραιώσης των μολυντών στη κορεσμένη ζώνη, 10) ταξινόμηση των πηγών και αιτιών της μόλυνσης σχετικά με τη σπουδαιότητα τους ή την επίδραση τους στην ποιότητα του υπόγειου νερού, 11) προσδιορισμός των υφιστάμενων προγραμμάτων και δραστηριοτήτων ελέγχου, 12) καθορισμός μεθόδων, τοποθεσιών και συχνότητας ελέγχου, 13) επιλογή και εφαρμογή του προγράμματος ελέγχου με βάση τη προτεραιότητα, 14) επεξεργασία και ερμηνεία των συλλεγόμενων στοιχείων από το πρόγραμμα ελέγχου, 15) συγκέντρωση και μετάδοση των πληροφοριών του συστήματος ελέγχου αρμόδιες υπηρεσίες.

## **6. ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ**

### **6.1. Εισαγωγή**

Η ρύπανση των υπόγειων νερών, οδηγεί στη μείωση των διαθέσιμων υδατικών πόρων και στην αύξηση του κινδύνου της εξάπλωσης της ρύπανσης στους γειτονικούς υδροφορείς και στα επιφανειακά υδάτινα συστήματα. Η ανάγκη αποκατάστασης και εξυγίανσης των υπόγειων υδροφορέων και του εδάφους σ' αυτές τις περιπτώσεις είναι μεγάλη.

Ο σκοπός της εξυγίανσης (remediation) είναι η επαναφορά της ποιότητας τους εδάφους και των υπόγειων νερών στις συνθήκες πριν τη ρύπανση τους με της απομάκρυνση των ρύπων. Επειδή είναι αδύνατο να απομακρυνθούν όλα τα μόρια του ρύπου, δε μπορεί να επιτευχθεί πλήρης αποκατάσταση.

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για την εξυγίανση και την αποκατάσταση των ρυπασμένων περιοχών των υδροφορέων. Οι πιο γνωστές και εφαρμόσιμες είναι: 1) εγκιβωτισμός του ρυπασμένου εδάφους, 2) απομάκρυνση των ρύπων μαζί με το έδαφος, 3) επεμβάσεις στη περιοχή ρύπανσης και 4) μείωση των κινδύνων με θεσμικούς ελέγχους.

### **6.2. Εγκιβωτισμός**

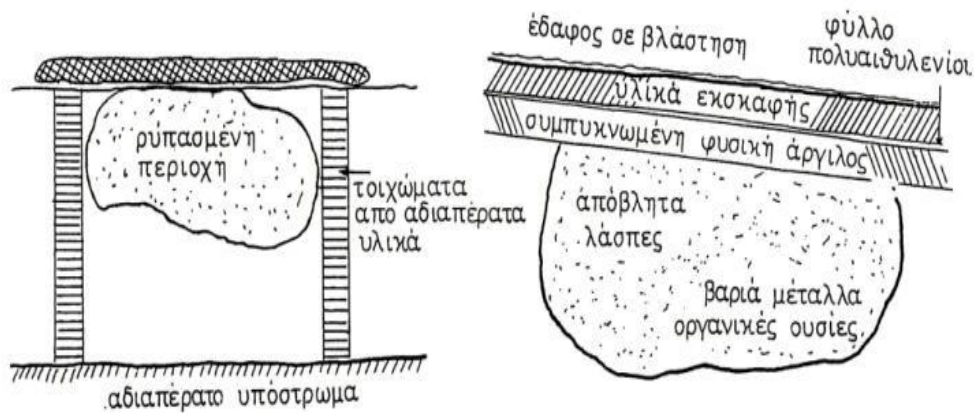
Σκοπός του εγκιβωτισμού (containment) είναι να κρατηθούν οι ρύποι στο έδαφος και να αποφευχθεί η παρά πέρα εξάπλωση τους. Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιούνται φυσικά και υδροδυναμικά φράγματα.

Μια από τις τεχνικές εγκιβωτισμού είναι η δημιουργία γύρω από τη ρυπασμένη περιοχή τοιχωμάτων από υλικό μικρής διαπερατότητας (τοιχώματα λάσπης, τοιχώματα από πηλό), με αποτέλεσμα είτε να απομονωθούν οι ρύποι από τη γύρω περιοχή είτε να προκληθεί διακοπή της ροής δια μέσου της ρυπασμένης περιοχής.

Άλλος τρόπος είναι με τη δημιουργία φράγματος με σιδερένιους πασσάλους. Υπάρχει ο κίνδυνος όμως της διαρροής από τις επαφές μεταξύ των πασσάλων.

Οι γεωμεμβράνες είναι συνθετικά φύλλα που τοποθετούνται σε ανοιγμένες τάφρους και χρησιμοποιούνται για τον ίδιο σκοπό προστασίας από την εξάπλωση των ρύπων.

**Σχήμα 6.1.** Διαγραμματική αναπαράσταση α) πλευρικού εγκιβωτισμού ρύπασμένης περιοχής στο έδαφος και β) κάλυψη της επιφάνειας με αδιαπέρατα υλικά (Αντωνόπουλος, 2001).



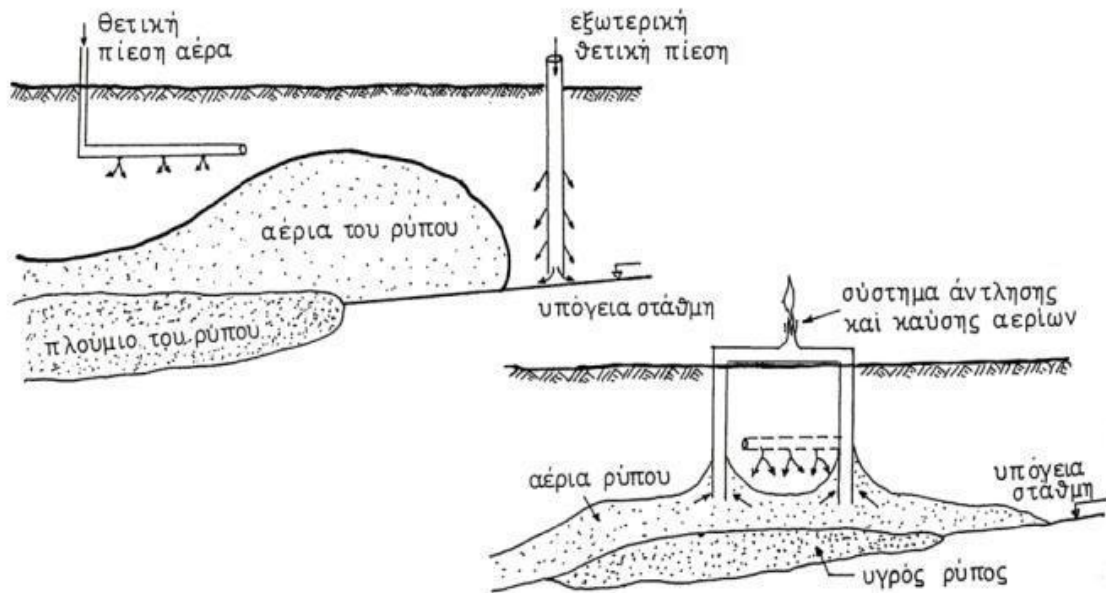
Ο εγκιβωτισμός, εκτός από τις περιπτώσεις που γίνεται μέσα στο έδαφος, μπορεί να γίνει και από την επιφάνεια, καλύπτοντας την έτσι ώστε να αποφεύγεται η διήθηση της βροχής. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι τα αργιλώδη, πηλοαργιλώδη, μίγματα φυσικών εδαφών και σταθεροποιητών από τσιμέντο και ιπτάμενης τέφρας. Επίσης χρησιμοποιούνται μεμβράνες συνθετικές από πολυαιθυλένιο και πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC). Για την απομάκρυνση των βρόχινων νερών κατασκευάζονται επιφανειακοί τάφροι συλλογής και απομάκρυνσης νερού.

Ο υδροδυναμικός έλεγχος της ρύπανσης των υπόγειων νερών έχει σαν σκοπό τη μείωση της υπόγειας στάθμης ώστε να αποφευχθεί η εκφόρτιση του σε ποτάμια και λίμνες, τη μείωση του ρυθμού ρύπανσης με την αραίωση των αποβλήτων και με τον εγκιβωτισμό του πλουμίου σε ένα χαμηλό δυναμικό δημιουργώντας τον κατάλληλο συνδυασμό φρεατίων άντλησης και φόρτισης. Η τεχνική αυτή απαιτεί τη σωστή εγκατάσταση και διαχείριση ώστε να αποφευχθούν προβλήματα από την υπεράντληση από ορισμένα φρεάτια ή τη φόρτιση από άλλα.

Ο έλεγχος των πτητικών μορφών των ρύπων μπορεί να επιτευχθεί με τα συστήματα θετικής και αρνητικής πίεσης. Κατά την έκχυση των υδρογονανθράκων στο έδαφος, το πιο άμεσο πρόβλημα είναι η ταχύτερη εξάπλωση των ατμών. Ακόμα και όταν το υγρό έχει απομακρυνθεί οι ατμοί συνεχίζουν να παραμένουν και να παρατείνουν το πρόβλημα. Η ρύθμιση του προβλήματος των ατμών μπορεί να γίνει με την εισαγωγή αέρα υπό πίεση στο έδαφος και την απομάκρυνση του.



**Σχήμα 6.2.** Διάταξη α) εγκιβωτισμού των ατμών με την εφαρμογή υπό πίεση αέρα στο έδαφος και β) της απομάκρυνσης τους με τον συνδυασμό πίεσης και άντλησης (Αντωνόπουλος, 2001).



### 6.3. Απομάκρυνση του ρύπου

Η απομάκρυνση του ρύπου (contaminant withdrawal) από το έδαφος είναι η πιο ολοκληρωμένη μέθοδος αποκατάστασης της ποιότητας μιας περιοχής. Μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους.

Με άντληση από φρεάτια απομακρύνονται οι ρύποι από το έδαφος. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται με επιτυχία κάτω από πολλές και διαφορετικές συνθήκες. Το πρόβλημα που υπάρχει πάντα είναι το τι θα γίνει το ρυπασμένο νερό που απομακρύνεται από τον υδροφόρα. Απαιτείται κατάλληλη επεξεργασία πριν χρησιμοποιηθεί για επαναπλήρωση ή να διατεθεί σε επιφανειακούς αποδέκτες.

Η χρησιμοποίηση στραγγιστικών αγωγών και τάφρων, σε μικρό βάθος και σε βάθος 1-2 μέτρων από την υπόγεια στάθμη, για τη συλλογή ρύπων στο επίπεδο της υπόγειας στάθμης είναι μια ακόμη μέθοδος απομάκρυνσης των ρύπων. Έτσι απομακρύνονται οι ρύποι που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

Οι πτητικές οργανικές ουσίες απομακρύνονται από την ακόρεστη ζώνη με αερισμό. Τα αέρια του εδάφους μπορούν να απομακρυνθούν με την εφαρμογή ρεύματος αέρα με πίεση σ' ένα φρεάτιο. Απαιτούνται όμως μεγάλοι όγκοι αέρα που θα διέλθουν διαμέσου του ρυπασμένου όγκου του εδάφους. Με την δημιουργία ρευμάτων αέρα προ-

καλείται επίσης αεριοποίηση και βιοαποδόμηση των ρύπων. Τα εξερχόμενα αέρια πρέπει να υποστούν κάποια επεξεργασία πριν ελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα.

Η εκσκαφή και απομάκρυνση του εδάφους με το ρύπο είναι η πιο δραστική μέθοδος. Το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι το κόστος εκσκαφής και η εξεύρεση κατάλληλης θέσης για την απόθεση του ρυπασμένου εδάφους.

#### **6.4. Επεξεργασία του ρύπου στη θέση του**

Μερικές από τις τεχνικές επεξεργασίας ρύπων μπορούν να εφαρμοστούν *in situ* για την απομάκρυνση και μείωση του ρύπου. Τέτοιες τεχνικές είναι η αποδόμηση των οργανικών ουσιών, η οξειδωση και η ακινητοποίηση των ρύπων.

Η βιολογική και χημική αποδόμηση των ρύπων είναι από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους. Η βιολογική αποδόμηση περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση των οργανικών ουσιών ως πηγή ενέργειας των βακτηρίων και την παραγωγή απλών προϊόντων, όπως νερού και CO<sub>2</sub> από τα σύνθετα οργανικά μόρια. Η πιο κοινή τεχνική είναι η υποβοήθηση της ανάπτυξης των γηγενών βακτηρίων με την προσθήκη θρεπτικών στοιχείων, όπως αζώτου και φωσφόρου και οξυγόνου. Για την επιτυχία της βιολογικής αποδόμησης των οργανικών ουσιών πρέπει οι γεωλογικές συνθήκες να δημιουργούν συνθήκες σχετικά μεγάλης υδραυλικής αγωγιμότητας, για να διευκολύνεται η μεταφορά οξυγόνου και θρεπτικών στοιχείων και να υπάρχει σημαντικός αριθμός βακτηρίων από τα είδη που αποδομούν τον ρύπο. Τα πλεονεκτήματα της βιολογικής αποδόμησης είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία υδρογονανθράκων και οργανικών ουσιών ευδιάλυτων στο νερό, είναι περιβαλλοντικά αποδεκτή μέθοδος καθώς δεν παράγονται άλλου είδους παράγωγα απόβλητα και προκαλεί πλήρη αποδόμηση του ρύπου, αξιοποιεί γηγενείς μικροοργανισμούς χωρίς να εισάγονται επικίνδυνοι οργανισμοί. Η επεξεργασία της ποιότητας γίνεται με τη μετακίνηση με το υπόγειο νερό και γενικά είναι επιτυχής για μικρής κλίμακας ρύπανση. Τα μειονεκτήματα της είναι ότι αναστέλλεται από βαριά μέταλλα και τοξικές ουσίες, τα βακτήρια μπορεί να προσκολληθούν στο έδαφος και να μειωθεί η ανακύκλωση, η εισροή θρεπτικών στοιχείων μπορεί να προκαλέσει τα γνωστά προβλήματα εμπλουτισμού των επιφανειακών νερών, τα υπολείμματα μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα γεύσης και οσμής και δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε υδροφορείς με μικρή διαπερατότητα που δεν επιτρέπουν ικανοποιητική ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων.

Με τη χημική αποδόμηση επεξεργάζονται οι ρύποι in situ προσθέτοντας κατάλληλα χημικά μέσα δια μέσου ενός δικτύου φρεατίων. Το μεγάλο πρόβλημα είναι η αβεβαιότητα επιτυχίας σε σχέση με άλλες μεθόδους αποκατάστασης, γιατί αν η διαδικασία της χημικής εξυγίανσης αποτύχει θα πρέπει να καθοριστούν εκτός από τον αρχικό ρύπο και τα χημικά πρόσθετα της αποδόμησης.

### **6.5. Επιλογές διαχείρισης**

Οι επιλογές διαχείρισης είναι δράσεις που γίνονται για να αποφευχθούν τα προβλήματα στη δημόσια υγεία ή έχουν σκοπό τη διακοπή της συνέχισης της ρυπασμένης από τις πηγές. Για τους λόγους αυτούς διακόπτεται ή περιορίζεται η χρήση του υδροφορέα, ώστε να μειωθεί η έκθεση των χρηστών στο ρυπασμένο νερό. Αναπτύσσονται εναλλακτικές πηγές νερού από άλλες περιοχές, απομακρύνονται οι πηγές ρύπανσης, εγκαθίσταται ένα σύστημα συνεχούς καταγραφής και μετρήσεων για τη μείωση, την απομάκρυνση και την διακοπή όλων των παρόμοιων δραστηριοτήτων, γίνεται ενημέρωση των χρηστών για τους κινδύνους από τη χρήση του νερού.

### **6.6. Συστήματα άντλησης των ρύπων από τον υδροφορέα**

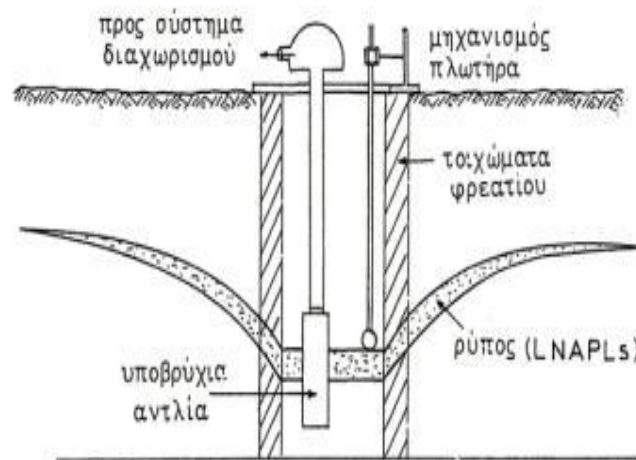
Από τα τρία κυριότερα προβλήματα ρύπανσης, που είναι, η ρύπανση με διαλυτές στο νερό ουσίες, με ελαφρότερα μη αναμιγνυόμενα με το νερό υγρά (LNAPLs) και με βαρύτερα μη αναμιγνυόμενα με το νερό υγρά (DNAPLs), αυτά που αντιμετωπίζονται ευκολότερα με την άντληση από τους υδροφορείς είναι τα πρώτα. Η απομάκρυνση των LNAPLs παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες. Το σύστημα άντλησης πρέπει να δημιουργεί ένα κώνο υποπίεσης στην υπόγεια στάθμη ώστε να προκαλείται ροή προς το φρεάτιο και να δημιουργεί τις συνθήκες κίνησης των ρύπων προς το φρεάτιο. Η λειτουργία των συστημάτων άντλησης απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή για αυτό πρέπει να γίνεται συνεχής καταγραφή του βάθους της υπόγειας στάθμης και να ελέγχεται το βάθος της αντλίας του ρύπου με ένα πλωτήρα.

Η πιο απλή κατασκευή άντλησης LNAPLs αποτελείται από ένα φρεάτιο (Σχήμα 6.3), αλλά μπορεί να αποτελείται και από δύο φρεάτια σε πολύ κοντινή απόσταση (Σχήμα 6.4).

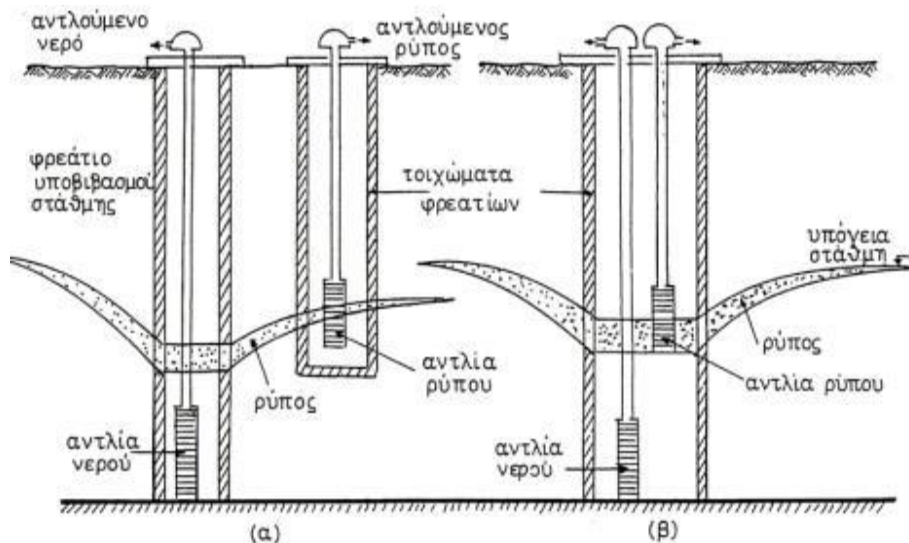
Στη πρώτη περίπτωση, η αντλία τοποθετείται στο φρεάτιο ώστε να αντλείται το νερό και ο ρύπος. Η άντληση δημιουργεί υποβιβασμό της υπόγειας στάθμης και απομακρύνεται ο ρύπος που επιπλέει. Υπάρχει ανάμιξη όμως του ρύπου με το νερό, οπότε πρέπει να υπάρχει στην επιφάνεια ειδική κατασκευή διαχωρισμού τους. Στην δεύτερη

περίπτωση, με την αντλία που βρίσκεται βαθύτερα από την υπόγεια στάθμη, όπου επιπλέον ο οργανικός ρύπος, επιτυγχάνεται υποβιβασμός της υπόγειας στάθμης και δημιουργία του κώνου για τη κίνηση του υγρού ρύπου προς το φρεάτιο. Στο άλλο φρεάτιο με την άλλη αντλία που βρίσκεται στη περιοχή της υπόγειας στάθμης αντλείται ο υγρός ρύπος.

**Σχήμα 6.3.** Διάταξη άντλησης ρύπων στο επίπεδο της υπόγειας στάθμης με ένα φρεάτιο άντλησης (Αντωνόπουλος, 2001).



**Σχήμα 6.4.** Διάταξη άντλησης α) με δύο φρεάτια και δύο αντλίες του επιπλέοντος ρύπου στην υπόγειο στάθμη και β) με ένα φρεάτιο και δύο αντλίες (Αντωνόπουλος, 2001).



## 6.7. Εξυγίανση με βιολογικές μεθόδους

Η εξυγίανση και αποκατάσταση των υπόγειων νερών από τη ρύπανση τους με χημικές ενώσεις, χρησιμοποιώντας βιολογικές μεθόδους (bioremediation), αποτελεί μια βιώσιμη μέθοδο για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Κατά την εξυγίανση με βιολογικές μεθόδους, χρησιμοποιούνται μικροβιολογικές διαδικασίες καθαρισμού του ρυπασμένου εδάφους και των υπόγειων νερών. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι: α) ο μόνιμος περιορισμός των ρύπων με βιοχημικούς μετασχηματισμούς και ανοργανοποίηση, β) αποφεύγεται η επεξεργασία με χημικά και φυσικά μέσα, γ) γίνεται αποκατάσταση in situ και δ) το κόστος δεν είναι απαγορευτικό.

Η βιοαποκατάσταση περιλαμβάνει σύνθετες αλληλεπιδράσεις των βιολογικών, χημικών και φυσικών διεργασιών. Η μελέτη των συστημάτων βιοαποκατάστασης διευκολύνεται με τη διακεκριμενοποίηση των παρατηρήσεων και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε τρεις κλίμακες μεγέθους (Πίνακας 6.1).

**Πίνακας 6.1.** Φαινόμενα που επηρεάζουν τη βιοαποκατάσταση στις τρεις κλίμακες μεγέθους των συστημάτων (Sturman et al., 1995).

<b>Μικροκλίμακα</b>	
Μικροοργανισμοί	Τοξικότητα
Διαδικασίες αποικοδόμησης	Οξύτητα, pH
Στοιχειομετρία αντιδράσεων	Αντιδράσεις με στερεά εδάφους
Κινητικές αντιδράσεων	Χημική ισορροπία
Δέκτες ηλεκτρονίων	Προσρόφηση
Θρεπτικά στοιχεία	
<b>Μεσοκλίμακα</b>	
Προσρόφηση (ασταθής)	
Προσκόλληση-αποκόλληση μικροοργανισμών	
Διάχυση	
Δύλιση	
Μεταφορά στις διεπιφάνειες	
<b>Μακροκλίμακα</b>	
Μετακίνηση	
Διασπορά	
Υδραυλικές ιδιότητες και οριακές συνθήκες	Χωρική ετερογένεια

Μετά τον προσδιορισμό των φαινομένων που κυριαρχούν σ' ένα πρόβλημα, αναζητούνται οι υπάρχουσες μέθοδοι για το χαρακτηρισμό και την ποσοτικοποίηση των φαινομένων και γίνεται η εκτίμηση της δυνατότητας αντιμετώπισης του φαινομένου με βιομετασχηματισμούς. Η βιοαποδόμηση και η επιτυχία της εξαρτάται από τον αριθμό των βακτηρίων και από τις συνθήκες που αναστέλλουν την ανάπτυξη τους.

Η χωρική ετερογένεια στη περιοχή της ρύπανσης μπορεί να προκαλέσει σημαντική επίδραση στη μετακίνηση των ρύπων και την ταχύτητα αποδόμησης. Παράμετροι που παρουσιάζουν χωρική μεταβλητότητα είναι το πορώδες, η αγωγιμότητα, η πυκνότητα μικροοργανισμών και οι χημικές ιδιότητες όπως τα θρεπτικά στοιχεία και οι δέκτες ηλεκτρονίων.

## 7. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

### 7.1. Εισαγωγή

Τα θέματα απορρύπανσης αφορούν την ανάληψη ενεργειών για την περιβαλλοντική αποκατάσταση εδαφών και υδροφορέων που έχουν ήδη ρυπανθεί, ενώ τα θέματα προστασίας αφορούν τη λήψη μέτρων για να αποφευχθεί η περαιτέρω επέκταση της ρύπανσης από περιοχές που έχουν ρυπανθεί προς άλλες περιοχές (π.χ. μέσω της κίνησης του υπόγειου νερού).

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

1. Η διαπίστωση ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι τέτοιος που προκαλεί σημαντικούς κινδύνους στη δημόσια υγεία ή γενικότερα “μη-αποδεκτή υποβάθμιση του περιβάλλοντος”. Τα τελευταία χρόνια, τα μέγιστα όρια της αποδεκτής υποβάθμισης του περιβάλλοντος έχουν μειωθεί σημαντικά (κυρίως λόγω της ευαισθητοποίησης των κοινωνικών φορέων) με συνέπεια τη μεγάλη αύξηση των περιοχών στις οποίες υπάρχει ανάγκη απορρύπανσης ή/και προστασίας.
2. Η ανάγκη βελτίωσης της ποιότητας του περιβάλλοντος σε μια περιοχή, έστω και εάν ο βαθμός ρύπανσης δεν προκαλεί σημαντικά προβλήματα δημόσιας υγείας.
3. Η ανάγκη αύξησης της εμπορικής αξίας των ακινήτων σε μια περιοχή.
4. Η ανάγκη ανάπτυξης μιας περιοχής σε συνδυασμό με την έλλειψη “καθαρών” χώρων για τη δημιουργία βιομηχανιών, οικισμών κλπ. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται και περιπτώσεις όπου διατίθενται μεν “καθαροί” χώροι για ανάπτυξη αλλά το κόστος τους υπερβαίνει το μικτό κόστος ανάπτυξης (αγορά συν απορρύπανση) άλλων χώρων στους οποίους επιβάλλεται απορρύπανση.

Η απλούστερη και λιγότερο δαπανηρή μέθοδος περιβαλλοντικής αποκατάστασης είναι η λεγόμενη “μηδενική λύση”, κατά την οποία δεν λαμβάνονται ειδικά μέτρα απορρύπανσης, αλλά η εξασθένιση του ρυπαντικού φορτίου επαφίεται στους φυσικούς μηχανισμούς υποβάθμισης, όπως η βιολογική αποδόμηση των ρύπων, η προσρόφηση τους στην επιφάνεια των αργιλικών ορυκτών, η μείωση της συγκέντρωσης των ρύπων μέσω αραίωσης ή εξάτμισης κλπ. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στις συνθήκες του περιβάλλοντος (pH, θερμοκρασία, υγρασία, παρουσία ουσιών που είναι τοξικές για τους μικροοργανισμούς κλπ) και συνεπώς η αποτελεσματική λειτουργία τους δεν είναι πάντοτε αξιόπιστη. Επιπλέον, η δράση των μηχανι-

σμών φυσικής εξασθένησης είναι πολύ βραδεία. Για τους λόγους αυτούς, στις περισσότερες περιπτώσεις έντονης ρύπανσης δεν συνιστάται η εφαρμογή της "μηδενικής λύσης".

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

Εκτός από τις ανωτέρω μεθόδους υπάρχουν και οι λεγόμενες μέθοδοι ενεργητικής απορρύπανσης που περιλαμβάνουν μεθόδους απορρύπανσης εδαφών και μεθόδους απορρύπανσης υπογείων υδάτων. Αναλυτικότερα οι μέθοδοι απορρύπανσης των υπόγειων υδάτων παρουσιάζονται παρακάτω.

## **7.2. 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 ανάπτυξη 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 θειικά 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 βιοαπο-



κατάσταση - 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.

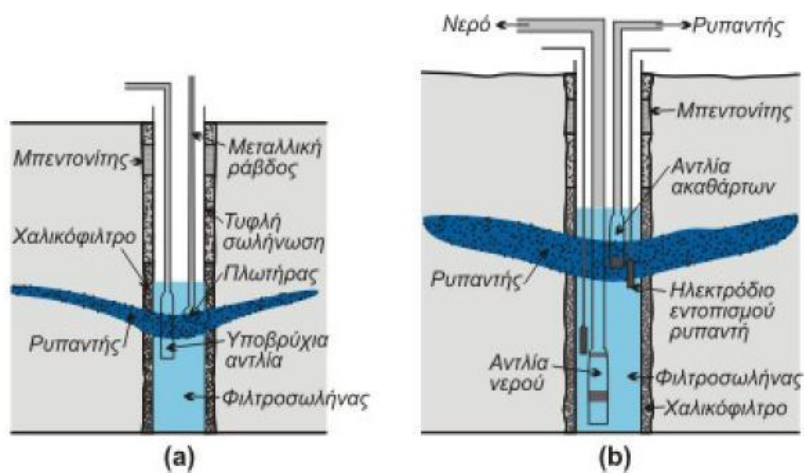
### **7.3. Η μέθοδος άντλησης και απορρύπανσης διαλυμένων ρυπαντών (pump and treat)**

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου στην περίπτωση διαλυμένων ρυπαντών που ανααναμειγνύονται 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 διοχέτευση 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. 7.1). Η πλέον αποτελεσματική διάταξη είναι αυτή στην οποία υπάρχουν δύο γεωτρήσεις άντλησης και μια 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 7.1.** Συστήματα “άντλησης-επεξεργασίας” για την ανάκτηση NAPL: (a) Απλή γεώτρηση, μία αντλία, (b) απλή γεώτρηση, ζεύγος αντλιών (Domenico-Schwartz, 1998).

#### 7.4. Απορρύπανση με άντληση επιπλεόντων ρύπων

Μια από τις πλέον συνήθεις ρυπάνσεις είναι η ρύπανση του εδάφους με ελαφρά πετρελαιοειδή λόγω τυχαίων διαφυγών από δεξαμενές αποθήκευσης σε διυλιστήρια, βιομηχανίες αλλά και κατοικίες. Τα πετρελαιοειδή που διαφεύγουν στο έδαφος συνήθως κατακρατούνται στους πόρους του εδάφους εντός της μερικώς κορεσμένης ζώνης (λόγω τριχοειδών δυνάμεων). Εάν τα πετρελαιοειδή είναι σε μεγάλες ποσότητες υπερβαίνουν τη δυνατότητα συγκράτησης των εδαφικών πόρων, φθάνουν στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα και συγκεντρώνονται στην επιφάνεια του δημιουργώντας μια κηλίδα (plume). Με την πάροδο του χρόνου, η κηλίδα διαχέεται στην οριζόντια διεύθυνση και μπορεί να καταλάβει μεγάλη έκταση φθάνοντας σε μεγάλη απόσταση από το σημείο της διαρροής. Εάν η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα υπόκειται σε εποχιακές διακυμάνσεις, η επιπλέον κηλίδα παρακολουθεί τη διακύμανση της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα και ρυπαίνει τη μερικώς κορεσμένη ζώνη του εδάφους καθ' ύψος σε μεγάλη απόσταση από την πηγή της ρύπανσης. Η διαπίστωση της έκτασης της ρύπανσης από επιπλέοντα πετρελαιοειδή μπορεί να γίνει με ερευνητικές γεωτρήσεις που φθάνουν μέχρι τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της γεώτρησης λαμβάνονται εδαφικά δείγματα από τη μερικώς κορεσμένη ζώνη στα οποία προσδιορίζεται η περιεκτικότητα σε πετρελαιοειδή με χημικές μεθόδους (π.χ. με πύρωση).

Η απορρύπανση των υπόγειων υδροφορέων από επιπλέοντες ρύπους (συνήθως ελαφρά πετρελαιοειδή) γίνεται με το σύστημα της διπλής άντλησης του επιπλέοντος πετρελαιοειδούς (dual pump free product recovery). Η μέθοδος συνίσταται στην άντληση νερού από τον υδροφορέα μέσω γεώτρησης, ώστε να δημιουργηθεί ένας κώνος ταπείνωσης της στάθμης του υδροφορέα. Ο επιπλέον ρύπος παρακολουθεί την επιφάνεια του κώνου ταπείνωσης και λόγω της υδραυλικής κλίσης που δημιουργείται, κινείται προς τη γεώτρηση, απ' όπου αντλείται με μια δεύτερη αντλία (skimmer pump). Λόγω της παρουσίας δυο αντλιών, η απόδοση της μεθόδου εξαρτάται από τη ρύθμιση των παροχών τους (και ιδίως από την παροχή της αντλίας νερού), δηλαδή από την επιτυγχανόμενη ταπείνωση της στάθμης του υδροφορέα. Αυξάνοντας την ταπείνωση της στάθμης του υδροφορέα, τα επιπλέοντα πετρελαιοειδή ρυπαίνουν τον υδροφορέα καθ' ύψος σε όλη την έκταση του κώνου ταπείνωσης και αυξάνεται η ποσότητα του ρύπου που συγκρατείται στους πόρους του υδροφορέα, χωρίς να μπορεί να ανακτηθεί με τη μέθοδο της άντλησης και να απαιτεί τη χρήση άλλων μεθόδων (όπως η εφαρμογή υποπίεσης, η θέρμανση κλπ).

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

### **7.5. Απορρύπανση με εφαρμογή υποπίεσης (vacuum extraction)**

Η εφαρμογή της υποπίεσης δεν μπορεί να γίνει κάτω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα αλλά μόνον εντός της μερικώς κορεσμένης ζώνης με συνέπεια να επηρεάζεται μόνο η επιφάνεια του υδροφορέα. Έτσι, η μέθοδος είναι αποδοτική για την απορρύπανση από επιπλέοντες πτητικούς ρύπους (όπως είναι τα ελαφρά κλάσματα της απόσταξης των πετρελαιοειδών: βενζίνη κλπ). Η εφαρμογή της στις ΗΠΑ κατά την τελευταία δεκαετία δείχνει ότι συχνά η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί σε σχέση με τη μέθοδο της διπλής άντλησης των επιπλεόντων ρύπων ως προς το κόστος, τον απαιτούμενο χρόνο και ότι ταυτοχρόνως γίνεται ανάκτηση τόσο των επιπλεόντων υδρογονανθράκων όσο και των υδρογονανθράκων που συγκρατούνται στους πόρους του εδάφους (εντός της μερικώς κορεσμένης ζώνης). Το κυριότερο μειονέκτημα της μεθόδου

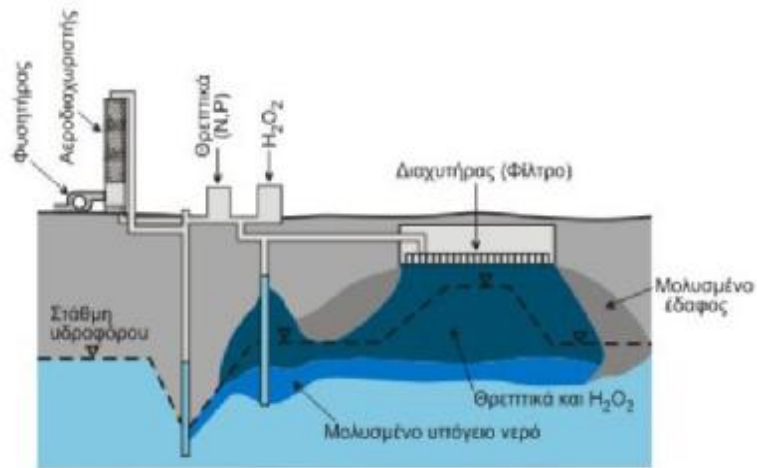
εφαρμογής υποπίεσης είναι η ανάγκη απομόνωσης της μερικώς κορεσμένης ζώνης του εδάφους από τον ατμοσφαιρικό αέρα, ώστε να είναι αποδοτική η εφαρμογή της υποπίεσης. Αυτό συνήθως γίνεται με προσωρινή κάλυψη της επιφάνειας του εδάφους με συνθετική μεμβράνη, αν και συχνά οι χώροι είναι ήδη καλυμμένοι επιφανειακά με ασφαλτοτάπητα ή κτίρια, οπότε η απαίτηση αυτή δεν ισχύει.

#### **7.6. Απορρύπανση υδροφορέων από βαρέα μέταλλα**

Η απορρύπανση υδροφορέων από βαρέα μέταλλα (υδράργυρος, μόλυβδος κλπ) συνήθως γίνεται μέσω των μεθόδων φυσικής εξασθένισης, με την προσρόφηση των ιόντων των βαρέων μετάλλων στην επιφάνεια των αργιλικών ορυκτών και την ακινητοποίηση τους. Η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική και κυρίως δεν έχει κόστος. Μια άλλη μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η απορρύπανση με εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος (electro-reclamation). Κατά τη μέθοδο αυτή, στον υδροφορέα εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού μέσω ηλεκτροδίων και τα βαρέα μέταλλα συλλέγονται στην άνοδο.

#### **7.7. 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 φουσητήρα (Σχ. 7.2). Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του αερίου στην ατμόσφαιρα είναι: στήλες με πληρωτικό υλικό, αερισμός με διαχυτήρες αέρα, ακροφύσια ψεκασμού και δίσκοι αερισμού. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μεταφορά της ρύπανσης στην ατμόσφαιρα. Οι πύργοι με πληρωτικό υλικό είναι οι καταλληλότεροι για την απομάκρυνση των πτητικών ενώσεων από το νερό. Σε μερικές περιπτώσεις (ύπαρξη δεξαμενών, μειωμένη απαίτηση απόδοσης) είναι οικονομικά συμφέρουσα η διάχυση αέρα ή η χρήση ακροφυσίων ψεκασμού.



**Σχήμα 7.2.** Μέθοδος βιοαποκατάστασης με αεροδιαχωρισμό (Καλλέργης, 2000).

### 7.8. 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.

**Πίνακας 7.1.** Κυριότερες μέθοδοι και τεχνικές απορρύπανσης των υδροφόρων και του εδάφους (Καλλέργης, 2000).

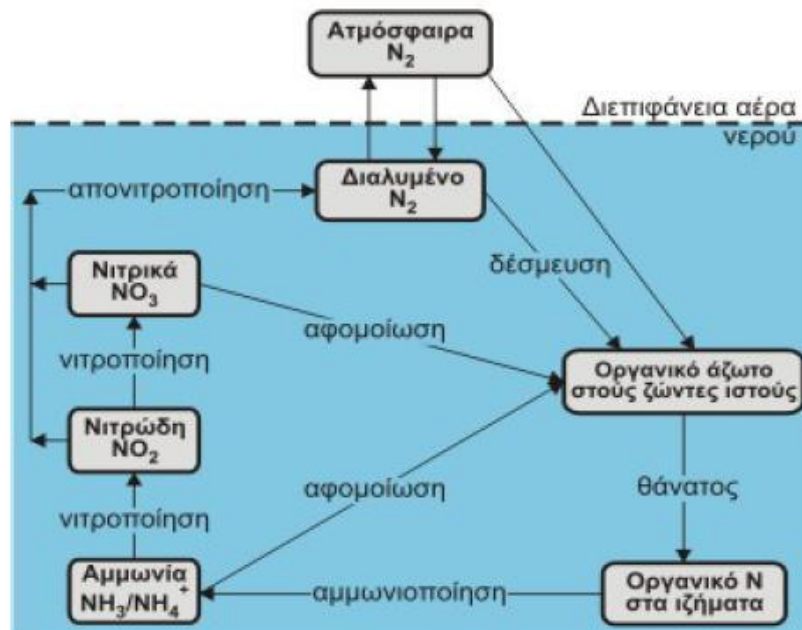
α/α	Τεχνική	Στόχος-Περιγραφή
1	Έλεγχος της πηγής ρύπανσης με μείωση του όγκου του ρυπαντή και φυσική χημική εξουδετέρωσή του.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ελαχιστοποίηση ή πρόληψη της ρύπανσης των υδροφόρων.</li> <li>- Μείωση του όγκου του ρυπαντή ή εξουδετέρωση του φυσικού ή χημικού του 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 στραγγιδιών-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 κατείσδυσης, μέσω αποχέτευσης, επένδυσης-στεγανοποίησης ή/και εξουδετέρωση του ρυπαντή με προσρόφιση.
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), τιμεντενέσεις, 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, προσρόφιση από ενεργό άνθρακα. Για την αφαίρεση των μετάλλων και των ανόργανων ρυπαντών χρησιμοποιείται η χημική καθίζηση.

## 7.9. Απονίτρωση των υπόγειων νερών

Η αμμωνία, τα νιτρικά, τα νιτρώδη, τα οργανικά σύμπλοκα του αζώτου και το αέριο άζωτο είναι οι πιο σημαντικές μορφές του αζώτου στο υδάτινο περιβάλλον.

Τα νιτρικά η πιο οξειδωμένη μορφή του αζώτου και στα υδατικά διαλύματα είναι χημικά ανενεργά. Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών, εκφρασμένες σε άζωτο (NO<sub>3</sub>-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 νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης, είναι μια σημαντική αιτία ποιοτικής υποβάθμισης των υπόγειων νερών. 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 7.3.** Ο κύκλος του αζώτου στο νερό (Αντωνόπουλος, 2001).

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, σύμφωνα με την ΚΥΑ 19562/1906/99 (ΦΕΚ 1575B/5-8-1999), όπως το Αργολικό πεδίο, η λεκάνη Κωπαΐδας, η λεκάνη του Πηνειού Ηλείας και η πε-



διάδα Θεσσαλίας συντάσσονται σχέδια δράσης, ώστε να μειωθεί η ρύπανση των νερών. Ο χρόνος απορρύπανσης εξαρτάται από την αρχική συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων, το πάχος και το πορώδες του υδροφόρου ορίζοντα και την κατείδυση.

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 7.4.** 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 αποσυνθετικές 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.

#### **7.10. Προστασία από την επέκταση της ρύπανσης**

Για τον περιορισμό της επέκτασης της ρύπανσης χρησιμοποιούνται:

##### **- Μέθοδοι εγκιβωτισμού (διαφράγματα).**

Τα διαφράγματα κατασκευάζονται από υλικά στεγανοποίησης (μπετονίτη, τσιμέντο), από σιδερένιους πασσάλους ή από γεωμεμβράνες. 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. Συστήματα κάλυψης της επιφάνειας περιοχών που έχουν ρυπανθεί με σκοπό τον εγκιβωτισμό των ρύπων, ώστε αφενός μεν να μη διασπείρονται στο περιβάλλον με τη μορφή σκόνης, αφετέρου δε να περιορίζεται η κατείσδυση των επιφανειακών υδάτων (γεγονός που μπορεί να καταλήξει στη ρύπανση των υπόγειων υδροφορέων της περιοχής). Κατακόρυφα περιμετρικά διαφράγματα, με σκοπό τον περιορισμό της επέκτασης της ρύπανσης μέσω της κυκλοφορίας του υπόγειου νερού στην οριζόντια διεύθυνση. Οριζόντια διαφράγματα βάσης, με σκοπό τον περιορισμό της επέκτασης της ρύπανσης μέσω της κίνησης των ρύπων στην κατακόρυφη διεύθυνση.

##### **- Υδραυλικές μέθοδοι αναστροφής της κίνησης του υπόγειου νερού.**

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

##### **- 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).

## 8. ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

### 8.1. Χαρακτηριστικά ποιότητας νερού

Τα γενικώς αποδεκτά ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού είναι τα ακόλουθα:

- **Ανόργανα συστατικά.** Τα επικρατέστερα είναι το ασβέστιο, το μαγνήσιο, το νάτριο, το κάλιο, τα όξινα ανθρακικά, τα θειικά, τα χλωριούχα, τα νιτρικά και τα πυριτικά. Επίσης η αμμωνία, τα νιτρώδη, τα φωσφορικά, ο σίδηρος, το μαγγάνιο το φθόριο και ιχνοστοιχεία σε μικρότερες συγκεντρώσεις. Τα ελληνικά νερά χαρακτηρίζονται από το όξινο ανθρακικό ασβέστιο (ηπειρωτικής προέλευσης φυσικά νερά) ή το χλωριούχο νάτριο (σε παραθαλάσσιες περιοχές). Για την εκτίμηση της ποιότητας του νερού, γίνονται μετρήσεις των ανόργανων συστατικών, της περιεκτικότητας σε πολυσθενή κατιόντα (σκληρότητα), τα διαλυμένα στερεά (TDS), η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η ενεργότητα ιόντων υδρογόνου (pH) και η καταλληλότητα για άρδευση (SAR).

- **Αιωρούμενα στερεά.** Είναι τα στερεά που περιέχονται στο νερό σε μεγαλύτερο μέγεθος των μορίων, μη ορατών δια γυμνού οφθαλμού. Προέρχονται από την αποσάθρωση των πετρωμάτων και από βιολογικές διεργασίες. Τα κυριότερα είδη βιολογικής προέλευσης είναι τα άλγη, τα βακτήρια και άλλοι ανώτεροι οργανισμοί. Μπορεί να έχουν φυσική και ανθρωπογενή προέλευση επίσης. Εξαιτίας του μικρού μεγέθους τους, έχουν μεγάλη ειδική επιφάνεια που λειτουργεί ως μέσο προσρόφησης – συγκράτησης τοξικών συστατικών και προκαλεί ισχυρή διάχυση φωτός αλλοιώνοντας τη διαύγεια του νερού. Οι μέθοδοι που μετρούνται τα αιωρούμενα στερεά είναι η θολότητα και η μέτρηση κατανομής μεγέθους των σωματιδίων.

- **Οργανικά συστατικά.** Προέρχονται από τη φυσική αποδόμηση υλικών φυτικής ή ζωικής προέλευσης, από βιομηχανική, αστική ή αγροτική ρύπανση. Οι γενικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό των οργανικών ενώσεων είναι η μέτρηση του χρώματος, η απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας, ο φθορισμός, ο ολικός οργανικός άνθρακας (TOC) και τα ολικά οργανικά αλογόνα (TOX). Υπάρχουν και εξιδεικευμένες τεχνικές που επιτρέπουν τον ποσοτικό προσδιορισμό του κάθε οργανικού ρυπαντή ξεχωριστά, οι οποίες περιλαμβάνουν παραλαβή σε οργανικούς διαλύτες των οργανικών ενώσεων του νερού με εκχύλιση – συμπύκνωση και τη ταυτοποίηση τους με αέρια χρωματογραφία (GC), φασματοσκοπία μάζας (MS), υγρή χρωματογραφία υψηλής πίεσης (HPLC) και με συνδυασμό των τεχνικών αυτών (π.χ. GC – MS).

- **Ραδιοϊσότοπα.** Είναι ραδιενεργά άτομα, τα οποία διασπώνται ελευθερώνοντας ενέργεια (ραδιενέργεια). Μπορεί να έχουν φυσική και ανθρώπινη προέλευση. Η φυσική

ραδιενέργεια οφείλεται στα ραδιενεργά στοιχεία που υπάρχουν στη γη ή δημιουργούνται από το βομβαρδισμό με κοσμική ακτινοβολία. Τα ανθρωπογενής προέλευσης ραδιενεργά ισότοπα προέρχονται από πυρηνικά όπλα, από ραδιενεργά φάρμακα και από τη παραγωγή και χρήση ραδιενεργών καυσίμων. Μπορεί να προκαλέσει υπεραναπτύξεις και τερατογενέσεις, γενετικές μεταλλάξεις και σωματικές επιδράσεις συμπεριλαμβανόμενου του καρκίνου.

- **Αισθητικά χαρακτηριστικά.** Περιλαμβάνουν την οσμή και τη γεύση. Το νερό πρέπει να είναι άχρουν, διαυγές και χωρίς γεύση. Σχετίζονται με τη προέλευση του νερού, τη μέθοδο επεξεργασίας του νερού και το δίκτυο διανομής. Πιθανότερες αιτίες δημιουργίας και γεύσης στα επιφανειακά νερά είναι η αποδόμηση φυτικών υλικών και τα προϊόντα μεταβολισμού των μικροοργανισμών. Η οσμή οφείλεται στην αναερόβια διάσπαση των οργανικών ενώσεων που υπάρχουν στο νερό.

- **Φυσικοχημικοί παράμετροι.** Η θερμοκρασία πρέπει να είναι 12 °C με μέγιστη επιτρεπόμενη τους 25 °C. Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας έχει αποτέλεσμα τη μείωση του διαλυμένου οξυγόνου με επιπτώσεις στη γεύση του νερού. Το pH πρέπει να κυμαίνεται από 6,5 – 8,5. Η αγωγιμότητα στους 20 °C πρέπει να είναι 2500 Ohm/cm και αποτελεί ένδειξη της ποσότητας των διαλυμένων αλάτων. Άλλες παράμετροι είναι το υπολειμματικό χλώριο, το διαλυμένο οξυγόνο, η περιεκτικότητα σε  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{=}$ .

- **Τοξικές παράμετροι.** Η παρουσία τοξικών ουσιών δεν επιτρέπεται στο νερό. Έχουν καθοριστεί ανώτατα επιτρεπόμενα όρια.

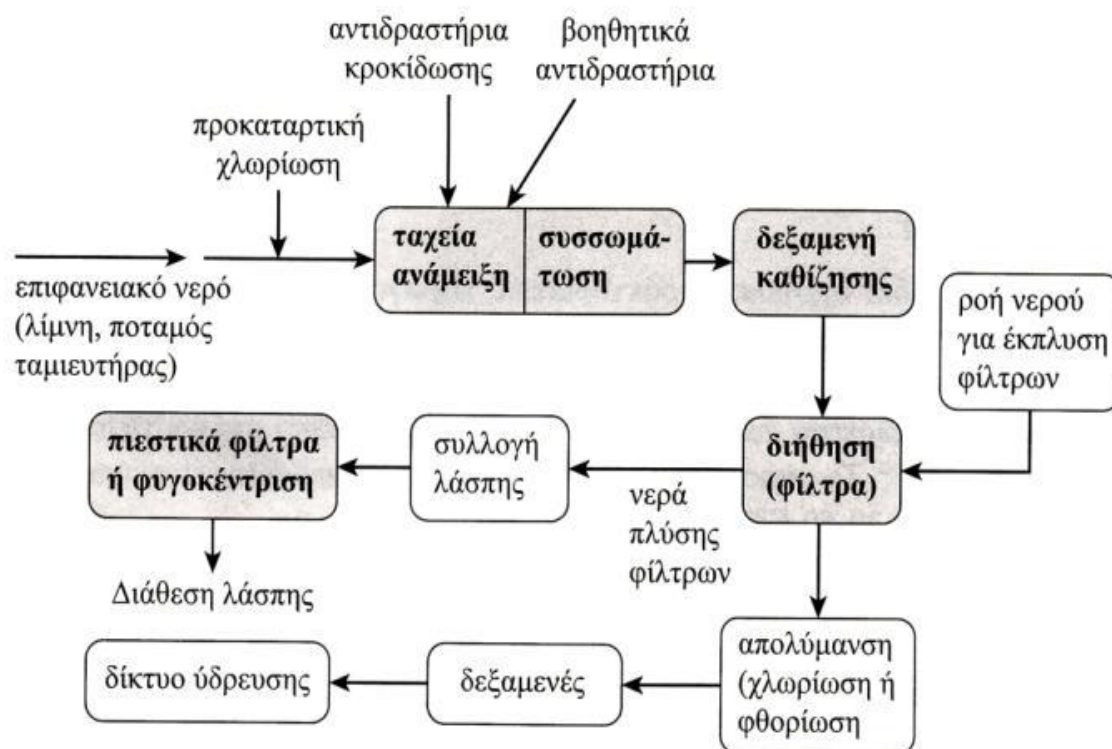
- **Μικροβιολογικές παράμετροι.** Προσδιορισμός των κολοβακτηριδίων/ml με τυποποιημένη μέθοδο.

- **Σκληρότητα.** Δεν αποτελεί χαρακτηριστικό παράγοντα ποιότητας νερού παρόλ' αυτά επιδημιολογικές μελέτες έχουν δείξει ότι τα νερά υψηλής ποιότητας έχουν θετικές επιπτώσεις στην υγεία. Για να είναι κατάλληλο ένα νερό πρέπει να παρουσιάζει ολική σκληρότητα μεγαλύτερη από 15 °F. Τα αποδεκτά επίπεδα είναι από 30 – 50 °F.

- **Παράμετροι που αφορούν ανεπιθύμητες ουσίες.** Οι ενώσεις του αζώτου αποτελούν τον δείκτη του επιπέδου ρύπανσης του νερού με οργανικές αζωτούχες ενώσεις. Η αναγωγικότητα του νερού εξαρτάται από τη παρουσία οργανικών ενώσεων και ορίζεται ως ο αριθμός των mg του  $\text{KMnO}_4$  απαιτείται για την οξειδωση των οργανικών ουσιών που περιέχονται σε ένα 1 λίτρο νερό.

Το πόσιμο νερό μπορεί να προέρχεται είτε από υπόγεια είτε από επιφανειακά νερά. Στα υπόγεια νερά δεν γίνεται ιδιαίτερη επεξεργασία. Διοχετεύονται στις δεξαμενές ό-

που γίνεται απολύμανση πριν από τη τροφοδοσία του δικτύου ύδρευσης με συνεχής χημική και μικροβιολογική παρακολούθηση. Αντίθετα τα επιφανειακά νερά είναι εκτεθειμένα στο περιβάλλον με αποτέλεσμα η ποιότητα τους να είναι υποβαθμισμένη. Συνεπώς κρίνεται απαραίτητη η επεξεργασία τους. Στο σχήμα 8.1 δίνεται το διάγραμμα ροής μιας τυπικής μονάδας επεξεργασίας νερού η οποία είναι σχεδιασμένη για την θολότητα του χρώματος και της οσμής του νερού καθώς και την απολύμανση για την πρόληψη πιθανών μολύνσεων από τη παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών (Σαββάκης, 2002).



**Σχήμα 8.1.** Διάγραμμα ροής μονάδας επεξεργασίας νερού (Σαββάκης, 2002).

## 8.2. Μικροβιολογικός έλεγχος του νερού

Τα νερά είναι φορείς μικροοργανισμών (μικρόβια και βακτήρια), οι οποίοι διασπούν την οργανική ύλη. Τα μικρόβια αυτά (σαπρόφυτα), δεν προκαλούν παθήσεις. Υπάρχουν όμως και μικρόβια (παθογόνοι μικροοργανισμοί) που ζουν σε βάρος των ζώων και των φυτών, στα οποία προκαλούν παθήσεις. Με το μολυσμένο νερό μεταδίδονται όλα τα λοιμώδη νοσήματα (τύφος, χολέρα, πολυομυελίτιδα, ηπατίτιδα, αμοιβαδική δυσεντερία κ.ά.).

Ο συνεχής μικροβιολογικός έλεγχος του νερού είναι απαραίτητος, ώστε να εντοπίζονται όσο το δυνατόν γρηγορότερα οι μικροοργανισμοί και να αποφεύγεται η προσβολή μεγάλου αριθμού ατόμων. Ως δείκτης μικροβιακής μόλυνσης χρησιμοποιείται το κολοβακτηρίδιο (coliform bacteria), το οποίο ζει στο παχύ έντερο των ανθρώπων και αποβάλλεται με τα κόπρανα. Η ανίχνευση και ο προσδιορισμός των παθογόνων μικροβίων στα νερά απαιτεί μεγάλες ποσότητες δείγματος και πολύπλοκες χρονοβόρες τεχνικές.

Ο μικροβιολογικός έλεγχος αναφέρεται στον προσδιορισμό του αριθμού των κολοβακτηριδίων σε 100ml δείγματος νερού. Γίνεται με δύο μεθόδους (Κουϊμτζής, 1998):

1) Μέθοδος των πολλαπλών σωληναρίων, η οποία στηρίζεται στην επώαση του δείγματος του νερού στους 37 °C με θρεπτικό υλικό (γαλακτόζη). Αν μετά την επώαση το δείγμα θολώσει, υπάρχει ένδειξη παρουσίας κολοβακτηριδίων και το δείγμα επωάζεται για άλλες 24 ώρες σε υπόστρωμα πηκτής αγάρ. Στη συνέχεια γίνεται καταμέτρηση των στελεχών με μικροσκόπιο.

2) Μέθοδος διήθησης μέσω μεμβρανών. Είναι γρήγορη, ωστόσο απαιτεί ειδικό εξοπλισμό.

Στον πίνακα 8.1 δίνονται στοιχεία για το μικροβιολογικό χαρακτηρισμό των νερών με βάση τον αριθμό των κολοβακτηριδίων που περιέχουν.

**Πίνακας 8.1.** Μικροβιολογικός χαρακτηρισμός των νερών (Κουϊμτζής, 1998).

Κολοβακτηρίδια/100 ml	Χαρακτηρισμός
0-1	Πόσιμο νερό
10-100	Μη ρυπασμένα επιφανειακά νερά
500-1000	Νερά ύποπτα μόλυνσης
1000-5000	Νερά μέτρια μολυσμένα
10.000-100.000	Νερά έντονα μολυσμένα
> 100.000	Αυτούσια λύματα

### 8.3. Σχεδιασμός εγκαταστάσεων επεξεργασίας νερού

Ο κύριος στόχος των εγκαταστάσεων επεξεργασίας νερού είναι η παραγωγή ενός προϊόντος, το οποίο θα ικανοποιεί τις προδιαγραφές ποιότητας με λογικό κόστος για τον χρήστη. Πολλές φορές για λόγους δημόσιας υγείας καθίσταται απαραίτητη η επεξεργασία του νερού. Τα ανεπιθύμητα συστατικά απομακρύνονται ή καθίστανται α-

βλαβή με κατάλληλες χημικές ή φυσικές διεργασίες (Πίνακας 8.2) (Μήτρακας, 2001). 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.

**Πίνακας 8.2.** Διεργασίες που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία νερού (Μήτρακας, 2001).

Διεργασία	Μέσο διαχωρισμού	Παράδειγμα επεξεργασίας
Θρόμβωση-καθίζηση/ επίπλευση	Βαρύτητα	Απομάκρυνση μικροοργανισμών (άλγη, βακτήρια), αργίλων, χουμικών οξέων, προϊόντων ιζηματοποίησης.
Ιζηματοποίηση	Χημικά αντιδραστήρια, οξειδωση και pH	Απομάκρυνση Ca, Fe, Mn, As, Zn, Cu, Cd, Ni, Pb, Hg, Ag, Cr, Se, Si, Mg, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , F <sup>-</sup> .
Διήθηση	Κοκκώδη υλικά σε κλίνη	Απομάκρυνση αργίλων, μικροοργανισμών, προϊόντων ιζηματοποίησης.
Απολύμανση	Οξειδωτικά - UV	Καταστροφή μικροοργανισμών.
Ιοντοεναλλαγή	Στερεές ρητίνες	Αποσκλήρυνση και απιονισμός του νερού, απομάκρυνση νιτρικών.
Αντίστροφη όσμωση	Ημπερατές μεμβράνες και πίεση	Απομάκρυνση διαλυτών αλάτων του νερού και οργανικών μικρορυπαντών.
Προσρόφηση	Στερεά προσροφητικά (π.χ. ενεργός άνθρακας)	Απομάκρυνση οργανικών ενώσεων και ιχνοστοιχείων.
Διαχωρισμός πτητικών	Αέρας	Απομάκρυνση αερίων ανοργάνων (H <sub>2</sub> S, CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> ) και οργανικών (CHCl <sub>3</sub> κ.α).
Απορρόφηση	Νερό	Προσθήκη CO <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> στο νερό.
Φυγοκέντρωση	Φυγόκεντρος δύναμη	Αφυδάτωση λάσπης
Διήθηση υπό σχηματισμό πλακούντα	Υφασμάτινες ή μεταλλικές μεμβράνες και κενό ή πίεση	Αφυδάτωση λάσπης

#### 8.4. Κροκίδωση (coagulation) – Συσσωμάτωση (flocculation)

Η κροκίδωση και η συσσωμάτωση είναι από τις πιο σημαντικές διεργασίες επεξεργασίας του νερού και απαιτούν το συνδυασμό φυσικών και χημικών φαινομένων για την παραγωγή κατάλληλου νερού για χρήση. Είναι τεχνικές επεξεργασίας του νερού για την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών μικρού μεγέθους ή κολλοειδών υλών. Σκοπός τους είναι η συνένωση μικρών σωματιδίων σε μεγαλύτερα τα οποία στη συ-

νέχεια απομακρύνονται από το νερό με καθίζηση ή επίπλευση ή διήθηση. Έχουν χαμηλό κόστος επεξεργασίας.

Η αποτελεσματική απομάκρυνση των κολλοειδών και διεσπαρμένων σωματιδίων από το νερό εξαρτάται από τη μείωση της σταθερότητας τους. Μηχανισμοί αποσταθεροποίησης οι οποίοι οδηγούν στην σωματιδιακή αποσταθεροποίηση ή κροκίδωση τους, είναι η συμπίεση της ηλεκτρικής διπολοστοιβάδας, η ηλεκτροστατική έλξη, ο σχηματισμός εσωτερικών μοριακών γεφυρών και η παγίδευση σωματιδίων ή σάρωση θρόμβων.

Η κροκίδωση και η συσσωμάτωση συμβαίνουν ταυτόχρονα και αλληλοκαλύπτονται για αυτό υπάρχει μια ασάφεια στη χρήση του κατάλληλου κάθε φορά φαινομένου. Κατά La Mer (1964) η κροκίδωση αναφέρεται όταν συμβαίνει μείωση των απωστικών δυνάμεων των ομώνυμα φορτισμένων κολλοειδών σωματιδίων και η συσσωμάτωση, όταν σχηματίζονται ορατοί θρόμβοι από τη σύνδεση των κολλοειδών σωματιδίων. Κατά Hahn (1966) συσσωμάτωση εννοείται ο σχηματισμός ορατών θρόμβων αφού αρθεί η σταθερότητα του κολλοειδούς και αρχίσουν οι συγκρούσεις των σωματιδίων.

Θρόμβωση (κροκίδωση και συσσωμάτωση) σωματιδίων είναι μια διαδικασία δυο διαδοχικών σταδίων. Στο αρχικό στάδιο μειώνεται η επίδραση των εσωτερικών δυνάμεων που είναι υπεύθυνες για τη σταθερότητα των σωματιδίων με τη προσθήκη χημικών ουσιών (κροκιδωτικά). Στην συνέχεια, συμβαίνουν συγκρούσεις σωματιδίων λόγω μοριακής κίνησης ή μηχανικής ανάμιξης.

Η συσσωμάτωση μπορεί να είναι αποτέλεσμα δυο βασικών μηχανισμών: Της ηλεκτροκινητικής συσσωμάτωσης, στην οποία τα ιόντα αντίθετου φορτίου που προστίθενται στο νερό προκαλούν μείωση του νερού οπότε οι ελκτικές δυνάμεις προκαλούν τη συσσωμάτωση και το σχηματισμό συσσωματωμάτων τα οποία καθιζάνουν και της σροθοκινητικής συσσωμάτωσης, στην οποία τα κολλοειδή σωματίδια προσροφούνται στην επιφάνεια των ηλεκτρολυτών ή δημιουργούνται γεφυρώσεις μεταξύ τους με αποτέλεσμα το σχηματισμό μεγάλων συσσωματωμάτων τα οποία καθιζάνουν.

Η συσσωμάτωση επηρεάζεται από: το pH του νερού, το χρόνο επαφής κροκιδωτικού-σωματιδίων, τη θερμοκρασία και το είδος του κροκιδωτικού.

Τα αντιδραστήρια κροκίδωσης που χρησιμοποιούνται είναι το θειικό αργίλιο και ο θειικός σίδηρος. Επίσης χρησιμοποιούνται και βοηθητικά αντιδραστήρια όπως μακρομόρια οξειδίου του πυριτίου και πολυηλεκτρολύτες.

Η επιλογή του κατάλληλου κροκιδωτικού και της δοσολογίας εξαρτάται από τη χημική συμπεριφορά των αιωρούμενων σωματιδίων και από το κόστος.



Για τη συσσωμάτωση χρησιμοποιούνται δυο ειδών συστήματα επεξεργασίας: τα συμβατικά συστήματα και τα μικτά συστήματα.

### **8.5. Ιζηματοποίηση**

Είναι η διεργασία αδιαλυτοποίησης κάποιων συστατικών του νερού, των οποίων συνήθως επιδιώκεται η απομάκρυνση επειδή είναι ανεπιθύμητα. Επιτυγχάνεται είτε με τη προσθήκη κατάλληλων αντιδραστηρίων, είτε με τη μεταβολή της τιμής του pH ή του αριθμού οξειδωσης των στοιχείων. Κατά την ιζηματοποίηση λαμβάνει χώρα μια φυσική (πυρηνογένεση και ανάπτυξη κρυστάλλων) και μια χημική διεργασία (χημική ισορροπία ετερογενών συστημάτων από δυσδιάλυτους ηλεκτρολύτες). Η ιζηματοποίηση συνδυάζεται είτε με διήθηση είτε με κροκίδωση – συσσωμάτωση.

Η ιζηματοποίηση χρησιμοποιείται στην ελάττωση της σκληρότητας του νερού, την απομάκρυνση των όξινων ανθρακικών, την ελάττωση των πυριτικών, την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων και την απομάκρυνση φθοριούχων, φωσφορικών και θειούχων ιόντων.

### **8.6. Καθίζηση - επίπλευση**

Είναι δύο φυσικοχημικές μέθοδοι διαχωρισμού των αιωρούμενων σωματιδίων από το νερό, οι οποίες στηρίζονται στη βαρύτητα. Τα σωματίδια μιας διασποράς με μεγαλύτερη πυκνότητα από αυτή του νερού τείνουν να καθιζήσουν εξαιτίας των δυνάμεων της βαρύτητας, ενώ τα σωματίδια με μικρότερη πυκνότητα (συνήθως λόγω προσκολλησεως σ' αυτά φυσαλίδων αέρα) τείνουν να επιπλεύσουν.

Η καθίζηση είναι ευρύτερα χρησιμοποιούμενη, απλή διεργασία με χαμηλό κόστος και μικρή κατανάλωση ενέργειας. Καθίζηση (sedimentation), είναι η κατακάθιση διακεκριμένων σωματιδίων ή θρόμβων των οποίων η αιώρηση οφείλεται σε υδροδυναμικές δυνάμεις. Υπάρχουν τέσσερα είδη κατακάθισης αιωρούμενων σωματιδίων μιας διασποράς: 1) κατακάθιση διακεκριμένων σωματιδίων σε αιώρημα μικρής συγκέντρωσης (καθίζηση άμμου), 2) καθίζηση θρόμβων (καθίζηση αραιής διασποράς μετά από θρόμβωση με χημικές ενώσεις), 3) καθίζηση ζώνης ή παρεμποδιζόμενη καθίζηση που παρατηρείται σε υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων, 4) διεργασία πύκνωσης των χαμηλών στρωμάτων της προηγούμενης κατηγορίας. Ο σχεδιασμός των δεξαμενών καθίζησης παρουσιάζει πολλές περιπλοκές. Τα είδη δεξαμενών καθίζησης είναι παραλληλόγραμμη ή κυκλική διατομής δεξαμενές, δεξαμενές με κεκλιμένα επίπεδα ή αγωγούς, επαφής λάσπης και επαφής λάσπης με κεκλιμένα επίπεδα.

Η επίπλευση χρησιμοποιείται για το καθαρισμό του νερού από αιωρούμενα στερεά, κολλοειδή ή γαλακτώματα με πυκνότητα μικρότερη ή ίση με 1g/ml. Χρησιμοποιείται με επιτυχία στον διαχωρισμό αλγών και στην απομάκρυνση του χρώματος του νερού. Στηρίζεται στην ύπαρξη ή στην τεχνητή δημιουργία διαφοράς πυκνότητας ανάμεσα στο νερό και την προς διαχωρισμό φάση. Μπορεί να είναι «αυθόρμητη» όταν η πυκνότητα των προς απομάκρυνση σωματιδίων ή σταγονιδίων είναι μικρότερη από αυτή του νερού (στατικοί ελαιοδιαχωριστές), ή «τεχνητή» όταν έχουμε προσθήκη φυσαλίδων αέρα και σχηματίζεται συνάθροισμα σωματιδίου-φυσαλίδων με μέση πυκνότητα μικρότερη από αυτή του νερού.

Διακρίνονται τρία είδη επίπλευσης: Η ηλεκτρολυτική επίπλευση (Electrolytic Flotation), η επίπλευση με διασκορπισμένο αέρα (Dispersed Air Flotation) και η επίπλευση με διαλυμένο αέρα (Dissolved Air Flotation).

### **8.7. Διήθηση**

Κατά τη διεργασία αυτή το νερό διέρχεται μέσα από ένα μέσο διήθησης και τα σωματίδια που περιέχει απομακρύνονται είτε με συσσώρευση στην επιφάνεια του διηθητικού μέσου, είτε με συγκράτηση στη μάζα του. Η χρήση της σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους επεξεργασίας του νερού όπως είναι η θρόμβωση, η ιζηματοποίηση και η καθίζηση οδηγεί στην απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων όλων των ειδών και μεγεθών και αποτελεί το τελικό στάδιο της συνολικής διεργασίας καθαρισμού του νερού, πριν την απολύμανση. Υπάρχουν πολλών ειδών διήθησης όπως η διήθηση επιφάνειας ή πλακούντα (cake filtration), η διήθηση χώρου, η διήθηση σε κλίνες με κοκκώδες διηθητικό μέσο (άμμος, ανθρακίτης), η διήθηση σε φίλτρα με προεπίστρωση (λεπτό στρώμα διηθητικού μέσου όπως η γη διατομών), η διήθηση με βαρύτητα (ανοιχτά φίλτρα), η διήθηση υπό πίεση (κλειστά φίλτρα). Τέλος σε κλίνες με κοκκώδες διηθητικό μέσο διακρίνουμε τη ταχεία και την αργή διήθηση.

### **8.8. Απομάκρυνση οργανικών ενώσεων από το νερό με προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα**

Προσρόφηση είναι η συσσώρευση ύλης στη διεπιφάνεια μεταξύ της υγρής φάσης του επεξεργαζόμενου νερού και της στερεάς φάσης του προσροφητή. Με χρήση ενεργοποιημένου άνθρακα ως προσροφητή, χρησιμοποιείται κατά τη παραγωγή πόσιμου νερού για την απομάκρυνση υλών που προκαλούν οσμή και γεύση καθώς και την απομάκρυνση μικροοργανισμών από το νερό και τα λύματα που έχουν υποστεί

βιολογική επεξεργασία. Μπορεί επίσης να πετύχει απομάκρυνση μερικών τοξικών ανόργανων υλών.

Ο ενεργός άνθρακας παρασκευάζεται από τη θέρμανση ξύλου ή κάρβουνου σε χαμηλή θερμοκρασία και έλλειψη οξυγόνου και στη συνέχεια έκθεση του σε οξειδωτική φλόγα υψηλής θερμοκρασίας για σύντομο χρονικό διάστημα. 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 σύσταση του.

Μειονέκτημα των φίλτρων ενεργού άνθρακα είναι η απόφραξη 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 επαναχρησιμοποίηση του αφού πρώτα αναγεννηθεί. Η αναγέννηση του ενεργού άνθρακα γίνεται θερμικά σε υψηλές θερμοκρασίες.

### **8.9. Απολύμανση**

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 ( $Cl_2$ ), 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 κλπ). 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 οξειδωση 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).

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.

Το διοξείδιο του χλωρίου ( $\text{ClO}_2$ ) απολυμαίνει αποτελεσματικά το νερό και είναι ασφαλέστερο για την ανθρώπινη υγεία, αλλά το κόστος είναι 3-4 φορές υψηλότερο (Κατσογιάννης & Κουϊμτζής, 2005).

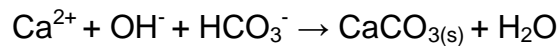
Τελευταία ως απολυμαντικό μέσο χρησιμοποιείται και το όζον ( $\text{O}_3$ ), το οποίο είναι ισχυρό οξειδωτικό και εκτός από τα βακτήρια και τους ιούς αποσυνθέτει τις χλωριωμένες και φαινολικές ενώσεις που βρίσκονται στο νερό και επιπλέον διασπά τα απορρυπαντικά. Το όζον χρησιμοποιείται κυρίως στην παραγωγή εμφιαλωμένων νερών, γιατί «εξωραΐζει» το νερό, απαλλάσσοντας το από ανεπιθύμητες οσμές και γεύσεις.

### **8.10. Αποσκλήρυνση**

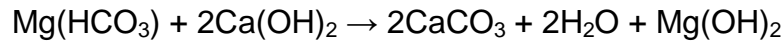
Η αποσκλήρυνση (softening) του νερού αποσκοπεί κυρίως στην απομάκρυνση των ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου και συνεπώς στην ελάττωση της σκληρότητας του νερού και γίνεται:

- Με χημικές διαδικασίες (προσθήκη  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{NaOH}$  ή  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 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.

### 8.11. Αντίστροφη όσμωση και ηλεκτροδιάλυση

Είναι δύο διεργασίες διαχωρισμού με τη βοήθεια μεμβρανών των διαλυτών συστατικών του νερού.

Η εφαρμογή της αντίστροφης ώσμωσης γίνεται κυρίως στην αφάλατωση υφάλμυρου ή θαλασσινού νερού για οικιακή χρήση, την επεξεργασία νερού για τροφοδοσία λεβητών, την επεξεργασία αποβλήτων για ανακύκλωση νερού, τη παραγωγή νερού υψηλής καθαρότητας για τις βιομηχανίες φαρμάκων και ηλεκτρονικών, την ανάκτηση πολύτιμων συστατικών από το συμπύκνωμα απόρριψης κ.ά. 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 ηλεκτροδιάλυση είναι μια ηλεκτροχημική μέθοδος διαχωρισμού με τη βοήθεια μεμβρανών ηλεκτροδιάλυσης των διαλυτών συστατικών του νερού υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Κατά την ηλεκτροδιάλυση τα ιόντα μεταφέρονται διαμέσου μεμβρανών από μικρότερης σε μεγαλύτερης συγκέντρωσης διαλύματα με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος. Το νερό ρέει επαπτόμενο στις μεμβράνες ενώ η κίνηση των ιόντων είναι κάθετη σ' αυτές.

Μερικά ιόντα φτάνοντας στην επιφάνεια της μεμβράνης δεσμεύουν τις φορτισμένες θέσεις ιοντοεναλλαγής προκαλώντας ρύπανση στις μεμβράνες με συνέπεια τη καταστροφή της αγωγιμότητας της και τη δημιουργία ενός σταθερού στρώματος φορτίου που εμποδίζει την διέλευση των ιόντων.

Η ηλεκτροδιάλυση χρησιμοποιείται για την αφαλάτωση υφάλμυρων νερών και τη προσυγκέντρωση του θαλασσινού νερού για τη παραγωγή αλατιού, την ανάκτηση γαλακτικού οξέος από απόβλητα γαλακτοκομικών βιομηχανιών, την απομάκρυνση οξέων από τους χυμούς φρούτων, την απομάκρυνση του τρυγικού οξέος από το κρασί, την επεξεργασία των αποβλήτων των γαλβανιστηρίων και την επεξεργασία των αποβλήτων των χημικών βιομηχανιών.

### **8.12. Ιοντοεναλλαγή**

Είναι μια φυσικοχημική διεργασία κατά την οποία επιτυγχάνεται μεταφορά ιόντων από ένα αδιάλυτο στερεό σε μια υγρή φάση ή αντίστροφα.

Η διαδικασία της ιοντοανταλλαγής χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση από το νερό ανόργανων φορτισμένων ιόντων και αλάτων  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{Mg}^{2+}$  (αποσκλήρυνση), όλων των διαλυμένων ιόντων με τη συνδυασμένη χρήση κατιονικών και ανιονικών ρητινών (απιονισμός), των ανθρακικών και όξινων ανθρακικών ιόντων (απαλκαλίωση) καθώς και την απομάκρυνση νιτρικών, την ανάκτηση μετάλλων από τα απόβλητα επιμετάλλωσης, την ανάκτηση αργύρου από τα απόβλητα της κινηματογραφικής βιομηχανίας, την ανάκτηση νικοτίνης από τα απόβλητα ξηραντηρίων καπνού, την ανάκτηση  $\text{Cr}^{6+}$  από τα απόβλητα επιμετάλλωσης και την απομάκρυνση  $\text{NH}_4^+$  από τα απόβλητα μονάδων αμμωνίας. 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.

### **8.13. Επικαθίσεις**

Επικαθίσεις (fouling) είναι η συσσώρευση ανεπιθύμητων υλικών σε κάθε επιφάνεια που βρίσκεται σε επαφή με κάποιο ρευστό. Συναντώνται σε κάθε βιομηχανική, οικιακή ή φυσιολογική διεργασία όπου υπάρχει ροή ρευστών (π.χ. λεβητόληθος, αρτηριοσκλήρωση, επικαθίσεις στις μεμβράνες αφαλάτωσης, στη παραγωγή πετρελαίου και

στις βιομηχανίες τροφίμων). Οι επικαθήσεις που σχηματίζονται σε διεπιφάνειες υγρού/στερεού ταξινομούνται σε: επικαθήσεις κρυστάλλωσης, σωματιδιακές επικαθήσεις, επικαθήσεις χημικής αντίδρασης, επικαθήσεις διάβρωσης και βιολογικές επικαθήσεις.

Εξαιτίας της συνθετότητας του προβλήματος της δημιουργίας επικαθήσεων, έχουν επινοηθεί ορισμένοι δείκτες οι οποίοι μπορούν να δείξουν σχετικά εύκολα τη τάση ενός νερού να σχηματίσει επικαθήσεις ή να προκαλέσει διάβρωση. Οι δείκτες αυτοί είναι ο δείκτης κορεσμού Langelier και ο δείκτης σταθερότητας του Ryznar, οι οποίοι αναφέρονται στο σχηματισμό επικαθήσεων  $\text{CaCO}_3$  και χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία νερού, μαζί με άλλες προτεινόμενες παραμέτρους για τον ίδιο σκοπό, όπως η στιγμιαία περίσσεια και ο δείκτης ωθούσας δύναμης.

Για την αντιμετώπιση των επικαθήσεων καθώς και για την επιλογή μεθόδου ελέγχου και πρόληψης του σχηματισμού τους ακολουθούμε τα εξής στάδια: 1) χαρακτηρισμός των επικαθήσεων και εύρεση των παραγόντων και μηχανισμών που επηρεάζουν την διεργασία συσσώρευσης υλικού, 2) επιλογή πιθανών μεθόδων ελέγχου και 3) συστηματική αξιολόγηση των μεθόδων. Τυπικές μέθοδοι ελέγχου όλων των βασικών σταδίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.3.

**Πίνακα 8.3.** Μέθοδοι ελέγχου των επικαθήσεων σε σχέση με την επίδραση στη βασική διεργασία που επηρεάζει τον σχηματισμό τους (Μήτρακας, 2001).

Ε Π Ι Κ Α Θ Η Σ Ε Ι Σ					
ΒΑΣΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	ΣΩΜΑΤΙ-ΔΙΑΚΕΣ	ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗΣ	ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ	ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ
<b>Μεταφορά</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Διήθηση/συσσωμάτωση</li> <li>•Διαχωριστές</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Αποσκλήρυνση νερού</li> <li>•Ιοντοεναλλαγή</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Αφαίρεση οξυγόνου</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Διήθηση/συσσωμάτωση</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Διήθηση</li> <li>•Απομάκρυνση O<sub>2</sub> και αέρα</li> </ul>
<b>Απορρόφηση (διεπιφάνεια)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Διασπαρτικά</li> <li>•Υλικό σωλήνα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Διασπαρτικά</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Επικάλυψη</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Βιοδιασπαρτικά</li> <li>•Βιοκτόνα</li> <li>•Επικάλυψη</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Διασπαρτικά</li> </ul>
<b>Αντίδραση</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Έλεγχος pH</li> <li>•Αναστολείς ανάπτυξης κρυστάλλων</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Αναστολείς ανάπτυξης κρυστάλλων</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Επικάλυψη</li> <li>•Ηλεκτρολυτική προστασία</li> <li>•Αναστολείς διάβρωσης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Κράμα σωλήνα</li> <li>•Βιοκτόνα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Αντιπυλμερικά</li> <li>•Αντιδιαβρωτικά</li> </ul>
<b>Απομάκρυνση</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Φυσική/χημική αφαίρεση</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Χηλικές Ενώσεις</li> <li>•Οξύ</li> <li>•Χημική αφαίρεση</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Χηλικές Ενώσεις</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Οξειδωτικά βιοκτόνα</li> <li>•Φυσική αφαίρεση</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Μηχανική αφαίρεση</li> </ul>

#### 8.14. Διάβρωση

Είναι κάθε αυθόρμητη αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων χημικής, ηλεκτροχημικής ή μηχανικής φύσης η οποία οδηγεί σε απώλεια υλικού. Υπάρχουν οκτώ τύποι διάβρωσης οι οποίοι δεν είναι αυτόνομοι και σχετίζονται μεταξύ τους (Fontana, 1986): η γενική ή ομοιόμορφη διάβρωση, η γαλβανική ή διμεταλλική διάβρωση, η διάβρωση ρωγμών, η διάβρωση με βελονισμούς, η διακρυσταλλική διάβρωση, η επιλεκτική απομάκρυνση, η μηχανική διάβρωση και η διαβρωτική θραύση. Η ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου αν και δεν αποτελεί είδος διάβρωσης, συχνά απαντά ως αποτέλεσμα διαβρωτικής προσβολής. Οι ιδιότητες του νερού που επηρεάζουν τον ρυθμό διάβρωσης είναι το pH, η ενεργότητα ηλεκτρονίων και ρε, το διαλυμένο οξυγόνο, η θερμοκρασία, η ταχύτητα ροής του νερού, το χλώριο, τα διαλυτά άλατα, η παρουσία μικροοργανισμών και οι επικαθήσεις.

Είναι σχεδόν απίθανο να επιτευχθεί η απόλυτη προστασία από τη διάβρωση ενός υλικού κατά την επαφή του με το νερό, εκτός αν χρησιμοποιηθούν υλικά όπως ο λευκόχρυσος και το γυαλί, κάτι που δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμο και δεν συμφέρει οικονομικά. Οι γενικοί μέθοδοι ελέγχου της διάβρωσης είναι: 1) η επιλογή του κατάλ-



ληλου κράματος ή μετάλλου για τις συγκεκριμένες διαβρωτικές συνθήκες, 2) η τροποποίηση του διαβρωτικού περιβάλλοντος (μείωση θερμοκρασίας, ταχύτητας, μεταβολή της συγκέντρωσης μιας ή περισσότερων διαβρωτικών ενώσεων, απομάκρυνση του διαλυμένου οξυγόνου ή των οξειδωτικών ουσιών, χρήση αναστολέων διάβρωσης), 3) η βελτιωμένη σχεδίαση του μηχανολογικού εξοπλισμού που εκτίθεται στο διαβρωτικό περιβάλλον, 4) καθοδική και ανοδική προστασία και 5) επικάλυψη με προστατευτικά στρώματα (μεταλλικές, οργανικές, ανόργανες επικαλύψεις).

### **8.15. Διύλιση του νερού**

Για την διύλιση του νερού εφαρμόζεται η τεχνική της διήθησης κλίνης. Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται η απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων και η εξαφάνιση της θολότητας του νερού. Είναι η πιο σημαντική μέθοδος επεξεργασίας του πόσιμου νερού. Τα συστήματα διήθησης του νερού ονομάζονται ταχυδιυλιστήρια. Άλλοι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι το πλύσιμο με μείγμα αέρα – νερού και τα διυλιστήρια βραδείας διύλισης.

### **8.16. Απομάκρυνση σιδήρου και μαγγανίου**

Αν και η παρουσία των δύο αυτών στοιχείων στο πόσιμο νερό δεν εγκυμονούν κινδύνους υγείας, πρέπει να απομακρύνονται για λόγους αισθητικής (γεύση, χρωματισμούς) και για προβλήματα που μπορεί να προκαλέσουν σε ορισμένες βιομηχανικές ή οικιακές διεργασίες (Πίνακας 8.4). Πολλά υπόγεια νερά περιέχουν σίδηρο και μαγγάνιο σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από το όριο ποσιμότητας. Οι κυριότερες συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας είναι (O'Connor, 1971, Mouchet, 1992): 1) οξείδωση και απομάκρυνση, 2) διήθηση σε ειδικό διηθητικό υλικό που δρα ως ανταλλάκτης ιόντων ή ηλεκτρονίων, 3) σταθεροποίηση των ιόντων σιδήρου και μαγγανίου με συμπλοκοποίηση, 4) χρήση MgO και γης διατομών ως διηθητικού μέσου, 5) οξυγόνωση του υδροφορέα (Μέθοδος Vyredox) και 6) βιολογική απομάκρυνση.

**Πίνακας 8.4.** Μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις σιδήρου και μαγγανίου στο νερό για διάφορες εφαρμογές (Μήτρακας, 2001).

Χρήση	Μέγιστη συγκέντρωση (mg/L)		
	Fe	Mn	Fe + Mn
Κλιματισμός	-	0,5	0,5
Ζυθοποιία	0,1	0,1	0,1
Κονσερβοποιία	-	0,2	0,2
Ανθρακούχα ποτά	0,1-0,2	0,2	0,1-0,2
Νερό ψύξης	0,5	0,2-0,5	0,2-0,5
Βαφεία	-	0	0
Επιμετάλλωση	ύψη	-	-
Επεξεργασία τροφίμων	0,2	0,2	0,2
Παραγωγή πάγου	-	0,2	0,2
Πλύσιμο	0,2-0,1	-	-
Βιομηχανία γάλακτος	-	0,03-0,1	-
Εμφάνιση φωτογραφιών	0,1	0,0	0,0
Βιομηχανία επεξεργασίας χαρτου	0,1	0,05	0,1
Βιομηχανία ζάχαρης	0,1-0,1	-	-
Νήματα (γενικά)	0,1-0,1	0,1-0,25	0,1-0,25
Νήματα (βαφή)	-	0,25	0,25
Βιομηχανία πλαστικών	-	0,02	0,02

### 8.17. Απομάκρυνση $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ και $\text{HCL}_3^-$

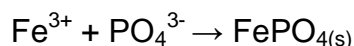
Η ελάττωση της σκληρότητας και των όξινων ανθρακικών του νερού για περιορισμένες απαιτήσεις επιτυγχάνεται συνήθως με ιοντοεναλλακτικές ρητίνες ή αντίστροφη όσμωση. Για μεγάλες παροχές η απομάκρυνση των ιόντων γίνεται με χημική ιζηματοποίηση. Το  $\text{Mg}^{2+}$  απομακρύνεται με τη μορφή  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , ενώ το  $\text{Ca}^{2+}$  και τα  $\text{HCL}_3^-$  με τη μορφή  $\text{CaCO}_3$ .

### 8.18. Απομάκρυνση $\text{SO}_4^{2-}$

Τα θειικά βρίσκονται συνήθως στα βιομηχανικά απόβλητα. Η ιζηματοποίηση τους με  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ώστε να σχηματιστεί  $\text{CaSO}_4$ , θεωρείται αποτελεσματική με τη προϋπόθεση της υψηλής συγκέντρωσης θειικών. Για μείωση της συγκέντρωσης τους σε τιμές μικρότερες των 500 mg/l θεωρείται ιδανική η καταβύθιση σαν σύμπλοκο  $\text{Ca}/\text{Al}/\text{SO}_4/\text{OH}$ . Τα θειικά απομακρύνονται επίσης ως  $\text{BaSO}_4$  με τη προσθήκη  $\text{BaCl}_2$ . Επίσης μπορούν να απομακρυνθούν με ιοντοεναλλαγή.

### 8.19. Απομάκρυνση PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>

Τα φωσφορικά συναντώνται σε μεγάλες συγκεντρώσεις στα αστικά λύματα. Συνήθως απομακρύνονται με ιζηματοποίηση σε μορφή αλάτων του σιδήρου ή αργίλου, όπως φαίνεται από την αντίδραση (Μήτρακας, 2001):



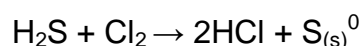
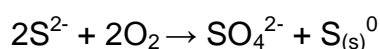
### 8.20. Απομάκρυνση F<sup>-</sup>

Τα ιόντα φθορίου μπορούν να ιζηματοποιηθούν με Ca(OH)<sub>2</sub> σε τιμή pH=10 (Μήτρακας, 2001):  $\text{Ca}^{2+} + 2\text{F}^- \rightarrow \text{CaF}_{2(s)}$

Αυτή η αντίδραση είναι κατάλληλη μόνο για την επεξεργασία αποβλήτων. Για τη μείωση της συγκέντρωσης του σε μικρότερες από 1,5 mg/l που απαιτούν οι προδιαγραφές του πόσιμου νερού, χρησιμοποιείται διεργασία προσρόφησης του σε υδροξείδιο του μαγνησίου κατά τη χημική ιζηματοποίηση του ή ενεργοποιημένη αλουμίνα.

### 8.21. Απομάκρυνση S<sup>2-</sup>

Τα θειούχα προσδίδουν μια δυσάρεστη γεύση και οσμή στο νερό. Συνήθως απομακρύνονται με αερισμό ή οξειδωση με χλώριο κατά τις αντιδράσεις (Μήτρακας, 2001):



Το παραγόμενο στοιχειακό θείο βρίσκεται σε κολλοειδή μορφή και προσδίδει στο νερό μια γαλακτώδη γαλάζια θολότητα. Παράλληλα με τις παραπάνω αντιδράσεις, σχηματίζονται και πολυσουλφίδια τα οποία δημιουργούν προβλήματα οσμής και γεύσης στο νερό και δεν συγκρατούνται από το στάδιο της διήθησης για τη συγκράτηση του στοιχειακού θείου.

Άλλος τρόπος απομάκρυνσης τους είναι με μερική οξειδωση τους. Τέλος και η καταβύθιση τους με προσθήκη Fe<sup>3+</sup> στη μορφή Fe<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, φαίνεται ικανοποιητική.

### 8.22. Απομάκρυνση πυριτίου

Η συγκέντρωση του πυριτίου ελαττώνεται κατά τη διεργασία της χημικής ιζηματοποίησης του ασβεστίου και του μαγνησίου, ιδιαίτερα όταν γίνεται εν θερμώ. Με διεργασίες προσρόφησης – καθίζησης η συγκέντρωση του πυριτίου ελαττώνεται μέχρι το 1mg/l.

### 8.23. Απομάκρυνση βαρέων μετάλλων

Τα μέταλλα ιζηματοποιούνται συνήθως ως υδροξειδία με τη ρύθμιση του pH στην ελάχιστη τιμή διαλυτότητας τους. Η ταυτόχρονη καταβύθιση δύο μετάλλων με διαφορετική τιμή pH, δημιουργεί πρόβλημα. Ο πιθανός σχηματισμός συμπλόκων αυξάνει τη συγκέντρωση και εμποδίζει τον διαχωρισμό του ιζήματος. Πολλές φορές το σχηματιζόμενο ίζημα βρίσκεται σε πολύ λεπτή, κολλοειδή διασπορά που δυσχεραίνει το διαχωρισμό του. Η ιζηματοποίηση των μετάλλων συνδυάζεται συνήθως με θρόμβωση του σχηματιζόμενου ιζήματος με  $\text{Fe}^{3+}$  για pH 6-9 και με  $\text{Al}^{3+}$  για pH 6-7. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εναπομένουσες μικρότερες συγκεντρώσεις μετάλλων εξαιτίας προσρόφησης στους θρόμβους.

Η μέθοδος SULFEX παρέχει τη δυνατότητα καταβύθισης των μετάλλων σε μορφή θειούχων αλάτων με αποτέλεσμα πολύ μικρότερες συγκεντρώσεις μετάλλων σε διάλυση. Η μέθοδος αυτή παρακάμπτει τα προβλήματα δυσσομίας και τοξικότητας από υπολειμματικό  $\text{S}^{2-}$  από τη χρήση  $\text{H}_2\text{S}$  ή  $\text{Na}_2\text{S}$ , με τη χρήση Fees.

### 8.24. Απομάκρυνση φυσικών οργανικών ενώσεων με ιζηματοποίηση

Τα νερά περιέχουν συχνά φυσικές οργανικές ενώσεις (χουμικές), οι οποίες σε μεγάλες συγκεντρώσεις προσδίδουν καφέ-κίτρινο χρώμα, και άργιλους που δημιουργούν θολότητα. Οι ουσίες αυτές απομακρύνονται αποτελεσματικά στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού που περιλαμβάνουν ελάττωση της σκληρότητας με  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  και στις εγκαταστάσεις θρόμβωσης με  $\text{Al}^{3+}$ .

### 8.25. Καθαρισμός του νερού με μεμβράνες

Διαλυμένα στερεά μπορούν να απομακρυνθούν από το νερό και τα λύματα με χρήση ημιπερατών μεμβρανών που έχουν πολύ μικρό μέγεθος πόρων και κατασκευάζονται συνήθως από αρωματικές πολυαμίδες.

Η διήθηση ή διέλευση διαμέσου μεμβρανών περιλαμβάνει διάφορες διεργασίες όπως η συμβατική διήθηση, η μικροδιήθηση (διαχωρισμός αιωρούμενων σωματιδίων με μέγεθος μικρότερο των 10 $\mu\text{m}$ ), η υπερδιήθηση (διαχωρισμός κολλοειδών σωματιδίων και μορίων με μοριακό βάρος μεγαλύτερο ή ίσο από 10<sup>3</sup>), η αντίστροφη όσμωση (διαχωρισμός διαλύτη από ένα διάλυμα ημιπερατής μεμβράνης με εφαρμογή μηχανικής πίεσης) και η ηλεκτροδιαπίδωση (διαχωρισμός ιόντων από ένα υδατικό διάλυμα).

## 9. ΔΙΑΘΕΣΗ - ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

### 9.1. Διάθεση λυμάτων σε ποταμούς

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι μεσογειακές πόλεις αποχετεύουν τα λύματα τους σε κάποιο υδατόρευμα. Τα δημοτικά λύματα περιέχουν ολικό άζωτο και φώσφορο σε συγκεντρώσεις 50 και 10mg/l αντίστοιχα. Οι επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις στα υδατορεύματα εξαρτώνται από τη χρήση τους. Η οδηγία της ΕΟΚ για την εξασφάλιση της διαβίωσης των ιχθύων συνιστά και επιβάλλει μέγιστες συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου 0,031 και 0,78mg/l αντιστοίχως για τη περίπτωση σαλμονίδων και 0,16 και 0,78mg/l για τη περίπτωση κυπρινίδων. Για τα φωσφορικά συνιστά να μην υπερβάλλονται οι συγκεντρώσεις 0,065 και 0,131mg/l για σαλμονίδες και κυπρινίδες αντίστοιχα (Χρίστουλας, 1991). Άρα απαιτούνται πολύ μεγάλες αραιώσεις για να ταπεινωθούν οι συγκεντρώσεις N και P των λυμάτων στα επιτρεπόμενα επίπεδα. Οι χαμηλές παροχές των ελληνικών ποταμών δεν μπορούν να επιτύχουν συχνά τις αραιώσεις και συνεπώς θα πρέπει να εφαρμόζεται η διαδικασία της νιτροποίησης ακολουθόμενη από απονιτροποίηση. Συχνά θεωρείται αναγκαία και η απομάκρυνση φωσφόρου.

Στα ελληνικά υδατορεύματα πραγματοποιούνται υδροληψίες για αρδεύσεις που απαιτεί απολύμανση των λυμάτων με υιοθετούμενη τη διαδικασία της χλωρίωσης. Το υπολειμματικό χλώριο είναι τοξικό για τα ψάρια, άρα επιβάλλεται αποχλωρίωση.

Όταν η αραιώση των λυμάτων είναι μικρή, το BOD του μείγματος μπορεί να ταπεινώσει το διαλυμένο οξυγόνο σε χαμηλότερα επίπεδα από τα επιτρεπόμενα. Εδώ θα απαιτείται βιολογική επεξεργασία των λυμάτων για απομάκρυνση BOD.

Η αποξυγόνωση υδατορεύματος εξαιτίας εισαγόμενου ανθρακούχου BOD ή αζωτούχου BOD μελετάται από την εξίσωση (Steeter και Phelps, 1925):

$$D = \frac{K_1 F_0}{K_2 - K_1} [e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}] + D_0 e^{-K_2 t}$$

όπου: D= έλλειμμα οξυγόνου σε χρόνο t, D<sub>0</sub>= αρχικό έλλειμμα οξυγόνου (t=0), K= ταθερά αποξυγόνωσης, F<sub>0</sub>= συγκέντρωση ολικού BOD στον χρόνο εισαγωγής, με τις εξής παραδοχές: πραγματοποιείται πλήρης μίξη λυμάτων-νερών και δεν πραγματοποιείται διασπορά κατά μήκος του άξονα του ποταμού.

## 9.2. Επεξεργασία δημοτικών και βιομηχανικών λυμάτων

Τα δημοτικά λύματα περιέχουν μεγάλες συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών, οργανικής ύλης, αζώτου και φωσφόρου και κολοβακτηριδίων. Η επεξεργασία τους πραγματοποιείται σε διαδοχικές βαθμίδες (προεπεξεργασία – πρωτοβάθμια – δευτεροβάθμια – τριτοβάθμια). Η ελάχιστη επεξεργασία περιλαμβάνει την προεπεξεργασία και την πρωτοβάθμια επεξεργασία.

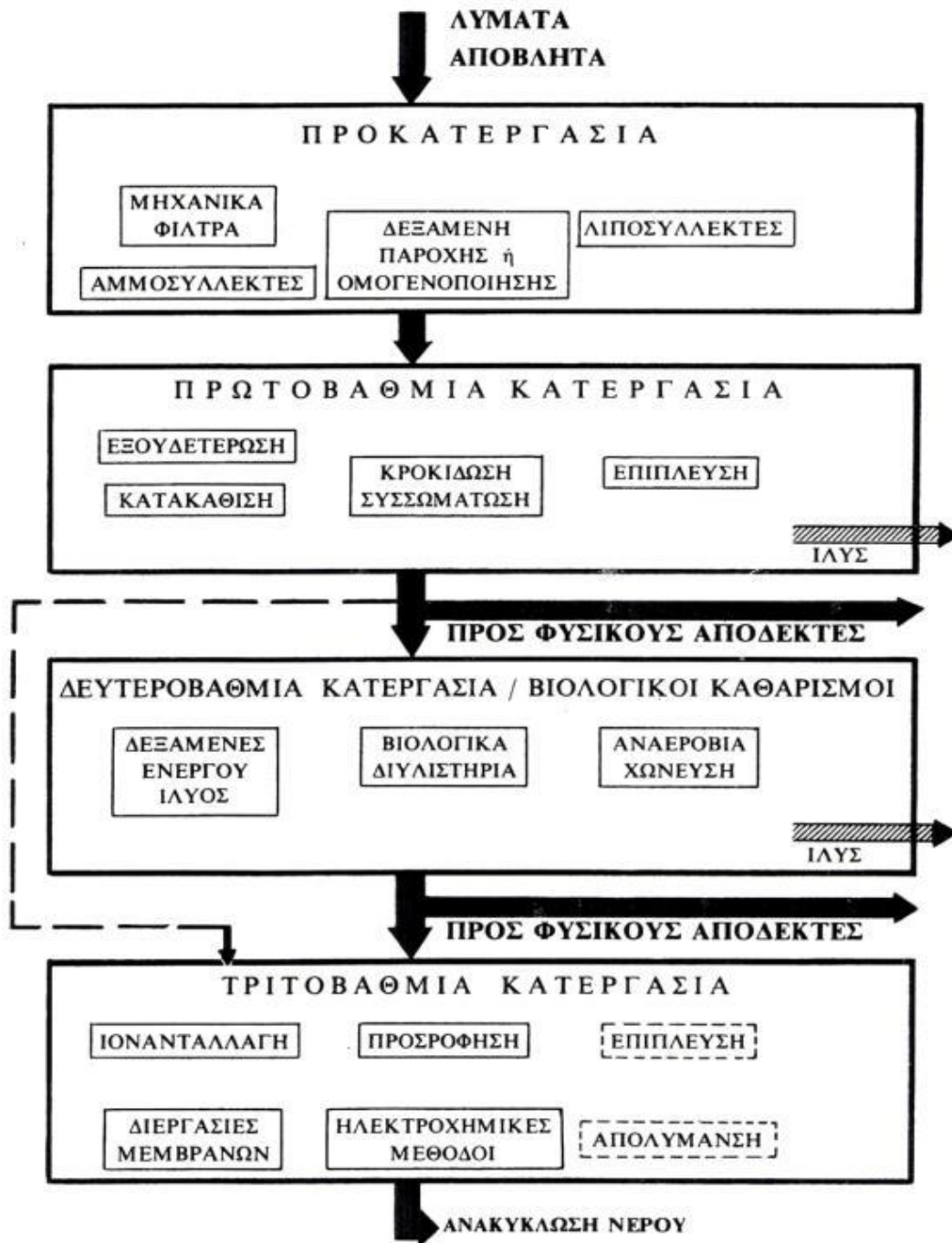
Τα βιομηχανικά λύματα διατίθενται κατ' ευθείαν στο περιβάλλον ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία ή στο δημοτικό δίκτυο αποχέτευσης ύστερα από προεπεξεργασία που πραγματοποιεί η βιομηχανία για την απομάκρυνση τοξικών υλών και υπερβολικών φορτίων στερεών, οργανικής ύλης και θρεπτικών (P, N). Βιομηχανικά λύματα με χαμηλό ή υψηλό pH βλάπτουν τα δίκτυα αποχέτευσης, την εγκατάσταση επεξεργασίας και τα υδατικά οικοσυστήματα. Ουδετεροποιούνται με προσθήκη αλκαλικών ενώσεων ή οξέων. Κατόπιν υποβάλλονται σε βιολογική επεξεργασία, όπως τα δημοτικά λύματα.

Τα βιομηχανικά λύματα χαρακτηρίζονται από μεγάλη διακύμανση παροχών και φορτίων ρύπανσης. Για τη καλή λειτουργία της εγκατάστασης επεξεργασίας κρίνεται αναγκαία η άμβλυση των αιχμών παροχής και φορτίων ρύπων με τη παρεμβολή εξισορρόπησης κυμαινόμενης στάθμης. Τα λύματα πρέπει να υποβάλλονται στη δεξαμενή σε έντονη μίξη και αερισμό ώστε να αποφεύγεται η καθίζηση αιωρούμενων στερεών και η δημιουργία σηπτικών καταστάσεων (Χρίστουλας, 1991).

Στο σχήμα 9.1 απεικονίζονται διαγραμματικά τα διάφορα στάδια κατεργασίας και οι διάφορες μέθοδοι και τεχνικές που περιλαμβάνονται σε καθένα απ' αυτά.

Στον πίνακα 9.1 δίνονται στοιχεία σχετικά με την ικανότητα καθαρισμού των διάφορων σταδίων κατεργασίας για συνήθη αστικά λύματα. Παράλληλα δίνονται και τα χαρακτηριστικά των λυμάτων μετά από κάθε στάδιο κατεργασίας.

**Σχήμα 9.1.** Διαγραμματική απεικόνιση μεθόδων και τεχνικών καθαρισμού αστικών λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων (Κουϊμτζής, Ματής, 1987).



**Πίνακας 9.1.** Χαρακτηριστικά αστικών λυμάτων και ικανότητα καθαρισμού των διαφόρων σταδίων κατεργασίας αυτών (Κουϊμτζής, Ματής, 1987).

Παράμετρος Ρύπανσης	Ακατέργαστα Λύματα ppm (mg/l)	Πρωτοβάθμια Κατεργασία		Δευτεροβάθμια Κατεργασία		Τριτοβάθμια Κατεργασία	
		ppm	I.K	ppm	I.K	ppm	I.K
BOD	300	195	35%	30	90%	2-5	>95%
COD	400	280	30%	80	80%	2-10	>95%
ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ	300	120	60%	30	90%	< 0.5	>90%
ΟΛΙΚΟ Ν	60	48	20%	30	50%	< 6	>90%
ΟΛΙΚΟΣ Ρ	15	13	12%	10	30%	< 0.15	> 95%
ΚΟΛΟΒΑΚΤΗΡΙΑ <sup>α</sup>	150.000	--	—	1000	—	< 0.02	

α = αριθμός ανά ml.

I.K = ικανότητα καθαρισμού %.

### 9.3. Στάδιο προεπεξεργασίας

Στο στάδιο αυτό εφαρμόζονται μια ή περισσότερες από τις παρακάτω τεχνικές:

1. Λιποσυλλέκτες. Χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση λιπαρών και ελαιωδών ουσιών.
2. Αμμοσυλλέκτες. Χρησιμοποιούνται για να συγκρατούν την άμμο και άλλα κοκκώδη υλικά που είναι δυνατό να προκαλέσουν βλάβες στα ευαίσθητα συστήματα των εγκαταστάσεων καθαρισμού. Είναι απαραίτητοι όταν στις εγκαταστάσεις καθαρισμού λυμάτων διοχετεύονται και νερά βροχής.
3. Εσχάρες. Αποτελούνται από ανοξείδωτο χάλυβα και είναι κατάλληλες για την συγκράτηση των στερεών με διάμετρο μεγαλύτερη των 10 mm.
4. Λεπτά κόσκινα. Συγκρατούν στερεά με διάμετρο μεγαλύτερη των 0,2 mm. Ανάλογα με το σχήμα τους έχουμε στατικά, δονούμενα, κυλινδρικά, περιστρεφόμενα, αυτοκαθαριζόμενα ή μη κλπ.
5. Δεξαμενή παροχής και ομογενοποίησης. Χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που έχουμε μεγάλες διακυμάνσεις στην ποιότητα και στην ποσότητα των απόβλητων. Τα διάφορα απόβλητα συγκεντρώνονται σε μια μεγάλη δεξαμενή στην οποία ομογενοποιούνται τα χαρακτηριστικά τους και εξισορροπούνται οι δια-



κυμάνσεις των βιολογικών φορτίων. Στη συνέχεια αντλούνται με σταθερή παπαροχή στα επόμενα στάδια καθαρισμού.

#### 9.4. Πρωτοβάθμια επεξεργασία

Στο στάδιο αυτό εφαρμόζονται οι παρακάτω μέθοδοι:

1. Κατακάθιση (καθίζηση). Τα υγρά απόβλητα οδηγούνται σε μια δεξαμενή όππου και παραμένουν για καθορισμένο χρονικό διάστημα. Στο διάστημα αυτό τα περισσότερα αιωρούμενα στερεά κατακάθονται με τη βοήθεια του πεδίου βαρύτητας.
2. Επίπλευση. Χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση σταγονιδίων και στερεών που είναι ελαφρότερα ή έχουν το ίδιο ειδικό βάρος με το νερό. Εφαρμόζεται σε ορισμένες περιπτώσεις βιομηχανικών αποβλήτων π.χ. τροφίμων, πετρελαιοειδών κ.ά.
3. Κροκίδωση – Συσσωμάτωση. Είναι μια χημική μέθοδος κατεργασίας των απόβλητων που αποσκοπεί στην απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών σωματιδίων, συνήθως κολλοειδών, που δύσκολα κατακάθονται με τη βοήθεια του πεδίου βαρύτητας. Για το σκοπό αυτό στα απόβλητα προστίθενται τα κατάλληλα άλατα όπως αργιλίου, σιδήρου, πολυηλεκτρολύτες.
4. Εξουδετέρωση. Είναι μια χημική μέθοδος επεξεργασίας αποβλήτων που έχει σαν σκοπό την ομαλοποίηση του pH για την ομαλή λειτουργία του βιολογικού καθαρισμού. Παράλληλα επιτυγχάνεται και αφαίρεση βαρέων μετάλλων που καταβυθίζονται σαν αδιάλυτα υδροξείδια.

#### 9.5. Δευτεροβάθμια επεξεργασία

Το δεύτερο στάδιο κατεργασίας περιλαμβάνει διάφορες μεθόδους και τεχνικές βιολογικού καθαρισμού. Ο βιολογικός καθαρισμός επιτυγχάνει τη βιοαποδόμηση της οργανικής ύλης που υπάρχει στα λύματα και σε πολλά βιομηχανικά απόβλητα. Για την επιτυχία του προϋπόθεση είναι η απουσία τοξικών ουσιών οι οποίες παρεμποδίζουν τη βιολογική αποδόμηση (κυανιούχα, χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες, βαρέα μέταλλα κ.ά.), τα οποία πρέπει να απομακρύνονται από τα απόβλητα προτού αυτά οδηγηθούν στα συστήματα βιολογικού καθαρισμού. Ο βιολογικός καθαρισμός γίνεται τόσο με αερόβιους όσο και με αναερόβιους μικροοργανισμούς. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές βιολογικού καθαρισμού όπως οι δεξαμενές ενεργού ιλύος, τα συστήματα

βιολογικής λεπτής στοιβάδας (βιολογικά διυλιστήρια ή φίλτρα), τα συστήματα αναερόβιας χώνευσης κ.ά.

Τα αστικά και βιομηχανικά απόβλητα, μετά τα δύο πρώτα στάδια επεξεργασίας, είναι κατάλληλα να διατεθούν στους φυσικούς αποδέκτες χωρίς περιβαλλοντικά προβλήματα ή να χρησιμοποιηθούν για άλλους σκοπούς π.χ. άρδευση. Τα στερεά απόβλητα που δημιουργούνται (λάσπες), χρειάζονται ιδιαίτερη επεξεργασία (πάχυνση, διήθηση κ.ά.).

### **9.6. Τριτοβάθμια επεξεργασία**

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον πλήρη καθαρισμό των λυμάτων ή αποβλήτων που προέρχονται από τα δύο προηγούμενα στάδια κατεργασίας. Το κόστος της τριτοβάθμιας επεξεργασίας είναι υψηλό και για αυτό, το στάδιο αυτό χρησιμοποιείται όταν υπάρχει γενικότερο πρόβλημα προσφοράς νερού. Δηλαδή στις περιπτώσεις που επαναχρησιμοποιείται το νερό τόσο για πόσιμο όσο και για βιομηχανικές χρήσεις.

Η επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί καθορίζεται από τη φύση των λυμάτων και αποβλήτων και από το σκοπό επαναχρησιμοποίησης των. Οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι: προσρόφηση, ιοντοεναλλαγή, διεργασίες μεμβρανών, ηλεκτροχημικές μέθοδοι, απολύμανση, επίπλευση.

## 10. ΔΙΚΑΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΥΔΑΤΩΝ

### 10.1. Προστασία υδάτων

Με το άρθρο 24 του Συντάγματος, το φυσικό περιβάλλον ανάγεται σε αντικείμενο εννόμου προστασίας. Η διάταξη αυτή καθιστά υποχρεωτική τη πλήρη και αποτελεσματική προστασία του, με τη λήψη αναγκαίων μέτρων, προληπτικών και κατασταλτικών. Στην έννοια του φυσικού περιβάλλοντος, περιλαμβάνονται τα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα ως φυσικοί πόροι και ως οικοσυστήματα, για τη προστασία των οποίων υπάρχει ο ν.1650/ 1986. Στο νόμο αυτό λαμβάνεται μέριμνα για τη διαπίστωση της ποιότητας των νερών και την ευαισθησία των οικοσυστημάτων.

Για τη διαχείριση των υδατικών πόρων, εκδόθηκε ο ν.1739/1987, με τον οποίο καθιερώθηκε νέο σύστημα ορθολογικής διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας και ελέγχου από το κράτος της χρήσεως των υδάτων με τη πρόβλεψη της υποχρέωσης λήψης άδειας για κάθε χρήση ύδατος.

Η χώρα χωρίζεται σε 14 υδατικά διαμερίσματα, οριοθετημένα μεταξύ τους (αρθ.1, παρ.4), προβλέπονται κεντρικός και περιφερειακοί φορείς διαχείρισης, καθώς και προγράμματα ανάπτυξης και διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας.

Προβλέπονται όροι και προϋποθέσεις κατασκευής έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων από φορείς του δημοσίου τομέα (αρθ.7 και 8) και κανόνες χρήσης νερού. Προσδιορίζονται κατώτατα και ανώτατα αναγκαία όρια ποσοτήτων χρήσης νερού, ανακατανομή τους και επιβολή περιορισμών τους (αρθ.9-10). Κατά το άρθρο 11, προβλέπεται η προστασία της ποιότητας και ποσότητας των υδατικών πόρων καθώς και επιβολή περιορισμών στη χρήση τους. Ακόμα τίθενται διατάξεις για τον έλεγχο διαφόρων δραστηριοτήτων που αλλοιώνουν ποιοτικά ή ποσοτικά τους υδατικούς πόρους.

Οι βιομηχανικές επιχειρήσεις που χρειάζονται άδεια χρήσης νερών, πρέπει να έχουν εγκεκριμένο σχέδιο εγκαταστάσεως ανακυκλώσεως του νερού καθώς και εγκατάσταση βιολογικού καθαρισμού των βιομηχανικών αποβλήτων.

Οι αφιρώσεις την άδεια χρήσεως ύδατος πράξεις πρέπει να περιλαμβάνουν εκτίμηση και αξιολόγηση της διαχειρίσεως σε σχέση με τη ποιότητα και ποσότητα των διαθέσιμων πόρων του υδροφόρου ορίζοντα και τυχόν επιπτώσεις σε άλλες χρήσεις (άρδευση, ύδρευση), (Συμβούλιο της Επικρατείας 2990/1998).

Ο στόχος της οδηγίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης 2000/60 είναι η διατήρηση και βελτίωση του υδάτινου περιβάλλοντος στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα. Ο στόχος για την ε-

πίτευξη καλής κατάστασης των υδάτων, θα πρέπει να επιδιωχθεί για κάθε λεκάνη απορροής ποταμού, ούτως ώστε να συντονίζονται τα μέτρα που αφορούν επιφανειακά και υπόγεια ύδατα που ανήκουν στο ίδιο οικολογικό, υδρολογικό και υδρογεωλογικό σύστημα. Υδρολογική λεκάνη ή λεκάνη απορροής ποταμού ή λίμνης είναι η εδαφική έκταση από την οποία συγκεντρώνεται το σύνολο της απορροής, μέσω διαδοχικών ρευμάτων, ποταμών και πιθανώς λιμνών και παροχετεύονται στη θάλασσα με ενιαίο στόμιο ποταμού, εκβολές ή δέλτα. (Νόμος 3199/2003)

## **10.2. Προστασία από τα απόβλητα**

### **A) Στερεά απόβλητα.**

Με την οδηγία 75/442/ΕΟΚ του Συμβουλίου, τέθηκαν ορισμένοι βασικοί κανόνες για την διαχείριση των στερεών αποβλήτων, οι οποίοι αφορούν τις υιοθετούμενες αρχές για κάθε κράτος για το περιορισμό της παραγωγής στερεών αποβλήτων, την ανακύκλωση, την περαιτέρω επεξεργασία τους και την καταστροφή τους (αρθ.3). Κατά τις διάφορες εργασίες της διαχείρισεως, δεν πρέπει να τίθεται σε κίνδυνο η υγεία των ανθρώπων και το περιβάλλον (αρθ.4). Επίσης καθιέρωνε την υποχρέωση καθορισμού αρμόδιων αρχών, οι οποίες θα ήταν επιφορτισμένες με το σχεδιασμό, την οργάνωση και την επίβλεψη των εργασιών διαθέσεως των αποβλήτων (αρθ.5) και επέβαλλε τη κατάρτιση σχεδίων διαχείρισης των απορριμάτων (αρθ.6). Η μεταφορά της αρχικής οδηγίας του 1975 στο ελληνικό εσωτερικό δίκαιο έγινε με την 49541/1424/9.7.1986 ΚΥΑ.

### **B) Υγρά απόβλητα.**

Οι διατάξεις του προεδρικού διατάγματος 1180/1981 (ΦΕΚ Α' 293), ρυθμίζει ζητήματα σχετικά με την απόρριψη υγρών αποβλήτων σε υδάτινους αποδέκτες, ορίζει ότι για τη χορήγηση άδειας λειτουργίας σε εγκαταστάσεις από τις οποίες προέρχονται υγρά απόβλητα απαιτείται η υποβολή άδειας διαθέσεως υγρών αποβλήτων (αρθ.4, παρ.4), οι όροι της οποίας πρέπει να είναι σύμφωνοι με τις καθοριζόμενες στο αρθ.3 κατευθυντήριες γραμμές. Στο αρθ.1 ορίζονται τα επιτρεπόμενα όρια εκπομπών ουσιών που ρυπαίνουν κάθε υδάτινο αποδέκτη κατά τις ισχύουσες υγειονομικές διατάξεις (ΣΤΕ 3567/1997).

Οι διατάξεις 3, 4 και 5 της Ε1β 221/22-1/24-2-1965 ΚΥΑ, προβλέπουν ως προς τους χώρους διάθεσης υγρών λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων. Αναλυτικότερα ορίζονται οι χώροι, οι όροι και οι προϋποθέσεις για τη διάθεση των υγρών αποβλήτων σε επιφανειακά ύδατα. Τέλος, προβλέπει την υποβολή μελέτης για την έγκριση

διαθέσεως των αποβλήτων που παράγονται από βιομηχανικές εγκαταστάσεις (ΣΤΕ 2447/2002).

Σε εναρμόνιση με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ, εκδόθηκε η 5673/400/5-3/14-3-1997 ΚΥΑ με την οποία θεσπίστηκαν όροι και προϋποθέσεις για τη διάθεση αστικών και βιομηχανικών λυμάτων.

Από τις ανωτέρω διατάξεις προκύπτει ότι η απ' ευθείας διάθεση σε επιφανειακά ύδατα βιομηχανικών λυμάτων επιτρέπεται μόνο σε περιοχές οι οποίες έχουν καθοριστεί για το σκοπό αυτό δυνάμει της Ε1β/221/22-1/24-21965 ΚΥΑ.

### **10.3. Κανονισμοί ποιότητας εκροών (ΚΠΕ)**

Οι κανονισμοί ποιότητας των υδάτινων σωμάτων αποτελούν τη βάση για το σχεδιασμό των αντιρρυπαντικών μέτρων και τον έλεγχο της απόδοσης τους αλλά δεν είναι από μόνοι τους επαρκείς. Χρειάζεται να καθορίζονται και οι ποιότητες των εκροών από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας και τις άλλες πηγές ρύπων.

Έτσι προκύπτουν ΚΠΕ με τοπική κατά κανόνα εφαρμογή. Οι τιμές των παραμέτρων ποιότητας των ΚΠΕ προκύπτουν από τις μελέτες ρύπανσης των υδάτινων αποδεκτών των λυμάτων. Συχνά όμως τα απαιτούμενα υδροδυναμικά και άλλα στοιχεία είναι ανεπαρκή με συνέπεια να μην εκπονούνται βάσιμες μελέτες και με πιθανό τελικό αποτέλεσμα την κατασκευή ανεπαρκών έργων επεξεργασίας – διάθεσης των λυμάτων. Οι ασάφειες των μελετών αυτών διευκολύνουν τους Οργανισμούς Αποχέτευσης για τους οποίους το πρώτο ζητούμενο δεν είναι η ποιότητα του υδάτινου περιβάλλοντος αλλά η μείωση του κόστους επεξεργασίας.

Οι παραπάνω καταστάσεις δικαιολογούν την παρέμβαση της Ευρωπαϊκής Ένωσης με την Οδηγία 271 του έτους 1991 “για τη επεξεργασία των αστικών λυμάτων” <sup>(2)</sup> η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως ένας ΚΠΕ γενικής εφαρμογής. Με αυστηρά ελεγχόμενες εξαιρέσεις η Οδηγία επιβάλλει δευτεροβάθμια επεξεργασία σε οικισμούς με μέγιστο εβδομαδιαίο ισοδύναμο πληθυσμό μεγαλύτερο από 10.000 ενώ στις περιπτώσεις που ο αποδέκτης είναι ποτάμι ή λίμνη η απαίτηση για δευτεροβάθμια επεξεργασία ισχύει και για πληθυσμούς 2.000 – 10.000 κατοίκων. Για υδάτινες περιοχές που χαρακτηρίζονται ευαίσθητες από άποψη ευτροφισμού η Οδηγία επιβάλλει επιπροσθέτως απομάκρυνση αζώτου ή/και φωσφόρου (Χρίστουλας, 1991).

### **Αναφορές**

1. Συμβούλιο των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων.

α. Οδηγία της 16/6/1975 για την απαιτούμενη ποιότητα των επιφανειακών υδάτων που προορίζονται για τη παραγωγή πόσιμου ύδατος. Επίσημη Εφημερίδα ΕΟΚ N194/26 της 25/7/75.

β. Οδηγία της 18/7/1978 για την ποιότητα των γλυκών υδάτων που έχουν ανάγκη προστασίας ή βελτιώσεως για τη διατήρηση της ζωής των ιχθύων. Επίσημη Εφημερίδα ΕΟΚ N222/1 της 14/8/1978.

γ. Οδηγία της 9/10/1979 για τις μεθόδους και συχνότητα μετρήσεων και αναλύσεων των επιφανειακών υδάτων που προορίζονται για παραγωγή πόσιμου νερού. Επίσημη Εφημερίδα ΕΟΚ N271/44 της 29/10/1979.

δ. Οδηγία της 15/7/1980 για την ποιότητα του πόσιμου νερού. Επίσημη Εφημερίδα ΕΟΚ N229/11 της 30/8/1980.

2. Συμβούλιο Ευρωπ. Κοινοτήτων “Οδηγία 91/271 για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων” Επίσης. Εφημερίδα Ευρ. Κοινοτήτων, αριθμ. L135/40/30-5-91.

## 11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι:

- 1) Τα υπόγεια νερά, στην Ελλάδα, είναι μια από τις σημαντικότερες πηγές προέλευσης νερού ανθρώπινης κατανάλωσης, είναι πολύ ευαίσθητα στη ρύπανση και έχουν περιορισμένη ικανότητα αυτοκαθαρισμού.
- 2) Η κατάληξη αστικών λυμάτων, βιομηχανικών αποβλήτων, ξεπλυμάτων εδάφους από εντατική χρήση λιπασμάτων, αλλά και κτηνοτροφικών αποβλήτων στα νερά, έχει ως συνέπεια την αύξηση της συγκέντρωσης διαφόρων ρύπων, με αποτέλεσμα τα νερά να γίνονται επικίνδυνα για τον άνθρωπο και τους ζωικούς οργανισμούς.
- 3) Μία σοβαρή μορφή ρύπανσης είναι η οργανική, εξαιτίας της ποσότητας των οργανικών ουσιών και των συνεπειών τους στο οικοσύστημα. Η μείωση της, κατά τη διάρκεια της εξελικτικής διαδικασίας, είναι γνωστή σαν αυτοκαθαρισμός.
- 4) Λόγω της ροής του νερού, η ρύπανση μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις και μεγάλα βάθη και να επηρεάσει ως εκ τούτου την ποιότητα του πόσιμου νερού και κατ' επέκταση την υγεία των ανθρώπων και των ζώων σε μεγάλη κλίμακα.
- 5) Η ρύπανση στους επιφανειακούς αποδέκτες είναι εντονότερη απ' ό,τι στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες λόγω της εντονότερης εκμετάλλευσης που υφίστανται και της μεγαλύτερης πίεσης που δέχονται. Ωστόσο η ρύπανση των επιφανειακών νερών, μπορεί να αντιμετωπιστεί σε μικρό χρονικό διάστημα ανάλογα με τα μέτρα προστασίας που θα ληφθούν, σε αντίθεση με τη ρύπανση των υπόγειων νερών που η αντιμετώπιση της είναι πιο χρονοβόρα, πιο πολύπλοκη και πιο δαπανηρή.
- 6) Το πόσιμο νερό προέρχεται είτε από υπόγεια είτε από επιφανειακά νερά. Στα υπόγεια δεν γίνεται ιδιαίτερη επεξεργασία. Διοχετεύονται στις δεξαμενές που γίνεται απολύμανση πριν από την τροφοδοσία δικτύου ύδρευσης με συνεχής χημική και μικροβιολογική παρακολούθηση. Αντίθετα, τα επιφανειακά νερά είναι εκτεθειμένα με αποτέλεσμα η ποιότητα τους να είναι υποβαθμισμένη. Συνεπώς κρίνεται απαραίτητη η επεξεργασία τους.
- 7) Τα επιζήμια αποτελέσματα της ρύπανσης είναι μολύνσεις, αποξυγόνωση, ευτροφισμός, αλατότητα, πρόκληση ασθενειών, που μεταφέρονται στον άνθρωπο.

πο άμεσα με το νερό, ή έμμεσα, όταν καταναλώνει προσβεβλημένους υδρόβιους οργανισμούς.

- 8) Οι κατάλληλες τεχνολογίες απορρύπανσης διαλέγονται κυρίως με βάση τους στόχους της αποκατάστασης ενός χώρου και τα χαρακτηριστικά των ρύπων. Οι υπάρχουσες τεχνολογίες απορρύπανσης μπορούν να χωριστούν χονδρικά σε δύο κατηγορίες, στις συμβατικές, για την αποτελεσματικότητα των οποίων έχουν συγκεντρωθεί τα απαραίτητα στοιχεία και στις μη συμβατικές. Οι συμβατικές τεχνολογίες πετυχαίνουν περιορισμένα αλλά σίγουρα αποτελέσματα, με κόστος όχι ιδιαίτερα χαμηλό και κάτω από συνθήκες όχι ιδιαίτερα αντίξοες. Ως συμβατικές χαρακτηρίζονται οι τεχνικές που αποσκοπούν στον περιορισμό εξάπλωσης του ρύπου με χαμηλής διαπερατότητας επιφανειακά εδαφικά καλύμματα ή κατακόρυφα περιμετρικά διαφράγματα. Κατ' εξοχήν συμβατικές θεωρούνται επίσης και οι μέθοδοι που συνδυάζουν δύο στάδια: i) άντληση νερού ή εκσκαφή χώματος και ii) επεξεργασία. Πρόκειται για τις πιο δοκιμασμένες μεθόδους απορρύπανσης, οι οποίες, μετά την απομάκρυνση του ρύπου με άντληση του υπόγειου νερού ή και εκσκαφή του χώματος, ανάγουν το πρόβλημα της ρύπανσης του υπεδάφους στο παλαιότερο και πιο καλά μελετημένο πρόβλημα της επεξεργασίας λυμάτων.
- 9) Στόχος της επεξεργασίας των λυμάτων είναι η απομάκρυνση ρυπαντικών ουσιών όπως των αιωρούμενων στερεών (SP), της οργανικής ύλης (BOD, COD) του αζώτου, του φωσφόρου και των παθογόνων. Ο σχεδιασμός γίνεται με βάση τα θεσμικά καθοριζόμενα ποιοτικά χαρακτηριστικά της εκροής ως προς SS, BOD και (στην περίπτωση ευαίσθητων αποδεκτών) N και P. Η νομοθεσία θέτει όρια και για κολοβακτηρίδια ή άλλους παθογόνους μικροοργανισμούς.
- 10) Η επεξεργασία πραγματοποιείται σε διαδοχικές βαθμίδες (προεπεξεργασία - πρωτοβάθμια - δευτεροβάθμια - τριτοβάθμια). Η ελάχιστη επεξεργασία για τα αστικά λύματα περιλαμβάνει προεπεξεργασία και πρωτοβάθμια επεξεργασία. Τα βιομηχανικά λύματα διατίθενται κατ' ευθείαν στο περιβάλλον ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία ή στο δημοτικό δίκτυο αποχέτευσης ύστερα από προεπεξεργασία που πραγματοποιεί η βιομηχανία.
- 11) Η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων για εμπλουτισμό υδροφορέων θα έδινε λύση στα προβλήματα υπαλυμύρισης και διάθεσης των επεξεργασμένων λυμάτων.



- 12) Εφόσον γίνουν οι καταγραφικές μελέτες της ρύπανσης, η απορρύπανση είναι ζήτημα χρόνου. Διατίθενται σήμερα πολλές τεχνολογίες απορρύπανσης υδάτων (επιφανειακών και υπογείων), όπως ο αεροδιαχωρισμός, η αεροδιασπορά, η απορρύπανση με εφαρμογή υποπίεσης, η απορρύπανση με άντληση διαλυμένων και επιπλεόντων ρυπαντών, η βιοεξυγίανση και η χημική αποδόμηση. Η πιο ολοκληρωμένη μέθοδος αποκατάστασης της ποιότητας μιας περιοχής είναι η απομάκρυνση του ρύπου, η οποία επιτυγχάνεται είτε με άντληση από φρεάτια, είτε με χρήση στραγγιστικών αγωγών και τάφρων είτε με την εφαρμογή ρεύματος αέρα με πίεση σ' ένα φρεάτιο. Το σημαντικό μειονέκτημα που υπάρχει όμως είναι ποια θα είναι η κατάληξη του ρυπασμένου νερού που απομακρύνεται από τον υδροφόρο.
- 13) Η βιοεξυγίανση παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Είναι μια φυσική (βιολογική) διεργασία, περιβαλλοντικά αποδεκτή καθώς δεν παράγονται άλλου είδους παράγωγα απόβλητα και προκαλεί πλήρη αποδόμηση του ρύπου αξιοποιώντας γηγενείς μικροοργανισμούς. Έχει αναγνωρισθεί ως ήπια τεχνολογία επεξεργασίας μολυσμένων περιοχών και έχει συμβάλει σημαντικά στην αντιμετώπιση των οξυμένων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Αντί για τη μεταφορά ρύπων από ένα περιβαλλοντικό μέσο σε άλλο (π.χ. από το νερό στον αέρα ή στο έδαφος) που επιτυγχάνουν άλλες μέθοδοι (π.χ. αεροδιαχωρισμός), η βιοεξυγίανση έχει αποδειχθεί ικανή να εξαλείφει πλήρως τους ρύπους. Συχνά εκτελείται επί τόπου (in situ) χωρίς σημαντικές περιβαλλοντικές διαταραχές ή μεταφορά επικίνδυνων υλικών σε άλλη περιοχή που θέτουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία. Έχει αποδειχθεί πιο οικονομική από άλλες τεχνικές. Τέλος υπερτερεί σε σχέση με τη χημική αποδόμηση στο ότι σε περίπτωση αποτυχίας της δεύτερης θα πρέπει να αντιμετωπιστούν εκτός από τον αρχικό ρύπο και τα διάφορα χημικά πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη της. Επομένως, η βιοεξυγίανση θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μια από τις πιο ποιοτικές μεθόδους εξυγίανσης του ρυπασμένου νερού.
- 14) Με τη μέθοδο της εφαρμογής πίεσης, επιτυγχάνεται απορρύπανση από επιπλέοντες πτητικούς ρύπους, καθώς δεν μπορεί να γίνει κάτω από τη στάθμη του υπόγειου νερού. Πλεονεκτεί σε σχέση με τη μέθοδο της άντλησης των επιπλεόντων ρυπαντών ως προς το κόστος, τον απαιτούμενο χρόνο και ότι ταυτόχρονα γίνεται ανάκτηση τόσο των επιπλεόντων υδρογονανθράκων όσο και αυτών που συγκρατούνται στους πόρους του εδάφους.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

**Πίνακας Ι.** Προδιαγραφές για την διάθεση υγρών βιομηχανικών αποβλήτων στο Θερμαϊκό κόλπο. Απόφαση νομάρχη 15549/11-7-83. Ισχύουν από 1-1-1987. (Κουίμτζής, 1998).

Παράμετροι		Ανώτατα επιτρεπτά όρια
1. pH		6-9
σε στιγμιαία δείγματα		5.5-9.5
2. Θερμοκρασία στην είσοδο του αποδέκτη		40°C
3. Χρώμα, μονάδες κλίμακας Pt/Co		75
4. Επιπλέοντα υλικά mg/l (Με διάμετρο >0.5 cm)		Απουσία - μηδέν
5. Αιωρούμενα στερεά	mg/l	75
6. BOD <sub>5</sub>	»	80
7. COD	»	250
8. Λίπη-έλαια (ζωικά-φυτικά)	»	20
9. Ορυκτά έλαια-υδρογονάνθρακες	»	15
10. Αργίλιο	»	20
11. Αρσενικό	»	2
12. Βάριο	»	20
13. Βόριο	»	2
14. Κάδμιο	»	0.5
15. Χρώμιο (III)	»	4
16. Χρώμιο (VI)	»	0.9
17. Σίδηρος ολικός	»	30
17α. Σίδηρος διαλυμένος	»	5
18. Μαγγάνιο	»	4
19. Υδράργυρος	»	0.05
20. Νικέλιο	»	4
21. Μόλυβδος	»	1
22. Χαλκός	»	2
23. Σελήνιο	»	0.1
24. Κασσίτερος	»	10
25. Ψευδάργυρος	»	10
26. Κυανιούχα	»	0.5
27. Χλώριο ελεύθερο	»	2
28. Θειώδη	»	2
29. Θειούχα	»	2
30. Φθοριούχα	»	30
31. Φωσφόρος	»	30
32. Αμμώνιο (NH <sub>4</sub> )	»	40
33. Νιτρώδη σε άζωτο	»	3
34. Νιτρικά σε άζωτο	»	50
35. Φαινόλες ολικές	»	0.5
36. Αλδεύδες	»	1
37. Αρωματικοί διαλύτες	»	0.4
38. Αζωτούχοι διαλύτες	»	0.2
39. Χλωριωμένοι διαλύτες	»	2
40. Άργυρος	»	0.5
41. Κολοβακτηριοειδή, ολικά	K/1000 ml	1000
42. Κολοβακτηριοειδή κοπρανώδη	»	200

**Πίνακας II.** Προδιαγραφές λυμάτων και υγρών βιομηχανικών αποβλήτων προκειμένου να διατεθούν στον Αξιό ποταμό (απόφαση νομάρχη Θεσσαλονίκης ΔΥ/22374/91/11-1-1994), (Κουίμτζής, 1998).

1. pH	6-8.5
σε στιγμιαία δείγματα	5.5-9
2. Θερμοκρασία	30 στην έξοδο του εργοστασίου
3. Χρώμα	Την απορρόφηση 50 χρωμα- τικών μονάδων κλίμακας Κοβαλτίου-Λευκόχρυσου
4. Επιπλέοντα υλικά (με διάμετρο >0.5 cm)	Μηδέν
5. Αιωρούμενα στερεά mg/l	40
6. BOD 5 mg/l	40
7. COD mg/l	120
8. Λίπη-έλαια mg/l (ζωικά-φυτικά)	10
9. Ορυκτά έλαια-υδρογονάνθρακες mg/l	5
10. Αργίλιο mg/l	10
11. Αρσενικό mg/l	1
12. Βάριο mg/l	10
13. Βόριο mg/l	1
14. Κάδμιο mg/l	0.2
15. Χρώμιο 3 mg/l	2
16. Χρώμιο 6 mg/l	0.5
17. Σίδηρος ολικός mg/l	15
17α. Σίδηρος διαλυμένος mg/l	3
18. Μαγγάνιο mg/l	2
19. Υδράργυρος mg/l	0.02
20. Νικέλιο mg/l	2
21. Μόλυβδος mg/l	0.5
22. Χαλκός mg/l	1
23. Σελήνιο mg/l	0.05
24. Κασσίτερος mg/l	9
25. Ψευδάργυρος mg/l	5
26. Κυανιούχα mg/l	0.25
27. Χλώριο ελεύθερο mg/l	1
28. Θειώδη mg/l	1
29. Θειούχα mg/l	1
30. Φθοριούχα mg/l	10
31. Φωσφόρος mg/l	5
32. Αμμώνιο (NH <sub>4</sub> ) mg/l	10
33. Νιτρώδη σε άζωτο mg/l	1.5
34. Νιτρικά σε άζωτο mg/l	15
35. Φαινόλες ολικές mg/l	0.2
36. Αλδεΐδες mg/l	0.1
37. Ολικό άζωτο κατά Kjeldahl (εκτός NO <sub>2</sub> και NO <sub>3</sub> ) mg/l	15
38. Αρωματικές και Χλωριωμένες ενώσεις: όπως ορίζονται στην πράξη 73 της 30.6.90 του Υπουργικού Συμβουλίου (ΦΕΚ 90Α/11.7.90)	
39. Άργυρος mg/l	0.25
40. Κολοβακτηριοειδή, ολικά Κ/100 ml	500
41. Κολοβακτηριοειδή κοπρανώδη Κ/100 ml	100

**Πίνακας III.** Προτεινόμενα χαρακτηριστικά ποιοτικών παραμέτρων για τον έλεγχο των βιομηχανικών αποβλήτων κατά κλάδο και είδος βιομηχανίας. (Κουϊμτζής, 1998).

Κλάδος βιομηχανίας	Ποιοτικές παράμετροι για εξέταση Συμπληρωματικές κατά περίπτωση			
	Κατηγορία	Βασικές	(3)	(4)
(1)	(2)	(3)	(3)	(4)
Τροφών και Ποτών	Αλλαντοποιία Σφαγεία	BOD <sub>5</sub> , COD, αιωρούμενα στερεά, λίπη και έλαια, pH	BOD <sub>5</sub> , COD, αιωρούμενα στερεά, λιπικά, θειικά, θειούχα κολοβακτηριοειδή, συνολ. οργαν. άνθρακας	
	Γαλακτοκομία	BOD <sub>5</sub> , COD, pH, αιωρούμενα στερεά	Χλωριούχα, χρώμα, N, P, ολικός οργανικός άνθρακας (TOC), θολερότητα	
	Κονσερβοποιία φρούτων και λαχανικών	BOD <sub>5</sub> , COD, αιωρούμενα στερεά, pH	Χρώμα, θερμοκρασία, ολικά διαλυμένα στερεά	
	Βρώσιμα λίπη και έλαια	BOD <sub>5</sub> , COD, αιωρούμενα στερεά, διαλυμένα στερεά, λίπη και έλαια, pH	N, P, θειικά, θειούχα	
	Αλευροποιία	BOD <sub>5</sub> , αιωρούμενα στερεά, pH	COD, ολικός οργανικός άνθρακας, ολικά διαλυμένα στερεά	
Οινοπνευματοποιία, οινοποιία, ζυθοποιία, αναψυκτικά	Αρτοποιία, μπισκοτοποιία, σοκολατοποιία, ζαχαροπλαστική, παραγωγή αμύλου & γλυκόζης, παραγωγή μαγιάς	BOD <sub>5</sub> , COD, pH, αιωρούμενα στερεά	N, P, θειικά, θειούχα	
	Οινοπνευματοποιία, οινοποιία, ζυθοποιία, αναψυκτικά	BOD <sub>5</sub> , pH, αιωρούμενα στερεά, καθιζάνοντα στερεά	N, P, θερμοκρασία, ολικά διαλυμένα στερεά, θολερότητα, αφρός	

Πίνακας III. (Συνέχεια).

Χημικές	Οξέα - Βάσεις - Άλατα	Οξύτης, αλκαλικότητα, διαλυτά στερεά, καθιζάνοντα στερεά	Χλωριούχα, θειικά, νιτρικά, φαινόλες, φορριούχα, BOD <sub>5</sub> , COD, συνολική απαίτηση οξυγ. (TOD)
	Παραγωγή τεχνητών ινών (RAYON)	BOD <sub>5</sub> , COD, pH, αιωρούμενα στερεά, θειούχα, θειικά, pH	
	Λιπάσματα (φωσφορικά)	Αιωρούμενα στερεά, διαλ. στερεά, ασβέστιο, φορριούχα, pH, θερμοκρασία, φωσφορικά P	Οξύτης, Al, As, Fe, Hg, N, θειικά
	Λιπαρά οξέα, γλυκερίνη και σάπωνες	BOD <sub>5</sub> , COD, επιφανειακές ενεργοί ουσίες, pH, έλαια και λιπη	Θειικά, θειούχα P, χλωριούχα
	Στύβωτικά	Al, Λιπη και έλαια, χρώμα, pH	
	Παραγωγή απορρυπαντικών	BOD <sub>5</sub> , COD, αιωρ. στερεά, λιπη και έλαια, επιφ. ενεργοί ουσίες, pH	P, θειικά, θειούχα
	Κόλλες, γεωργ. φάρμακα	COD, As, Cd, Cu, φορριούχα, Pb, φαινόμενες, Se, Zn	
	Φωτογραφικά εργαστήρια	Bo, Cd, Cu, Pb, Ag, θειούχα, θειικά, pH	Τοξικές ουσίες κατά περίπτωση
Βυροδεψία	Τεχνητό δέρμα Γουνοποία Δερμάτινα είδη	BOD <sub>5</sub> , COD, διαλ., καθιζάνοντα και αιωρ. στερεά, χρώμα, Cr, Λιπη & έλαια, θειούχα, αλκαλικότητα	Fe, αμίνες

Πίνακας III. (Συνέχεια).

Υφαντουργικά	Εριουργία, βαμβακουργία, μεταξοβιομηχανία, συνθετικές ίνες, κλωστοβιομηχανία, δαντέλοποιία, καλτσοποιία, πλεκτική, παραγωγή σχοινίων-σπάγγων, ταπητουργία	Εφόσον η βιομηχανία συνδυάζεται με βαφεία ή φινιριστήρια θα εξετάζονται οι παρακάτω παράμετροι
Βαφεία και φινιριστήρια		BOD <sub>5</sub> , COD, pH, αιωρ. στερεά, χρώμα, αλκαλικότητα, Cr
Χαρτοποιία		BOD <sub>5</sub> , COD, αιωρ. στερεά, NH <sub>3</sub> , χρώμα, διαλυμένα στερεά
Ηλεκτρικά είδη	Μετασχηματιστές, ηλεκτροχημικά, συσσωρευτές, ξηρά στοιχεία, σύρματα, καλώδια, ηλεκτρικά είδη, φωτιστικά, τηλεπικοινωνιακό υλικό, ηλεκτρικές συσκευές	Λίπη και έλαια, PCB's, βαρέα μέταλλα κατά περίπτωση
Ελαστικά		BOD <sub>5</sub> , COD, pH, ολικά αιωρούμενα στερεά, λίπη και έλαια
Πετρέλαιο και άνθρακας	Διυλιστήρια πετρελαίου, παραγωγή λιπαντικών	NH <sub>3</sub> , BOD <sub>5</sub> , αιωρούμενα στερεά, διαλυμένα στερεά, λίπη και έλαια,θειούχα, θερμοκρασία, pH, COD, υδρογονάνθρακες
Προϊόντα ασφάλτου και πίσσας		BOD <sub>5</sub> , φαινόλες, θειικά,θειούχες, λίπη και έλαια, pH
		Χρώμα, έλαια και λίπη, ολικά διαλυμ. στερεά, θερμοκρασία, Cu, Zn, θειούχα, φαινόλες
		Φαινόλες
		Ολικά διαλυμ. στερεά, θειικά, CN <sup>-</sup> , Τοξικά πρόσθετα και ουσίες
		Χλωριούχα, χρώμα, Cu, CN <sup>-</sup> , Fe, Pb, Μερκαπτάνες, N, οσμές, ολικός P, θειικά, τοξικότητα, θολερότητα, πτητικά αιωρ. στερεά, Zn



Πίνακας III. (Συνέχεια).

Μη μεταλλικά υλικά	Υάλουργία, κεραμική, καθρεπτοποιία, Αιωρούμενα στερεά, pH, θερμοκρασία, καθίζοντα στερεά ολικά διαλυμένα στερεά βιομηχανία	Cr (III, VI), Zn, Cu, Fe, Ag, νιτρικά,
	Παραγωγή υαλώματος	(όταν έχουν υγρά απόβλητα) Pb, Zn
Μεταλλουργικές Βιομηχανίες	Παραγωγή σιδήρου και χάλυβος	Φαινόλες, CN, αμμωνία, έλαια και λίπη, αιωρ. στερεά, βαρέα μέταλλα (Cr, Ni, Zn, Sn), διαλυμ. στερεά, οξίνης, θερμοκρασία, COD και pH
	Μεταλλουργία άλλων μετάλλων	Κατά περίπτωση εξέταση διαφόρων παραμέτρων
Κατασκευή προϊόντων από μέταλλο	Σωληνουργία, βιδοποιία, σιδηρικά οικιακών, κατασκευή εργαλείων, σόματα καλοριφέρ, βληματοποιία, καυκοποιία, χάλκουργία	(Πιθανότητα υπέρξυος αποβλήτων, Cd, Cr(III, VI), Cu, Fe, Ni, Ag, Sn, Al που προέρχονται από την επεξεργασία και καθαρισμό της επιφανείας των μετάλλων)
	Ορειχάλκουργία, κατασκευή ειδών αλουμινίου και εμαγιέ, δοχεία λευκοσιδήρου, μαχαίροπήρ.	COD, λίπη και έλαια, pH, αιωρούμενα στερεά
	Επιμεταλλώσεις	Cd, Cr (III, VI), Cu, CN <sup>-</sup> , Fe, Ni, Ag, Sn, Al



Πίνακας III. (Συνέχεια).

Αιμογλεκτρικοί σταθμοί	BOD <sub>5</sub> , αιωρ. στερεά, διαλ. στερεά, Cr, Cu, Fe, Zn, P, N COD, CN <sup>-</sup> , λίπη και έλαια, χρώμα, φαινόλες, θολερότητα, P, N, θερμο- κρασία
Γεωργ. βιομηχανίες	Κτηνοτροφικές μονάδες, πτηνοτροφι- κές μονάδες BOD <sub>5</sub> , διαλυμ. στερεά, αιωρ. στερεά, N, νιτρικά, P, pH, COD

**Πίνακας IV.** Τοξικολογικές ιδιότητες παρασιτοκτόνων (Κουϊμτζής, 1998).

Εμπορική ονομασία	Τοξικότητα Ποντίκια (mg/kg)	LD <sub>50</sub> Ψάρια (ppm)	Ημπερίοδος ζωής (εβδομάδες)	Συντελεστής συσσώρευση
<b>Οργανοχλωριωμένα:</b>				
Aldrin	55	0.003	520	4444
HCB	3000	0.79	208	60
DDT	113	0.007	546	70000
Dieldrin	60	0.003	>312	3300
Endrin	25	0.0002	>624	1000
Lindane	106	0.018	>728	60
<b>Οργανοφωσφορικά:</b>				
Azinphosethyl	17.5	0.019	>4	0
Dichlorvos	68	0.700	8	0
Disulfoton	7.5	0.040	2	0
Malathion	1375	0.070	2	0
Parathion	13	0.047	8	9
Phorate	3	0.0055	2	0
<b>Καρβαμικά:</b>				
Carbaryl	675	2.0	2	0
Carbofuran	11	0.21	8-16	0
<b>Τριαζίνες:</b>				
Ametryn	1100	3.4	4-12	0
Atrazine	2000	12.6	26-78	0
Cyanazine	334	>1		
		4-8	0	
Prometon	1750	>1		
		>104	0	
<b>Διάφορα:</b>				
Dalapon	4000	115	2-4	0
Dicamba	1100	35000	8-12	0
Endothall	80	1.15	4	0
Picoram	8200	2.5	52-78	0
2,4-D	400	250	1-4	0
2,4,5-T	300	0.5	1-12	0
Alachlor	1800	13.5	8-12	0
Bromacil	5200	75	40-48	0
Captan	9000	0.13	<1	0
Θεικός χαλκός	2000	0.15	μόνιμο	0
Diuron	3400	4.3	<52	0
Ethylmercury chlorid	37	1.8	μόνιμο	3000
Pyrazon	3300	40	4-8	0

**Πίνακας V.** Συσχέτιση τομέων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και προβλημάτων χώρου και περιβάλλοντος (EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY, 1995).

<i>ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ</i>	<i>ΑΙΤΙΑ / ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ</i>	<i>ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ ΧΩΡΟΥ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ</i>
Αστικοποίηση και μεταφορές	Μεταβολές χρήσεων γης (π.χ. για λιμένες, αερολιμένες, οδικό, σιδηροδρομικό δίκτυο, εκσκαφή και διάθεση προσχώσεων λιμένος, κηλίδες στη θάλασσα (πετρελαίου, αποχετευτικών λυμάτων κλπ.) υδατοληψία, εκροές υγρών και στερεών αποβλήτων.	Απώλεια οικοτόπων και ποικιλίας ειδών, υποβάθμιση επιπέδου υπόγειων υδάτων, ρύπανση υδάτων, κίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία, ευτροφισμός, εισαγωγή ξένων ειδών.
Γεωργία	Ανάκτηση εδαφών, χρήση λιπασμάτων και ζιζανιοκτόνων, κτηνοτροφικές μονάδες, υδατοληψία, αρδευτικά έργα.	Απώλεια οικοτόπων και ποικιλίας ειδών, ρύπανση υδάτων, ευτροφισμός.
Τουρισμός, αναψυχή και κινήγι	Ανάπτυξη και μεταβολές χρήσεων γης (π.χ. γήπεδα γκολφ), οδικό, σιδηροδρομικό και αεροπορικό δίκτυο, λιμένες και λιμένες αναψυχής, υδατοληψία, διάθεση υγρών και στερεών αποβλήτων.	Απώλεια οικοτόπων και ποικιλίας ειδών, υποβάθμιση επιπέδου υπόγειων υδάτων, εισχώρηση αλμυρών υδάτων σε υπόγεια ύδατα, ρύπανση υδάτων, ευτροφισμός, κίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία.
Αλιεία και ιχθυοκαλλιέργεια	Κατασκευή λιμένων, εγκαταστάσεις απαραίτητου εξοπλισμού αλίευσης και ιχθυοκαλλιέργειας, εκροές εγκαταστάσεων ιχθυοκαλλιέργειας.	Υπεραλίευση, συνέπειες και σε άλλα είδη ιχθυοπανίδας, ρύπανση ακτών από εκροές απορριμμάτων και πετρελαιοπαραγωγών, υδατική ρύπανση, ευτροφισμός, εισαγωγή ξένων ειδών, καταστροφή οικοτόπων και μεταβολές στις θαλάσσιες κοινότητες.
Βιομηχανία (περιλαμβάνεται η παραγωγή ενέργειας)	Μεταβολές χρήσεων γης, ηλεκτροπαραγωγοί σταθμοί, εξαγωγή φυσικών πόρων, εκροές λυμάτων κατά τη διαδικασία παραγωγής, ψύξη υδάτων, ανεμόμυλοι, περιορισμοί ποταμών, φράγματα παλίρροιας και αντιπλημμυρικά έργα.	Απώλεια οικοτόπων και ποικιλίας ειδών, υδατική ρύπανση, ευτροφισμός, θερμική ρύπανση, μειωμένη παραγωγή πόσιμων υδάτων, δημιουργία ιζήματος στις παράκτιες ζώνες, διάβρωση ακτών.

**Πίνακας VI.** Ποσοστό % υγροτόπων με περιβαλλοντικές αλλοιώσεις – κύριες αιτίες (ΚΑΡΑΪΣΚΑΚΗ, 1996, ΣΤΑΜΑΤΙΟΥ, 1997 επεξεργασία).

<i>% ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ</i>	<i>ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΑΙΤΙΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΑΛΛΟΙΩΣΕΩΝ</i>
75,0 %	Ρύπανση από αστικά λύματα ή απορρίματα
62,5 %	Ρύπανση από γεωργικές δραστηριότητες
54,0 %	Παράνομο κινήγι
46,0 %	Ρύπανση από βιομηχανίες και βιοτεχνίες
37,5 %	Εκχερνώσεις
37,5 %	Ανεξέλεγκτη άντληση
33,0 %	Άλλα εγγειοβελτιωτικά έργα (π.χ. φράγματα, διευθετήσεις κοίτης)
33,0 %	Αλλοίωση του χαρακτήρα ή περιορισμός της έκτασης από διάφορες αιτίες (π.χ. καταπατήσεις)
33,0 %	Ανεξέλεγκτη βόσκηση, επιβλαβής για το οικοσύστημα
33,0 %	Υλοτομήσεις κυρίως παράνομες, με συνέπειες στα υγροτοπικά δάση
25,0 %	Πτώση της στάθμης της λίμνης
21,0 %	Ανεξέλεγκτες αμμοληψίες
21,0 %	Αυθαίρετη δόμηση
21,0 %	Κατασκευή έργων όπως: επέκταση αεροδρομίου, έργα διαχείρισης μονάδων υδατοκαλλιεργειών
21,0 %	Προσχώσεις
17,0 %	Επιχωματώσεις
12,5 %	Ρύπανση από κτηνοτροφικές δραστηριότητες
12,5 %	Υπεραλίευση ή μη ορθή αλίευση
8,0 %	Στραγγίσεις νόμιμες ή παράνομες
8,0 %	Υπερβολική αύξηση καλαμώνων

**VII. Βασική κοινοτική νομοθεσία για τη ρύπανση των υδάτων** (Καράκωστας, 2006).

**Γλυκά νερά – Αποχέτευση – Υγρά Απόβλητα.**

α. Οδηγία 75/439/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 16<sup>ης</sup> Ιουνίου 1975 περί διαθέσεως των χρησιμοποιούμενων ορυκτέλαιων, η οποία τροποποιήθηκε από τις οδηγίες 87/101/ ΕΟΚ και 91/692/ΕΟΚ.

β. Οδηγία 75/440/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 16<sup>ης</sup> Ιουνίου 1975 περί της απαιτούμενης ποιότητας των υδάτων επιφανείας που προορίζονται για τη παραγωγή πόσιμου ύδατος στα κράτη μέλη, όπως τροποποιήθηκε από τις οδηγίες 79/8689/ΕΟΚ και 91/692/ΕΟΚ.

- Οδηγία 76/160/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 8<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 1975 περί της ποιότητας των υδάτων κολυμβήσεως.

- Οδηγία 79/869/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 9<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1979 περί των μεθόδων μετρήσεως και περί της συχνότητας των δειγματοληψιών και της αναλύσεως των επιφανειακών υδάτων, τα οποία προορίζονται για τη παραγωγή πόσιμου ύδατος στα κράτη μέλη, η οποία τροποποιήθηκε από τις οδηγίες 81/855/ ΕΟΚ και 91/692/ΕΟΚ.

- Οδηγία 79/923/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 30<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1979 περί της απαιτούμενης ποιότητας των υδάτων για οστρακοειδή, η οποία τροποποιήθηκε από την οδηγία 91/692/ΕΟΚ.

γ. Οδηγία 80/778/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 15<sup>ης</sup> Ιουλίου 1980 περί της ποιότητας του πόσιμου νερού, η οποία καταργήθηκε από την οδηγία 98/83/ΕΚ.

δ. Οδηγία 76/464/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 4<sup>ης</sup> Μαΐου 1976 περί ρυπάνσεως που προκαλείται από ορισμένες επικίνδυνες ουσίες που εκχέονται στο υδάτινο περιβάλλον της Κοινότητας, όπως τροποποιήθηκε από την οδηγία 91/692/ΕΟΚ.

- Οδηγία 82/176/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 22ας Μαρτίου 1982 περί των οριακών τιμών και των ποιοτικών στόχων και τις απορρίψεις υδραργύρου από το βιομηχανικό τομέα της ηλεκτρολύσεως των χλωριούχων αλάτων αλκαλίων, όπως τροποποιήθηκε από την οδηγία 91/692/ΕΟΚ.

- Οδηγία 83/513/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 26<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1983 για τις οριακές τιμές και τους στόχους για τις απορρίψεις καδμίου, όπως τροποποιήθηκε από την οδηγία 91/692/ΕΟΚ.

- Οδηγία 83/156/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 8<sup>ης</sup> Μαρτίου 1984 για τις οριακές τιμές και τους ποιοτικούς στόχους, όσον αφορά τις απορρίψεις υδραργύρου σε τομείς

άλλους εκτός του τομέα της ηλεκτρολύσεως των χλωριούχων αλάτων και αλκαλίων.

- Οδηγία 84/491/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 9<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1984 σχετικά με τις οριακές τιμές και τους ποιοτικούς στόχους για τις απορρίψεις εξαχλωροκυκλοεξάνιου, όπως τροποποιήθηκε από την οδηγία 91/692/ΕΟΚ.

ε. Οδηγία 80/68/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 17<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 1979 περί προστασίας των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση που προέρχεται από ορισμένες επικίνδυνες ουσίες, όπως τροποποιήθηκε από την οδηγία 91/692/ΕΟΚ.

στ. Οδηγία 86/280/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 12<sup>ης</sup> Ιουνίου 1986 σχετικά με τις οριακές τιμές και τους ποιοτικούς στόχους για τις απορρίψεις ορισμένων επικίνδυνων ουσιών που υπάγονται στον κατάλογο Ι του παραρτήματος της Οδηγίας 76/464/ΕΟΚ, όπως τροποποιήθηκε από τις οδηγίες 88/347/ΕΟΚ και 91/692/ΕΟΚ.

- Οδηγία 88/347/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 16<sup>ης</sup> Ιουνίου 1988 για την τροποποίηση του παραρτήματος ΙΙ της Οδηγίας 86/280/ΕΟΚ σχετικά με τις οριακές τιμές και τους ποιοτικούς στόχους για τις απορρίψεις ορισμένων επικίνδυνων ουσιών που υπάγονται στον κατάλογο Ι του παραρτήματος της Οδηγίας 76/464/ΕΟΚ.

ζ. Οδηγία 91/271/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 21<sup>ης</sup> Μαΐου 1991 για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων, όπως τροποποιήθηκε από την οδηγία 98/15/ΕΚ.

η. Οδηγία 79/369/ΕΟΚ περί των μεθόδων μετρήσεως και περί της συχνότητας των δειγματοληψιών και της αναλύσεως των επιφανειακών υδάτων τα οποία προορίζονται για την παραγωγή πόσιμου ύδατος στα Κράτη Μέλη.

### **Στερεά Απόβλητα.**

α. Οδηγία 76/403/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 6<sup>ης</sup> Απριλίου 1976 περί της εξαλείψεως των πολυχλωροδιφαινυλίων και των πολυχλωροτριφαινυλίων.

- Οδηγία 78/319/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 20<sup>ης</sup> Μαρτίου 1978 περί των τοξικών και επικίνδυνων αποβλήτων

β. Οδηγία 84/631/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 6<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 1984 για την επιτήρηση και τον έλεγχο εντός της Ευρωπαϊκής Κοινότητας των διασυννοριακών μεταφορών επικίνδυνων αποβλήτων.

γ. Οδηγία 85/631/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 27<sup>ης</sup> Ιουνίου 1985 για τις συσκευασίες υγρών τροφίμων.

δ. Οδηγία 91/156/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 18<sup>ης</sup> Μαρτίου 1991 για την τροποποίηση της Οδηγίας 75/442/ΕΟΚ περί των στερεών αποβλήτων.

ε. Οδηγία 92/3/Ευρατόμ. «Επιτήρηση και έλεγχος των αποστολών ραδιενεργών αποβλήτων»

στ. Κανονισμός (ΕΚ) αριθ.2408/98 της Επιτροπής της 6<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 1998 για την τροποποίηση του παραρτήματος V του κανονισμού (ΕΟΚ) αριθ. 259/94 του Συμβουλίου σχετικά με την παρακολούθηση και έλεγχο των μεταφορών αποβλήτων στο εσωτερικό της Κοινότητας καθώς και κατά της είσοδο και έξοδο τους.

ζ. Οδηγία 75/442/ΕΟΚ περί των στερεών αποβλήτων.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Αλμπάνης Τ., (1999): Ρύπανση και Τεχνολογία Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων.
2. Αντωνόπουλος Β., (1991): "Υποβάθμιση των Υδατορευμάτων από το Νερό που Επιστρέφει μετά την Άρδευση". Γεωργική Έρευνα, 15 (2), 271-281.
3. Αντωνόπουλος Β., (1999): Υδρολογία της Ακόρεστης Ζώνης του Εδάφους, Υπηρεσίας Δημοσιευμάτων του Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
4. Αντωνόπουλος Β., (2001): Ποιότητα Επιφανειακών Υδατικών Πόρων, Υδατικοί Πόροι Ι Τεχνική Υδρολογία (υπ.εκδ), Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
5. Αντωνόπουλος Β., (2003): Ποιότητα και Ρύπανση Υπόγειων Νερών, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
6. Αντωνόπουλος Β., (2003): Υδραυλική Περιβάλλοντος και Ποιότητα Επιφανειακών Υδάτων, Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη.
7. Αντωνόπουλος Β., (2003) Ποιότητα και Ρύπανση Υδατικών Πόρων, ΕΠΕΑΕΚ II, Τμήμα Γεωπονίας, Α.Π.Θ.
8. Appelo C. and Postma D., (1994): Geochemistry, groundwater and pollution, Balkema, 536 p.
9. Bachmat Y., Collin M., (1987): Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution, Proc. And Information No 38. TNO Committee on Hydrogeology Research, Hague, Netherlands, 297-307.
10. Βουδούρης Κ., (2000): Θέματα Υδρογεωλογίας Περιβάλλοντος, Α.Π.Θ., Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.
11. Βουδούρης Κ., Γιαννάτος Γ., Διαμαντοπούλου Π., Ζάννης Π., Παπακωνσταντίνου, Κ., (2002): Αποτελέσματα του πιλοτικού προγράμματος τεχνητού εμπλουτισμού του υπό πίεση υδροφορέα της βιομηχανικής περιοχής Πατρών, μέσω βαθιών γεωτρήσεων. Πρακτικά 6ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου. Ξάνθη, 47-58.
12. Βουδούρης Κ., Μανδηλαράς Δ., (2004): Εκτίμηση της τρωτότητας των υπόγειων νερών με τη μέθοδο DRASTIC: Η περίπτωση του αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης του Γλαύκου (Ν. Αχαΐας). Υδροτεχνικά, Τόμος 14, Δεκέμβριος 2004, 17-30.
13. Βουδούρης Κ., Σούλιος Γ., Γιαννέλη Χ., Μανδηλαράς Δ., Αντωνάκος Α., (2005): Μέθοδοι υπολογισμού του φυσικού εμπλουτισμού των υπόγειων

- υδροφορέων. Πρακτικά 13ου Σεμιναρίου για την Προστασία του Περιβάλλοντος. Θεσσαλονίκη. Εργαστήριο Ελέγχου Ρύπανσης Περιβάλλοντος, Τμήμα Χημείας, ΑΠΘ, 105-120.
14. Bouwer H., (1996): Issues in artificial recharge. *Wat. Sci. Tech*, Vol. 33, No 10-11, 381-390.
  15. Daskalaki P., Voudouris K., (2006): Groundwater quality in porous aquifers in Greece: a synoptic review. *Las aguas subterranas en los paises mediterraneos. Publicaciones del Instituto Geologico y Minero de Espana. Serie: Hidrogeologia y aguas subterranas No 17, 135-142. Madrid.*
  16. Διαμαντής Ι. και Πεταλάς Χ., (1997): Πηγές Επιβάρυνσης (ρύπανσης) Παράκτιων Υδροφορέων – Τεχνικές Αναγνώρισης – Τρόποι Αντιμετώπισης, Πρακτικά Συνεδρίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Τόμος ΙΙ, ΤΕΕ Θεσσαλίας.
  17. Domenico A. & Schwartz W., (1998): *Physical and chemical hydrogeology.* Wiley & Sons.
  18. Θεοδωροπούλου Μ., Τεχνολογία Ρύπανσης, Τ.Ε.Ι Πάτρας, Τμήμα Μηχανολογίας.
  19. Hahn H., (1966): Der Koagulations Prozess, *Jahrbuck Von Wasser*, 33,172.
  20. Feigin A., Ravina I. and Shalhevet J., (1991): "Irrigation with Treated Sewage Effluent: Management for Environmental Protection", *Advance series in agricultural science*, Springer – Verlag, Berlin.
  21. Fontana Mars G., (1986): *Corrosion Engineering*, United States
  22. Herzog B., Pennino J. and Nielsen G., (1991): Ground-Water Sampling, In Nielsen, D.M. (ed.), *Practical Handbook of Ground-Water Monitoring*, Lewis publishers, U.S.A., pp 304-327.
  23. Καββαδάς Μ., (1996): Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής, ΕΜΠ.
  24. Καλλέργης Γ., (2000): Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. Τόμος Β' ΤΕΕ. Αθήνα.
  25. Καλλέργης Γ., (1986): Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία, Τ.Ε.Ε. Αθήνα.
  26. Καλλέργης Γ., (2001): Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη ρύπανση νερών και εδαφών. Πρακτικά ημερίδας «Υδρογεωλογία και Περιβάλλον». ΕΕΥ. Αθήνα 7-74.
  27. Καλύβας Δ., Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών στη Διαχείριση των Υδατικών Πόρων, Πολυτεχνική Σχολή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.



28. Κανελλοπούλου Ε., (2000): Ρύπανση του Περιβάλλοντος και Στοιχεία Εφαρμοσμένης Κλιματολογίας, Αθήνα.
29. Καραϊσκάκη Τ., (1996): Οι υγράτοποι που έγιναν σκουπιδότοποι, Η ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΗ, Κυρ. 14.07.1996,σελ.15.
30. Καρακώστας Ι., (2006): Περιβάλλον & Δίκαιο, Δίκαιο Διαχείρισης και Προστασίας των Περιβαλλοντικών Αγαθών, 2<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Αντ.Ν.Σάκκουλα, Αθήνα – Κομοτηνή.
31. Karyotis Th., Panagopoulos A., Kosmas C., Pateras D., Panoras A., Danalatos N., Yassoglou N., (2001): Guidelines for establishing a code for good agricultural practice in the river Pinios sedimentary basin, southern Greece. 12th World Fertilizer Congress, Beijing, China. Preprints (in press), Chinese Academy of Sciences, Beijing, China.
32. Κατσογιάννης Α., Κουϊμτζής Θ., (2005): Απολύμανση πόσιμου νερού με βάση το χλώριο. Σύγκριση των διαφόρων μεθόδων χλωρίωσης. Πρακτικά 13ου Σεμιναρίου για την Προστασία του Περιβάλλοντος. Τμήμα Χημείας ΑΠΘ. Θεσσαλονίκη, 137-152.
33. Κουϊμτζής Θ. και Ματής Κ., (1987): Αρχές Τεχνολογίας Αντιρρύπανσης, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
34. Κουϊμτζής Θ., (1994): Χημεία Περιβάλλοντος, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
35. Κουϊμτζής Θ., (1998): Χημεία Περιβάλλοντος, University Studio Press, Θεσσαλονίκη 1998.
36. Κουμαντάκης Ι., Παναγόπουλος Α., Σταυρόπουλος Ξ., Βουδούρης Κ., (1999): Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού στο παράκτιο υδροφόρο σύστημα του Βόρειου τμήματος του Νομού.
37. La Mer V.K., (1964): Coagulation Symposium Introduction, J. Colloid Sci., 19, 291
38. Λαμπράκης Ν., Τηνιακός Λ., Λαζάρου Α., Καλλέργης Γ., (1998): Νιτρορύπανση αγροτικής προέλευσης στα υπόγεια νερά (Πελοπόννησος). Πρακτικά 4ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη, 163-178.
39. Λέκκας Σ. με τη συνεργασία του Αλεξοπούλου Α., (1984): Μαθήματα Υδρογεωλογίας, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Δυναμικής Τεκτονικής Εφαρμοσμένης Τεχνολογίας, Αθήνα 1984.
40. Λέκκας Θ., (1996): Περιβαλλοντική Μηχανική Ι – Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, Μυτιλήνη.

41. Λέκκας Θ., (2001): Περιβαλλοντική Μηχανική ΙΙ-Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, Μυτιλήνη.
42. Margat J., (1968): Groundwater vulnerability maps, conception-estimation-mapping (in French). EEC Institut Europeen de l' Eau, Paris, France.
43. McCutcheon S.C., (1991): Water Quality Modeling: Biogeochemical Cycles in Rivers, CRC Press, Boca Raton, Fla.
44. Meybeck M., Chapman D.V. and Helmer R., (1990): "Global Freshwater Quality – A First Assessment" , WHO and UNEP, B.Blackwell, Ltd., U.K.
45. Μήτρακας Μ., (2001): Ποιοτικά Χαρακτηριστικά και Επεξεργασία Νερού, 2<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2001.
46. Mouchet P., (1992): From Conventional to Biological Removal Of Iron and Manganese in France, JAWWA 84, 158-167.
47. Νικολαΐδης Ν., (2005): Υδατική Χημεία, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
48. O'Connor J.T., (1971): Iron and Manganese in Water Quality and Treatment, A Handbook of Public Water Supplies, McGraw-Hill, 3<sup>rd</sup> Ed., New York.
49. Olmer M., Rezac B., (1974): Methodical principles of maps for protection of groundwater in Bohemia and Moravia, scale geologists. Montpellier, France, Memoires, Tome 10, 1.
50. Πουλοβασίλης Α., (1980): Τεχνητός εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφόρων σχηματισμών. Πρακτικά ΙΙ Πανελληνίου Σεμιναρίου Υδρολογίας. Τόμος ΙΙ, 587-600.
51. Πρακτικά 3ου Συνεδρίου ΕΕΔΥΠ, Διαχείριση Υδατικών Πόρων σε Νησιώτικες και Παράκτιες Περιοχές, Μάιος 1997, Αθήνα.
52. Rao S., Alley K., (1996): Groundwater quality in the Niva river basin, Chittoor district, India. Environmental Geology 32 (1) Jyle 1997, 56-63.
53. Σαββάκης Κ., (2002): Χημική Τεχνολογία, Εισαγωγή στη Περιβαλλοντική Τεχνολογία, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
54. Σταματίου Ε., (1997): Σειρα Ερευνητικών Εργασιών, 9(21):489-512, Χωρικές Δυσλειτουργίες και Περιβαλλοντικές Αλλοιώσεις στους Παράκτιους Νομούς της Ελλάδας – Προβλήματα και Προοπτικές, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης.
55. Στουρνάρας Γ.Κ., (1997): Ειδικά θέματα Υδρογεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας. Παν. Αθηνών.
56. Στουρνάρας Γ. Κ., (2000): Ειδικά Μαθήματα Γεωλογικών Εφαρμογών, Αθήνα.

57. Streeter H.W. and Phelps E.B., (1925): 'A study of the pollution and natural purification of the Ohio River', U.S. Public Health Service Bulletin No. 146.
58. Sturman P.J., Stewart P.S., Cunningham A.B., Bouwer E.J., Wolfram J.H., (1995): Engineering scale-up of in situ bioremediation processes, a review. J. Contam. Hydrol. 19, 171-203.
59. Sun N.Z., (1995): Mathematical modeling of groundwater pollution, Springer-Verlang, Berlin.
60. Τερζίδης Γ. και Καραμούζης Δ., (1985): Υδραυλική Υπόγειων Νερών, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
61. Τεχνική Έκθεση, (1980): Πρόγραμμα Ελέγχου Ρυπάνσεως Περιβάλλοντος Αθήνας, Τόμος II, Αθήνα.
62. Τσιούρης Σ. και Γεράκης Π., (1991): Υγρότοποι της Ελλάδας: Αξίες, Αλλοιώσεις και Προστασία. Τμήμα Γεωπονίας, WWF και IUCN, Θεσσαλονίκη.
63. Τσιούρης Σ., (2001): Θέματα Προστασίας Περιβάλλοντος, Εκδόσεις Γαρταγάνη, Θεσσαλονίκη.
64. U.S. Geological Survey, (2002): Assessing groundwater vulnerability to contamination: Providing scientifically defensible information for decision makers. U.S.G.S., Dep. Of the Interior. Circular 1224, Reston, Virginia.
65. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1991): "A review of methods for assessing the sensitivity of aquifers to pesticide contamination" , U.S. EPA, Office of Grounwater Protection Washington DC, preliminary document.
66. U.S.N.R.C. (1992): Restoration of aquatic ecosystems. Nation. Acad. Press., pp. 552.
67. Villumsen A., Jacobsen O.S., Sonderskov C., (1983): Mapping of vulnerability of groundwater reservoirs with regard to surface pollution. Year book 1982, Geological Survey of Denmark, Copenhagen, 17-38.
68. Voudouris K. , Panagopoulos A., Koumantakis I., (2004): Nitrate pollution in the coastal aquifer system of the Korinthos Prefecture (Greece). Global Nest: The International Journal, Vol. 6, No 1, 31-38, 2004.
69. Χρίστουλας Δ., (1991): Ρύπανση των Υδάτων και Αντιρυπαντική Τεχνολογία 1<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
70. [www.watersave.gr](http://www.watersave.gr)
71. [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov)

72. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)