

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ  
ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ  
ΠΕΡΙΟΧΩΝ**

**ΦΩΤΗΣ ΡΗΓΑΣ  
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΑΘΗΝΑ 2013**



## Αντί Προλόγου

Πέμπτον ἐπέταξεν αὐτῷ ἄθλον τῶν Αὐγείου βοσκημάτων ἐν ἡμέρᾳ μιᾷ μόνον ἐκφορῆσαι τὴν ὄνθον. ....

Ἡρακλῆς ..... τῆς τε αὐλῆς τὸν θεμέλιον διεῖλε καὶ τὸν Ἀλφειὸν καὶ τὸν Πηγειὸν σύνεγγυς ῥέοντας παροχeteύσας ἐπήγαγεν, ἔκρουν δι' ἄλλης ἐξόδου ποιήσας.

### Απόδοση στα Νέα Ελληνικά

Πέμπτο δε ἄθλο τον διέταξε (ο Ευρυσθέας) να βγάλει ἔξω (ἀπό τους στάβλους) σε μια ημέρα την κόπρη του Αυγεία.

Ο Ηρακλῆς ἀφῆρεσε ἓνα μέρος των θεμελίων της αυλῆς και αφού (δι' οχετού) διοχέτευσε τον Αλφειό και τον Πηγειό, που ἔρρεαν εκεί κοντά, τους ἔρριψε επάνω (ἔρριψε τα ὕδατα επάνω στους σωρούς της κόπρου), αφού ἔκαμε ἄλλη διέξοδο προς εκροή των υδάτων.

«Βιβλιοθήκη» Απολλοδώρου του Ασκληπιάδου, 180-119 π.Χ.



# **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>1.</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	1
1.2	ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ.....	4
1.2.1	Είδη υδροφορέων.....	4
1.2.2	Υδραυλικό ύψος.....	5
1.2.3	Πορώδες.....	6
1.2.4	Υδραυλική αγωγιμότητα.....	7
1.2.5	Ροή προς φρεάτιο άντλησης.....	8
1.3	ΒΑΘΜΟΣ ΩΡΙΜΑΝΣΗΣ Η ΦΑΣΗ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ.....	11
1.4	ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ.....	14
1.4.1	Στρατηγικές επιλογές.....	14
1.4.2	Στρατηγικές λήψης αποφάσεων.....	14
<b>2</b>	<b>ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΥΣ.....</b>	<b>17</b>
2.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	17
2.1.1	Πλεονεκτήματα επί τόπου επεξεργασίας.....	17
2.1.2	Μειονεκτήματα επί τόπου επεξεργασίας.....	17
2.2	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	18
2.3	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ.....	18
2.3.1	Απόληψη ατμών εδάφους.....	19
2.3.1.1	Γενικά.....	19
2.3.1.2	Προκαταρκτικός έλεγχος αποτελεσματικότητας.....	21
2.3.1.3	Λεπτομερής αξιολόγηση αποτελεσματικότητας.....	22
2.3.1.3.1	Καθοριστικοί παράγοντες της διαπερατότητας εδάφους.....	23
2.3.1.3.2	Καθοριστικοί παράγοντες της πηκτικότητας των ρύπων.....	25
2.3.1.4	Σχεδιασμός συστήματος απόληψης ατμών εδάφους.....	27
2.3.1.4.1	Ορθολογικός σχεδιασμός.....	28
2.3.1.4.2	Παρακολούθηση προόδου της εξυγίανσης.....	36
2.3.1.5	Κριτήρια επιλογής και σχεδιασμού.....	38
2.3.2	Βιοαερισμός.....	40
2.3.2.1	Γενικά.....	40
2.3.2.2	Προκαταρκτικός έλεγχος αποτελεσματικότητας.....	42
2.3.2.3	Λεπτομερής αξιολόγηση αποτελεσματικότητας.....	43
2.3.2.3.1	Χαρακτηριστικά της περιοχής.....	44
2.3.2.3.2	Χαρακτηριστικά ρύπων.....	47
2.3.2.4	Σχεδιασμός συστήματος βιοαερισμού εδάφους.....	49
2.3.2.4.1	Ορθολογικός σχεδιασμός.....	50
2.3.2.4.2	Παρακολούθηση προόδου της εξυγίανσης.....	54
2.3.2.5	Κριτήρια επιλογής και σχεδιασμού.....	55
2.3.3	Βιοαναρρόφηση.....	57
2.3.4	Αγροκαλλιέργεια.....	58
2.3.4.1	Γενικά.....	58
2.3.4.2	Αξιολόγηση αποτελεσματικότητας.....	60
2.3.4.2.1	Χαρακτηριστικά εδάφους.....	61
2.3.4.2.2	Χαρακτηριστικά ρύπων.....	65
2.3.4.2.3	Κλιματικές συνθήκες.....	66
2.3.4.2.4	Βιοεπεξεργασιμότητα.....	67
2.3.4.3	Σχεδιασμός συστήματος αγροκαλλιέργειας.....	68
2.3.4.4	Παρακολούθηση λειτουργίας και εξέλιξης.....	70
2.3.4.5	Κριτήρια επιλογής και σχεδιασμού.....	70
2.3.5	Πλύση και έκπλυση εδάφους.....	72
2.3.6	Θερμική επεξεργασία.....	73
2.3.6.1	Ατμοποίηση.....	73
2.3.6.2	Στερεοποίηση ή υαλοποίηση.....	74
2.3.7	Ηλεκτροκινητική.....	75
2.3.8	Φυτοεξυγίανση.....	76
2.3.8.1	Γενικά.....	76

2.3.8.2	Περιγραφή της Τεχνολογίας.....	78
2.3.8.2.1	Φυτομετασχηματισμός.....	78
2.3.8.2.2	Ριζοσφαιρική Βιοεξυγίανση.....	82
2.3.8.2.3	Φυτοσταθεροποίηση.....	83
2.3.8.2.4	Φυτοεκχύλιση ή φυτοαπόληψη.....	84
2.3.8.2.5	Ριζοδιήθηση.....	84
2.3.8.3	Εφαρμογές και αποδόσεις.....	85
2.3.8.3.1	Περιορισμοί.....	85
2.3.8.3.2	Αποδόσεις.....	88
2.3.8.4	Σχεδιασμός συστήματος φυτοεξυγίανσης.....	91
2.3.8.4.1	Επιλογή φυτού.....	92
2.3.8.4.2	Επεξεργασιμότητα.....	93
2.3.8.4.3	Πυκνότητα και διάταξη φυτέματος.....	93
2.3.8.4.4	Άρδευση, αγρονομικές εισροές και συντήρηση.....	94
2.3.8.4.5	Σύλληψη και διαπνοή υπόγειων νερών.....	95
2.3.8.4.6	Ρυθμός πρόσληψης ρύπου και χρόνος καθαρισμού.....	97
2.3.8.4.7	Ανάλυση αστοχιών.....	98
2.3.8.5	Παραδείγματα.....	98
2.3.8.6	Κόστος.....	101
2.3.8.7	Θεσμικά ζητήματα.....	103
2.3.8.8	Συμπεράσματα εφαρμογής της φυτοεξυγίανσης.....	104
2.3.9	Φυσική απομείωση.....	106
2.3.10	Συστήματα παράδοσης / ανάκτησης.....	106
2.3.11	Οικονομική σύγκριση μεθόδων ακόρεστης ζώνης.....	108
2.4	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΝΕΡΟΥ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗΣ ΖΩΝΗΣ.....	109
2.4.1	Άντληση ελεύθερου προϊόντος.....	109
2.4.2	Βιοαναρρόφηση.....	109
2.4.3	Συστήματα άντλησης και επεξεργασίας υπόγειου νερού.....	110
2.4.4	Επί τόπου βιοεξυγίανση.....	111
2.4.4.1	Άντληση και επανέγχυση.....	111
2.4.4.2	Εμφύσηση αέρα.....	112
2.4.5	Τοιχία επεξεργασίας.....	113
2.4.6	Φυσική απομείωση.....	114
2.4.7	Σύγκριση τεχνολογιών κορεσμένης ζώνης.....	114
2.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ.....	115
<b>3</b>	<b>ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ.....</b>	<b>117</b>
3.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	117
3.1.1	Σύγκριση εντός και εκτός τόπου εξυγίανσης νερού.....	117
3.1.2	Ευνοϊκές συνθήκες για εκτός τόπου επεξεργασία νερού.....	118
3.1.3	Απομακρυνόμενα συστατικά από υπόγεια νερά.....	118
3.2	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΚΤΟΣ ΤΟΠΟΥ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΝΕΡΟΥ.....	119
3.3	ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ.....	121
3.4	ΠΡΟ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	122
3.5	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΔΙΑΛΥΜΕΝΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ.....	123
3.5.1	Απογύμνωση με αέρα.....	123
3.5.2	Απογύμνωση με ατμό.....	124
3.5.3	Προχωρημένη οξείδωση.....	125
3.5.4	Ρόφηση σε ενεργό άνθρακα.....	128
3.5.5	Βιοαντιδραστήρες.....	129
3.5.6	Διαχωρισμός με μεμβράνες.....	131
3.5.7	Σύγκριση τεχνολογιών απομάκρυνσης οργανικών.....	132
3.6	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΔΙΑΛΥΜΕΝΩΝ ΑΝΟΡΓΑΝΩΝ ΡΥΠΩΝ.....	132
3.6.1	Οξείδωση και αναγωγή.....	132
3.6.2	Προσρόφηση.....	133
3.6.3	Διαχωρισμός με μεμβράνες.....	133
3.6.4	Ιοντεναλλαγή.....	134
3.6.5	Καταβύθιση.....	134
3.6.6	Κροκίδωση / Θρόμβωση.....	135
3.6.7	Διήθηση.....	136

3.6.8 Σύγκριση τεχνολογιών απομάκρυνσης ανόργανων ουσιών.....	136
3.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ .....	137
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</b>	<b>139</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>147</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ .....</b>	<b>151</b>





# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Βασικές έννοιες

**Προστασία περιβάλλοντος** είναι το σύνολο των μέτρων που αποσκοπούν στη διατήρηση των φυσικών, χημικών και βιολογικών χαρακτηριστικών του, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η λειτουργία του ως φιλόξενο βιότοπου όλων των σημερινών μορφών ζωής πάνω στον πλανήτη. Όσον αφορά το ανθρώπινο είδος ειδικότερα, η προστασία του περιβάλλοντος επεκτείνεται και στην αποφυγή περιβαλλοντικών διαταραχών, που μπορούν να επηρεάσουν δυσμενώς την αισθητική, την ψυχική κατάσταση, τη διασκέδαση και την πνευματική και σωματική του υγεία.

**Εξυγίανση περιβάλλοντος** είναι το σύνολο των τεχνικών που αποσκοπούν στην αποκατάσταση στα φυσιολογικά επίπεδα όλων των περιβαλλοντικών παραμέτρων που έχουν διαταραχθεί από ανθρώπινες δραστηριότητες. Η επιλογή των απαιτούμενων τεχνικών εξυγίανσης δεν προκαθορίζεται, αλλά εξαρτάται από τα ειδικά χαρακτηριστικά και εξειδικεύεται σε κάθε συγκεκριμένη περίπτωση ρύπανσης μιας περιοχής.

Ένας γενικός ορισμός της **εξυγίανσης ρυπασμένων περιοχών** είναι ο καθαρισμός από ρύπους ενός στερεού μέσου όπως το έδαφος ή ενός υγρού μέσου όπως το υπόγειο νερό. Υπάρχουν όμως μερικές περιπτώσεις που δεν υπάρχει καθόλου καθαρισμός, αλλά μόνο περιορισμός ή ακινητοποίηση των ρύπων. Είναι φανερό λοιπόν ότι ο όρος εξυγίανση έχει ευρύτερη έννοια από τον καθαρισμό. Έτσι, ο πληρέστερος ορισμός της εξυγίανσης αφορά στην ανάπτυξη και εφαρμογή συστηματικών διαδικασιών για την απομάκρυνση, καταστροφή, περιορισμό ή άλλου τρόπου μείωση της διαθεσιμότητας των ρύπων σε καθορισμένους αποδέκτες.

Οι **ρυπασμένες ή μολυσμένες περιοχές** χαρακτηρίζονται από το είδος της ανθρώπινης δραστηριότητας που προκάλεσε τη ρύπανση ή τη μόλυνση. Οι περιοχές αυτές μπορεί να είναι πολύ μικρές σε έκταση ή πολύ μεγάλες. Μπορεί ακόμη να αποτελούνται από μολυσμένο έδαφος, μολυσμένο επιφανειακό ή υπόγειο νερό, άλλο υγρό ή ατμούς μέσα στους πόρους του μολυσμένου εδάφους και ιζήματα.

Με τον όρο **επί τόπου (in situ) εξυγίανση** νοείται η εξυγίανση που εφαρμόζεται στην περιοχή ρύπανσης χωρίς προηγούμενη εκσκαφή εδάφους ή ιζημάτων, ή άντληση υπόγειου νερού. Τέτοιες τεχνολογίες χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό εδάφους στην ακόρεστη ζώνη ή εδάφους και υπόγειου νερού στην κορεσμένη ζώνη. Με τον όρο **εκτός τόπου (ex situ) εξυγίανση** νοείται η εξυγίανση ρυπασμένου υλικού που έχει προηγουμένως εκσκαφεί ή απομακρυνθεί μόνιμα ή προσωρινά από την αρχική θέση για επεξεργασία. Η εκτός τόπου επεξεργασία μπορεί να γίνει στη ρυπασμένη περιοχή με κινητό εξοπλισμό (*on-site*) ή σε άλλη περιοχή σε κινητές ή μόνιμες εγκαταστάσεις, οπότε πρόκειται για **απομακρυσμένη (off-site) εξυγίανση**.

**Μόλυνση** είναι η παρουσία μέσα στο περιβαλλοντικό μέσο υψηλών συγκεντρώσεων ουσιών, ιζημάτων, ή οργανισμών, ή ενέργειας πάνω από το φυσιολογικό επίπεδο τιμών του μέσου ή του οργανισμού.

**Ρύπανση** είναι η εισαγωγή από τον άνθρωπο στο περιβαλλοντικό μέσο, άμεσα ή έμμεσα, ουσιών ή ενέργειας που έχουν ως αποτέλεσμα επιβλαβείς επιπτώσεις, όπως καταστροφές των βιολογικών πόρων, κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία, παρεμπόδιση δραστηριοτήτων (συμπεριλαμβανομένης της αλιείας), υποβάθμιση της ποιότητας του μέσου όσον αφορά τις διάφορες χρήσεις του και μείωση των διευκολύνσεων που αυτό παρέχει. Σχετικές έννοιες είναι ο **ρύπος** (ρυπαίνουσα ουσία ή ενέργεια) και ο **ρυπαντής** (αυτός που ρυπαίνει).

Με άλλα λόγια η μόλυνση παρέχει ένα προειδοποιητικό σήμα, αλλά δεν συνιστά ρύπανση, εκτός και αν, πρώτον, προκαλείται από ανθρώπινη δραστηριότητα και, δεύτερον, έχει κάποια δυσμενή επίπτωση. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι ακόμη και αν εργαστηριακές μελέτες δείχνουν ότι η μολύνουσα ουσία είναι τοξική σε ορισμένους οργανισμούς που φυσιολογικά υπάρχουν στο μέσο, αυτό μπορεί να παρέχει ένα πιθανώς εντονότερο προειδοποιητικό σήμα, αλλά δεν αποδεικνύει απαραίτητα ότι η ουσία αυτή έχει επιβλαβή αποτελέσματα στο φυσικό περιβάλλον.

Από αυστηρά βιολογική άποψη, ακόμα και αν μία τοξική ουσία προκαλέσει το θάνατο μερικών φυτών ή ζώων στο φυσικό περιβάλλον, αυτό έχει συνήθως μικρή βαρύτητα, εκτός και αν οι θάνατοι προκαλούν αλλαγές στην πληθυσμιακή σύνθεση στο σύνολό της, δηλαδή στο οικοσύστημα. Οι περισσότεροι θαλάσσιοι οργανισμοί για παράδειγμα, αναπαράγονται σε κολοσσιαία κλίμακα και το μεγαλύτερο μέρος του γόνου πεθαίνει πρόωρα από διάφορους φυσικούς παράγοντες. Οι θάνατοι από τοξικές ουσίες μπορεί να είναι εντελώς ασήμαντοι σε σύγκριση με αυτές τις φυσικές απώλειες και μπορεί να μην έχουν καμία σημαντική επίπτωση στο σύνολο του πληθυσμού.

Η "εισαγωγή από τον άνθρωπο" σημαίνει ότι εξαιρούμε από αυτό τον ορισμό τα φυσικά φαινόμενα που μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα την τροποποίηση του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, η εισροή μεγάλων ποσοτήτων αργίλου από ένα ποτάμι σε μία λίμνη ή στη θάλασσα προκαλεί ένα ασυνήθιστο χρωματισμό. Πρόκειται για ένα φυσικό φαινόμενο που όμως δεν συνιστά ρύπανση. Αντίθετα, το ίδιο φαινόμενο της τροποποίησης της όψης του νερού, αν προκαλείται από εισροές που περιέχουν ανόργανες ουσίες ως αποτέλεσμα ανθρώπινης δραστηριότητας, για παράδειγμα από τη λειτουργία ενός λατομείου ή μίας τσιμεντοβιομηχανίας, συνιστά ρύπανση.

Δεδομένου ότι ο όρος μόλυνση έχει επικρατήσει στην ελληνική ορολογία στις περιπτώσεις βιολογικών μολυσματικών παραγόντων και ραδιενεργού μόλυνσης, εφεξής θα χρησιμοποιείται στο εγχειρίδιο αυτό αδιακρίτως ο όρος ρύπανση και μόνο σε περιπτώσεις που απαιτείται θα γίνεται διάκριση των όρων μόλυνση και ρύπανση.

Οι διάφορες **πηγές** οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν χημική ρύπανση είναι:

- Διαρροές από δεξαμενές ή χώρους απόθεσης, όπως κλίνες ξήρασης βιομηχανικών αποβλήτων και χώροι ταφής αστικών ή βιομηχανικών αποβλήτων.
- Ατυχήματα που καταλήγουν σε πετρελαιοκηλίδες ή κηλίδες χημικών ουσιών στο έδαφος ή σε υδάτινο αποδέκτη.
- Απόβλητα πυρηνικών εργοστασίων που προκαλούν ραδιενεργό μόλυνση.
- Ανεξέλεγκτη διάθεση χημικών ουσιών στο περιβάλλον.
- Συσσώρευση ρύπων από σημειακές ή μη σημειακές πηγές.
- Ακούσιες εκλύσεις ρύπων από βιομηχανικές ή εμπορικές δραστηριότητες.
- Παροπλισμός εγκαταστάσεων, όπως κτήρια, βιομηχανίες, αεροδρόμια, χώροι εκπαίδευσης πυροσβεστών και χώροι στρατιωτικής εκπαίδευσης.

Αυτοί οι παράγοντες έχουν άμεση επενέργεια προκαλώντας ρυπάνσεις που μπορούμε να αποκαλέσουμε **πρωτογενείς**, αλλά υπάρχουν και άλλοι που αξιολογούνται ως **δευτερογενείς** και βασίζονται σε βιολογικές και βιοχημικές διαταραχές των ειδών που ζουν σε ένα περιβαλλοντικό μέσο προκαλώντας ανισορροπία μεταξύ των ειδών. Έτσι, η διευθέτηση της κοίτης ενός ποταμού, ή η ανακατασκευή των οχθών του μπορεί να τροποποιήσει τα ρεύματα και να προκαλέσει μία στασιμότητα του νερού, πράγμα που θα αυξήσει το φορτίο σε οργανικό υλικό και θα προκαλέσει ενδεχομένως φαινόμενα ευτροφισμού, προκαλώντας ζημιά στη βιολογική ποιότητα του νερού.

Έτσι, οι **κατηγορίες** των ουσιών που ενδέχεται να προκαλέσουν μόλυνση ή ρύπανση είναι δυνατό να είναι:

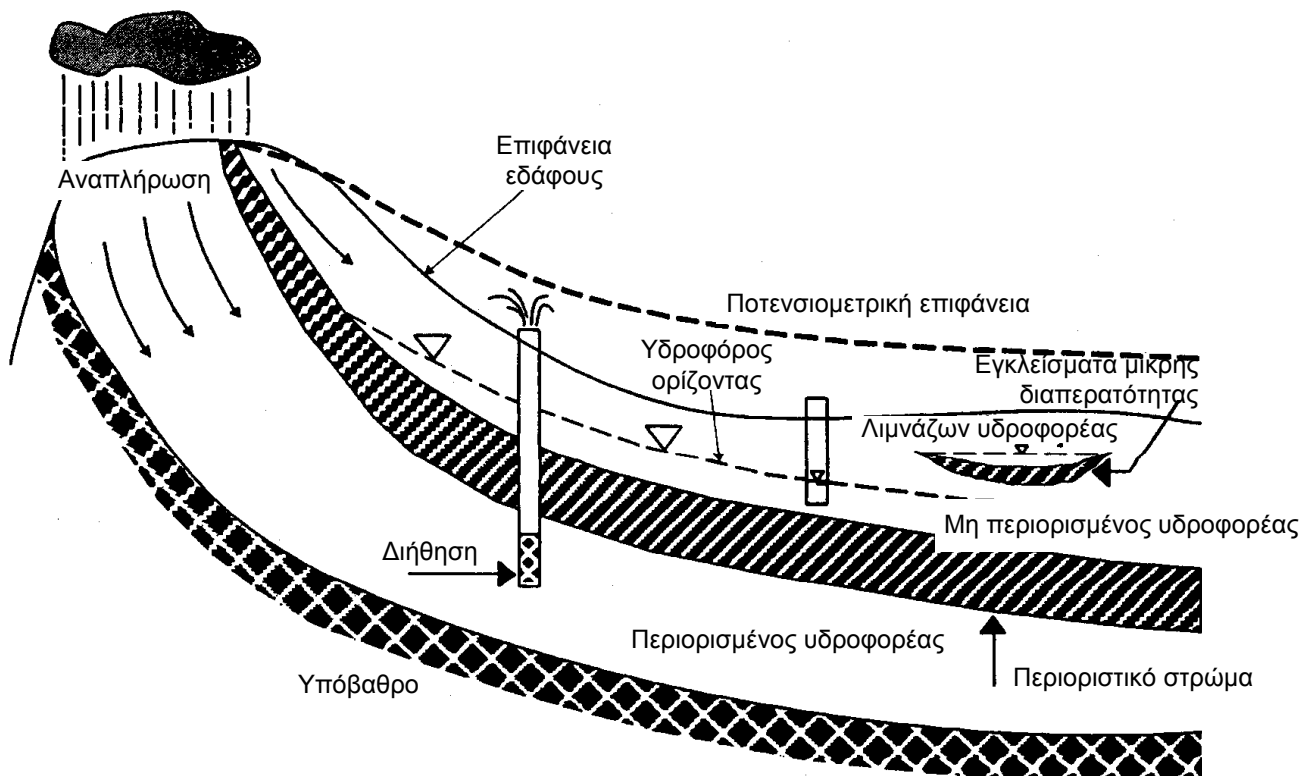
- Θρεπτικά (π.χ. άζωτο, φωσφόρος και κάλιο) ή ουσίες που καταναλώνουν οξυγόνο (π.χ. αστικά ή κτηνοτροφικά λύματα και αγροτικά ή βιομηχανικά παραπροϊόντα) με περιβαλλοντικές επιπτώσεις την πρόκληση ευτροφισμού, τη μείωση του οξυγόνου στο περιβαλλοντικό μέσο και την ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών.
- Τοξικές οργανικές ουσίες (π.χ. διοξίνες, πολυχλωριωμένα διφαινύλια και αγροχημικά) που μπορεί να προκαλέσουν θανάτους, τερατογενέσεις, μεταλλάξεις, ανοσοκαταστολή ή άλλα προβλήματα υγείας σε ανθρώπους και άλλους ζωντανούς οργανισμούς.
- Τοξικά μέταλλα (π.χ. κάδμιο, μόλυβδος, υδράργυρος και ψευδάργυρος) με ανάλογες επιπτώσεις.
- Ραδιενεργές ουσίες (π.χ. ουράνιο, καίσιο και ραδόνιο) που εκτός από την ενδεχόμενη τοξικότητα, εκπέμπουν επιπλέον ιοντίζουσες ακτινοβολίες (ακτίνες Χ, βήτα, ή γάμμα).
- Οχληρές ουσίες και επικίνδυνα υλικά (π.χ. αιωρούμενα στερεά στο νερό ή στον αέρα και βλήματα πυροβολικού σε πεδίο δοκιμών) τα οποία μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα γεύσης στο νερό, οσμές,

προβλήματα επικαθίσεων σε αγωγούς και συστήματα επεξεργασίας και κινδύνους έκρηξης.

## 1.2 Υπόγειοι υδροφορείς

### 1.2.1 Είδη υδροφορέων

Ένας **υδροφορέας (aquifer)** είναι μία γεωλογική μονάδα που μπορεί να διατηρήσει και να μεταφέρει νερό. Πολλοί γεωλογικοί σχηματισμοί μπορούν να λειτουργήσουν ως υδροφορείς, όπως αυτοί που εμφανίζονται σε αμμώδη εδάφη και σε πορώδη και διαπερατά πετρώματα. Διακρίνονται δύο είδη υδροφορέων, μη περιορισμένοι και περιορισμένοι υδροφορείς (Σχ. 1.1).



Σχήμα 1.1. Σχηματισμοί διαφόρων υδροφορέων στο υπέδαφος.

**Μη περιορισμένοι υδροφορείς (unconfined aquifers)** είναι διαπερατοί σχηματισμοί που περιλαμβάνουν μία φρεατική επιφάνεια (υδροφόρος ορίζοντας) ως άνω όριο που αυξομειώνεται εποχιακά και ημερήσια. Οι μη περιορισμένοι υδροφορείς βρίσκονται συνήθως κοντά στην επιφάνεια του εδάφους με τον υδροφόρο ορίζοντα σε άμεση επαφή με την ατμόσφαιρα. Ένας ειδικός τύπος μη περιορισμένου υδροφορέα είναι ο **λιμνάζων ή στάσιμος υδροφορέας (perched aquifer)** που εμφανίζεται όταν το νερό της βροχής κατά τη διείσδυσή του στο έδαφος μέσω της ακόρεστης ζώνης συναντά ένα στρώμα

μικρής διαπερατότητας και έκτασης, όπως εγκλείσματα αργίλου σε αμμώδες έδαφος. Αυτός ο υδροφορέας έχει γενικά μικρή παραγωγικότητα και τα αποθέματά του εξαντλούνται σε σύντομο χρονικό διάστημα.

**Περιορισμένοι υδροφορείς (confined aquifers)** σχηματίζονται όταν διαπερατές ζώνες περικλείονται από γεωλογικούς σχηματισμούς μικρής διαπερατότητας. Αυτοί οι υδροφορείς είναι πλήρως κορεσμένοι, βρίσκονται υπό πίεση και δεν έχουν υδροφόρο ορίζοντα. Οι συνθήκες πίεσης χαρακτηρίζονται από την ποτενσιομετρική επιφάνεια, που εκφράζει την ολική πίεση (σε ύψος στήλης νερού). Δίνεται από το ύψος στο οποίο ανεβαίνει η στάθμη του νερού μέσα σε φρεάτια που εισχωρούν μέχρι τον υδροφορέα. Η στάθμη του νερού σε αυτές τις περιπτώσεις υπερβαίνει την επιφάνεια του ανώτερου αδιαπέραστου στρώματος και ισορροπεί στη στάθμη που εξισώνεται με την ατμοσφαιρική πίεση. Σε μερικές μάλιστα περιπτώσεις η ποτενσιομετρική επιφάνεια μπορεί να είναι υψηλότερη από την επιφάνεια του εδάφους, οπότε το νερό αναβλύζει με φυσικό τρόπο από το φρεάτιο χωρίς άντληση (αρτεσιανά φρεάτια).

Η ροή του νερού στο υπέδαφος εξαρτάται από την υδραυλική κλίση, αλλά και από τις ιδιότητες του υδροφορέα, όπως το πορώδες, η υδραυλική αγωγιμότητα, η διαπερατότητα και η χωρητικότητα.

## 1.2.2 Υδραυλικό ύψος

Το υπόγειο νερό κινείται στο υπέδαφος από περιοχές μεγαλύτερου **υδραυλικού ύψους (hydraulic head)** προς περιοχές χαμηλότερου υδραυλικού ύψους. Το υδραυλικό ύψος σε κάθε θέση δίνεται από την εξίσωση του Bernoulli:

$$h = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \quad (1.1)$$

όπου  $h$  είναι το υδραυλικό ύψος,  $z$  η ανύψωση της στάθμης πάνω από το επίπεδο αναφοράς,  $p$  η πίεση ενός υγρού σταθερής πυκνότητας  $\rho$ ,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $v$  η ταχύτητα του ρευστού.

Ο όρος της πίεσης στην εξίσωση αυτή είναι:

$$h_p = \frac{p}{\rho g} \quad (1.2)$$

Κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα στην κορεσμένη ζώνη ο όρος πίεσης είναι μεγαλύτερος από την ατμοσφαιρική πίεση ( $h_p > 0$ ). Επίσης, επειδή στην περίπτωση αυτή οι ταχύτητες κίνησης του νερού στο υπέδαφος είναι συνήθως πολύ μικρές ο όρος ταχύτητας στην Εξ. (1.1) παραλείπεται.

### 1.2.3 Πορώδες

Πορώδες ( $\varepsilon$ ) είναι ο λόγος του κενού χώρου ( $V_V$ ) προς τον ολικό όγκο ( $V_T$ ) ενός μέσου:

$$\varepsilon = \frac{V_V}{V_T} \quad (1.3)$$

Το πορώδες καθορίζεται από την πάκτωση των κόκκων του εδάφους, το σχήμα των κόκκων και την κοκκομετρική σύνθεση. Το πορώδες είναι ένα μέτρο της ποσότητας νερού που μπορεί να συγκρατήσει το κορεσμένο μέσο, δεν μπορεί να εκφράσει όμως πόσο νερό μπορεί να αποδώσει το μέσο. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται να είναι γνωστό το **ενεργό πορώδες ( $\varepsilon_e$ )**, που είναι ο λόγος του κενού χώρου μέσω του οποίου μπορεί να συμβεί ροή του ρευστού προς τον ολικό όγκο. Εφόσον μέρος του ολικού πορώδους καταλαμβάνεται από στατικό υγρό που συγκρατείται στην επιφάνεια των κόκκων με επιφανειακή τάση, το ενεργό πορώδες είναι μικρότερο από το ολικό πορώδες. Τυπικές τιμές του πορώδους διαφόρων εδαφών δίνονται στον Πίν. 1.1.

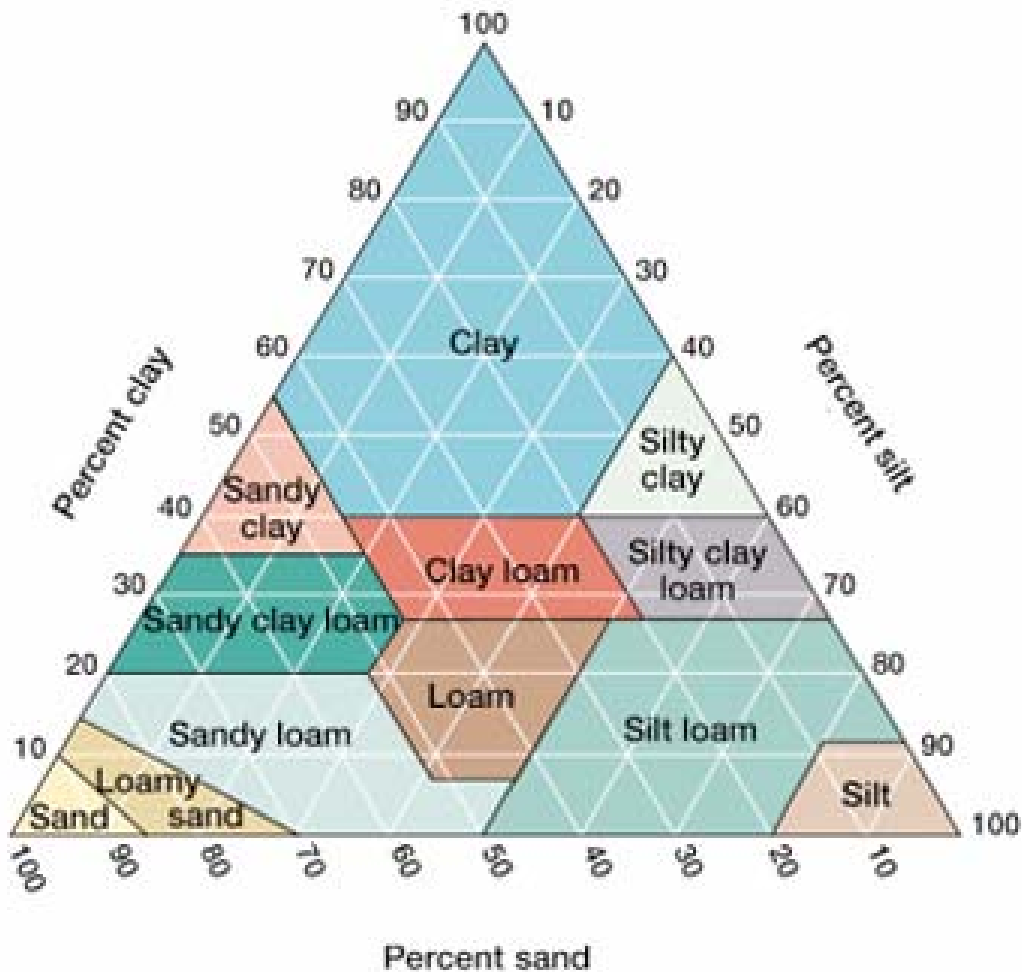
Πίνακας 1.1. Τιμές ενεργού πορώδους και υδραυλικής αγωγιμότητας.

Τύπος εδάφους	Πορώδες (%)	Υδραυλική αγωγιμότητα	
		Περιγραφή	K (cm/s)
Χάλικες (gravel)	25 - 40	Υψηλή διαπερατότητα	$10^{-2} - 1$
Άμμος	25 - 50	Μέση διαπερατότητα	$10^{-3} - 10^{-1}$
Ιλυώδης άμμος	30 - 50	Μικρή διαπερατότητα	$10^{-5} - 10^{-3}$
Ιλύς, αμμώδης ιλύς, αργιλώδης άμμος	35 - 50	Πολύ μικρή διαπερατότητα	$10^{-6} - 10^{-4}$
Άργιλος	33 - 60	Πρακτικά αδιαπέραστη	$10^{-9} - 10^{-6}$

Τα διάφορα εδάφη κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με την υφή του εδάφους (soil texture) που βασίζεται στην αναλογία των κόκκων άμμου (sand), ιλύος (silt) και αργίλου (clay). Οι κόκκοι αργίλου έχουν διάμετρο μικρότερη από 0,002 mm (2  $\mu$ m), η ιλύς κυμαίνεται από 0,002 μέχρι 0,05 mm και η άμμος από 0,05 έως 2 mm. Στο τριγωνικό διάγραμμα του Σχ. 1.2 φαίνεται το βασικό σύστημα ταξινόμησης υφών εδαφους του U.S. Department of Agriculture.

Τα ποσοστά και των τριών κλασμάτων εμφανίζονται στο ίδιο διάγραμμα. Οι κορυφές του τριγώνου αντιπροσωπεύουν το 100% καθενός από τα τρία βασικά συστατικά (άμμος, ιλύς και άργιλος). Τα πηλώδη εδάφη (loams) είναι τα ευκολότερα καλλιεργούμενα εδάφη και αποτελούνται από ένα μίγμα, στο οποίο

τα τρία κλάσματα εμφανίζονται σε παραπλήσιες αναλογίες. Έτσι, αυτά τα εδάφη εμφανίζονται γύρω από την κεντρική περιοχή του τριγωνικού διαγράμματος.



Σχήμα 1.2. Σύστημα ταξινόμησης υφών εδάφους του U.S. Department of Agriculture.

#### 1.2.4 Υδραυλική αγωγιμότητα

Σε περιοχές όπου τα εδάφη στην κορεσμένη ζώνη είναι όμοια με αυτά της ακόρεστης ζώνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η υδραυλική αγωγιμότητα των εδαφών για τον υπολογισμό της διαπερατότητάς των. **Υδραυλική αγωγιμότητα** είναι ένα μέτρο της ικανότητας του εδάφους να επιτρέπει τη διέλευση του νερού, η οποία μπορεί να προσδιορισθεί εργαστηριακά.

Ο ρυθμός μεταφοράς μέσω ενός ομογενούς μέσου είναι ανάλογος προς την υδραυλική κλίση που προκαλεί τη ροή. Αυτή η σχέση είναι γνωστή ως **νόμος του Darcy** και εκφράζεται ως:

$$Q = K \cdot A \cdot S = \varepsilon \cdot v \cdot A \quad (1.4)$$

όπου:

Q: είναι η ποσότητα του υγρού που διέρχεται δια μέσου μιας επιφάνειας A ανά μονάδα χρόνου ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )

K: συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας (εξαρτάται από το είδος του εδάφους) ( $\text{cm}/\text{sec}$ )

S: υδραυλική κλίση, δηλαδή η διαφορά στάθμης του νερού ανάμεσα σε δύο σημεία διαιρούμενη με την απόσταση που διανύει το υγρό

A: η επιφάνεια της διατομής μέσα από την οποία περνά το υγρό ( $\text{cm}^2$ )

v: η ταχύτητα ροής του υγρού ( $\text{cm}/\text{s}$ )

e: το πορώδες, δηλαδή ο λόγος του κενού προς το συνολικό όγκο του εδάφους.

Η **εσωτερική διαπερατότητα** μπορεί να υπολογισθεί από την υδραυλική αγωγιμότητα με τη σχέση:

$$k = K (\mu / \rho g) \quad (1.5)$$

όπου: k: είναι η εσωτερική διαπερατότητα ( $\text{cm}^2$ )

K: η υδραυλική αγωγιμότητα ( $\text{cm}/\text{sec}$ )

$\mu$ : το ιξώδες του νερού ( $\text{g}/\text{cm}\cdot\text{sec}$ )

$\rho$ : η πυκνότητα του νερού ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $\text{cm}/\text{sec}^2$ ).

$$\text{Σε } 20^\circ\text{C: } (\mu / \rho g) = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ cm}\cdot\text{sec.}$$

Για μετατροπή του k από  $\text{cm}^2$  σε μονάδες Darcy, αυτό πολλαπλασιάζεται επί  $10^8$ .

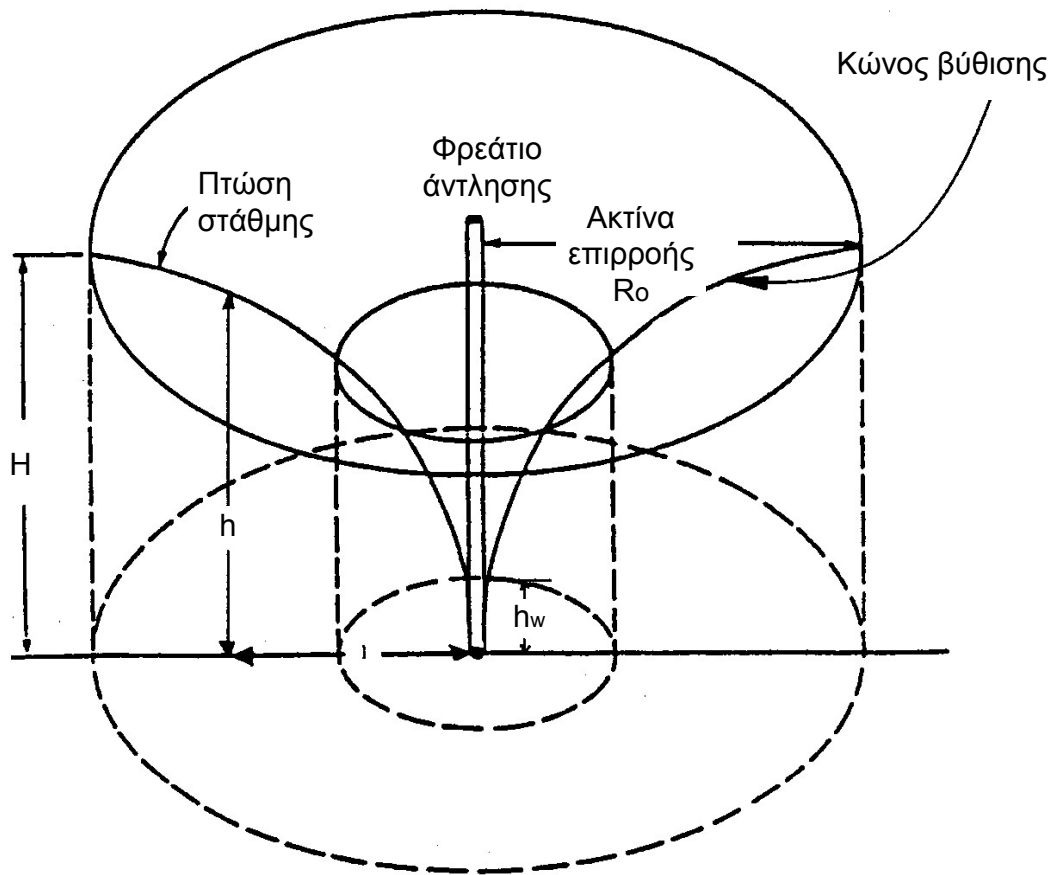
Προσεγγιστικές τιμές του ενεργού πορώδους και της υδραυλικής αγωγιμότητας παρατίθενται επίσης στον Πίν. 1.1.

### 1.2.5 Ροή προς φρεάτιο άντλησης

Τα φρεάτια άντλησης διανοίγονται για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών ενός υπόγειου υδροφορέα, αλλά και την εξυγίανση μολυσμένου υπόγειου νερού. Συνεπώς, στην τελευταία περίπτωση πρέπει να μπορεί να υπολογισθεί η παροχή του νερού προς ένα φρεάτιο άντλησης. Στο Σχ. 1.3 απεικονίζεται η ροή του υπόγειου νερού προς τον φρεαταγωγό.

Με την έναρξη της άντλησης η στάθμη του νερού κοντά στο φρεάτιο χαμηλώνει με την πιο χαμηλή στάθμη σε επαφή με το φρεάτιο. Η ταπείνωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα είναι μικρότερη σε μεγαλύτερες αποστάσεις από το φρεάτιο και σε κάποια απόσταση η πτώση στάθμης είναι αμελητέα, σχηματίζοντας έτσι τον **κώνο βύθισης (cone of depression)**. Η απόσταση από το κέντρο του φρεατίου μέχρι τα όρια του κώνου βύθισης ονομάζεται **ακτίνα επιρροής (radius of influence,  $R_0$ )**.

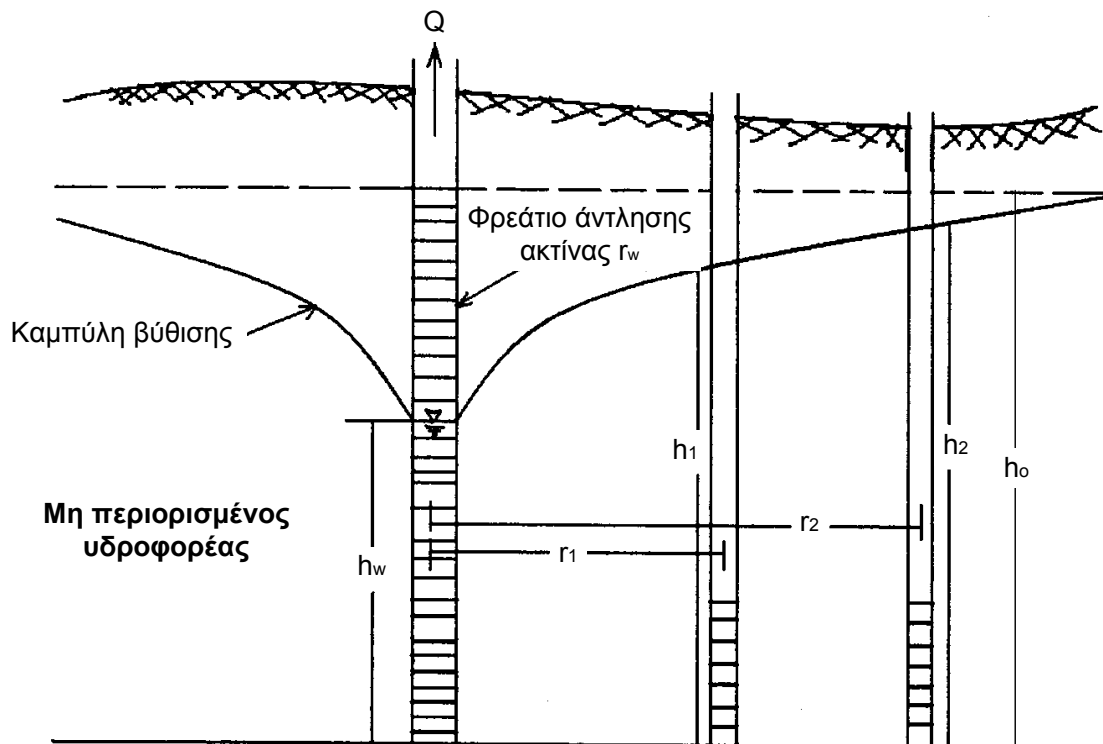




Σχήμα 1.3. Σχηματισμός κώνου ταπείνωσης της στάθμης υδροφόρου ορίζοντα σε φρεάτιο άντλησης.

Το σχήμα και το μέγεθος του κώνου ταπείνωσης εξαρτάται από το ρυθμό άντλησης, το χρόνο άντλησης και τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα. Έχουν αναπτυχθεί σχέσεις υπολογισμού που περιγράφουν τη μη σταθερή και τη σταθερή κατάσταση, τόσο για περιορισμένους όσο και για μη περιορισμένους υδροφορείς. Όλες αυτές οι σχέσεις βασίζονται στην υπόθεση ότι το μέσο των υδροφορέων είναι ομοιογενές και ισότροπο και η ροή ακτινική.

Στο Σχ. 1.4 φαίνεται η ταπείνωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και ο κώνος βύθισης σε ένα μη περιορισμένο υδροφορέα και σε συνθήκες σταθερής κατάστασης.



Σχήμα 1.4. Ακτινική ροή προς φρεάτιο άντλησης σε ένα μη περιορισμένο υδροφόρο.

Η σχέση που περιγράφει τη ροή είναι τότε:

$$Q = \pi K \frac{h_2^2 - h_1^2}{\ln(r_2 / r_1)} \quad (1.6)$$

### Παράδειγμα 1.1

Σε μη περιορισμένο υδροφόρο διανοίγεται φρεάτιο βάθους 20 m κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα και τοποθετείται σωληναγωγός εσωτερικής διαμέτρου 20 cm. Αντλείται νερό μέχρι αποκατάστασης σταθερής κατάστασης με αντλία παροχής 210 L/min, οπότε παρατηρείται πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα ίση με 1 m σε απόσταση 5 m από τον άξονα του σωληναγωγού και πτώση ίση με 0,8 m σε απόσταση 10 m.

Υπολογίστε το συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους και την πτώση στάθμης στο χαμηλότερο σημείο του κώνου βύθισης.

### Λύση

Τα δεδομένα του προβλήματος είναι:

$$Q = 210 \text{ L/min} = 0.0035 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H_0 = 20 \text{ m}$$

$$D_w = 20 \text{ cm} \rightarrow r_w = 0,1 \text{ m}$$

$$r_1 = 5 \text{ m} \rightarrow h_0 - h_1 = 1 \text{ m}$$

$$r_2 = 10 \text{ m} \rightarrow h_0 - h_2 = 0,8 \text{ m}$$

Τότε από την Εξ. (1.6) προκύπτει:

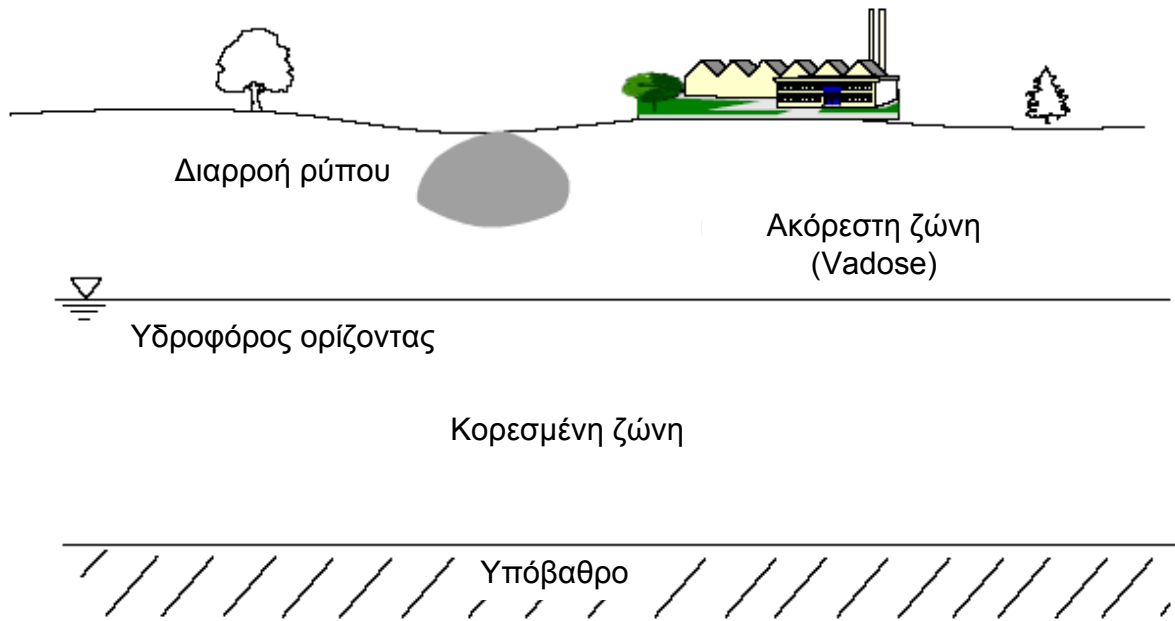
$$0,0035 = \pi \times K \times \frac{(20 - 0,8)^2 - (20 - 1)^2}{\ln(10/5)} \rightarrow K = 1,011 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Το χαμηλότερο σημείο του κώνου βύθισης βρίσκεται σε επαφή με το σωληναγωγό άντλησης, δηλαδή σε απόσταση  $r_w$  από τον άξονα του σωληναγωγού, οπότε εφαρμόζοντας πάλι την Εξ. (1.6) προκύπτει:

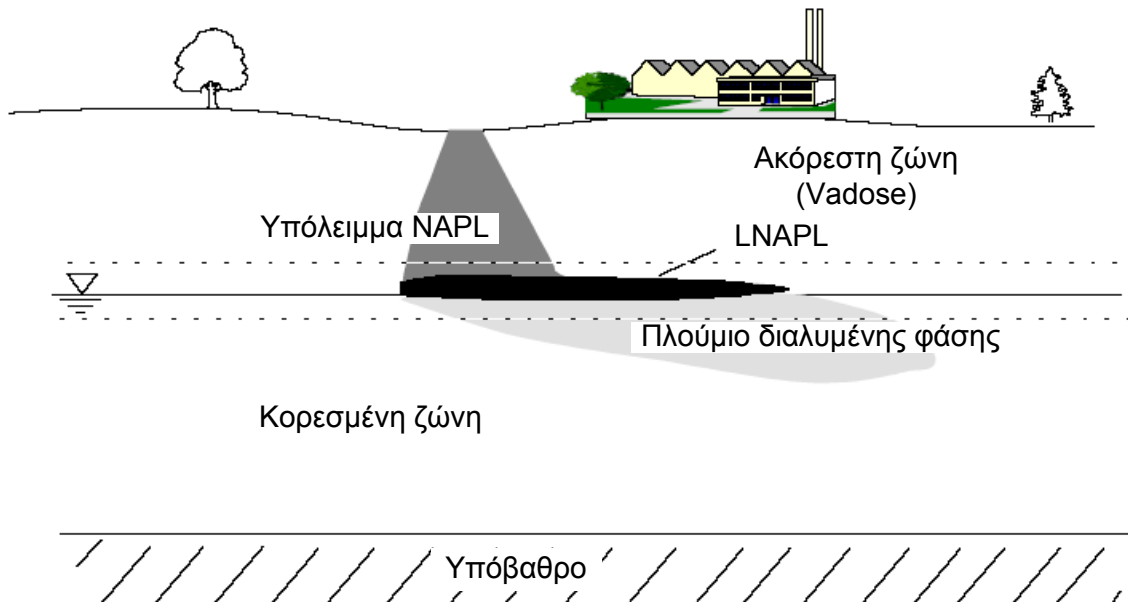
$$0,0035 = \pi \times 1,011 \times 10^{-4} \times \frac{(20 - 1)^2 - (20 - x)^2}{\ln(5/0,1)} \rightarrow \underline{\underline{x = 2,17 \text{ m}}}$$

### 1.3 Βαθμός ωρίμανσης ή φάση εξέλιξης της ρύπανσης

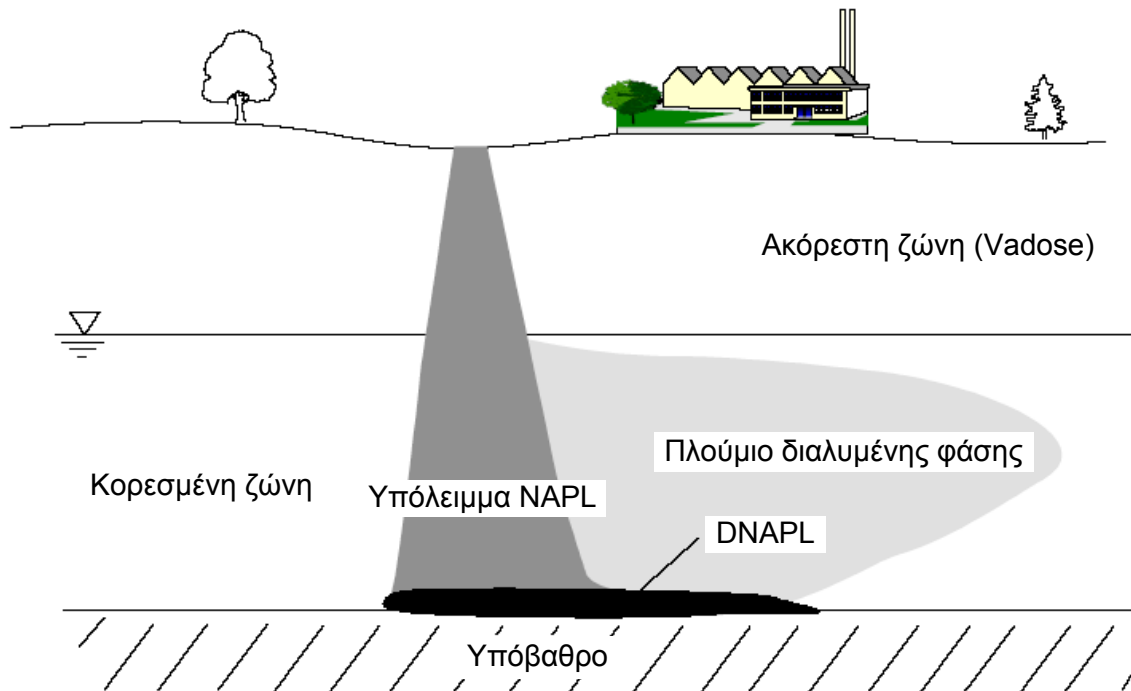
Σημαντικό ρόλο στην επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξυγίανσης παίζει ο βαθμός ωρίμανσης ή η φάση εξέλιξης της ρύπανσης, λόγω της δυναμικής φύσης (κινητικότητας) των ρύπων στο περιβάλλον. Έτσι, οι ρυπασμένες περιοχές μπορεί να έχουν πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά ανάλογα με το χρονοδιάγραμμα της ρύπανσης και την ταχύτητα διασποράς ενός ρύπου. Η κίνηση για παράδειγμα ενός υγρού ρύπου δια μέσου εδαφικών στρωμάτων εξαρτάται κυρίως από το ειδικό του βάρος. Διακρίνουμε λοιπόν τις περιπτώσεις ελαφρού μη υδατικής φάσης υγρού (ΕΜΥΦΥ) ή στην Αγγλική ορολογία light non-aqueous phase liquid (LNAPL) και αυτή του πυκνού μη υδατικής φάσης υγρού (ΠΜΥΦΥ) ή dense non-aqueous phase liquid (DNAPL). Η κατάσταση αμέσως μετά τη διαρροή ενός ρύπου στο έδαφος φαίνεται στο Σχήμα 1.5, ενώ οι ώριμες καταστάσεις όπου ο ρύπος έχει διαπεράσει την ακόρεστη σε νερό ζώνη (vadose zone) και έχει εισχωρήσει σε βάθος μέσα στην κορεσμένη ζώνη για τις περιπτώσεις υγρού ρύπου μικρού ειδικού βάρους (LNAPL) και μεγάλου ειδικού βάρους (DNAPL) απεικονίζονται στα Σχήματα 1.6 και 1.7, αντιστοίχως.



Σχήμα 1.5. Απεικόνιση μόλυνσης εδάφους αμέσως μετά τη διαρροή ενός ρύπου.



Σχήμα 1.6. Τυπική προχωρημένη μόλυνση εδάφους με ελαφρό μη υδατικής φάσης υγρό (LNAPL).



Σχήμα 1.7. Τυπική προχωρημένη μόλυνση εδάφους με πυκνό μη υδατικής φάσης υγρό (DNAPL).

Στο Σχ. 1.5 απεικονίζεται η μόλυνση του εδάφους αμέσως μετά τη διαρροή ενός ρύπου στην επιφάνειά του και την εισχώρηση σε μικρό βάθος στο έδαφος μακριά ακόμη από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα από τον οποίο αρχίζει η κορεσμένη ζώνη. Στα Σχ. 1.6 και 1.7 έχει μεσολαβήσει σημαντικό χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα οι ρύποι να έχουν εισχωρήσει σε βάθος. Το έδαφος τόσο στην ακόρεστη όσο και την κορεσμένη ζώνη έχει μολυνθεί, υπάρχει ελεύθερο ρυπαντικό υγρό μέσα στους πόρους του εδάφους, καθώς και διαλυμένη ουσία στο υπόγειο νερό που σχηματίζει υγρό πλούμιο (plume), σε αντιστοιχία με τα αέρια πλούμια των καπνοδόχων. Η διαφορά στις δύο τελευταίες περιπτώσεις είναι ότι στα ελαφρά υγρά η ρυπαίνουσα ουσία φθάνει στον υδροφόρο ορίζοντα όπου και επιπλέει, ενώ τα πυκνά υγρά συνεχίζουν την προς τα κάτω πορεία τους μέχρι να συναντήσουν ένα αδιαπέραστο στρώμα όπως το βραχώδες υπόβαθρο του εδάφους ή ένα στρώμα αργίλου.

Τα σενάρια περιπλέκονται και η εξυγίανση καθίσταται πολύ δύσκολη, αν το υπέδαφος έχει ρήγματα στα οποία θα εισχωρήσει ο υγρός ρύπος. Αν αντιθέτως το υπόβαθρο ή ένα αδιαπέραστο στρώμα αργίλου βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια και πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα τότε η εξυγίανση είναι εύκολη υπόθεση.

## 1.4 Στρατηγικές εξυγίανσης

### 1.4.1 Στρατηγικές επιλογές

Το πλήθος των ειδικών τεχνικών (μεθόδων) εξυγίανσης ρυπασμένων περιοχών είναι πολύ μεγάλο, αλλά αυτό των στρατηγικών επιλογών είναι περιορισμένο, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.8. Έτσι, η προσέγγιση του θέματος θα γίνει στη συνέχεια στη βάση των στρατηγικών επιλογών, δηλαδή:

- Επί τόπου εξυγίανση εδάφους και υπόγειου νερού
- Άντληση και επεξεργασία υπόγειου νερού
- Επεξεργασία απαερίων
- Επί τόπου περιορισμός
- Εκτός τόπου εξυγίανση μετά από εκσκαφή

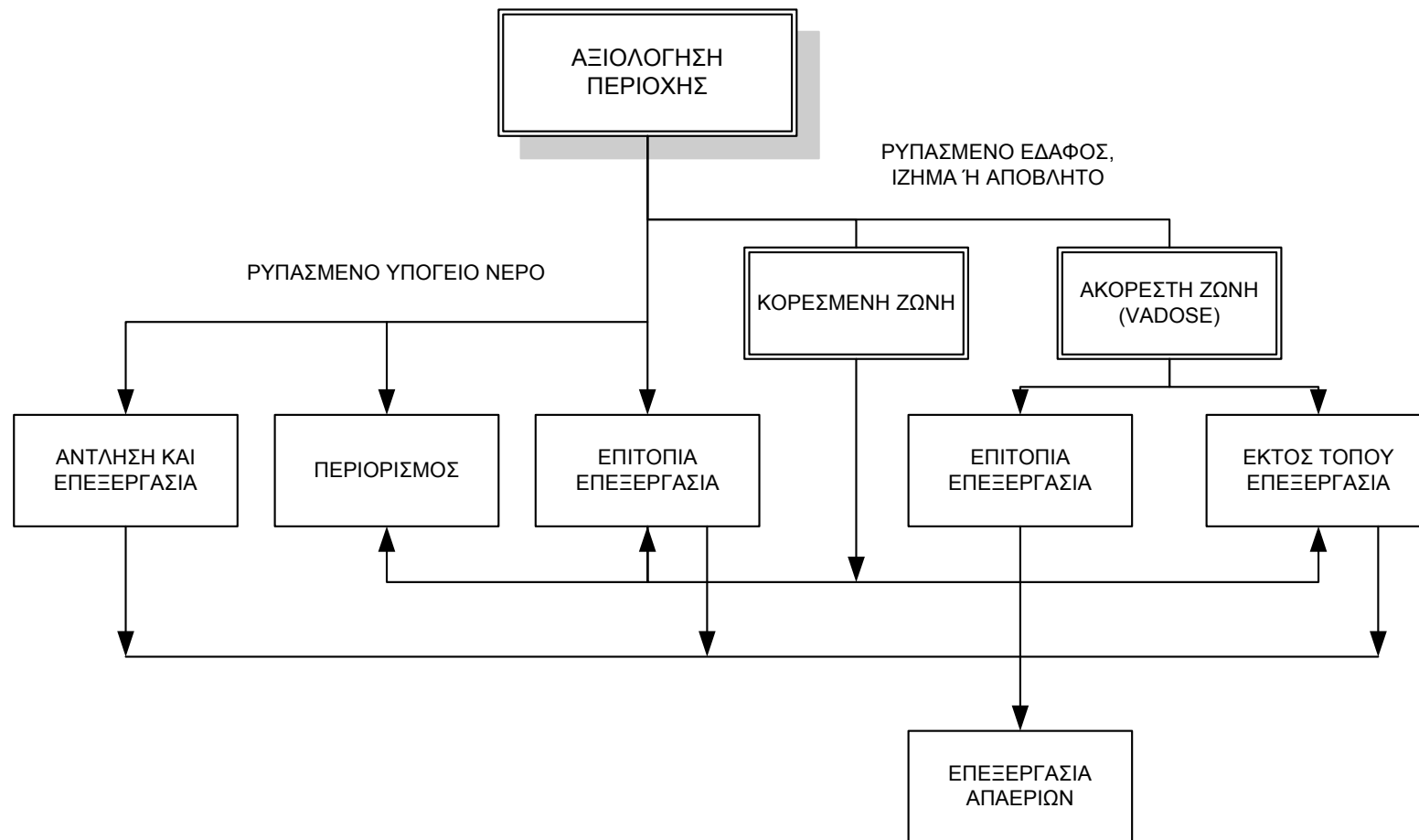
### 1.4.2 Στρατηγικές λήψης αποφάσεων

Η στρατηγική λήψης αποφάσεων πριν από οποιαδήποτε επιλογή μεθόδου εξυγίανσης φαίνεται ότι παραβλέπεται στις περισσότερες περιπτώσεις και οι διάφοροι μελετητές έχουν την τάση να εστιάζουν το ενδιαφέρον τους στις ειδικές τεχνολογίες επεξεργασίας παρά στις γενικές επιλογές εξυγίανσης. Συνήθως μάλιστα το αρχικό στάδιο παρακάμπτεται και προεπιλέγεται αμέσως η τεχνολογία επεξεργασίας, είτε από τον ιδιοκτήτη της περιοχής, είτε από το μελετητή.

Τρεις είναι οι φάσεις στις στρατηγικές λήψης αποφάσεων που εφαρμόζονται συνήθως, αφού όμως έχει προηγηθεί η αρχική προσεκτική αξιολόγηση της περιοχής:

#### **1<sup>η</sup> Φάση: Καθορισμός στόχων εξυγίανσης και κριτηρίων**

- Πλήρης χαρακτηρισμός της ρυπασμένης περιοχής.
- Καθορισμός απαιτήσεων και κριτηρίων και προσδιορισμός του κρατικού ή ιδιωτικού οργάνου παρακολούθησης του έργου και πιστοποίησης του αποτελέσματος.
- Προσδιορισμός των τεχνικών, περιβαλλοντικών και χρονικών περιορισμών.
- Καθορισμός του τελικού στόχου του έργου και των εξειδικευμένων κριτηρίων καθαρισμού.



Σχήμα 1.8. Διάγραμμα ροής γενικών επιλογών εξυγίανσης ρυπασμένων περιοχών.

**2<sup>η</sup> Φάση: Διαλογή των εναλλακτικών λύσεων**

- Καταγραφή όλων των γενικών επιλογών εξυγίανσης, συμπεριλαμβανομένης της μη επέμβασης (Σχ. 1.7).
- Απόρριψη των περιβαλλοντικά μη αποδεκτών και των τεχνικά ανέφικτων επιλογών.
- Καταγραφή όλων των υποεπιλογών των επιλεγμένων γενικών επιλογών.
- Απόρριψη όλων των υποεπιλογών που δεν είναι αποδεκτές για τους παραπάνω λόγους.

**3<sup>η</sup> Φάση: Επιλογή της τελικής λύσης**

Οι μέθοδοι που μπορούν να εφαρμοστούν για την τελική επιλογή της καταλληλότερης λύσης μεταξύ αυτών που θα παραμείνουν στον κατάλογο των υποεπιλογών της δεύτερης φάσης είναι:

- Σταθμισμένη αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων (π.χ. πολυκριτηριακή ανάλυση).
- Ανάλυση κόστους/οφέλους.
- Ομοφωνία των υπεύθυνων φορέων.
- Πρόσκληση για ανταγωνιστικές μελετητικές προσφορές.

Κάθε υποψήφια μέθοδος πρέπει να αξιολογηθεί σε τέσσερα στάδια:

**Στάδιο 1:** Ένας **προκαταρκτικός έλεγχος αποτελεσματικότητας** της μεθόδου θα προσφέρει πληροφορίες για το εάν αυτή είναι αποτελεσματική στη συγκεκριμένη περίπτωση ή όχι.

**Στάδιο 2:** Στη **λεπτομερή αξιολόγηση αποτελεσματικότητας** θα χρησιμοποιηθούν κριτήρια επιλεξιμότητας. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθούν τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του εδάφους και των ρύπων, θα συγκριθούν αυτά με τις τιμές αποτελεσματικότητας της μεθόδου, θα αποφασισθεί η εκτέλεση ή όχι πιλοτικής μελέτης και θα τεκμηριωθεί η καταλληλότητα της μεθόδου.

**Στάδιο 3:** Θα ακολουθήσει μία **αξιολόγηση του σχεδιασμού** με σκοπό την τελική επιλογή της μεθόδου στη βάση πιλοτικών ή άλλων μελετών και ελέγχου του σχεδιασμού εκτέλεσης εργασιών κατασκευής.

**Στάδιο 4:** Η **αξιολόγηση των σχεδίων λειτουργίας και παρακολούθησης** θα δώσει πληροφορίες για την επάρκεια των ελέγχων εκκίνησης και λειτουργίας του συστήματος και την καταλληλότητα των σχεδίων παρακολούθησης της περιοχής μετά την ολοκλήρωση του έργου.



## **2 ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΥΣ**

### **2.1 Γενικά**

Οι τεχνολογίες επί τόπου (in situ) επεξεργασίας εφαρμόζονται στο ρυπασμένο υλικό χωρίς να προηγηθεί εκσκαφή του εδάφους ή ιζήματος ή να αντληθεί υπόγειο νερό. Χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό εδάφους στην ακόρεστη ζώνη ή εδάφους και υπόγειου νερού στην κορεσμένη ζώνη.

Η επί τόπου επεξεργασία εμφανίζει ορισμένα πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα έναντι της εκτός τόπου επιλογής, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη διαμόρφωση της επιλογής της καταλληλότερης μεθόδου επεξεργασίας.

#### **2.1.1 Πλεονεκτήματα επί τόπου επεξεργασίας**

Οι τεχνολογίες επί τόπου επεξεργασίας είναι συνήθως πιο οικονομικές και λιγότερο παρεμβατικές στο περιβάλλον σε σχέση με τις εκτός τόπου, οι οποίες απαιτούν την εκσκαφή ρυπασμένου υλικού και μεταφορά του σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας που βρίσκονται συχνά σε άλλη χώρα. Αντιθέτως, η επί τόπου επεξεργασία δεν απαιτεί βαρύ εξοπλισμό και μόνιμες εγκαταστάσεις, ούτε και μεγάλες εδαφικές εκτάσεις για την εγκατάσταση του εξοπλισμού. Επιπροσθέτως, ελαχιστοποιεί την έκθεση ανθρώπων και περιβάλλοντος σε τοξικές ουσίες, κάτι που συμβαίνει στην εκτός τόπου επεξεργασία με την εξόρυξη ρυπασμένου υλικού, τους χειρισμούς στην επιφάνεια του εδάφους και τη μεταφορά σε άλλο μέρος για επεξεργασία. Οι κίνδυνοι αυτοί σε συνδυασμό με την εναντίωση της κοινής γνώμης σε εκτός τόπου επεμβάσεις, οι τεχνολογίες επί τόπου επεξεργασίας γίνονται συχνά πιο εύκολα αποδεκτές.

#### **2.1.2 Μειονεκτήματα επί τόπου επεξεργασίας**

Οι τεχνολογίες επί τόπου επεξεργασίας όμως εκτός από πλεονεκτήματα έχουν και ορισμένους τεχνολογικούς περιορισμούς κυρίως σε περιπτώσεις δυσμενών περιβαλλοντικών συνθηκών, ενώ γενικά απαιτούν μεγαλύτερους χρόνους επεξεργασίας από τις εκτός τόπου τεχνολογίες. Οι τοπικοί παράγοντες που μπορεί να καταστήσουν μια επί τόπου επεξεργασία λιγότερο αποτελεσματική περιλαμβάνουν μικρή διαπερατότητα εδάφους, ανομοιογένειες του υπεδάφους και εμπόδια πρόσβασης στις ρυπασμένες ζώνες.

Η χαμηλή διαπερατότητα του εδάφους μπορεί να δυσκολέψει την εισχώρηση ρευστών επεξεργασίας, όπως οξυγόνου και επιφανειακά ενεργών ουσιών, μέσα στο υπέδαφος. Οι ανομοιογένειες του υπεδάφους εξάλλου μπορεί να οδηγήσουν τα ρευστά επεξεργασίας σε ζώνες με μεγαλύτερη διαπερατότητα, με συνέπεια οι ζώνες με μικρότερη διαπερατότητα να επεξεργάζονται λίγο ή καθόλου. Η μέθοδος θρυμματοποίησης του εδάφους όμως που θα περιγραφεί παρακάτω μπορεί να βοηθήσει στο ξεπέραςμα αυτού του προβλήματος.

Η κατανομή του ρύπου που καθορίζεται από παράγοντες όπως η φύση του (ελαφρό μη υδατικής φάσης υγρό – LNAPL ή αντιθέτως πυκνό μη υδατικής φάσης υγρό - DNAPL) μπορεί να καθορίσουν την εφαρμοσιμότητα μιας επί τόπου επεξεργασίας, καθώς και το είδος και την αλληλουχία των επί μέρους διεργασιών που θα απαιτηθούν. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός ελαφρού υγρού, αυτό συνήθως αντλείται στην επιφάνεια, και δεν επεξεργάζεται επί τόπου. Επί τόπου επεξεργασία μπορεί να είναι όμως εφικτή και για ρύπους διαλυμένους στο υπόγειο νερό.

Όσον αφορά την αλληλουχία των διεργασιών, απομακρύνονται πρώτα τα ελεύθερα ελαφρά υγρά και ακολουθεί η απομάκρυνση των διαλυμένων ρύπων. Σε περιπτώσεις που η προσαγωγή ρευστών στη ζώνη ρύπανσης δυσχεραίνεται από εμπόδια στην επιφάνεια του εδάφους ή του υπεδάφους, αυτό μπορεί να αποτελέσει λόγο απόρριψης μιας επί τόπου επεξεργασίας. Αντιθέτως, τέτοιοι περιορισμοί δεν εμποδίζουν την εφαρμογή των εκτός τόπου τεχνολογιών.

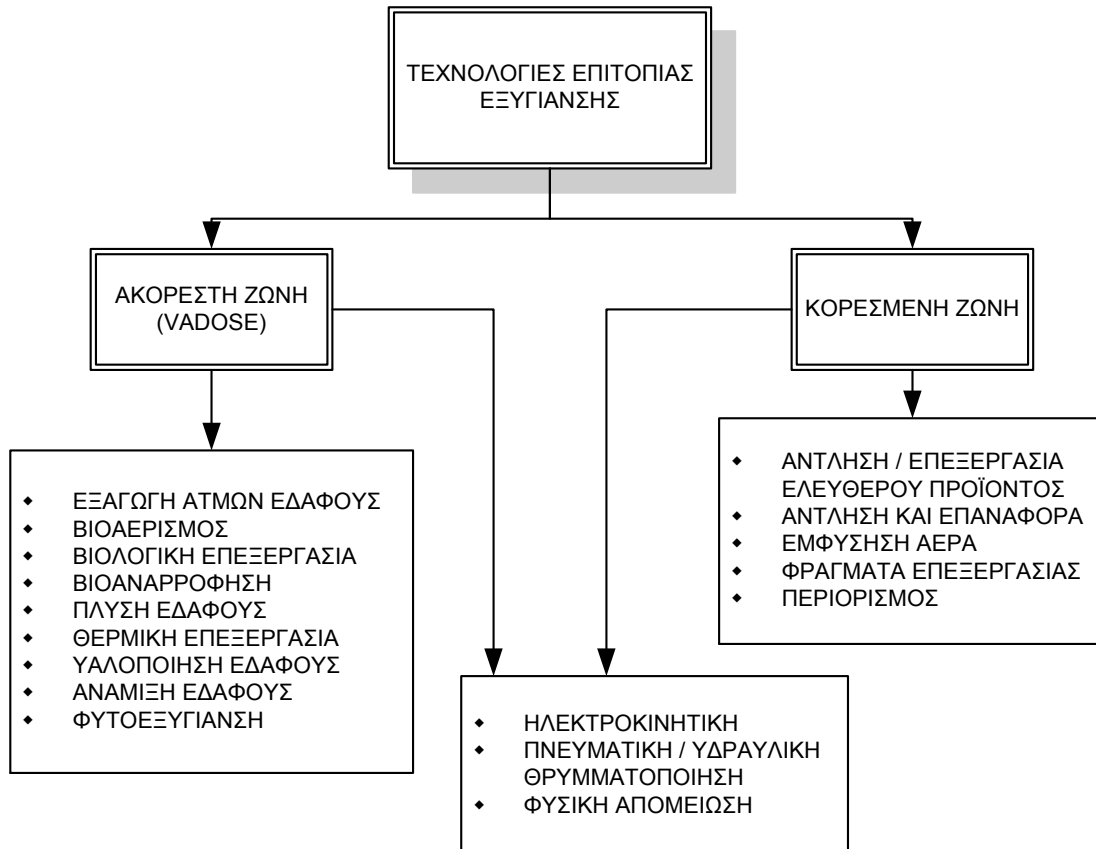
## 2.2 Τεχνολογίες επί τόπου επεξεργασίας

Οι τεχνολογίες επί τόπου επεξεργασίας που καταγράφονται στο Σχ. 2.1 μπορούν να εφαρμοστούν, τόσο σε ρύπανση της κορεσμένης, όσο και της ακόρεστης ζώνης. Η ρύπανση του υπεδάφους μπορεί να εμφανισθεί ως ελεύθερο προϊόν που επιπλέει στον υδροφόρο ορίζοντα, ως υπολειμματική ρύπανση στην ακόρεστη και την κορεσμένη ζώνη και ως διάλυμα ουσιών στο υπόγειο νερό.

Απαιτούνται λοιπόν ειδικές τεχνικές για κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις, οι οποίες μπορεί να εφαρμοσθούν μόνες τους ή σε συνδυασμό με άλλες. Η ανάκτηση, για παράδειγμα, ελεύθερου προϊόντος από το υπέδαφος μπορεί να απαιτήσει τεχνολογίες άντλησης του ελεύθερου προϊόντος, διαχωρισμού από το υπόγειο νερό, επεξεργασίας του νερού και καταστροφής ή ανακύκλωσης του ελεύθερου προϊόντος.

## 2.3 Επεξεργασία εδάφους στην ακόρεστη ζώνη

Η ρύπανση της ακόρεστης ζώνης συνίσταται στη ρόφηση υγρών ρύπων στα στερεά σωματίδια του εδάφους ή την παγίδευσή τους στα διάκενα των σωματιδίων. Οι τεχνολογίες εξυγίανσης αυτής της ζώνης βασίζονται στην παρουσία αέρα (οξυγόνου), τη δυνατότητα προσαγωγής αέρα και την παρουσία μικροοργανισμών που έχουν την ικανότητα αποδόμησης ρύπων.



Σχήμα 2.1. Τεχνολογίες επί τόπου επεξεργασίας ρυπασμένου εδάφους και υπόγειου νερού.

## 2.3.1 Απόληψη ατμών εδάφους

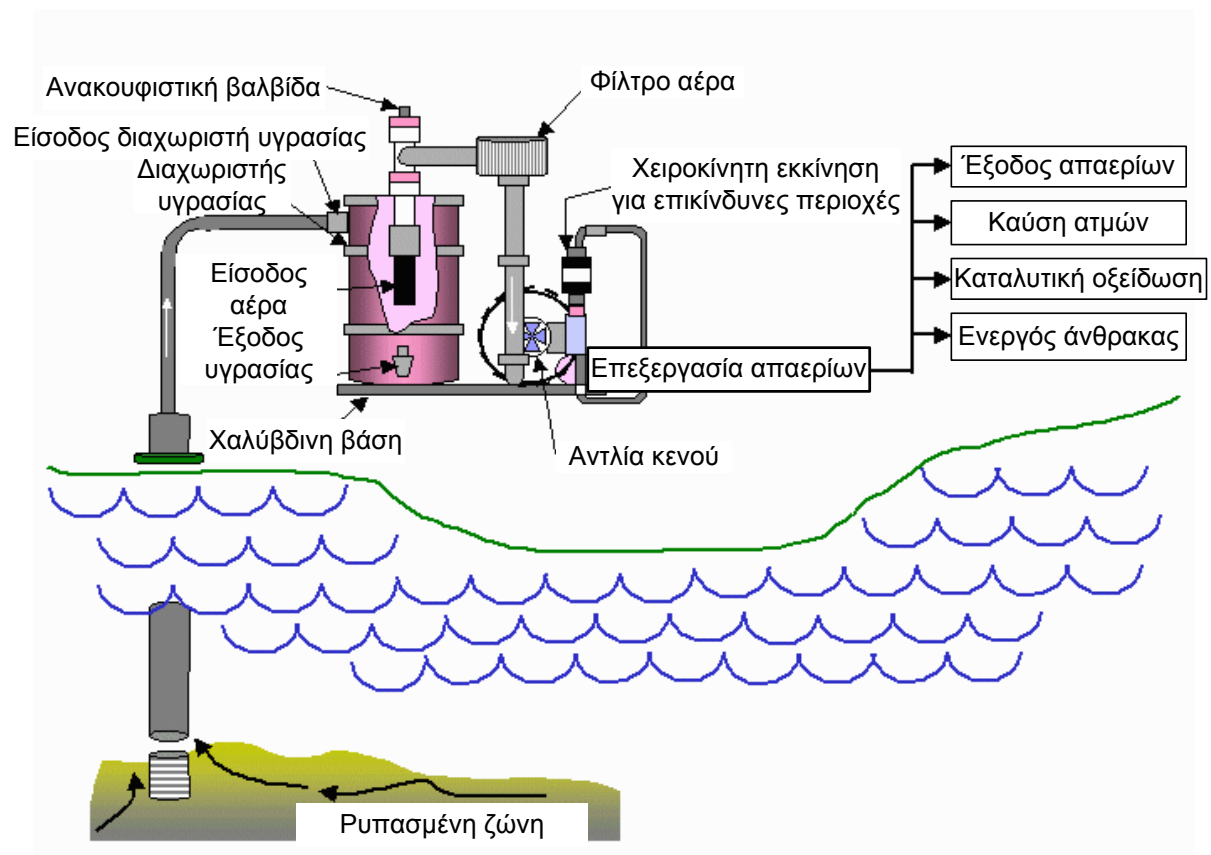
### 2.3.1.1 Γενικά

Η απόληψη ατμών εδάφους (**soil vapour extraction**), ή όπως αλλιώς είναι γνωστή **απόληψη ρύπων με εφαρμογή κενού (soil vacuum extraction - SVE)** και **αερισμός εδάφους (soil venting)**, αποσκοπεί στην μείωση των συγκεντρώσεων των πτητικών ρύπων στο έδαφος. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή κενού στο υπέδαφος για να βοηθηθεί η εξάτμιση των ρύπων και η μεταφορά τους στην επιφάνεια. Για το σκοπό αυτό τοποθετούνται κατακόρυφοι ή οριζόντιοι αεραγωγοί μέσα και γύρω από τη ρυπασμένη ζώνη, έτσι ώστε να μπορεί να κινηθεί αέρας από την επιφάνεια και να εισχωρήσει στο υπέδαφος. Το κενό στο υπέδαφος δημιουργείται με τη λειτουργία μιας αεραντλίας σε φρεάτια απόληψης μέσω των οποίων απομακρύνονται οι ατμοί των ρύπων μαζί με τον αέρα. Ο αέρας στο υπέδαφος αναπληρώνεται σε αυτή την περίπτωση κυρίως από την επιφάνεια του εδάφους παρά από τους αεραγωγούς. Έτσι, αυτή η τεχνολογία αποδίδει καλύτερα όταν το έδαφος είναι αρκετά διαπερατό, ώστε να επιτρέπει την κυκλοφορία του αέρα μέσα στο υπέδαφος.

Η **φραγή** (στεγανοποίηση) της επιφάνειας του εδάφους είναι απαραίτητη για την αποφυγή συντόμευσης (βραχυκύκλωσης) της ροής του αέρα σε ζώνες του εδάφους μεγάλης διαπερατότητας. Η φραγή εμποδίζει τον αέρα να ακολουθήσει τον ευκολότερο δρόμο προς το φρεάτιο απόληψης και τον εξαναγκάζει να κινηθεί μέσα από τη ρυπασμένη ζώνη.

Η τεχνολογία έχει δοκιμασθεί με επιτυχία σε ρυπασμένες περιοχές, αλλά η εφαρμογή της περιορίζεται σε εδάφη μεγάλου βάθους ακόρεστης ζώνης όπως τα αμμώδη και σε πηθικούς ρύπους. Υπάρχει όμως η δυνατότητα θρυμματοποίησης του εδάφους, όταν αυτό έχει μικρή διαπερατότητα, όπως εξετάζεται παρακάτω.

Μειονέκτημα επίσης αυτής της τεχνολογίας είναι η ανάγκη επεξεργασίας των απαερίων που περιέχουν τους απομακρυνόμενους από το υπέδαφος ρύπους. Άλλο μειονέκτημα αποτελεί η περίπτωση μίγματος ρύπων διαφορετικής πηθικότητας, οπότε είναι πιθανό να απαιτηθεί η συμπληρωματική εξυγίανση και με άλλη τεχνολογία. Ένα τυπικό σύστημα απόληψης ατμών εδάφους φαίνεται στο Σχ. 2.2.



Σχήμα 2.2. Τυπικό σύστημα απόληψης ατμών εδάφους.

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνικής απόληψης ατμών εδάφους καταγράφονται συνοπτικά στον Πίν. 2.1.

Πίνακας 2.1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα απόληψης ατμών εδάφους.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Αποδειγμένη απόδοση, διαθέσιμος εξοπλισμός, εύκολη εγκατάσταση.</li> <li>➤ Ελάχιστη διαταραχή περιβάλλοντος χώρου.</li> <li>➤ Σύντομοι χρόνοι επεξεργασίας της τάξης των 6 μηνών έως 2 ετών σε ιδανικές συνθήκες.</li> <li>➤ Χαμηλό κόστος της τάξης των 20-50 \$/ton ρυπασμένου εδάφους.</li> <li>➤ Μπορεί να συνδυασθεί με άλλες τεχνολογίες, όπως αερισμό εδάφους και βιοεξυγίανση.</li> <li>➤ Μπορεί να εφαρμοσθεί κάτω από κτήρια.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Δύσκολο να επιτευχθούν μειώσεις συγκεντρώσεων μεγαλύτερες από 90%.</li> <li>➤ Αμφίβολη αποτελεσματικότητα σε εδάφη διαστρωματωμένα ή μικρής διαπερατότητας.</li> <li>➤ Το κόστος μπορεί να ανέβει σημαντικά, εάν απαιτηθεί επεξεργασία ατμών.</li> <li>➤ Απαιτούνται γενικά άδειες για έκλυση αερίων στην ατμόσφαιρα.</li> <li>➤ Μπορεί να εφαρμοσθεί μόνο στην ακόρεστη ζώνη, ενώ απαιτούνται άλλες μέθοδοι για την επεξεργασία της κορεσμένης ζώνης και του υπόγειου νερού.</li> </ul>

### 2.3.1.2 Προκαταρκτικός έλεγχος αποτελεσματικότητας

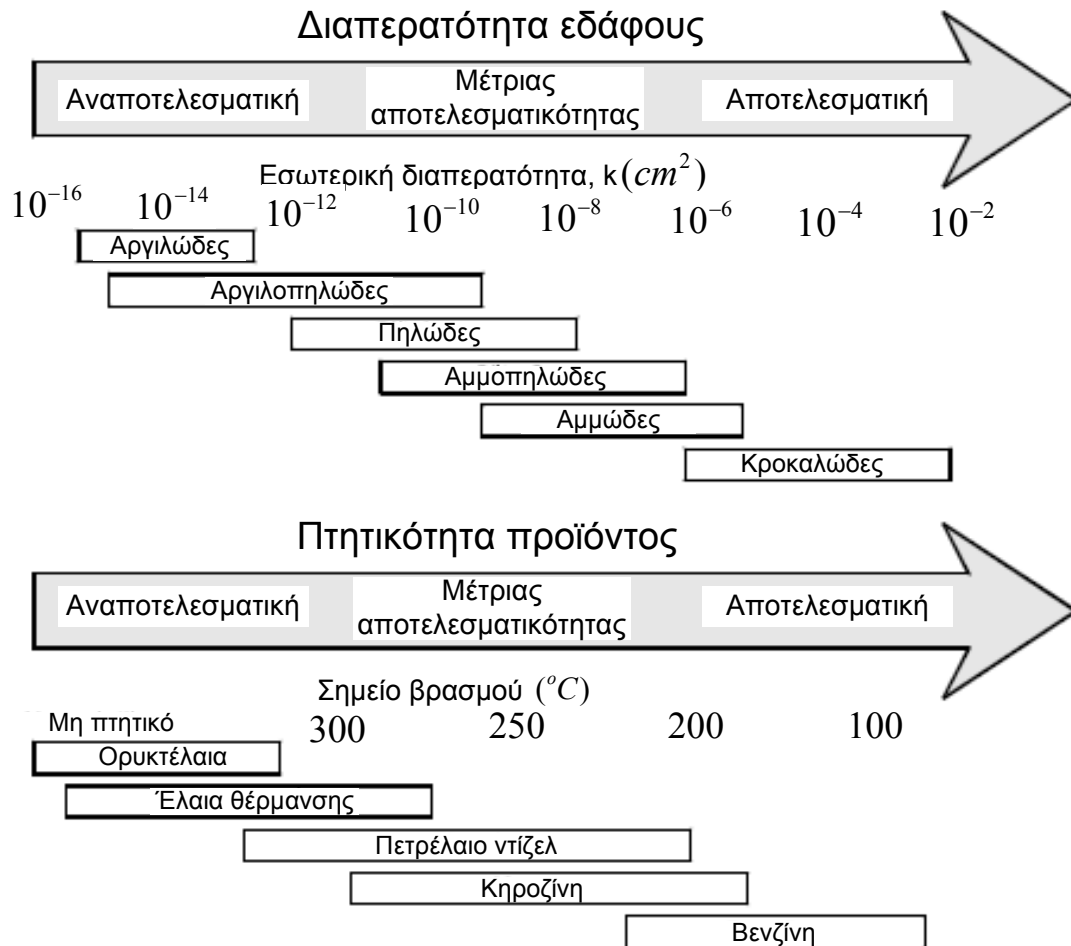
Παρόλο που η τεχνική απόληψης ατμών εδάφους είναι καλά μελετημένη, η εφαρμογή της σε μία συγκεκριμένη περίπτωση δεν είναι απλή υπόθεση και απαιτούνται για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας εμπειρία από ανάλογα έργα. Οι κρίσιμες παράμετροι οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για τη λήψη της κατ' αρχήν απόφασης για την καταλληλότητα της μεθόδου για την περιοχή είναι:

- Η **διαπερατότητα** του ρυπασμένου εδάφους, η οποία προσδιορίζει το ρυθμό απόληψης των ατμών των ρύπων από το έδαφος.
- Η **πητικότητα** των ρύπων, η οποία προσδιορίζει το ρυθμό και την έκταση εξάτμισης των ρύπων από την κατάσταση της προσρόφησης στο έδαφος στην κατάσταση ατμών μέσα στο έδαφος.

Γενικά, η διαπερατότητα καθορίζεται από το είδος του εδάφους. Τα λεπτόκοκκα εδάφη, όπως τα αργιλώδη και πηλώδη, έχουν μικρότερη διαπερατότητα από τα χονδροκόκκα, όπως τα αμμώδη. Η πητικότητα των οργανικών ουσιών είναι ένα μέτρο της ικανότητας εξάτμισης και μπορεί να προσεγγισθεί με το σημείο βρασμού ή τη θερμοκρασιακή περιοχή βρασμού για μίγματα ουσιών.

Στο Σχ. 2.3 δίνεται ένα αρχικό εργαλείο ενδεχόμενης επιλογής της μεθόδου απόληψης ατμών εδάφους για μία συγκεκριμένη περιοχή. Το σχήμα

αυτό παρέχει περιοχές διαπερατοτήτων τυπικών ειδών εδαφών και περιοχές πτητικότητας βασισμένων σε περιοχές σημείων βρασμού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αρχικές εκτιμήσεις της αποτελεσματικότητας της μεθόδου απόληψης ατμών εδάφους. Για να χρησιμοποιηθεί αυτό το εργαλείο θα πρέπει πρώτα να είναι γνωστά το είδος του εδάφους και το είδος των ρύπων. Οι πληροφορίες που δίνονται στην επόμενη ενότητα θα προσφέρουν τη δυνατότητα μιας πιο ακριβούς αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας.



Σχήμα 2.3. Προκαταρκτικός έλεγχος αποτελεσματικότητας της τεχνικής απόληψης ατμών εδάφους.

### 2.3.1.3 Λεπτομερής αξιολόγηση αποτελεσματικότητας

Μετά τον προκαταρκτικό έλεγχο αποτελεσματικότητας της τεχνικής απόληψης ατμών εδάφους και την κατ' αρχήν επιλογή της μεθόδου απαιτείται λεπτομερής αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς της για τη συγκεκριμένη περιοχή. Για το σκοπό αυτό επανεξετάζονται οι δύο κρίσιμοι παράγοντες της μεθόδου, δηλαδή η διαπερατότητα του εδάφους και η πτητικότητα των ρύπων.

Η συνδυασμένη δράση αυτών των παραγόντων καθορίζει τον αρχικό ρυθμό απόληψης των ρύπων, ο οποίος όμως μειώνεται με τη λειτουργία της εγκατάστασης, καθώς μειώνονται οι συγκεντρώσεις των πτητικών οργανικών στο έδαφος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλές παράμετροι για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας και της πτητικότητας, όπως φαίνεται στον Πίν. 2.2.

Πίνακας 2.2. Παράμετροι προσδιορισμού της διαπερατότητας και της πτητικότητας

Διαπερατότητα εδάφους	Πτητικότητα ρύπων
➤ Εσωτερική διαπερατότητα	➤ Τάση ατμών
➤ Δομή εδάφους και διαστρωμάτωση	➤ Σύσταση προϊόντος και σημεία βρασμού
➤ Βάθος υδροφόρου ορίζοντα	➤ Σταθερά Henry
➤ Περιεκτικότητα σε υγρασία	

### 2.3.1.3.1 Καθοριστικοί παράγοντες της διαπερατότητας εδάφους

#### **Εσωτερική διαπερατότητα**

Η εσωτερική διαπερατότητα είναι ένα μέτρο της ικανότητας του εδάφους να επιτρέπει τη διέλευση ρευστών και αποτελεί τον σπουδαιότερο παράγοντα προσδιορισμού της αποτελεσματικότητας της μεθόδου απόληψης ατμών εδάφους. Η εσωτερική διαπερατότητα παίρνει τιμές σε ένα εύρος 13 τάξεων μεγέθους (από  $10^{-16}$  έως  $10^{-3}$  cm<sup>2</sup>) για μία ποικιλία υλικών εδάφους, αν και χρησιμοποιείται μια πιο περιορισμένη περιοχή τιμών για κοινούς τύπους εδαφών (από  $10^{-13}$  έως  $10^{-5}$  cm<sup>2</sup>). Προσδιορίζεται ακριβέστερα με δοκιμές πεδίου, αλλά μπορεί να εκτιμηθεί με μια προσέγγιση μιας μέχρι δύο τάξεων μεγέθους με την εξόρυξη πυρήνων εδάφους και εργαστηριακές μετρήσεις. Τα χονδρόκοκκα εδάφη, όπως τα αμμώδη, έχουν μεγαλύτερη εσωτερική διαπερατότητα από τα πιο λεπτόκοκκα, όπως οι άργιλοι και οι πηλοί.

Σημειώτέον ότι η ικανότητα διέλευσης του αέρα δια μέσου ενός εδάφους μειώνεται με την παρουσία εδαφικού νερού, το οποίο αποφράσσει τους πόρους του εδάφους και μειώνει έτσι τη ροή του αέρα. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία σε λεπτόκοκκα εδάφη, καθώς αυτά έχουν την τάση να συγκρατούν περισσότερο νερό. Ενδεικτικές τιμές της εσωτερικής διαπερατότητας σε σχέση με την αποτελεσματικότητα της τεχνικής απόληψης ατμών εδάφους δίνονται στον Πίν. 2.3.

Πίνακας 2.3. Εσωτερική διαπερατότητα και αποτελεσματικότητα της τεχνικής απόληψης ατμών εδάφους (SVE).

Εσωτερική διαπερατότητα (k)	Αποτελεσματικότητα SVE
$k \geq 10^{-8} \text{ cm}^2$	Γενικά αποτελεσματική
$10^{-8} \geq k \geq 10^{-10} \text{ cm}^2$	Ενδεχομένως αποτελεσματική. Απαιτεί περαιτέρω αξιολόγηση.
$k < 10^{-10} \text{ cm}^2$	Οριακή αποτελεσματικότητα έως αναποτελεσματικότητα.

### **Δομή εδάφους και διαστρωμάτωση**

Η δομή του εδάφους και η διαστρωμάτωση αποτελούν σημαντικούς παράγοντες στην αποτελεσματικότητα της τεχνικής απόληψης ατμών εδάφους, επειδή επηρεάζουν την κίνηση των ατμών μέσα στο έδαφος κατά την εφαρμογή της μεθόδου. Έτσι, ρωγμές στο έδαφος μπορεί να δώσουν πολύ μεγαλύτερες διαπερατότητες από τις αναμενόμενες, για παράδειγμα σε αργιλώδη εδάφη. Σε αυτή την περίπτωση όμως η αυξημένη ροή περιορίζεται στις ρωγμές του εδάφους και όχι στο αδιατάραχτο έδαφος και αυτό οδηγεί σε αναποτελεσματικότητα της μεθόδου και μεγάλους χρόνους επεξεργασίας.

Η διαστρωμάτωση του εδάφους επίσης με στρώματα με διαφορετικές διαπερατότητες μπορεί να αυξήσει την πλευρική ροή των ατμών στα πιο διαπερατά στρώματα του εδάφους και να μειώσει τη ροή ατμών στα λιγότερο διαπερατά στρώματα.

Η δομή του εδάφους μπορεί να μελετηθεί με την εξέταση πυρήνων εδάφους και την παρατήρηση γεωλογικών τομών. Πρέπει να επιβεβαιωθούν τα είδη του εδάφους, να τεκμηριωθούν οι οπτικές παρατηρήσεις και να εξασφαλισθεί ο επαρκής αριθμός δειγματοληψιών. Σε διαστρωματωμένα εδάφη απαιτείται ο προσεκτικός εντοπισμός των λιγότερο διαπερατών στρωμάτων.

### **Βάθος υδροφόρου ορίζοντα**

Οι αυξομειώσεις του υδροφόρου ορίζοντα πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη κατά την εφαρμογή της τεχνικής απόληψης ατμών εδάφους. Οι εποχιακές ή οι ημερήσιες αυξομειώσεις μπορεί να κατακλύσουν μερικές φορές μέρος του ρυπασμένου υπεδάφους ή του συστήματος απόληψης εμποδίζοντας τη ροή του αέρα σε αυτά. Αυτό το ενδεχόμενο δημιουργεί ιδιαίτερο πρόβλημα σε συστήματα οριζόντιας απόληψης που οι διάτρητοι αγωγοί άντλησης είναι παράλληλοι με τον υδροφόρο ορίζοντα.

Έτσι, η τεχνική απόληψης ατμών εδάφους δεν κρίνεται γενικά κατάλληλη για περιοχές στις οποίες ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε βάθος λιγότερο από 1 m από την επιφάνεια του εδάφους. Σε περιπτώσεις επίσης που ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε βάθος λιγότερο από 3 m από την επιφάνεια



του εδάφους πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα, επειδή μπορεί να συμβεί εισχώρηση νερού στους σωλήνες απόληψης, λόγω του εφαρμοζόμενου κενού εμποδίζοντας έτσι την άντληση ατμών του εδάφους. Η αποτελεσματικότητα της τεχνικής απόληψης ατμών εδάφους σε σχέση με το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα φαίνεται στον Πίν. 2.5.

Πίνακας 2.5. Αποτελεσματικότητα της τεχνικής απόληψης ατμών εδάφους (SVE) σε σχέση με το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα

Βάθος υδροφόρου ορίζοντα	Αποτελεσματικότητα SVE
> 3 m	Αποτελεσματική
1 m < βάθος < 3 m	Απαιτούνται ειδικά μέτρα (π.χ. άντληση του υπόγειου νερού για ταπείνωση της στάθμης)
< 1 m	Γενικά μη αποτελεσματική

### 2.3.1.3.2 Καθοριστικοί παράγοντες της πτητικότητας των ρύπων

#### **Τάση ατμών**

Η τάση ατμών είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό στην αξιολόγηση της εφικτότητας και αποτελεσματικότητας της τεχνικής απόληψης ατμών εδάφους σε μια συγκεκριμένη περίπτωση. Η τάση ατμών ενός ρύπου είναι ένα μέτρο της ευκολίας εξάτμισης και αντιστοιχεί στην πίεση που εξασκούν οι ατμοί του σε ισορροπία με την υγρή ή στερεή φάση του. Είναι φανερό λοιπόν ότι ουσίες με μεγαλύτερη τάση ατμών θα απομακρυνθούν ευκολότερα με ένα σύστημα απόληψης ατμών εδάφους. Ουσίες με τάση ατμών μεγαλύτερη από 0,5 mm Hg θεωρούνται γενικά ότι προσφέρονται για την τεχνική αυτή. Μίγματα ουσιών, όπως τα πετρελαιοειδή, απομακρύνονται από το έδαφος με διαφορετικούς ρυθμούς, οι οποίοι εξαρτώνται από την τάση ατμών κάθε συστατικού. Στον Πίν. 2.6 δίνονται οι τάσεις ατμών ορισμένων κοινών υγρών ουσιών που εμπλέκονται συχνά σε περιστατικά ρύπανσης του εδάφους.

Πίνακας 2.6. Τάσεις ατμών ορισμένων κοινών υγρών ρύπων

Συστατικό	Τάση ατμών (mm Hg σε 20°C)
Μεθυλο- <i>t</i> -βουτυλ-αιθέρας	245
Βενζόλιο	76
Τολουόλιο	22
Διβρωμοαιθυλένιο	11
Αιθυλοβενζόλιο	7
Ξυλόλια	6
Ναφθαλένιο	0,5
Τετρα-αιθυλιούχος μόλυβδος	0,2

### **Σύσταση προϊόντος και σημεία βρασμού**

Τα πιο κοινά πετρελαϊκά προϊόντα που οδηγούν σε διαρροές από υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης είναι η βενζίνη, το ντίζελ, η κηροζίνη, το πετρέλαιο θέρμανσης και τα ορυκτέλαια. Τα προϊόντα αυτά αποτελούν μίγματα πολλών ενώσεων και έτσι συχνά κατηγοριοποιούνται βάσει της περιοχής σημείων βρασμού. Επειδή το σημείο βρασμού είναι μέτρο της πτητικότητας μιας ουσίας, η δυνατότητα εφαρμογής της τεχνικής απόληψης ατμών εδάφους μπορεί να εκτιμηθεί από την περιοχή σημείων βρασμού των πετρελαϊκών προϊόντων. Η περιοχή σημείων βρασμού κοινών πετρελαϊκών προϊόντων φαίνεται στον Πίν. 2.7.

Πίνακας 2.7. Περιοχή σημείων βρασμού κοινών πετρελαϊκών προϊόντων

Πετρελαϊκό προϊόν	Περιοχή σημείων βρασμού (°C)
Βενζίνη	40 - 225
Κηροζίνη	180 - 300
Καύσιμο ντίζελ	200 - 338
Πετρέλαιο θέρμανσης	> 275
Ορυκτέλαια	Μη πτητικά

Γενικά, τα συστατικά πετρελαϊκών προϊόντων με σημεία βρασμού μικρότερα από 250–300°C θεωρούνται αρκετά πτητικά, ώστε να μπορούν να απομακρυνθούν με την τεχνική απόληψης ατμών εδάφους. Επομένως, η τεχνική αυτή μπορεί να απομακρύνει σχεδόν όλα τα συστατικά της βενζίνης, ένα μέρος της κηροζίνης και του ντίζελ και ένα μικρό τμήμα των ορυκτελαίων.

Δεδομένου όμως ότι τα πετρελαϊκά προϊόντα είναι γενικά βιοαποδομήσιμα, λογικό είναι να εξετασθεί και η δυνατότητα απομάκρυνσής τους με βιοαερισμό.

Μια άλλη δυνατότητα είναι η προσαγωγή θερμού αέρα για την υποβοήθηση της εξάτμισης αυτών των προϊόντων, επειδή η τάση ατμών αυξάνει με τη θερμοκρασία. Όμως οι ενεργειακές απαιτήσεις της εξάτμισης είναι γενικά τόσο μεγάλες που καθιστούν τη δυνατότητα αυτή οικονομικά ασύμφορη.

### **Σταθερά Henry**

Ένας άλλος δείκτης της πτητικότητας ενός συστατικού είναι η σταθερά του Henry που είναι ο συντελεστής αναλογίας μεταξύ της συγκέντρωσης ενός συστατικού στο νερό και της μερικής του πίεσης στην αέρια φάση σε συνθήκες ισορροπίας. Συνεπώς, η σταθερά του Henry είναι ένα μέτρο της τάσης εξάτμισης ενός συστατικού διαλυμένου στην υγρασία του εδάφους, έτσι ώστε να μπορέσει να απομακρυνθεί. Οι σταθερές του Henry για μερικούς κοινούς ρύπους δίνονται στον Πίν. 2.8. Γενικά, συστατικά με τιμές μεγαλύτερες από 100 atm θεωρούνται ότι μπορούν να απομακρυνθούν με την τεχνική απόληψης ατμών εδάφους.

Πίνακας 2.8. Σταθερές Henry για μερικούς κοινούς ρύπους πετρελαϊκής προέλευσης

<b>Συστατικό</b>	<b>Σταθερά Henry (atm)</b>
Τετρα-αιθυλιούχος μόλυβδος	4700
Αιθυλοβενζόλιο	359
Ξυλόλια	266
Βενζόλιο	230
Τολουόλιο	217
Ναφθαλένιο	72
Διβρωμοαιθυλένιο	34
Μεθυλ- <i>t</i> -βουτυλ-αιθέρας	27

#### **2.3.1.4 Σχεδιασμός συστήματος απόληψης ατμών εδάφους**

Μετά την αποδοχή της τεχνικής απόληψης ατμών εδάφους ως κατάλληλης μεθόδου εξυγίανσης μιας ρυπασμένης περιοχής ακολουθεί ο σχεδιασμός του συστήματος. Συνιστάται να εκτελεσθεί πρώτα μια πιλοτική μελέτη, η οποία θα προσφέρει τα απαιτούμενα δεδομένα για το σχεδιασμό σε πλήρη κλίμακα.

#### 2.3.1.4.1 Ορθολογικός σχεδιασμός

Οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε ένα ορθολογικό σχεδιασμό (conceptual design) ενός συστήματος απόληξης ατμών εδάφους είναι οι ακόλουθοι.

##### **Ακτίνα επιρροής**

Η ακτίνα επιρροής είναι η πιο σημαντική παράμετρος που πρέπει να εξετάζεται στο σχεδιασμό ενός συστήματος απόληξης ατμών εδάφους. Αυτή είναι η μεγαλύτερη απόσταση από ένα φρεάτιο απόληξης στην οποία μπορεί να εφαρμοσθεί ικανοποιητικό κενό και ροή ατμών, έτσι ώστε να προκληθεί επαρκής εξάτμιση και απομάκρυνση των ρύπων από το έδαφος. Ως πρακτικός κανόνας, ακτίνα επιρροής θεωρείται ότι είναι η απόσταση από το φρεάτιο απόληξης στην οποία παρατηρείται κενό τουλάχιστον 2,5 mm νερού.

Η ακτίνα επιρροής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η πλευρική και η κατακόρυφη διαπερατότητα, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, η παρουσία ή απουσία επιφανειακής φραγής, η χρησιμοποίηση φρεατίων έγχυσης και ο βαθμός ετερογένειας του εδάφους. Γενικά, η ακτίνα επιρροής κυμαίνεται από 1,5 m για λεπτόκοκκα εδάφη μέχρι 30 m για χονδρόκοκκα εδάφη. Σε διαστρωματωμένα εδάφη η ακτίνα επιρροής προσδιορίζεται για κάθε τύπο εδάφους.

Η ακτίνα επιρροής είναι απαραίτητη για τον καθορισμό του αριθμού και των αποστάσεων των φρεατίων απόληξης και προσδιορίζεται στη βάση των μετρήσεων της πιλοτικής μελέτης. Σε περιοχές όμως που δεν είναι δυνατή η εκτέλεση πιλοτικής μελέτης η ακτίνα επιρροής μπορεί να εκτιμηθεί με προσομοίωση της ροής του αέρα ή εμπειρικές μεθόδους.

##### **Κενό απόληξης**

Κενό απόληξης είναι το κενό που απαιτείται στην κορυφή του φρεατίου απόληξης για να προκαλέσει την επιθυμητή παροχή ατμών στο φρεάτιο. Παρόλο που αυτό προσδιορίζεται συνήθως με πιλοτικές μελέτες, μπορεί επίσης να υπολογισθεί και τυπικές τιμές του κυμαίνονται μεταξύ 7,5 cm και 2,5 m στήλης νερού. Λιγότερο διαπερατά εδάφη απαιτούν γενικά υψηλότερο κενό για να εξασφαλίσουν μια λογική ακτίνα επιρροής. Πρέπει όμως να λαμβάνεται υπόψη ότι υψηλό κενό (π.χ. μεγαλύτερο από 2,5 m) μπορεί να προκαλέσει ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα και έμφραξη των οπών των φρεατίων απόληξης.

##### **Παροχή ατμών**

Η ογκομετρική παροχή ατμών εδάφους από κάθε φρεάτιο απόληξης, η ακτίνα επιρροής και το κενό άντλησης αλληλοεξαρτώνται. Και αυτή η παράμετρος πρέπει να προσδιορίζεται με πιλοτικές μελέτες, αλλά μπορεί να υπολογισθεί με υπάρχοντα μαθηματικά μοντέλα. Για τον προσδιορισμό του

χρόνου λειτουργίας της εγκατάστασης απαιτείται η παροχή ατμών εδάφους. Τυπικοί ρυθμοί απόληψης κυμαίνονται από 0,3 μέχρι 3 m<sup>3</sup>/min.

### **Αρχικές συγκεντρώσεις ρύπων**

Οι αρχικές συγκεντρώσεις συστατικών των ρύπων στο ρεύμα ατμών μετρούνται στη φάση της πιλοτικής μελέτης ή υπολογίζονται σε δείγματα εδάφους. Αυτές χρειάζονται για την εκτίμηση του μαζικού ρυθμού απομάκρυνσης ρύπων και του χρόνου λειτουργίας, καθώς και τον καθορισμό της αναγκαιότητας επεξεργασίας των απομακρυνόμενων ατμών πριν την απόρριψή τους στην ατμόσφαιρα ή την επαναφορά τους στο έδαφος.

Οι αρχικές συγκεντρώσεις των ρύπων στο ρεύμα ατμών είναι γενικά τάξεις μεγέθους υψηλότερες από τις συγκεντρώσεις που έπονται και διαρκούν μόνο λίγες ώρες μέχρι μια ημέρα. Η επεξεργασία των ατμών θεωρείται απαραίτητη κατά τη διάρκεια της αρχικής αυτής φάσης εξυγίανσης.

### **Απαιτούμενες τελικές συγκεντρώσεις ρύπων**

Οι απαιτούμενες τελικές συγκεντρώσεις ρύπων στο έδαφος ή τους ατμούς καθορίζονται, είτε νομοθετικά, είτε προσδιορίζονται με μελέτες επικινδυνότητας για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Αυτές θα καθορίσουν πιο τμήμα της ρυπασμένης περιοχής απαιτεί εξυγίανση και τότε θα τερματισθεί αυτή.

### **Απαιτούμενος χρόνος εξυγίανσης**

Ο απαιτούμενος χρόνος εξυγίανσης μπορεί επίσης να επηρεάσει το σχεδιασμό του συστήματος. Ο μελετητής μπορεί να μειώσει τις αποστάσεις των φρεατίων απόληψης για να αυξήσει την ταχύτητα εξυγίανσης, έτσι ώστε να ανταποκριθεί στις προθεσμίες ή τις απαιτήσεις του πελάτη.

### **Όγκος εδάφους προς επεξεργασία**

Ο όγκος εδάφους που θα υποστεί επεξεργασία καθορίζεται από νομοθετικές ρυθμίσεις ή από μελέτες επικινδυνότητας για τη ρυπασμένη περιοχή.

### **Όγκος πόρων**

Ο υπολογισμός του όγκου των πόρων χρησιμοποιείται μαζί με την παροχή απόληψης για τον προσδιορισμό του ρυθμού ανταλλαγής του όγκου των πόρων. Ο ρυθμός ανταλλαγής υπολογίζεται διαιρώντας τον όγκο των πόρων του εδάφους στη ζώνη επεξεργασίας με τον υπολογισμένο ρυθμό απόληψης ατμών. Ο όγκος των πόρων υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το πορώδες του εδάφους με τον όγκο του προς επεξεργασία εδάφους. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι για αποτελεσματική εξυγίανση πρέπει να εξάγεται

καθημερινά από το έδαφος όγκος ατμών εδάφους τουλάχιστον ίσος με τον όγκο των πόρων.

Ο απαιτούμενος χρόνος για την ανταλλαγή ενός όγκου ατμών εδάφους ίσου με τον όγκο των πόρων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$t = \frac{\varepsilon \cdot V}{Q} = \frac{(m^3 \text{ vapor} / m^3 \text{ soil}) \cdot (m^3 \text{ soil})}{(m^3 \text{ vapor} / \text{hr})} = \text{hr} \quad (2.3)$$

όπου:  $t$ : χρόνος ανταλλαγής του όγκου των πόρων (hr)

$\varepsilon$ : πορώδες εδάφους ( $m^3$  ατμών /  $m^3$  εδάφους)

$V$ : όγκος του προς επεξεργασία εδάφους ( $m^3$ )

$Q$ : ολική παροχή απόληψης ατμών ( $m^3$  ατμών / hr)

### **Περιορισμοί απόρριψης και απαιτήσεις παρακολούθησης**

Αυτές καθορίζονται συνήθως με νομοθετικές ρυθμίσεις και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από τους μελετητές ενός συστήματος απόληψης ατμών για την πρόβλεψη σημείων δειγματοληψίας στην εγκατάσταση και μονάδας επεξεργασίας των απαερίων.

### **Περιοριστικές κατασκευές στην περιοχή**

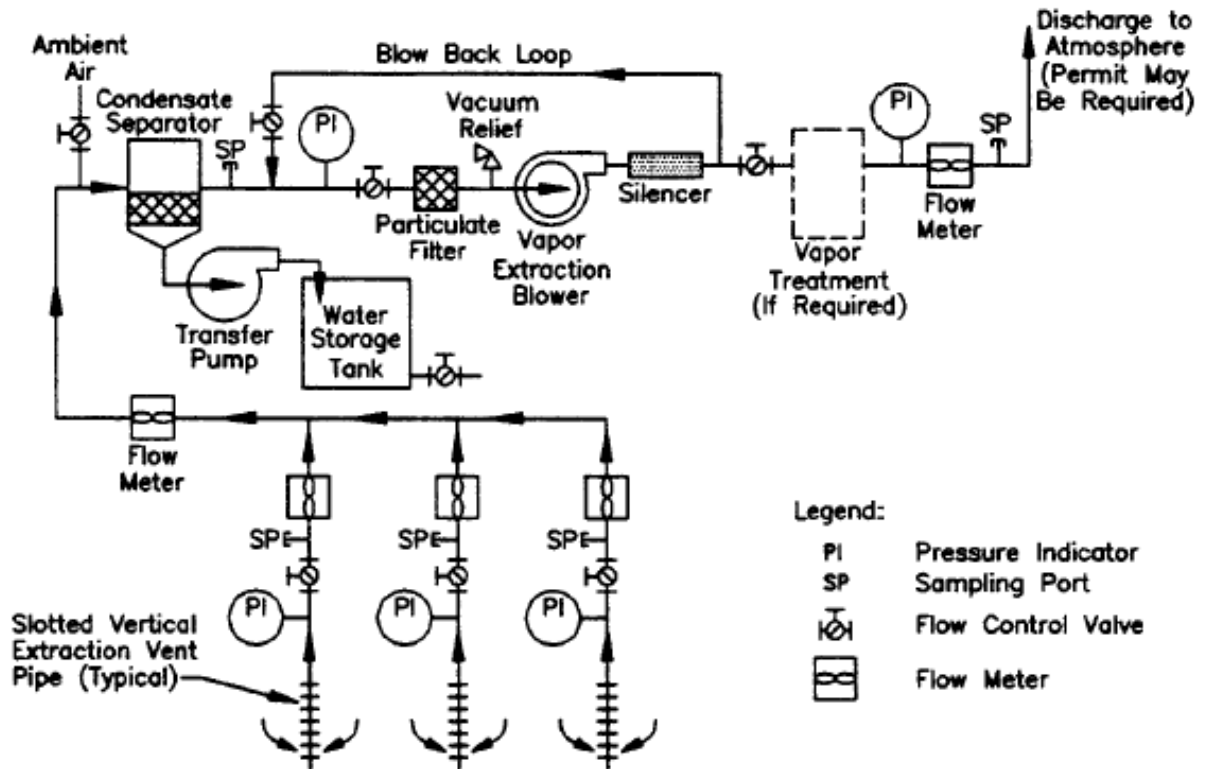
Οι περιοριστικές κατασκευές στην περιοχή όπως υπάρχοντα κτήρια και υπόγειες κατασκευές, πρέπει να αναγνωρίζονται και να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό της εγκατάστασης εξυγίανσης.

### **Τμήματα ενός συστήματος απόληψης ατμών εδάφους**

Μετά τον ορθολογικό σχεδιασμό της εγκατάστασης ακολουθεί ο λεπτομερειακός σχεδιασμός των ακόλουθων τμημάτων:

- Φρεάτια απόληψης
- Προσανατολισμός φρεατίων, θέση και κατασκευαστικές λεπτομέρειες
- Σωληνώσεις
- Σχεδιασμός μονάδας προεπεξεργασίας ατμών
- Επιλογή φυσητήρα
- Επιλογή οργάνων και σχεδιασμός συστήματος ελέγχου
- Προαιρετικά τμήματα (φρεάτια έγχυσης, επιφανειακή σφράγιση, αντλίες ταπείνωσης υδροφόρου ορίζοντα, μονάδα επεξεργασίας ατμών)

Στο Σχήμα 2.4 δίνεται το διάγραμμα σωληνώσεων και οργάνων ενός συστήματος απόληψης ατμών εδάφους.



Σχήμα 2.4. Διάγραμμα σωληνώσεων και οργάνων ενός συστήματος απόληψης ατμών εδάφους.

### Φρεάτια απόληψης

**Προσανατολισμός φρεατίων.** Χρησιμοποιούνται τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια φρεάτια απόληψης. Η επιλογή προσανατολισμού πρέπει να βασίζεται στις ειδικές ανάγκες και συνθήκες της περιοχής. Στον Πίν. 2.9 καταγράφονται τοπικές συνθήκες και ο αντίστοιχος κατάλληλος προσανατολισμός.

Πίνακας 2.9. Τοπικές συνθήκες και ο αντίστοιχος κατάλληλος προσανατολισμός φρεατίων.

Προσανατολισμός φρεατίων	Συνθήκες περιοχής
Κατακόρυφα φρεάτια απόληψης	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ρηχή έως βαθιά ρύπανση (1,5-30 m)</li> <li>➤ Βάθος υδροφόρου ορίζοντα &gt; 3 m</li> </ul>
Οριζόντια φρεάτια απόληψης	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ρηχή ρύπανση (&lt; 7,5 m)</li> <li>➤ Πιο αποτελεσματικά από τα κατακόρυφα φρέατα για βάθη &lt; 3 m</li> <li>➤ Κατασκευή δύσκολη για βάθη &gt; 7,5 m.</li> <li>➤ Ζώνη ρύπανσης περιορισμένη σε ένα στρώμα εδάφους.</li> </ul>

**Θέσεις και αριθμός φρεατίων.** Προσδιορίζονται με αρκετές μεθόδους. Με την **πρώτη μέθοδο** το εμβαδόν της επιφάνειας που χρειάζεται επεξεργασία διαιρείται με το εμβαδόν της επιφάνειας επιρροής ενός μόνο φρεατίου για προσδιορισμό του αριθμού των απαιτούμενων φρεατίων. Μετά τοποθετούνται τα φρεάτια σε κανονική διάταξη για να καλύψουν όλη την περιοχή.

$$\text{Επιφάνεια επιρροής ενός φρεατίου} = \pi \cdot (\text{ακτίνα επιρροής})^2 \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Αριθμός απαιτούμενων φρεατίων} &= \\ &= [\text{Επιφάνεια επεξεργασίας (m}^2\text{)}] / [\text{Επιφάνεια επιρροής ενός φρεατίου (m}^2\text{ / φρεάτιο)}] \end{aligned} \quad (2.5)$$

Στη **δεύτερη μέθοδο** προσδιορίζεται πρώτα η ολική παροχή απόληψης που απαιτείται για την αντικατάσταση του όγκου των πόρων του εδάφους στη ρυπασμένη περιοχή σε ένα εύλογο χρόνο (8–24 ώρες). Ο αριθμός των απαιτούμενων φρεατίων προσδιορίζεται μετά διαιρώντας την ολική παροχή απόληψης με την παροχή ενός μόνο φρεατίου.

$$\text{Αριθμός απαιτούμενων φρεατίων} = \frac{Q}{q} = \frac{\varepsilon \cdot V / t}{q} \quad (2.6)$$

όπου:  $\varepsilon$ : πορώδες εδάφους (m<sup>3</sup> ατμού / m<sup>3</sup> εδάφους)

$V$ : όγκος εδάφους ρυπασμένης περιοχής (m<sup>3</sup> εδάφους)

$q$ : παροχή απόληψης ατμών από ένα μόνο φρεάτιο (m<sup>3</sup> ατμού / hr)

$t$ : χρόνος αντικατάστασης του όγκου των πόρων (hr)



**Πρόσθετοι παράγοντες** που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον καθορισμό της διάταξης των φρεατίων είναι οι ακόλουθοι:

- Η διάταξη είναι πυκνότερη σε περιοχές υψηλών συγκεντρώσεων ρύπων για αύξηση του ρυθμού απομάκρυνσης ρύπων.
- Εάν υπάρχει ή προβλέπεται να υπάρξει σφράγιση εδάφους, τα φρεάτια διανοίγονται πιο αραιά, επειδή ο αέρας εισέρχεται πλευρικά από μεγαλύτερη απόσταση και όχι απ' ευθείας από την επιφάνεια. Αυτό όμως απαιτεί την αύξηση των φρεατίων έγχυσης αέρα.
- Σε ρυπασμένες περιοχές διαστρωματωμένου εδάφους τα φρεάτια σε στρώματα εδάφους μικρότερης εσωτερικής διαπερατότητας διανοίγονται πιο πυκνά από φρεάτια σε στρώματα μεγαλύτερης εσωτερικής διαπερατότητας.

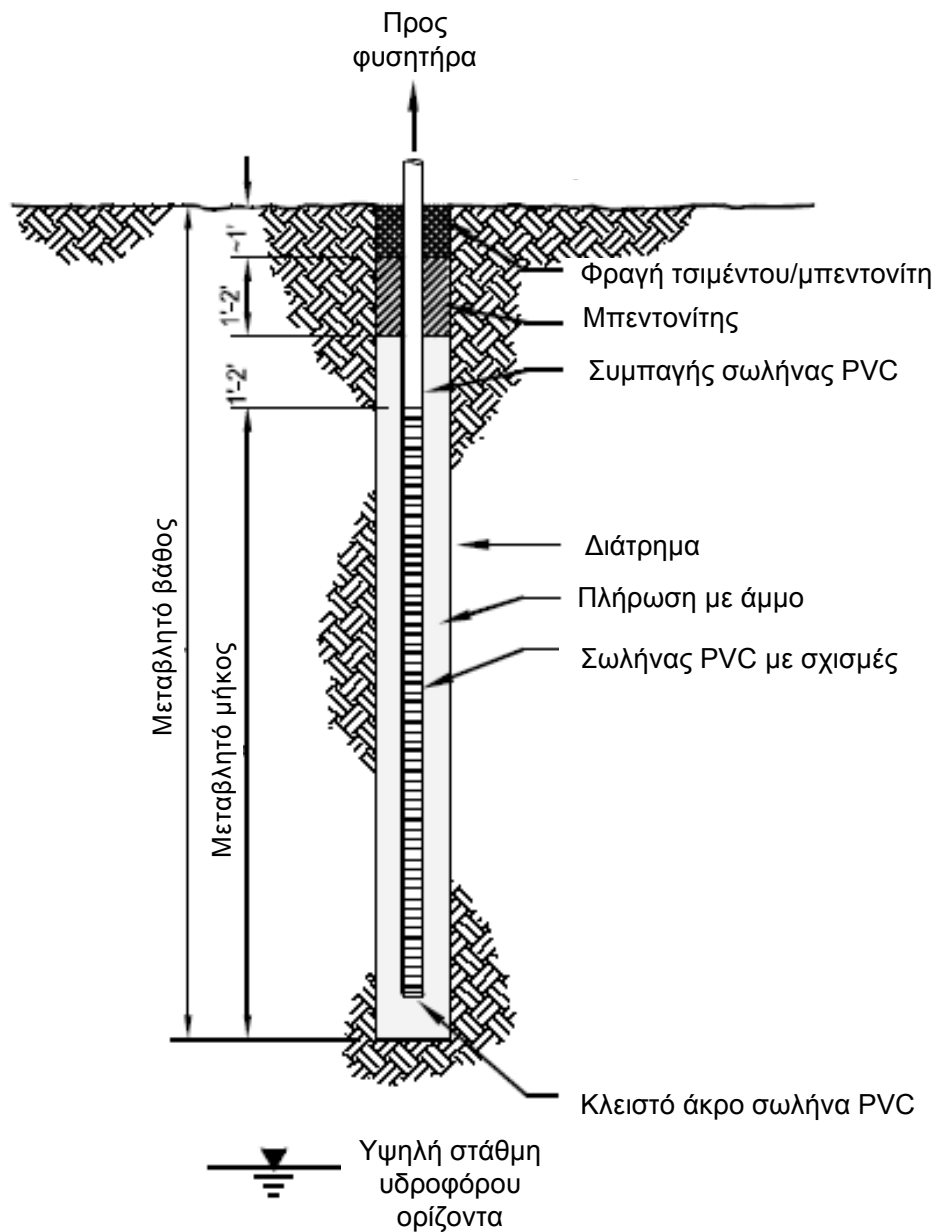
### **Κατασκευή φρεατίων**

Τα **κατακόρυφα φρεάτια** απόληψης είναι όμοια στην κατασκευή με τα φρεάτια παρακολούθησης των υπόγειων νερών και για την διάνοιξή τους χρησιμοποιούνται οι ίδιες τεχνικές. Είναι συνήθως σωλήνες από PVC με σχισμές. Η διάμετρος τους κυμαίνεται από 5 έως 30 cm ανάλογα με την παροχή και το βάθος με συνηθέστερη διάμετρο τα 10 cm.

Στο Σχ. 2.5 φαίνεται ένα τυπικό κατακόρυφο φρεάτιο. Τα κατακόρυφα φρεάτια κατασκευάζονται τοποθετώντας τον σωλήνα στο κέντρο του διατρήματος. Στο δακτυλιωτό τμήμα μεταξύ τοιχωμάτων του διατρήματος και του σωλήνα τοποθετείται διαπερατό πληρωτικό υλικό που εκτείνεται 30-60 cm πάνω από το τμήμα του σωλήνα με σχισμές και ακολουθείται από 30-60 cm φραγής μπεντονίτη. Το υπόλοιπο τμήμα μέχρι την επιφάνεια φράσσεται με ρευστοκονίαμα τσιμέντου-μπεντονίτη. Το διηθητό πληρωτικό υλικό και τα ανοίγματα των σχισμών πρέπει να είναι συμβατά με το μέγεθος των κόκκων του συγκεκριμένου εδάφους.

Η θέση και το μήκος του τμήματος του σωλήνα με τις σχισμές (φίλτρο) σε κατακόρυφα φρεάτια ποικίλει και εξαρτάται από το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, τη διαστρωμάτωση του εδάφους και την κατανομή των ρύπων στο υπέδαφος. Γενικά, το μήκος του κόσκινου έχει μικρή επίδραση στην ακτίνα επιρροής ενός φρεατίου απόληψης.

Τα **οριζόντια φρεάτια** ενδείκνυνται για περιπτώσεις ρηχού υδροφόρου ορίζοντα. Στο Σχ. 2.6 φαίνονται οι λεπτομέρειες κατασκευής ενός ρηχού οριζόντιου συστήματος φρεατίων. Τα οριζόντια φρεάτια απόληψης κατασκευάζονται με την τοποθέτηση σωλήνων PVC με σχισμές κοντά στον πυθμένα μιας σκαμμένης τάφρου. Οι σωλήνες τοποθετούνται μέσα σε χαλίκια και η επιφάνεια του εδάφους καλύπτεται με μπεντονίτη ή άλλο αδιαπέραστο υλικό ως φραγή απ' ευθείας εισόδου αέρα. Στα οριζόντια φρεάτια τα φίλτρα πρέπει να τοποθετούνται αρκετά πάνω από τις διακυμάνσεις του υδροφόρου ορίζοντα, έτσι ώστε να μην υπάρχει περίπτωση να βρεθούν τα φρεάτια μέσα στο νερό. Οι τιμές της υποπίεσης επίσης πρέπει να καταγράφονται για να εντοπίζεται αμέσως τυχόν εισροή νερού και φράξιμο των φίλτρων.

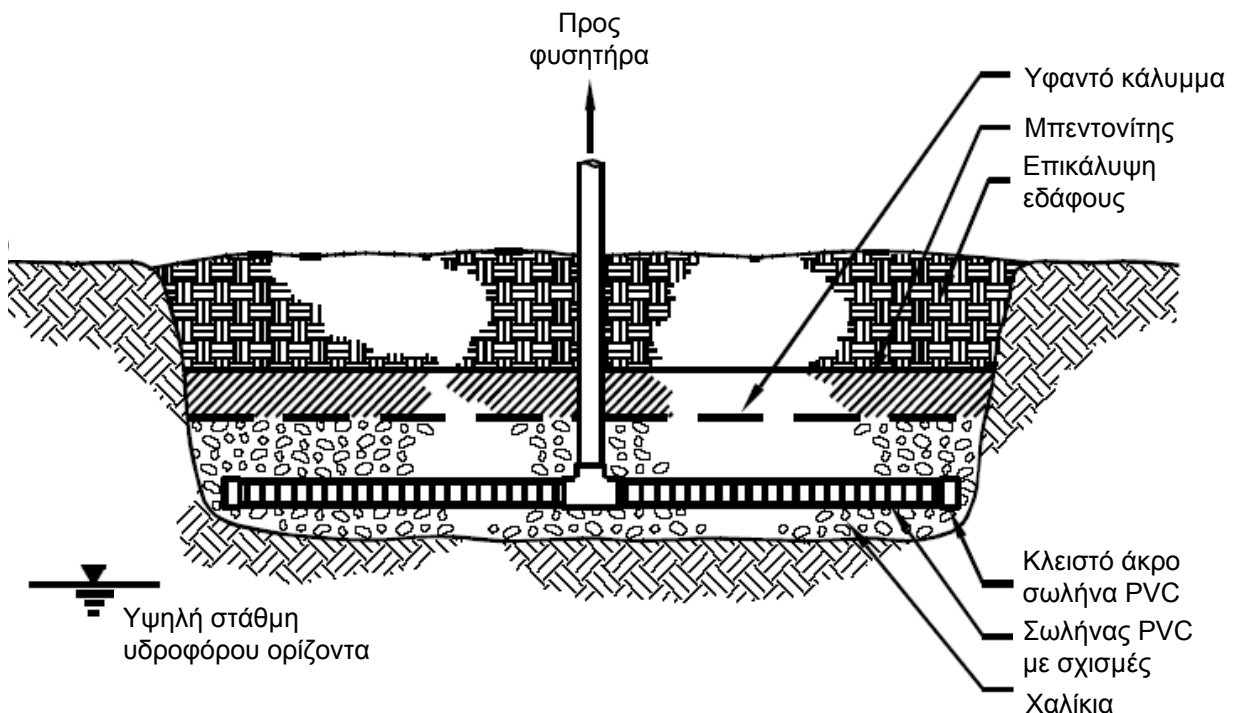


Σχήμα 2.5. Κατασκευαστικές λεπτομέρειες ενός τυπικού κατακόρυφου φρεατίου απόληψης ατμών εδάφους.

### **Προεπεξεργασία ατμών**

Οι ατμοί που εξάγονται από το έδαφος μπορεί να περιέχουν συμπυκνώματα υγρασίας, νερό και σωματίδια τα οποία μπορούν να μειώσουν την αποδοτικότητα του συστήματος επεξεργασίας. Για μείωση του κινδύνου πρόκλησης ζημιάς στο φυσητήρα ο κύριος αγωγός διανομής πρέπει να έχει κλίση προς τα φρεατία, έτσι ώστε τυχόν ανερχόμενο νερό να επιστρέφει στα

φρεατία. Στη συνέχεια το ρεύμα των ατμών διέρχεται από ένα διαχωριστή υγρασίας και ένα φίλτρο σωματιδίων πριν την είσοδό του στο φυσητήρα.



Σχήμα 2.6. Κατασκευαστικές λεπτομέρειες ενός τυπικού οριζόντιου φρεατίου απόληψης ατμών εδάφους.

### **Επιλογή φυσητήρα**

Το είδος και η ισχύς του φυσητήρα που θα επιλεγεί πρέπει να βασισθεί στην απαιτούμενη υποπίεση στα φρεατία απόληψης (συνυπολογίζοντας τις απώλειες πίεσης σε όλο το σύστημα) και στην συνολική παροχή. Στην τελευταία πρέπει να ληφθεί υπόψη το άθροισμα των παροχών όλων των φρεατίων απόληψης. Σε περιπτώσεις που μπορεί να συμβούν εκρήξεις λόγω της φύσης των ατμών, οι φυσητήρες πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με αντιεκρηκτικούς κινητήρες και ηλεκτρικά συστήματα.

### **Επιφανειακή φραγή**

Σε ένα σύστημα απόληψης ατμών εδάφους μπορεί να συμπεριληφθεί και φραγή του εδάφους για την αποφυγή διείσδυσης νερού από την επιφάνεια του εδάφους, το οποίο μπορεί να μειώσει την παροχή αέρα και την παροχή ατμών από το έδαφος. Αυτά επιτυγχάνονται επειδή η επιφανειακή φραγή εξαναγκάζει το φρέσκο αέρα να αντληθεί από μεγαλύτερη απόσταση. Σε συστήματα με επιφανειακή φραγή, η μικρότερη κλίση πίεσης μειώνει και τις ταχύτητες ροής και αυτό μπορεί να απαιτήσει την εφαρμογή υψηλότερου κενού στα φρεατία απόληψης.

Οι επιφανειακές φραγές ή καλύμματα επιλέγονται έτσι ώστε να ταιριάζουν με τις τοπικές συνθήκες και τις επιχειρηματικές δραστηριότητες της περιοχής. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεμβράνες υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE), άργιλος ή μπεντονίτης με φυτοκάλυψη, καθώς επίσης σκυρόδεμα ή ασφαλτοτάπητας.

### **Ταπείνωση στάθμης υπόγειου νερού**

Η ταπείνωση της στάθμης του υπόγειου νερού μπορεί να κριθεί απαραίτητη σε περιοχές με ρηχό υδροφόρο ορίζοντα. Η άντληση υπόγειου νερού μπορεί να μειώσει την εισχώρηση νερού στα φρεάτια απόληξης και να χαμηλώσει τον υδροφόρο ορίζοντα, έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η εξυγίανση μεγαλύτερου όγκου εδάφους. Η άντληση υπόγειου νερού είναι ενδεχόμενο όμως να δημιουργήσει δύο νέα ρεύματα αποβλήτων τα οποία θα απαιτήσουν καθαρισμό, ένα ρεύμα μολυσμένου νερού και ένα ρεύμα ελεύθερου προϊόντος (σχεδόν καθαρού ρύπου).

### **Συστήματα επεξεργασίας ατμών**

Εάν τα αποτελέσματα της πιλοτικής μελέτης έχουν δείξει την παρουσία πτητικών οργανικών ουσιών (Volatile Organic Compounds - VOC) πάνω από τα επιτρεπτά όρια στο ρεύμα απαερίων, τότε απαιτείται και ο σχεδιασμός ενός συστήματος επεξεργασίας ατμών. Οι συνήθεις επιλογές στην περίπτωση αυτή είναι κοκκώδης ενεργός άνθρακας, καταλυτική οξειδωση και θερμική οξειδωση.

Η ρόφηση σε κοκκώδη ενεργό άνθρακα είναι πολύ δημοφιλής, επειδή είναι διαθέσιμη τεχνολογία, απλή στη λειτουργία και συχνά οικονομική. Η καταλυτική οξειδωση όμως είναι γενικά πιο οικονομική από τη ρόφηση σε άνθρακα, όταν το ρυπαντικό φορτίο είναι μεγάλο. Εν τούτοις η καταλυτική οξειδωση δεν συνιστάται για λόγους ασφαλείας, όταν οι συγκεντρώσεις των χημικών οργανικών ρύπων είναι μεγαλύτερες από το 20% του κατώτερου ορίου αναφλεξιμότητας. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται με επιτυχία η θερμική οξειδωση επειδή οι υψηλές συγκεντρώσεις ευνοούν την καύση. Μια νέα τεχνολογία βιολογικής επεξεργασίας ατμών, τα βιοφίλτρα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά και οικονομικά για ατμούς σε συγκεντρώσεις μικρότερες από το 10% του κατώτερου ορίου αναφλεξιμότητας.

#### **2.3.1.4.2 Παρακολούθηση προόδου της εξυγίανσης**

Η παρακολούθηση της προόδου ενός εγκατεστημένου συστήματος εξυγίανσης απόληξης ατμών όσον αφορά τη μείωση των ρύπων στο έδαφος θεωρείται απαραίτητη εργασία. Ο υπολογισμός της απομακρυνόμενης κατά τακτά χρονικά διαστήματα μάζας ρύπων μπορεί να γίνει μετρώντας τις συγκεντρώσεις των ρύπων στους ατμούς και τις παροχές των αερίων ρευμάτων στον κύριο αγωγό διανομής του συστήματος. Για το σκοπό αυτό κατασκευάζεται διάγραμμα των στιγμιαίων και αθροιστικών μαζών που απομακρύνονται συναρτήσει του χρόνου. Η μάζα ρύπων που απομακρύνεται κατά τη διάρκεια

μιας χρονικής περιόδου μπορεί να υπολογισθεί με την Εξ. 2.7. Αυτή η εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε φρεάτιο απόληψης και στη συνέχεια να ολοκληρωθεί ή για το σύνολο του συστήματος ανάλογα με τα υπάρχοντα δεδομένα παρακολούθησης.

$$M = C \cdot Q \cdot t \quad (2.7)$$

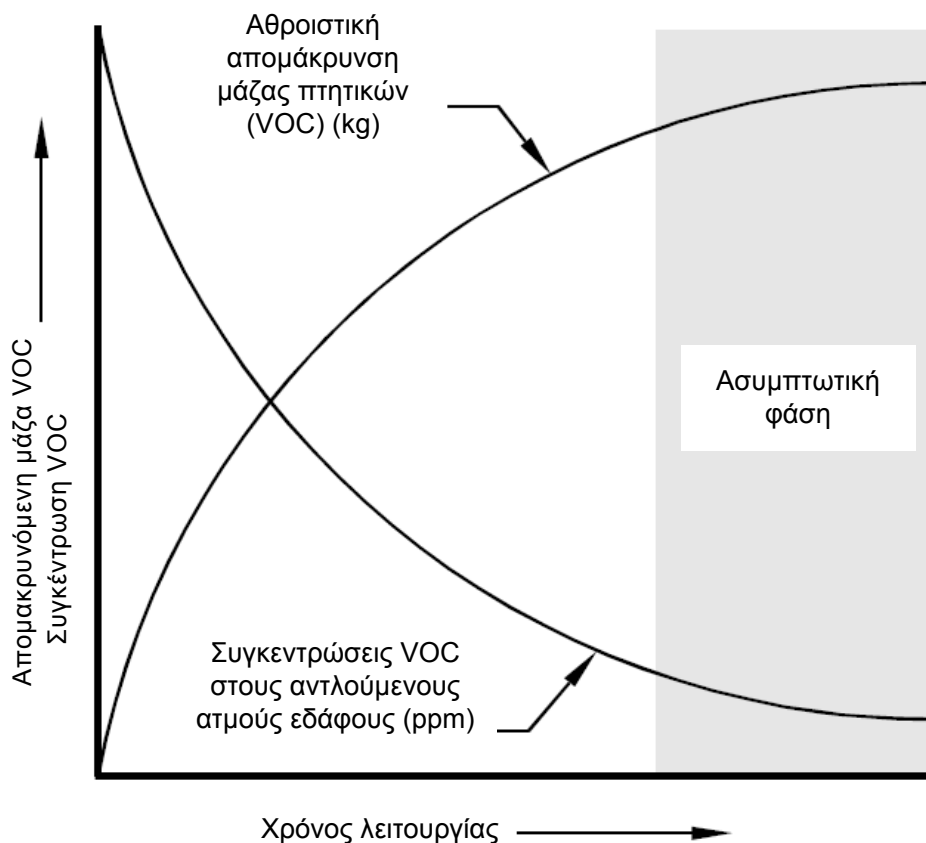
όπου:  $M$ : αθροιστική απομάκρυνση μάζας (kg)

$C$ : συγκέντρωση ατμών ρύπου ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$Q$ : παροχή απόληψης ατμών ( $\text{m}^3/\text{hr}$ )

$t$ : χρόνος λειτουργίας (hr)

Η πρόοδος εξυγίανσης εδαφών με τα συστήματα απόληψης ατμών εμφανίζει ασυμπτωτική συμπεριφορά με το χρόνο, όσον αφορά τη μείωση της συγκέντρωσης ατμών και την αθροιστική απομάκρυνση ρύπων (Σχ. 2.7).



Σχήμα 2.7. Μεταβολή της συγκέντρωσης ατμών και της αθροιστικής απομάκρυνσης ρύπων με το χρόνο.

Εκτός από την ολική συγκέντρωση ρύπων στο ρεύμα των αερίων πρέπει να προσδιορίζεται και η σύνθεση των ατμών και να συγκρίνεται αυτή με τη σύνθεση των ρύπων στο έδαφος. Με τη σύγκριση αυτή θα διαπιστωθεί μετατόπιση της σύνθεσης των ατμών προς βαρύτερα κλάσματα, π.χ. σε περιπτώσεις διαρροής πετρελαιοειδών στο έδαφος. Όταν διαπιστωθεί ασυμπτωτική συμπεριφορά στην άντληση ατμών, πρέπει να εξετασθούν εναλλακτικές τεχνικές για αύξηση του ρυθμού απομάκρυνσης ρύπων, όπως η αύξηση της παροχής στα φρέατα με αυξημένες συγκεντρώσεις ατμών σταματώντας την άντληση ατμών στα φρέατα με χαμηλές συγκεντρώσεις, ή η τεχνική της παλμικής άντλησης. **Παλμική άντληση** είναι η τεχνική του περιοδικού σταματήματος και ξεκινήματος της λειτουργίας των φρεατίων απόληψης, έτσι ώστε να δίνεται χρόνος για αποκατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας πριν από την επόμενη απόληψη. Άλλες πιο επιθετικές εναλλακτικές λύσεις για επιτάχυνση της ασυμπτωτικής φάσης είναι η διάτρηση πρόσθετων φρεατίων απόληψης ή έγχυσης.

Η συχνότητα δειγματοληψιών και μετρήσεων σε όλο το σύστημα πρέπει να είναι ημερήσια κατά το ξεκίνημα της εγκατάστασης (πρώτες 7-10 ημέρες) και ανά 15-ήμερο ή μήνα στη συνέχεια.

### 2.3.1.5 Κριτήρια επιλογής και σχεδιασμού

Τα κριτήρια επιλογής και σχεδιασμού μπορούν να βοηθήσουν στη λήψη της απόφασης επιλογής ενός συστήματος απόληψης ατμών εδάφους ως μεθόδου εξυγίανσης και στη συνέχεια στον εντοπισμό δυσλειτουργιών και επανεξέτασης του αρχικού σχεδιασμού της εγκατάστασης (Πίν. 2.10). Αν δεν πληρούνται μερικά από αυτά τα κριτήρια, θα πρέπει να αναζητηθούν συμπληρωματικές πληροφορίες προκειμένου να βελτιωθεί η εγκατάσταση και να επιτευχθούν οι στόχοι που τέθηκαν αρχικά.

Πίνακας 2.10. Κριτήρια επιλογής και σχεδιασμού ενός συστήματος απόληψης ατμών εδάφους.

Κριτήριο	Οριακή τιμή ή μέτρα αντιμετώπισης
<b>Διαπερατότητα εδάφους</b>	
➤ Εσωτερική διαπερατότητα	$> 10^{-9} \text{ cm}^2$
➤ Βάθος υδροφόρου ορίζοντα	$> 1 \text{ m}$
➤ Υγρασία εδάφους	Σχετικά χαμηλή

**Πτητικότητα ρύπων**

- |  |   |
|--|---|
| ➤ Τάση ατμών ρύπων                     | > 0,5 mm Hg                                     |
| ➤ Σε περίπτωση τάσης ατμών < 0,5 mm Hg | Απαιτείται ενίσχυση, π.χ. με έγχυση θερμού αέρα |
| ➤ Σημεία βρασμού συστατικών των ρύπων  | < 300°C   |
| ➤ Σταθερά Henry                        | > 100 atm                                       |

**Σχεδιασμός συστήματος**

- |   |  |
|---|--|
| ➤ Ακτίνα επιρροής   | 1,5–30 m   |
| ➤ Υπολογισμός ακτίνας επιρροής  | Για όλα τα είδη εδαφών της περιοχής                          |
| ➤ Υπολογισμός παροχής απόληψης  | Επίτευξη τεθέντος χρόνου εξυγίανσης                          |
| ➤ Επιλογή είδους φρεατίων (κατακόρυφα ή οριζόντια)  | Κατάλληλα για τις συνθήκες της περιοχής                      |
| ➤ Πυκνότητα φρεατίων  | Να καλύπτει την ακτίνα επιρροής κάθε φρεατίου                |
| ➤ Ανοίγματα φίλτρων φρεατίων  | Να ταιριάζουν με το είδος του εδάφους                        |
| ➤ Επιλογή φυσητήρα  | Να είναι κατάλληλος για τις επιθυμητές συνθήκες κενού        |
| ➤ Προαιρετικά τμήματα σχεδιασμού (φρεάτια έγχυσης, καλύμματα, ταπείνωση υδροφόρου ορίζοντα, επεξεργασία απαερίων) | Επιλογή και σχεδιασμός τους, αν δεν επιτυγχάνονται οι στόχοι |

**Λειτουργία και παρακολούθηση**

- |  |                  |
|--|------------------|
| ➤ Μετρήσεις και αναλύσεις στην αρχική φάση λειτουργίας (7-10 ημέρες) | Κάθε ημέρα       |
| ➤ Μετρήσεις και αναλύσεις μετά την αρχική φάση λειτουργίας           | Ανά 15-30 ημέρες |

## 2.3.2 Βιοαερισμός

### 2.3.2.1 Γενικά

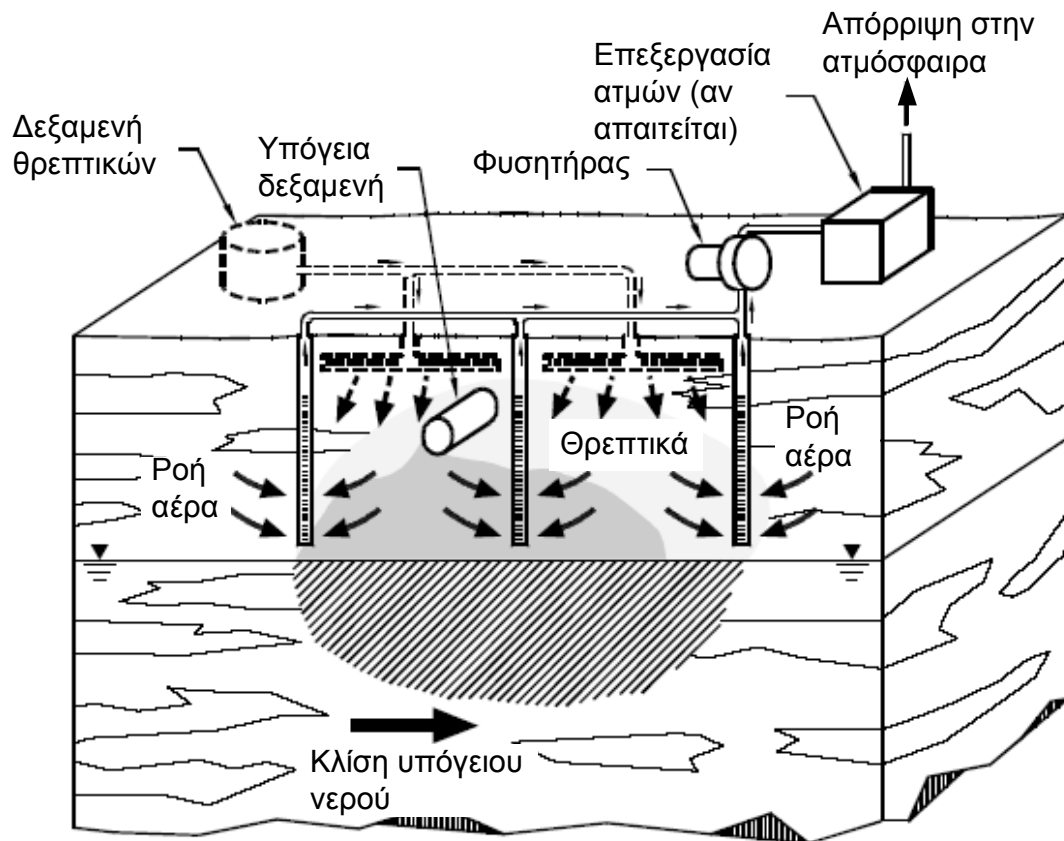
Ο **βιοαερισμός (Bioventing)** ανήκει στις τεχνολογίες βιοεξυγίανσης. Άλλες τεχνολογίες βιοεξυγίανσης που μπορούν να εφαρμοσθούν στην επί τόπου βιοεξυγίανση είναι η βιοαναρρόφηση και η αγροκαλλιέργεια.

Στις τεχνολογίες αυτές μικροοργανισμοί, όπως τα βακτήρια και οι μύκητες, αποσυνθέτουν οργανικές ουσίες και τις μετατρέπουν σε βιόμαζα, ενδιάμεσα προϊόντα και παραπροϊόντα όπως διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο και ανόργανα άλατα. Οι τεχνολογίες αυτές βασίζονται στον έλεγχο της διαθεσιμότητας και της συγκέντρωσης των ρύπων και τελικά στον έλεγχο του ρυθμού αντίδρασης. Οι κύριοι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη βιοαποδόμηση είναι η οξύτητα, η υγρασία και η θερμοκρασία του εδάφους, καθώς και η συγκέντρωση θρεπτικών.

Πριν την εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών πρέπει να αξιολογηθούν με προσοχή οι τοπικές συνθήκες και να εκτελεσθούν μελέτες επεξεργασιμότητας για έλεγχο της δυνατότητας εφαρμογής της μεθόδου. Η αξιολόγηση της περιοχής θα αποκαλύψει τα είδη και τις συγκεντρώσεις των ρύπων, την κατανομή τους, την παρουσία κατάλληλων αποσυνθετικών μικροοργανισμών και τις ιδιότητες του εδάφους που σχετίζονται με τη βιολογική δραστηριότητα. Οι μελέτες επεξεργασιμότητας θα προσδιορίσουν τη βιοαποδομησιμότητα των ρύπων, θα ταυτοποιήσουν ενδιάμεσα και παραπροϊόντα και θα αποκαλύψουν τρόπους ενίσχυσης της διαδικασίας.

Το μειονέκτημα της επεξεργασίας των απαερίων στην τεχνική της απόληψης ατμών εδάφους μπορεί να ξεπεραστεί με μια μικρή τροποποίησή της που οδηγεί στην τεχνική του βιοαερισμού. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική προσάγεται οξυγόνο όχι για την απομάκρυνση των πτητικών, αλλά για την ενεργοποίηση των μικροοργανισμών που συμμετέχουν στην αερόβια αποσύνθεση των ρύπων επί τόπου. Διανοίγονται φρεάτια προσαγωγής και απόληψης όμοια με αυτά της απόληψης ατμών εδάφους, αλλά αντίθετα με αυτή που στοχεύει σε μεγάλες παροχές αέρα για την εξάτμιση των πτητικών, ο βιοαερισμός παρέχει ελεγχόμενη ποσότητα αέρα για ελαχιστοποίηση παραγωγής απαερίων και υποβοήθηση της βιοαποδόμησης στο υπέδαφος. Ο βιοαερισμός μπορεί να ενισχυθεί με την προσθήκη θρεπτικών στο υπέδαφος, αλλά αυτό δεν είναι μερικές φορές δυνατό. Ένα τυπικό σύστημα βιοαερισμού σε συνδυασμό με φρεάτια απόληψης φαίνεται στο Σχ. 2.8. Η ροή του αέρα μπορεί να αναστραφεί σε περίπτωση που απαιτηθεί προσαγωγή αέρα.





Σχήμα 2.8. Τυπικό σύστημα βιοαερισμού σε συνδυασμό με φρεάτια απόληψης.

Όλες οι βιοδιασπώμενες ουσίες μπορούν να απομακρυνθούν από την ακόρεστη ζώνη, με ιδιαίτερη αποτελεσματικότητα σε πετρελαϊκά προϊόντα όπως βενζίνη, κηροζίνη και πετρέλαιο ντίζελ. Προτιμάται όμως η μέθοδος του βιοαερισμού σε μέσης πτητικότητας κλάσματα όπως το ντίζελ, επειδή τα ελαφρύτερα κλάσματα όπως η βενζίνη απομακρύνονται ευκολότερα με την τεχνική απόληψης ατμών εδάφους. Τα βαρύτερα εξάλλου κλάσματα του πετρελαίου όπως τα ορυκτέλαια απαιτούν γενικά μεγαλύτερους χρόνους βιοδιάσπασης από τα ελαφρύτερα. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του βιοαερισμού καταγράφονται συνοπτικά στον Πίν. 2.11.

Πίνακας 2.11. Πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του βιοαερισμού.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Χρησιμοποιεί διαθέσιμο εξοπλισμό, με εύκολη εγκατάσταση.	Αρχικά, οι υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων μπορεί να είναι τοξικές στους μικροοργανισμούς.
Παρεμποδίζει ελάχιστα τις τοπικές δραστηριότητες. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δύσκολα προσβάσιμες περιοχές (π.χ. κάτω από κτήρια).	Δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε ορισμένες τοπικές συνθήκες (π.χ. μικρή διαπερατότητα εδάφους, υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο, ανεπαρκής γνώση του υπεδάφους).
Απαιτεί σύντομους χρόνους επεξεργασίας, συνήθως 6 μήνες μέχρι 2 έτη σε άριστες συνθήκες.	Δεν μπορεί πάντα να επιτύχει πολύ χαμηλές τελικές συγκεντρώσεις.
Έχει ανταγωνιστικό κόστος: 45-140 \$/τον ρυπασμένου εδάφους.	Απαιτούνται γενικά άδειες για κατασκευή φρεατίων έγχυσης θρεπτικών και ενδεχομένως για προσαγωγή αέρα.
Συνδυάζεται εύκολα με άλλες τεχνολογίες, όπως εμφύσηση αέρα και άντληση υπόγειου νερού.	
Δεν είναι συχνά απαραίτητη η επεξεργασία των απαερίων.	

### 2.3.2.2 Προκαταρκτικός έλεγχος αποτελεσματικότητας

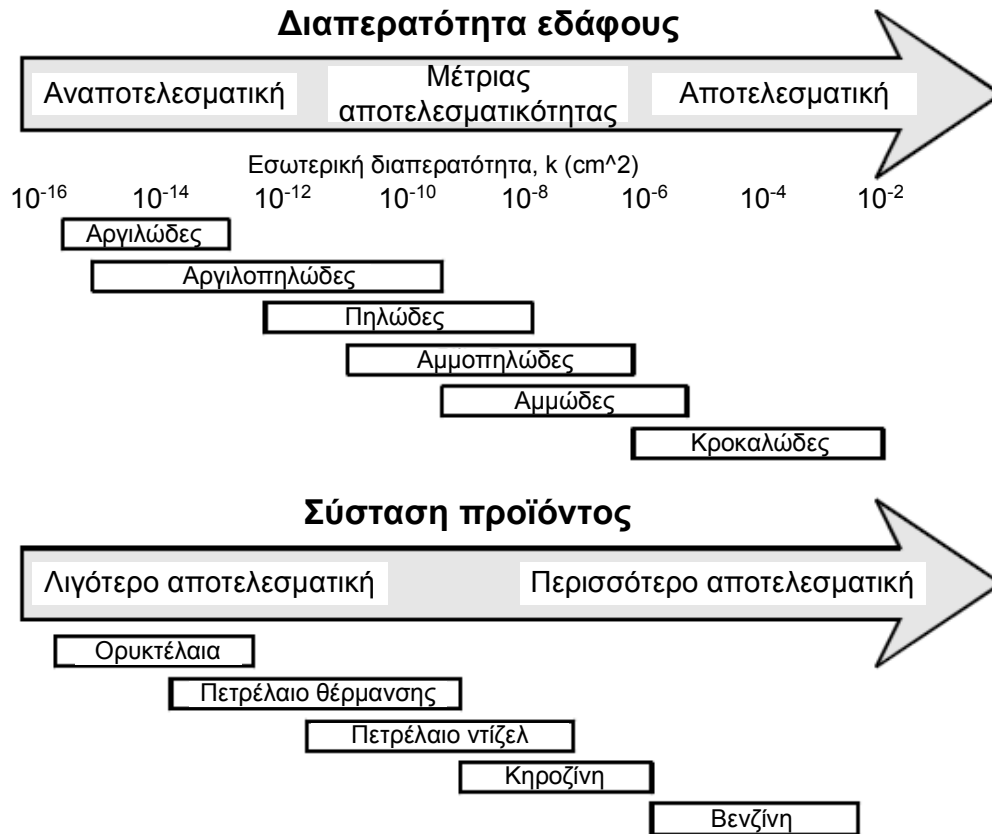
Οι κρίσιμες παράμετροι οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για τη λήψη της κατ' αρχήν απόφασης για την καταλληλότητα της μεθόδου για την περιοχή είναι:

- Η **διαπερατότητα** του ρυπασμένου εδάφους, η οποία καθορίζει το ρυθμό προσαγωγής οξυγόνου στους μικροοργανισμούς του υπεδάφους.
- Η **βιοαποδομησιμότητα** των ρύπων, η οποία καθορίζει το ρυθμό και την έκταση αποσύνθεσης των ρύπων από τους μικροοργανισμούς.

Η διαπερατότητα καθορίζεται γενικά από το είδος του εδάφους. Έτσι, λεπτόκοκκα εδάφη (π.χ. άργιλοι και πηλοί) έχουν μικρότερες διαπερατότητες από χονδροκόκκα εδάφη (π.χ. άμμος και χαλίκια). Η βιοαποδομησιμότητα ενός ρύπου είναι μέτρο της δυνατότητας μεταβολισμού του από τους μικροοργανισμούς του εδάφους προς διοξείδιο του άνθρακα και νερό, με την προϋπόθεση ότι αυτοί θα έχουν αρκετό οξυγόνο και θρεπτικά.

Στο Σχ. 2.9. δίνεται ένα αρχικό εργαλείο ενδεχόμενης επιλογής της μεθόδου βιοαερισμού για μία συγκεκριμένη περιοχή στην περίπτωση ρύπανσης με υδρογονάνθρακες. Το σχήμα αυτό παρέχει περιοχές διαπερατοτήτων τυπικών ειδών εδαφών και τα είδη των υδρογονανθράκων και

μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αρχικές εκτιμήσεις της αποτελεσματικότητας της μεθόδου βιοαερισμού. Για να χρησιμοποιηθεί αυτό το εργαλείο θα πρέπει πρώτα να είναι γνωστά το είδος του εδάφους και το είδος των ρύπων. Οι πληροφορίες που δίνονται στην επόμενη ενότητα θα προσφέρουν τη δυνατότητα μιας πιο ακριβούς αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας.



Σχήμα 2.9. Προκαταρκτικός έλεγχος αποτελεσματικότητας της τεχνικής βιοαερισμού.

### 2.3.2.3 Λεπτομερής αξιολόγηση αποτελεσματικότητας

Μετά τον προκαταρκτικό έλεγχο αποτελεσματικότητας της τεχνικής βιοαερισμού και την κατ' αρχήν επιλογή της μεθόδου απαιτείται λεπτομερής αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς της για τη συγκεκριμένη περιοχή. Για το σκοπό αυτό επανεξετάζονται οι δύο κρίσιμοι παράγοντες της μεθόδου, δηλαδή η διαπερατότητα του εδάφους και το είδος των ρύπων. Η αρχική διαλογή επικεντρώθηκε στη διαπερατότητα εδάφους και τη βιοαποδομησιμότητα των ρύπων, ενώ η λεπτομερής αξιολόγηση εξετάζει μια ευρύτερη κλίμακα περιοχών και χαρακτηριστικών των ρύπων, όπως φαίνεται στον Πίν. 2.12.

Πίνακας 2.12. Παράμετροι που χρησιμοποιούνται στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της περιοχής και των ρύπων.

Χαρακτηριστικά περιοχής	Χαρακτηριστικά ρύπων
➤ Εσωτερική διαπερατότητα	➤ Χημική δομή
➤ Δομή εδάφους και διαστρωμάτωση	➤ Συγκέντρωση και τοξικότητα
➤ Μικροβιακή παρουσία	➤ Τάση ατμών
➤ pH εδάφους	➤ Σύσταση προϊόντος και σημεία βρασμού
➤ Υγρασία εδάφους	➤ Σταθερά Henry
➤ Θερμοκρασία εδάφους	
➤ Συγκεντρώσεις θρεπτικών	
➤ Βάθος υδροφόρου ορίζοντα	

### 2.3.2.3.1 Χαρακτηριστικά της περιοχής

#### **Εσωτερική διαπερατότητα**

Η εσωτερική διαπερατότητα είναι ένα μέτρο της ικανότητας του εδάφους να μεταφέρει αέρα και αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα προσδιορισμού της αποτελεσματικότητας του βιοαερισμού, επειδή καθορίζει την ποσότητα του οξυγόνου που θα προσαχθεί με άντληση ή προσαγωγή στους μικροοργανισμούς του υπεδάφους. Οι αποσυνθετικοί μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν το οξυγόνο για να μεταβολίσουν τις οργανικές ουσίες προς διοξείδιο του άνθρακα και νερό, μια διεργασία η οποία είναι γνωστή ως αερόβια αναπνοή. Η αποδόμηση μεγάλων ποσοτήτων οργανικών ουσιών απαιτεί μεγάλο μικροβιακό πληθυσμό, ο οποίος χρειάζεται οξυγόνο, όχι μόνο για τη μεταβολική διεργασία αλλά και για την αύξηση της βακτηριακής μάζας. Για παράδειγμα, για τη βιοαποδόμηση ενός kg πετρελαϊκού προϊόντος απαιτούνται 3-3,5 kg οξυγόνου. Στη διαστασιολόγηση των φυσητήρων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι για τροφοδοσία 1 kg ανά ημέρα οξυγόνου απαιτείται παροχή αέρα 0,16 m<sup>3</sup>/h.

Όσα παρατίθενται στο κεφάλαιο για την τεχνολογία απόληψης ατμών εδάφους για την εσωτερική διαπερατότητα σε σχέση με το είδος του εδάφους, τη διαστρωμάτωση και το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα ισχύουν και στην περίπτωση του βιοαερισμού.

#### **Μικροβιακή παρουσία**

Φυσιολογικά, το έδαφος περιέχει μεγάλο πλήθος και ποικιλία μικροοργανισμών συμπεριλαμβανομένων των βακτηρίων, αλγών (φυκών), μυκήτων, πρωτοζώων και ακτινομυκήτων. Η πλειονότητα αυτών των μικροοργανισμών σε καλά αεριζόμενα εδάφη, τα οποία και προσφέρονται για βιοαερισμό, είναι γενικά αερόβιοι. Από αυτούς εξάλλου τα βακτήρια αποτελούν

την πιο πολυάριθμη και βιοχημικά δραστήρια ομάδα, ιδιαίτερα σε χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου. Για την κυτταρική τους ανάπτυξη τα βακτήρια χρειάζονται μία πηγή άνθρακα και άλλα θρεπτικά στοιχεία όπως άζωτο και φωσφόρο, ενώ για τις μεταβολικές τους λειτουργίες είναι απαραίτητη μία πηγή ενέργειας. Η μεταβολική διεργασία παραγωγής ενέργειας των βακτηρίων απαιτεί για την ενζυμική οξείδωση της πηγής άνθρακα ένα τερματικό δέκτη ηλεκτρονίων (Terminal Electron Acceptor – TEA).

Τα μικρόβια κατατάσσονται ανάλογα με τις πηγές άνθρακα και τον τερματικό δέκτη ηλεκτρονίων που χρησιμοποιούν για τη διεξαγωγή των μεταβολικών διεργασιών. Τα βακτήρια που χρησιμοποιούν ως πηγή άνθρακα τις οργανικές ενώσεις ονομάζονται *ετερότροφα*, ενώ εκείνα που χρησιμοποιούν ανόργανες ενώσεις *αυτότροφα*. Τα βακτήρια που χρησιμοποιούν ως τερματικό δέκτη ηλεκτρονίων το οξυγόνο ονομάζονται αερόβια, αυτά που χρησιμοποιούν άλλες ουσίες (π.χ. νιτρικά ή θειικά) *αναερόβια* και αυτά που χρησιμοποιούν τόσο οξυγόνο όσο και άλλες ουσίες *προαιρετικά αερόβια*. Για εφαρμογές βιοαερισμού με στόχο πετρελαϊκά προϊόντα αξιοποιούνται ετερότροφα αερόβια βακτήρια (ή και προαιρετικά αερόβια).

Η αξιολόγηση της παρουσίας και του πληθυσμού των αυτοχθόνων βακτηρίων που αναμένεται να συνεισφέρουν στην αποδόμηση των ρύπων γίνεται με εργαστηριακή ανάλυση δειγμάτων εδάφους από την ρυπασμένη περιοχή. Αυτές οι αναλύσεις πρέπει τουλάχιστον να περιλαμβάνουν απαριθμήσεις των ολικών ετεροτρόφων βακτηρίων. Παρόλο που τα ετερότροφα βακτήρια υπάρχουν κανονικά σε όλα τα εδάφη, μετρήσεις αποικιών ανά γραμμάριο εδάφους μικρότερες από 1000 CFU (Colony Forming Units) υποδεικνύουν την παρουσία τοξικών συγκεντρώσεων ανόργανων ή οργανικών ουσιών, ή μειωμένη παρουσία οξυγόνου ή/και βασικών θρεπτικών. Εν τούτοις, συγκεντρώσεις βακτηρίων ακόμη και 100 CFU/gr εδάφους μπορούν να αυξηθούν σε ικανοποιητικά επίπεδα με βιοαερισμό. Για μια επιτυχημένη εφαρμογή της τεχνικής του βιοαερισμού πρέπει επίσης να καταμετρείται εργαστηριακά ο απαιτούμενος πληθυσμός των ετεροτρόφων βακτηρίων που θα εξασφαλίζει την αποδόμηση των συγκεκριμένων ρύπων στο έδαφος.

### **pH εδάφους**

Το άριστο pH του εδάφους για βακτηριακή ανάπτυξη είναι μεταξύ 6 και 8 και συνεπώς έξω από αυτή την περιοχή απαιτείται διόρθωσή του πριν την εφαρμογή του βιοαερισμού.

### **Υγρασία εδάφους**

Τα βακτήρια χρειάζονται υγρές συνθήκες για την ανάπτυξή τους, υπερβολική υγρασία όμως μειώνει τη διαθεσιμότητα οξυγόνου με τον περιορισμό της ροής του αέρα δια μέσου των πόρων του εδάφους. Η ιδανική περιοχή υγρασίας είναι μεταξύ 40 και 85 % της υδατοχωρητικότητας του εδάφους. Σε περιπτώσεις αυξημένης υγρασίας η ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα με άντληση υπόγειου νερού μπορεί να μειώσει την υγρασία στη

ρυπασμένη ζώνη σε αποδεκτά επίπεδα προκειμένου να εφαρμοσθεί με επιτυχία ο βιοαερισμός.

Η δυνατότητα διείσδυσης ομβρίων νερών μπορεί να αυξήσει υπερβολικά την υγρασία σε περιοχές που δεν υπάρχει επιφανειακό κάλυμμα, όπως ασφαλτος ή σκυρόδεμα. Αυτό μπορεί να αποτελέσει σημαντικό πρόβλημα σε περιπτώσεις έντονων βροχοπτώσεων και λεπτόκοκκων εδαφών. Η ίδια η εφαρμογή του βιοαερισμού εξάλλου συμβάλει στην ξήρανση υγρών εδαφών με την αυξημένη παροχή αέρα, το οποίο αποτελεί επίσης πρόβλημα που θα πρέπει να αντιμετωπισθεί.

### **Θερμοκρασία εδάφους**

Ο ρυθμός βακτηριακής ανάπτυξης εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Έχει αποδειχθεί ότι η μικροβιακή δραστηριότητα του εδάφους μειώνεται σημαντικά σε θερμοκρασίες μικρότερες των 10°C και ουσιαστικά σταματά στους 5°C. Επίσης, η μικροβιακή δραστηριότητα των πιο σημαντικών βακτηρίων βιοαποδόμησης οργανικών ουσιών μειώνεται σε θερμοκρασίες πάνω από 45°C. Στην περιοχή από 10 μέχρι 45°C ο ρυθμός μικροβιακής δραστηριότητας περίπου διπλασιάζεται κάθε 10°C, όπως συμβαίνει συνήθως και στις χημικές αντιδράσεις. Στις περισσότερες περιοχές της Ελλάδας η θερμοκρασία του υπεδάφους παραμένει σταθερή γύρω στους 18°C σε όλη τη διάρκεια του έτους.

### **Συγκεντρώσεις θρεπτικών**

Τα βακτήρια χρειάζονται ανόργανα θρεπτικά όπως νιτρικά και φωσφορικά για την υποστήριξη της κυτταρικής τους ανάπτυξης στα πλαίσια της οποίας συντελείται και η αποσύνθεση των ρύπων. Τα θρεπτικά μπορεί να είναι διαθέσιμα στη ρυπασμένη περιοχή, συχνά όμως απαιτείται η προσθήκη τους για την ανάπτυξη των βακτηριακών πληθυσμών. Υπερβολικές όμως ποσότητες ορισμένων θρεπτικών ενδέχεται να καταστείλουν το μεταβολισμό των κυττάρων.

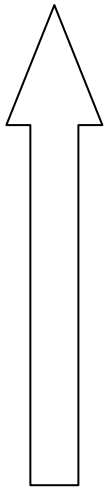
Ένας χονδρικός υπολογισμός των ελάχιστων απαιτήσεων σε θρεπτικά βασίζεται στη στοιχειομετρία της συνολικής διεργασίας κυτταρικής ανάπτυξης και βιοαποδόμησης που δίνει τη στοιχειακή σχέση άνθρακα / αζώτου / φωσφόρου μεταξύ 100/10/1 και 100/1/0,5 ανάλογα με τους ρύπους και τα εμπλεκόμενα είδη βακτηρίων στη διεργασία βιοαποδόμησης. Έτσι, στην εφαρμογή της μεθόδου βιοαερισμού πρέπει να προσδιορισθούν πρώτα οι φυσικές συγκεντρώσεις άνθρακα, αζώτου και φωσφόρου στο έδαφος και χρησιμοποιώντας τους στοιχειομετρικούς λόγους να καθορισθούν στη συνέχεια οι προσθήκες θρεπτικών.

### 2.3.2.3.2 Χαρακτηριστικά ρύπων

#### Χημική δομή

Οι χημικές δομές των συστατικών των ρύπων στο έδαφος προσδιορίζουν σε μεγάλο βαθμό το ρυθμό βιοαποδόμησης με την τεχνική του βιοαερισμού. Στην περίπτωση των πετρελαιικών προϊόντων που συνήθως αποθηκεύονται σε υπόγειες δεξαμενές, σχεδόν όλα τα συστατικά τους είναι βιοαποδομήσιμα. Όσο πιο πολύπλοκη όμως είναι η δομή του συστατικού, τόσο πιο δύσκολη και αργή θα είναι η αποδόμησή του. Τα περισσότερα χαμηλού μοριακού βάρους ( $\leq 9$  άτομα άνθρακα) αλειφατικά και μονοαρωματικά συστατικά βιοαποδομούνται πιο εύκολα από τα μεγαλύτερου μοριακού βάρους ανάλογά τους. Στον Πίν. 2.13 καταγράφονται κατά σειρά μειούμενου ρυθμού βιοαποδόμησης, ορισμένα κοινά συστατικά πετρελαιοειδών υπόγειων δεξαμενών.

Πίνακας 2.13. Χημική δομή και βιοαποδομησιμότητα συστατικών πετρελαιοειδών.

Βιοαποδομησιμότητα	Συστατικά	Πετρελαιοειδή στα οποία βρίσκονται	
 Περισσότερο βιοαποδομήσιμο	κ-βουτάνιο, ισοπεντάνιο, κ-οκτάνιο	➤ Βενζίνη	
	Εννεάνιο	➤ Πετρέλαιο ντίζελ	
	Μεθυλοβουτάνιο, διμεθυλοπεντένια, μεθυλοκτάνια	➤ Βενζίνη	
	Βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλοβενζόλιο, ξυλόλια	➤ Βενζίνη	
	Προπυλοβενζόλια	➤ Ντίζελ, κηροζίνη	
	Δεκάνια	➤ Ντίζελ	
	Δωδεκάνια	➤ Κηροζίνη	
	Δεκατριάνια	➤ Πετρέλαιο θέρμανσης	
	Δεκατετράνια	➤ Ορυκτέλαια	
	Ναφθαλένια	➤ Ντίζελ	
	Φθορανθένια	➤ Κηροζίνη	
	Λιγότερο βιοαποδομήσιμο	Πυρένια	➤ Πετρέλαιο θέρμανσης
		Ακεναφθένια	➤ Ορυκτέλαια

Η γνώση της χημικής δομής των συστατικών μιας εντοπισμένης ρύπανσης που προτείνεται να απορρυπανθεί με βιοαερισμό επιτρέπει την αναγνώριση των δύσκολα βιοαποδομήσιμων συστατικών. Έτσι, η εκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου εξυγίανσης, οι μελέτες επεξεργασιμότητας, οι πιλοτικές μελέτες πεδίου και η εφαρμογή του βιοαερισμού πρέπει να βασισθούν σε εκείνα τα συστατικά, τα οποία είναι πιο δύσκολο να αποδομηθούν κατά τη διαδικασία της βιοεξυγίανσης.

### **Συγκέντρωση και τοξικότητα**

Η παρουσία πολύ μεγάλων συγκεντρώσεων πετρελαιοειδών, τοξικών οργανικών ουσιών, ή βαρέων μετάλλων στο έδαφος μπορεί να είναι τοξική ή να παρεμποδίζει την ανάπτυξη των μικροοργανισμών βιοαποδόμησης. Επιπλέον, πολύ μικρές συγκεντρώσεις οργανικών ουσιών στο έδαφος μπορεί επίσης να έχουν ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της μικροβιακής δραστηριότητας.

Γενικά, συγκεντρώσεις πετρελαϊκών υδρογονανθράκων πάνω από 25.000 ppm, ή βαρέων μετάλλων πάνω από 2.500 ppm στο έδαφος λειτουργούν παρεμποδιστικά ή/και τοξικά για αερόβια βακτήρια. Η αντοχή των μικροοργανισμών του εδάφους σε άλλες τοξικές ουσίες μπορεί να είναι πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερη και πρέπει να ελέγχεται εργαστηριακά κατά περίπτωση. Συνεπώς, απαιτείται η εξακρίβωση όχι μόνο του είδους, αλλά και των συγκεντρώσεων των ρύπων στο έδαφος πριν από οποιαδήποτε περαιτέρω ενέργεια.

Εκτός από τις μέγιστες συγκεντρώσεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι τελικές συγκεντρώσεις απορρύπανσης, επειδή κάτω από ορισμένες οριακές συγκεντρώσεις τα βακτήρια δεν μπορούν να αφομοιώσουν τον άνθρακα των ρύπων, ώστε να διατηρήσουν τη βιολογική δραστηριότητά τους. Οι οριακές αυτές συγκεντρώσεις μπορούν να προσδιορισθούν με εργαστηριακές μελέτες και θα πρέπει να είναι μικρότερες από τις απαιτούμενες συγκεντρώσεις απορρύπανσης. Παρόλο που οι οριακές τιμές ποικίλουν εξαρτώμενες από τα χαρακτηριστικά των βακτηρίων και των ρύπων, συγκεντρώσεις ρύπων κάτω από 0,1 ppm δεν είναι γενικά δυνατό να επιτευχθούν μόνο με βιολογική επεξεργασία. Η εμπειρία έχει δείξει επίσης ότι μειώσεις των συγκεντρώσεων πετρελαιοειδών πάνω από 95% είναι δύσκολο να επιτευχθούν λόγω της παρουσίας των δύσκολα αποδομήσιμων συστατικών τους.

Συμπερασματικά, πριν την εφαρμογή της μεθόδου βιοεξυγίανσης με βιοαερισμό πρέπει σε πρώτη φάση να εξετάζονται τα είδη των ρύπων και οι αρχικές και τελικές απαιτούμενες συγκεντρώσεις του συνόλου των ρύπων και των συστατικών τους. Αν απαιτείται τελική συγκέντρωση μικρότερη από 0,1 ppm για οποιοδήποτε συστατικό ή μείωση του συνόλου των ρύπων μεγαλύτερη από 95%, τότε θα πρέπει, είτε να εκτελεσθεί μία πιλοτική μελέτη που θα αποδεικνύει τη δυνατότητα επίτευξης αυτών των μειώσεων με βιοαερισμό, είτε να εξετασθεί το ενδεχόμενο εφαρμογής άλλης τεχνολογία εξυγίανσης. Οι προϋποθέσεις αυτές συνοψίζονται στον Πίν. 2.14.



Πίνακας 2.14. Συγκεντρώσεις απορρύπανσης και αποτελεσματικότητα βιοαερισμού.

<b>Απαιτήσεις απορρύπανσης</b>	<b>Αποτελεσματικότητα βιοαερισμού</b>
Συγκέντρωση συστατικού > 0,1 ppm και ολική μείωση ρύπων < 95%	Αποτελεσματική
Συγκέντρωση συστατικού < 0,1 ppm ή ολική μείωση ρύπων > 95%	Πιθανώς αναποτελεσματική. Απαιτούνται πιλοτικές μελέτες για επιβεβαίωση των στόχων.

### **Τάση ατμών**

Η τάση ατμών είναι σημαντικό χαρακτηριστικό των ρύπων προκειμένου να αξιολογηθεί το ενδεχόμενο εξάτμισης αντί της βιοαποδόμησης. Τάση ατμών είναι η πίεση των ατμών ενός υλικού σε θερμοδυναμική ισορροπία με την υγρή ή τη στερεή φάση του. Ουσίες με τάσεις ατμών μεγαλύτερες από 0,5 mm Hg είναι πιθανότερο να εξατμισθούν και να παρασυρθούν στο δημιουργούμενο ρεύμα αέρα πριν να βιοαποδομηθούν. Συνεπώς, η επί τόπου βιοαποδόμηση με βακτήρια μπορεί να εφαρμοσθεί μόνο σε συστατικά ρύπων με τάση ατμών μικρότερη από 0,5 mm Hg. Αν όμως οι συγκεντρώσεις ορισμένων συστατικών ενός μίγματος ουσιών όπως τα πετρελαιοειδή είναι σημαντικές στο ρεύμα εξόδου, τότε θα απαιτηθεί επεξεργασία των ατμών.

### **Σημεία βρασμού και σταθερά Henry**

Ισχύουν γενικά στο βιοαερισμό όσα αναφέρονται στο κεφάλαιο για την τεχνική απόληψης ατμών εδάφους σε σχέση με τη σύσταση του προϊόντος, τα σημεία βρασμού των συστατικών του και τις σταθερές Henry.

Όσον αφορά τα πετρελαιοειδή σχεδόν όλα τα συστατικά τους είναι βιοαποδομήσιμα, αν και συστατικά μεγάλου μοριακού βάρους και υψηλών σημείων βρασμού απαιτούν μεγαλύτερους χρόνους επεξεργασίας. Προϊόντα με σημεία βρασμού κάτω από 250-300°C εξατμίζονται σε κάποια έκταση και μπορούν να απομακρυνθούν με ένα συνδυασμό εξάτμισης και βιοαποδόμησης σε ένα σύστημα βιοαερισμού. Με κριτήριο τη σταθερά Henry, συστατικά με τιμές της σταθεράς μικρότερες από 100 atm θεωρούνται μη πτητικά και μπορούν καταρχήν να βιοαποδομηθούν με βιοαερισμό.

#### **2.3.2.4 Σχεδιασμός συστήματος βιοαερισμού εδάφους**

Μετά την αποδοχή της τεχνικής βιοαερισμού ως κατάλληλης μεθόδου εξυγίανσης μιας ρυπασμένης περιοχής ακολουθεί ο σχεδιασμός του συστήματος. Συνιστάται να εκτελεσθεί πρώτα μια πιλοτική μελέτη, η οποία θα προσφέρει τα απαιτούμενα δεδομένα για το σχεδιασμό σε πλήρη κλίμακα. Σε γενικές γραμμές οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις και μέσα είναι τα ίδια με αυτά

ενός συστήματος απόληψης ατμών εδάφους με την προσθήκη των δεξαμενών και αντλιών θρεπτικών μέσων που ενδεχόμενα να απαιτηθούν στο σύστημα βιοαερισμού εδάφους.

#### **2.3.2.4.1 Ορθολογικός σχεδιασμός**

Οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε ένα ορθολογικό σχεδιασμό ενός συστήματος βιοαερισμού είναι οι ακόλουθοι.

##### **Ακτίνα επιρροής**

Η ακτίνα επιρροής είναι η μεγαλύτερη απόσταση από ένα φρεάτιο απόληψης (ή προσαγωγής) αέρα στην οποία μπορεί να επιτευχθεί ικανοποιητική παροχή αέρα, έτσι ώστε να διατηρηθούν ικανοποιητικοί ρυθμοί αποδόμησης. Η ακτίνα επιρροής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η πλευρική και η κατακόρυφη διαπερατότητα, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, η παρουσία ή απουσία επιφανειακής φραγής, η χρησιμοποίηση φρεατίων έγχυσης και ο βαθμός ετερογένειας του εδάφους. Γενικά, η ακτίνα επιρροής κυμαίνεται από 1,5 m για λεπτόκοκκα εδάφη μέχρι 30 m για χονδρόκοκκα εδάφη. Σε διαστρωματωμένα εδάφη η ακτίνα επιρροής προσδιορίζεται για κάθε τύπο εδάφους.

Η ακτίνα επιρροής είναι απαραίτητη για τον καθορισμό του αριθμού και των αποστάσεων των φρεατίων απόληψης ή έγχυσης και προσδιορίζεται στη βάση των μετρήσεων της πιλοτικής μελέτης. Σε περιοχές όμως που δεν είναι δυνατή η εκτέλεση πιλοτικής μελέτης η ακτίνα επιρροής μπορεί να εκτιμηθεί με προσομοίωση της ροής του αέρα ή εμπειρικές μεθόδους.

##### **Κενό απόληψης**

Κενό απόληψης είναι το κενό που απαιτείται στην κορυφή του φρεατίου απόληψης για να προκαλέσει την επιθυμητή παροχή αέρα στο φρεάτιο. Παρόλο που αυτό προσδιορίζεται συνήθως με πιλοτικές μελέτες, μπορεί επίσης να υπολογισθεί. Τυπικές τιμές του κενού κυμαίνονται μεταξύ 7,5 cm και 2,5 m νερού και της πίεσης έγχυσης μεταξύ 0,7–3,4 bar. Λιγότερο διαπερατά εδάφη απαιτούν γενικά υψηλότερο κενό για να εξασφαλίσουν μια λογική ακτίνα επιρροής. Πρέπει όμως να λαμβάνεται υπόψη ότι υψηλό κενό (π.χ. μεγαλύτερο από 2,5 m) μπορεί να προκαλέσει ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα και έμφραξη των οπών των φρεατίων απόληψης. Στην έγχυση αέρα η υψηλή πίεση μπορεί να ωθήσει το ρυπασμένο νερό σε καθαρό έδαφος και καθαρό υπόγειο νερό.

##### **Παροχή ατμών**

Η ογκομετρική παροχή ή άντληση αέρα από κάθε φρεάτιο απόληψης ή έγχυσης καθορίζει το ρυθμό προσαγωγής οξυγόνου στην ρυπασμένη περιοχή. Η ογκομετρική παροχή, η ακτίνα επιρροής και το κενό άντλησης

αλληλοεξαρτώνται. Και αυτή η παράμετρος πρέπει να προσδιορίζεται με πιλοτικές μελέτες, αλλά μπορεί και να υπολογίζεται με υπάρχοντα μαθηματικά μοντέλα. Η παροχή ατμών εδάφους απαιτείται για τον προσδιορισμό του χρόνου λειτουργίας της εγκατάστασης. Τυπικοί ρυθμοί απόληψης κυμαίνονται από 0,15 μέχρι 3 m<sup>3</sup>/min.

### **Αρχικές συγκεντρώσεις ρύπων**

Οι αρχικές συγκεντρώσεις συστατικών των ρύπων στο ρεύμα αέρα μετρούνται στη φάση της πιλοτικής μελέτης ή υπολογίζονται σε δείγματα εδάφους. Χρειάζονται για την εκτίμηση του μαζικού ρυθμού απομάκρυνσης ρύπων και του χρόνου λειτουργίας, καθώς τον καθορισμό της αναγκαιότητας επεξεργασίας των απομακρυνόμενων ατμών πριν την απόρριψή τους στην ατμόσφαιρα ή την επανέγχυσή τους στο έδαφος.

### **Απαιτούμενες τελικές συγκεντρώσεις ρύπων**

Οι απαιτούμενες τελικές συγκεντρώσεις ρύπων στο έδαφος ή τους ατμούς καθορίζονται, είτε νομοθετικά, είτε προσδιορίζονται με μελέτες επικινδυνότητας για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Αυτές θα καθορίσουν πιο τμήμα της ρυπασμένης περιοχής απαιτεί εξυγίανση και τότε θα τερματισθεί αυτή.

### **Απαιτούμενος χρόνος εξυγίανσης**

Ο απαιτούμενος χρόνος εξυγίανσης μπορεί επίσης να επηρεάσει το σχεδιασμό του συστήματος. Ο μελετητής μπορεί να μειώσει τις αποστάσεις των φρεατίων απόληψης για να αυξήσει την ταχύτητα βιοεξυγίανσης, έτσι ώστε να ανταποκριθεί στις προθεσμίες ή τις απαιτήσεις του πελάτη.

### **Όγκος εδάφους προς επεξεργασία**

Ο όγκος εδάφους που θα υποστεί επεξεργασία καθορίζεται από νομοθετικές ρυθμίσεις ή από μελέτες επικινδυνότητας για τη ρυπασμένη περιοχή.

### **Όγκος πόρων**

Ο υπολογισμός του όγκου των πόρων χρησιμοποιείται μαζί με την παροχή απόληψης για τον προσδιορισμό του ρυθμού ανταλλαγής του όγκου των πόρων και συνεπώς το ρυθμό προσαγωγής οξυγόνου. Ο ρυθμός ανταλλαγής υπολογίζεται διαιρώντας τον όγκο των πόρων του εδάφους στη ζώνη επεξεργασίας με τον υπολογισμένο ρυθμό απόληψης ατμών. Ο όγκος των πόρων υπολογίζεται εξάλλου πολλαπλασιάζοντας το πορώδες του εδάφους με τον όγκο του προς επεξεργασία εδάφους. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι για αποτελεσματική εξυγίανση πρέπει να εξάγεται καθημερινά από το έδαφος όγκος ατμών εδάφους τουλάχιστον ίσος με τον όγκο των πόρων.

Ο απαιτούμενος χρόνος για την ανταλλαγή ενός όγκου ατμών εδάφους ίσου με τον όγκο των πόρων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$t = \frac{\varepsilon \cdot V}{Q} = \frac{(m^3 \text{ vapor} / m^3 \text{ soil}) \cdot (m^3 \text{ soil})}{(m^3 \text{ vapor} / \text{hr})} = \text{hr} \quad (2.8)$$

όπου:  $t$ : χρόνος ανταλλαγής του όγκου των πόρων (hr)

$\varepsilon$ : πορώδες εδάφους ( $m^3$  ατμών /  $m^3$  εδάφους)

$V$ : όγκος του προς επεξεργασία εδάφους ( $m^3$ )

$Q$ : ολική παροχή απόληψης ατμών ( $m^3$  ατμών / hr)

### **Περιορισμοί απόρριψης και απαιτήσεις παρακολούθησης**

Αυτές καθορίζονται συνήθως με νομοθετικές ρυθμίσεις και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από τους μελετητές ενός συστήματος βιοαερισμού για την πρόβλεψη σημείων δειγματοληψίας στην εγκατάσταση και μονάδας επεξεργασίας των απαερίων.

### **Περιοριστικές κατασκευές στην περιοχή**

Οι περιοριστικές κατασκευές στην περιοχή όπως υπάρχοντα κτήρια και υπόγειες κατασκευές, πρέπει να αναγνωρίζονται και να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό της εγκατάστασης εξυγίανσης.

### **Θρεπτικά μίγματα και ρυθμός τροφοδοσίας**

Η ανάγκη τροφοδοσίας με θρεπτικά, τα συστατικά των θρεπτικών μιγμάτων και ο ρυθμός τροφοδοσίας προσδιορίζονται, είτε με μελέτες πεδίου, είτε με εργαστηριακές μελέτες.

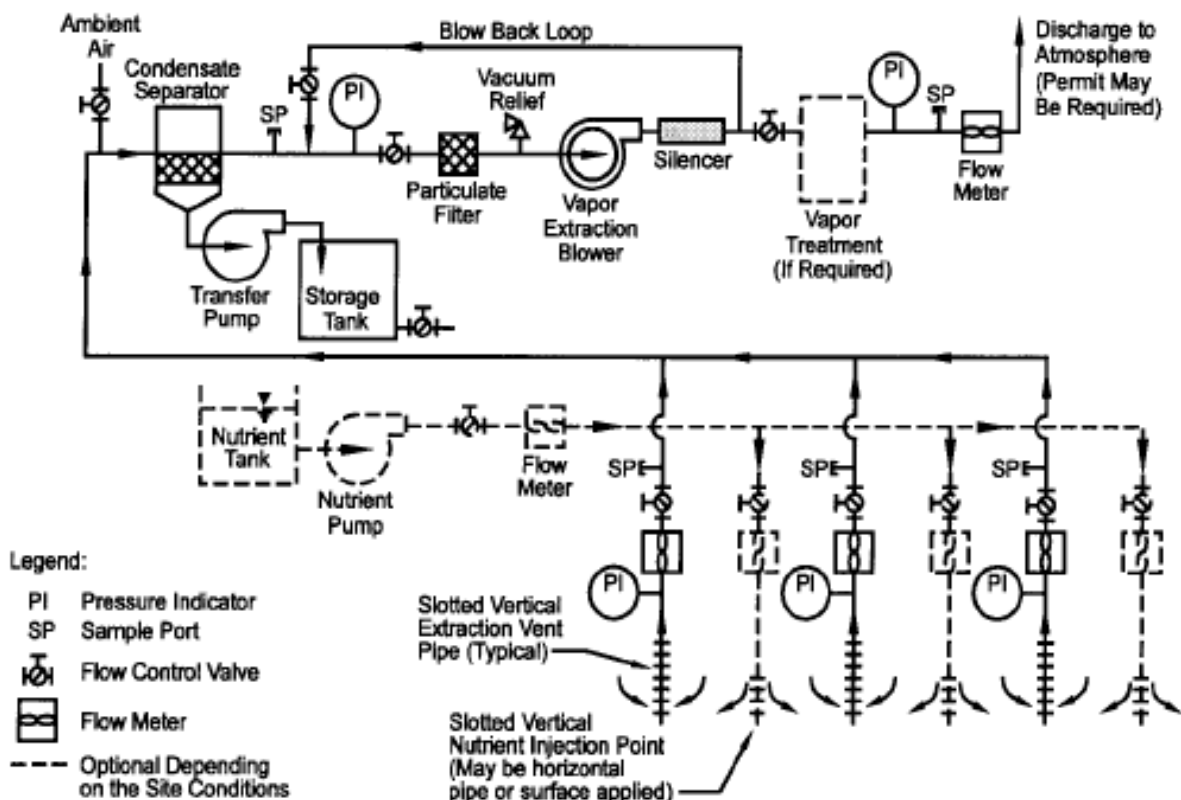
### **Τμήματα ενός συστήματος βιοαερισμού**

Μετά το βασικό σχεδιασμό της εγκατάστασης ακολουθεί ο λεπτομερειακός σχεδιασμός των ακόλουθων τμημάτων:

- Φρεάτια απόληψης (ή έγχυσης)
- Προσανατολισμός φρεατίων, θέση και κατασκευαστικές λεπτομέρειες
- Σωληνώσεις
- Σχεδιασμός μονάδας προεπεξεργασίας ατμών (αν απαιτείται)
- Επιλογή φυσητήρα
- Επιλογή οργάνων και σχεδιασμός συστήματος ελέγχου
- Προαιρετικά τμήματα (φρεάτια έγχυσης, επιφανειακή φραγή, αντλίες ταπείνωσης υδροφόρου ορίζοντα, μονάδα επεξεργασίας ατμών)

Αν η προμελέτη δείξει ότι απαιτείται προσθήκη θρεπτικών στο έδαφος, στο σχεδιασμό πρέπει να συμπεριληφθεί ο προσανατολισμός του φρέατος προσθήκης, η θέση του και κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Πρέπει ακόμη να ελεγχθεί, αν υφίστανται νομοθετικοί περιορισμοί, όπως απαίτηση για λήψη ειδικής άδειας ή απαγόρευση για οποιαδήποτε προσθήκη στο έδαφος στην περιοχή. Στο Σχ. 2.10 δίνεται το διάγραμμα σωληνώσεων και οργάνων ενός συστήματος βιοαερισμού συνδυασμένο με σύστημα απόληψης ατμών εδάφους.

Σε συστήματα εξυγίανσης με βιοαερισμό χρησιμοποιούνται τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια φρεάτια απόληψης και κατασκευάζονται όπως ακριβώς τα φρεάτια απόληψης ατμών εδάφους. Τα ίδια ισχύουν επίσης και για τα υπόλοιπα τμήματα του βιοαερισμού (φουσητήρας και όργανα ελέγχου), καθώς και για τη φραγή του εδάφους για την αποφυγή διείσδυσης νερού από την επιφάνεια, την ταπείνωση της στάθμης του υπόγειου νερού και την ενδεχόμενη εγκατάσταση ενός συστήματος επεξεργασίας ατμών.



Σχήμα 2.10. Διάγραμμα σωληνώσεων και οργάνων ενός συστήματος βιοαερισμού συνδυασμένο με σύστημα απόληψης ατμών εδάφους.

### **Μονάδα τροφοδοσίας θρεπτικών**

Στο βιοαερισμό όμως είναι δυνατό να απαιτηθεί επιπλέον των λειτουργικών τμημάτων που συναντούνται στα συστήματα απόληψης ατμών εδάφους μία μονάδα τροφοδοσίας θρεπτικών για την υποστήριξη της βιολογικής ανάπτυξης στο υπέδαφος. Τα θρεπτικά διοχετεύονται στο υπέδαφος με τοπική εφαρμογή ή με έγχυση με τη βοήθεια οριζόντιων τάφρων ή φρεατίων. Η τοπική εφαρμογή γίνεται είτε με το χέρι, είτε με συμβατικά συστήματα ποτίσματος (π.χ. ψεκαστήρες). Τα οριζόντια φρεάτια κατασκευάζονται με παρόμοιο σχεδιασμό όπως τα φρεάτια απόληψης και αποτελούνται από σωλήνες PVC διάτρητους ή με σχισμές τοποθετημένους σε ρηχές τάφρους (< 60 cm) πάνω σε κλίση χαλικιών. Τα διαλύματα θρεπτικών παρασκευάζονται από στερεά μίγματα τριπολυφωσφορικών και αμμωνιακών αλάτων που χρησιμοποιούνται σε γεωργικές εφαρμογές και προστίθενται ανά ένα έως τρεις μήνες. Τα συστήματα τροφοδοσίας θρεπτικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την προσθήκη διαλυμάτων ρύθμισης του pH, εφόσον αυτό απαιτείται.

#### **2.3.2.4.2 Παρακολούθηση προόδου της εξυγίανσης**

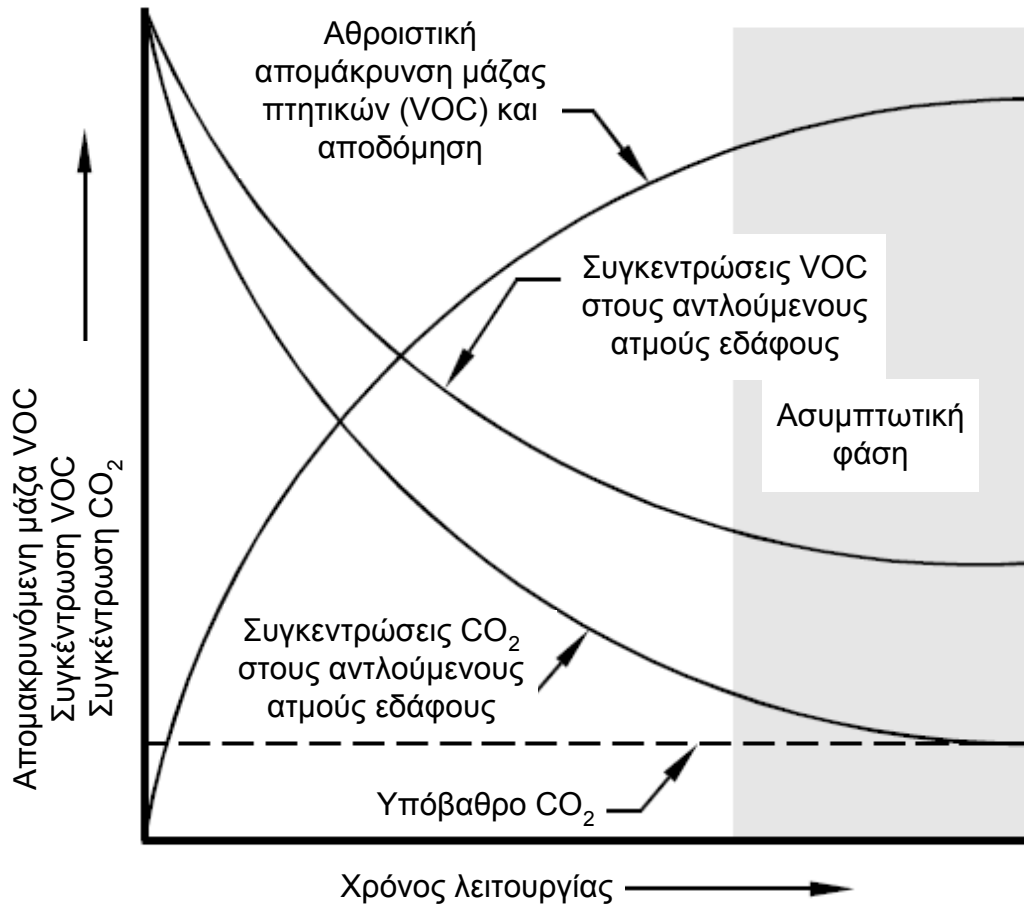
Η παρακολούθηση της προόδου ενός εγκατεστημένου συστήματος βιοαερισμού όσον αφορά τη μείωση των ρύπων στο έδαφος θεωρείται απαραίτητη εργασία, είναι όμως πιο δύσκολη υπόθεση από τα συστήματα απόληψης ατμών εδάφους, επειδή η απομακρυνόμενη μάζα ρύπων στο έδαφος δεν μπορεί να μετρηθεί μόνο με την παρουσία των ρύπων στους ατμούς. Έτσι, στο βιοαερισμό παράλληλα με τις συγκεντρώσεις ρύπων στο αέριο ρεύμα, πρέπει να προσδιορίζεται και το διοξείδιο του άνθρακα (προϊόν της μικροβιακής αναπνοής).

Τα συστήματα τα οποία κατασκευάζονται μόνο με φρεάτια έγχυσης δεν προσφέρονται για ικανοποιητική παρακολούθηση της προόδου της εξυγίανσης, επειδή δεν είναι δυνατή η συλλογή των απαερίων. Η παρακολούθηση πρέπει να περιλαμβάνει τότε δειγματοληψίες από το υπέδαφος για έλεγχο της μείωσης των ρύπων. Θα πρέπει να διασφαλισθεί επίσης ότι το ρεύμα του προσαγόμενου αέρα δεν προκαλεί μόλυνση της ατμόσφαιρας ή του καθαρού εδάφους και του υπόγειου νερού. Για το σκοπό αυτό πρέπει να λαμβάνονται και να ελέγχονται τακτικά δείγματα αέρα και υπόγειου νερού. Η συχνότητα δειγματοληψιών και μετρήσεων σε όλο το σύστημα πρέπει να είναι ημερήσια κατά το ξεκίνημα της εγκατάστασης (πρώτες 7-10 ημέρες) και ανά 15-ήμερο ή μήνα στη συνέχεια.

Η πρόοδος της εξυγίανσης με ένα σύστημα βιοαερισμού εμφανίζει ασυμπτωτική συμπεριφορά ως προς τις πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC) και το διοξείδιο του άνθρακα, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.11. Όταν η επεξεργασία φθάσει στην ασυμπτωτική περιοχή, πρέπει να εξετασθούν εναλλακτικές επεμβάσεις για αύξηση της αποδοτικότητας, όπως αύξηση του ρυθμού απόληψης ατμών ή της συχνότητας προσθήκης θρεπτικών. Άλλες πιο δραστικές επεμβάσεις μπορεί να είναι η διάνοιξη φρεατίων έγχυσης ή πρόσθετων φρεατίων απόληψης ή ακόμη και η έγχυση διαλυμάτων βακτηρίων.

Εάν η ασυμπτωτική συμπεριφορά είναι επίμονη για περιόδους μεγαλύτερες από 6 μήνες, πρέπει να τροποποιηθεί περαιτέρω ο σχεδιασμός

του συστήματος, για παράδειγμα με παλμική έγχυση ή απόληψη αέρα. Σε περίπτωση που η ασυμπτωτική συμπεριφορά επιμένει, πιθανό να πρέπει να εγκαταλειφθεί η λειτουργία αυτής της εγκατάστασης εξυγίανσης.



Σχήμα 2.11. Απομακρυνόμενη μάζα πτητικών (VOC) και συγκέντρωση VOC και CO<sub>2</sub> συναρτήσει του χρόνου σε ένα σύστημα βιοαερισμού.

### 2.3.2.5 Κριτήρια επιλογής και σχεδιασμού

Τα κριτήρια αυτά μπορούν να βοηθήσουν στη λήψη της απόφασης επιλογής του βιοαερισμού εδάφους ως μεθόδου εξυγίανσης και στη συνέχεια στον εντοπισμό δυσλειτουργιών και επανεξέτασης του αρχικού σχεδιασμού της εγκατάστασης (Πίν. 2.15). Αν δεν πληρούνται μερικά από αυτά τα κριτήρια, θα πρέπει να αναζητηθούν συμπληρωματικές πληροφορίες προκειμένου να βελτιωθεί η εγκατάσταση και να επιτευχθούν οι στόχοι που τέθηκαν αρχικά.

Πίνακας 2.15. Κριτήρια επιλογής και σχεδιασμού ενός συστήματος βιοαερισμού εδάφους.

Κριτήριο	Οριακή τιμή ή μέτρα αντιμετώπισης
<b>Χαρακτηριστικά περιοχής</b>	
➤ Εσωτερική διαπερατότητα	$> 10^{-10} \text{ cm}^2$
➤ Ολικά ετερότροφα βακτήρια	$> 1.000 \text{ CFU / gr}$
➤ pH εδάφους	6 – 8
➤ Υγρασία εδάφους	40 – 85%
➤ Θερμοκρασία εδάφους	10 – 45°C
➤ Λόγος άνθρακα/αζώτου/φωσφόρου	100 / 10 / 5 μέχρι 100 / 1 / 0,5
➤ Βάθος υδροφόρου ορίζοντα	$> 1 \text{ m}$
<b>Χαρακτηριστικά ρύπων</b>	
➤ Συστατικά ρύπων	Βιοαποδομήσιμα
➤ Συγκέντρωση πετρελαιοειδών	$< 25.000 \text{ ppm}$
➤ Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων	$< 2.500 \text{ ppm}$
➤ Σε περίπτωση συστατικών με τάση ατμών $> 0,5 \text{ mm Hg}$ ή σημεία βρασμού $< 300^\circ\text{C}$ ή σταθερά Henry $> 100 \text{ atm}$	Έλεγχος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τα πτητικά συστατικά
<b>Σχεδιασμός συστήματος</b>	
➤ Ακτίνα επιρροής	1,5–30 m
➤ Υπολογισμός ακτίνας επιρροής	Για όλα τα είδη εδαφών της περιοχής
➤ Υπολογισμός παροχής απόληψης	Επίτευξη τεθέντος χρόνου εξυγίανσης
➤ Επιλογή είδους φρεατίων (κατακόρυφα ή οριζόντια)	Κατάλληλα για τις συνθήκες της περιοχής
➤ Πυκνότητα φρεατίων	Να καλύπτει την ακτίνα επιρροής κάθε φρέατος
➤ Ανοίγματα φίλτρων φρεατίων	Να ταιριάζουν με το είδος του εδάφους
➤ Επιλογή φυσητήρα	Να είναι κατάλληλος για τις επιθυμητές συνθήκες κενού
➤ Φρεάτια έγχυσης	Να περιλαμβάνονται στο βασικό σχεδιασμό



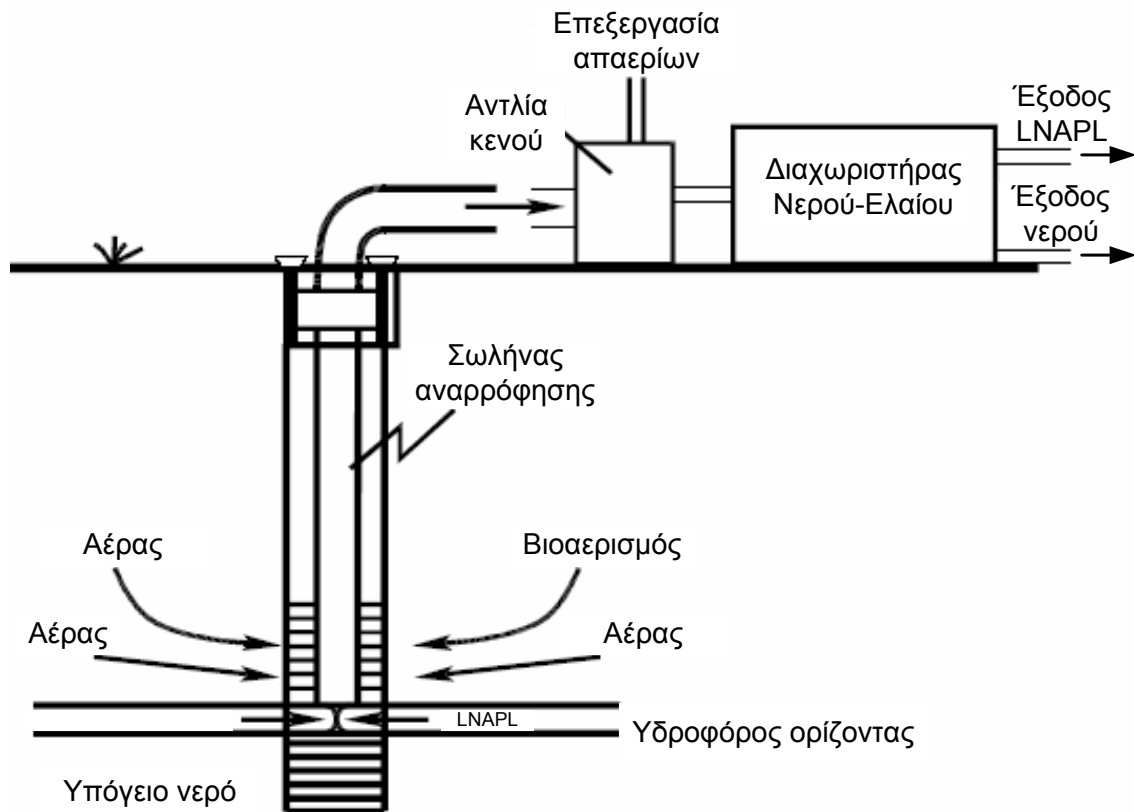
- 
- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Προαιρετικά τμήματα σχεδιασμού (τροφοδοσία θρεπτικών, επιφανειακά φράγματα, ταπείνωση υδροφόρου ορίζοντα, επεξεργασία απαερίων)</li> </ul> | Επιλογή και σχεδιασμός τους, αν δεν επιτυγχάνονται οι στόχοι |
|---|--|

#### **Λειτουργία και παρακολούθηση**

- |  |                  |
|--|------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Παρακολούθηση πτητικών οργανικών (VOC) και CO<sub>2</sub></li> </ul>          | Επιθυμητή        |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Δειγματοληψία και αναλύσεις υπεδάφους για έλεγχο βιοαποδόμησης</li> </ul>     | Υποχρεωτικές     |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Μετρήσεις και αναλύσεις στην αρχική φάση λειτουργίας (7-10 ημέρες)</li> </ul> | Κάθε ημέρα       |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Μετρήσεις και αναλύσεις μετά την αρχική φάση λειτουργίας</li> </ul>           | Ανά 15-30 ημέρες |
- 

### **2.3.3 Βιοαναρρόφηση**

Η βιοαναρρόφηση (Bioslurping) είναι μία καινοτόμος τεχνολογία, η οποία βασίζεται στην απομάκρυνση επιπλέοντος ελεύθερου προϊόντος πάνω στον υδροφόρο ορίζοντα και τον αερισμό του εδάφους με κατάλληλο αναρροφητικό σωλήνα. Αυτή η τεχνική αερισμού μοιάζει με το βιοαερισμό, δεδομένου ότι υποβοηθάει την εξάτμιση και τη βιοαποδόμηση επί τόπου και οι ατμοί των ρύπων που φθάνουν στην επιφάνεια του εδάφους, είτε απορρίπτονται ως έχουν, είτε επεξεργάζονται. Ένα τυπικό σύστημα βιοαναρρόφησης φαίνεται στο Σχ. 2.12.



Σχήμα 2.12. Τυπικό σύστημα βιοαναρρόφησης.

## 2.3.4 Αγροκαλλιέργεια

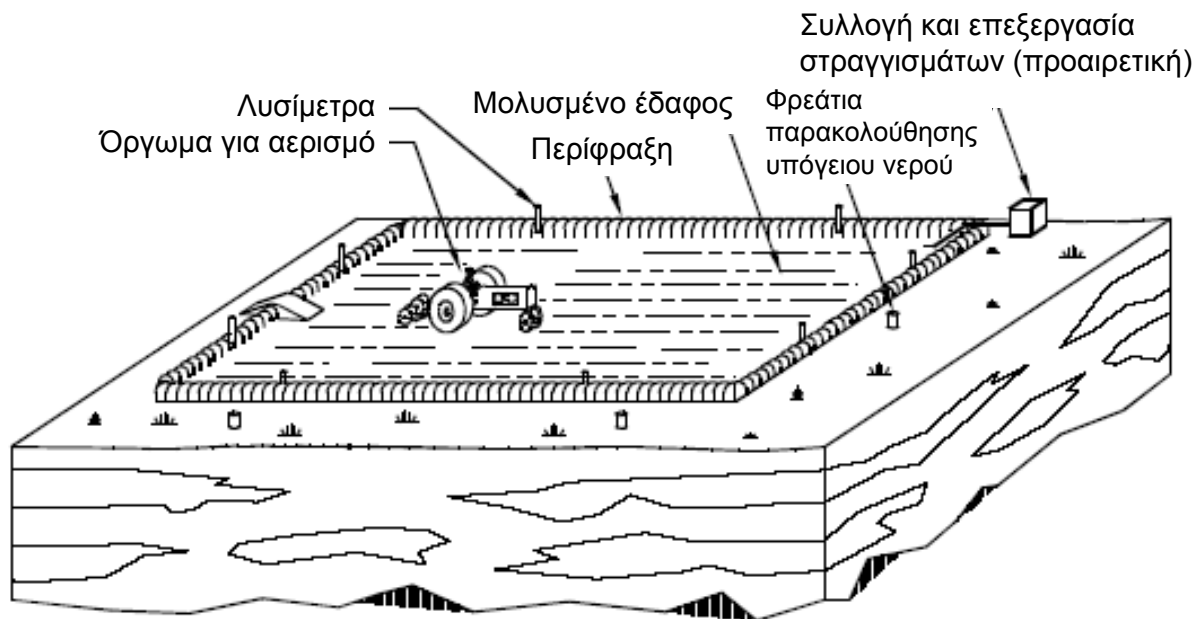
### 2.3.4.1 Γενικά

Η **αγροκαλλιέργεια (landfarming)** ή **επεξεργασία εδάφους (land treatment)** αποτελεί μια τεχνολογία επιφανειακής επεξεργασίας εδαφών, η οποία μειώνει τις συγκεντρώσεις των ρύπων με βιοεξυγίανση. Το μολυσμένο χώμα μετά την εκσκαφή του απλώνεται σε λεπτό στρώμα πάνω στο έδαφος και ενισχύεται η μικροβιακή δραστηριότητα με αερισμό ή/και με την προσθήκη θρεπτικών και υγρασίας που οδηγεί στην αποδόμηση των ρύπων. Με την τεχνική αυτή επιδιώκεται με τη ρύθμιση ορισμένων κρίσιμων περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως το pH, η υγρασία και η θερμοκρασία του εδάφους και οι συγκεντρώσεις οξυγόνου και θρεπτικών, να προωθήσουν τη βιοαποδόμηση.

Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας το όργανο βοηθάει στον αερισμό του εδάφους, αλλά και στην ενσωμάτωση βελτιωτικών, όπως πριονίδια, άχυρο ή άλλα διογκωτικά υλικά, θρεπτικών ή ακόμη και μικροοργανισμών. Οι μικροοργανισμοί μπορεί να είναι επιλεγμένοι, γενετικά τροποποιημένοι ή εγκλιματισμένοι (προσαρμοσμένοι στις τοπικές συνθήκες). Τα διογκωτικά υλικά προστίθενται στο έδαφος με σκοπό να αυξήσουν την ικανότητα συγκράτησης

νερού και τη διαπερατότητα αέρα, ή να προσφέρουν μια πηγή άνθρακα στους μικροοργανισμούς. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε βιοαποδομήσιμους ρύπους, όπως οι πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες και η πενταχλωροφαινόλη, με την προϋπόθεση ότι η συγκέντρωσή τους δεν υπερβαίνει ορισμένα όρια, πάνω από τα οποία οι μικροοργανισμοί δεν μπορούν να αναπτυχθούν.

Εάν το βάθος της ρύπανσης είναι μικρό (μέχρι 1 m), είναι δυνατό να εφαρμοσθεί η μέθοδος χωρίς εκσκαφή του εδάφους. Για βάθη όμως μεγαλύτερα από 1,5 m, απαιτείται η εκσκαφή του μολυσμένου χώματος και το άπλωμά του στην επιφάνεια του εδάφους για επεξεργασία. Η τυπική λειτουργία μιας εγκατάστασης αγροκαλλιέργειας φαίνεται στο Σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13. Τυπικό σύστημα αγροκαλλιέργειας.

Η εφαρμογή της μεθόδου σε πηητικούς ρύπους καταλήγει στην απομάκρυνσή τους περισσότερο με εξάτμιση παρά με βιοαποδόμηση με τον αερισμό του εδάφους κατά το όργωμα. Αντιθέτως, οι μικρής πηητικότητας ρύποι βιοαποδομούνται κυρίως, αλλά οι χρόνοι βιοεξυγίανσης επιμηκύνονται συνήθως σημαντικά. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της αγροκαλλιέργειας φαίνονται στον Πίν. 2.16.

Πίνακας 2.16. Πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της αγροκαλλιέργειας.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Σχετικά εύκολος σχεδιασμός και εφαρμογή.	Μειώσεις ρύπων μεγαλύτερες από 95% και σε τελικές συγκεντρώσεις μικρότερες από 0,1 ppm δεν επιτυγχάνονται εύκολα.
Σε άριστες συνθήκες, επιτυγχάνονται σύντομοι χρόνοι επεξεργασίας από 6 μήνες έως 2 έτη.	Μπορεί να μην έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων.
Έχει ανταγωνιστικό κόστος: 30-60 \$/ton ρυπασμένου εδάφους.	Η αυξημένη συγκέντρωση τοξικών ρύπων μπορεί να παρεμποδίσει τη μικροβιακή ανάπτυξη.
Είναι αποτελεσματική σε οργανικούς ρύπους με χαμηλούς ρυθμούς βιοαποδόμησης.	Τα πτητικά συστατικά απομακρύνονται περισσότερο με εξάτμιση παρά με βιοαποδόμηση. Απαιτείται μεγάλη εδαφική έκταση για την επεξεργασία. Η δημιουργία σκόνης και ατμών κατά τον αερισμό μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα ποιότητας αέρα. Μπορεί να απαιτηθεί η τοποθέτηση στεγανής επένδυσης κάτω από το ρυπασμένο στρώμα εδάφους.

#### 2.3.4.2 Αξιολόγηση αποτελεσματικότητας

Οι κρίσιμες παράμετροι οι οποίες επιβάλλεται να χρησιμοποιηθούν για τη λήψη της απόφασης εφαρμογής της μεθόδου για την εξυγίανση μιας ρυπασμένης περιοχή κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες, σε εδαφικές παραμέτρους, παραμέτρους ρύπων και κλιματικές συνθήκες, όπως φαίνεται στον Πίν. 2.17. Οι περισσότερες παράμετροι της αγροκαλλιέργειας, πλην των κλιματικών συνθηκών, μπορούν να ελεγχθούν κατά την εφαρμογή της μεθόδου, λόγω της επεξεργασίας στην επιφάνεια του εδάφους.

Πίνακας 2.17. Κρίσιμες παράμετροι για την επιλογή μεθόδου εξυγίανσης μιας ρυπασμένης περιοχής.

Χαρακτηριστικά εδάφους	Χαρακτηριστικά ρύπων	Κλιματικές συνθήκες
Πυκνότητα μικροβιακού πληθυσμού	Πτητικότητα	Θερμοκρασία περιβάλλοντος
pH εδάφους	Χημική σύσταση	Βροχοπτώσεις
Υγρασία εδάφους	Συγκέντρωση και τοξικότητα	Ένταση ανέμου
Θερμοκρασία εδάφους		
Συγκεντρώσεις θρεπτικών		
Υφή εδάφους		

### 2.3.4.2.1 Χαρακτηριστικά εδάφους

#### Πυκνότητα μικροβιακού πληθυσμού

Το έδαφος περιέχει σε κανονικές συνθήκες μεγάλο αριθμό μικροοργανισμών, όπως βακτήρια, άλγες (μικροφύκη), μύκητες, πρωτόζωα και ακτινομύκητες. Οι μικροοργανισμοί αυτοί είναι γενικά αερόβιοι σε καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη, τα οποία είναι και τα πιο κατάλληλα για εξυγίανση με τη μέθοδο της αγροκαλλιέργειας. Από τους μικροοργανισμούς αυτούς οι πιο πολυάριθμοι και βιοχημικά δραστήριοι είναι τα βακτήρια, ιδιαίτερα σε χαμηλά επίπεδα οξυγόνου. Τα βακτήρια χρειάζονται για την κυτταρική τους ανάπτυξη μια πηγή άνθρακα και για τις μεταβολικές τους λειτουργίες μια πηγή ενέργειας.

Στο έδαφος υπάρχουν συνήθως αρκετά είδη και ποσότητες μικροοργανισμών. Σε πρόσφατες όμως εφαρμογές με τεχνικές βιοεξυγίανσης, και ιδιαίτερα εκτός τόπου, έχουν χρησιμοποιηθεί καλλιεργημένοι μικροοργανισμοί ή ζωική κοπριά, συνήθως από κοτόπουλα ή αγελάδες. Η προσθήκη κοπριάς συνεισφέρει με την αύξηση του μικροβιακού πληθυσμού και τον εμπλουτισμό του εδάφους σε θρεπτικά. Για εφαρμογές αγροκαλλιέργειας με ρύπους μικρής τοξικότητας όπως τα πετρελαιοειδή, τα πιο σημαντικά βακτήρια είναι αυτά που είναι συγχρόνως αερόβια (ή προαιρετικά αερόβια) και ετερότροφα.

Απαιτούνται εργαστηριακές αναλύσεις δειγμάτων εδάφους από τη ρυπασμένη περιοχή, προκειμένου να ελεγχθεί η παρουσία και η πληθυσμιακή επάρκεια βακτηρίων που θα συνεισφέρουν στις διεργασίες βιοεξυγίανσης. Αυτές οι αναλύσεις πρέπει να περιλαμβάνουν οπωσδήποτε την καταμέτρηση του αριθμού ολικών ετερότροφων βακτηρίων. Σε τυπικά εδάφη οι πυκνότητες μικροβιακού πληθυσμού κυμαίνονται μεταξύ  $10^4$  μέχρι  $10^7$  CFU/g. Για αποτελεσματική εξυγίανση με αγροκαλλιέργεια, ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός ετερότροφων βακτηρίων πρέπει να είναι  $10^3$  CFU/g. Μικρότερη

μικροβιακή πυκνότητα υποδεικνύει την παρουσία τοξικών συγκεντρώσεων οργανικών ή ανόργανων ουσιών. Και σε αυτή την περίπτωση όμως μπορεί να εφαρμοσθεί με επιτυχία η αγροκαλλιέργεια, εάν το ρυπασμένο έδαφος αραιωθεί με υγιές έδαφος και αυξηθεί τεχνητά η μικροβιακή του πυκνότητα.

Μερικές φορές είναι απαραίτητο να αναγνωρισθούν εργαστηριακά τα υπάρχοντα βακτηριακά είδη. Αυτό γίνεται σε περιπτώσεις που υπάρχει αβεβαιότητα για την ικανότητα των αυτόχθονων μικροβίων να αποδομήσουν συγκεκριμένους ρύπους. Εάν διαπιστωθεί ότι τα υπάρχοντα είδη μικροοργανισμών ή ο αριθμός τους δεν είναι ικανοποιητικά, μπορούν αυτά να βελτιωθούν με την προσθήκη καλλιεργημένων μικροβίων που διατίθενται στην αγορά.

### **ρΗ εδάφους**

Το άριστο ρΗ του εδάφους για βακτηριακή ανάπτυξη είναι μεταξύ 6 και 8 και συνεπώς έξω από αυτή την περιοχή απαιτείται διόρθωσή του πριν την εφαρμογή της αγροκαλλιέργειας. Σε εδάφη με ρΗ εκτός αυτών των ορίων πρέπει να το ρΗ να διορθώνεται πριν αλλά και κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου. Το ρΗ του εδάφους μπορεί να αυξηθεί με την προσθήκη ασβέστου και να μειωθεί με την προσθήκη στοιχειακού θείου.

### **Υγρασία εδάφους**

Τα βακτήρια χρειάζονται υγρές συνθήκες για την ανάπτυξή τους, υπερβολική υγρασία όμως μειώνει τη διαθεσιμότητα οξυγόνου με τον περιορισμό της ροής του αέρα δια μέσου των πόρων του εδάφους. Η ιδανική περιοχή υγρασίας είναι μεταξύ 40 και 85 % της υδατοχωρητικότητας του εδάφους που αντιστοιχεί σε 12-30% κατά βάρος εδάφους. Σε εφαρμογές αγροκαλλιέργειας πρέπει να προστίθεται περιοδικά υγρασία στο έδαφος, επειδή ο αερισμός με το όργωμα ξηραίνει το έδαφος με την εξάτμιση του νερού.

Η δυνατότητα διείσδυσης ομβρίων νερών μπορεί να αυξήσει υπερβολικά την υγρασία σε περιοχές που δεν υπάρχει επιφανειακό κάλυμμα, όπως ασφαλτος ή σκυρόδεμα. Αυτό μπορεί να αποτελέσει σημαντικό πρόβλημα σε περιπτώσεις έντονων βροχοπτώσεων και λεπτόκοκκων εδαφών. Η τοποθέτηση τότε ενός αδιάβροχου καλύμματος μπορεί να περιορίσει την αυξημένη διείσδυση νερού και τη διάβρωση του επεξεργαζόμενου εδάφους.

### **Θερμοκρασία εδάφους**

Ο ρυθμός βακτηριακής ανάπτυξης εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Έχει αποδειχθεί ότι η μικροβιακή δραστηριότητα του εδάφους μειώνεται σημαντικά σε θερμοκρασίες μικρότερες των 10°C και ουσιαστικά σταματά στους 5°C. Επίσης, η μικροβιακή δραστηριότητα των πιο σημαντικών βακτηρίων βιοαποδόμησης οργανικών ουσιών μειώνεται σε θερμοκρασίες πάνω από 45°C. Στην περιοχή από 10 μέχρι 45°C ο ρυθμός μικροβιακής δραστηριότητας περίπου διπλασιάζεται κάθε 10°C, όπως συμβαίνει συνήθως και στις χημικές

αντιδράσεις. Έτσι, οι εποχιακές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας καθορίζουν την αποτελεσματικότητα της αγροκαλλιέργειας και τα θερμά κλίματα ευνοούνται από την άποψη αυτή. Σε ψυχρά κλίματα ή στις ψυχρές περιόδους θερμότερων κλιμάτων πρέπει να λαμβάνονται μέτρα, όπως η θέρμανση της εγκατάστασης βιοεξυγίανσης με μια κατασκευή τύπου θερμοκηπίου, ή η προσθήκη στο επεξεργαζόμενο έδαφος ψυχρόφιλων βακτηρίων που έχουν έντονη μικροβιακή δραστηριότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες.

### **Συγκεντρώσεις θρεπτικών**

Τα βακτήρια χρειάζονται ανόργανα θρεπτικά, όπως νιτρικά και φωσφορικά, για την υποστήριξη της κυτταρικής τους ανάπτυξης στα πλαίσια της οποίας συντελείται και η βιοδιάσπαση των ρύπων. Τα θρεπτικά μπορεί να είναι διαθέσιμα στη ρυπασμένη περιοχή, συχνά όμως απαιτείται η προσθήκη τους για την ανάπτυξη των βακτηριακών πληθυσμών. Υπερβολικές όμως ποσότητες ορισμένων θρεπτικών, όπως φωσφορικών και θειικών, ενδέχεται να καταστείλουν το μεταβολισμό των κυττάρων.

Ένας χονδρικός υπολογισμός των ελάχιστων απαιτήσεων σε θρεπτικά βασίζεται στη στοιχειομετρία της συνολικής διεργασίας κυτταρικής ανάπτυξης και βιοαποδόμησης που δίνει τη στοιχειακή σχέση άνθρακα / αζώτου / φωσφόρου μεταξύ 100/10/1 και 100/1/0,5 ανάλογα με τους ρύπους και τα εμπλεκόμενα είδη βακτηρίων στη διεργασία βιοαποδόμησης. Έτσι, στην εφαρμογή της μεθόδου αγροκαλλιέργειας πρέπει να προσδιορισθούν πρώτα οι φυσικές συγκεντρώσεις άνθρακα, αζώτου και φωσφόρου στο έδαφος και χρησιμοποιώντας τους στοιχειομετρικούς λόγους να καθορισθούν στη συνέχεια οι προσθήκες θρεπτικών. Μια συντηρητική εκτίμηση του απαιτούμενου αζώτου και φωσφόρου για άριστη βιοαποδόμηση πετρελαιοειδών βασίζεται στη θεώρηση ότι η ολική μάζα του υδρογονάνθρακα αντιπροσωπεύει τη διατιθέμενη για βιοαποδόμηση μάζα άνθρακα. Αυτή η απλούστευση βασίζεται στο γεγονός ότι η περιεκτικότητα των πετρελαϊκών υδρογονανθράκων σε άνθρακα είναι περίπου 90% κατά βάρος. Για πιο ακριβείς υπολογισμούς όμως πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η περιεκτικότητα του ρύπου σε άνθρακα.

### **Παράδειγμα 2.1**

Έδαφος συνολικού όγκου 2.000 m<sup>3</sup> και φαινομένης πυκνότητας 1,75 g/cm<sup>3</sup> έχει ρυπανθεί από μια υπόγεια δεξαμενή πετρελαίου με μέση συγκέντρωση ρύπου 1.000 mg/kg. Να υπολογισθούν οι άριστες απαιτούμενες συγκεντρώσεις αζώτου και φωσφόρου.

### **Λύση**

Η μάζα ρυπασμένου εδάφους είναι:

$$(\text{Μάζα εδάφους}) = 2000\text{m}^3 \times 1,75 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times \frac{1\text{kg}}{10^3\text{g}} \times \frac{10^6\text{cm}^3}{1\text{m}^3} = 3,5 \times 10^6\text{ kg}$$

Η μάζα του ρύπου είναι:

$$(\text{Μάζα ρύπου}) = 3,5 \times 10^6 \text{ kg} \times 1000 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ kg}}{10^6 \text{ mg}} = 3.500 \text{ kg}$$

Χρησιμοποιώντας τους λόγους C/N/P ίσους με 100/10/1 υπολογίζεται η μάζα του αζώτου ίση με 350 kg και η μάζα του φωσφόρου ίση με 35 kg. Σε όρους συγκεντρώσεων, οι ιδανικές συγκεντρώσεις είναι 100 mg/kg και 10 mg/kg για το άζωτο και το φωσφόρο, αντιστοίχως. Οι τιμές αυτές πρέπει να συγκριθούν με τις αναλύσεις εδάφους για να ευρεθεί αν απαιτείται η προσθήκη θρεπτικών. Η προσθήκη αζώτου πρέπει να γίνεται με ουσίες αργής απελευθέρωσης, όπως το οργανικό άζωτο, επειδή το άζωτο μειώνει το pH, ιδιαίτερα με ανόργανες πηγές αζώτου όπως το νιτρικό αμμώνιο.

### **Υφή του εδάφους**

Η υφή του εδάφους επηρεάζει τη διαπερατότητα, την υγρασία και τη φαινομένη πυκνότητα του εδάφους. Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τη διασφάλιση επαρκούς προσφοράς οξυγόνου με το όργωμα, ομοιόμορφης κατανομής θρεπτικών και επιπέδου υγρασίας.

Βαριά εδάφη όπως οι άργιλοι και οι πηλοί τείνουν να δημιουργήσουν συσσωματώματα που εμποδίζουν τον αερισμό του εδάφους, δυσκολεύουν την κατανομή των θρεπτικών και συγκρατούν υπερβολικές ποσότητες νερού μετά από μια βροχή. Σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει να αναμιγνύονται με το βαρύ έδαφος βελτιωτικά, όπως ο γύψος, και διογκωτικά μέσα, όπως το άχυρο και το πριονίδι, που καθιστούν το μέσο αγροκαλλιέργειας αφράτο και εύκολα αεριζόμενο. Συμπαγή εδάφη απαιτούν θρυμματισμό τους πριν την ενσωμάτωση των βελτιωτικών εδάφους.

### **Πτητικότητα ρύπων**

Η πτητικότητα είναι σημαντικό χαρακτηριστικό των ρύπων προκειμένου να αξιολογηθεί το ενδεχόμενο εξάτμισης αντί της βιοαποδόμησης, ιδιαίτερα κατά τη φάση οργώματος. Οι ατμοί των ρύπων που εκπέμπονται κατά τη διαδικασία της εξυγίανσης με αγροκαλλιέργεια διασπείρονται στην ατμόσφαιρα, εκτός και αν η αγροκαλλιέργεια έχει κλεισθεί σε μια κατασκευή τύπου θερμοκηπίου ή έχει καλυφθεί με πλαστικό κάλυμμα.

Τα πετρελαϊκά προϊόντα που είναι συχνά υπεύθυνα για ρυπάνσεις του εδάφους από υπόγειες δεξαμενές μπορεί να είναι πτητικά, όπως οι βενζίνες, ή πολύ λιγότερο πτητικά, όπως τα λιπαντικά. Ανάλογα με τους νομοθετικούς περιορισμούς που ισχύουν εκάστοτε μπορεί να απαιτηθεί ο έλεγχος των εκπομπών, έτσι ώστε αυτά να μη διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα. Σε ρυπάνσεις με τοξικά χημικά, όπως τα πτητικά φυτοφάρμακα, επιβάλλεται σε κάθε περίπτωση η εγκατάσταση συστήματος κατακράτησης των τοξικών ατμών.



### 2.3.4.2.2 Χαρακτηριστικά ρύπων

#### **Χημική δομή**

Οι χημικές δομές των συστατικών των ρύπων στο έδαφος προσδιορίζουν σε μεγάλο βαθμό το ρυθμό βιοαποδόμησης με την τεχνική της αγροκαλλιέργειας. Στην περίπτωση των πετρελαϊκών προϊόντων που συνήθως αποθηκεύονται σε υπόγειες δεξαμενές, σχεδόν όλα τα συστατικά τους είναι βιοαποδομήσιμα. Όσο πιο πολύπλοκη όμως είναι η δομή του συστατικού, τόσο πιο δύσκολη και αργή θα είναι η αποδόμησή του. Τα περισσότερα χαμηλού μοριακού βάρους ( $\leq 9$  άτομα άνθρακα) αλειφατικά και μονοαρωματικά συστατικά βιοαποδομούνται πιο εύκολα από τα μεγαλύτερου μοριακού βάρους ανάλογά τους. Στον Πίν. 2.13 του κεφαλαίου για το βιοαερισμό καταγράφονται κατά σειρά μειούμενου ρυθμού βιοαποδόμησης, ορισμένα κοινά συστατικά πετρελαιοειδών υπόγειων δεξαμενών.

Η χημική δομή των συστατικών μιας ρύπανσης επιτρέπει σε μεγάλο βαθμό τον προσδιορισμό των πιο δύσκολα βιοαποδομήσιμων συστατικών. Έτσι, οι υπολογισμοί χρόνου απορρύπανσης, οι μελέτες βιοεπεξεργασιμότητας, οι πιλοτικές μελέτες πεδίου και η λειτουργία της εγκατάστασης, καθώς και η τελική παρακολούθηση υπολειμματικών ρύπων πρέπει να βασίζονται στους πιο δύσκολα βιοδιασπώμενους ρύπους.

#### **Συγκέντρωση και τοξικότητα**

Η παρουσία πολύ μεγάλων συγκεντρώσεων πετρελαιοειδών, τοξικών οργανικών ουσιών, ή βαρέων μετάλλων στο έδαφος μπορεί να είναι τοξική ή να παρεμποδίζει την ανάπτυξη των μικροοργανισμών βιοαποδόμησης. Επιπλέον, πολύ μικρές συγκεντρώσεις οργανικών ουσιών στο έδαφος μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της μικροβιακής δραστηριότητας.

Γενικά, συγκεντρώσεις πετρελαϊκών υδρογονανθράκων στην περιοχή 10.000 έως 50.000 ppm, ή βαρέων μετάλλων πάνω από 2.500 ppm στο έδαφος λειτουργούν παρεμποδιστικά ή/και τοξικά για τους περισσότερους μικροοργανισμούς. Η αντοχή των μικροοργανισμών του εδάφους σε άλλες τοξικές ουσίες μπορεί να είναι πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερη και πρέπει να ελέγχεται εργαστηριακά κατά περίπτωση. Γενικά, αν οι συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων είναι μεγαλύτερες από 10.000 ppm ή οι συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων μεγαλύτερες από 2.500 ppm, επιβάλλεται η ανάμιξη του ρυπασμένου εδάφους με καθαρό για αραίωση, έτσι ώστε να μειωθούν οι συγκεντρώσεις των επικίνδυνων ρύπων κάτω από τα όρια.

Εκτός από τις μέγιστες συγκεντρώσεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι τελικές συγκεντρώσεις απορρύπανσης, επειδή κάτω από ορισμένες οριακές συγκεντρώσεις τα βακτήρια δεν μπορούν να αφομοιώσουν τον άνθρακα των ρύπων, ώστε να διατηρήσουν τη βιολογική δραστηριότητά τους. Οι οριακές αυτές συγκεντρώσεις μπορούν να προσδιορισθούν με εργαστηριακές μελέτες και θα πρέπει να είναι μικρότερες από τις απαιτούμενες συγκεντρώσεις απορρύπανσης. Παρόλο που οι οριακές τιμές ποικίλουν εξαρτώμενες από τα

χαρακτηριστικά των βακτηρίων και των ρύπων, συγκεντρώσεις ρύπων κάτω από 0,1 ppm δεν είναι γενικά δυνατό να επιτευχθούν μόνο με βιολογική επεξεργασία. Η εμπειρία έχει δείξει επίσης ότι μειώσεις των συγκεντρώσεων πετρελαιοειδών πάνω από 95% είναι δύσκολο να επιτευχθούν, λόγω της παρουσίας των δύσκολα βιοδιασπώμενων συστατικών τους.

Συμπερασματικά, πριν την εφαρμογή της μεθόδου βιοεξυγίανσης με αγροκαλλιέργεια πρέπει σε πρώτη φάση να εξετάζονται τα είδη των ρύπων και οι αρχικές και τελικές απαιτούμενες συγκεντρώσεις του συνόλου των ρύπων και των συστατικών τους. Αν απαιτείται τελική συγκέντρωση μικρότερη από 0,1 ppm για οποιοδήποτε συστατικό ή μείωση του συνόλου των ρύπων μεγαλύτερη από 95%, τότε θα πρέπει, είτε να εκτελεσθεί μία πιλοτική μελέτη που θα αποδεικνύει τη δυνατότητα επίτευξης αυτών των μειώσεων με βιοαερισμό, είτε να εξετασθεί το ενδεχόμενο εφαρμογής άλλης τεχνολογίας εξυγίανσης.

#### **2.3.4.2.3 Κλιματικές συνθήκες**

Οι εγκαταστάσεις αγροκαλλιέργειας βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους και συνεπώς εκτίθενται σε κλιματικούς παράγοντες, όπως η βροχή, το χιόνι, ο άνεμος και η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

##### **Θερμοκρασία περιβάλλοντος**

Είναι σημαντικός παράγοντας επειδή καθορίζει τη θερμοκρασία του εδάφους που με τη σειρά της επηρεάζει τη μικροβιακή δραστηριότητα και τελικά τη βιοαποδόμηση. Η άριστη θερμοκρασιακή περιοχή είναι 10-45°C. Σε ψυχρά κλίματα και εποχές το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπισθεί με θερμοκηπιακές κατασκευές, κάλυψη με πλαστική μεμβράνη ή ακόμα και θέρμανση.

##### **Βροχόπτωση**

Αν η εγκατάσταση είναι ακάλυπτη και η βροχή πέφτει απ' ευθείας στο έδαφος, η υγρασία του εδάφους μπορεί να αυξηθεί υπερβολικά και να παρατηρηθούν προβλήματα διάβρωσης του εδάφους. Κατά τη διάρκεια ξηρασίας επίσης, η περιεχόμενη υγρασία μπορεί να μειωθεί κάτω από τα όρια μικροβιακής δραστηριότητας, οπότε απαιτείται η προσθήκη νερού στο έδαφος.

Σε περιοχές με ετήσιο ύψος βροχόπτωσης μεγαλύτερο από 750 mm νερού κατά τη διάρκεια της περιόδου αγροκαλλιέργειας θα απαιτηθεί η τοποθέτηση μιας προστατευτικής κατασκευής, όπως θερμοκήπιο, πλαστική σήραγγα ή κάλυψη με πλαστικό φύλλο ή λινάτσα. Επιπλέον, η επιφανειακή απορροή πρέπει να ελέγχεται με την κατασκευή αναχωμάτων στην περίμετρο της αγροκαλλιέργειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, επιβάλλεται να κατασκευασθεί και ένα σύστημα συλλογής των στραγγισμάτων για την αποφυγή ρύπανσης του υπόγειου νερού.

## Άνεμος

Σε περιόδους επικράτησης ισχυρών ανέμων, και οπωσδήποτε κατά τη φάση του οργώματος μπορεί να συμβεί απόβρωση του εδάφους και μεταφορά του ρυπασμένου χώματος σε γειτονική περιοχή. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί με τον περιοδικό ψεκάσμό του εδάφους με νερό.

### 2.3.4.2.4 Βιοεπεξεργασιμότητα

Σε περιπτώσεις μεγάλης τοξικότητας των ρύπων ή μη ευνοϊκών συνθηκών του εδάφους, συνιστάται να εκτελούνται μελέτες βιοεπεξεργασιμότητας. Οι μελέτες αυτές γίνονται συνήθως στο εργαστήριο και σχεδιάζονται, έτσι ώστε να υπολογίζονται οι κατάλληλες παράμετροι σχεδιασμού που θα βοηθήσουν να δοθούν απαντήσεις σε κρίσιμα ερωτήματα. Εάν οι μελέτες βιοεπεξεργασιμότητας δεν καταδεικνύουν αποτελεσματικότητα της μεθόδου αγροκαλλιέργειας στη συγκεκριμένη περίπτωση, τότε θα απαιτηθούν πιλοτικές μελέτες ή δοκιμές πεδίου, ή ακόμη και επιλογή άλλης μεθόδου εξυγίανσης. Οι μελέτες βιοεπεξεργασιμότητας πρέπει τελικά να δίνουν επαρκή στοιχεία για τη βιοαποδομησιμότητα των ρύπων, την ικανότητα των αυτοχθόνων μικροοργανισμών να αποδομούν τους ρύπους, τις άριστες συνθήκες μικροβιακής ανάπτυξης και την επάρκεια θρεπτικών.

Στις μελέτες βιοεπεξεργασιμότητας χρησιμοποιούνται γενικά δύο εργαστηριακές τεχνικές: μελέτες σε κωνικές φιάλες και μελέτες σε ρηχά σκεύη. Και στους δύο τύπους μελετών το πρώτο στάδιο είναι ο προσδιορισμός των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του προς επεξεργασία εδάφους. Οι απαιτούμενες τυπικές φυσικές και χημικές αναλύσεις φαίνονται στον Πίν. 2.18.

Πίνακας 2.18. Φυσικές και χημικές παράμετροι προσδιοριζόμενες σε μελέτες βιοεπεξεργασιμότητας.

Παράμετρος	Προσδιοριζόμενες ιδιότητες
Τοξικότητα εδάφους	Είδη και συγκεντρώσεις ρύπων και/ή μετάλλων, pH.
Υφή εδάφους	Κοκκομετρία, περιεκτικότητα σε άργιλο, υγρασία, πορώδες, διαπερατότητα, φαινομένη πυκνότητα.
Θρεπτικά	Νιτρικά, φωσφορικά, άλλα ιόντα.
Βιοαποδομησιμότητα ρύπων	Ολικός οργανικός άνθρακας, πτητικότητα, χημική δομή.

Αντικειμενικός στόχος αυτών των αναλύσεων είναι:

- Ο προσδιορισμός των τύπων και συγκεντρώσεων των ρύπων στο έδαφος που θα αξιοποιηθεί στις μελέτες βιοεπεξεργασιμότητας.
- Ο προσδιορισμός των συγκεντρώσεων (αζώτου και φωσφόρου) στο έδαφος.
- Ο προσδιορισμός των παρεμποδιστικών παραγόντων της βακτηριακής ανάπτυξης, όπως συγκεντρώσεις τοξικών μετάλλων και τιμές pH.

Μετά το χαρακτηρισμό των δειγμάτων εδάφους εκτελούνται οι **μελέτες αξιολόγησης** της αποτελεσματικότητας βιοαποδόμησης. Λόγω απλότητας και χαμηλού κόστους χρησιμοποιούνται συνήθως φιάλες για έλεγχο της βιοαποδομησιμότητας σε νερό ή έδαφος με τη βοήθεια μικρόκοσμου (αντιπροσωπευτικού βιοσυστήματος) μέσα σε υδατικό πολτό. Ειδικά στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της αγροκαλλιέργειας, οι φιάλες δεν κρίνονται τόσο κατάλληλες όσο οι δοκιμές σε ρηχά σκεύη που προσομοιάζουν την τελική εφαρμογή στερεάς κατάστασης.

Η αποδόμηση τόσο στις φιάλες όσο και στα σκεύη μετρείται με παρακολούθηση της μείωσης των συγκεντρώσεων των ρύπων και τις μεταβολές του βακτηριακού πληθυσμού και άλλων παραμέτρων με το χρόνο. Στα πλαίσια αυτά οι μελέτες βιοαποδομησιμότητας μπορεί να περιλαμβάνουν τις ακόλουθες επί μέρους μελέτες:

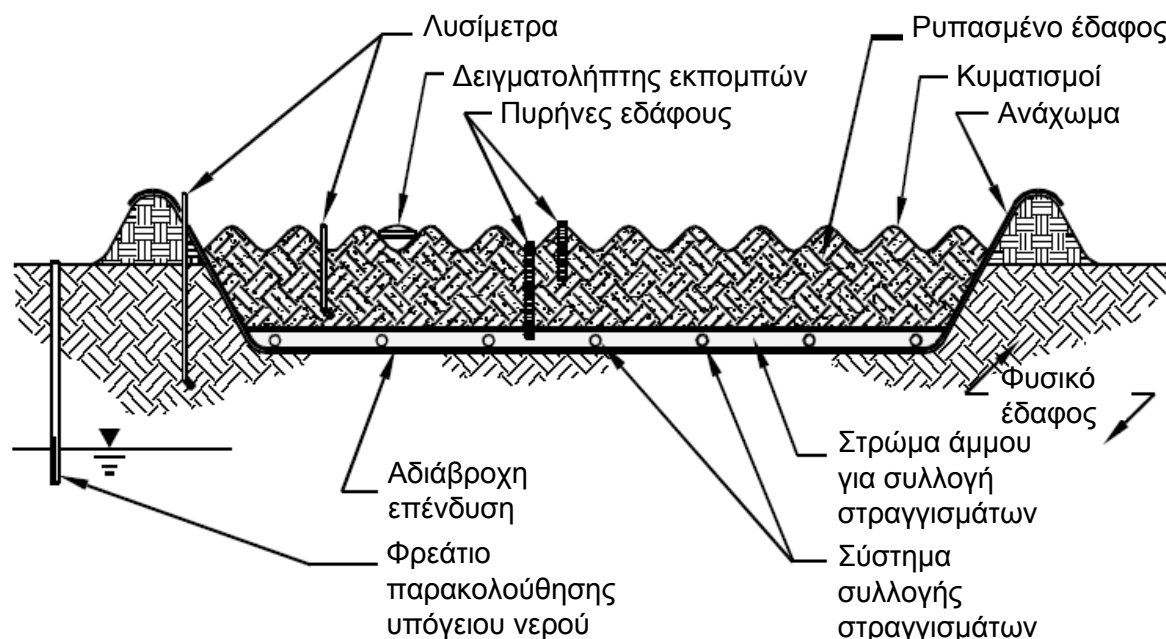
- Οι **μελέτες ελέγχου χωρίς βελτιωτικά** μετρούν το ρυθμό αποδόμησης των ρύπων με τα υπάρχοντα στο έδαφος βακτήρια με οξυγόνωση του εδάφους χωρίς όμως πρόσθετα θρεπτικά.
- Οι **μελέτες με ρύθμιση θρεπτικών** προσδιορίζουν την άριστη σχέση C/N/P για μεγιστοποίηση του ρυθμού αποδόμησης χρησιμοποιώντας μικρόκοσμους παρασκευασμένους με διαφορετικές συγκεντρώσεις θρεπτικών.
- Οι **μελέτες με επιλεγμένα στελέχη** επιλέγονται όταν οι αυτόχθονες μικροοργανισμοί αποδειχθούν ανεπαρκείς για αποτελεσματική βιοαποδόμηση. Οι μικρόκοσμοι εμβολιάζονται τότε με βακτήρια ή άλλους μικροοργανισμούς, η αποτελεσματικότητα των οποίων έχει αποδειχθεί εργαστηριακά σε ανάλογες περιπτώσεις, και ελέγχεται η αποτελεσματικότητα του εμβολιασμού.
- Οι **μελέτες ελέγχου με στείρες συνθήκες** μετρούν την αποδόμηση που οφείλεται σε αβιοτικούς παράγοντες (π.χ. εξάτμιση) για σύγκριση με τις βιολογικές διαδικασίες.

### 2.3.4.3 Σχεδιασμός συστήματος αγροκαλλιέργειας

Εφόσον επιβεβαιωθεί η δυνατότητα εφαρμογής της αγροκαλλιέργειας για μια συγκεκριμένη περίπτωση ρύπανσης, ακολουθεί ο σχεδιασμός του συστήματος βιοεξυγίανσης. Αυτός περιλαμβάνει την αιτιολόγηση της ορθότητας

της απόφασης και τον ορθολογικό σχεδιασμό της εγκατάστασης. Στο λεπτομερειακό σχεδιασμό πρέπει να περιλαμβάνονται:

- **Απαιτήσεις γης** που προσδιορίζονται διαιρώντας τον όγκο εδάφους προς επεξεργασία με το βάθος της αγροκαλλιέργειας. Το βάθος της αγροκαλλιέργειας κυμαίνεται μεταξύ 30 και 45 cm ανάλογα με τις δυνατότητες του εξοπλισμού οργώματος. Υπάρχει όμως ισχυρός εξοπλισμός που μπορεί να φθάσει μέχρι 60 cm. Πρόσθετος χώρος απαιτείται γύρω από την αγροκαλλιέργεια για το ανάχωμα και την πρόσβαση στην εγκατάσταση.
- **Κατασκευή του συστήματος αγροκαλλιέργειας** που περιλαμβάνει την προετοιμασία της περιοχής (αποψίλωση και εξομάλυνση), αδιάβροχη επένδυση (αν απαιτηθεί τελικά), συλλογή και επεξεργασία στραγγισμάτων, προεπεξεργασία εδάφους (θρυμματισμός, ανάμιξη με διογκωτικά και βελτιωτικά, έλεγχος pH) και κάλυψη για συλλογή και επεξεργασία ατμών (αν απαιτηθεί τελικά). Ο σχεδιασμός μιας εγκατάστασης αγροκαλλιέργειας φαίνεται στο Σχ. 2.14
- **Εξοπλισμός αερισμού** που συνήθως περιλαμβάνει τυπικό γεωργικό εξοπλισμό (μηχανικό άροτρο), ο οποίος ρυμουλκείται από τρακτέρ, έτσι ώστε το αφράτο έδαφος να μη συμπιέζεται από τους τροχούς του τρακτέρ.
- **Συστήματα διαχείρισης νερού** για έλεγχο της επιφανειακής εισροής ομβρίων νερών για αποφυγή υδατοκορεσμού ή έκπλυσης του εδάφους.
- **Έλεγχος της διάβρωσης του εδάφους** από τον άνεμο ή το νερό που περιλαμβάνει την κυματοειδή διαμόρφωση του εδάφους, την κατασκευή συστημάτων διαχείρισης των ομβρίων και τον ψεκασμό με νερό κατά το όργωμα για συγκράτηση της σκόνης.
- **Ρύθμιση pH και τροφοδοσίας θρεπτικών** που περιλαμβάνει την περιοδική προσθήκη στερεών λιπασμάτων, ασβέστου και/ή θείου κατά το όργωμα για ανάμιξη με τα στερεά βελτιωτικά ή την εφαρμογή υγρών θρεπτικών με ψεκασμό. Η σύνθεση των θρεπτικών και των όξινων/αλκαλικών διαλυμάτων πρέπει να έχει προσδιορισθεί με τις μελέτες βιοεπεξεργασιμότητας, ενώ η συχνότητα εφαρμογής τους τροποποιείται κατά τη λειτουργία της εγκατάστασης αγροκαλλιέργειας.
- **Ασφάλεια της περιοχής** από παρείσακτους που είναι απαραίτητη για την αποφυγή επαφής του κοινού με το μολυσμένο υλικό. Έτσι, κατασκευάζεται συνήθως φράκτης που περικλείει πλήρως την εγκατάσταση.
- Ο **έλεγχος αέριων εκπομπών** μπορεί να απαιτηθεί, εάν ορισμένα συστατικά των ρύπων είναι αρκετά πτητικά. Οι εκπομπές πρέπει να υπολογίζονται στη βάση των αρχικών συγκεντρώσεων στο έδαφος και η συγκέντρωσή τους πάνω από το ρυπασμένο έδαφος πρέπει να παρακολουθείται κατά τα αρχικά στάδια λειτουργίας. Εάν απαιτηθεί, πρέπει να εγκατασταθεί σύστημα συλλογής και επεξεργασίας των εκπομπών.



Σχήμα 2.14. Τομή ενός τυπικού συστήματος αγροκαλλιέργειας.

#### 2.3.4.4 Παρακολούθηση λειτουργίας και εξέλιξης

Θα πρέπει να καταρτίζονται προγράμματα παρακολούθησης της ομαλής λειτουργίας της εγκατάστασης αγροκαλλιέργειας, καθώς και προγράμματα παρακολούθησης των υπολειμμάτων των ρύπων σε βάθος χρόνου. Η κανονική παρακολούθηση συντελεί στην αριστοποίηση της διαδικασίας απορρύπανσης με τον έλεγχο της μείωσης των συγκεντρώσεων των ρύπων στο έδαφος και των εκπομπών στον αέρα, της μετανάστευσης ρύπων στο υπέδαφος (σε εγκαταστάσεις χωρίς επένδυση) και της ποιότητας του υπόγειου νερού. Είναι δυνατό ακόμη να παρακολουθείται και η ποιότητα των επιφανειακών απορροών ομβρίων που διέρχονται από την εγκατάσταση.

#### 2.3.4.5 Κριτήρια επιλογής και σχεδιασμού

Τα κριτήρια αυτά μπορούν να βοηθήσουν στη λήψη της απόφασης επιλογής της αγροκαλλιέργειας ως μεθόδου βιοεξυγίανσης και στη συνέχεια στον εντοπισμό δυσλειτουργιών και επανεξέτασης του αρχικού σχεδιασμού της εγκατάστασης (Πίν. 2.19). Αν δεν πληρούνται μερικά από αυτά τα κριτήρια, θα πρέπει να αναζητηθούν συμπληρωματικές πληροφορίες προκειμένου να βελτιωθεί η εγκατάσταση και να επιτευχθούν οι στόχοι που τέθηκαν αρχικά.

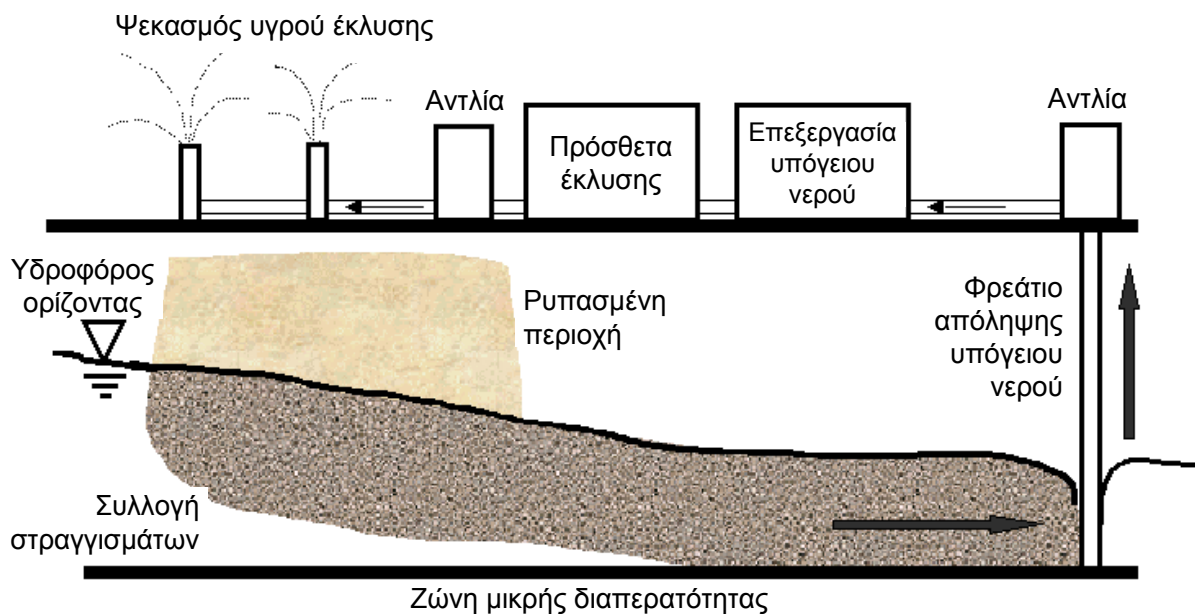
Πίνακας 2.19. Κριτήρια επιλογής και σχεδιασμού ενός συστήματος αγροκαλλιέργειας.

Κριτήριο	Οριακή τιμή ή μέτρα αντιμετώπισης
<b>Χαρακτηριστικά εδάφους</b>	
➤ Ολικά ετερότροφα βακτήρια	> 1.000 CFU / gr
➤ pH εδάφους	6 – 8
➤ Υγρασία εδάφους	40 – 85%
➤ Θερμοκρασία εδάφους	10 – 45°C
➤ Λόγος άνθρακα / αζώτου / φωσφόρου	100 / 10 / 5 μέχρι 100 / 1 / 0,5
➤ Τάση συσσωμάτωσης εδάφους	Όχι
<b>Χαρακτηριστικά ρύπων</b>	
➤ Συστατικά ρύπων	Βιοαποδομήσιμα
➤ Συγκέντρωση πετρελαιοειδών	< 50.000 ppm
➤ Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων	< 2.500 ppm
<b>Κλιματικές συνθήκες</b>	
➤ Ύψος βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια της περιόδου αγροκαλλιέργειας	< 750 mm
➤ Ισχυροί άνεμοι	Όχι
<b>Βιοεπεξεργασιμότητα</b>	
➤ Εκπόνηση μελέτης βιοεπεξεργασιμότητας	Επιθυμητή
➤ Μελέτη αποτελεσματικότητας της μεθόδου, απαίτησης σε θρεπτικά και προσδιορισμός παρεμποδιστικών παραγόντων	Επιθυμητά
<b>Λειτουργία και παρακολούθηση</b>	
➤ Δειγματοληψίες και αναλύσεις για έλεγχο βιοαποδόμησης	Υποχρεωτικές
➤ Παρακολούθηση επιφανειακών απορροών ομβρίων	Επιθυμητή
➤ Παρακολούθηση αερίων εκπομπών	Επιθυμητή

### 2.3.5 Πλύση και έκπλυση εδάφους

Η **έκπλυση εδάφους (soil flushing)** και η **πλύση εδάφους (soil washing)** αφορούν στην έγχυση νερού ή άλλων υγρών (συμπεριλαμβανομένων των υδατικών διαλυμάτων), αντιστοίχως, στο υπέδαφος με σκοπό την εκρόφηση ή τη διάλυση των ρύπων. Το σύστημα βασίζεται στην κατασκευή επιφανειακών αυλάκων ή διάτρητων σωλήνων για τη διείσδυση των υγρών έκπλυσης και τον κατακλυσμό του υπεδάφους, μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν και κοινοί ψεκαστήρες άρδευσης. Με τη βοήθεια ρηχών φρεατίων ή υπόγειων οχετών τα υγρά έκπλυσης συλλέγονται και αντλούνται στην επιφάνεια για επεξεργασία. Μετά τον καθαρισμό τους τα υγρά έκπλυσης μπορούν να ανακυκλωθούν.

Λόγω της ποικιλίας των υγρών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως νερό, αλκαλικά διαλύματα και αλκοόλες, αυτή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί, τόσο για οργανικές, όσο και ανόργανες ουσίες. Τα εδάφη όμως πρέπει να είναι διαπερατά (ή να μπορούν να γίνουν διαπερατά με θρυμματοποίηση) και το επεξεργασμένο έδαφος είναι πιθανό να μη χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία. Το κόστος είναι γενικά μέτριο, εξαρτάται όμως σημαντικά από το είδος του υγρού έκπλυσης. Ένα τυπικό σύστημα έκπλυσης εδάφους φαίνεται στο Σχ. 2.15.



Σχήμα 2.15. Τυπικό σύστημα έκπλυσης εδάφους με ψεκασμό.



Το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η απαίτηση για αυστηρό χειρισμό και έλεγχο των υγρών έκπλυσης για την αποφυγή μετανάστευσης εκτός της περιοχής, με επακόλουθο την ενδεχόμενη ρύπανση υπόγειου ή επιφανειακού νερού σε γειτονική περιοχή. Οι υπεδάφειες ετερογένειες και η μικρή διαπερατότητα του εδάφους μπορεί επίσης να μειώσουν σημαντικά την απόδοση της τεχνικής αυτής. Παρά τα πλεονεκτήματά της η εισαγωγή βλαπτικών ή δυνητικά τοξικών υγρών έκπλυσης στο έδαφος ανησυχεί πολλούς υποψήφιους χρήστες, οι οποίοι διερωτώνται για ενδεχόμενες αλλαγές στη φυσική και χημική κατάσταση του επεξεργασμένου εδάφους.

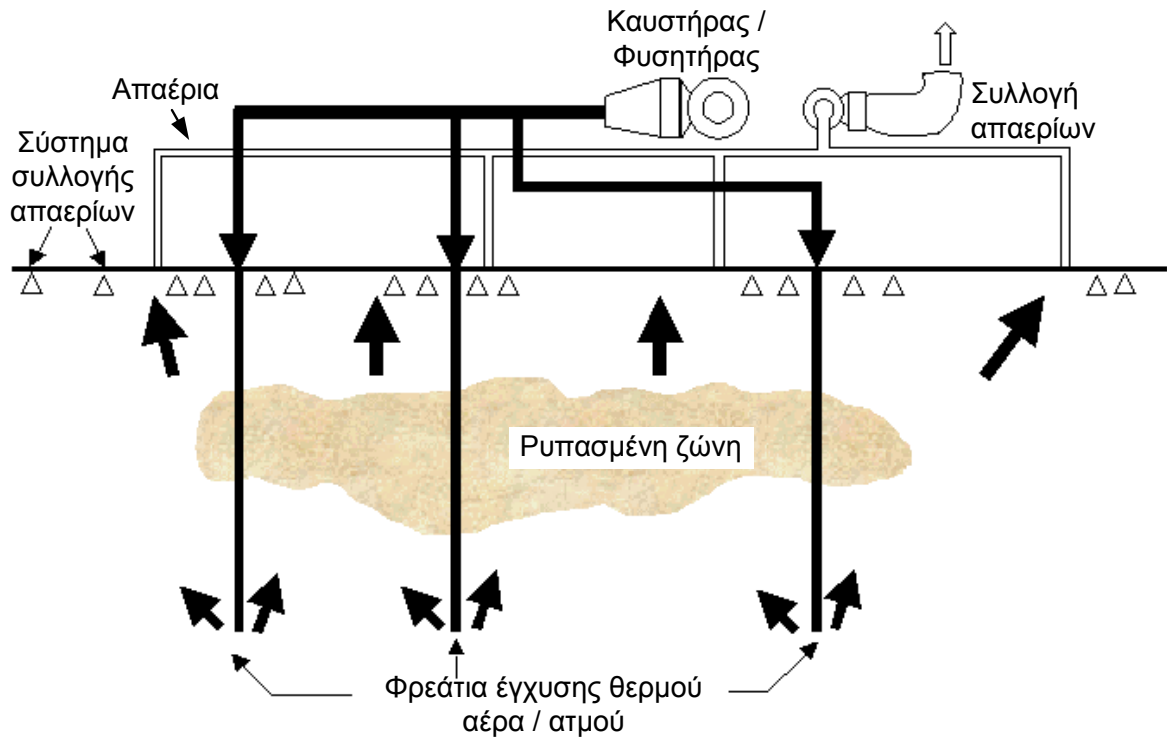
### **2.3.6 Θερμική επεξεργασία**

Ορισμένες τεχνικές θερμικής επεξεργασίας βασίζονται στη θέρμανση του εδάφους για την εκρόφηση και την εξάτμιση των ρύπων στο υπέδαφος. Ουσίες που μπορούν να απομακρυνθούν με τέτοιες τεχνικές είναι αλειφατικοί και αρωματικοί υδρογονάνθρακες, όπως αυτοί που περιέχονται στο πετρέλαιο κίνησης και τη βενζίνη, και χλωριωμένες ουσίες με σημεία βρασμού μεταξύ 80 και 300°C. Άλλες τεχνικές όμως βασίζονται στην επί τόπου θερμική επεξεργασία με σκοπό τη μετατροπή των ρύπων σε μία χημικά αδρανή στερεή μάζα.

#### **2.3.6.1 Ατμοποίηση**

Για την ατμοποίηση των ρύπων αυτές οι τεχνολογίες χρησιμοποιούν μέσα όπως την έγχυση θερμών ρευστών (νερό, ατμό ή αέρα), θέρμανση με ραδιοφωνικές συχνότητες και ηλεκτρικές αντιστάσεις. Μετά την παραλαβή τους από το υπέδαφος οι εξατμισμένοι ρύποι επεξεργάζονται με τις κατάλληλες τεχνικές επεξεργασίας απαερίων. Κατάλληλα εδάφη για την απομάκρυνση πτητικών και ημιπτητικών ουσιών με εφαρμογή αυτών των μεθόδων είναι τα αμμώδη.

Είναι φανερό ότι μειονέκτημα των τεχνικών θέρμανσης αποτελεί η αδυναμία απομάκρυνσης από το υπέδαφος μη πτητικών οργανικών και μετάλλων. Στο Σχ. 2.16. φαίνεται ένα τυπικό σύστημα έγχυσης στο έδαφος θερμού αέρα ή ατμού.



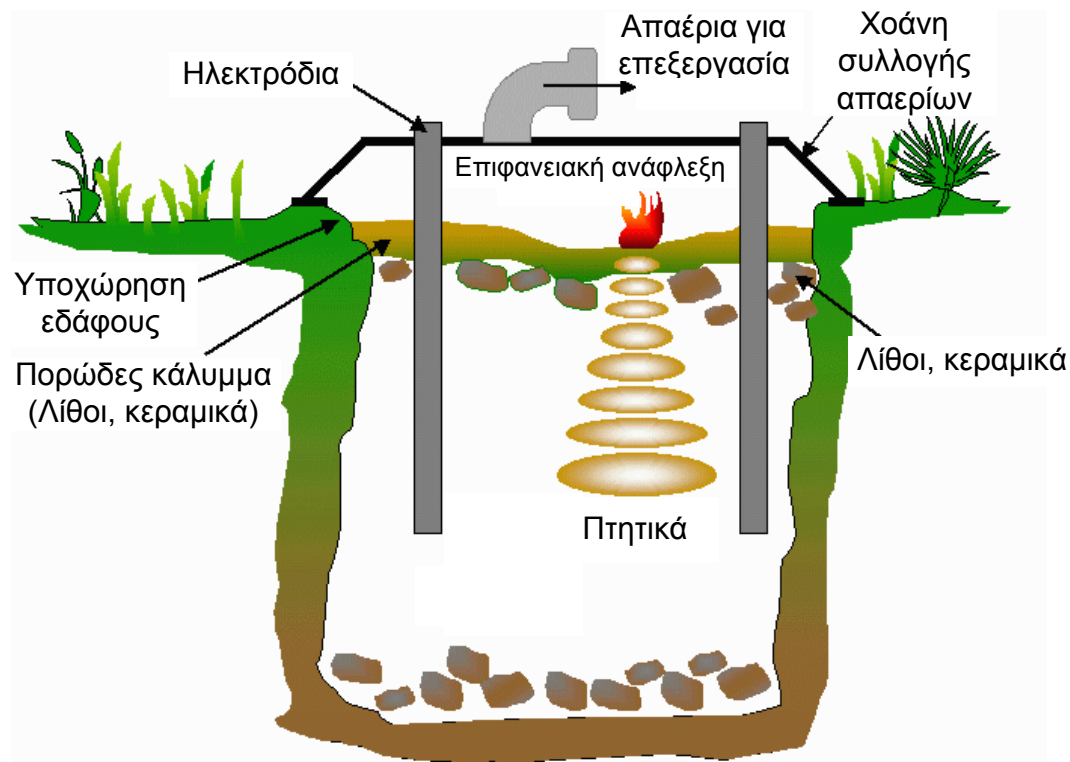
Σχήμα 2.16. Τυπικό σύστημα έγχυσης θερμού αέρα ή ατμού.

### 2.3.6.2 Στερεοποίηση ή υαλοποίηση

Στη μέθοδο της **υαλοποίησης (vitrification)** χρησιμοποιείται θερμότητα για τη μετατροπή ρυπασμένων εδαφών σε χημικά αδρανείς υαλώδεις και κρυσταλλικές μάζες. Αυτό επιτυγχάνεται με τη θέρμανση του εδάφους μέχρι 3600°C με τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ ηλεκτροδίων εμφυτευμένων στο ρυπασμένο έδαφος. Σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες τα πυριτικά συστατικά του εδάφους τήκονται και σχηματίζουν ένα υαλώδες υλικό, οι οργανικοί ρύποι πυρολύονται και ορισμένα μέταλλα εξατμίζονται. Με την ολοκλήρωση της τεχνολογίας αυτής το ρυπασμένο έδαφος μετατρέπεται σε ένα χημικά σταθερό υλικό που μοιάζει με γρανίτη.

Πλεονεκτήματα της τεχνικής είναι η αποφυγή εκσκαφής του ρυπασμένου υλικού, και συνεπώς η χαμηλή έκθεση στους ρύπους, και η μετατροπή του ρυπασμένου εδάφους σε μία υαλώδη αδρανή μάζα.

Μειονεκτήματα αποτελούν η απαίτηση για εξειδικευμένο προσωπικό για τη λειτουργία του εξοπλισμού, η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας και η μετανάστευση πτητικών ρύπων σε γειτονικές περιοχές. Η υψηλή υγρασία του εδάφους αυξάνει σημαντικά το χρόνο επεξεργασίας και επιβαρύνει το κόστος. Στο Σχ. 2.17. φαίνεται ένα τυπικό σύστημα επί τόπου υαλοποίησης.



Σχήμα 2.17. Τυπικό σύστημα επί τόπου υαλοποίησης.

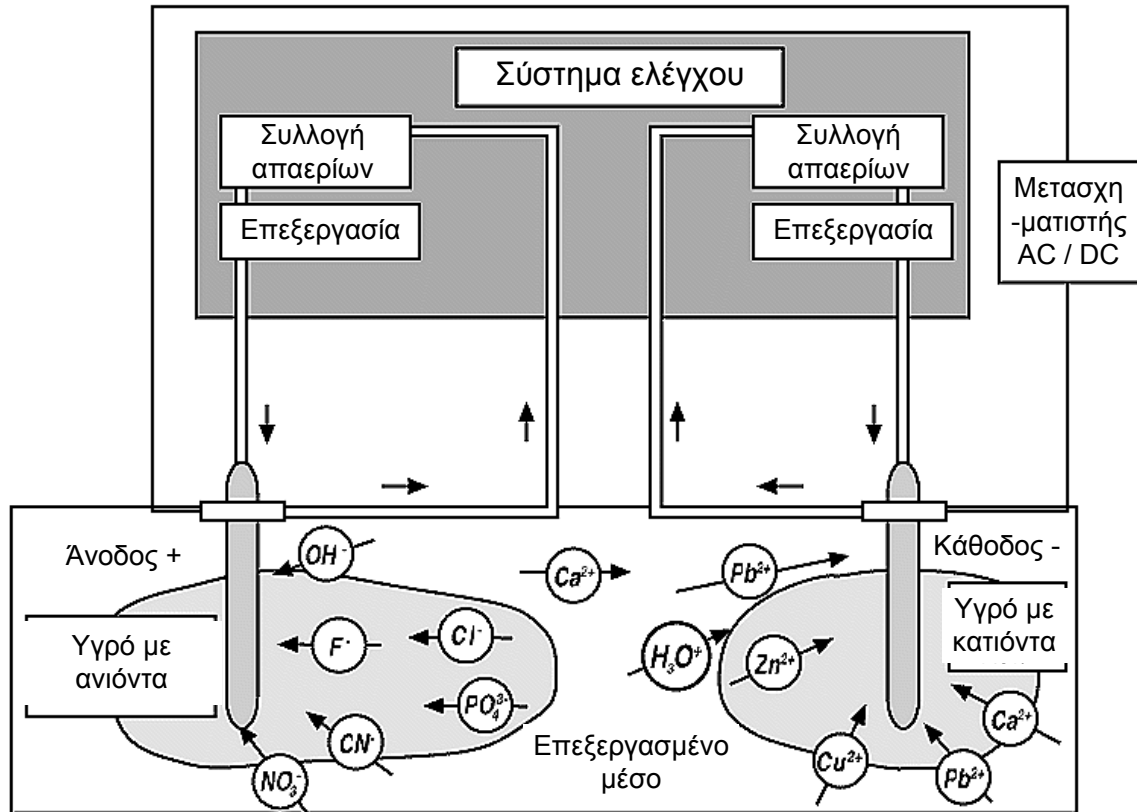
### 2.3.7 Ηλεκτροκινητική

Η **ηλεκτροκινητική (electrokinetics)** έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν με επιτυχία στην αφυδάτωση εδαφών και χρησιμοποιείται πρόσφατα και στην εξυγίανση ρυπασμένων περιοχών. Βασίζεται στην αρχή της κίνησης φορτισμένων ιόντων και σωματιδίων υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου. Καθώς το νερό κινείται μέσω του εδάφους, αρνητικά φορτισμένα σωματίδια, όπως αυτά της αργίλου, έλκουν θετικά ιόντα από το νερό και σχηματίζεται ένα στρώμα θετικών ιόντων στην επιφάνεια αυτών των σωματιδίων. Τότε, εάν εφαρμοσθεί ένα ηλεκτρικό πεδίο σε ένα τέτοιο έδαφος, αυτά τα θετικά φορτισμένα σωματίδια θα κινηθούν προς την κάθοδο. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να απομακρυνθούν διάφορα μεταλλικά ιόντα από το έδαφος.

Η τεχνολογία της ηλεκτροκινητικής είναι σχετικά απλή και η εξυγίανση μιας ρυπασμένης περιοχής είναι μόνιμη. Η απομάκρυνση μόνο θετικών ιόντων με αυτή τη μέθοδο θεωρείται ως μειονέκτημα και για το λόγο αυτό η ηλεκτροκινητική ακολουθείται συχνά από άλλες μεθόδους εξυγίανσης, ιδιαίτερα αν υπάρχουν και οργανικοί ρύποι. Επιπλέον, οι απαιτήσεις για μεγάλη ηλεκτρική ισχύ ανεβάζουν σημαντικά το κόστος και καθιστούν τη μέθοδο αντικοινωνική.

Μια καινοτόμος τροποποίηση της μεθόδου υπόσχεται την απομάκρυνση μαζί με τα μεταλλικά ιόντα και οργανικών ουσιών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τον ακόλουθο μηχανισμό. Καθώς τα ιόντα κινούνται προς την κάθοδο,

δημιουργούν ένα ρεύμα που συμπαρασύρει και το νερό να κινηθεί προς την κάθοδο. Έτσι, εάν οι οργανικές ουσίες έχουν κάποια διαλυτότητα στο νερό, θα απομακρυνθούν και αυτές μαζί με τα ιόντα μετάλλων. Στο Σχ. 2.18 φαίνεται ένα τυπικό σύστημα επί τόπου ηλεκτροκινητικής εξυγίανσης.



Σχήμα 2.18. Τυπικό σύστημα επί τόπου ηλεκτροκινητικής εξυγίανσης.

## 2.3.8 Φυτοεξυγίανση

### 2.3.8.1 Γενικά

**Φυτοεξυγίανση (phytoremediation)** είναι η χρήση φυτών για την επί τόπου (in situ) επεξεργασία ρυπασμένων εδαφών, ιζημάτων και νερού. Εφαρμόζεται σε περιοχές με επιφανειακές ρυπάνσεις με οργανικά, θρεπτικά ή μέταλλα που είναι επιδεκτικά μιας από τις ακόλουθες τεχνικές: Φυτομετασχηματισμός, ριζοσφαιρική βιοεξυγίανση, φυτοσταθεροποίηση, φυτοεκχύλιση και ριζοδιήθηση.

Η φυτοεξυγίανση έχει χρησιμοποιηθεί σ' ένα σημαντικό αριθμό πιλοτικών και πλήρους κλίμακας επιδείξεων. Αποτελεί μια ανερχόμενη τεχνολογία, η οποία αξίζει να μελετηθεί για την εξυγίανση ρυπασμένων περιοχών για λόγους χαμηλού κόστους, αισθητικής και μακροπρόθεσμης εφαρμογής της.

Η φυτοεξυγίανση είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για περιοχές, όπου άλλες μέθοδοι βιοεξυγίανσης δεν είναι οικονομικά αποδοτικές ή εφαρμόσιμες, για

περιοχές με χαμηλές συγκεντρώσεις ρύπων που απαιτείται μόνο μακροχρόνιος εξευγενισμός και σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες όπου απαιτείται βλάστηση ως τελική επικάλυψη (π.χ. χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων). Οι περιοριστικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν πριν την επιλογή της μεθόδου εξυγίανσης είναι η αποδοχή της μεθόδου, η μεγάλη διάρκεια για την απομάκρυνση των ρύπων, η ενδεχόμενη μόλυνση της βλάστησης και της τροφικής αλυσίδας, καθώς και δυσκολίες διατήρησης της βλάστησης σε περιοχές με τοξικά απόβλητα.

Έχει αποδειχθεί σε πολλές περιπτώσεις η αντοχή των φυτών σε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις οργανικών χημικών χωρίς τοξικές επιδράσεις και η δυνατότητα μετασχηματισμού των χημικών σε λιγότερο τοξικούς μεταβολίτες. Επίσης, τα φυτά προκαλούν την αποδόμηση οργανικών ενώσεων στη ριζόσφαιρα με αποδέσμευση από τις ρίζες εκκριμάτων και ενζύμων, καθώς και την αύξηση του οργανικού άνθρακα στο έδαφος. Στην περίπτωση των μετάλλων, τα φυτά εμφανίζουν τις δυνατότητες της πρόσληψης και ανάκτησης των ρύπων από την υπέργεια βιομάζα (**φυτοεκχύλιση ή φυτοαπόληψη-phytoextraction**), της **διήθησης των μετάλλων από το νερό στο ριζικό σύστημα (ριζοδιήθηση - rhizofiltration)** και της σταθεροποίησης ρυπασμένων περιοχών με έλεγχο της διάβρωσης του εδάφους και της **εξατμισοδιαπνοής (evapotranspiration)** μεγάλων ποσοτήτων νερού (**φυτοσταθεροποίηση - phytostabilization**).

Πρόσφατες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σε απόβλητα που περιέχουν πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες, όπως η ομάδα BTEX (βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλοβενζόλιο και ξυλόλια), καθώς και πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs), πενταχλωροφαινόλη (PCP), πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs), χλωριωμένες αλειφατικές ενώσεις (τριχλωροαιθυλένιο, τετραχλωροαιθυλένιο και 1,1,2,2-τετραχλωροαιθάνιο), απόβλητα εκρηκτικών (2,4,6-τρινιτροτολουόλιο ή TNT και RDX), μέταλλα (μόλυβδος, κάδμιο, ψευδάργυρος, αρσενικό, χρώμιο και σελήνιο), φυτοφάρμακα και επιφανειακές απορροές που περιέχουν φυτοφάρμακα (atrazine, cyanazine, alachlor), ραδιενουκλεοτίδια (καίσιο-137, στρόντιο-90 και ουράνιο) και απόβλητα με θρεπτικά (αμμωνιακά, φωσφορικά και νιτρικά άλατα). Έχουν χρησιμοποιηθεί σε ποικίλες εφαρμογές διάφορα είδη φυτών συμπεριλαμβανομένων των υβριδίων λεύκας και κοινής λεύκας, ιτιών, σίκαλης, σόργου, τριφυλλιού, αλφάλφας και υδρόβιων φυτών, όπως αναχαρίδες και καλαμιές, καθώς και υπερσυσσωρευτές μετάλλων, όπως ο ηλίανθος και το ινδικό σινάπι.

Η φυτοεξυγίανση έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε εκτάσεις ρυπασμένες με μόλυβδο, σε μια μικρή λίμνη μολυσμένη με ουράνιο στο Τσερνομπίλ, στην απομάκρυνση νιτρικών και ατραζίνης από αγροτικές απορροές στην Iowa των ΗΠΑ, σε ένα βιομηχανικό υγρότοπο και στην απομάκρυνση του TNT από το έδαφος. Επιτυχημένες εφαρμογές έχουν πραγματοποιηθεί επίσης σε μικρότερες περιοχές ρυπασμένες με φυτοφάρμακα και αμμωνιακά. Σε αυτές τις περιοχές οι διαθέσιμοι χρηματικοί πόροι ήταν ανεπαρκείς για μακροπρόθεσμη παρακολούθηση των εφαρμογών. Η φυτοεξυγίανση όμως μένει να αποδείξει την αποτελεσματικότητά της σε μακράς διάρκειας εφαρμογές με τον καθορισμό των κατάλληλων ειδών φυτών σε διάφορες εφαρμογές, προκειμένου να κερδίσει τη γενική αποδοχή και την ενσωμάτωσή της στη νομοθεσία.

## 2.3.8.2 Περιγραφή της Τεχνολογίας

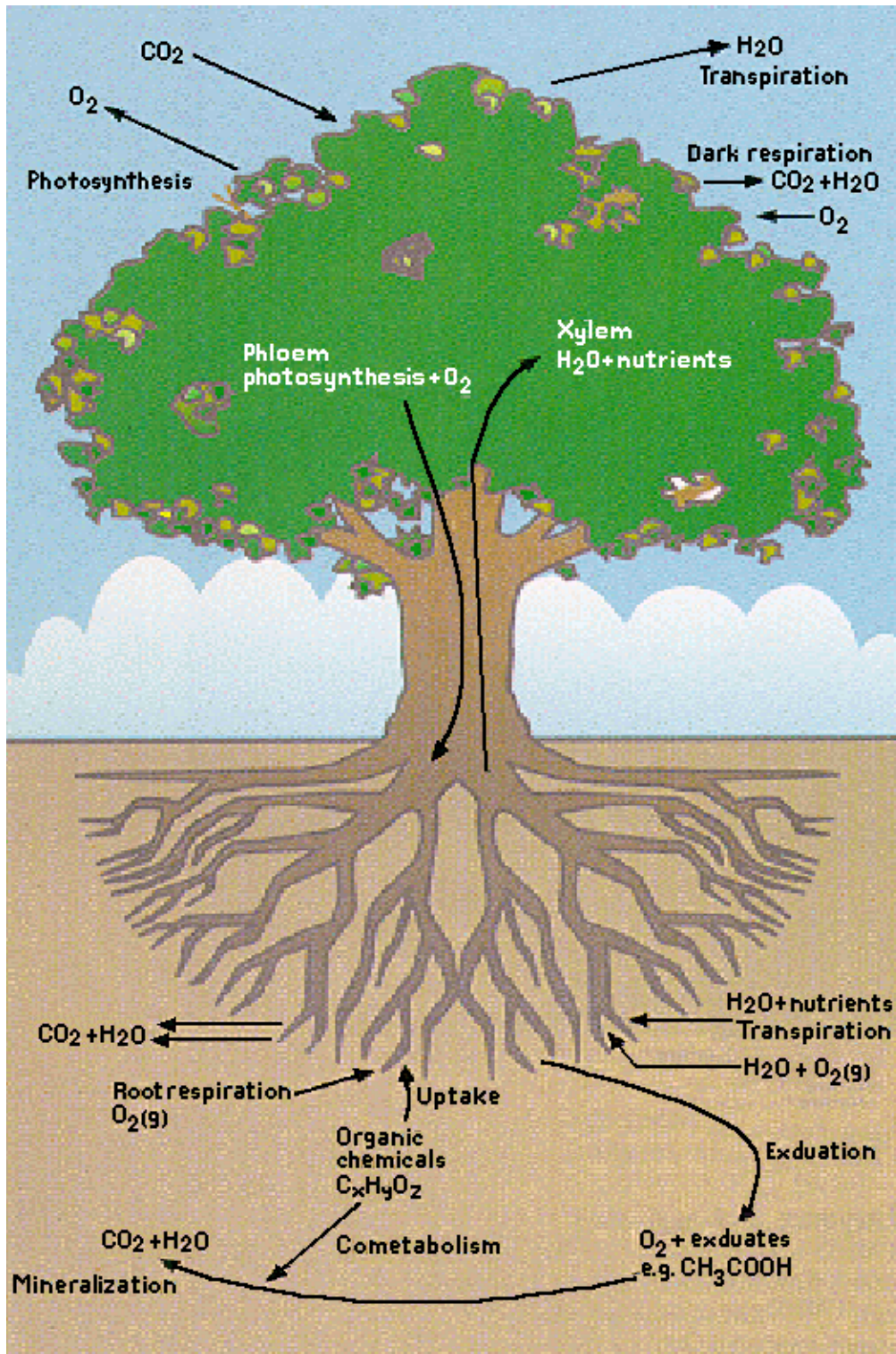
### 2.3.8.2.1 Φυτομετασχηματισμός

Ο **φυτομετασχηματισμός (phytotransformation)** σχετίζεται με την πρόσληψη οργανικών θρεπτικών και ρύπων από το έδαφος και τα υπόγεια νερά και τον επακόλουθο μετασχηματισμό τους από τα φυτά. Εξαρτάται από την άμεση λήψη των ρύπων από το νερό του εδάφους και τη συσσώρευση των μεταβολιτών στους ιστούς του φυτού. Είναι πολύ σημαντικό, οι μεταβολίτες που συσσωρεύονται στη βλάστηση να είναι μη τοξικοί ή τουλάχιστον λιγότερο τοξικοί από τις αρχικές ουσίες.

Ενδεχόμενες εφαρμογές περιλαμβάνουν το φυτομετασχηματισμό σε περιοχές πετροχημικών εγκαταστάσεων και αποβλήτων εκρηκτικών, πετρελαιοκηλίδες, χλωριωμένους διαλύτες, σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (για μείωση των BOD και COD), απόβλητα αγροχημικών (φυτοφάρμακα και λιπάσματα). Ο φυτομετασχηματισμός συχνά δεν είναι η μόνη επιλογή, αλλά συνδυάζεται με άλλες μεθόδους, όπως η απομάκρυνση του ρυπασμένου εδάφους και η φυσικοχημική επεξεργασία του πριν τον τελικό εξευγενισμό του με φυτομετασχηματισμό.

Στο Σχ.2.19 φαίνονται οι ροές μάζας σε ένα δέντρο. Οι μηχανισμοί μεταφοράς οξυγόνου, νερού και άνθρακα ποικίλλουν ανάμεσα στα είδη φυτών. Τα φυτά προμηθεύουν με οξυγόνο το έδαφος της ριζόσφαιρας, αλλά και οι ρίζες χρειάζονται οξυγόνο για την αναπνοή τους. Η διακίνηση υλικών στις ρίζες είναι ο κύριος μηχανισμός που προσθέτει οργανικό άνθρακα στο έδαφος. Έχει διαπιστωθεί εργαστηριακά ότι φιντάνια μεταφέρουν σημαντικές ποσότητες οξυγόνου στη ριζόσφαιρα (0,5 mol O<sub>2</sub> ανά m<sup>2</sup> επιφάνειας εδάφους τη ημέρα). Τα φυτά είναι ικανά να προσλαμβάνουν ουσίες άμεσα από το νερό του εδάφους ή να παράγουν εκκρίματα που συμβάλλουν στην αποδόμηση οργανικών ρύπων μέσω συμμεταβολισμού στη ριζόσφαιρα (βλέπε ριζοσφαιρική βιοεξυγίανση).

Η άμεση πρόσληψη οργανικών από τα φυτά δια μέσου των ριζών αποδεικνύεται ότι είναι ένας εξαιρετικά αποτελεσματικός μηχανισμός απομάκρυνσης χημικών σε εδάφη ρυπασμένα σε μικρό βάθος με **μετρίως υδρόφοβες ενώσεις** (συντελεστής κατανομής οκτανόλης-νερού, logK<sub>ow</sub>=1 έως 3,5). Αυτό περιλαμβάνει τα περισσότερα ξυλόλια, χλωριωμένους διαλύτες και μικρής αλυσίδας αλειφατικές ενώσεις. **Υδρόφοβα χημικά** (logK<sub>ow</sub> > 3,5) δεσμεύονται τόσο ισχυρά στην επιφάνεια των ριζών που δεν μπορούν να μεταφερθούν μέσα στο φυτό. Οι υδατοδιαλυτές ουσίες (logK<sub>ow</sub> < 1.0) δεν απορροφούνται επαρκώς στις ρίζες, ούτε μεταφέρονται αποτελεσματικά δια μέσου των φυτικών μεμβρανών. Τα **πολύ υδρόφοβα χημικά** (logK<sub>ow</sub>>3.5) είναι υποψήφια για φυτοσταθεροποίηση και/ή ριζοσφαιρική εξυγίανση.



Σχήμα 2.19. Σχηματική παράσταση ροών οξυγόνου, νερού και χημικών σε ένα δένδρο.

Η άμεση πρόσληψη χημικών μέσω των ριζών εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα πρόσληψης, το ρυθμό διαπνοής και τη συγκέντρωση της χημικής ουσίας στο νερό του εδάφους. Η αποδοτικότητα της πρόσληψης εξαρτάται από τις φυσικοχημικές ιδιότητες, τη χημική διαφοροποίηση και το ίδιο το φυτό. Η διαπνοή είναι βασικός παράγοντας που καθορίζει το ρυθμό πρόσληψης και εξαρτάται από το είδος του φυτού, την επιφάνεια των φύλλων, τα θρεπτικά, την υγρασία εδάφους, τη θερμοκρασία, τον άνεμο και την σχετική υγρασία.

Όταν μια οργανική ουσία μετακινείται μέσα στο φυτό, αποθηκεύεται στους νέους ιστούς του φυτού μέσω λιγνινοποίησης (ομοιοπολικοί δεσμοί της ένωσης στη λιγνίνη του φυτού) ή εξατμίζεται, μεταβολίζεται ή μετατρέπεται σε ανόργανες ουσίες (CO<sub>2</sub> και νερό). Χλωριωμένες αλειφατικές ενώσεις, όπως το τριχλωροαιθυλένιο (TCE) μετατρέπονται σε CO<sub>2</sub> και λιγότερο τοξικούς αερόβιους μεταβολίτες (τριχλωροαιθανόλη, τριχλωροοξικό οξύ και διχλωροοξικό οξύ). Τα παράγωγα είναι ανάλογα με εκείνα που έχουν βρεθεί στο ανθρώπινο σώμα από την αποδόμηση του τριχλωροαιθυλενίου από το κυτόχρωμα P-450, το οποίο είναι ένα είδος ενζύμου κοινό στα φυτά και τους ανθρώπους. Εξαιτίας του ενζύμου αυτού, τα φυτά αποκαλούνται «πράσινο ήπαρ» σε όρους ενζυμικής βιοχημείας. Στην πραγματικότητα, το κυτόχρωμα P-450 δεν είναι ένα απλό ένζυμο, αλλά μια υπερ-οικογένεια ισοενζύμων (οξυγενάσες) που οξειδώνουν ξενοβιοτικές ουσίες.

Μια άλλη μορφή φυτομετατροπής είναι η **φυτοεξάτμιση (phytovolatilization)**. Πτητικές ενώσεις ή τα προϊόντα μεταβολισμού τους απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα διαμέσου της διαπνοής του φυτού. Πολλές οργανικές ενώσεις είναι οξειδοανθεκτικές σε υπεδάφιο περιβάλλον, αντιδρούν ταχύτατα στην ατμόσφαιρα με ρίζες υδροξυλίου, ένα οξειδωτικό που σχηματίζεται στο φωτοχημικό κύκλο. Η μεταφορά ρύπων από το έδαφος ή τα υπόγεια νερά στην ατμόσφαιρα δεν είναι επιθυμητή όπως στην επί τόπου αποδόμηση, αλλά είναι προτιμότερη από την παρατεταμένη παραμονή τους στο έδαφος και τον κίνδυνο μόλυνσης των υπογείων νερών.

Τα ένζυμα νιτροαναγωγάση και λακκάση στα φυτά μπορούν να αποδομήσουν απόβλητα εγκαταστάσεων πυρομαχικών, όπως το TNT, και να ενσωματώσουν τμήματα δομών δακτυλίου σε νέους φυτικούς ιστούς. Η αποτοξικοποίηση (detoxification) μετασχηματίζει το αρχικό υλικό σε μη φυτοτοξικούς μεταβολίτες που αποθηκεύονται στους φυτικούς ιστούς. Μια πλήρης κατανόηση των χημικών δρόμων και των τελικών προϊόντων της ενζυμικής διαδικασίας θα απλοποιήσει τις έρευνες τοξικότητας στην επί τόπου φυτοεξυγίανση. Μια σύνοψη των τυπικών φυτών που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές φυτοεξυγίανσης παρουσιάζεται στον Πίν. 2.20.



Πίνακας 2.20. Τυπικά φυτά που χρησιμοποιούνται σε διάφορες τεχνικές φυτοεξυγίανσης

Τεχνική	Μέσο	Ρύποι	Τυπικά φυτά
1. Φυτομετασχηματισμός	Έδαφος, υπόγεια νερά, Στραγγίσματα ΧΥΤΑ Εδαφική διάθεση αστικών λυμάτων	Ζιζανιοκτόνα (atrazine, alachlor) Αρωματικές ενώσεις (BTEX) Χλωριωμένα αλειφατικά (TCE) Θρεπτικά ( $\text{NO}_3^-$ , $\text{NH}_4^+$ , $\text{PO}_4^-$ ) Απόβλητα πυρομαχικών (TNT, RDX)	Φρεατόφυτα (λεύκα, ιπιά) Ποώδη (σίκαλη, σόργο, φεστούκα) Ελλοβόκαρπα (τριφύλλι, αλφάλφα, αρακάς)
2. Ριζοσφαιρική βιοεξυγίανση ή φυτοδιέγερση	Έδαφος, ιζήματα, εδαφική διάθεση αστικών λυμάτων	Οργανικοί ρύποι (φυτοφάρμακα, αρωματικά, πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs))	Μουριά, μηλιά, πορτοκαλιά (αποδέσμευση φαινολικών) Ποώδη με ινώδεις ρίζες (σίκαλη, φεστούκα) για ρυπάνσεις σε βάθος 0-1 m Φρεατόφυτα για 0-3,5 m Υδρόβια φυτά για ιζήματα
3. Φυτοσταθεροποίηση	Έδαφος, ιζήματα	Μέταλλα (Pb, Cd, Zn, As, Cu, Cr, Se, U) Υδρόφοβες ενώσεις (PAHs, PCBs, διοξίνες, φουράνια, πενταχλωροφαινόλη, DDT, dieldrin)	Φρεατόφυτα δέντρα που αποπνέουν μεγάλες ποσότητες νερού για υδραυλικό έλεγχο. Ποώδη με ινώδεις ρίζες για την πρόληψη εδαφικής διάβρωσης. Πυκνές ρίζες για την απορρόφηση ή δέσμευση των ρύπων.
4. Φυτοεκχύλιση	Έδαφος, ιζήματα	Μέταλλα (Pb, Cd, Zn, Ni, Cu) με προσθήκη EDTA για Pb και Se (εξάτμιση)	Ηλίανθος, ινδικό σινάπι κριθάρι, αγριοκάμβη, τσουκνίδες, ραδίκια.
5. Ριζοδιήθηση	Υπόγεια και επιφανειακά νερά και λύματα σε λιμνοθάλασσες και υγρότοπους	Μέταλλα (Pb, Cd, Zn, Ni, Cu, ) Ραδιενεργά υλικά (Cs, Sr, U) Υδρόφοβες ενώσεις	Υδροχαρή φυτά: -Αναρριχόμενα (λινάρι, μαράντα, ψάθα, ζάμια) -Καταδύόμενα (άλγες, φύκια, ευρασιατικό μυριόφυλλο)

### 2.3.8.2.2 Ριζοσφαιρική Βιοεξυγίανση

Η ριζοσφαιρική βιοεξυγίανση (**rhizosphere bioremediation**) αυξάνει τον οργανικό άνθρακα στο έδαφος, τα βακτήρια και τους μύκητες της ριζόσφαιρας. Η ριζοσφαιρική βιοεξυγίανση είναι γνωστή και ως **φυτοδιέγερση (phytostimulation)** ή **φυτοβοηθούμενη βιοεξυγίανση (plant-assisted bioremediation)**. Έχει αποδειχθεί ότι το πλήθος των ωφέλιμων βακτηρίων αυξάνονται στο ριζικό σύστημα των λευκών σε σχέση με μια αφύτευτη έκταση. Οι απονιτροποιητές *Pseudomonas spp.*, οργανισμοί αποδόμησης των ΒΤΕΧ και ετερότροφοι οργανισμοί αυξάνονται σημαντικά. Τα φυτά επίσης παράγουν εκκρίματα που βοηθούν στην αποδόμηση των οργανικών ενώσεων, διεγείροντας ορισμένα ενζυμικά συστήματα των υπαρχόντων βακτηριακών πληθυσμών, προκαλώντας την ανάπτυξη νέων ειδών ικανών να αποδομούν απόβλητα, καθώς επίσης αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις διαλυτών θρεπτικών υποστρωμάτων για όλους τους μικροοργανισμούς. Οι απώλειες γλυκόζης, αλκοολών και οξέων από τα υπέργεια και τα υπόγεια τμήματα των φυτών ανέρχονται σε 10-20% της φωτοσύνθεσης των φυτών σε ετήσια βάση. Ερευνητές έχουν μελετήσει την κατανομή μοριακών βαρών των εκκριμάτων των ριζών υβριδίων λεύκας. Τα εκκρίματα περιλαμβάνουν μικρές αλυσίδες οργανικών οξέων, φαινόλες και μικρές συγκεντρώσεις ουσιών υψηλού μοριακού βάρους (ένζυμα και πρωτεΐνες).

Μεταξύ άλλων έχουν μελετηθεί πέντε φυτικά συστήματα ενζύμων σε ιζήματα και στο έδαφος (αφαλογονάση, νιτροαναγωγή, υπεροξειδάσες, λακκάση και νιτριλάση). Τα αφαλογονωτικά ένζυμα είναι σημαντικά στις αντιδράσεις αποχλωρίωσης των χλωριωμένων υδρογονανθράκων. Η νιτροαναγωγή απαιτείται στο αρχικό στάδιο της αποδόμησης των νιτροαρωματικών ενώσεων, ενώ η λακκάση βοηθά στη διάσπαση δομών αρωματικού δακτυλίου οργανικών ρύπων. Η υπεροξειδάση και η νιτριλάση συμμετέχουν στις οξειδωτικές αντιδράσεις. Τα ένζυμα είναι ενεργά στη ριζόσφαιρα και πολύ κοντά στις ρίζες (1 mm) για μετασχηματισμούς οργανικών ρύπων που είναι αδύνατοι απουσία φυτών. Έτσι, η παρουσία των ριζικών συστημάτων των φυτών δημιουργεί ένα εδαφικό οικοσύστημα που είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για βιοεξυγίανση. Όταν τα φυτά αναπτύσσονται στο έδαφος ή σε ιζήματα, το pH ρυθμίζεται κατάλληλα, τα μέταλλα βιοπροσροφούνται ή σχηματίζουν χηλικά σύμπλοκα και τα ένζυμα παραμένουν προστατευμένα στο εσωτερικό του φυτού ή προσροφούνται στην επιφάνειά του. Σε μελέτες αποδόμησης του TNT με φυτά όπως τα κερατόφυλλα διαπιστώθηκε ότι αυτά αυξάνουν το pH του νερού από 3 σε 7 και προσροφούν μεγάλες ποσότητες μετάλλων που συνήθως αναστέλλουν την ανάπτυξη βακτηρίων, ενώ τα φυτά παραμένουν υγιή.

Τα φυτά βοηθούν με μικροβιακούς μετασχηματισμούς κατά πολλούς τρόπους:

- Οι μυκητοριζικοί οργανισμοί σε συνεργασία με τις ρίζες μεταβολίζουν οργανικούς ρύπους.

- Τα εκκρίματα των φυτών διεγείρουν βακτηριακούς μετασχηματισμούς (ενζυμική επαγωγή).
- Η συσσώρευση οργανικού άνθρακα αυξάνει τους ρυθμούς μετατροπής σε ανόργανα προϊόντα (εμπλουτισμός του υποστρώματος).
- Τα φυτά παρέχουν κατάλληλο περιβάλλον για την αύξηση των μικροβιακών πληθυσμών.
- Παρέχεται οξυγόνο στις ρίζες, εξασφαλίζοντας έτσι αερόβιους μετασχηματισμούς.

Έχει βρεθεί ότι φλαβονοειδή και κουμαρίνη αποδεδειγμένα από τις ρίζες δέντρων, όπως η μουριά, η πορτοκαλιά και η μηλιά, που επιλέγουν και διεγείρουν οργανισμούς αποδόμησης των PAHs και PCBs.

Οι μύκητες που αναπτύσσονται συμβιωτικά με τα φυτά, έχουν μοναδικούς ενζυματικούς δρόμους αποδόμησης οργανικών ουσιών που δεν θα μπορούσαν να επιτευχθούν μόνο με βακτήρια. Η μικροβιακή μετατροπή σε ανόργανα συστατικά της ατραζίνης συνδέεται με την αναλογία του οργανικού άνθρακα στο έδαφος. Η συγκέντρωση μικροβίων στη ριζόσφαιρα είναι άφθονη και τυπικές αποικίες μπορεί να περιλαμβάνουν  $5 \times 10^5$  βακτήρια,  $9 \times 10^5$  ακτινομύκητες,  $2 \times 10^3$  μύκητες ανά gr ξηρού εδάφους. Τα βακτήρια αναπτύσσονται σε αποικίες που καταλαμβάνουν 4 έως 10% της επιφάνειας της ρίζας.

#### 2.3.8.2.3 Φυτοσταθεροποίηση

Η **φυτοσταθεροποίηση (Phytostabilization)** σχετίζεται με τη συγκράτηση μολυσμένου εδάφους και ιζημάτων στη θέση τους με τη βλάστηση και την ακινητοποίηση τοξικών ουσιών στο έδαφος. Η δημιουργία βλάστησης με ανεπτυγμένα ριζικά συστήματα εμποδίζει τη μεταφορά σκόνης με τον άνεμο, που αποτελεί ένα σημαντικό τρόπο ανθρώπινης έκθεσης σε περιοχές τοξικών αποβλήτων. Είναι δυνατός επίσης ο υδραυλικός έλεγχος, λόγω του μεγάλου όγκου νερού που διαπνέεται από τα φυτά εμποδίζοντας έτσι τη μετανάστευση στραγγισμάτων σε υπόγεια και επιφανειακά νερά. Η φυτοσταθεροποίηση είναι κατάλληλη σε περιοχές ρυπασμένες με μέταλλα, όπου η καλύτερη πρακτική είναι συχνά η παραμονή των ρύπων στη θέση τους. Τα μέταλλα δεν αποδομούνται και κατά συνέπεια η συγκράτησή τους *in situ* είναι η καλύτερη λύση για περιοχές με χαμηλά επίπεδα ρύπανσης ή για τεράστιες εκτάσεις όπου δεν είναι εφικτές άλλες μέθοδοι εξυγίανσης. Η ταχεία ανάπτυξη φυτών είναι απαραίτητη για την άσκηση υδραυλικού ελέγχου και ακινητοποίησης στην περιοχή. Τα φυτά δεν πρέπει να καταστρέφονται, ούτε να μετακινούνται κατά τη διάρκεια της φυτοσταθεροποίησης. Χαμηλές συγκεντρώσεις ραδιονουκλεοτιδίων μπορούν επίσης να συγκρατηθούν με τη φυτοσταθεροποίηση και αυτή η μέθοδος μπορεί να μειώσει σημαντικά τον κίνδυνο, αν ο χρόνος ημιζωής τους δεν είναι πολύ μεγάλος. Για την ακινητοποίηση τοξικών μετάλλων, όπως μόλυβδος, κάδμιο, ψευδάργυρος και αρσενικό, απαιτούνται μερικές φορές τροποποιητικά εδάφους, όπως φωσφορικά, άσβεστος και οργανικά υλικά. Το κάδμιο μεταναστεύει εύκολα στα

φύλλα και υπάρχει κίνδυνος για την τροφική αλυσίδα, πράγμα που αποτελεί περιοριστικό παράγοντα στην εφαρμογή της φυτοσταθεροποίησης σε ορισμένες περιπτώσεις.

#### 2.3.8.2.4 Φυτοεκχύλιση ή φυτοαπόληψη

Η **φυτοεκχύλιση ή φυτοαπόληψη (Phytoextraction)** αναφέρεται στη χρήση φυτών που συσσωρεύουν μέταλλα με τη μεταφορά και τη συσσώρευση τους στα υπέργεια τμήματα του φυτού ή τη ρίζα. Η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε εκτάσεις ρυπασμένες με μόλυβδο και κάδμιο και έχει προταθεί για την απομάκρυνση ραδιονουκλεοτιδίων από περιοχές με μικτά απόβλητα. Η φυτοεκχύλιση εμφανίζει σημαντικό πλεονέκτημα χαμηλού κόστους σε σχέση με άλλες μεθόδους εκσκαφής εδάφους και επεξεργασία του ή τελική διάθεση. Ένα σημαντικό θέμα στη φυτοεκχύλιση είναι κατά πόσο τα μέταλλα μπορούν να ανακτηθούν οικονομικά από τους ιστούς των φυτών ή απαιτείται δαπανηρή τελική διάθεση του αποβλήτου.

Κριτήρια σχεδιασμού αποτελούν ο παράγοντας συσσώρευσης (λόγος συγκέντρωσης του μετάλλου στο φυτικό ιστό σε σχέση με το έδαφος) και η παραγωγικότητα του φυτού (kg ξηρού μάζας που παράγονται σε κάθε σοδιά). Για να έχουμε μια βιώσιμη μέθοδο επεξεργασίας χρειάζεται ένα γρήγορα αναπτυσσόμενο φυτό (>6,7 τόνοι ξηρής μάζας ανά εκτάριο και έτος) που να συλλέγεται εύκολα και να συσσωρεύει μεγάλες συγκεντρώσεις μετάλλων στο συλλεγόμενο τμήμα του φυτού (>1000 mg μετάλλου /kg).

Γενικά, εύκολα βιοδιαθέσιμα μέταλλα είναι το κάδμιο, το νικέλιο, ο ψευδάργυρος, το αρσενικό, το σελήνιο και ο χαλκός. Μέτρια βιοδιαθέσιμα μέταλλα είναι το κοβάλτιο, το μαγγάνιο, ο σίδηρος, ενώ ο μόλυβδος, το χρώμιο και το ουράνιο δεν είναι πολύ βιοδιαθέσιμα. Η βιοδιαθεσιμότητα του μολύβδου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με την προσθήκη EDTA στο έδαφος. Ο μόλυβδος, το χρώμιο και το ουράνιο μπορούν να απομακρυνθούν με την ακινητοποίησή τους στο έδαφος και τις ρίζες με τη ριζοδιήθηση.

#### 2.3.8.2.5 Ριζοδιήθηση

Η **ριζοδιήθηση (Rhizofiltration)** αναφέρεται στη δράση των ριζών των φυτών που προσροφούν, συγκεντρώνουν και κατακρημνίζουν μέταλλα από επιφανειακά ή υπόγεια νερά. Οι ρίζες έχουν την ικανότητα να απορροφούν μεγάλες ποσότητες μολύβδου και χρωμίου από το νερό του εδάφους ή το νερό που διέρχεται δια μέσου της ζώνης των ριζών μιας πυκνής βλάστησης. Η δυνατότητα επεξεργασίας ραδιενεργών ρύπων έχει συγκεντρώσει την προσοχή του τύπου στο εξωτερικό. Η ριζοδιήθηση έχει εφαρμοστεί σε περιοχές ρυπασμένες με ραδιενεργά κατάλοιπα στις ΗΠΑ και την Ουκρανία (Τσερνομπίλ) με τη χρήση ηλιάνθων.

Ρηχές λιμνοθάλασσες έχουν διαμορφωθεί ως υγρότοποι και διατηρούνται ως ικανά μικροβιακά συστήματα με χαμηλό διαλυμένο οξυγόνο στα ιζήματα. Υπόγεια νερά ή υγρά απόβλητα αντλούνται μέσω του συστήματος

για απομάκρυνση των ρύπων με ριζοδιήθηση. Συνήθως αυτή η τεχνολογία προορίζεται για μέταλλα ή μεικτά απόβλητα, αλλά είναι κατάλληλη και για απόβλητα πυρομαχικών. Το TNT και το RDX είναι οργανικοί ρύποι που απορροφούνται ισχυρά από τις ρίζες και δεν μπορούν να μετακινηθούν σε σημαντικό βαθμό.

Επίσης η τεχνολογία αυτή έχει χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία στην επεξεργασία θρεπτικών, μετάλλων και οργανικών ρύπων εδώ και πολλά χρόνια. Μακράς διάρκειας εκμετάλλευση των φυτών υγροτόπων και συνθήκες αναγωγής των θειικών οδηγούν στην αύξηση του pH και την ελάττωση των συγκεντρώσεων των τοξικών μετάλλων για την επεξεργασία όξινων αποβλήτων ορυχείων. Τα ριζικά συστήματα και τα ιζήματα στους υγρότοπους είναι επαμφοτερίζουσες ζώνες (αερόβιες και αναερόβιες), που διευκολύνουν τη ρόφηση και την κατακρήμνιση των τοξικών μετάλλων. Σημαντικές εφαρμογές πεδίου της φυτοεξυγίανσης φαίνονται στον Πίν. 2.21.

### **2.3.8.3 Εφαρμογές και αποδόσεις**

#### **2.3.8.3.1 Περιορισμοί**

Οι περιορισμοί των τεχνικών φυτοεξυγίανσης περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Δυσκολία επεξεργασίας αποβλήτων σε βάθος μεγαλύτερο των τριών μέτρων.
- Πιθανή πρόσληψη των ρύπων στα φύλλα και απελευθέρωση μέσω της φθινοπωρινής πτώσης τους.
- Αδυναμία καθαρισμού σε σύντομο χρονικό διάστημα.
- Δυσκολίες ανάπτυξης της επιλεγμένης βλάστησης λόγω τοξικότητας της ρυπασμένης περιοχής.
- Πιθανή μετανάστευση των ρύπων εκτός περιοχής μέσω των μακροπόρων του εδάφους ή δέσμευσης σε διαλυτά εκχυλίσματα φυτών.

Μερικές φορές νομοθετημένοι περιορισμοί δεν επιτρέπουν την παραμονή των ρύπων με οποιαδήποτε μορφή σε μια περιοχή, ακόμη και αν η δημιουργημένη φυτοκάλυψη εμποδίζει τη διάβρωση του εδάφους ή τους υδρολογικούς δρόμους έκθεσης στα τοξικά. Η φυτοεξυγίαση είναι περισσότερο αποτελεσματική σε περιοχές με επιφανειακές ρυπάνσεις, όπου οι ρύποι επεξεργάζονται στη ριζόσφαιρα και με πρόσληψη στη ρίζα. Περιοχές με μόλυνση σε βάθος ή σε μικρές λίμνες μη υδατικών υγρών φάσεων δεν μπορούν να δώσουν γενικά καλά αποτελέσματα. Εν τούτοις, σε ρυπασμένα βαθιά υπόγεια νερά ή στραγγίσματα ταφής απορριμμάτων μπορεί να εφαρμοστεί άντληση και άρδευση φυτειών δέντρων.

Πίνακας 2.21. Εφαρμογές πεδίου της φυτοεξυγίανσης και έργα επίδειξης.

Τοποθεσία	Εφαρμογή	Φυτά	Ρύποι	Αποδόσεις	Φορέας
Chernobyl, Ukraine	Ριζοδιήθηση σε λίμνη κοντά στην πυρηνική καταστροφή	Ηλίανθοι ( <i>Helianthus annuus</i> )	<sup>137</sup> Cs, <sup>90</sup> Sr	90% μείωση σε 2 εβδομάδες. 8000 φορές συγκέντρωση στις ρίζες.	I. Raskin, Rutgers, U
Asthtabula, OH	Ριζοδιήθηση σε ενεργειακά απόβλητα	Ηλίανθοι ( <i>Helianthus annuus</i> )	U	95% απομάκρυνση σε 24h από 350 ppb σε <5 ppb	B. Ensley, Phytotech
Trenton, NJ	Φυτοεκχύλιση σε αγρό	Ινδικό σινάπι ( <i>Brassica juncea</i> )	Pb	Απομάκρυνση Pb κάτω από τα όρια σε μια περίοδο. Πρόγραμμα SITE.	B. Ensley, Phytotech
Rocky Flats, CO	Ριζοδιήθηση σε στραγγίσματα ταφής απορριμμάτων	Ηλίανθος, σινάπι	U, νιτρικά	Αρχή του προγράμματος	Rock, 1997
Dearing, KS	Φυτοσταθεροποίηση σε εγκαταλειμμένα χυτήρια και άγονα χωράφια	Λεύκες, ( <i>Populus spp.</i> )	Pb, Zn, Cd C >20.000 ppm για Pb, Zn	50% επιβίωση μετά από 3 χρόνια. Επιτυχημένη ανακαλλιέργεια στην περιοχή	G.Pierzynski, Kansas St.
Whitewood Cr, SD	Φυτοσταθεροποίηση σε απόβλητα μεταλλείων	Λεύκες, ( <i>Populus spp.</i> )	As, Cd	95% καταστροφή δέντρων, λόγω κακών συνθηκών και βόσκησης ελαφιών. Θανάτωση των ζώων.	J. Shnoor, U. of Iowa
Pennsylvania	Φυτοεκχύλιση σε κατάλοιπα μεταλλείων	<i>Thlaspi caerulescens</i>	Zn, Cd	Ταχεία πρόσληψη, αλλά δύσκολη η αποκατάσταση του εδάφους	R. Chaney, USDA Beltsville, MD, Brown 1995
San Francisco, CA	Φυτοεξάτμιση αποβλήτων διυλιστηρίων	Σινάπι ( <i>Brassica ssp.</i> )	Se	Μερική πρόσληψη του Se και εξάτμιση, αλλά δύσκολη η αποκατάσταση του εδάφους	G.Banuelos, USDA Salinity Lab, CA
Aberdeen, MD J-field site	Φυτομετασχηματισμός υπογείων νερών σε ένα χωράφι	Υβρίδια λευκών ( <i>Populus spp.</i> )	TCE, PCA (1,1,2,2-Τετραχλωροαιθάνιο)	Μόνο στο δεύτερο έτος της έρευνας	H. Compton, EPA/ERT Edison, NJ
Carswell AFB FT. Worth, TX	Φυτομετασχηματισμός υπογείων νερών σε 4 χωράφια	Υβρίδια λευκών ( <i>Populus spp.</i> )	TCE	Μόνο στο δεύτερο χρόνο του προγράμματος SITE	G. Harvey, Ohio Wright-Patterson, AFB

Πίνακας 2.21. Εφαρμογές της φυτοεξυγίανσης (συνέχεια).

Τοποθεσία	Εφαρμογή	Φυτά	Ρύποι	Αποδόσεις	Φορέας
Milan, TN	Φυτομετασχηματισμός σε υγρότοπο μιας εγκατάστασης πυρομαχικών	<i>Elodeia</i> <i>Scirpus lacustris</i> Κάναβις ( <i>Canary grass</i> )	TNT, RDX	> 90% απομάκρυνση	D. Bader, U.S Army Aberdeen Proving Ground, MA
Middletown, IA	Φυτομετασχηματισμός σε αεριζόμενο υγρότοπο και στο περιβάλλον έδαφος	Ποταμογείτων (Pondweed), Coontail, Μαράντα καλαμοειδής (Arrowroot), Υβρίδια λεύκας	TNT, RDX	Αρχή λειτουργίας	J. Shnoor, U. of Iowa, K.Howe, Army COE Omaha
Ogden, UT	Φυτομετασχηματισμός (έδαφος και υπόγεια νερά) σε πετροχημικά απόβλητα	Υβρίδια λεύκας	BTEX, TPH	Στο δεύτερο χρόνο του προγράμματος SITE	A. Ferro, Phytokinetics
Portland, OR	Φυτομετασχηματισμός σε απόβλητα συντηρητικών ξύλου	Υβρίδια λεύκας	PCP, PAH	Στο δεύτερο χρόνο του προγράμματος SITE	A. Ferro, Phytokinetics
Martell, IA Clarence, IA Amana, IA	Φυτομετασχηματισμός σε αγροτικές απορροές και σε περιοχές αγροτικών συνεταιρισμών	Υβρίδια λεύκας	Ατραζίνη, νιτρικά	90% μείωση νιτρικών, ατραζίνης στα υπόγεια νερά	Licht, Ecolotree Paterson and Shnoor (1992)

Η αποδόμηση των οργανικών ενώσεων περιορίζεται συχνά από φαινόμενα μεταφοράς μάζας. Για παράδειγμα, η εκρόφηση και μεταφορά μάζας των ρύπων από σωματίδια του εδάφους στην υδατική φάση μπορεί να αποτελέσει το βραδύτερο στάδιο της επεξεργασίας. Έτσι, η φυτοεξυγίανση μπορεί να απαιτήσει περισσότερο χρόνο για την επίτευξη των στόχων σε σχέση με τη μέθοδο της εκσκαφής και επεξεργασίας, ειδικά για υδρόφοβους ρύπους που είναι ισχυρά συνδεδεμένοι με τα σωματίδια του εδάφους. Σε πολλές περιπτώσεις, η φυτοεξυγίανση αποτελεί τελικό στάδιο εξευγενισμού μετά τη χρησιμοποίηση άλλων μεθόδων.

Η εφαρμογή της φυτοεξυγίανσης κατά τη διάρκεια του χειμώνα μπορεί να εμφανίσει προβλήματα όταν χρησιμοποιούνται φυλλοβόλα φυτά που ρίχνουν τα φύλλα τους, μειώνεται η πρόσληψη ουσιών από το έδαφος και το υπεδάφιο νερό δεν αντλείται για τη διαπνοή των φυτών. Συνιστάται η μαθηματική μοντελοποίηση της υδρολογίας και της μεταφοράς ρύπων για να διασφαλιστεί ότι η μετανάστευση των ρύπων και η μεταφορά στα υπόγεια νερά κατά τη διάρκεια της χειμερινής νάρκης των φυτών δεν θα παρεμποδίζει τη φυτοεξυγίανση.

### 2.3.8.3.2 Αποδόσεις

#### Φυτομετασχηματισμός

Η αρχή του φυτομετασχηματισμού έχει επαληθευθεί στο εργαστήριο, στο θερμοκήπιο και σε μικρά αγροτεμάχια. Οι ρύποι είτε ακινητοποιούνται συνδεδεμένοι με σωματίδια του εδάφους ή τις ρίζες, είτε μεταβολίζονται ή εξατμίζονται όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.20. Έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες ισοζυγίων μάζας με τη χρήση ουσιών σημασμένων με  $^{14}\text{C}$  και έτσι, διερευνήθηκε η μοίρα και η μεταφορά διαφόρων χημικών μέσα στα φυτά.

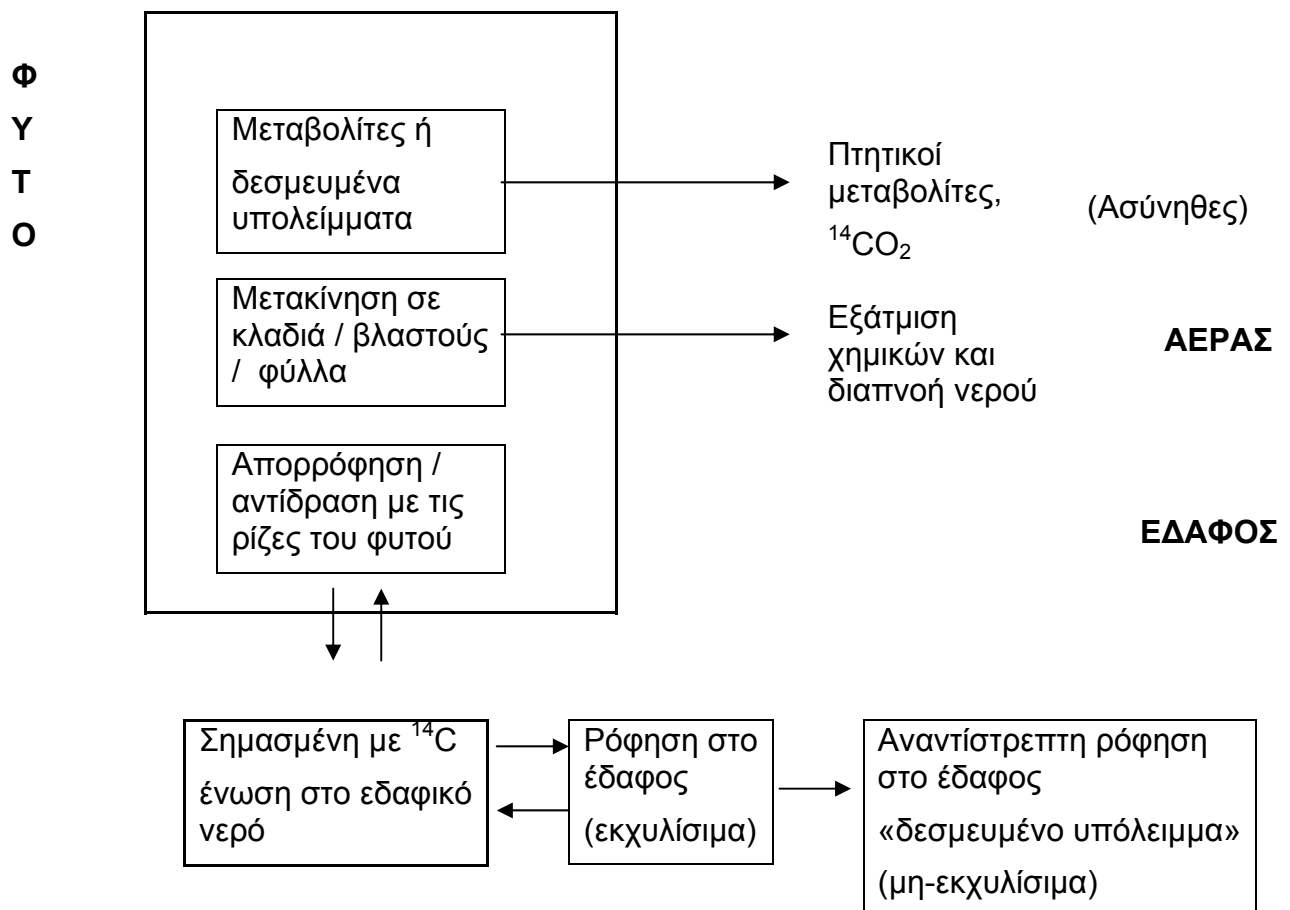
Έχει αποδειχθεί ότι το τριχλωροαιθυλένιο (TCE) μετατρέπεται σε τριχλωροαιθανόλη, τριχλωροοξικό οξύ και διχλωροοξικό οξύ από υβρίδια λεύκας. Αυτή η παρατήρηση είναι ένδειξη αερόβιου μετασχηματισμού, όπως συμβαίνει στο ανθρώπινο ήπαρ με τη βοήθεια του ενζύμων του κυτοχρώματος P-450 (μονο-οξυγενάση). Ίχνη ποσοτήτων  $^{14}\text{CO}_2$  αποδεσμεύονται από τα φυτά, πράγμα που δείχνει την μερική τουλάχιστον ανοργανοποίηση του TCE. Η μετατροπή είναι μάλλον ασυνήθιστη, αλλά δεν υπάρχουν αναφορές στη βιβλιογραφία πλήρους μετατροπής αρωματικών ενώσεων σε ανόργανες ουσίες από τα φυτά. Στη φυτοεξυγίανση έχει αποδειχθεί ότι το ζιζανιοκτόνο τριαζίνη μετασχηματίζεται σε αμμελίνη, ένα πλήρως υδροξυλιωμένο και απαλκυλιωμένο μεταβολίτη, αλλά δεν υπάρχει ένδειξη ανοργανοποίησης σε  $^{14}\text{CO}_2$ . Ένα μέρος (~15%) των σημασμένων δακτυλίων της ατραζίνης ενσωματώνεται στη βιομάζα ως δεσμευμένο υπόλειμμα.

Οι υδρόφοβες ενώσεις ( $\log K_{ow} > 3,5$ ) αναμένεται να απορροφούνται ισχυρότερα στο έδαφος και δεν είναι βιοδιαθέσιμες για μετακίνηση. Η βιοεξυγίανση των υδρόφοβων ενώσεων, όπως PCBs και PAHs, είναι εφικτή λόγω ενίσχυσης των διεργασιών μικροβιακής αποδόμησης της ριζόσφαιρας και της ρόφησης στις ρίζες. Μετρίως υδρόφοβες ενώσεις ( $\log K_{ow} = 1$  έως 3,5) προσλαμβάνονται από τα φυτά και μεταβολίζονται, εξατμίζονται ή



ενσωματώνονται στους ιστούς ως μη-εκχυλίσιμα υπολείμματα. Αυτά θεωρούνται γενικά ως λιγότερο τοξικά για τα ζώα (μη-βιοδιαθέσιμα), αλλά απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να επιβεβαιωθεί αυτό σε ορισμένες ουσίες. Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) μπορούν να απομακρυνθούν με τη διαπνοή των φυτών και απλά μοντέλα εκπομπής τοξικών ουσιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό του κινδύνου στην ατμόσφαιρα. Στην περίπτωση του TCE, ο χρόνος ημιζωής σε αερόβιο έδαφος και τα υπόγεια νερά ευρίσκεται στην τάξη μεγέθους ετών, ενώ στην ατμόσφαιρα αντιδρά με ρίζες υδροξυλίου με αποτέλεσμα χρόνους ημιζωής της τάξης ωρών έως ημερών.

Υδρόφιλες ενώσεις ( $\log K_{ow} < 1$ ) δεν προσλαμβάνονται, ούτε ροφούνται από τα φυτά. Εν τούτοις υπάρχουν και εξαιρέσεις, και έτσι απαιτείται συνήθως πειραματική επιβεβαίωση. Η φυτοεξυγίανση μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη επιλογή για ορισμένες υδρόφιλες ενώσεις που εμφανίζουν σημαντική κινητικότητα στο υπέδαφος και δεν υπόκεινται σε μικροβιακή αποδόμηση.



Σχήμα 2.20. Μεταφορά οργανικών ενώσεων με ουσίες σημασμένες με  $^{14}\text{C}$  σε εργαστηριακά πειράματα φυτοεξυγίανσης

Στον Πίνακα 2.21 παρουσιάζονται ορισμένες εφαρμογές πεδίου της φυτοεξυγίανσης. Παρά το μεγάλο αριθμό ερευνών στο εργαστήριο και το θερμοκήπιο, λίγες περιπτώσεις καθαρισμού πλήρους κλίμακας με φυτομετασχηματισμό αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Δεν έχουν ολοκληρωθεί ακόμη αρκετά μεγάλα προγράμματα φυτοεξυγίανσης, όπως φαίνεται στον Πίν. 2.21, ορισμένα όμως μικρότερα έργα επίδειξης έχουν δώσει πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα στην Ευρώπη και την Αμερική.

### **Ριζοσφαιρική Βιοεξυγίανση**

Η ριζοσφαιρική βιοεξυγίανση έχει εφαρμοσθεί σε εδάφη ρυπασμένα με TCE. Δεν έγινε δυνατή η μελέτη των ισοζυγίων μάζας, αλλά αποδείχθηκε η εξαφάνιση του TCE με το χρόνο και οι διαφορές ανάμεσα σε 5 είδη φυτών. Η αερόβια ριζοσφαιρική εξυγίανση πιστεύεται ότι είναι αποτελεσματική σε αρωματικές υδρόφοβες ενώσεις όπως φαινόλες, PAHs, BTEX σε τοποθεσίες επιφανειακής μόλυνσης.

### **Φυτοσταθεροποίηση**

Η φυτοσταθεροποίηση είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για υδρόφοβες ενώσεις και μέταλλα, σε περιοχές όπου η επεξεργασία ή η απομάκρυνση δεν είναι εφικτές ή ως στάδιο εξευγενισμού, όταν οι συγκεντρώσεις ρύπων βρίσκονται κάτω από τα νομοθετημένα επίπεδα. Έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία η φυτοσταθεροποίηση μετάλλων σε δύο τοποθεσίες, σε ένα ορυχείο στη Νότια Ντακότα (ΗΠΑ) με μέχρι 1.000 mg/kg αρσενικού (και λιγότερο κάδμιο) και σε ένα εγκαταλειμμένο χυτήριο στο Κάνσας (ΗΠΑ) με μέχρι 20.000 mg/kg μολύβδου και 200.000 mg/kg ψευδαργύρου. Σκοπός σε κάθε περιοχή ήταν η σταθεροποίηση του εδάφους και η μείωση της μεταφοράς διηθημάτων στα υπόγεια νερά, χρησιμοποιώντας υβρίδια λεύκας. Στη Νότια Ντακότα, τα δέντρα καταστράφηκαν εξαιτίας των σκληρών καιρικών συνθηκών, τη βόσκησης των ελαφιών και της τοξικότητας του εδάφους. Στο Κάνσας, η επιβίωση των δέντρων ήταν μεγαλύτερη του 50% τον τρίτο χρόνο και η προσπάθεια ήταν επιτυχημένη. Τοποθεσίες με μεγαλύτερες συγκεντρώσεις μετάλλων είναι δύσκολο να φυτοσταθεροποιηθούν εξαιτίας της τοξικότητας και του υψηλού κόστους. Συνήθως απαιτούνται βελτιωτικά του εδάφους, όπως χημικά λιπάσματα φωσφόρου/αζώτου/καλίου, άσβεστος ή οργανική λίπανση (ιλύς αστικών λυμάτων, χωνεμένη κοπριά, φύλλα, άχυρο, κ.ά.).

### **Φυτοεκχύλιση ή φυτοαπόληψη**

Η φυτοεκχύλιση έχει εφαρμοσθεί αποτελεσματικά στην εξυγίανση ρυπασμένων με μόλυβδο εδαφών. Σε μια περίπτωση περίπου 50% του μόλυβδου απομακρύνθηκε από το έδαφος ( $\approx 700$  mg/kg), μέχρι να επιτευχθούν τα επιθυμητά επίπεδα (400 mg/kg) σε ένα χρόνο με τη χρησιμοποίηση του *Brassica juncea*, ένα συγκενικό είδος του σιναπιού. Για μια επιτυχημένη φυτοεκχύλιση θα πρέπει η ανάπτυξη των φυτών να είναι ταχεία ( $>6,7$  τόνοι ξηρής μάζας ανά εκτάριο και έτος), το υπέργειο τμήμα του φυτού να μπορεί να

συλλεχθεί εύκολα και το φυτό να συσσωρεύει μεγάλες ποσότητες μετάλλου στο υπέργειο τμήμα ( $\approx 1000$  mg/kg). Για τον καθαρισμό μιας έκτασης μέσα σε τρία έως πέντε έτη το φυτό πρέπει να συσσωρεύει 10 φορές περισσότερο από τη συγκέντρωση του εδάφους. Για παράδειγμα, εάν η συγκέντρωση στο έδαφος είναι 500 mg/kg, τότε η συγκέντρωση στο φυτό θα πρέπει να είναι 5.000 mg/kg για τον καθαρισμό του εδάφους σε μερικά χρόνια. Σε ορισμένες περιοχές τα μέταλλα είναι βιοδιαθέσιμα, ενώ σε άλλες όχι. Γενικά, τα κάδμιο, νικέλιο, ψευδάργυρος, αρσενικό και χαλκός είναι βιοδιαθέσιμα, ενώ τα μόλυβδος, χρώμιο και ουράνιο δεν προσλαμβάνονται και δεν μεταφέρονται στη συγκομιδή. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται φυτά που συσσωρεύουν νικέλιο, κοβάλτιο, χαλκό, μαγγάνιο, μόλυβδο, ψευδάργυρο και σελήνιο. Ο ψευδάργυρος και το βόριο είναι φυτοτοξικά σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες των 200 mg/kg στο έδαφος. Η προσθήκη EDTA (0,5 έως 10  $\mu\text{g}$  EDTA /kg εδάφους) έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει σημαντικά τη βιοδιαθεσιμότητα του μολύβδου, αλλά πρέπει να συνεκτιμάται και η αύξηση του ρυθμού μεταφοράς μετάλλων στα υπόγεια νερά. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να απαιτηθεί μαθηματική μοντελοποίηση για πλήρη κατανόηση της κίνησης του νερού και της μεταφοράς του μολύβδου.

### **Ριζοδιήθηση**

Η ριζοδιήθηση είναι αποτελεσματική σε περιπτώσεις, όπου μπορούν να δημιουργηθούν υγρότοποι, έτσι ώστε όλο το ρυπασμένο νερό να μπορεί να έλθει σε επαφή με τις ρίζες. Οι ρύποι που μπορούν απομακρυνθούν αποτελεσματικά με αυτή τη μέθοδο είναι αυτοί που προσροφούνται ισχυρά από τις ρίζες, όπως υδρόφοβες οργανικές ουσίες, μόλυβδος, χρώμιο (III), ουράνιο και αρσενικό.

#### **2.3.8.4 Σχεδιασμός συστήματος φυτοεξυγίανσης**

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος φυτοεξυγίανσης ποικίλλει ανάλογα με τους ρύπους, τις συνθήκες της περιοχής, το απαιτούμενο επίπεδο καθαρισμού και τα φυτά. Η φυτοεκχύλιση έχει διαφορετικές απαιτήσεις σχεδιασμού από τη φυτοσταθεροποίηση ή τη ριζοσφαιρική εξυγίανση. Εν τούτοις, είναι δυνατό να καθορισθούν μερικοί παράγοντες που είναι κοινοί στις περισσότερες μεθόδους φυτοεξυγίανσης. Τέτοιοι παράγοντες είναι:

- Η επιλογή του φυτού.
- Η επεξεργασιμότητα.
- Η πυκνότητα φυτέματος και η διαρρύθμιση της φυτείας.
- Η άρδευση, οι αγρονομικές εισροές και η συντήρηση.
- Η ζώνη σύλληψης υπογείων νερών και ο ρυθμός διαπνοής.
- Ο ρυθμός πρόσληψης του ρύπου και ο απαιτούμενος χρόνος καθαρισμού.
- Η ανάλυση των τρόπων αστοχίας.

#### 2.3.8.4.1 Επιλογή φυτού

Τα φυτά επιλέγονται σύμφωνα με τις ανάγκες εφαρμογής και τους ρύπους. Για το φυτομετασχηματισμό των οργανικών ενώσεων οι απαιτήσεις σχεδιασμού είναι φυτά ανθεκτικά και ταχείας ανάπτυξης, εύκολα στο φύτεμα και τη συντήρηση, οι μεγάλες ανάγκες τους σε νερό για εξατμισοδιαπνοή (εάν το πρόβλημα αφορά το υπόγειο νερό) και μετατροπή των ρύπων σε μη-τοξικά ή μικρότερης τοξικότητας προϊόντα. Σε εύκρατα κλίματα, επιλέγονται συχνά τα φρεατόφυτα (π.χ. υβρίδια λεύκας, ιτιές) λόγω της ταχείας ανάπτυξής τους, των βαθιών ριζών τους μέχρι τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και των μεγάλων ρυθμών διαπνοής. Για περιοχές ρυπασμένες με απόβλητα εγκαταστάσεων πυρομαχικών έχουν χρησιμοποιηθεί φυτά που έχουν δραστικότητα νιτροαναγωγάσης. Έτσι, για χερσαίες ρυπάνσεις έχουν επιλεγεί μέχρι σήμερα υβρίδια λεύκας, ενώ για υγρά απόβλητα έχουν προταθεί τα υδρόβια είδη ποταμογεΐτων, μαράντα καλαμοειδής και κοινή καλαμιά. Για τοποθεσίες ρύπανσης με πετροχημικά, έχουν επιλεγεί άλλα δέντρα (μηλιά, πορτοκαλιά και μουριά), λόγω της ικανότητάς τους να αποδεσμεύουν φλαβονοειδή και φαινολικά, ενώσεις που είναι γνωστές ότι προκαλούν την παραγωγή ενζύμων σε οργανισμούς αποδόμησης των PCBs και PAHs. Έχει αποδειχθεί ότι υβρίδια λεύκας μπορούν να προσλαμβάνουν και να μετασχηματίζουν το TCE. Οι μελετητές μηχανικοί μπορούν να βρουν στη βιβλιογραφία πολλές πληροφορίες για τα καταλληλότερα φυτά για κάθε περίπτωση. Είναι προτιμότερο, όμως να συγκροτούν διεπιστημονικές ομάδες που να περιλαμβάνουν και ένα γεωπόνο για την αναγνώριση και επιλογή των φυτών που θα αναπτυχθούν καλύτερα στην περιοχή.

Τα ποώδη φυτά φυτεύονται μαζί με δέντρα σε περιοχές ρυπασμένες με οργανικές ενώσεις ή ως κύρια μέθοδος εξυγίανσης. Παρέχουν ένα τεράστιο αριθμό λεπτών ριζών στο επιφανειακό έδαφος που επιδρούν αποτελεσματικά στη δέσμευση και το μετασχηματισμό υδρόφοβων ρύπων όπως TPH, BTEX, και PAHs. Καλλιεργούνται ανάμεσα σε σειρές δέντρων για σταθεροποίηση των εδαφών και προστασία κατά της ανεμόφερτης σκόνης που μπορεί να μεταφέρει τους ρύπους εκτός περιοχής. Ελλοβόκαρπα, όπως αλφάλφα, τριφύλλι, αρακάς, και μπιζέλια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δέσμευση αζώτου σε φτωχά εδάφη. Τα φυτά φεστούκα, σίκαλη και καλάμια έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία εκτός των άλλων και σε περιοχές με πετροχημικά απόβλητα. Τα ποώδη συλλέγονται περιοδικά και διατίθενται για κομποστοποίηση ή καίγονται. Οι υδρόφοβες ενώσεις δεν μετατοπίζονται μέσα στο φυτό, οπότε δεν μολύνεται το υπέργειο τμήμα των φυτών. Το σύστημα επιτυγχάνει τη φυτοεξυγίανση μέσω διεργασιών στη ριζόσφαιρα και ρόφησης στις ρίζες.

Η επιλογή των φυτών εξαρτάται από τη επιλεγείσα εφαρμογή, φυτοσταθεροποίηση, ριζοδιήθηση, ή φυτοεκχύλιση. Στη φυτοεκχύλιση επιδιώκεται η συγκέντρωση του μετάλλου στο υπέργειο τμήμα της βιομάζας, που αν είναι εφικτό συλλέγεται και ανακτάται με τη συγκομιδή. Τα φυτά που χρησιμοποιούνται σήμερα στη φυτοεκχύλιση είναι ηλίανθοι και ινδικό σινάπτι για τη δέσμευση μολύβδου, χόρτα του γένους *Thlaspi spp.* για ψευδάργυρο, κάδμιο και νικέλιο και ηλίανθοι για ραδιονουκλεοτίδια (Πίν. 2.21). Η ανάκτηση μετάλλων από τη βλάστηση έχει επικεντρωθεί στην αποτέφρωση και ανάκτηση των μετάλλων από την τέφρα ή σε τεχνικές υγρής εκχύλισης. Ακόμη και αν δε είναι

εφικτή η ανάκτηση μετάλλων από τη βιομάζα ή την τέφρα, ούτως ή άλλως αυτά συγκεντρώνονται σε πολύ μικρότερους όγκους για την τελική διάθεση.

Σε εφαρμογές τεχνητών υγροτόπων χρησιμοποιούνται υδροχαρή φυτά, άλλα από τα οποία αναπτύσσονται μέσα στο νερό και άλλα στην επιφάνειά του. Η επιφανειακή βλάστηση διαπνέει νερό και είναι ευκολότερη η συγκομιδή της. Τα υπό την επιφάνεια είδη δεν διαπνέουν, αλλά παρέχουν περισσότερη βιομάζα για πρόσληψη και ρόφηση των ρύπων στην υδατική φάση. Στα υδροχαρή είδη περιλαμβάνονται τα λέμνα, ζάμια, ψάθα, βούρλα, ποταμογεΐτων, ευρασιατικό μυριόφυλλο, αναχαρίδες, φύκη και καλαμιές.

#### 2.3.8.4.2 Επεξεργασιμότητα

Για τη διασφάλιση των επιθυμητών αποτελεσμάτων σε συστήματα βιοεξυγίανσης απαιτούνται πριν το σχεδιασμό του συστήματος η εκτέλεση μελετών επεξεργασιμότητας. Έτσι, αποκτώνται δεδομένα τοξικότητας και ρυθμών μετασχηματισμού σε μελέτες επεξεργασιμότητας. Αναμένονται μεγάλες διαφορές τοξικότητας και ρυθμών μετασχηματισμού από ένα φυτικό είδος σε άλλο, ακόμη και μεταξύ μιας ποικιλίας φυτού σε άλλη. Το βόριο, ο ψευδάργυρος, τα αμμωνιακά, μερικά μέταλλα και άλατα είναι ιδιαίτερα τοξικά στα φυτά. Η αλληλουχία των πληροφοριών σχεδιασμού που απαιτούνται εκτείνεται από υδροπονικές μελέτες, πειραματισμό σε γλάστρες με χώμα από την ρυπασμένη περιοχή μέσα σε θερμοκήπιο, μέχρι μελέτες σε αγροτεμάχια (15 X 15 m). Διαφορετικές συγκεντρώσεις ρύπων αναλύονται για έλεγχο της τοξικότητας, ενώ συλλέγονται διάφοροι φυτικοί ιστοί προκειμένου να προσδιοριστούν οι μεταβολίτες και τα υπολείμματα των αρχικών ουσιών. Οι αρμόδιοι φορείς μπορεί να απαιτήσουν πληροφορίες για ολικά ισοζύγια μάζας, πράγμα που απαιτεί τη χρήση ραδιενεργά σημασμένων ουσιών στο εργαστήριο.

Μπορεί να χρειαστούν εργαστηριακές μελέτες επεξεργασιμότητας για να προσδιορισθεί η μοίρα των ρύπων στο φυτικό σύστημα. Για παράδειγμα, πρέπει να εξετάζεται το δυναμικό κίνησης πτητικών ενώσεων, όπως το βενζόλιο και το τριχλωροαιθυλένιο δια μέσου του φυτού και της διαπνοής τους στην ατμόσφαιρα ως τοξικών αερίων ρύπων. Τα πτητικά εκπέμπονται συχνά στην ατμόσφαιρα από τα φυτά, οπότε πρέπει να γίνονται εκτιμήσεις συγκεντρώσεων τοξικότητας, έτσι ώστε να διαπιστώνεται, αν οι εκπομπές είναι αποδεκτές. Ομοίως, μετρίως υδρόφοβες οργανικές ενώσεις ( $\log K_{ow} = 1$  έως 3.5) μεταφέρονται στα φύλλα και μεταβολίζονται. Σε αυτή την περίπτωση, επιβάλλονται μετρήσεις των συγκεντρώσεων των αρχικών ενώσεων και των μεταβολιτών τους στα φύλλα για να διαπιστωθεί, αν ξεπερνιούνται τα νομοθετημένα όρια.

#### 2.3.8.4.3 Πυκνότητα και διάταξη φυτέματος

Η πυκνότητα φυτέματος εξαρτάται από την εφαρμογή, όπως η χρήση υβριδίων λεύκας ως παρόχθιων ζωνών ελέγχου, ως επικαλύψεων χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων και σε περιοχές απόρριψης επικίνδυνων

αποβλήτων. Οι λεύκες φυτεύονται από 2.500 έως 5.000 δέντρα ανά εκτάριο, με ειδικό μηχάνημα σε βάθος 0,30-0,45 m ή σε σειρές αυλακιών 0,30-1,80 m βάθους. Στην τελευταία περίπτωση οι λεύκες φυτεύονται ως βέργες σε αποστάσεις 0,60 m μεταξύ των δένδρων και 3 m μεταξύ των αυλακιών. Αναπτύσσουν βαθιές ρίζες και μεγάλο υπέργειο τμήμα από την πρώτη κιόλας περίοδο. Αρκετά φρεατόφυτα της οικογένειας *Salix*, όπως οι ιπιές και τα υβρίδια λεύκας, καλλιεργούνται με τον ίδιο τρόπο. Δέντρα με σκληρό ξύλο (πάνω από 25% λιγνίνη) και αειθαλή απαιτούν χαμηλότερη πυκνότητα φυτέματος.

Μια αρχικά μεγάλη πυκνότητα φυτέματος εξασφαλίζει ένα σημαντικό ποσό εξατμισοδιαπνοής το πρώτο έτος, αλλά τα δέντρα αραιώνουν από μόνα τους με ανταγωνισμό σε περίπου 1.500-2.000 δέντρα ανά εκτάριο στα πρώτα έξι έτη. Η συγκομιδή λευκών γίνεται κάθε 6 έτη και πωλούνται ως καυσόξυλα, ή χαρτοπολτός σε χαρτοβιομηχανίες, ενώ τα δέντρα αναπτύσσονται και πάλι από το σημείο που κόπηκαν (πρέμνο). Το πυκνό και βαθύ ριζικό σύστημα παραμένει στη θέση του και υποστηρίζει την ανάπτυξη κατά το επόμενο έτος. Ο χρόνος ζωής των υβριδίων λεύκας όπως το *Populus deltoides* x *nigra* DN-34 (Imperial Carolina) είναι περισσότερο από 30 έτη, χρόνος που είναι αρκετός για την ολοκλήρωση ενός έργου εξυγίανσης.

Τα φιντάνια των ποωδών φυτών βυθίζονται στο έδαφος ή σπείρονται για φύτεμα σε περιοχές με απόβλητα. Επιτυγχάνονται αποδόσεις υπέργειας βιομάζας περίπου 200-600 g/m<sup>2</sup> (2-6 ton/ha) στη δεύτερη συγκομιδή, με 1 έως 3 συγκομιδές το έτος, ανάλογα με το κλίμα και τη διαθεσιμότητα νερού.

Η αρχική πυκνότητα φύτευσης των υδροβίων ειδών σε ένα τεχνητό ή φυσικό υγρότοπο είναι συνήθως τρία φυτά ανά θέση, στο κέντρο ακτίνας 0,90 m. Στο κόστος έργου πρέπει να συνυπολογίζεται η συντήρηση των φυτών και το επαναφύτεμα σε ποσοστό τουλάχιστον 30% των αρχικών φυτών κατά το δεύτερο και τρίτο έτος. Η τελική πυκνότητα φυτέματος σε 4 υγρότοπους ρυπασμένους με TNT που μελετήθηκαν συστηματικά κυμάνθηκε από 2.400-4.000 g/m<sup>2</sup> με προσθήκη 350-700 mg/L λιπάσματος (N=3,6%, P=0,7%, K=2,4%, ιχνοστοιχεία: Mg, Na, Si, S, Fe, Zn, Mn). Η προσθήκη μεγάλων ποσοτήτων λιπασμάτων στις παραπάνω εφαρμογές έγινε για να διασφαλισθεί η μέγιστη επεξεργασία του TNT με αναερόβιες μικροβιακές διαδικασίες παρά με πρόσληψη από το φυτό και μετασχηματισμό του.

#### 2.3.8.4.4 Άρδευση, αγρονομικές εισροές και συντήρηση

Στη χερσαία φυτοεξυγίανση πρέπει να περιλαμβάνεται και το κόστος άρδευσης, της τάξης των 250-500 mm νερού το έτος, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται έντονη εκκίνηση και λειτουργία του συστήματος, ακόμα και σε περιόδους ξηρασίας. Εν τούτοις μπορεί να απαιτηθεί η υδρολογική μοντελοποίηση για τον υπολογισμό του ρυθμού διήθησης στα υπόγεια νερά υπό συνθήκες άρδευσης. Με τον καιρό, η άρδευση πρέπει να μειώνεται στην περιοχή, με την προϋπόθεση ότι η περιοχή δέχεται ικανοποιητική βροχόπτωση. Στο κόστος λειτουργίας και συντήρησης πρέπει να συμπεριλαμβάνονται οι διεργασίες συγκομιδής, αναφυτέματος, κλαδέματος, παρακολούθησης των ρύπων και προσθήκης λιπασμάτων.

Οι αγρονομικές εισροές περιλαμβάνουν τα θρεπτικά μέσα για την ταχεία ανάπτυξη της βλάστησης και των βακτηρίων της ριζόσφαιρας, όπως N/P/K από εμπορικά μίγματα λιπασμάτων, προσθήκη ανθρακούχων ουσιών και βελτιωτικά εδάφους (κοπριά, ιλύς αστικών λυμάτων, κομποστοποιημένα αγροτικά απορρίμματα, άχυρο, φύλλα). Ο ρυθμός προσθήκης λιπασμάτων είναι 55 kg P ανά εκτάριο και 110 kg N ανά εκτάριο ανά έτος, ειδικά για την παραγωγή πωδών με λεπτές ρίζες σε περιοχές με πετροχημικά. Ένα κρίσιμο στοιχείο είναι το έδαφος να έχει αρκετή υδατοχωρητικότητα για να μπορεί να αναπτύξει βλάστηση. Αυτό συνήθως δεν συμβαίνει στις περιπτώσεις απορριμμάτων ορυχείων και εγκαταλειμμένων χυτηρίων, όπου απαιτούνται βελτιωτικά εδάφους και όργωμα και σε μερικές περιπτώσεις εξουδετέρωση του χαμηλού pH με προσθήκη ασβέστου.

Ο ρυθμός παραγωγής βιομάζας αξιολογείται σε 17 τόνους ξηρής μάζας ανά εκτάριο ανά έτος για ταχέως αναπτυσσόμενα δέντρα. Το ποσό του αζώτου που αποθηκεύεται στον κορμό είναι περίπου 0,5-1%, απ' όπου μπορεί να υπολογισθεί η ποσότητα του αζώτου που έχει δεσμευθεί. Από την στοιχειομετρία του ξυλώδους ιστού και των φύλλων που δίδονται στη βιβλιογραφία υπολογίζονται οι ανάγκες σε θρεπτικά συστατικά.

Σε μερικές περιπτώσεις οι χημικές εισροές αποτελούν μέρος του σχεδιασμού φυτοεξυγίανσης. Στην φυτοσταθεροποίηση επιβάλλεται η δέσμευση των μετάλλων από τα σωματίδια του εδάφους, έτσι ώστε να μην είναι διαθέσιμα για πρόσληψη από τα φυτά ή στράγγιση. Τα φωσφορικά λιπάσματα είναι αποτελεσματικά στη δέσμευση μολύβδου και ψευδαργύρου και μπορούν να προστεθούν στα χαντάκια πριν από το φύτεμα. Στην φυτοεκχύλιση είναι επιθυμητό το αντίθετο φαινόμενο, δηλαδή τα μέταλλα πρέπει να είναι βιοδιαθέσιμα για πρόσληψη από το φυτό. Σε αυτή την περίπτωση προστίθενται με την άρδευση στο έδαφος συμπλοκοποιητές, όπως EDTA (0,5-1 μg EDTA/kg εδάφους) για να εξασφαλισθεί η πρόσληψη μετάλλων στη βιομάζα από το έδαφος.

#### 2.3.8.4.5 Σύλληψη και διαπνοή υπόγειων νερών

Για την κατανόηση της μοίρας των ρύπων και των φαινομένων μεταφοράς πρέπει να διευκρινισθεί πρώτα η κίνηση του νερού στην περιοχή. Για εφαρμογές που έχουν σχέση με τη φυτοεξυγίανση υπόγειου νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας απλός υπολογισμός στη ζώνη σύλληψης, για να εκτιμηθεί, αν η αντλία φυτοεξυγίανσης είναι αποτελεσματική στην εισχώρηση μέσα στο υπόγειο λοφίο (πλούμιο) των ρύπων.

Σκοπός της φυτοεξυγίανσης είναι η ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα, έτσι ώστε οι ρύποι να κινηθούν προς τις ρίζες για πρόσληψη και επεξεργασία. Σε εφαρμογές που αφορούν την εξυγίανση υπογείων νερών, μια απλή ζώνη σύλληψης αποτιμάται κατά πόσο είναι αποτελεσματική η φυτοεξυγίανση στην απομάκρυνση των ρύπων. Είναι σημαντικό να κατανοηθεί ότι οι ρύποι δεν προσλαμβάνονται με την ίδια συγκέντρωση όπως στο έδαφος και τα υπόγεια νερά, αλλά υπάρχει ένας παράγοντας συγκέντρωσης στο ρεύμα διαπνοής (transpiration stream concentration factor, TSCF) ως μέτρο της

αποτελεσματικότητας πρόσληψης, που συνεκτιμά τη μερική μόνο πρόσληψη του ρύπου λόγω φλοιώδους φραγμού στην επιφάνεια της ρίζας. Ο ρυθμός πρόσληψης υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$U = (TSCF) \cdot (T) \cdot (C) \quad (2.9)$$

όπου  $U$ : ρυθμός πρόσληψης του ρύπου (kg/ha/yr)  
 $TSCF$ : συντελεστής συγκέντρωσης στο ρεύμα διαπνοής (αδιάστατος)  
 $T$ : ρυθμός διαπνοής της βλάστησης (L/ha/yr)  
 $C$ : συγκέντρωση ρύπου στην υδατική φάση εδάφους ή στα υπόγεια νερά (kg/L)

Εάν ο ρύπος δεν προσληφθεί από τη βλάστηση, τότε συμπυκνώνεται με εξάτμιση οπότε η μάζα του ρύπου θα είναι λιγότερη λόγω πρόσληψης από το φυτό αλλά η συγκέντρωση θα είναι μεγαλύτερη. Αυτή η δυνατότητα είναι πιθανή σε υπόγεια νερά ή υγρότοπους που υδρόφιλοι ρύποι συγκεντρώνονται στην κατεύθυνση του ρεύματος του φυτοσυστήματος.

Η ποσότητα του ρύπου που δεν προσλαμβάνεται από τη βλάστηση συμπυκνώνεται λόγω εξάτμισης. Αυτό σημαίνει ότι η μάζα του ρύπου θα είναι μικρότερη στο υπόγειο πλούμιο, λόγω πρόσληψης από το φυτό, αλλά η υπολειμματική συγκέντρωσή του θα είναι μεγαλύτερη. Αυτή η αυξημένη συγκέντρωση είναι λογικό να προκαλεί ανησυχίες κατά τη φυτοεξυγίανση πλουμίων υπόγειων νερών ή τεχνητών υγροτόπων, όπου ένας σχετικά υδρόφιλος ρύπος μπορεί να συγκεντρωθεί στην υδατική πλευρά ενός φυτοσυστήματος.

Δεδομένα υπολογισμού του παράγοντα  $TSCF$  της Εξ. (2.9) δίνονται στον Πίν. 2.22. Ο συντελεστής συγκέντρωσης στη ρίζα (root concentration factor – RCF) καθορίζεται επίσης στον πίνακα ως ο λόγος της συγκέντρωσης του ρύπου στη ρίζα προς τη συγκέντρωσή του στο νερό του εδάφους (mg/kg ρίζας ανά mg/L). Στα συστήματα φυτοεξυγίανσης είναι σημαντικό να είναι γνωστή η ροφημένη μάζα του ρύπου στις ρίζες.

Ανεπτυγμένα δένδρα της οικογένειας των φρεατόφυτων (λεύκες, ιτιές, ράμνοι, ευκάλυπτοι, κυπαρίσσια, σημύδες, κέδροι) μπορούν να διαπνέουν 0,9 έως 1,5 m νερού. Αυτό είναι ισοδύναμο με 2,27-3,78 m<sup>3</sup> νερού ανά δένδρο το χρόνο στα ανεπτυγμένα είδη (6.000 δένδρα ανά εκτάριο). Ο ρυθμός διαπνοής στα δύο πρώτα έτη είναι μικρότερος κατά περίπου 0,76 m<sup>3</sup> ανά δένδρο το έτος και στα δένδρα με σκληρό ξύλο (>25% λιγνίνη) διαπνέεται περίπου η μισή ποσότητα νερού από ότι σε ένα φρεατόφυτο. Τα 2 m νερού το έτος είναι ένα πρακτικό μέγιστο για τη διαπνοή ενός συστήματος με πλήρη εδαφοκάλυψη. Το θεωρητικό μέγιστο είναι 4 m ανά έτος στη βάση της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε βόρειο γεωγραφικό πλάτος 40°, που απαιτείται για την εξάτμιση του νερού. Εάν η εξατμισοδιαπνοή του συστήματος υπερβαίνει τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, είναι πιθανό να συλληφθεί το νερό με ανοδική κατακόρυφη κίνηση δια μέσου του εδάφους. Περιοχές που δέχονται κατακρημνίσεις τη χειμερινή περίοδο (χειμερία νάρκη για τα φυλλοβόλα δένδρα) πρέπει να μοντελοποιούνται για να προσδιορίζεται, αν το έδαφος θα είναι αρκετά ξηρό την επόμενη περίοδο ανάπτυξης την άνοιξη.



Πίνακας 2.22. Συντελεστές συγκέντρωσης της διαπνοής (TSCF) και συγκέντρωσης της ρίζας (RCF) για διάφορους ρύπους.

Χημική ένωση	$\log K_{ow}$	Διαλυτότητα $-\log C_w^{sat}$ σε 25°C (mol/L)	Σταθερά Henry σε 25°C (αδιάστ.)	Τάση ατμών $-\log P_o$ 25°C (atm)	Συντελ. συγκέντρ. διαπνοής TSCF*	Συντελ. συγκέντρ. στη ρίζα RCF** (L/kg)
Βενζόλιο	2,13	1,64	0,225	0,90	0,71	3,6
Τολουόλιο	2,69	2,25	0,276	1,42	0,74	4,5
Αιθυλο- βενζόλιο	3,15	2,80	0,324	1,90	0,63	6,0
m-Ξυλόλιο	3,20	2,77	0,252	1,98	0,61	6,2
TCE	2,33	2,04	0,437	1,01	0,74	3,9
Ανιλίνη	0,90	0,41	$2,2 \times 10^5$	2,89	0,26	3,1
Νιτροβενζόλιο	1,83	1,77	0,0025	3,68	0,62	3,4
Φαινόλη	1,45	0,20	$>1,0 \times 10^5$	3,59	0,47	3,2
Πενταχλωρο- φαινόλη	5,04	4,27	$1,5 \times 10^4$	6,75	0,07	54
Ατραζίνη	2,69	3,81	$1,0 \times 10^7$	9,40	0,74	4,5
1,2,4- τριχλωρο- βενζόλιο	4,25	3,65	0,113	3,21	0,21	19
RDX	0,87	4,57	-	-	0,25	3,1

$$* TSCF = 0,75 \exp\{-[(\log K_{ow} - 2,5)^2/2,4]\} \quad (2.10)$$

$$** RCF = 3,0 + \exp(1,497 \log K_{ow} - 3,615) \quad (2.11)$$

#### 2.3.8.4.6 Ρυθμός πρόσληψης ρύπου και χρόνος καθαρισμού

Από την Εξ. (2.9) είναι δυνατό να υπολογισθεί ο ρυθμός πρόσληψης του ρύπου, που ισούται με το ρυθμό απομάκρυνσής του από έδαφος. Υποθέτουμε ότι η κινητική είναι κατά προσέγγιση πρώτης τάξης για την χρονική επίτευξη της εξυγίανσης, οπότε ο ρυθμός απομάκρυνσης του ρύπου από έδαφος είναι:

$$dM/dt = U = -k M \quad (2.12)$$

όπου:  $k$ : σταθερά πρώτης τάξης για την πρόσληψη ( $\text{yr}^{-1}$ )

$U$ : ρυθμός πρόσληψης ρύπου ( $\text{kg/ha/yr}$ )

$M$ : υπολειμματική μάζα ρύπου ( $\text{kg/ha}$ )

$t$ : χρόνος ( $\text{yr}$ )

Τότε, η υπολειμματική μάζα του ρύπου στο έδαφος σε οποιοδήποτε χρόνο υπολογίζεται από την Εξ. (2.13):

$$M = M_0 e^{-kt} \quad (2.13)$$

όπου:  $M_0$ : αρχική μάζα ρύπου ( $\text{kg/ha}$ )

Λύνοντας ως προς το χρόνο και προκύπτει η εξίσωση:

$$t = - (\ln M/M_0) / k \quad (2.14)$$

όπου  $t$ : χρόνος απομάκρυνσης,  $\text{yr}$

$M$ : υπολειπόμενη μάζα,  $\text{kg}$

$M_0$ : αρχική μάζα ρύπου,  $\text{kg}$

#### 2.3.8.4.7 Ανάλυση αστοχιών

Στη φυτοεξυγίανση, όπως σε κάθε άλλη μέθοδο επεξεργασίας. Υπάρχουν επιτυχίες και αποτυχίες. Έτσι, σε περίπτωση αποτυχίας θα πρέπει να αναλυθούν οι αιτίες, προκειμένου να αυξηθούν οι πιθανότητες επιτυχίας στην επόμενη εφαρμογή. Αιτίες αποτυχίας μπορεί να αποτελέσουν αναπάντεχοι παγετοί, καταιγίδες, ζώα (κατσίκια, αρουραίοι, ελάφια, κάστορες), ασθένειες ή παράσιτα (μύκητες, έντομα) και μεγάλη τοξικότητα ρύπων. Πρέπει επίσης να διασφαλισθούν κεφάλαια για το ενδεχόμενο περιοδικού επαναφυτέματος της περιοχής για ένα βιώσιμο σύστημα φυτοεξυγίανσης.

#### 2.3.8.5 Παραδείγματα

Οι Εξ. (1)-(4) είναι δυνατό να εφαρμοσθούν σε περιοχές ρυπασμένες με μέταλλα ή οργανικούς ρύπους με σκοπό τον επιτυχή σχεδιασμό φυτοεξυγίανσης. Ακολουθούν δύο παραδείγματα, από τα οποία το πρώτο αφορά την επεξεργασία του ΤΣΕ με φυτομετασχηματισμό και το δεύτερο για την απομάκρυνση μολύβδου με φυτοεκχύλιση, που δείχνουν τον τρόπο εφαρμογής των εξισώσεων σχεδιασμού.

## Παράδειγμα 2.2

### Απομάκρυνση οργανικών ρύπων

Υπολείμματα TCE ανακαλύφθηκαν σε ακόρεστο έδαφος στα 3 μέτρα βάθος. Από μετρήσεις των δειγμάτων σε λυσίμετρο βρέθηκε ότι η συγκέντρωση της ουσίας στο νερό είναι 100 mg/L. Σχεδιάζεται το φύτεμα υβριδίων λεύκας και για το σκοπό αυτό φυτεύτηκαν σε πυκνότητα 3.700 δέντρα ανά εκτάριο για πρόσληψη και φυτομετασχηματισμό του TCE. Κατά το δεύτερο και τρίτο έτος, τα δέντρα αναμένεται να διαπνέουν 0,91 m νερού το έτος ή περίπου 2.330 L ανά δένδρο το έτος. Υπολογίστε τον απαιτούμενο χρόνο καθαρισμού της περιοχής, εάν η μάζα του TCE είναι 2.440 kg ανά εκτάριο και η απαίτηση του σχεδιασμού είναι στα 244 kg ανά εκτάριο (90% απομάκρυνση).

### Λύση

$$U = (TSCF) (T) (C)$$

όπου  $TSCF = 0.74$  (Πιν. 2.22)

$$T = (2.330 \text{ L/δένδρο/yr}) (3.700 \text{ δένδρα/ha}) = 8,62 \times 10^6 \text{ L/ha/yr}$$

$$C_o = 100 \text{ mg/L}$$

$$U_o = 0,74 \times 8,62 \times 10^6 (\text{L/ha/yr}) \times 100 \times 10^{-6} (\text{kg/L}) = 638 \text{ kg/ha/yr}$$

Οπότε από την Εξ. 2.12 και για  $t=0$ :

$$k = U_o / M_o = (638 \text{ kg/ha/yr}) / (2.440 \text{ kg/ha}) = 0,26 \text{ yr}^{-1}$$

Τελικά:

$$t = - (\ln M/M_o) / k = - \ln(244/2.440) / 0,26 \text{ έτη}$$

$$t = 8.9 \text{ έτη}$$

Το μεγαλύτερο μέρος του TCE που προσλαμβάνεται από τις λεύκες αναμένεται να εξατμισθεί βαθμιαία στην ατμόσφαιρα, ενώ ένα μέρος θα μεταβολιστεί από τα φύλλα και τον ξυλώδη ιστό των δέντρων.

## Παράδειγμα 2.3

### Απομάκρυνση Μετάλλων

Σε μια μολυσμένη περιοχή η συγκέντρωση μολύβδου στο έδαφος είναι 600 mg/kg μέχρι βάθος 30 cm. Η απαίτηση καθαρισμού έχει καθοριστεί στα 400 mg/kg. Σχεδιάζεται το φύτεμα, η λίπανση και η συγκομιδή ινδικού σιναπιού (*Brassica juncea*) τρεις φορές το χρόνο για φυτοεκχύλιση. Χρησιμοποιώντας μικρές ποσότητες EDTA, είναι δυνατό να επιτευχθούν συγκεντρώσεις στο φυτό 5.000 mg/kg (επί ξηρής μάζας) και αποδόσεις της τάξης των 6.700 kg ξηρής μάζας ανά σοδειά και ανά εκτάριο. Η φαινόμενη πυκνότητα ξηρού εδάφους είναι 1,5 kg/L. Υπολογίστε τον απαιτούμενο χρόνο καθαρισμού.

**Λύση**

$$U = \text{Ρυθμός πρόσληψης} = \\ = (5.000 \text{ mg/kg}) (3 \times 6.700 \text{ kg/ha/yr}) (10^{-6} \text{ kg/mg}) = 100 \text{ kg/ha/yr}$$

$$M_o = \text{αρχική μάζα μολύβδου στο έδαφος} = \\ = (600 \text{ mg/kg}) (1.5 \text{ kg/L}) (1.000 \text{ L/m}^3) (10^{-6} \text{ kg/mg}) (30 \text{ cm}) (10^{-2} \text{ m/cm}) \\ = (10^4 \text{ m}^2/\text{ha}) = 2.700 \text{ kg/ha}$$

Ο όγκος εδάφους σε ένα εκτάριο και βάθος 0,30 cm είναι:

$$V_s = (0,30 \text{ m}) (10.000 \text{ m}^2/\text{ha}) = 3.000 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Η μάζα εδάφους σε ένα εκτάριο και βάθος 0,30 cm είναι:

$$M_s = (1,5 \text{ kg/L}) (10^3 \text{ L/m}^3) (3.000 \text{ m}^3/\text{ha}) = 4,5 \cdot 10^6 \text{ kg/ha}$$

Η υπολειμματική μάζα μολύβδου στο τέλος της επεξεργασίας (απαίτηση καθαρισμού στα 400 mg/kg) είναι τότε:

$$M = (400 \text{ mg/kg}) (10^{-3} \text{ kg/mg}) (4,5 \cdot 10^6 \text{ kg/ha}) = 1.800 \text{ kg/ha}$$

Είναι βάσιμη η υπόθεση ότι η κινητική είναι μηδενικής τάξης (σταθερός ρυθμός πρόσληψης κάθε χρόνο), δεδομένου ότι το EDTA καθιστά το μολύβδο συνεχώς βιοδιαθέσιμο στο φυτό, οπότε:

$$t = (M_o - M) / U = (2.700 - 1.800) / 100 = \underline{\underline{9.0 \text{ \u0395\u039d\u0397}}}$$

Στην πραγματικότητα ο χρόνος καθαρισμού μπορεί να είναι μικρότερος από 9 \u0395\u039d\u0397, εάν ο μολύβδος μεταναστεύει στα κατώτερα στρώματα του εδάφους με την προσθήκη του EDTA, ή αν το \u0391\u0394\u0391 του εδάφους συντελεί στην οριζόντια διασπορά των ρύπων πέραν της ρυπασμένης περιοχής. Τα νομοθετημένα επίπεδα καθαρισμού, όπως τα 400 mg/kg του παραδείγματος, βασίζονται συνήθως σε \u0391\u0394\u0391 που δεν πρέπει να υπερβεί κανείς και η συμμόρφωση με αυτά γίνεται με αναλύσεις που πραγματοποιούνται στο τέλος κάθε \u0395\u039C\u0397.

### 2.3.8.6 Κόστος

Η φυτοεξυγίανση είναι μια ανταγωνιστική μέθοδος, αισθητικά ευχάριστη και με μεγάλη δημόσια αποδοχή. Από οικονομική άποψη το κόστος της φυτοεξυγίανσης είναι πολύ μικρότερο από άλλες εναλλακτικές μεθόδους. Έτσι, για παράδειγμα, έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία ότι για την απομάκρυνση του TNT από υγρά απόβλητα με δύο αναιρόβιους υγρότοπους που ακολουθούντο από δύο αερόβια συστήματα με το φυτό κάνναβη (canary grass), το κόστος επεξεργασίας έφθασε μόνο στο 30% του κόστους επεξεργασίας με ενεργό άνθρακα (Πίν. 2.21). Οι Πίν. 2.23-2.25 παρέχουν τρεις διαφορετικές αξιολογήσεις της φυτοεξυγίανσης σε σύγκριση με άλλες μεθόδους.

Πίνακας 2.23. Σύγκριση κόστους πενταετίας της φυτοεξυγίανσης με υβρίδια λεύκας και της συμβατικής άντλησης και επεξεργασίας με σύστημα αντίστροφης ώσμωσης για νερό μολυσμένο με νιτρικά (τιμές 1996).

<b>1. Φυτοεξυγίανση</b>	
Σχεδιασμός και κατασκευή	\$ 50.000
Εξοπλισμός παρακολούθησης	
Προμήθεια εξοπλισμού	10.000
Εγκατάσταση	10.000
Αντικατάσταση	5.000
Πενταετής παρακολούθηση	
Ταξίδια και διοικητικά	50.000
Συλλογή δειγμάτων	50.000
Ετήσιες αναφορές	25.000
Αναλύσεις δειγμάτων	50.000
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>\$ 250.000</b>
<b>2. Άντληση και επεξεργασία αντίστροφης ώσμωσης</b>	
Εξοπλισμός	\$ 100.000
Τεχνικές συμβουλές	25.000
Εγκατάσταση / Κατασκευή	100.000
Δαπάνες πενταετίας	
Συντήρηση	105.000
Λειτουργία (ηλεκτρικό ρεύμα)	50.000
Διάθεση αποβλήτων	280.000
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>\$ 660.000</b>

Στον Πίν. 2.23 γίνεται σύγκριση ενός πενταετούς έργου φυτοεξυγίανσης και ενός συστήματος άντλησης και επεξεργασίας με αντίστροφη ώσμωση για υπόγειο νερό ρυπασμένο με νιτρικά. Το κόστος της φυτοεξυγίανσης είναι λιγότερο από το μισό σε σχέση με τη δεύτερη μέθοδο. Ο Πίν. 2.24 δείχνει το υπολογισμένο όφελος κόστους της φυτοεκχύλισης για μέταλλα, συγκριτικά με την επί τόπου δέσμευση, την εκσκαφή και υγειονομική ταφή σε εγκεκριμένο χώρο επικίνδυνων αποβλήτων και την εκχύλιση εδάφους. Η φυτοεκχύλιση αποδεικνύεται πολύ οικονομικότερη των άλλων μεθόδων, αλλά υστερεί στους χρόνους επεξεργασίας που μπορεί να φθάσουν μέχρι 5 έτη. Στον Πίν. 2.25, επίσης, φαίνεται ότι η φυτοεξυγίανση πετροχημικών περιοχών πλεονεκτεί λόγω χαμηλού κόστους, αλλά απαιτεί περισσότερο χρόνο για την επίτευξη του σκοπού της σε σχέση με άλλες μεθόδους.

Η φυτοεξυγίανση είναι συγκρίσιμη με την επί τόπου βιοεξυγίανση και τη φυσική απομείωση των ρύπων. Σε αυτές τις μεθόδους απαιτούνται μαθηματική μοντελοποίηση και παρακολούθηση της περιοχής για να δειχθεί η αποτελεσματικότητά τους στις αρμόδιες αρχές.

Πίνακας 2.24. Σύγκριση κόστους φυτοεκχύλισης μετάλλων με άλλες μεθόδους (τιμές 1987).

Τύπος επεξεργασίας	Κόστος (\$/m <sup>3</sup> )	Απαιτούμενος χρόνος (μήνες)	Πρόσθετοι παράγοντες / δαπάνες	Προβλήματα ασφάλειας
Επί τόπου δέσμευση	90-200	6-9	Μεταφορά /εκσκαφή Μακροχρόνια παρακολούθηση	Διήθηση (στράγγιση)
Υγειονομική ταφή απορριμμάτων	100-400	6-9	Μακράς διάρκειας παρακολούθηση	Διήθηση
Εκχύλιση εδάφους με χημικά μέσα	250-500	8-12	Ελάχιστη χημική επεξεργασία 5.000 m <sup>3</sup>	Διάθεση υπολειμμάτων
Φυτοεκχύλιση	15-40	18-60	Χρόνος / δέσμευση γης	Διάθεση υπολειμμάτων

Πίνακας 2.25. Σύγκριση κόστους φυτοεξυγίανσης (ριζοσφαιρική φυτοεξυγίανση) περιοχών μολυσμένων με πετροχημικά με άλλες μεθόδους

Τύπος επεξεργασίας	Εύρος κόστους \$/ton
Φυτοεξυγίανση	10-40
Επί τόπου βιοεξυγίανση	55-170
Αερισμός εδάφους	20-240
Έμμεση θέρμανση	130-330
Έκπλυση εδάφους	90-220
Στερεοποίηση / Σταθεροποίηση	260-370
Εκχύλιση με διαλύτη	400-480
Αποτέφρωση	220-1650

### 2.3.8.7 Θεσμικά ζητήματα

Η φυτοεξυγίανση είναι πολύ νέα μέθοδος και για το λόγο αυτό δεν έχει εγκριθεί από κρατικούς και κοινοτικούς οργανισμούς ακόμα. Η ομάδα σχεδιασμού πρέπει να εργαστεί με τους αρμόδιους φορείς και να δίνει ικανοποιητικές απαντήσεις για τα θέματα που θα προκύψουν σε όλους τους συμμετέχοντες. Η εμπειρία έχει δείξει ότι οι κρατικοί φορείς εκτιμούν τη συμμετοχή τους στο σχεδιασμό καινοτόμων έργων αποκατάστασης του περιβάλλοντος, επειδή ενδιαφέρονται για την εφαρμογή νέων τεχνολογιών. Η καίρια ερώτηση στην οποία πρέπει να δοθεί απάντηση είναι κατά πόσο η φυτοεξυγίανση μπορεί να αποκαταστήσει μια ρυπασμένη περιοχή και να μειώσει τους κινδύνους για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον.

Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα απαιτεί πιλοτικές μελέτες και έργα επίδειξης για μια ποικιλία αποβλήτων. Τα ερωτήματα που αναδεικνύονται κατά την υλοποίηση έργων όπως αυτά που παρατίθενται στον Πίν. 2 είναι τα ακόλουθα:

- Μπορεί να απορρυπανθεί η περιοχή σε αποδεκτό επίπεδο και σε πόσο χρόνο;
- Δημιουργούνται ενδιάμεσα τοξικά παράγωγα ή προϊόντα;
- Η μέθοδος είναι οικονομικά ανταγωνιστική με άλλες μεθόδους;
- Η μέθοδος είναι αποδεκτή από τους πολίτες;

Οι δύο τελευταίες απαντήσεις φαίνεται να είναι θετικές, επειδή η φυτοεξυγίανση, ως περιβαλλοντικά φιλική, εμφανίζει μεγάλη δημόσια απήχηση. Η απάντηση στα πρώτα ερωτήματα θα καθορίσει κατά πόσο η φυτοεξυγίανση

θα καθιερωθεί ως βασική μέθοδος αποκατάστασης του περιβάλλοντος στο μέλλον.

#### **2.3.8.8 Συμπεράσματα εφαρμογής της φυτοεξυγίανσης**

Η φυτοεξυγίανση είναι μια ανερχόμενη τεχνολογία για απορρύπανση περιοχών και είναι ελκυστική λόγω χαμηλού κόστους και προσαρμοστικότητας. Δεν αποτελεί πανάκεια για τα προβλήματα που προκύπτουν από επικίνδυνα απόβλητα, αλλά δείχνει μεγάλες δυνατότητες σε εφαρμογές επεξεργασίας αποβλήτων μεταλλικών ιόντων και οργανικών ενώσεων, σε περιοχές που η μόλυνση είναι επιφανειακή. Μένει ακόμη να κατανοηθεί καλύτερα ο ρόλος των ενζύμων, των μεταβολιτών και η επιλογή του φυτού ανάλογα με τα απόβλητα. Τα φυτά έχουν την ικανότητα να αντέχουν σε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις ρυπαντικών ουσιών. Προσλαμβάνουν τα χημικά με το ριζικό τους σύστημα και τα μετατρέπουν σε λιγότερο τοξικά παράγωγα, ενώ είναι γνωστό ότι διεγείρουν την αποικοδόμηση των οργανικών ενώσεων στη ριζόσφαιρα. Η αποτελεσματικότητα της νέας τεχνολογίας δεν έχει αποδειχθεί σε πλήρη κλίμακα σε αρκετές περιπτώσεις. Στον Πίν. 2.26 δίνεται μία περίληψη των κρίσιμων παραγόντων για μια επιτυχημένη εφαρμογή της φυτοεξυγίανσης.



Πίνακας 2.26. Κρίσιμοι παράγοντες και συνθήκες για την επιτυχία της φυτοεξυγίανσης.

Τεχνική φυτοεξυγίανσης	Παράγοντες επιτυχίας / Στοιχεία σχεδιασμού	Ιδανικές συνθήκες εφαρμογής	Μηχανισμός	Βλάστηση
Φυτομετασχηματισμός	Πρόσληψη από το φυτό. Απαιτείται δέσμευση υπολείμματος, μεταβολισμός ή εξάτμιση.	$\log K_{ow} = 1-3,5$ Μη τοξικές συγκεντρώσεις.	Προσλαμβάνονται μετρίως υδρόφοβες οργανικές ενώσεις.	Δένδρα, ποώδη
Ριζοσφαιρική βιοεξυγίανση	Μικροβιακή αποδόμηση. Απαιτείται πυκνό ριζικό σύστημα.	Ενώσεις επιδεκτικές αερόβιας αποδόμησης.	Οι πυκνές ρίζες προσροφούν τα χημικά και προάγουν τη μικροβιακή αποδόμηση.	Δένδρα, ποώδη, ελλοβόκαρπα
Φυτοσταθεροποίηση	Υδραυλικός έλεγχος, σταθεροποίηση εδάφους, ακινητοποίηση.	Ταχεία ανάπτυξη ριζών. Υδρόφοβα ή ακινητοποιημένα χημικά.	Οι ρίζες συγκρατούν χώμα και νερό και ακινητοποιούν τα μέταλλα.	Δένδρα, ποώδη, ελλοβόκαρπα
Φυτοεκχύλιση	Παραγωγικότητα φυτού, συσσώρευση στο συλλεγόμενο φυτό.	$>6,7 \text{ ton ξηρή μάζα /ha/yr}$ $>1.000 \text{ mg μετάλλων /kg εδάφους}$	Η ταχεία ανάπτυξη παρέχει ικανοποιητικό ρυθμό πρόσληψης και μεγάλη ικανότητα συσσώρευσης.	Χερσαία φυτά ή υδρόβια φυτά για ιζήματα
Ριζοδιήθηση	Απορρόφηση / διήθηση από τις ρίζες. Επαφή νερού με ρίζες. Υδραυλικός χρόνος παραμονής.	Πυκνότητα φυτών $200-1.000 \text{ gr/m}^2$ . Υδραυλικός χρόνος παραμονής: μερικές ημέρες.	Οι ρίζες προσροφούν και ακινητοποιούν τους ρύπους.	Υδρόβια αναδυόμενα ή καταδυόμενα φυτά

### 2.3.9 Φυσική απομείωση

Ως **φυσική απομείωση (natural attenuation)** νοείται η μείωση των συγκεντρώσεων των ρύπων σε μια περιοχή ως αποτέλεσμα φυσικών διεργασιών. Οι διεργασίες αυτές μπορεί να είναι, είτε βιοτικές (βιολογικές), είτε αβιοτικές (μη βιολογικές). Η παθητική βιοεξυγίανση (βιοτική) αναφέρεται στην εγγενή ικανότητα των μικροοργανισμών του περιβάλλοντος να αποσυνθέτουν ρύπους, καταναλώνοντάς τους ως υποστρώματα (τροφή) παρουσία οξυγόνου και άλλων θρεπτικών. Η φυσική απομείωση θα είναι επιτυχής, εφόσον υπάρχουν κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες και οι ρύποι είναι διαθέσιμοι στους μικροοργανισμούς και σε συγκεντρώσεις που δεν είναι τοξικές στους μικροοργανισμούς.

Η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει τη διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης της στη συγκεκριμένη περίπτωση και την παρακολούθηση της εξέλιξής της. Η εφικτότητα εξετάζεται σε πρώτη φάση σε σχέση με την καταλληλότητα των περιβαλλοντικών συνθηκών. Στη συνέχεια και εφόσον απαιτείται, η περιοχή μπορεί να ενισχυθεί με θρεπτικά στοιχεία. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, το έδαφος πρέπει να ελέγχεται συνεχώς με δειγματοληψίες για να εξακριβώνεται ότι οι ρύποι πράγματι βιοαποδομούνται.

Η φυσική απομείωση εφαρμόζεται κυρίως σε οργανικούς ρύπους όπως η ομάδα BTEX (βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλοβενζόλιο και ξυλόλια), πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες και ορισμένοι χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες. Η μέθοδος δεν έχει εφαρμογή σε ρύπανση με ελεύθερο προϊόν.

### 2.3.10 Συστήματα παράδοσης / ανάκτησης

Τα **συστήματα παράδοσης/ανάκτησης (delivery/recovery systems)** χρησιμοποιούνται, είτε για την εισαγωγή υλικών στο υπέδαφος, είτε για την απόληψη ρύπων από τη ρυπασμένη ζώνη.

#### **Ανάμιξη εδάφους**

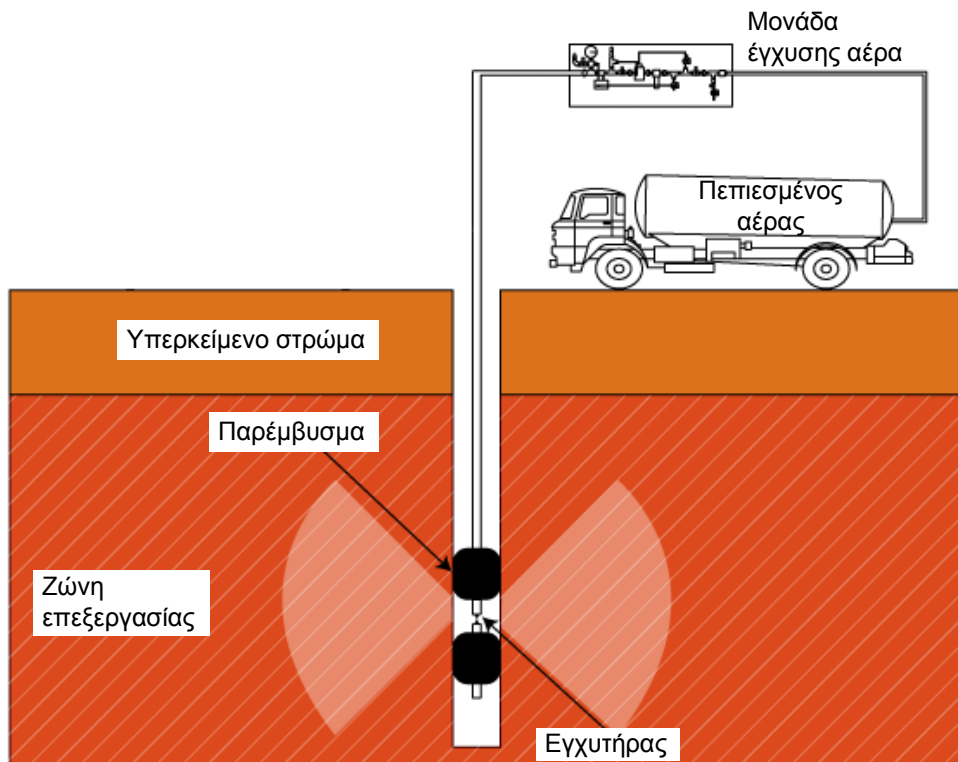
Η επί τόπου ανάμιξη εδαφών χρησιμοποιείται για την ενσωμάτωση ουσιών οι οποίες απαιτούνται για την ακινητοποίηση ρύπων ή για την ανάκτηση ρύπων. Η τεχνική της ανάμιξης είναι χρήσιμη στις τεχνικές στερεοποίησης/σταθεροποίησης που θα αναλυθούν παρακάτω και βασίζονται στην ανάμιξη με κατάλληλο εξοπλισμό ρευστοκονιάματος ή ασβέστου με το ρυπασμένο υλικό για ακινητοποίηση. Μερικές φορές παράγονται πτητικές ουσίες κατά την ανάμιξη, οπότε απαιτείται η συλλογή των ατμοσφαιρικών για επεξεργασία τους.

#### **Πνευματική / Υδραυλική θρυμματοποίηση**

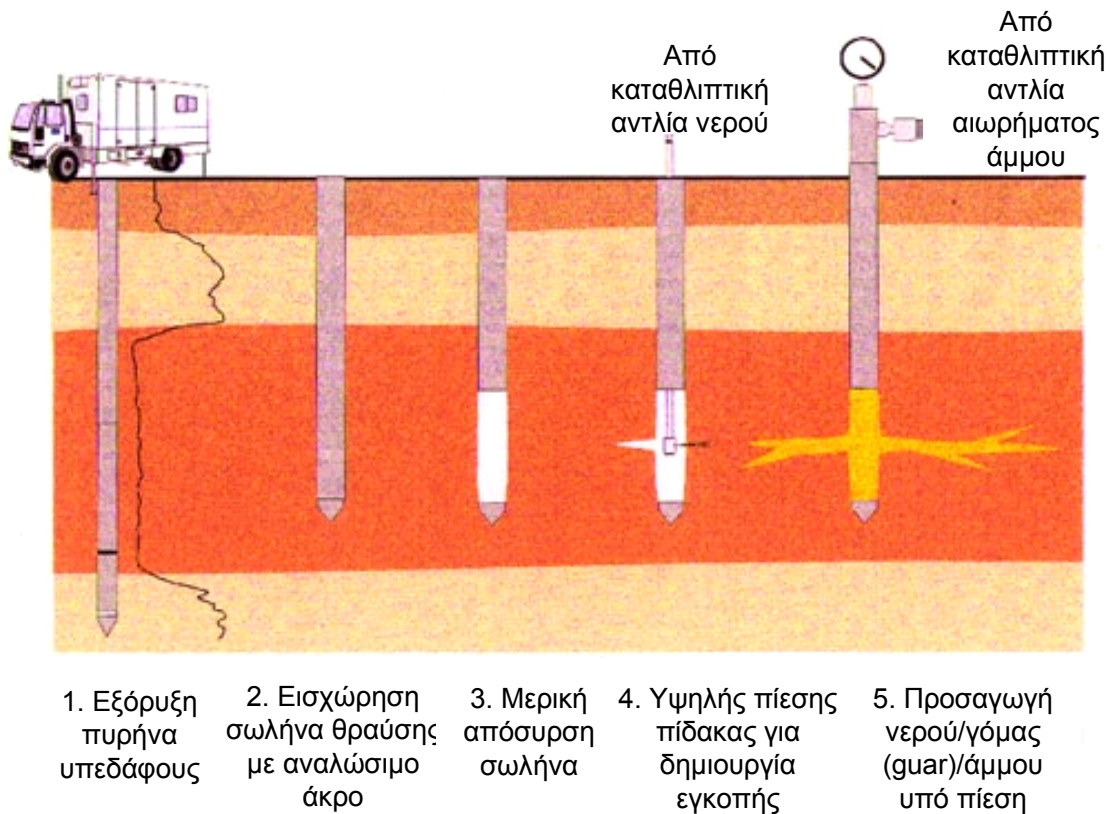
Η τεχνική της **πνευματικής ή υδραυλικής θρυμματοποίησης (pneumatic/hydraulic fracturing)** χρησιμοποιείται σε μεγάλη έκταση στη

βιομηχανία πετρελαίου για τη θραύση των χαμηλής διαπερατότητας κοιτασμάτων πετρελαίου. Οι εφαρμογές της στις τεχνολογίες βιοεξυγίανσης σχετίζονται με την αύξηση της διαπερατότητας του εδάφους σε τεχνολογίες όπως η απόληψη ατμών εδάφους και η άντληση και επεξεργασία.

Η θρυμματοποίηση επιτυγχάνεται με την έγχυση πεπιεσμένου αέρα (πνευματική θρυμματοποίηση) (Σχ. 2.21) ή νερού (υδραυλική θρυμματοποίηση) (Σχ. 2.22) στο χαμηλής διαπερατότητας έδαφος. Η διατήρηση του αυξημένου πορώδους μετά την εφαρμογή επιτυγχάνεται με την πλήρωση των ρωγμών με πολτό άμμου για να διευκολυνθεί στη συνέχεια η έγχυση βελτιωτικών ρευστών ή η απόληψη ρύπων με τις τεχνολογίες απόληψης ατμών εδάφους ή άντλησης και επεξεργασίας.



Σχήμα 2.21. Πνευματική θρυμματοποίηση εδάφους με έγχυση αέρα στο υπέδαφος με πίεση μεγαλύτερη από την πίεση στο συγκεκριμένο βάθος (υπερκείμενη πίεση και τάση συνοχής) και με παροχή που υπερβαίνει τη φυσική διαπερατότητα.



Σχήμα 2.22. Υδραυλική θρυμματοποίηση εδάφους με υψηλής πίεσης πίδακα νερού στο υπέδαφος.

### 2.3.11 Οικονομική σύγκριση μεθόδων ακόρεστης ζώνης

Οι πιο οικονομικές τεχνολογίες στην επεξεργασία εδάφους στην ακόρεστη ζώνη είναι η απόληψη ατμών εδάφους (με ή χωρίς επεξεργασία απαερίων), η βιοεξυγίανση και ο βιοαερισμός. Οι υπόλοιπες τεχνολογίες, με την εξαίρεση της υαλοποίησης, έχουν περίπου το ίδιο κόστος, αλλά δεν χρησιμοποιούνται πολύ συχνά. Σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες, η επί τόπου υαλοποίηση είναι εξαιρετικά δαπανηρή.

Οι δαπάνες εξυγίανσης αυξάνουν σημαντικά όταν η διαπερατότητα τους εδάφους είναι περιορισμένη. Τότε, το κόστος των τεχνολογιών οι οποίες βασίζονται στην έγχυση ρευστών (αέρα, ατμού ή νερού, συνήθως) αυξάνει σημαντικά και ο χρόνος εξυγίανσης επιμηκύνεται πολύ. Ο χρόνος εξυγίανσης των βιολογικών μεθόδων επίσης επιμηκύνεται σημαντικά, όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι χαμηλή, αλλά συγχρόνως αυξάνει και το κόστος λόγω της ανάγκης θέρμανσης του μέσου για καλύτερα αποτελέσματα.

## 2.4 Επεξεργασία εδάφους και νερού κορεσμένης ζώνης

Στην κορεσμένη ζώνη είναι δύσκολο να γίνει διαφοροποίηση στην επεξεργασία ανάμεσα στο έδαφος και το υπόγειο νερό, επειδή τα δύο μέσα βρίσκονται σε στενή επαφή και οι μεταξύ τους φυσικοχημικές αλληλεπιδράσεις είναι συνεχείς και σε δυναμική εξέλιξη. Ο μόνος τρόπος για ξεχωριστή επεξεργασία της κορεσμένης ζώνης είναι η εκσκαφή και επεξεργασία εκτός τόπου του εδάφους και στη συνέχεια η άντληση του νερού που θα συγκεντρωθεί στο σημείο εκσκαφής για επεξεργασία. Μια άλλη περίπτωση είναι η συλλογή και επεξεργασία ελεύθερου προϊόντος, όπως η βενζίνη, το ντίζελ και τα λιπαντικά, οι χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες, ή ακόμη και τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια. Το χαρακτηριστικό αυτών των υγρών είναι ότι έχουν μικρή διαλυτότητα στο νερό και ανάλογα με το ειδικό βάρος τους θα επιπλέουν στον υδροφόρο ορίζοντα ή θα έχουν λιμνάσει στο υπόβαθρο ή σε αδιαπέραστο στρώμα του υπεδάφους, καθιστώντας έτσι τη συλλογή τους ευκολότερη.

### 2.4.1 Άντληση ελεύθερου προϊόντος

Για την άντληση **ελεύθερου προϊόντος (free product pumping)** που επιπλέει στον υδροφόρο ορίζοντα διατίθενται στην αγορά ειδικές πνευματικές αντλίες εξαφρισμού, οι οποίες όμως μαζί με το προϊόν αντλούν και μικρές ποσότητες υπόγειου νερού, χωρίς να ταπεινώνουν τον υδροφόρο ορίζοντα. Απαιτείται έτσι ένας διαχωριστής υγρών στην επιφάνεια του εδάφους για διαχωρισμό νερού και προϊόντος. Το προϊόν οδηγείται στη συνέχεια για περαιτέρω επεξεργασία και καθαρισμό και εφόσον η ποιότητά του είναι ικανοποιητική μπορεί να διατεθεί πάλι στην αγορά.

Μια άλλη δυνατότητα είναι η χρησιμοποίηση δύο αντλιών σε διαφορετικά βάθη, η μια για την άντληση νερού και άλλη για την άντληση προϊόντος. Η άντληση νερού δημιουργεί αντίστροφο κώνο στον υδροφόρο ορίζοντα, στον οποίο συσσωρεύεται το ελεύθερο προϊόν, καθιστώντας έτσι τη συλλογή του με τη δεύτερη αντλία ευκολότερη. Για την αποφυγή έντονης ανάμιξης των δύο υγρών μέσα στον κώνο απαιτείται προσεκτική άντληση του νερού.

### 2.4.2 Βιοαναρρόφηση

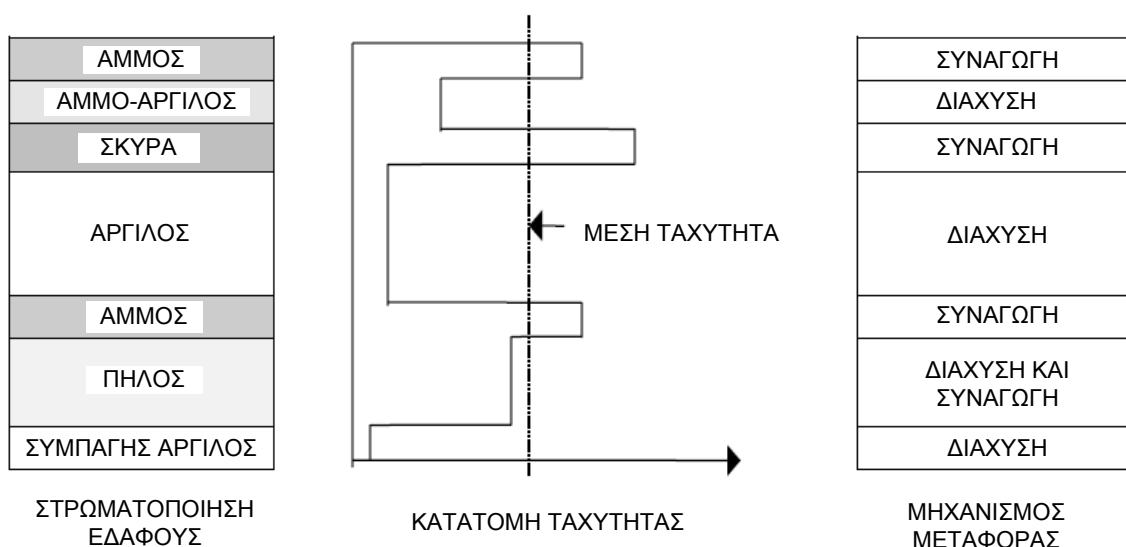
Η καινοτόμος τεχνολογία της **βιοαναρρόφησης (Bioslurping)** έχει εξετασθεί ήδη στις τεχνολογίες επεξεργασίας στην ακόρεστη ζώνη. Βασίζεται στην απομάκρυνση επιπλέοντος ελεύθερου προϊόντος πάνω στον υδροφόρο ορίζοντα και τον σύγχρονο αερισμό του εδάφους με κατάλληλο φρεάτια για υποβοήθηση της επί τόπου βιοαποδόμησης. Στην επιφάνεια του εδάφους τα δύο υγρά και τα απαιρία διαχωρίζονται και επεξεργάζονται περαιτέρω πριν την τελική τους διάθεση.

### 2.4.3 Συστήματα άντλησης και επεξεργασίας υπόγειου νερού

Η **άντληση και επεξεργασία (pump and treat)** αποτελεί την πιο δημοφιλή μέθοδο αντιμετώπισης προβλημάτων του υπόγειου νερού. Αν και στο παρελθόν είχε θεωρηθεί ως μια τεχνολογία καθαρισμού ρυπασμένων περιοχών, η μέθοδος χρησιμοποιείται σήμερα περισσότερο για τον περιορισμό ενός ρυπασμένου υλικού παρά για την εξυγίανση μιας περιοχής.

Στις πρώτες εφαρμογές της τεχνολογίας άντλησης και επεξεργασίας πιστευόταν ότι ήταν δυνατό να επιτευχθούν τα όρια καθαρισμού με απομάκρυνση ικανοποιητικού όγκου νερού από τους πόρους του εδάφους στη ζώνη ρύπανσης. Στους υπολογισμούς μάλιστα οι μελετητές θεωρούσαν το έδαφος ως ομοιογενές και ισότροπο. Διαπιστώθηκε όμως ότι αυτές οι συνθήκες πολύ σπάνια συναντώνται σε εδάφη και κατά συνέπεια οι υπολογισμοί ήταν εσφαλμένοι με αποτέλεσμα οι χρόνοι καθαρισμού να είναι πολύ μεγαλύτεροι από τους αναμενόμενους.

Από τους παράγοντες που επηρεάζουν τους χρόνους καθαρισμού, η ετερογένεια του υπεδάφους φαίνεται να είναι ο καθοριστικός παράγοντας, δεδομένου ότι το νερό ακολουθεί τον ευκολότερο δρόμο για να κινηθεί ανάμεσα στις ζώνες διαφορετικής διαπερατότητας του εδάφους. Όπως φαίνεται στην κατατομή (προφίλ) ταχυτήτων του Σχ. 2.23, το υπόγειο νερό κινείται γρήγορα σε στρώματα άμμου και σκύρων (χαλικιών), αργά σε μικτά εδάφη (αμμοπηλώδη και αμμοαργιλώδη) και ακινητοποιείται σε συμπαγή άργιλο. Λόγω των αυξημένων αντιστάσεων στη ροή του νερού σε ορισμένα στρώματα του εδάφους, ελάχιστο νερό αντλείται από τις ζώνες μικρής διαπερατότητας και συνεπώς πρέπει να αντληθούν πολλαπλάσιοι όγκοι νερού από τους αρχικά υπολογιζόμενους για την επίτευξη των στόχων απορρύπανσης.



Σχήμα 2.23. Σχηματική απεικόνιση των διαφορών διαπερατότητας και μηχανισμών μεταφοράς μάζας σε διάφορα είδη εδάφους.

Η κατανομή των ρύπων επίσης στα διάφορα είδη εδάφους διαφοροποιείται δυσμενώς, δεδομένου ότι τα μικρής διαπερατότητας υλικά έχουν συνήθως μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ρύπων. Τα υλικά αυτά έχουν μικρότερο μέγεθος κόκκων, και συνεπώς μεγαλύτερη ελεύθερη επιφάνεια, και μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε οργανική ύλη. Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τα μικρής διαπερατότητας υλικά καλύτερα ροφητικά μέσα, με αυξημένες συγκεντρώσεις ρύπων σε σχέση με τα μεγάλης διαπερατότητας υλικά.

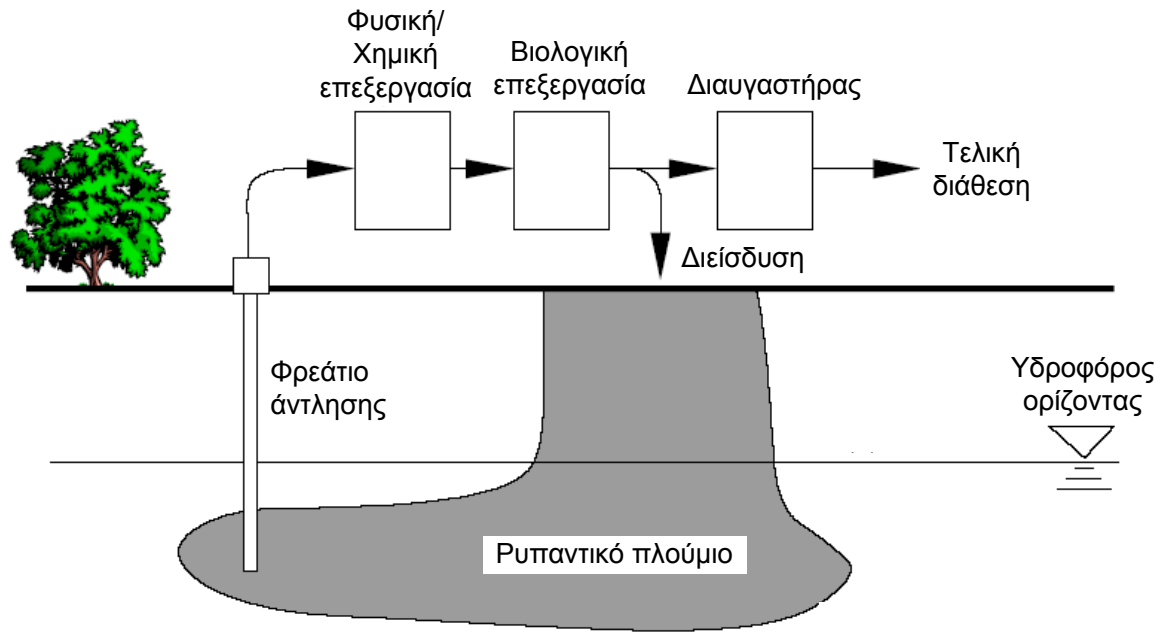
Με αυτούς τους περιορισμούς η τεχνολογία άντλησης και επεξεργασίας βρίσκει σήμερα εφαρμογή στον περιορισμό της ρύπανσης σε ορισμένη περιοχή και την επεξεργασία του αντλούμενου υπόγειου νερού.

#### 2.4.4 Επί τόπου βιοεξυγίανση

Η επί τόπου βιοεξυγίανση έχει χρησιμοποιηθεί στην κορεσμένη ζώνη κυρίως για τον καθαρισμό περιοχών ρυπασμένων με υδρογονάνθρακες. Ο περιοριστικός παράγοντας στην τεχνολογία αυτή είναι το οξυγόνο και για το λόγο αυτό έχουν εξευρεθεί διάφοροι τρόποι παροχής οξυγόνου, θρεπτικών και άλλων συμπληρωματικών υλικών στο υπέδαφος.

##### 2.4.4.1 Άντληση και επανέγχυση

Η τεχνική της **άντλησης και επανέγχυσης (pump and reinject)** έχει ως στόχο την ενίσχυση της βιοεξυγίανσης επί τόπου με την άντληση υπόγειου νερού, την προσθήκη βελτιωτικών σε αυτό και την επανέγχυσή του στο υπέδαφος μέσω κατάλληλου φρεατίου (Σχ. 2.24). Το αποτέλεσμα είναι η βιοεξυγίανση του ρυπασμένου νερού και η έκπλυση του εδάφους με την κυκλοφορία του νερού. Τα βελτιωτικά που προστίθενται στο νερό αποσκοπούν στη διέγερση των μικροοργανισμών προκειμένου να προαχθεί η βιοαποδόμηση των ρύπων, τόσο μέσα στο βιοαντιδραστήρα, όσο και στο έδαφος. Είναι δυνατό να προστεθεί στο σύστημα και μια ή περισσότερες μονάδες φυσικής ή/και χημικής επεξεργασίας για απομάκρυνση μεταλλικών ιόντων. Μέρος του επεξεργασμένου νερού μπορεί τότε να επανέλθει στο υπέδαφος για εμπλουτισμό του με θρεπτικά και μικροοργανισμούς και μέρος να διατεθεί για άλλη χρήση μετά από διαύγανσή του σε δεξαμενή καθίζησης.

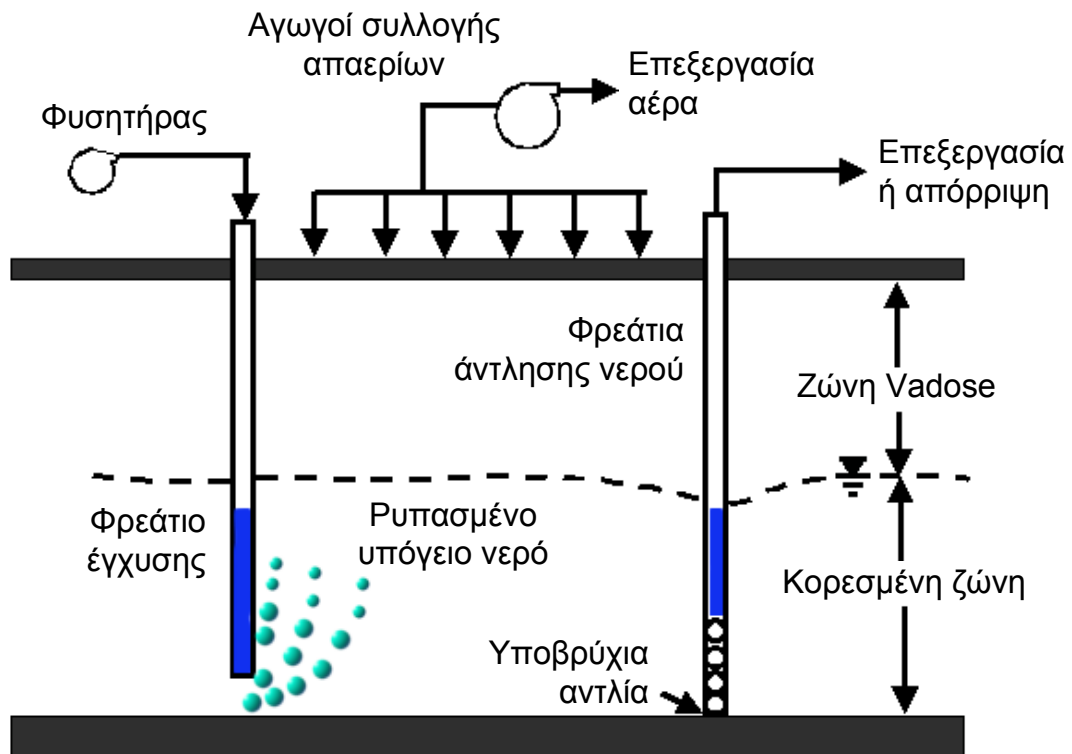


Σχήμα 2.24. Απλουστευμένη απεικόνιση ενός συστήματος άντλησης και επανέγχυσης.

#### 2.4.4.2 Εμφύσηση αέρα

Η **εμφύσηση αέρα (air sparging)** στην κορεσμένη ζώνη του εδάφους προσφέρει μεγάλες δυνατότητες εξυγίανσης σε συνδυασμό με βιοεξυγίανση ή εξάτμιση των ρύπων. Ο αέρας εισάγεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα με σκοπό να απομακρύνει με εξάτμιση ή/και να προσφέρει οξυγόνο για τη βιοαποδόμηση των ρύπων. Οι ατμοί των ρύπων ή οι μεταβολίτες τους από την αποδόμηση κινούνται προς τα πάνω και στην πορεία τους μπορούν να συλληφθούν από φρεάτια άντλησης ατμών και να επεξεργασθούν στην επιφάνεια του εδάφους (Σχ. 2.25).





Σχήμα 2.25. Τυπικό σύστημα εμφύσησης αέρα στην κορεσμένη ζώνη.

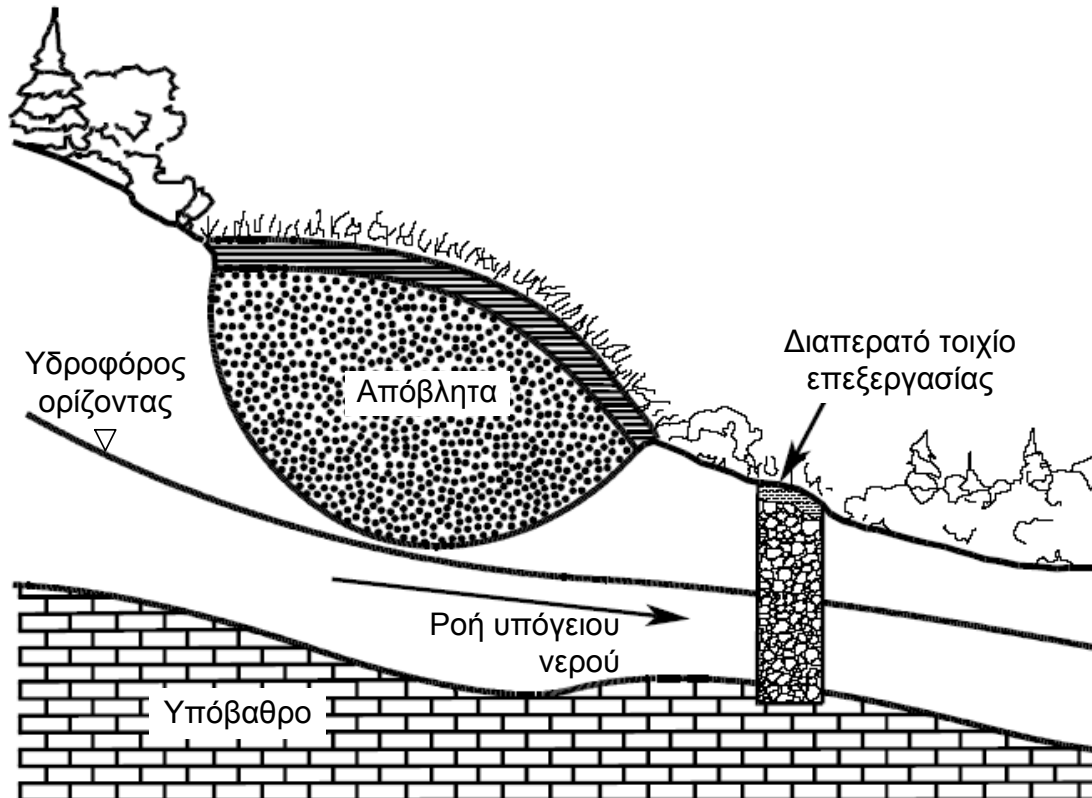
#### 2.4.5 Τοιχία επεξεργασίας

Σε αντίθεση με τα ενεργητικά συστήματα επεξεργασίας για τα οποία απαιτούνται αντλίες και εξοπλισμός στην επιφάνεια του εδάφους, τα **τοιχία επεξεργασίας (treatment walls)** αποτελούν παθητικά συστήματα, επειδή δεν χρειάζονται παρά ελάχιστη παρακολούθηση και συντήρηση. Όπως φαίνεται στο Σχ. 2.26, το μόνο που χρειάζεται είναι η κατασκευή ενός διαπερατού τοιχίου στην πορεία του υπόγειου νερού. Για την κατασκευή του τοιχίου απαιτείται η εκσκαφή τάφρου, η οποία γεμίζεται με ένα διαπερατό μέσο, όπως άμμος ή σκύρα, για βελτίωση της ροής του νερού, μαζί με κατάλληλα πρόσθετα για καταβύθιση, ρόφηση ή αποδόμηση των ρύπων. Ρινίσματα σιδήρου χρησιμοποιούνται, για παράδειγμα, για αφυδραλογόνωση και στη συνέχεια τελική αποδόμηση χλωριωμένων ουσιών διαλυμένων στο υπόγειο νερό.

Πλεονέκτημα των τοιχίων επεξεργασίας αποτελεί οι μικρές απαιτήσεις για συντήρηση. Δεν απαιτείται επίσης παρακολούθηση και τα τοιχία φαίνεται ότι μπορούν να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς αντικατάσταση. Τα έξοδα όμως εγκατάστασης είναι πολύ υψηλά, ιδιαίτερα όταν πρέπει να κατασκευασθούν τα τοιχία σε μεγάλο βάθος.

Άλλο μειονέκτημα είναι ότι η τεχνολογία αυτή είναι σχετικά νέα και δεν υπάρχει μακρόχρονη εμπειρία για τη σταθερότητα του συστήματος. Φαίνεται

όμως ότι προσφέρουν μια ικανοποιητική λύση σε περιπτώσεις που οι χρόνοι επεξεργασίας με άλλες μεθόδους είναι πολύ μεγάλοι.



Σχήμα 2.26. Τυπικό σύστημα επεξεργασίας υπόγειου νερού με τοίχιο επεξεργασίας.

#### 2.4.6 Φυσική απομείωση

Όπως αναφέρεται και στις τεχνολογίες εξυγίανσης στην ακόρεστη ζώνη, η φυσική απομείωση βασίζεται στη μείωση των συγκεντρώσεων των ρύπων σε μια περιοχή με φυσικές διεργασίες. Οι διεργασίες αυτές μπορεί να είναι βιοτικές (βιολογικές) ή αβιοτικές (μη βιολογικές). Η φυσική απομείωση με βιοτικές διεργασίες συνιστά παθητική βιοεξυγίανση που οφείλεται στη φυσική ικανότητα των μικροοργανισμών να αποσυνθέτουν οργανικές ουσίες. Όσα αναφέρονται στην εφαρμογή της μεθόδου στην ακόρεστη ζώνη ισχύουν και για την κορεσμένη ζώνη.

#### 2.4.7 Σύγκριση τεχνολογιών κορεσμένης ζώνης

Η τεχνολογία άντλησης και επεξεργασίας είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία εξυγίανσης στην κορεσμένη ζώνη του εδάφους για επεξεργασία του υπόγειου νερού, χρησιμοποιείται όμως κυρίως για τον

υδραυλικό περιορισμό του ρυπασμένου νερού παρά για εξυγίανση μιας ρυπασμένης περιοχής.

Για άντληση του υπόγειου νερού στην επιφάνεια χρησιμοποιούνται κατακόρυφα και οριζόντια φρεάτια. Σε περιπτώσεις εδαφών με μικρή διαπερατότητα χρησιμοποιείται η πνευματική ή η υδραυλική θρυμματοποίηση για διευκόλυνση της άντλησης του υπόγειου νερού.

## 2.5 Συμπεράσματα για τις επί τόπου τεχνολογίες

Οι επί τόπου τεχνολογίες εμφανίζουν ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι των τεχνολογιών εκτός τόπου, όπως το χαμηλότερο κόστος, τις μικρές απαιτήσεις χώρου για τον επιφανειακό εξοπλισμό και τη μη παρεμπόδιση των δραστηριοτήτων στην περιοχή. Παρά αυτά τα πλεονεκτήματα όμως οι αβεβαιότητες ως προς την αποτελεσματικότητα των επί τόπου τεχνολογιών ευνοούν μερικές φορές την επιλογή των εκτός τόπου τεχνολογιών.

Ορισμένες επί τόπου τεχνολογίες, όπως η απόληψη ατμών εδάφους, η βιοεξυγίανση, ο βιοαερισμός, η έκπλυση εδάφους, η άντληση/επανέγχυση και η εμφύσηση αέρα, εξαρτώνται από τη μεταφορά ρευστών δια μέσου του εδάφους. Εάν το υπέδαφος δεν είναι αρκετά διαπερατό, μπορεί να αυξηθεί η διαπερατότητα με πνευματική ή υδραυλική θρυμματοποίηση.

Για άλλες επί τόπου τεχνολογίες η διαπερατότητα δεν είναι κρίσιμος παράγοντας, αλλά η ανάμιξη του εδάφους, όπως για παράδειγμα η αγροκαλλιέργεια. Οι θερμικές επεξεργασίες, όπως η υαλοποίηση και η ηλεκτροκινητική, χρησιμοποιούν θερμότητα ή ηλεκτρικό ρεύμα για την απομάκρυνση των ρύπων ή την ακινητοποίησή τους στο έδαφος.

Οι παθητικές τεχνολογίες, όπως η φυσική απόμειωση και τα τοιχία επεξεργασίας, απαιτούν πολύ μεγάλους χρόνους επεξεργασίας και παρακολούθησης για την επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων.

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες στην ακόρεστη ζώνη είναι η απόληψη ατμών εδάφους και ο βιοαερισμός, ενώ στην κορεσμένη ζώνη η άντληση και επεξεργασία εξακολουθεί να είναι η πιο δημοφιλής επιλογή.



## **3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ**

### **3.1 Γενικά**

Η εκτός τόπου επεξεργασία του υπόγειου νερού, γνωστή ως άντληση και επεξεργασία, περιλαμβάνει την άντληση στην επιφάνεια, την επεξεργασία του ρυπασμένου νερού και την τελική διάθεση ή επανέγχυση του επεξεργασμένου νερού στο υπέδαφος. Η άντληση του υπόγειου νερού στην επιφάνεια αποτελεί μια στρατηγική περιορισμού της ρύπανσης με υδραυλική παρεμπόδιση μεταφοράς των ρύπων εκτός της αρχικής περιοχής ρύπανσης. Παρόλο που η άντληση και επεξεργασία μπορεί να επιτύχει μια μερική εξυγίανση του εδάφους και του υπόγειου νερού, αυτή η τεχνολογία δεν είναι ικανή από μόνη της να επιτύχει πλήρη καθαρισμό της κορεσμένης ζώνης. Σε μερικές περιπτώσεις όμως, αποτελεί τη μόνη λύση, αν και η επεξεργασία του υπόγειου νερού μπορεί να διαρκέσει πολλά έτη.

#### **3.1.1 Σύγκριση εντός και εκτός τόπου εξυγίανσης νερού**

Η βασική διαφορά των εντός τόπου και εκτός τόπου τεχνολογιών εξυγίανσης του υπόγειου νερού έγκειται στο γεγονός ότι στις εκτός τόπου τεχνολογίες το νερό πρέπει να αντληθεί στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ στις εντός τόπου το υπόγειο νερό παραμένει συνήθως και επεξεργάζεται στο υπέδαφος. Είναι δυνατό όμως σε εντός τόπου επεξεργασία να αντλείται το υπόγειο νερό στην επιφάνεια μόνο για προσθήκη θρεπτικών και να επανεισάγεται στο υπέδαφος για ολοκλήρωση της επεξεργασίας, αν και τα θρεπτικά μπορούν και να προστίθενται απ' ευθείας στο υπέδαφος.

Οι επί τόπου τεχνολογίες επίσης επεξεργάζονται και ροφημένους σε σωματίδια του εδάφους ρύπους, ενώ οι εκτός τόπου επεξεργάζονται μόνο διαλυμένους ρύπους και ελεύθερο προϊόν.

Γενικά, οι εντός τόπου τεχνολογίες απαιτούν μικρότερη δεσμευμένη έκταση στην επιφάνεια του εδάφους για την εγκατάσταση του αναγκαίου εξοπλισμού από τις εκτός τόπου και αυτή η διαφορά μπορεί να είναι καθοριστική στην επιλογή της μεθόδου.

Οι εκτός τόπου τεχνολογίες περικλείουν σοβαρότερους περιβαλλοντικούς κινδύνους με την έκθεση ανθρώπων και άλλων οργανισμών σε ρύπους που για την επεξεργασία τους απαιτείται η εξαγωγή τους στην επιφάνεια του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων των απαερίων από την επεξεργασία.

Όσον αφορά τους χρόνους επεξεργασίας, οι εκτός τόπου τεχνολογίες πλεονεκτούν γενικά, προσφέροντας το πλεονέκτημα μιας επαρκούς εργαστηριακής μελέτης και μοντελοποίησης που επιτρέπει τελικά και την αριστοποίηση μιας διεργασίας.

Από πλευράς κόστους, οι εκτός τόπου τεχνολογίες είναι συνήθως ακριβότερες λόγω των μεγαλύτερων απαιτήσεων σε εξοπλισμό επεξεργασίας και συντήρησης, έχουν όμως το σημαντικό πλεονέκτημα της ευχερέστερης

παρακολούθησης της προόδου της εξυγίανσης με την εξέταση αντιπροσωπευτικών και άμεσα διαθέσιμων δειγμάτων.

Στον Πίν. 3.1 φαίνονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο αυτών προσεγγίσεων.

Πίνακας 3.1. Σύγκριση εντός τόπου και εκτός τόπου τεχνολογιών.

	Εντός τόπου	Εκτός τόπου
Άντληση υπόγειου νερού	Μπορεί να απαιτηθεί	Απαιτείται
Κατάσταση ρύπων	Ροφημένοι/Υπολειμματικοί	Διαλυμένοι
Απαιτούμενη επιφανειακή έκταση	Ελάχιστη	Μεγάλη
Έκθεση σε ρύπους	Ελάχιστη	Σημαντική
Χρόνοι επεξεργασίας	Μεγάλοι	Μικροί
Κόστος	Χαμηλό προς μέτριο	Μέτριο προς μεγάλο
Παρακολούθηση προόδου	Δύσκολη	Εύκολη

### 3.1.2 Ευνοϊκές συνθήκες για εκτός τόπου επεξεργασία νερού

Οι δυνατότητες άντλησης ρυπασμένου υπόγειου νερού και επεξεργασίας του στην επιφάνεια του εδάφους εξαρτώνται από την κατάσταση του υπεδάφους και το είδος της ρύπανσης. Οι ιδιότητες του υπόγειου υδροφορέα που ευνοούν την άντληση είναι:

- Σχετικά απλή στρωματοποίηση του υπεδάφους
- Σχετικά ομοιογενές υλικό του υδροφορέα
- Σημαντική υδραυλική αγωγιμότητα

Η αυξημένη διαλυτότητα των ρύπων στο υπόγειο νερό διευκολύνει τη μεταφορά τους στο έδαφος για επεξεργασία, ενώ η ρόφησή τους σε σωματίδια του υδροφορέα τη δυσχεραίνει.

### 3.1.3 Απομακρυνόμενα συστατικά από υπόγεια νερά

Εκτός από τους ρύπους το αντλούμενο νερό στην επιφάνεια του εδάφους μπορεί να περιέχει και άλλα συστατικά που μπορεί να παρεμποδίσουν και πρέπει να απομακρυνθούν για μια επιτυχή επεξεργασία του νερού. Τέτοια συστατικά είναι:

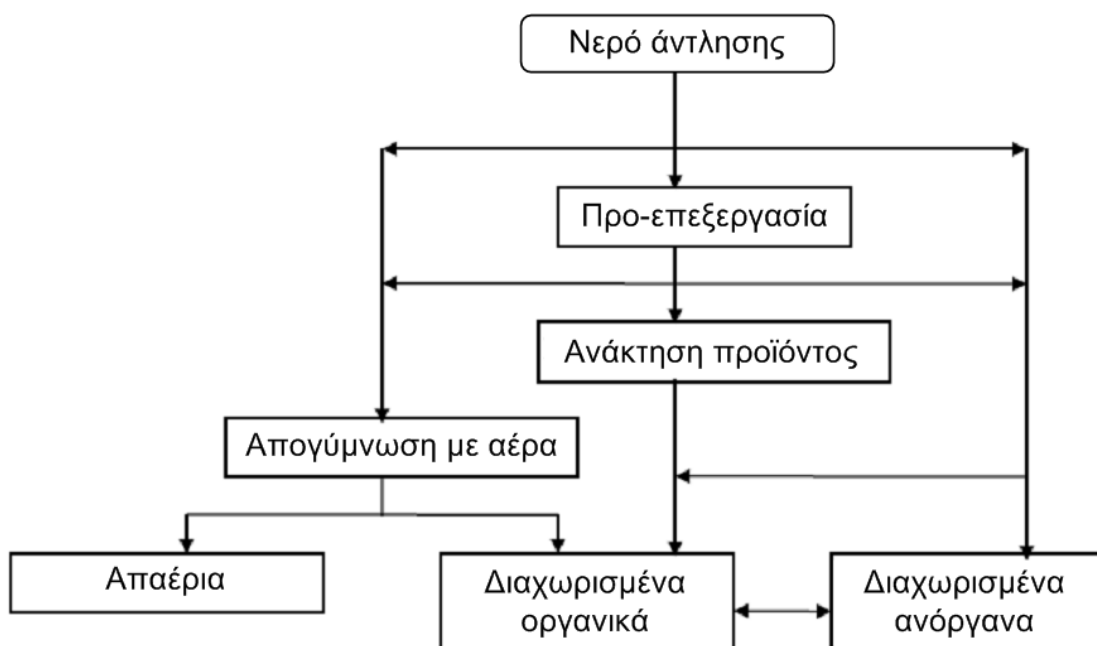
- Ορισμένα ανόργανα ιόντα, όπως ο σίδηρος και το μαγγάνιο

- Αιωρούμενα στερεά
- Ελεύθερο προϊόν, όπως η βενζίνη
- Διαλυμένα οργανικά

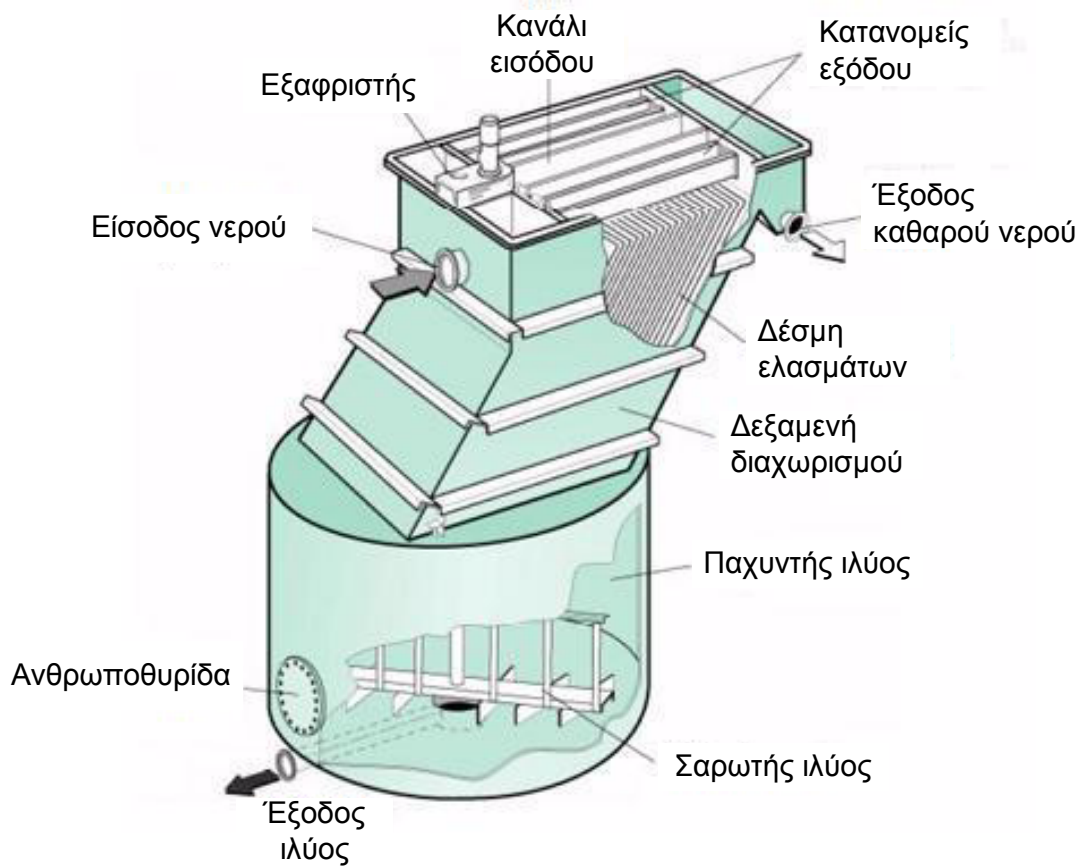
### 3.2 Τεχνολογίες εκτός τόπου επεξεργασίας νερού

Τα διαδοχικά βήματα που είναι δυνατό να απαιτηθούν για την επεξεργασία υπόγειου νερού στην επιφάνεια του εδάφους φαίνονται στο Σχ. 3.1.

Το υπόγειο νερό μπορεί να προ-επεξεργασθεί, ή να σταλεί απ' ευθείας σε ένα απογυμνωτή με αέρα ή άλλα συστήματα επεξεργασίας νερού. Στην προ-επεξεργασία απομακρύνονται ορισμένα οχληρά ανόργανα ή αιωρούμενα στερεά και από εκεί μπορεί να οδηγηθεί στον απογυμνωτή με αέρα ή άλλη επεξεργασία. Για την απομάκρυνση αιωρουμένων στερεών από το ρυπασμένο νερό χρησιμοποιούνται με επιτυχία οι διαχωριστές με ελάσματα (Σχ. 3.2). Από τον απογυμνωτή παράγονται δύο ρεύματα, αυτά των απαερίων και του επεξεργασμένου νερού. Τα απαέρια μπορεί να απορριφθούν κατευθείαν στην ατμόσφαιρα ή να επεξεργασθούν περαιτέρω, εφόσον περιέχουν ρύπους πάνω από τα επιτρεπτά όρια.



Σχήμα 3.1. Διαδοχικά βήματα επεξεργασίας υπόγειου νερού στην επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 3.2. Τυπικός διαχωριστής αιωρουμένων στερεών από το νερό με ελάσματα.

Στον Πίν. 3.2 φαίνονται οι εμπορικές και οι αναπτυσσόμενες τεχνολογίες επεξεργασίας οργανικών και ανόργανων ρύπων σε νερό άντλησης. Εμπορικές ή συμβατικές τεχνολογίες είναι αυτές που είναι διαθέσιμες εμπορικά και χρησιμοποιούνται συνήθως στην εξυγίανση ρυπασμένων περιοχών. Αναπτυσσόμενες ή καινοτόμες τεχνολογίες είναι αυτές που έχουν ελεγχθεί και χρησιμοποιηθεί σε εξυγιάνσεις ρυπασμένων περιοχών, αλλά δεν έχει προσδιορισθεί ικανοποιητικά ακόμη το κόστος και η αποτελεσματικότητά τους σε μια ποικιλία συνθηκών.



Πίνακας 3.2. Τεχνολογίες εκτός τόπου επεξεργασίας υπόγειου νερού και στάδιο ανάπτυξης.

Τεχνολογίες	Στάδιο ανάπτυξης
<b><u>Οργανικά συστατικά</u></b>	
Διαχωριστές	Εμπορικό
Απογυμνωτές με αέρα	Εμπορικό
Απογυμνωτές με ατμό	Εμπορικό (μερικώς)
Φίλτρα ενεργού άνθρακα	Εμπορικό
Μεμβράνες	Εμπορικό
Συστήματα οξειδωσης	Εμπορικό (σε τελικό στάδιο)
Βιοαντιδραστήρες ενεργού ιλύος	Εμπορικό
Βιοαντιδραστήρες σταθερής μεμβράνης	Εμπορικό
Βιοφυσικά συστήματα	Εμπορικό
<b><u>Ανόργανα συστατικά</u></b>	
Αλκαλική καταβύθιση	Εμπορικό
Κροκίδωση	Εμπορικό
Ιοντεναλλαγή	Εμπορικό
Προσρόφηση	Εμπορικό
Διήθηση	Εμπορικό
Αναγωγή	Εμπορικό
Μεμβράνες	Εμπορικό (μεμβράνες υπό ανάπτυξη)
Οξειδωση	Εμπορικό

### 3.3 Ανάκτηση ελεύθερου προϊόντος

Οι διαχωριστές που χρησιμοποιούνται για την **ανάκτηση ελεύθερου προϊόντος (free product recovery)** από το υπόγειο νερό στην επιφάνεια του εδάφους βασίζονται στο διαχωρισμό των φάσεων μη αναμίξιμων υγρών με διαφορετική πυκνότητα. Έχουν βρει ευρεία εφαρμογή κυρίως στο διαχωρισμό πετρελαϊκών προϊόντων από το νερό.

Ο διαχωριστής είναι συνήθως μια δεξαμενή με ελάσματα για την αποφυγή συντόμευσης της πορείας του υγρού ρεύματος. Το υπόγειο νερό μετά την άντλησή του εισέρχεται στο διαχωριστή και η πάνω φάση (οργανική συνήθως) υπερχειλίζει σε δεξαμενή συλλογής, ενώ η κάτω φάση (υδατική συνήθως) οδηγείται σε χωριστή δεξαμενή για περαιτέρω επεξεργασία. Η διαχωρισμένη

ελαιώδης φάση μπορεί να αξιοποιηθεί για ανακύκλωση ή να καεί σε καυστήρες για παραγωγή θερμότητας.

Μετά το πέρασμα από το διαχωριστή, η υδατική φάση μπορεί να περιέχει πετρελαϊκό προϊόν σε περιεκτικότητα 10-100 ppm. Το νερό τότε μπορεί να απορριφθεί στο περιβάλλον, αν η καθαρότητά του κριθεί ικανοποιητική, ή να επεξεργασθεί περαιτέρω με ενεργό άνθρακα, για παράδειγμα.

Οι ρυθμοί επεξεργασίας και το κόστος εξαρτώνται από παράγοντες όπως η δυναμικότητα του διαχωριστή, η περιεκτικότητα σε ρύπους του ρεύματος εισόδου και ο βαθμός απόδοσης της συγκεκριμένης μονάδας.

Τα **πλεονεκτήματα** των διαχωριστών υγρών είναι η διαθεσιμότητά τους, η σίγουρη λειτουργία τους, η χαμηλή τιμή αγοράς και η μικρή συντήρηση. **Μειονεκτήματα** αποτελούν η αδυναμία διαχωρισμού διαλυμένων ρύπων, οι βιολογικές επικαθίσεις και οι απώλειες των πτητικών.

### 3.4 Προ-επεξεργασία υπόγειου νερού

Συχνά, προκύπτουν ανόργανες οχληρές ουσίες στο αντλούμενο νερό, οι οποίες μπορεί να πρέπει να απομακρυνθούν πριν την επεξεργασία του για απομάκρυνση των κύριων ρύπων. Αν δεν απομακρυνθούν έγκαιρα αυτές οι οχληρές ουσίες, μπορεί να περιορίσουν την αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας. Η προ-επεξεργασία περιλαμβάνει χημικές ή φυσικές διεργασίες, οι οποίες στοχεύουν συνήθως στα ιόντα σιδήρου και μαγγανίου, τη σκληρότητα του νερού και τα αιωρούμενα στερεά.

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διεργασίες στην προ-επεξεργασία του νερού είναι:

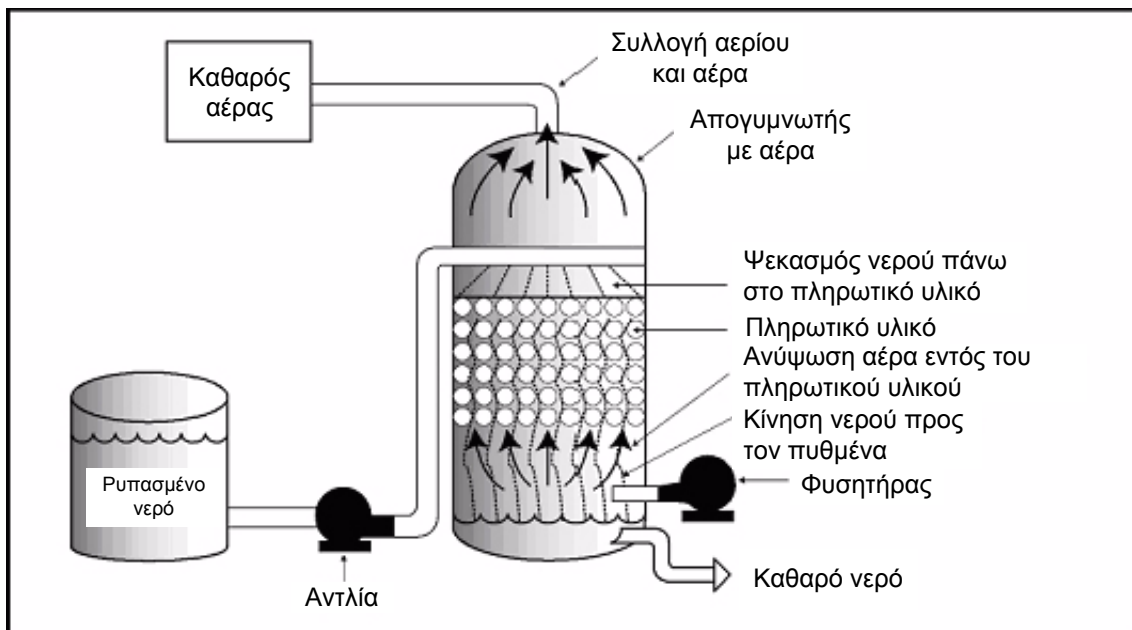
- **Αερισμός.** Χρησιμοποιείται αέρας για την οξειδωση διαλυμένου σιδήρου και μαγγανίου για την δημιουργία αδιάλυτων ιζημάτων που διαχωρίζονται εύκολα.
- **Χημική οξείδωση.** Ανόργανα ιζήματα μπορούν να παραχθούν επίσης με οξειδωτικά όπως το υπεροξείδιο του υδρογόνου, το διοξείδιο του χλωρίου και το υπερμαγγανικό κάλιο.
- **Ρύθμιση pH.** Το pH του διαλύματος ρυθμίζεται στην άριστη τιμή με οξέα ή βάσεις για καλύτερη επεξεργασία των ρύπων.
- **Διήθηση.** Για το διαχωρισμό των αιωρούμενων στερεών που ήδη υπάρχουν στο νερό ή έχουν δημιουργηθεί με την καταβύθιση ουσιών με αερισμό ή προσθήκη χημικών χρησιμοποιούνται κατάλληλα φίλτρα.
- **Αποσκλήρυνση νερού.** Εφόσον απαιτηθεί, χρησιμοποιούνται χημικά για την εσωτερική αποσκλήρυνση του νερού.

### 3.5 Απομάκρυνση διαλυμένων οργανικών ρύπων

#### 3.5.1 Απογύμνωση με αέρα

Η **απογύμνωση με αέρα (air stripping)** βασίζεται στην αύξηση της ελεύθερης επιφάνειας του ρυπασμένου νερού, με αποτέλεσμα τη μεταφορά των πτητικών οργανικών ουσιών στην αέρια φάση. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την επίτευξη αυτού του σκοπού περιλαμβάνει στήλες με πληρωτικά υλικά, διασπορά αέρα, στήλες με δίσκους και ψεκασμό του νερού.

Πιο συχνά χρησιμοποιούνται στήλες (πύργοι) αερισμού, στους οποίους το ρυπασμένο νερό και ο αέρας εισέρχονται κατ' αντιστροφή (Σχ. 3.3). Συγκεκριμένα, το ρεύμα αέρα από τον φυσητήρα εισέρχεται από τον πυθμένα του πύργου, ενώ το ρεύμα νερού εισέρχεται από την κορυφή. Τα δύο ρεύματα συναντώνται στο πληρωτικό υλικό, όπου αποκαθίσταται η θερμοδυναμική ισορροπία του ρύπου στις δύο φάσεις. Το επεξεργασμένο νερό μπορεί να χρειαστεί εξευγενισμό με ενεργό άνθρακα, ενώ και τα απαέρια μπορεί να χρειαστούν περαιτέρω επεξεργασία.



Σχήμα 3.3. Σύστημα απογύμνωσης με αέρα και πληρωτικό υλικό.

Τα συστήματα απογύμνωσης με αέρα είναι κατάλληλα για απομάκρυνση αλογονωμένων και μη αλογονωμένων οργανικών ουσιών. Η δυναμικότητά τους κυμαίνεται από 2 έως 23 m<sup>3</sup>/h νερού.

Στα **πλεονεκτήματα** αυτών των συστημάτων περιλαμβάνονται η αξιοπιστία και η διαθεσιμότητά τους, καθώς και ότι μπορούν να εγκατασταθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα και απαιτούν λίγη συντήρηση. Δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα για νερό ρυπασμένο με ουσίες μεγάλης πτητικότητας, όπως οι

βενζίνες και τα BTEX σε συγκεντρώσεις μέχρι 10 ppm. Δεν εμφανίζουν ευαισθησία σε διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων εισόδου και οι αποδόσεις τους γενικά ξεπερνούν το 90%.

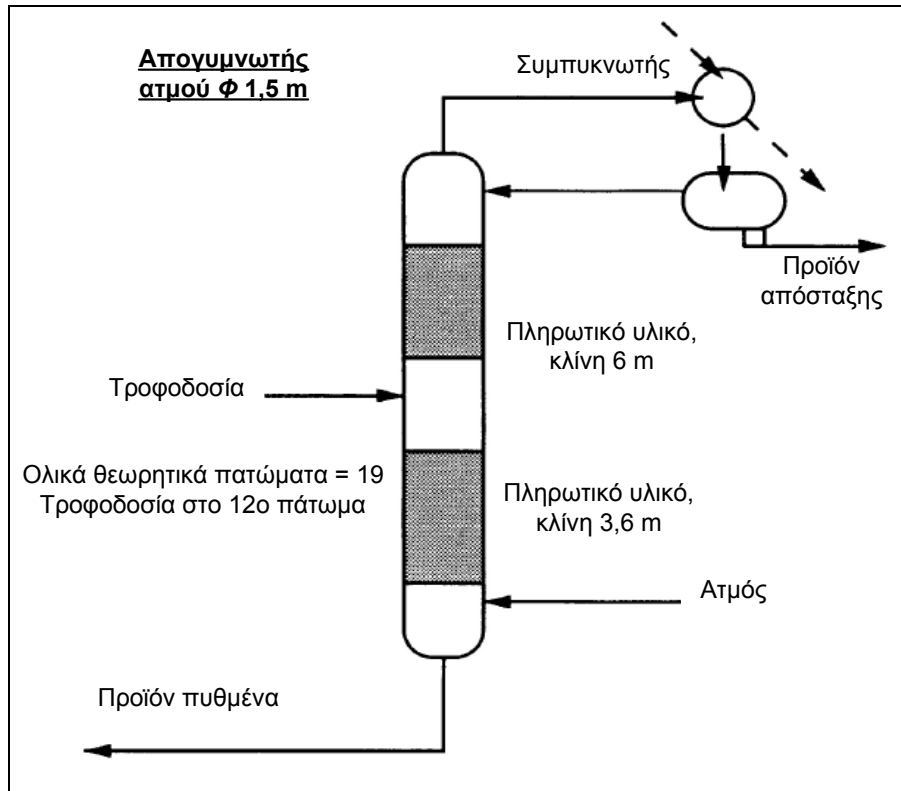
**Μειονεκτήματα** αποτελούν η τάση για αποθέσεις ανόργανων ιζημάτων και βιομάζας, οι οποίες φράζουν τα διάκενα του πληρωτικού υλικού. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται το σταμάτημα της μονάδας και το πλύσιμο με οξύ. Η προ-επεξεργασία για απομάκρυνση του σιδήρου μπορεί να ελαχιστοποιήσει τις αποφράξεις.

Άλλο μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι οι συγκεντρώσεις εισόδου του νερού επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις εξόδου, τόσο του επεξεργασμένου νερού, όσο και των απαερίων. Ποιότητα πόσιμου νερού δεν μπορεί να επιτευχθεί μόνο με απογυμνωτή αέρα και έτσι ο εξευγενισμός του νερού με ενεργό άνθρακα είναι απαραίτητος σε αυτές τις περιπτώσεις.

### 3.5.2 Απογύμνωση με ατμό

Παρόλο που αυτή η τεχνολογία **απογύμνωσης με ατμό (steam stripping)** είναι εμπορικά διαθέσιμη, δεν είναι τόσο καλά μελετημένη όσο η απογύμνωση με αέρα. Σε σύγκριση με την απογύμνωση με αέρα, η απογύμνωση με ατμό λειτουργεί σε υψηλότερη θερμοκρασία, γεγονός που αυξάνει την απόδοση απογύμνωσης. Είναι φανερό ότι η τεχνολογία αυτή είναι ελκυστική σε περιπτώσεις που υπάρχει διαθεσιμότητα ατμού (Σχ. 3.4).

Αυτά τα συστήματα είναι αποτελεσματικά για νερό ρυπασμένο με αλογονωμένες και μη αλογονωμένες οργανικές ουσίες μέσης πτητικότητας. Για ουσίες με μικρή πτητικότητα, η προθέρμανση του νερού συντελεί στη μεγαλύτερη αποδοτικότητα της μεθόδου. Όπως και η απογύμνωση με αέρα, αυτή η τεχνική δεν είναι καταστροφική για τους ρύπους και συνεπώς το επεξεργασμένο νερό και τα απαέρια μπορεί να χρειασθούν συμπληρωματική επεξεργασία. Αν και λόγω των σχετικά υψηλών θερμοκρασιών δεν εμφανίζεται βιολογική ρύπανση, αποθέσεις ανόργανων στερεών είναι δυνατό να δημιουργήσουν προβλήματα αποφράξεων.



Σχήμα 3.4. Απογυμνωτής ατμού με πληρωτικό υλικό και ανακύκλωση ατμού.

### 3.5.3 Προχωρημένη οξειδωση

Η **προχωρημένη οξειδωση (advanced oxidation)** αποτελεί μια νέα τεχνολογία, η οποία έχει τη δυνατότητα πλήρους καταστροφής των οργανικών ρύπων με μετατροπή τους σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό (πλήρης ανοργανοποίηση). Οι εμπορικές εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν όζον και/ή υπεροξείδιο του υδρογόνου ως οξειδωτικά, σε συνδυασμό με υπεριώδη ακτινοβολία και μερικές φορές καταλύτη, όπως διοξείδιο του τιτανίου ή ιόντα σιδήρου (αντίδραση Fenton). Συστήματα προχωρημένης οξειδωσης είναι τα ακόλουθα:

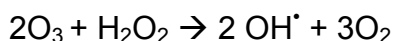
- $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$  (Fenton)
- $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{3+}$  (Fenton)
- $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+})/\text{UV}$  (Φωτοβοηθούμενη Fenton)
- $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{3+}$  - Οξαλικό ιόν
- $\text{Mn}^{2+}/\text{Οξαλικό οξύ}/\text{Οζον}$
- $\text{TiO}_2/\text{h}\nu/\text{O}_2$  (Φωτοκαταλυτική)
- $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$
- $\text{O}_3/\text{UV}$
- $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$

Με τους συνδυασμούς αυτούς παράγονται ελεύθερες ρίζες υδροξυλίου, των οποίων το οξειδωτικό δυναμικό ξεπερνά αυτό του όζοντος (Πίν. 3.3). Μέρος του εξοπλισμού αποτελεί και μια μονάδα καταστροφής των ρύπων των απαερίων με όζον.

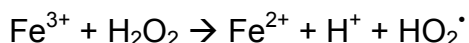
Πίνακας 3.3. Οξειδωτικά δυναμικά διαφόρων μέσων οξειδωσης.

Μέσο οξειδωσης	Οξειδωτικό δυναμικό (Volt)	Σχετική ισχύς ως προς χλώριο
Φθόριο	3,06	2,25
Ρίζα υδροξυλίου	2,80	2,05
Όζον	2,07	1,52
Υπεροξειδίο υδρογόνου	1,77	1,30
Υπερμαγγανικό κάλιο	1,67	1,23
Υποχλωριώδες οξύ	1,49	1,10
Διοξειδίο του χλωρίου	1,49	1,10
Χλώριο	1,36	1,00
Οξυγόνο	1,20	0,81

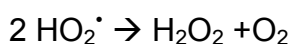
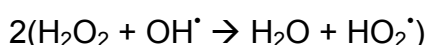
Στην περίπτωση χρησιμοποίησης του όζοντος για τη διάσπαση του υπεροξειδίου του υδρογόνου, η αντίδραση είναι:



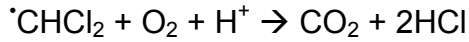
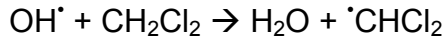
Στην αντίδραση Fenton οι ελεύθερες ρίζες υδροξυλίου παράγονται με τις επί μέρους αντιδράσεις:



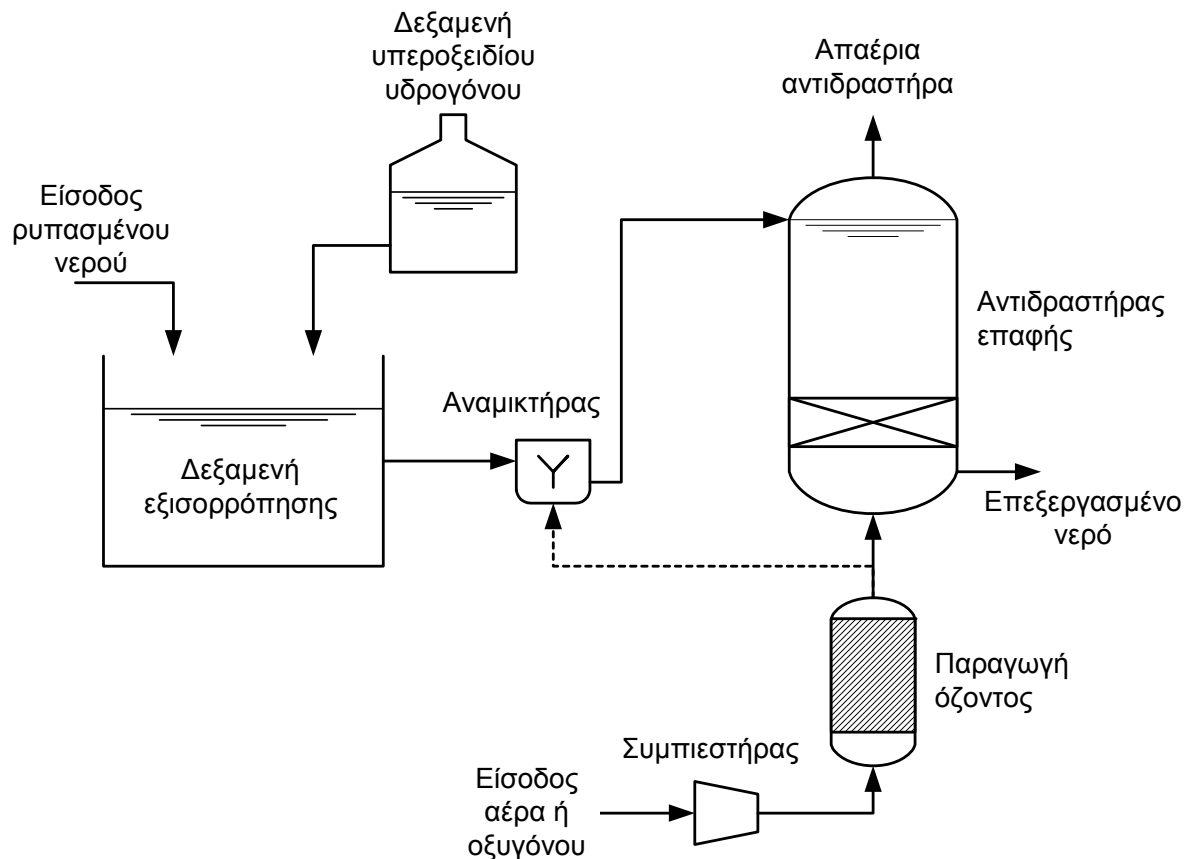
Όταν χρησιμοποιείται το σύστημα υπεροξειδίου του υδρογόνου με υπεριώδη ακτινοβολία οι αντιδράσεις ενεργοποίησης είναι:



Για παράδειγμα, η οξείδωση του διχλωρομεθανίου (επίμονος οργανικός ρύπος, POP) με ελεύθερες ρίζες υδροξυλίου αποδίδεται με τις αντιδράσεις:



Ένα τυπικό διάγραμμα ροής για το σύστημα όζοντος και υπεροξειδίου του υδρογόνου φαίνεται στο Σχ. 3.5. Οι χρόνοι παραμονής είναι της τάξης των 40 min. Λόγω της μεγάλης αποτελεσματικότητας της μεθόδου που ξεπερνά το 98%, το επεξεργασμένο νερό μπορεί να απορριφθεί χωρίς άλλη επεξεργασία στο περιβάλλον ή να αξιοποιηθεί.



Σχήμα 3.5. Τυπικό διάγραμμα ροής για το σύστημα O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Η προχωρημένη οξείδωση είναι κατάλληλη για επεξεργασία νερού ρυπασμένου με αλογονωμένες πτητικές και μέσης πτητικότητας οργανικές ουσίες, συμπεριλαμβανομένων των οξειδοανθεκτικών φυτοφαρμάκων. Η αποτελεσματικότητά της όμως σε μη αλογονωμένους υδρογονάνθρακες είναι

περιορισμένη. Η απουσία ρύπων στα απαέρια ελαχιστοποιεί την έκθεση των εργαζομένων σε ρυπογόνους παράγοντες.

Το καθαρό αποτέλεσμα των παραπάνω αντιδράσεων είναι η πλήρης μετατροπή του οργανικού ρύπου σε διοξείδιο του άνθρακα, νερό και ανόργανα άλατα που αποτελούν ακίνδυνες ουσίες.

Κύριο **πλεονέκτημα** αυτής της τεχνολογίας είναι ότι καταστρέφει πλήρως τους ρύπους. Η δυναμικότητα αυτών των εγκαταστάσεων είναι γενικά μεγάλη και κυμαίνεται από 3 έως 46 m<sup>3</sup>/h ρυπασμένου νερού.

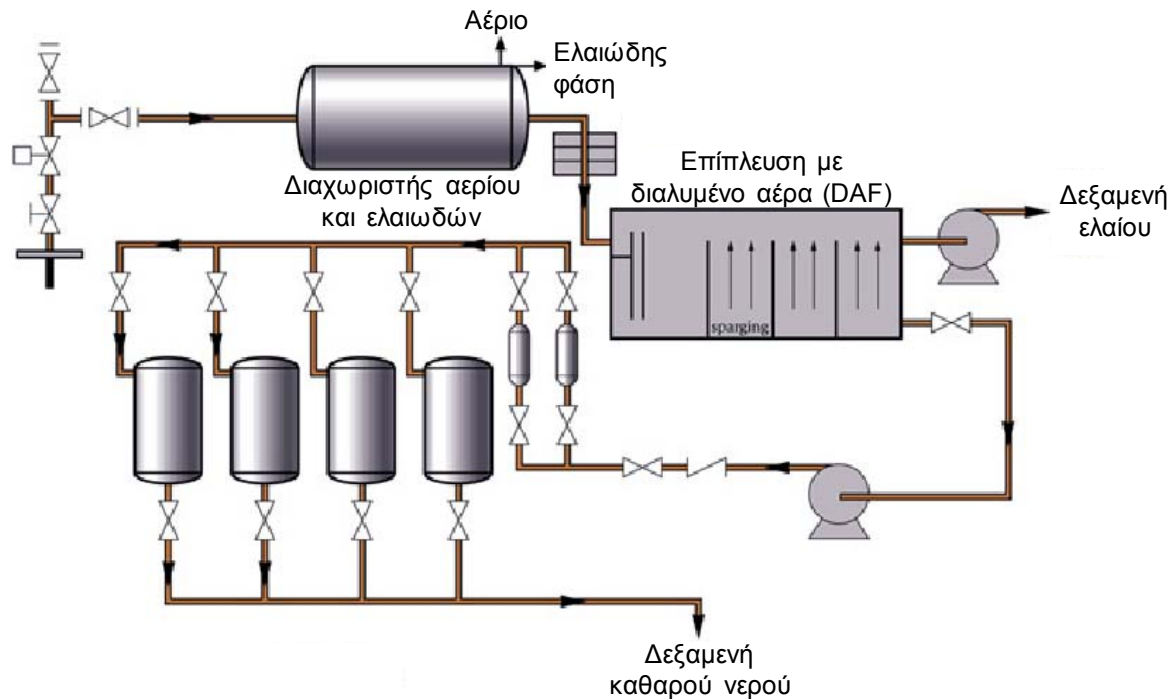
Στα **μειονεκτήματα** συγκαταλέγονται η απαίτηση για εξειδικευμένο προσωπικό και μεγάλη έκταση στην επιφάνεια του εδάφους για τον εξοπλισμό. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι υψηλό, λόγω της μεγάλης ενεργειακής κατανάλωσης και των ακριβών λυχνιών υπεριώδους. Η λειτουργία μπορεί να επηρεασθεί από διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις των ρύπων και την αυξημένη παρουσία ανόργανων και οργανικών ουσιών από φυσικές πηγές στο υπόγειο νερό. Έτσι, η προ-επεξεργασία του νερού μπορεί να κριθεί απαραίτητη σε αυτές τις περιπτώσεις.

### 3.5.4 Ρόφηση σε ενεργό άνθρακα

Στη **ρόφηση σε ενεργό άνθρακα (carbon adsorption)** ο ενεργός άνθρακας παράγεται με θέρμανση λιγνινοκυτταρινούχων υλικών και αποτελεί ένα εξαιρετικό ροφητικό μέσο οργανικών ουσιών. Η πρώτη ύλη και οι συνθήκες παραγωγής ενεργού άνθρακα καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το μέγεθος των πόρων του υλικού και τις ροφητικές του ικανότητες. Μια σημαντική ιδιότητα του ενεργού άνθρακα είναι ότι μπορεί μετά τη χρήση και τον κορεσμό του να επανενεργοποιηθεί με θέρμανση ή με χρήση χημικών. Η αναγέννηση με θέρμανση όμως έχει το πλεονέκτημα ότι καταστρέφει τις ροφημένες ουσίες στον άνθρακα.

Οι ουσίες που μπορούν να απομακρυνθούν από το ρυπασμένο υπόγειο νερό με ενεργό άνθρακα είναι αλογονωμένες και μη αλογονωμένες οργανικές ενώσεις μέσης πτητικότητας. Η τεχνολογία αυτή είναι λιγότερο αποτελεσματική στην επεξεργασία αλογονωμένων πτητικών οργανικών ενώσεων, υδρογονανθράκων, φυτοφαρμάκων και ανόργανων ενώσεων. Σε χαμηλές συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων όμως (μέχρι 1 ppm) η αποτελεσματικότητα του ενεργού άνθρακα φθάνει το 99% στην απομάκρυνση αυτών των ουσιών. Συνήθως, εγκαθίστανται δύο μονάδες ρόφησης σε ενεργό άνθρακα, έτσι ώστε όταν χρησιμοποιείται η μία να αναγεννάται ο ενεργός άνθρακας της άλλης μονάδας. Ένα πλήρες σύστημα επεξεργασίας νερού με τέσσερις κλίνες ενεργού άνθρακα φαίνεται στο Σχ. 3.6.





Σχήμα 3.6. Πλήρες σύστημα επεξεργασίας υπόγειου νερού με ενεργό άνθρακα.

Η δυναμικότητα εγκαταστάσεων απομάκρυνσης ρύπων από το νερό με ενεργό άνθρακα κυμαίνεται στα  $1-23 \text{ m}^3/\text{h}$  ρυπασμένου νερού.

Στα **πλεονεκτήματα** των συστημάτων με ενεργό άνθρακα περιλαμβάνονται η αξιοπιστία και η εμπορική διαθεσιμότητα της τεχνολογίας. Οι μονάδες εγκαθίστανται εύκολα και η λειτουργία τους δεν επηρεάζεται από μικρές διακυμάνσεις στη συγκέντρωση εισόδου.

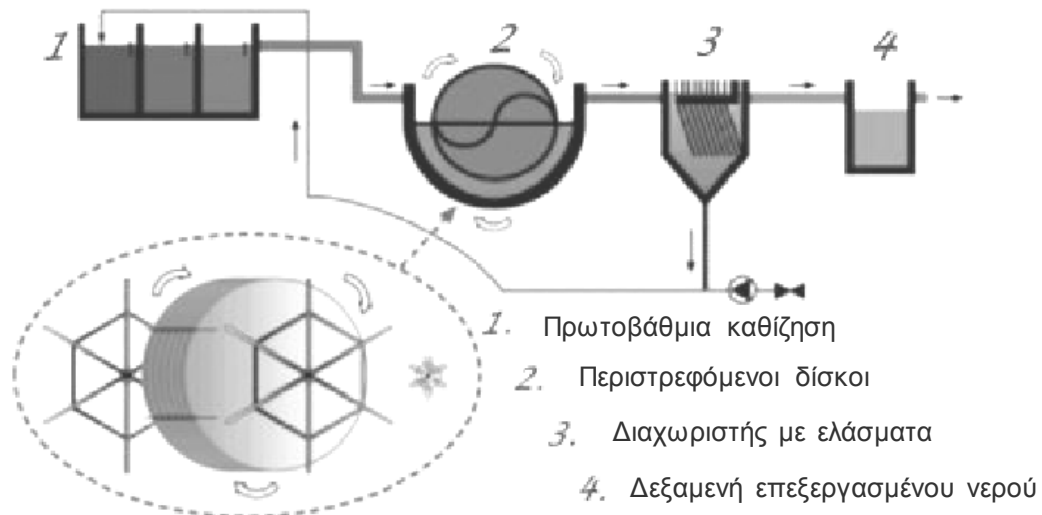
**Μειονέκτημα** αποτελεί το γεγονός ότι πρόκειται για μια μη καταστροφική μέθοδο και οι ρύποι μεταφέρονται από το νερό στον ενεργό άνθρακα. Όταν ο ενεργός άνθρακας κορεσθεί, η συγκέντρωση των ρύπων στο ρεύμα εξόδου του νερού ξεπερνά μια καθορισμένη τιμή και τότε ο απενεργοποιημένος άνθρακας πρέπει να αντικατασταθεί ή να αναγεννηθεί.

Τα φίλτρα ενεργού άνθρακα εξαντλούνται πρόωρα, αν άλλες διαλυμένες ουσίες ή ιόντα καταλάβουν μεγάλο ποσοστό πόρων στον άνθρακα, ή αν χρησιμοποιείται για πρωτοβάθμια επεξεργασία με υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων. Το αποτέλεσμα σε αυτές τις περιπτώσεις θα είναι το υψηλό κόστος επεξεργασίας. Τα φίλτρα αυτά μπορούν να αποφραχθούν από υψηλές συγκεντρώσεις βιολογικής ύλης και μετάλλων από φυσικές πηγές.

### 3.5.5 Βιοαντιδραστήρες

Η βιολογική επεξεργασία υγρών έχει αναπτυχθεί εδώ και πολλές δεκαετίες με επιτυχία στην επεξεργασία αστικών λυμάτων. Ο εξοπλισμός και τα υλικά είναι λοιπόν εμπορικά διαθέσιμα και σε λογικό κόστος. Οι **βιοαντιδραστήρες**

**(bioreactors)** σχεδιάζονται έτσι ώστε να φέρνουν σε επαφή τους διαλυμένους ρύπους με μικροοργανισμούς, οι οποίοι μπορεί να είναι αιωρούμενοι ή προσαρτημένοι σε κάποιο μέσο. Τα συστήματα επεξεργασίας μπορεί να είναι λοιπόν εγκαταστάσεις αιωρούμενης ανάπτυξης, όπως εγκαταστάσεις ενεργού ιλύος) ή αντιδραστήρες ακινητοποιημένης μεμβράνης, όπως στραγγιστικά φίλτρα ή βιοδίσκοι (Σχ. 3.7).



Σχήμα 3.7. Σύστημα επεξεργασίας νερού με εμβαπτιζόμενους βιοδίσκους.

Στα συστήματα αιωρούμενης ανάπτυξης το ρυπασμένο υπόγειο νερό και ο μικροβιακός πληθυσμός (ενεργός ιλύς) έρχονται σε επαφή μέσα στη δεξαμενή αερισμού. Οι μικροοργανισμοί αποσυνθέτουν τους ρύπους αερόβια παράγοντας συγχρόνως νέα κύτταρα. Στα συστήματα σταθερής μεμβράνης οι μικροοργανισμοί είναι προσαρτημένοι σε ένα στερεό μέσο όπως οι κροκάλες (στραγγιστικά φίλτρα) ή ένα πλαστικό φύλλο (βιοδίσκοι).

Οι βιοαντιδραστήρες χρησιμοποιούνται κυρίως για την επεξεργασία μη αλογονωμένων πτητικών και μέσης πτητικότητας οργανικών ουσιών. Προσφέρονται ιδιαίτερα για την επεξεργασία μικρού μοριακού βάρους και μεγάλης διαλυτότητας οργανικών ενώσεων, με επίπεδο ολικού οργανικού άνθρακα < 5.000 ppm, οπότε οι αποδόσεις φθάνουν το 99%. Παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία και απόδοση τέτοιων εγκαταστάσεων είναι η θερμοκρασία, η συγκέντρωση των ρύπων, οι συγκεντρώσεις θρεπτικών και ο χρόνος παραμονής στο βιοαντιδραστήρα. Το επεξεργασμένο νερό απορρίπτεται ως έχει ή αξιοποιείται μετά από τριτοβάθμια επεξεργασία.

Η δυναμικότητα των βιοαντιδραστήρων κυμαίνεται στα όρια 1-23 m<sup>3</sup>/h ρυπασμένου νερού. Η βιολογική επεξεργασία είναι συχνά πιο οικονομική από τη ρόφηση σε ενεργό άνθρακα.

**Πλεονεκτήματα** της βιολογικής επεξεργασίας είναι η εμπορική διαθεσιμότητα, η ευκολία λειτουργίας και η καταστροφή των ρύπων.

Στα **μειονεκτήματα** της μεθόδου περιλαμβάνεται η ανάγκη τελικής διάθεσης της περίσσειας ιλύος. Τα ιζήματα σιδήρου επίσης μπορεί να φράξουν σωληνώσεις και η προ-επεξεργασία για την απομάκρυνση αυτών ή/και άλλων μετάλλων κρίνεται τότε απαραίτητη. Η απαιτούμενη επίσης έντονη ανάδευση του ανάμεικτου υγρού μπορεί να προκαλέσει την απώλεια πτητικών οργανικών στην ατμόσφαιρα. Σε αυτή την περίπτωση οι εκπομπές πρέπει να συλλέγονται και να επεξεργάζονται. Οι χαμηλές θερμοκρασίες τέλος μειώνουν το ρυθμό βιοαποδόμησης και συντελούν σε μακρούς χρόνους επεξεργασίας. Αν για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος απαιτηθεί θέρμανση, τότε το κόστος επεξεργασίας θα αυξηθεί ανάλογα.

### 3.5.6 Διαχωρισμός με μεμβράνες

Ο **διαχωρισμός με μεμβράνες (membrane separation)** έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία μέχρι σήμερα για εφαρμογές όπως η αφαλάτωση και πρόσφατα επιχειρείται η εφαρμογή της τεχνολογίας στην απομάκρυνση οργανικών από υγρά απόβλητα. Η τεχνολογία βασίζεται σε φυσικές διεργασίες και διαχωρίζει διαλυμένους οργανικούς ρύπους από την υδατική φάση με την εφαρμογή πίεσης σε μεμβράνες. Στις τεχνικές της υπερδιήθησης και της αντίστροφης ώσμωσης οι ασκούμενες πιέσεις κυμαίνονται στα 0,34-6,8 bar 6,8-17 bar, αντιστοίχως. Ως κατασκευαστικά υλικά των μεμβρανών χρησιμοποιούνται διάφορα πολυμερή όπως η οξική κυτταρίνη, σε μορφές όπως τα φύλλα, σωλήνες και κοίλες ίνες.

Η επεξεργασία με μεμβράνες είναι μη καταστροφική, με συνέπεια να παράγει συμπυκνώματα τα οποία πρέπει να διατεθούν σε κατάλληλους αποδέκτες ή να καταστραφούν. Αυτές οι τεχνικές έχουν καλύτερη απόδοση σε νερό με σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένους πτητικούς και μέσης πτητικότητας υδρογονάνθρακες (<5 ppm). Η υπερδιήθηση ταιριάζει καλύτερα σε ενώσεις με μοριακά βάρη μεγαλύτερα από 5.000, ενώ η αντίστροφη ώσμωση σε ενώσεις με μοριακά βάρη μεγαλύτερα από 200.

Η δυναμικότητα αυτών των μονάδων κυμαίνεται στα 0,2-23 m<sup>3</sup>/h. Το κόστος για την αντικατάσταση και καθαρισμό των μεμβρανών φθάνει το 10-30% του κόστους επένδυσης, ενώ αυτό επιβαρύνεται σημαντικά και με τις δαπάνες διάθεσης του συμπυκνώματος.

Στα **πλεονεκτήματα** αυτής της τεχνολογίας περιλαμβάνεται η απομάκρυνση και ανόργανων ρύπων μαζί με τους οργανικούς.

Σημαντικό **μειονέκτημα** αποτελεί η ανάγκη για προ-επεξεργασία του νερού (π.χ. απομάκρυνση σιδήρου και σκληρότητας) για την αντιμετώπιση της έμφραξης των μεμβρανών που μειώνουν την αποτελεσματικότητά τους. Η θερμοκρασία και οι διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις του ρεύματος εισόδου μπορεί επίσης να επηρεάσουν δυσμενώς τη λειτουργία. Εφόσον η τεχνολογία είναι μη καταστροφική, παράγεται ένας μεγάλος όγκος συμπυκνώματος (της

τάξης του 10-25%) που πρέπει να διατεθεί με ασφάλεια και επιβαρύνει το κόστος.

### 3.5.7 Σύγκριση τεχνολογιών απομάκρυνσης οργανικών

Οι πιο δημοφιλείς τεχνικές για την απομάκρυνση διαλυμένων οργανικών ρύπων από υπόγειο νερό που αντλείται για επεξεργασία στην επιφάνεια του εδάφους είναι η απογύμνωση με αέρα και η ρόφηση σε ενεργό άνθρακα. Με κριτήριο όμως το λειτουργικό κόστος προτιμούνται όμως οι εγκαταστάσεις απογύμνωσης με αέρα. Σε τιμές του 1987, η απογύμνωση με αέρα κόστιζε 0,5-8 cents US/m<sup>3</sup>, ενώ η ρόφηση σε ενεργό άνθρακα 5-24 cents US/m<sup>3</sup>. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι η απογύμνωση με αέρα εξακολουθεί να είναι οικονομικότερη από τον ενεργό άνθρακα, ακόμη και αν απαιτηθεί η εγκατάσταση στην απογύμνωση μονάδας επεξεργασίας των αερίων εκπομπών.

Παρόλο που από οικονομική άποψη είναι πιο συμφέρουσα η απογύμνωση με αέρα, σε όρους καλύτερης ποιότητας επεξεργασμένων αποβλήτων παρά τις διακυμάνσεις υδραυλικών παροχών και ρυπαντικών φορτίων, η τεχνολογία ενεργού άνθρακα υπερέχει σημαντικά. Επιπλέον, η απογύμνωση με αέρα δεν καταστρέφει τους ρύπους, ενώ η θερμική αναγέννηση του ενεργού άνθρακα τους οξειδώνει. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι η τεχνολογία ενεργού άνθρακα είναι πολύ πιο οικονομική από την απογύμνωση με αέρα, όταν ο προβλεπόμενος χρόνος λειτουργίας είναι μικρότερος από δύο έτη.

## 3.6 Απομάκρυνση διαλυμένων ανόργανων ρύπων

Οι ανόργανοι διαλυμένοι ρύποι που εμφανίζονται στο υπόγειο νερό και πρέπει να απομακρυνθούν μετά την άντλησή του στην επιφάνεια του εδάφους είναι συνήθως βαρέα μέταλλα (π.χ. κάδμιο, μόλυβδος, υδράργυρος και χαλκός), νιτρικά, ολικά διαλυμένα στερεά, σε συνδυασμό με ρύθμιση του pH.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται συνήθως για το σκοπό αυτό είναι οξείδωση ή αναγωγή, προσρόφηση, διαχωρισμός με μεμβράνες, ιοντεναλλαγή, καταβύθιση, κροκίδωση/θρόμβωση και διήθηση. Τα στραγγίσματα από χώρους υγειονομικής ταφής αστικών απορριμμάτων και εγκαταλειμμένα ορυχεία αποτελούν την κύρια πηγή βαρέων μετάλλων, ενώ τα νιτρικά και τα ολικά διαλυμένα στερεά προέρχονται κυρίως από γεωργικές εκμεταλλεύσεις.

### 3.6.1 Οξείδωση και αναγωγή

Για την απομάκρυνση του σιδήρου χρησιμοποιείται συχνά η οξείδωση του από τη διαλυτή δισθενή μορφή του στην αδιάλυτη τρισθενή. Αυτό επιτυγχάνεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, εύκολα με απλό αερισμό του νερού σε pH 7-7,5. Ο σίδηρος δεν είναι τοξικό μέταλλο, αλλά θεωρείται ως οχληρό ανόργανο συστατικό, λόγω της αρνητικής παρεμβολής του σε ορισμένα συστήματα απομάκρυνσης άλλων συστατικών του υπόγειου νερού.

Το εξασθενές χρώμιο είναι ένα τοξικό βαρύ μέταλλο, διαλυτό στο νερό σε υψηλό pH, σε αντίθεση με το τρισθενές χρώμιο, το οποίο δεν είναι διαλυτό σε υψηλό pH. Η απομάκρυνση του χρωμίου βασίζεται λοιπόν στην αρχική μείωση του pH του ρυπασμένου νερού κάτω από 3 και στη συνέχεια στην προσθήκη ενός αναγωγικού μέσου όπως το διοξείδιο του θείου για μετατροπή του εξασθενούς χρωμίου σε τρισθενές. Με την ανύψωση του pH, καταβυθίζεται το τρισθενές χρώμιο. Η χημική αναγωγή χρησιμοποιείται επίσης για την απομάκρυνση του μολύβδου και του υδραργύρου.

Η οξειδωση και η αναγωγή είναι απλές διεργασίες που μπορούν να διεξαχθούν με απλό και διαθέσιμο εξοπλισμό και κοινά αντιδραστήρια. Το κόστος επένδυσης και οι λειτουργικές δαπάνες είναι χαμηλά.

### 3.6.2 Προσρόφηση

Η προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα έχει άριστα αποτελέσματα όχι μόνο στη ρόφηση και τελικά στην απομάκρυνση οργανικών διαλυτών ρύπων, αλλά και στην απομάκρυνση ανόργανων διαλυμένων ουσιών από το ρυπασμένο νερό, όπως αρσενικό, χρώμιο, κασσίτερος, υδράργυρος και άργυρος. Ο μεγαλύτερος περιορισμός είναι όμως το υψηλό κόστος επένδυσης και κυρίως το υψηλό λειτουργικό κόστος.

### 3.6.3 Διαχωρισμός με μεμβράνες

Ο διαχωρισμός με μεμβράνες είναι κατάλληλος όχι μόνο για την απομάκρυνση οργανικών, αλλά και ανόργανων ουσιών από νερό. Συνήθως χρησιμοποιούνται πολλές μεμβράνες σε συστοιχία για την επίτευξη ικανοποιητικού αποτελέσματος.

Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται κυρίως όταν επιδιώκεται η απομάκρυνση πολύ τοξικών συστατικών. Καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με ρύπους μεγάλου ιοντικού φορτίου. Μπορεί να απαιτηθεί η προ-επεξεργασία του νερού για την απομάκρυνση συστατικών που προσβάλλουν τις μεμβράνες ή δυσχεραίνουν τη λειτουργία τους. Η προ-επεξεργασία περιλαμβάνει την απομάκρυνση σιδήρου και μαγγανίου με οξειδωση και διήθηση, ρύθμιση του pH, ή απομάκρυνση λιπών και ελαίων που δημιουργούν στρώμα πάνω στη μεμβράνη.

Τα συστήματα με μεμβράνες είναι εμπορικά διαθέσιμα, αλλά απαιτούν υψηλές πιέσεις και είναι ακριβά στη λειτουργία τους. Οι λειτουργικές δαπάνες και οι δαπάνες συντήρησης περιλαμβάνουν μεγάλη κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος για τη λειτουργία των αντλιών υψηλής πίεσης, επισκευές και αντικατάσταση των μεμβρανών περίπου τρεις φορές το έτος. Στις δαπάνες πρέπει να συμπεριληφθούν και αυτές για την προ-επεξεργασία του νερού.

### 3.6.4 Ιοντεναλλαγή

Τα συστήματα ιοντεναλλαγής αποσκοπούν στην ανταλλαγή βλαβερών θετικών ή αρνητικών ιόντων με άλλα μη επιζήμια με τη βοήθεια κατάλληλου υλικού. Αυτή η τεχνική έχει βρει μεγάλη εφαρμογή στην αποσκλήρυνση του νερού χρησιμοποιώντας συνθετικές ιοντεναλλακτικές ρητίνες. Στον Πίν. 3.4 φαίνεται η εκλεκτικότητα διαφόρων τύπων ιοντεναλλακτικών ρητινών για διάφορα ιόντα. Οι ιοντεναλλάκτες με αρνητικά φορτισμένες θέσεις (όξιμες ρητίνες) ανταλλάσσουν κατιόντα, ενώ αυτοί με θετικά φορτισμένες θέσεις (βασικές ρητίνες) ανταλλάσσουν ανιόντα.

Πίνακας 3.4. Είδη ρητινών και εκλεκτικότητα ιόντων.

Ρητίνη	Εκλεκτικότητα
Ισχυρώς όξινη	$\text{Li}^+, \text{H}^+, \text{Na}^+, \text{NH}_4^+, \text{K}^+, \text{Rb}^+, \text{Cs}^+, \text{Mg}^{2+}, \text{Zn}^{2+}, \text{Cu}^{2+}, \text{Ca}^{2+}, \text{Pb}^{2+}$
Ασθενώς όξινη	$\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Mg}^{2+}, \text{Ca}^{2+}, \text{Cu}^{2+}, \text{H}^+$
Ισχυρώς αλκαλική	$\text{F}^-, \text{OH}^-, \text{H}_2\text{PO}_4^-, \text{HCO}_3^-, \text{Cl}^-, \text{NO}_2^-, \text{HSO}_3^-, \text{CN}^-, \text{Br}^-, \text{NO}_3^-, \text{HSO}_4^-, \text{I}^-$
Ασθενώς αλκαλική	$\text{F}^-, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{I}^-, \text{PO}_4^{3-}, \text{NO}_3^-, \text{CrO}_4^{2-}, \text{SO}_4^{2-}, \text{OH}^-$

Αυτές οι ρητίνες έχουν γενικά μεγαλύτερη χημική συγγένεια με δισθενή ιόντα παρά με μονοσθενή. Έτσι, το δισθενές ασβέστιο θα αντικαταστήσει το μονοσθενές νάτριο στη ρητίνη και αυτό εξηγεί τη λειτουργία των ιοντεναλλακτικών ρητινών ως αποσκλήρυντών του νερού.

Τα ανιόντα που συνήθως απομακρύνονται με ιοντεναλλαγή από ρυπασμένα υπόγεια νερά είναι ιόντα αλογόνων, θειικά, νιτρικά και κυανιούχα. Από τα κατιόντα απομακρύνονται συνήθως τα βαρέα μέταλλα. Οι ρητίνες αναγεννώνται μετά τη χρήση τους και τότε προκύπτει ένα συμπύκνωμα του διαχωρισμένου ιόντος, το οποίο πρέπει να διατεθεί με ασφαλή τρόπο.

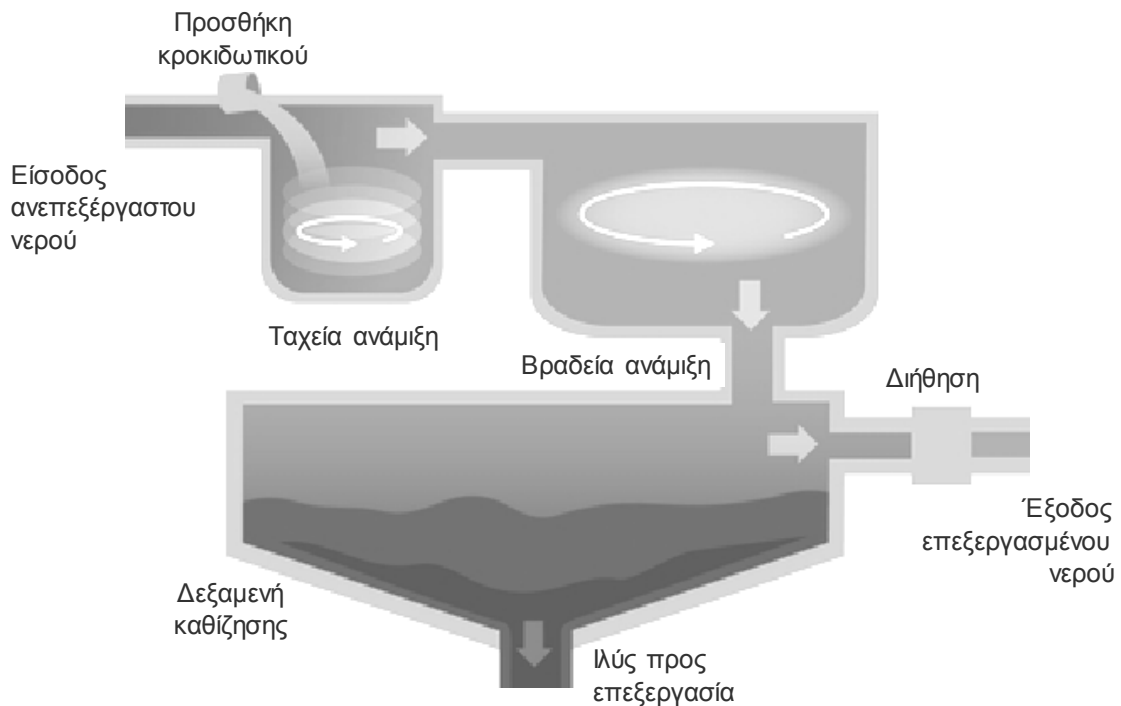
### 3.6.5 Καταβύθιση

Πολλά ιόντα μετάλλων καταβυθίζονται από διαλύματα με ανύψωση του pH, αλλά όχι όλα. Έτσι, ο δισθενής σίδηρος παραμένει διαλυμένος σε υψηλό pH, αλλά μπορεί να απομακρυνθεί με οξειδωση, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Άλλος τρόπος απομάκρυνσης των ιόντων μετάλλων με καταβύθιση είναι η μετατροπή τους σε θειούχα ή υδροξειδία. Από άποψη κόστους, η μετατροπή σε υδροξειδία είναι πιο συμφέρουσα, η μετατροπή όμως σε θειούχα δίνει καλύτερα ποιοτικά αποτελέσματα λόγω μικρότερης διαλυτότητας των θειούχων. Έτσι, η καταβύθιση με μετατροπή σε θειούχα χρησιμοποιείται συνήθως σε περιπτώσεις που η συγκέντρωση μετάλλων στο επεξεργασμένο νερό πρέπει να είναι πολύ χαμηλή.

### 3.6.6 Κροκίδωση / Θρόμβωση

Η τεχνική της **κροκίδωσης/θρόμβωσης (coagulation/flocculation)** χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που τα αιωρούμενα σωματίδια είναι τόσο μικρά (π.χ. σωματίδια αργίλου) που δεν καθιζάνουν εύκολα, οπότε απαιτούνται άλλες μέθοδοι για το διαχωρισμό τους. Μια τέτοια μέθοδος είναι η προσθήκη χημικών ουσιών, οι οποίες θα προκαλέσουν κροκίδωση (εξουδετέρωση ηλεκτρικών φορτίων) και θρόμβωση (συσσωμάτωση σε μεγάλα αθροίσματα) με τελικό αποτέλεσμα την καθίζησή τους σε σύντομο χρονικό διάστημα, αν αφεθούν σε ηρεμία. Η ρύθμιση του pH παίζει σημαντικό ρόλο συνήθως σε αυτή την τεχνολογία. Οι καλά σχηματισμένοι θρόμβοι μπορούν να απομακρυνθούν, είτε με καθίζηση, είτε με διήθηση. Ένα τυπικό σύστημα κροκίδωσης/θρόμβωσης φαίνεται στο Σχ. 3.8.



Σχήμα 3.8. Τυπικό σύστημα κροκίδωσης/θρόμβωσης.

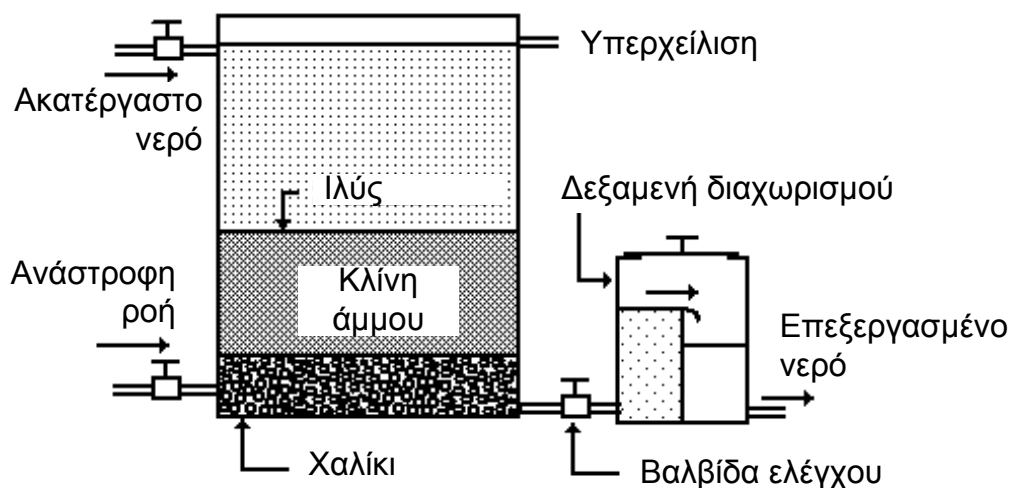
Για την κροκίδωση χρησιμοποιούνται ανόργανες ουσίες όπως άσβεστος, θειικό αργίλιο και χλωριούχος τρισθενής σίδηρος, ενώ για τη θρόμβωση ορισμένα υδατοδιαλυτά πολυμερή έχουν αποδειχθεί πολύ αποτελεσματικά. Για την επεξεργασία του υπόγειου νερού, η άσβεστος θεωρείται το καλύτερο κροκιδωτικό, επειδή αυξάνει το pH και βοηθάει τη θρόμβωση.

### 3.6.7 Διήθηση

Η διήθηση συντελείται με την εξαναγκασμένη διέλευση ενός υγρού μέσα από ένα πορώδες μέσο, με μέγεθος πόρων μικρότερο από το μέγεθος των προς διαχωρισμό σωματιδίων. Σε ένα τυπικό φίλτρο όγκου, το υπόγειο νερό μετά την άντληση αναγκάζεται να διέλθει μέσα από μια κλίνη αποτελούμενη από κοκκώδες υλικό, όπως άμμος ή ανθρακίτης (Σχ. 3.9). Στα φίλτρα επιφανείας χρησιμοποιούνται φύλλα πορώδους χάρτου, ή μεταλλικού ή πλαστικού πλέγματος.

Με τη διέλευση του νερού, η παγίδευση κόκκων από το νερό στην επιφάνεια ή τη μάζα του φίλτρου καθαρίζει το νερό. Με την πάροδο του χρόνου η παροχευτικότητα του φίλτρου μειώνεται, οπότε το φίλτρο πρέπει να καθαρισθεί και αυτό επιτυγχάνεται με αντίστροφη ροή του νερού με υψηλή ταχύτητα για διασκορπισμό των συσσωματωμάτων. Το συμπύκνωμα σωματιδίων που προκύπτει από το πλύσιμο του φίλτρου πρέπει να διατεθεί με ασφάλεια στο περιβάλλον.

Αυτά τα φίλτρα λειτουργούν οικονομικά για νερά με αιωρούμενα στερεά στην περιοχή των 100-200 mg/L. Τοποθετούνται μετά τη δεξαμενή καθίζησης του ρυπασμένου νερού και πριν από τα φίλτρα ενεργού άνθρακα για να μειώνουν τις εμφράξεις των τελευταίων από σωματίδια. Ο εξοπλισμός είναι εμπορικά διαθέσιμος και εύκολος στη λειτουργία και τον έλεγχο. Αποτελεί μια συνηθισμένη τεχνική προ-επεξεργασίας του υπόγειου νερού.



Σχήμα 3.9. Σχηματική διάταξη απλού φίλτρου όγκου (πίεσης).

### 3.6.8 Σύγκριση τεχνολογιών απομάκρυνσης ανόργανων ουσιών

Οι πιο κοινές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία υπόγειου νερού μετά την άντλησή του στην επιφάνεια είναι η ιοντεναλλαγή, η καταβύθιση, η καθίζηση και η διήθηση. Πριν από την επιλογή μιας μεθόδου καθαρισμού του



νερού όμως, πρέπει να καθορισθεί το επίπεδο καθαρισμού. Οι πιο πολλές τεχνικές μπορούν να φθάσουν τα όρια που τίθενται για τη διάθεση ενός υγρού ρεύματος στο δίκτυο ακαθάρτων μιας πόλης. Αν τα όρια όμως είναι πολύ αυστηρά (π.χ. πόσιμο νερό), τότε θα απαιτηθεί ο εξευγενισμός του νερού με ενεργό άνθρακα, που θα αυξήσει σημαντικά το κόστος καθαρισμού.

Σε κάθε δύσκολη περίπτωση καλό είναι να προηγηθεί μελέτη επεξεργασιμότητας του νερού για να επιλεγούν τα στάδια επεξεργασίας και οι καταλληλότερες τεχνικές.

### **3.7 Συμπεράσματα για την επεξεργασία υπόγειου νερού**

Οι τεχνολογίες άντλησης και επεξεργασίας ρυπασμένου υπόγειου νερού περιλαμβάνουν πρώτα τεχνικές απομάκρυνσης ελεύθερου προϊόντος και οχληρών ανόργανων ουσιών. Ακολουθούν τεχνολογίες απομάκρυνσης οργανικών και ανόργανων ρύπων, διαλυμένων ή αιωρούμενων μέσα στο νερό. Οι τεχνολογίες αυτές μπορεί να είναι καταστροφικές ή μη.

Το επεξεργασμένο νερό μπορεί να απορρίπτεται σε δίκτυα ακαθάρτων, επιφανειακά ή υπόγεια υδατικά συστήματα, ή να εξευγενίζεται μέχρι να φθάσει την ποιότητα του πόσιμου νερού.

Οι πιο κοινές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση διαλυμένων πτητικών οργανικών ουσιών στο υπόγειο νερό είναι οι απογυμνωτές αέρα και τα φίλτρα ενεργού άνθρακα. Αν όμως το νερό περιέχει μέσης πτητικότητας ή μη πτητικές ενώσεις, τότε πρέπει να εξετασθούν άλλες τεχνολογίες.

Για την απομάκρυνση ανόργανων συστατικών χρησιμοποιούνται συνήθως οι τεχνικές της ιοντεναλλαγής, καταβύθισης, καθίζησης και διήθησης των ρύπων.



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## Μελέτη εφαρμογής

### Παραγωγή και έλεγχος στραγγισμάτων χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων

#### **Χαρακτηριστικά στραγγισμάτων**

Τα στραγγίσματα, το συμπυκνωμένο υγρό που προέρχεται από τους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, έχουν μεταβαλλόμενη σύσταση, η οποία εξαρτάται από την ηλικία του χώρου και το είδος των απορριμμάτων που περιέχει ο χώρος. Οι τυπικές τιμές συγκεντρώσεων διαφόρων συστατικών των στραγγισμάτων που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία δίνονται στον Πιν. Π.1.

**Πίνακας Π.1. Χαρακτηριστικά στραγγισμάτων από χώρο υγειονομικής ταφής (σε mg/L, πλην του pH)**

Συστατικό	Περιοχή τιμών	Τυπική τιμή
Οργανικό φορτίο BOD <sub>5</sub>	200-20000	6000
COD	1000-30000	10000
Ολικά στερεά	2000-5000	3000
Ολικό άζωτο	20-1000	200
Αλκαλικότητα (ως CaCO <sub>3</sub> )	200-5000	400
Διαλυτά άλατα (Cl, SO <sub>4</sub> )	200-3000	500
Σίδηρος	50-800	100
Μόλυβδος	1-10	2
Ψευδάργυρος	25-250	50
pH	5-8	6

#### **Ποσότητα στραγγισμάτων**

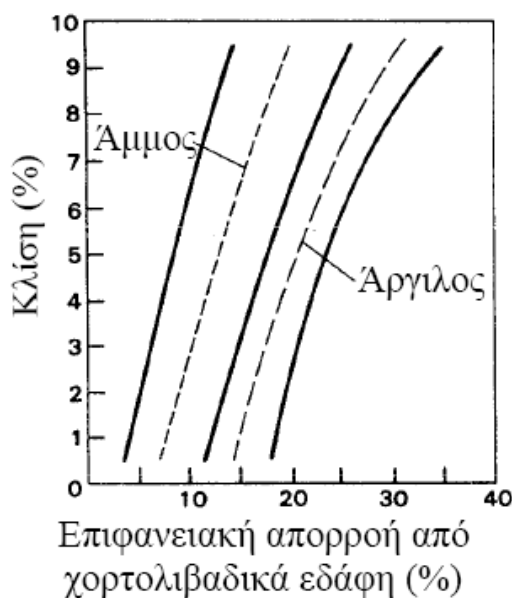
Σε συνθήκες σταθερής κατάστασης η παραγωγή στραγγισμάτων ισούται με την ποσότητα της βροχής που καταλήγει στο χώρο υγειονομικής ταφής μείον την ποσότητα της βροχής που απομακρύνεται από αυτόν. Μέχρι το σημείο κορεσμού του χώρου επίσης το εισερχόμενο νερό μειώνεται κατά την ποσότητα της υγρασίας που συγκρατεί το έδαφος και τα απορρίμματα. Η βάση υπολογισμού των ποσοτήτων από αυτές της συνεισφέρουσες πηγές φαίνεται στον Πιν. Π.2.

Πίνακας Π.2. Ποσότητα στραγγισμάτων από συνεισφέρουσες πηγές

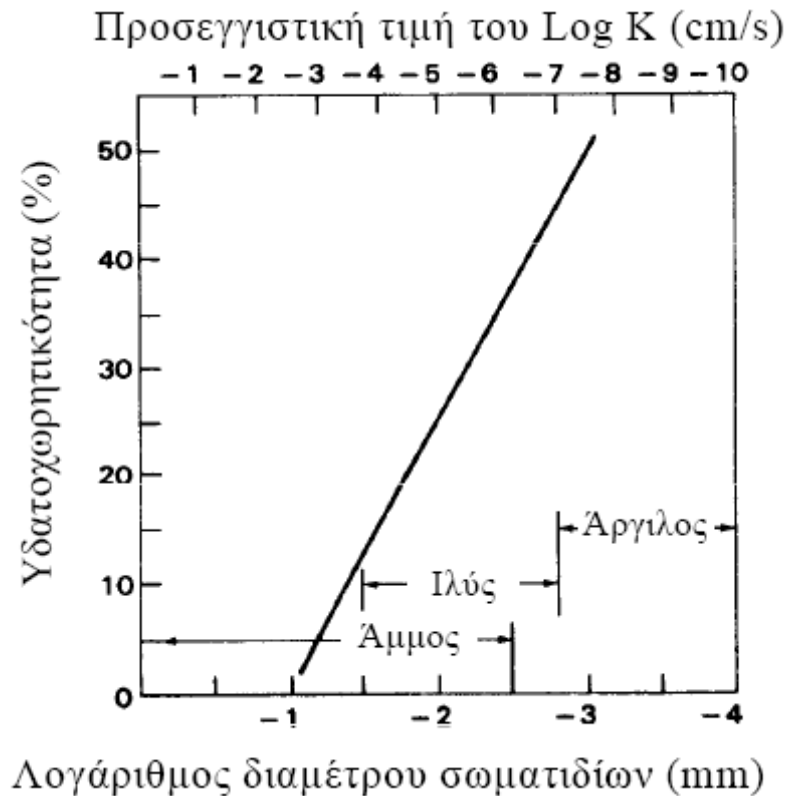
Πηγή στραγγισμάτων	Αναφορά	Τυπική τιμή	Κανονική περιοχή τιμών	Σημαντικότερος παράγοντας
1. Βροχόπτωση	Αρχεία	900 mm	400-1200 mm	Τοποθεσία (κλίμα)
2. Απώλειες από:				
α) Εξατμισοδιαπνοή	Αρχεία	70%*	40-90%	Υγρασία
β) Επιφανειακή απορροή	Σχ. 1	20%	10-45%	Τύπος εδάφους
3. Συγκράτηση νερού (%κ.ο.)				
α) Κορεσμένο έδαφος	Σχ. 2	30%	10-40%	Τύπος εδάφους
β) Απορρίμματα	Δοκιμή πεδίου	30%	20-35%	Απορρίμματα

\*Η απώλεια 70% αντιστοιχεί σε χώρο με βλάστηση. Σε χώρο υγειονομικής ταφής, η απώλεια μπορεί να είναι 1/2 έως 2/3 αυτής της τιμής (35-45% της ολικής βροχόπτωσης).

Στο Σχ. Π.1 απεικονίζεται η εκατοστιαία επιφανειακή απορροή νερού από χορτολιβαδικά εδάφη για διάφορες κλίσεις και στο Σχ. Π.2 συσχετίζεται η υδατοχωρητικότητα εδαφών με το συντελεστή διαπερατότητας ή τη διάμετρο των σωματιδίων του εδάφους. Τα σχήματα αυτά συμπληρώνουν τα δεδομένα του Πιν. Π.2.



Σχήμα Π.1. Επιφανειακή απορροή από χορτολιβαδικά εδάφη.



Σχήμα Π.2. Προσεγγιστική υδατοχωρητικότητα εδαφών (% όγκος νερού / όγκος εδάφους).

### Παράδειγμα Π.1

#### Ποσότητα στραγγισμάτων και χρόνος κορεσμού

Αστικά απορρίμματα αφού μεταφερθούν και συμπιεστούν καλά, τοποθετούνται σε χώρο υγειονομικής ταφής σε τρία στρώματα. Το κάθε στρώμα έχει βάθος 2 m και χωρίζεται από το επόμενο με επίστρωση πάχους 250 mm αργίλου. Ο χώρος καλύπτεται από στρώμα αργίλου πάχους 1 m και κλίσης 4%. Αν η ετήσια βροχόπτωση είναι 900 mm, από την οποία το 67% χάνεται λόγω εξάτμισης, υπολογίστε:

- Την ποσότητα των παραγόμενων στραγγισμάτων και
- Το χρόνο κορεσμού των απορριμμάτων και εξόδου των στραγγισμάτων από το χώρο της ταφής.

Στον υπολογισμό του ρυθμού διήθησης των στραγγισμάτων μέσα από τα απορρίμματα, αγνοήστε τις διαχωριστικές στρώσεις αργίλου πάχους 250 mm.

#### Λύση

Οι υποθέσεις που πρέπει να γίνουν και βασίζονται σε δεδομένα της βιβλιογραφίας είναι οι εξής:

1. Πυκνότητα των απορριμμάτων πριν τη συμπίεση =  $300 \text{ kg/m}^3$
2. Μέση περιεχόμενη υγρασία (15-40%) πριν τη συμπίεση = 25% κ.β.  
(Πρέπει να προσδιορισθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια κατά τη λειτουργία της εγκατάστασης με μετρήσεις πεδίου)
3. Πυκνότητα καλά συμπιεσμένων απορριμμάτων =  $600 \text{ kg/m}^3$
4. Μέγιστη περιεχόμενη υγρασία συμπιεσμένων απορριμμάτων = 30% κ.ο. (Να μετρηθεί κατά τη λειτουργία).

α) Ετήσια βροχόπτωση (από αρχεία της περιοχής) = 900 mm  
 Μείον η απώλεια από εξατμισοδιαπνοή (Πιν. Π.2):  $(67\%) \times 1/2 = 300 \text{ mm}$   
Μείον η απώλεια επιφανειακής απορροής (Σχ. Π.1):  $(17\%) = 150 \text{ mm}$   
 Ετήσια παραγωγή στραγγισμάτων = 450 mm

β) Συγκρατούμενο νερό

Στο αργιλώδες έδαφος = 45% για τη λιγότερο αδιαπέραστη άργιλο (Σχ. Π.2). Το έδαφος θεωρείται κορεσμένο, όταν δεν μπορεί να συγκρατήσει επιπλέον νερό.

Στα εισερχόμενα απορρίμματα

- Ως βάση υπολογισμού θεωρούμε βάρος απορριμμάτων = 1000 kg
- Βάρος νερού/μονάδα βάρους απορριμμάτων (υπόθεση 2) = 25%
- Βάρος νερού σε 1000 kg απορριμμάτων = 250 kg
- Όγκος νερού = βάρος νερού/πυκνότητα νερού =  $250 \text{ kg} / 1000 \text{ kg/m}^3 = 0,25 \text{ m}^3$

Στα συμπιεσμένα απορρίμματα

Όγκος συμπιεσμένων απορριμμάτων = βάρος/πυκνότητα =  $1000 \text{ kg} / 600 \text{ kg/m}^3 = 1,667 \text{ m}^3$

Όγκος νερού / μονάδα όγκου συμπιεσμένων =  $0,25 \text{ m}^3 / 1,667 \text{ m}^3 = 0,15 = 15\%$

Έτσι, η διαθέσιμη ικανότητα συγκράτησης νερού στα συμπιεσμένα απορρίμματα είναι:

Μέγιστη δυναμικότητα (υπόθεση 4) = 30%

Μείον αρχική ποσότητα νερού στα απόβλητα = 15%

Διαθέσιμη ικανότητα συγκράτησης = 15%

Συνεπώς, με παραγωγή στραγγισμάτων 450 mm/έτος, η διήθηση μέσα από 6 m απορριμμάτων με ικανότητα συγκράτησης 15%, θα γίνει σε :

$$0,15 \times 6 \text{ m} / 0,450 \text{ m/έτος} = \underline{\underline{2 \text{ έτη}}}$$

Το παράδειγμα αυτό μας δείχνει πως ένα ισοζύγιο μάζας νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ποσότητας στραγγισμάτων και του χρόνου εξόδου τους. Στην πραγματικότητα, σε ένα χώρο υγειονομικής ταφής, τα διάφορα υλικά δεν είναι πάντα τοποθετημένα μέσα στο έδαφος ή η επιφανειακή απορροή του νερού της γύρω περιοχής μπορεί να καταλήγει στο χώρο ταφής και όχι σε κάποιο σύστημα ομβρίων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία άμεσου προβλήματος ελέγχου των στραγγισμάτων. Το ισοζύγιο του νερού παρουσιάζει πολλές ατέλειες, δίνει όμως τη δυνατότητα σύγκρισης των προβλημάτων που δημιουργούν τα στραγγίσματα κάτω από διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Τα στραγγίσματα μπορεί να είναι αμελητέα σε ξηρά κλίματα ή να ξεπερνούν ακόμη και το 100% της βροχόπτωσης σε περιπτώσεις ακατάλληλου σχεδιασμού σε υγρές συνθήκες.

### Έλεγχος στραγγισμάτων

Στη βιβλιογραφία βρίσκεται ότι για απορρίμματα με πυκνότητα  $330 \text{ kg/m}^3$  η ποσότητα των υγρών φτάνει τα  $450 \text{ L/ton}$  στερεών αποβλήτων. Αυτή η συγκεκριμένη αναλογία χρησιμοποιείται μάλιστα στην Αγγλία, όπου εφαρμόζεται η ταυτόχρονη διάθεση στερεών και υγρών αποβλήτων.

Όταν επιτευχθεί ο κορεσμός των απορριμμάτων με υγρά απόβλητα, τα στραγγίσματα μεταναστεύουν προς τον υδροφόρο ορίζοντα. Ο μέγιστος ρυθμός διύλισης μέσω του εδάφους συμβαίνει, όταν το έδαφος κορεστεί με νερό και δεν μπορεί να απορροφήσει άλλο. Τότε, ο ρυθμός μεταφοράς μέσω ενός ομογενούς μέσου είναι ανάλογος προς την υδραυλική κλίση που προκαλεί τη ροή. Αυτή η σχέση είναι γνωστή ως νόμος του Darcy που δίνεται από την Εξ. (1.4):

$$Q = K \cdot S \cdot A = \varepsilon \cdot v \cdot A \quad (2.2)$$

Τιμές του πορώδους και της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά προσέγγιση παραθέτονται στον Πιν. 2.4.

### Παράδειγμα Π.2

#### Ρύπανση υδροφόρου ορίζοντα

Θεωρώντας ότι ο χώρος υγειονομικής ταφής που περιγράψαμε στο προηγούμενο παράδειγμα είναι τοποθετημένος σε άργιλο με πορώδες 50% με συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας  $K = 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ , τίθενται τα ακόλουθα ερωτήματα:

- α) Πόσος χρόνος θα χρειαζόταν για τα στραγγίσματα, ώστε αυτά να μεταφερθούν από τον πυθμένα της εγκατάστασης στον υδροφόρο ορίζοντα  $1,5 \text{ m}$  χαμηλότερα, θεωρώντας ότι τα στραγγίσματα δεν μένουν στο χώρο της ταφής και ότι το υποκείμενο έδαφος είναι κορεσμένο ;
- β) Πόσος χρόνος θα χρειαζόταν, αν ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας ήταν  $K = 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$  ;

γ) Αν η χώρος της ταφής υπερχειλίζει, τι αποτέλεσμα θα είχε αυτό το γεγονός στο χρόνο μεταφοράς του υγρού στα ερωτήματα α) και β);

### Λύση

α) Χρησιμοποιώντας το νόμο του Darcy έχουμε:

$$v = K \cdot S \cdot A / \varepsilon \cdot A = K \cdot S / \varepsilon$$

Έτσι,

$$K = 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s} \times 86400 \times 365 \text{ s/yr} = 3,15 \text{ cm/yr}$$

H = υψομετρική διαφορά της επιφάνειας του νερού από τον πυθμένα του χώρου ταφής και το ανώτερο τμήμα του υδροφόρου ορίζοντα = 1,5 m

d = απόσταση στην οποία επενεργεί η διαφορά στάθμης H = 1,5 m

$$S = H/d = 1,5/1,5 = 1$$

$$v = K \cdot S / \varepsilon = 3,15 \times 1 / 0,5 = 6,30 \text{ cm/yr}$$

$$t = d/v = 1,5 \text{ m} / 6,30 \times 10^{-2} \text{ m/yr} = \underline{\underline{24 \text{ \u0395\u03c4\u0397}}}$$

β) Αν  $K = 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s} = 31,5 \text{ cm/yr}$  και το πορώδες παραμένει 0,5, τότε

$$t = 1,5 \text{ m} \times 0,5 / 31,5 \times 10^{-2} \text{ m/yr} = \underline{\underline{2,4 \text{ \u0395\u03c4\u0397}}} \text{ (10 φορές ταχύτερα από το (α)).}$$

γ) Αν υπερχειλίζει ο χώρος της ταφής, τότε η υδραυλική δρώσα δύναμη H είναι η διαφορά στην υψομετρική στάθμη ανάμεσα στην επιφάνεια του νερού στο ανώτερο τμήμα του χώρου και στο ανώτερο τμήμα του υδροφόρου ορίζοντα, δηλαδή 9 m. Η απόσταση d που διανύουν τα στραγγίσματα είναι πάλι 1,5 m. Έτσι:

$$S = 9/1,5 = 6$$

$$\text{Οπότε: } v = 6 \cdot K / \varepsilon$$

Τότε για  $K = 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$  προκύπτει:

$$t = d \varepsilon / K S = \underline{\underline{4 \text{ \u0395\u03c4\u0397}}}$$

Για  $K = 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ .

$$t = d \varepsilon / K S = \underline{\underline{0,4 \text{ \u0395\u03c4\u0397}}}$$

Σχόλιο: Οι υπολογισμοί έγιναν θεωρώντας το έδαφος κορεσμένο. Αν αυτό δεν συνέβαινε, οι υπολογισμοί θα γίνονταν πολύπλοκοι και ο χρόνος μεταφοράς θα ήταν ακόμη μικρότερος.

Το παράδειγμα που προηγήθηκε φανερώνει τη σημασία κατασκευής χώρων υγειονομικής ταφής σε αδιαπέραστα εδάφη και της αποφυγής συσσώρευσης στραγγισμάτων μέσα σε αυτούς τους χώρους. Τέτοιες ιδανικές συνθήκες, όμως, δεν είναι πάντα δυνατές και συνεπώς πρέπει να λαμβάνονται πρόσθετα μέτρα για την προστασία των υπογείων υδατικών αποθεμάτων.



Τέτοια μέτρα περιλαμβάνουν την κάλυψη του εδάφους με άργιλο ή γεωμεμβράνες, τη συλλογή, την απομάκρυνση και την επεξεργασία των στραγγισμάτων και την τοποθέτηση συστημάτων καταγραφής των υπογείων υδάτων. Αυτές οι διαδικασίες σκοπεύουν στη εξασφάλιση, ότι ο χώρος μένει όσο το δυνατό πιο ξηρός και ότι τα στραγγίσματα δεν μεταφέρονται στον υδροφόρο ορίζοντα. Τα συγκεκριμένα μέτρα δεν εγγυώνται την ανυπαρξία διαρροών. Εντούτοις, αν συμβεί κάτι τέτοιο, η μείωση των ροών των ρύπων, καθώς το υγρό περνά μέσα από το έδαφος αποτελεί ένα πρόσθετο εμπόδιο της ρύπανσης του υδροφόρου ορίζοντα. Εξαιτίας της διήθησης, της απορρόφησης, της βιολογικής δραστηριότητας και της βροχόπτωσης, το έδαφος αποτελεί ένα ιδιαίτερα αποτελεσματικό μέσο απομάκρυνσης πολλών οργανικών συστατικών, μετάλλων και άλλων ανόργανων ιόντων.

Αντίθετα με την προσπάθεια διατήρησης ξηρών συνθηκών μέσα στο χώρο της υγειονομικής ταφής, μερικοί μελετητές υποστηρίζουν, ότι τα απορρίμματα θα πρέπει να διατηρούνται υγρά. Το γεγονός αυτό επιταχύνει την αναερόβια χώνευση και πράγματι είναι απαραίτητο, αν ο σκοπός του σχεδιασμού είναι εκτός των άλλων και η αξιοποίηση του βιοαερίου. Η συλλογή και ανακύκλωση των στραγγισμάτων επιταχύνουν την αποσύνθεση, και έτσι μειώνεται η συγκέντρωση των ρύπων και ο χρόνος επίτευξης της τελικής σταθεροποίησης της περιοχής. Η απόφαση διατήρησης του χώρου σε υγρές ή ξηρές συνθήκες δεν είναι πάντοτε εύκολη υπόθεση. Για κάθε περίπτωση οι μελετητές θα πρέπει να εξετάζουν σε ποιο βαθμό οι κλιματικές συνθήκες επηρεάζουν θετικά ή αρνητικά, αν το ρεύμα εισόδου των υγρών αποβλήτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ελεγχόμενα, πόσο σημαντικός είναι ο υδροφόρος ορίζοντας, αν η ανάκτηση του βιοαερίου είναι οικονομικά εφικτή και αν υπάρχει ανάγκη επεξεργασίας των στραγγισμάτων. Επειδή η σημασία αυτών των παραγόντων ποικίλει ανάλογα με την τοποθεσία της εγκατάστασης, ο σχεδιασμός ενός χώρου υγειονομικής ταφής πρέπει να είναι ειδικός σε καθεμία περίπτωση.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### ***Ξένη βιβλιογραφία***

1. Alexander Martin, "Biodegradation and Bioremediation", 2<sup>nd</sup> edition, Academic Press, 1999.
2. Baker H. Katherine, Herson S. Diane, "Bioremediation", McGraw-Hil, 1994.
3. Baird Colin, "Environmental Chemistry", second edition, 2000.
4. Committee on in situ bioremediation, "In situ Bioremediation: When does it work?", Water Science and Technology Board, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council, National Academic Press, Washington, 1993.
5. Contaminated Sites Management Working Group, "Site Remediation Technologies: A Reference Manual", Water Technology International Corp., Burlington, Ontario, 1997.
6. EPA 542-R-01-006, "Brownfields Technology Primer: Selecting and Using Phytoremediation for Site Cleanup", Washington, USA, 2001.
7. EPA 542-R-03-009, "Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report (Eleven Edition)", Washington, USA, 2003.
8. EPA 600/R-99/107, "Introduction to Phytoremediation", Cincinnati, Ohio, USA, 2000.
9. Dritsa V. and Rigas F., "Enhanced ligninolytic activity of selected fungi potentially useful in bioremediation applications", WSEAS Transactions on Environment and Development, **2**(9), 1137-1144, 2006.
10. Dritsa V., Rigas F., Doulia D., and Ramirez-Zamora R.M., "Evaluation of selected Polyporaceae and Ganodermataceae fungi as potential pollutant degraders", WSEAS Transactions on Environment and Development, **5**(2), 475-482, 2006.
11. Dritsa V., Rigas F., Natsis K. and Marchant R., "Characterization of a fungal strain isolated from a polyphenol polluted site", Bioresource Technology, **98**, 1741–1747, 2007.
12. Frazar C., "The bioremediation and Phytoremediation of Pesticide-contaminated Sites", EPA, Washington, USA, 2000.

13. Frick C.M., Farrel R.E., Germida J.J., "Assessment of Phytoremediation as an In-situ Technique for Cleaning Oil-Contaminated Sites", Petroleum Technology Alliance of Canada (PTAC), Calgary, Canada, 1999.
14. Gadd G. M., "Fungi in Bioremediation", 2<sup>nd</sup> edition, Cambridge University Press, 2001.
15. John Wright, "Environmental Chemistry", Rutledge introduction to environmental series, London and New York, 2003
16. LaGrega M.D., Buckingham P.L., Evans J.C., "Hazardous Waste Management", 2<sup>nd</sup> ed., McGraw-Hill, Boston, USA, 2001.
17. Lasat M.M., "The Use of Plants for the Removal of Toxic Metals from Contaminated Soil", American Association for the Advancement of Science.
18. Otten Almar, Arne Alphenaar, Charles Pijls, Frank Spuij and Han de Wit, "In Situ Soil Remediation", Kluwer Academic Publishers, 1997.
19. Papadopoulou K., Rigas F. and Doulia D., "Lindane Degradation in Soil by *Pleurotus ostreatus*", WSEAS Transactions on Environment and Development, 5(2), 489-496, 2006.
20. Pivetz B.E., "Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites", EPA, Ada, Oklahoma, USA, 2001.
21. Rigas F., Marchant R., Dritsa V., Kapsanaki-Gotsi E., Gonou-Zagou Z., and Avramides E.J., "Screening of wood rotting fungi potentially useful for the degradation of organic pollutants", Water, Air & Soil Pollution: Focus, 3, 201-210, 2003.
22. Rigas F., Dritsa V., Marchant R., Papadopoulou K., Avramides E.J., and Hatzianestis I., "Biodegradation of Lindane by *Pleurotus ostreatus* via central composite design", Environment International, 31, 191– 196, 2005.
23. Rigas F. and Dritsa V., "Fungal Remediation of Contaminated Sites" in: "Environmental Research at the Leading Edge", Nova Science Publishers, Inc., New York, USA, 2006.
24. Rigas F. and Dritsa V., "Decolorisation of a polymeric dye by selected fungal strains in liquid cultures", Enzyme and Microbial Technology, **39**, 120-124, 2006.
25. Rigas F., Papadopoulou K., Dritsa V., D. Doulia, "Bioremediation of a soil contaminated by Lindane utilizing the fungus *Ganoderma australe* via

- response surface methodology”, Journal of Hazardous Materials, **140**, 325–332, 2007.
26. Sasek V. et al., “The Utilization of Bioremediation to Reduce Soil Contamination: Problems and Solutions”, Kluwer Academic Publishers, 2003.
27. Schnoor J.L., “Phytoremediation”, GWRTAC, Pittsburgh, USA, 1997.
28. Sharma Hari D., Reddy Krishna R., “Geoenvironmental Engineering: site remediation, waste containment and emerging waste management technologies”, John Wiley & Sons, Inc., 2004
29. Sturman P. J., Stewart P. S., Cunningham A. B., Bouwer E. J., Wolfram J. H., “Engineering scale- up of in situ bioremediation processes: a review”, Journal of Contaminant Hydrology, 1995, 19, pp 171- 203
30. Yaron B., R. Calvet, R. Prosa, “Soil Pollution, Processes and Dynamics”, Springer, 1996.

### **Ελληνική βιβλιογραφία**

1. Ρήγας Φώτης, «Επιστήμη και Τεχνολογία Περιβάλλοντος», Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2004.
2. Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Β., “Τεχνολογίες Αποκατάστασης Εδαφών και Υπόγειων Υδάτων από επικίνδυνους ρύπους ”, Εκδόσεις Ζυγός, Αθήνα, 2005.
3. Ρήγας Φ. και Ντούλια Δ., “Οξειδωτικές μέθοδοι απομάκρυνσης φυτοφαρμάκων από το πόσιμο νερό”, Περιοδικό Πανελληνίου Συλλόγου Χημικών Μηχανικών “Βιομηχανία - Περιβάλλον”, **7**, 45-50, Αύγουστος - Οκτώβριος 1995.
4. Τσαγκαράκης κ.ά., «Βιοεξυγίανση χώρων υγειονομικής ταφής και διάθεσης απορριμμάτων», ΤΕΕ, Τμήμα Ανατολικής Κρήτης, Ηράκλειο Κρήτης, 2006.
5. Ρήγας Φ., Δρίτσα Β. και Παπαδοπούλου Κ., “Η χρήση λιγνινολυτικών μυκήτων σε εφαρμογές βιοεξυγίανσης”, Χημικά Χρονικά, **2**, 13-21, 2007.



# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

## A

Αγροκαλλιέργεια	40, 58, 61, 64, 66, 69, 113
Αερισμός	19, 103, 122
Αιθυλοβενζόλιο	26, 27, 47, 77, 106
Ακεναφθένια	47
Ακτίνα επιρροής	7, 28, 32, 33, 39, 50, 56
Ακτινομύκητες	61, 83
Αλκαλική καταβύθιση	121
Αναγωγή	122, 132, 133
Αναερόβια χώνευση	145
Ανάκτηση ελεύθερου προϊόντος	18, 121, 145
Ανακύκλωση υλικών	18, 122, 125, 145
Άντληση ελεύθερου προϊόντος	18, 109
Άντληση και επανέγχυση	111
Απόβλητα	
στερεά	77, 80, 81, 85, 101
υγρά	77, 85, 92, 101, 131, 143
πυρηνικά	3, 84
τοξικά	77, 104
Απογύμνωση	
με αέρα	123, 124, 132
με ατμό	124
Απόληψη	
ατμών εδάφους	19-40
Απορρίμματα	
αστικά	95, 139-143, 145
Αποσκήρυνση νερού	122, 134
Αποψίλωση	69
Άργιλος	6, 136

## B

Βαθμός ωρίμανσης ρύπανσης	10
Βακτήρια	
ετερότροφα	40, 44, 45, 46, 48, 49, 56, 61, 62, 63, 65, 68, 82, 83
αυτότροφα	71
Βενζίνη	26, 47
Βενζόλιο	26, 27, 47, 97
Βιοαερισμός	40-56, 108, 115
Βιοαναρρόφηση	40, 57, 58, 109
Βιοαντιδραστήρες	
ενεργού ιλύος	121, 130

σταθερής μεμβράνης	121, 130
Βιοαποδόμηση	40, 46-49, 57, 60, 62-65, 68, 71, 109, 111, 112, 131
Βιοαποδομησιμότητα	40, 42, 43, 47, 67
Βιοεξυγίανση	
φυτοβοηθούμενη	82
Βιοεπεξεργασιμότητα	65, 67, 68, 69, 71
Βουτάνιο	47
Βροχόπτωση	61, 66, 71, 94, 140-143, 145

## Δ

Δεκάνια	47
Δεκατετράνια	47
Δεκατριάνια	47
Διάγραμμα σωληνώσεων και οργάνων	30, 53
Διαπερατότητα	5-7, 17, 20-24, 28, 38, 42, 43, 44, 50, 56, 64, 67, 73, 107-111, 115, 140
Διαστρωμάτωση	21, 23, 24, 28, 33, 44, 50
Διαχωρισμός με μεμβράνες	121, 131-133
Διαχωριστές	119, 121
Διβρωμοαιθυλένιο	26, 27
Διεργασίες απορρόφησης	81, 89, 105, 144
Διήθηση	94, 102, 121, 122, 132, 133, 135-137, 141, 142, 145
μετάλλων	77
Διμεθυλοπεντένια	47
Δωδεκάνια	47

## E

Εδάφους	
θερμοκρασία	4-6, 9, 11-13, 15, 17-36, 38-46, 48-69, 71-78, 80, 83-86, 88, 90, 91, 95, 96, 99, 100, 102, 103, 105-111
πλύση	72
Έλεγχος	
αποτελεσματικότητας	15, 21, 22, 42, 43
Ελεύθερες ρίζες υδροξυλίου	80, 89, 126
Εμφύσηση αέρα	42, 112, 115

Ενεργός άνθρακας.....36, 128, 129  
 Εννεάνιο .....47  
 Ένταση ανέμου .....61  
 Εξασθενές χρώμιο ..... 133  
 Εξάτμιση ρύπων ..19, 21, 25-28, 40, 49,  
 57, 59, 60, 62, 68, 73, 112  
 Εξατμισοδιαπνοή ..... 77, 92, 94,96,  
 140,142  
 Εξυγίανση  
 εκτός τόπου .7, 12, 13, 20, 29, 36, 51,  
 60, 61, 75, 76, 78, 90, 91, 95, 109,  
 115, 117-119, 121  
 επί τόπου... 10, 13, 14, 15, 18, 27, 29,  
 30, 36, 39, 48, 49, 51-56, 61, 64,  
 66, 67, 75-77, 83, 92, 94, 97, 107,  
 111, 115, 117  
 Επεξεργασία  
 απαερίων... 13, 17, 18, 21, 29, 30, 32,  
 39, 42, 48, 49, 51, 52, 54, 56, 58,  
 59, 60, 66, 67, 69, 72, 73, 76, 78,  
 84, 85, 90, 94, 95, 98, 101, 102,  
 106, 108, 109, 119, 123, 124  
 εδάφους .....73, 108, 109  
 Επιφανειακή απορροή ..... 140, 143  
 σφράγιση .....30  
 Εσωτερική διαπερατότητα 7, 23, 24, 38,  
 44, 56

**H**

Ηλεκτροκινητική .....75, 115

**Θ**

Θρόμβωση.....2, 132, 135  
 Θρυμματοποίηση..... 17, 20, 72, 106  
 πνευματική.....106-108, 115  
 υδραυλική .....106-108, 115

**I**

Ιλύος επεξεργασία ..... 121, 130  
 Ιοντεναλλαγή.....2, 119, 130  
 Ισοπεντάνιο.....47

**K**

Καταβύθιση.....113, 121, 122, 132, 135-  
 137  
 Κενό απόληψης .....28, 50  
 Κηροζίνη .....26, 47  
 Κροκίδωση..... 121, 132, 135

Κώνος βύθισης..... 8

**M**

Μεθυλ-τ-βουτυλ-αιθέρας..... 27  
 Μεθυλοβουτάνιο ..... 47  
 Μεθυλοκτάνια ..... 47  
 Μεμβράνες ..... 119  
 Μη περιορισμένοι υδροφορείς..... 4  
 Μόλυνση..... 2  
 Μύκητες..... 40, 61, 82, 83, 98

**N**

Ναφθαλένιο ..... 26, 27, 47  
 Νόμος του Darcy ..... 6, 7, 143, 144  
 Ντίτζελ..... 26, 41, 47, 107

**Ξ**

Ξυλόλια..... 26, 27, 47, 77, 78, 106

**O**

Όγκος πόρων ..... 29, 51  
 Όζον ..... 125-127  
 Οκτάνιο..... 47  
 Ομβρία ύδατα ..... 16, 46, 62, 69, 70, 71,  
 143  
 Οξειδωση..... 36, 45, 121, 122, 125-127,  
 132-134  
 Ορθολογικός σχεδιασμός ..... 28, 50  
 Ορυκτέλαια ..... 26, 47  
 Ουσίες τοξικές ..... 2, 3, 17, 48, 65

**Π**

Παλμική άντληση ..... 38  
 Περιβάλλοντος.... 2, 17, 21, 61, 66, 104,  
 106, 107  
 εξυγίανση ..... 66  
 προστασία ..... 103  
 προστασία..... 1  
 Περιορισμένοι υδροφορείς ..... 5  
 Πετρέλαιο θέρμανσης..... 26, 47  
 Πηγές φυσικές ..... 128, 129  
 Πορώδες..... 5-7, 29, 30, 32, 51, 52, 67,  
 136, 143, 144  
 Προπυλοβενζόλια..... 47  
 Προσανατολισμός φρεατίων. 30, 31, 32,  
 52  
 Προσρόφηση..... 2, 21, 121, 132



Προχωρημένη οξείδωση..... 125, 127  
 Πρωτόζωα .....61  
 Πτητικότητα.....21, 22, 64, 67, 121, 124,  
 127, 128, 130, 131, 137  
 Πυρένια.....47

**P**

Ριζοδιήθηση ....2, 76, 77, 81, 84, 85, 86,  
 91, 92, 105  
 Ριζοσφαιρική βιοεξυγίανση ....2, 81, 82,  
 90, 105  
 Ρύθμιση pH.....69, 122  
 Ρύπανση.....2  
 εδάφους. 18, 25, 32, 42, 59, 110, 125,  
 127  
 χημική..... 1, 2, 3, 18, 32, 73, 92  
 Ρυπαντής.....2  
 Ρύπος.....2

**Σ**

Σημεία βρασμού ..23, 26, 44, 49, 56, 73  
 Σταθερά Henry.....23, 27, 39, 44, 97  
 Στερεοποίηση ..... 74, 103  
 Στραγγίσματα.....66, 69, 81, 83, 85, 86,  
 132, 139, 140, 141-145  
 Συμμεταβολισμός.....78  
 Συστήματα οξείδωσης ..... 121  
 παράδοσης/ανάκτησης..... 106

**T**

Ταπείνωση υδροφόρου ορίζοντα.30, 52  
 Τάση ατμών...23, 25, 26, 39, 44, 49, 97  
 Τερματικός δέκτης ηλεκτρονίων.....45  
 Τετρα-αιθυλιούχος μόλυβδος.....26, 27  
 Τοιχία επεξεργασίας .....113, 115  
 Τολουόλιο .....26, 27, 97  
 Τριχλωροαιθυλένιο .....77, 80, 88, 93

**Υ**

Υαλοποίηση.....74, 75, 108, 115

Υδατοχωρητικότητα45, 62, 95, 140, 141  
 Υδραυλική  
 αγωγιμότητα ..... 5, 6, 7, 9, 118, 143  
 κλίση.....6, 7, 143  
 Υδραυλικό ύψος ..... 5  
 Υδροφορέας ..... 4, 5, 7, 8, 9, 118  
 λιμνάζων ή στάσιμος..... 4, 5  
 Υδροφορείς  
 περιορισμένοι..... 4  
 υπόγειοι..... 1, 4, 5, 8  
 Υδροφόρος ορίζοντας .... 7, 8, 9, 12, 23,  
 24, 25, 28, 32, 33, 38, 39, 44, 45, 50,  
 56, 92, 95, 109, 112, 142-145  
 Υπεροξειδάσες ..... 82

**Φ**

Φθορανθένια ..... 47  
 Φίλτρα ενεργού άνθρακα.121-124, 128-  
 133, 136, 137  
 Φραγή..... 20, 33, 35, 52, 53  
 Φρεάτια  
 κατακόρυφα .. 5, 7, 19, 30, 31, 32, 33,  
 35, 36, 38, 39, 40, 41, 53, 54, 115  
 έγχυσης ..... 30, 31, 52  
 άντλησης ..... 7, 112  
 απόληψης..... 30, 31  
 κατακόρυφα ..... 52  
 οριζόντια..... 52  
 Φυσητήρας .. 30, 34, 35, 39, 52, 56, 123  
 Φυσική απομείωση..... 102, 106, 113  
 Φυτοδιέγερση ..... 81, 82  
 Φυτοεκχύλιση . 2, 76, 77, 81, 84, 86, 90,  
 91, 92, 95, 98, 99, 102, 105  
 Φυτοεξάτμιση ..... 80  
 Φυτοεξυγίανση ..... 1, 76, 101, 103  
 Φυτομετασχηματισμός 2, 76, 78, 81, 86,  
 87, 88, 105  
 Φυτοσταθεροποίηση .. 2, 77, 78, 81, 83,  
 86, 90, 92, 95, 105

**X**

Χημική οξείδωση ..... 122

**ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ**

**ΦΩΤΗΣ ΡΗΓΑΣ**

**ΕΜΠ 2013**