



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικινδύνων Αποβλήτων
Laboratory of Toxic and Hazardous Waste Management

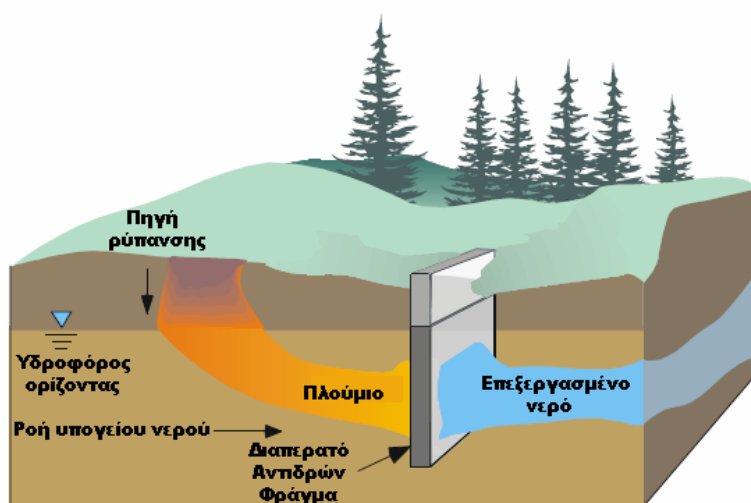


Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος

Π.Μ.Σ. ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΡΥΠΑΣΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΠΡΟΪΟΝΤΑ
ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΑΥΤΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ
ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ»



ΜΟΥΧΤΑΡΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΤΡΟΚΛΟΣ

ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ: ΔΡ. ΓΙΔΑΡΑΚΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

Χανιά, 2007



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικινδύνων Αποβλήτων
Laboratory of Toxic and Hazardous Waste Management



Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος

Π.Μ.Σ. ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΡΥΠΑΣΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΠΡΟΪΟΝΤΑ
ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΑΥΤΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ
ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ»

ΜΟΥΧΤΑΡΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΤΡΟΚΛΟΣ

ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Εξεταστική επιτροπή: Γιδαράκος Ευάγγελος (Επιβλέπων Καθηγητής)
Πασαδάκης Νικόλαος
Διαμαντόπουλος Ευάγγελος

Χανιά, 2007

*My head is full of suspicion
I'm coming home sometime
I've swallowed too much oily water
It keeps slipping down my spine*

Blur
Oily water

ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και στήριξαν κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης διατριβής.

Έτσι, θέλω αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου, κ. Ευάγγελο Γιδαράκο, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου τα τελευταία 3 χρόνια της συνεργασίας μας, καθώς επίσης και για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, αλλά και για τη στήριξη και βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στο Τμήμα.

Επιπρόσθετα, ευχαριστώ τους Καθηγητές κ.κ. Διαμαντόπουλο Ευάγγελο και Πασαδάκη Νικόλαο, για την εξέταση και τον έλεγχο της παρούσας εργασίας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέρφους Βαμβασάκη Ιωάννη και Μαυράκη Νικήτα, με τους οποίους συνεργαστήκαμε άψογα τα τελευταία χρόνια, εργαζόμενοι σε παρεμφερείς εργασίες, ανταλλάσσοντας απόψεις και ιδέες καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων μας.

Επιπλέον, ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Νικόλαο Πασαδάκη και το επιτελείο του, οι οποίοι σε όλη τη διάρκεια των αναλύσεών μου με βοήθησαν και με κατάρτισαν στο χειρισμό του εξοπλισμού του εργαστηρίου τους.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συνάδερφο και φίλη Καλλιόπη Αναστασιάδου, της οποίας οι συμβουλές από την πρώτη μέχρι την τελευταία στιγμή της διεξαγωγής του πειράματος υπήρξαν καθοριστικές για την επιτυχή ολοκλήρωση αυτού.

Οφείλω, επίσης, να ευχαριστήσω όλους τους συναδέρφους του Εργαστηρίου Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων των τελευταίων 2 ετών, οι οποίοι με κάθε τρόπο με βοήθησαν στην εκπόνηση της συγκεκριμένης διατριβής.

Συνολικά, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου ήταν δίπλα μου, παρέχοντας μου ψυχολογική, αλλά και υλική υποστήριξη.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τη φίλη μου Ζολώτα Χριστίνα και τη μητέρα της Ζαφείρω, στη μνήμη της οποίας αφιερώνεται και η παρούσα εργασία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ρύπανση του υπογείου νερού, εξ' αιτίας πετρελαϊκών ρύπων αποτελεί εδώ και αρκετά χρόνια, ζωτικής σημασίας πρόβλημα για τους κατοίκους περιοχών που γειτνιάζουν με διυλιστήρια, σταθμούς μεταφόρτωσης πετρελαιοειδών, αλλά και πρατήρια υγρών καυσίμων. Οι συμβατικές τεχνολογίες που έχουν ήδη εφαρμοστεί, όπως η άντληση και επεξεργασία (pump-and-treat) και η ex-situ βιοαποδόμηση, μπορούν να επεξεργαστούν συγκεκριμένες ποσότητες υπογείου νερού ημερησίως, ενώ μεγάλοι όγκοι ρυπασμένου ύδατος προσπερνούν τις κατασκευές αυτές, χωρίς να εξυγιαίνονται. Επιπρόσθετα, οι συγκεκριμένες μέθοδοι είναι κοστοβόρες, καθώς απαιτούν διαρκή παρουσία και επίβλεψη από προσωπικό, όπως επίσης και διαρκή χρήση μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Τη λύση στο πρόβλημα αυτό έρχεται να δώσει η καινοτόμος τεχνολογία των ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ (*PERMEABLE REACTIVE BARRIERS - PRB*), η οποία βρίσκει εφαρμογή στην εξυγίανση υπογείων υδάτων από διάφορους ρύπους, όπως βαρέα μέταλλα, στραγγίσματα από ΧΥΤΑ, αλλά και πετρελαιοειδή. Η φιλοσοφία των ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ βασίζεται στην παθητική εξυγίανση του υπογείου νερού, μέσω της αλληλεπίδρασής του με το εκάστοτε αντιδρών υλικό. Η διαφοροποίηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας από τις υπόλοιπες είναι ότι καθιστά εφικτή την εξυγίανση ολόκληρου του ρεύματος του υπογείου νερού και όχι μόνο των αντλούμενων ποσοτήτων.

Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε προσομοίωση ενός συγκεκριμένου υπογείου υδροφορέα, ρυπασμένου από προϊόντα πετρελαίου, ο οποίος στη συνέχεια εξυγιάνθηκε με τη χρήση της τεχνολογίας των ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ. Τα πληρωτικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο φράγμα ήταν το κομπόστ και το ορυκτό διατομίτης, ενώ το πείραμα διεξήχθη σε πιλοτική δεξαμενή κατασκευασμένη από plexiglass, όπου και εξετάστηκαν διαφορετικοί χρόνοι παραμονής για κάθε υλικό.

Τα αποτελέσματα απέδειξαν την υψηλή απόδοση της τεχνολογίας και για τα δύο υλικά, οπότε και η εφαρμογή ενός συστήματος ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ προτείνεται για κάθε περίπτωση ρύπανσης υπογείου υδροφορέα από προϊόντα πετρελαίου.

ABSTRACT

Groundwater pollution, caused by petroleum products, constitutes a very important problem for the residents of regions that abut on refineries, petroleum transshipment stations, as well as gas stations. The conventional technologies that have already been applied, such as pump-and-treat systems and bioremediation installations, can remediate specific amounts of the groundwater each day, while a large volume of polluted water may not be treated. Moreover, those methods are very expensive, in terms of energy consumption and cost of the personnel.

The solution to this major problem is given by the innovative technology of the PERMEABLE REACTIVE BARRIERS (PRB), which can be applied for the remediation of any pollutant regarding the groundwater, such as heavy metals, leachate from landfills, as well as petroleum products. The philosophy of PERMEABLE REACTIVE BARRIERS is based in the passive remediation of the groundwater, caused by its interaction with every reacting material. The differentiation of this technology is that in this case, the whole amount of the groundwater is being remediated, contrary to the others that are treating only specific amounts.

In this thesis, a simulation of a specific aquifer, carrying petroleum products, was accomplished. This aquifer was later remediated by the use of the PERMEABLE REACTIVE BARRIERS technology. The reactive materials used in this case were Municipal Compost and Diatomaceous Earth (*diatomite*). The experiment took place in a pilot tank, which is made of plexiglass.

The results of the experiments have proved the efficiency of the technology on both materials, so the application of a PERMEABLE REACTIVE BARRIERS system is proposed for every case of underground water pollution, caused by petroleum products.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

| | | |
|-------|---|------|
| 1.1 | ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΔΙΑΠΕΡΑΤΑ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ | 1-1 |
| 1.2 | ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ | 1-2 |
| 1.3 | ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ | 1-2 |
| 1.4 | ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ | 1-4 |
| 1.4.1 | Απαιτούμενα Δεδομένα για Ορθό Σχεδιασμό και την Κατασκευή των PRB's | 1-5 |
| 1.4.2 | Στόχοι κατά το σχεδιασμό των PRB's | 1-6 |
| 1.4.3 | Διεργασίες που μειώνουν την απόδοση των PRB's σε σχέση με το χρόνο | 1-8 |
| 1.4.4 | Ιδανικές Τοποθεσίες για Εγκατάσταση Ενεργών Διαπερατών Φραγμάτων | 1-9 |
| 1.5 | <i>ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ PRB'S - MONITORING</i> | 1-9 |
| 1.6 | ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ / ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΩΝ PRB'S | 1-11 |
| 1.7 | ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ / ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΩΝ PRB'S | 1-11 |
| 1.8 | ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΜΕΤΑΞΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΤΑ PRB | 1-12 |
| 1.8.1 | Κόστος μελέτης | 1-12 |
| 1.8.2 | Κόστος εγκατάστασης | 1-13 |
| 1.8.3 | Κόστος λειτουργίας | 1-14 |
| 1.8.4 | Κόστος αντικατάστασης | 1-15 |
| 1.8.5 | Κόστος monitoring | 1-15 |
| 1.8.6 | Κόστος απομάκρυνσης | 1-16 |
| 1.8.7 | Συνολικό κόστος | 1-17 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ

ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

| | | |
|-------|---|-----|
| 2.1 | ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ | 2-1 |
| 2.1.1 | Τεχνολογία αδιαπέρατων φραγμάτων | 2-1 |
| 2.1.2 | Λεπτά αντιδρώντα φράγματα | 2-2 |
| 2.1.3 | Γεωτρήσεις και ανάμιξη σε μεγάλο βάθος | 2-2 |
| 2.1.4 | Τεχνολογία "jet" | 2-3 |
| 2.1.5 | Εφαρμογή των αντιδρώντων φραγμάτων σε ήδη υπάρχοντα συστήματα | 2-4 |

| | | |
|-------|--|------|
| 2.1.6 | Συστήματα βασισμένα σε πηγάδια | 2-4 |
| 2.1.7 | Συστήματα έγχυσης | 2-5 |
| 2.2 | ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ | 2-6 |
| 2.2.1 | Μονής φάσης φράγμα | 2-6 |
| 2.2.2 | Διπλής φάσης φράγμα | 2-7 |
| 2.2.3 | Σύνθετο αδιαπέρατο φράγμα | 2-7 |
| 2.2.4 | Λεπτά φράγματα | 2-7 |
| 2.2.5 | Φράγματα από σωρούς φύλλων | 2-8 |
| 2.2.6 | Μη διαπερατά φράγματα με χρήση πασσάλων και υψηλή πίεση | 2-9 |
| 2.2.7 | Φράγματα έγχυσης | 2-9 |
| 2.2.8 | Παγωμένα φράγματα | 2-9 |
| 2.3 | ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ | 2-10 |
| 2.3.1 | Γενικά περί γεωμετρίας φράγματος | 2-10 |
| 2.3.2 | Επίδραση της διαμόρφωσης του φράγματος ως της τη ζώνη εγκλεισμού | 2-12 |
| 2.3.3 | Συμπεράσματα για γεωμετρία των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων | 2-13 |
| 2.4 | ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ | 2-14 |
| 2.5 | ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΟΣ ΜΕΣΟΥ | 2-16 |
| 2.6 | ΧΡΟΝΟΣ ΖΩΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ | 2-18 |
| 2.7 | ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΖΩΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΥ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΟΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ | 2-18 |
| 2.7.1 | Χρόνος ζωής της Διαπερατού Αντιδρώντος Φράγματος | 2-18 |
| 2.7.2 | Παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο ζωής της φράγματος | 2-18 |
| 2.8 | ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΩΝ PRB's ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ | 2-19 |
| 2.8.1 | Η Περίπτωση του Offenbach | 2-19 |
| 2.8.2 | Η Περίπτωση της Pantex | 2-21 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΡΥΠΩΝ (BTEX, MTBE)

| | | |
|-------|------------------------------|------|
| 3.1 | ΓΕΝΙΚΑ | 3-1 |
| 3.2 | ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ NAPLs | 3-2 |
| 3.3 | BTEX | 3-3 |
| 3.3.1 | Βενζόλιο | 3-3 |
| 3.3.2 | Τολουόλιο | 3-5 |
| 3.3.3 | Αιθυλο-βενζόλιο | 3-6 |
| 3.3.4 | Ξυλόλιο | 3-8 |
| 3.4 | MTBE | 3-9 |
| 3.5 | Χρωματισμός του ρύπου | 3-11 |

| | |
|--------------------------|------|
| 3.5.1 Δείκτης methyl red | 3-11 |
| 3.5.2 Νιτρική αμμωνία | 3-11 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ

| | |
|--|------|
| 4.1 ΓΕΝΙΚΑ | 4-1 |
| 4.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ | 4-2 |
| 4.2.1 Μονάδα εισαγωγής | 4-2 |
| 4.2.2 Κυρίως τμήμα | 4-3 |
| 4.2.3 Μονάδα εξαγωγής | 4-3 |
| 4.2.4 Λάστιχο - αντλία | 4-4 |
| 4.2.5 Οπές | 4-6 |
| 4.2.6 Πλάκα διαχωρισμού φάσεων | 4-7 |
| 4.2.7 Βρύση | 4-9 |
| 4.2.8 Γρύλος | 4-10 |
| 4.2.9 Δεξαμενές τροφοδοσίας | 4-10 |
| 4.2.10 Κατασκευές για περιορισμό της εξάτμισης | 4-11 |
| 4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΡΥΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ | 4-12 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΈΔΑΦΟΣ - ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΑ ΥΛΙΚΑ

| | |
|---|-----|
| 5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΠΛΗΡΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΟΥ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΟΣ ΚΕΛΙΟΥ | 5-1 |
| 5.2 ΚΟΜΠΟΣΤ | 5-4 |
| 5.3 ΔΙΑΤΟΜΙΤΗΣ | 5-6 |
| 5.3.1 Γενικά για το διατομίτη | 5-6 |
| 5.3.2 Χαρακτηριστικά και χρήσεις | 5-7 |
| 5.3.3 Χρήσεις διατομίτη ως προσροφητικό υλικό - Διεθνής επιστημονική εμπειρία | 5-8 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ

| | |
|--|-----|
| 6.1 ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ | 6-1 |
| 6.1.1 Ισόθερμη Freundlich | 6-1 |
| 6.1.2 Γραμμική Ισόθερμη | 6-3 |
| 6.1.3 Ισόθερμη Langmuir | 6-6 |
| 6.2 Η ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ ΣΤΑ ΔΙΑΠΕΡΑΤΑ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ | 6-7 |
| 6.3 ΜΙΚΡΟΒΙΑΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ | 6-9 |

| | | |
|-------|--|------|
| 6.3.1 | Αύξηση σε μη περιοριστικές συνθήκες περιβάλλοντος | 6-9 |
| 6.3.2 | Αύξηση σε περιοριστικές συνθήκες περιβάλλοντος | 6-11 |
| 6.3.3 | Συσχέτιση βιοαποικοδόμησης με τη λειτουργία αντιδραστήρων Slurry | 6-12 |
| 6.4 | ΒΙΟΑΠΟΔΟΜΗΣΗ | 6-14 |
| 6.4.1 | <i>In-situ</i> βιο-απορρύπανση / Μηχανισμοί βιο-μετατροπής | 6-14 |
| 6.4.2 | Μικροβιακός μεταβολισμός | 6-14 |
| 6.4.3 | Μηχανισμοί απορρόφησης των NAPL's από μικροοργανισμούς | 6-15 |
| 6.5 | ΒΙΟΑΠΟΔΟΜΗΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ | 6-16 |
| 6.5.1 | Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες | 6-17 |
| 6.5.2 | Βιοαποδόμηση MTBE | 6-18 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ

| | | |
|---------|---|------|
| 7.1 | ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ | 7-1 |
| 7.1.1 | Ταξινόμηση των βασικών χρωματογραφικών τεχνικών | 7-2 |
| 7.1.2 | Το χρωματογράφημα | 7-3 |
| 7.1.3 | Κατανομή των συστατικών ανάμεσα στις φάσεις | 7-4 |
| 7.1.4 | Χρόνος συγκράτησης | 7-4 |
| 7.1.5 | Η διαχωριστική ικανότητα | 7-5 |
| 7.1.6 | Ποιοτική και ποσοτική χρωματογραφική ανάλυση | 7-6 |
| 7.2 | ΑΕΡΙΑ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ | 7-7 |
| 7.2.1 | Αρχή Αέριας Χρωματογραφίας | 7-7 |
| 7.2.2 | Βασικές έννοιες | 7-8 |
| 7.2.3 | Ανιχνευτές | 7-10 |
| 7.2.3.1 | Ανιχνευτής Ιονισμού Φλόγας (F.I.D.) | 7-11 |
| 7.2.3.2 | Ανιχνευτής Θερμικής Αγωγιμότητας (T.C.D.) | 7-12 |
| 7.2.3.3 | Ανιχνευτής Δέσμευσης Ηλεκτρονίων (E.C.D.) | 7-13 |
| 7.2.3.4 | Ανιχνευτής Φωτοϊονισμού (P.I.D.) | 7-13 |
| 7.3 | ΜΙΚΡΟΕΚΧΥΛΙΣΗ ΣΤΕΡΕΗΣ ΦΑΣΗΣ (SPME) | 7-13 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

| | | |
|-----|--|-----|
| 8.1 | ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ | 8-1 |
| 8.2 | ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HEAD-SPACE | 8-1 |
| 8.3 | ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΡΥΠΟΥ | 8-3 |
| 8.4 | ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΡΥΠΟΥ, ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΚΑΙ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ | 8-4 |

| | | |
|-------|--|------|
| 8.4.1 | Προετοιμασία ρύπου και τροφοδοσίας | 8-4 |
| 8.4.2 | Προσαρμογή πιλοτικής δεξαμενής | 8-5 |
| 8.5 | ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ | 8-8 |
| 8.5.1 | Τυφλό | 8-8 |
| 8.5.2 | Τοποθέτηση κομπόστ ως αντιδρών υλικό | 8-9 |
| 8.5.3 | Τοποθέτηση διατομίτη ως αντιδρών υλικό | 8-10 |
| 8.5.4 | Δειγματοληψία | 8-10 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ / ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

| | | |
|-------|--|------|
| 9.1 | ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΔΑΦΟΥΣ | 9-1 |
| 9.1.1 | Αποτελέσματα κοκκομετρικών αναλύσεων | 9-1 |
| 9.1.2 | Αποτελέσματα αναλύσεων υδροπερατότητας | 9-4 |
| 9.2 | ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΑΕΡΙΟΥ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΟΥ | 9-8 |
| 9.2.1 | Βαθμονόμηση Αέριου Χρωματογράφου | 9-8 |
| 9.3 | ΑΝΑΛΥΣΗ MTBE | 9-11 |
| 9.3.1 | MTBE Τυφλό | 9-11 |
| 9.3.2 | MTBE στο κομπόστ | 9-14 |
| 9.3.3 | MTBE στο διατομίτη | 9-16 |
| 9.4 | ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΕΝΖΟΛΙΟΥ | 9-18 |
| 9.4.1 | Βενζόλιο Τυφλό | 9-18 |
| 9.4.2 | Βενζόλιο στο κομπόστ | 9-21 |
| 9.4.3 | Βενζόλιο στο διατομίτη | 9-23 |
| 9.5 | ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΛΟΥΟΛΙΟΥ | 9-25 |
| 9.5.1 | Τολουόλιο Τυφλό | 9-25 |
| 9.5.2 | Τολουόλιο στο κομπόστ | 9-27 |
| 9.5.3 | Τολουόλιο στο διατομίτη | 9-29 |
| 9.6 | ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΙΘΥΛΟ-ΒΕΝΖΟΛΙΟΥ | 9-32 |
| 9.6.1 | Αιθυλο-βενζόλιο Τυφλό | 9-32 |
| 9.6.2 | Αιθυλο-βενζόλιο στο κομπόστ | 9-34 |
| 9.6.3 | Αιθυλο-βενζόλιο στο διατομίτη | 9-36 |
| 9.7 | ΑΝΑΛΥΣΗ Π-ΞΥΛΟΛΙΟΥ | 9-39 |
| 9.7.1 | π-Ξυλόλιο Τυφλό | 9-39 |
| 9.7.2 | π-Ξυλόλιο στο κομπόστ | 9-41 |
| 9.7.3 | π-Ξυλόλιο στο διατομίτη | 9-43 |
| 9.8 | ΑΝΑΛΥΣΗ Ο-ΞΥΛΟΛΙΟΥ | 9-46 |

Περιεχόμενα

| | | |
|-------|-------------------------|------|
| 9.8.1 | ο-Ξυλόλιο Τυφλό | 9-46 |
| 9.8.2 | ο-Ξυλόλιο στο κομπόστ | 9-48 |
| 9.8.3 | ο-Ξυλόλιο στο διατομίτη | 9-50 |
| 9.9 | ΙΣΟΘΕΡΜΕΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ | 9-53 |
| 9.10 | pH | 9-61 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ / ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

| | | |
|---------|---|------|
| 10.1 | ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 10-1 |
| 10.2 | ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ | 10-3 |
| 10.3 | ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ | 10-5 |
| 10.3.1 | Εφαρμογή στην εξυγίανση από πετρελαϊκούς ρύπους | 10-5 |
| 10.3..2 | Άλλες εφαρμογές | 10-7 |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

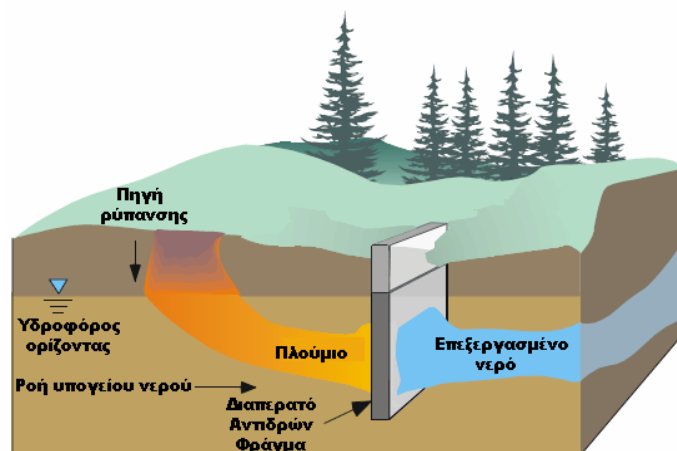
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κεφάλαιο 1

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΔΙΑΠΕΡΑΤΑ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ

Σε διάφορα σημεία, όπου φυλάσσονται ή επεξεργάζονται επικίνδυνα απόβλητα, παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις σε βαρέα μέταλλα, πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες, καθώς και αλογονωμένες οργανικές ουσίες, οι οποίες διεισδύουν στο υπέδαφος και καταλήγουν στο υπόγειο νερό, ρυπαίνοντάς το. Οι συμβατικές τεχνολογίες, όπως το pump-and-treat απαιτούν τη χρήση μεγάλων ποσών ενέργειας, αυξάνοντας το κόστος λειτουργίας, ενώ δεν κρίνονται επαρκείς στην περίπτωση, όπου οι ρύποι καθιζάνουν στον πυθμένα του υδροφορέα ή προσροφώνται στα εδαφικά σωματίδια. Έτσι, η εναλλακτική μέθοδος της χρήσης ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ (PERMEABLE REACTIVE BARRIERS) αποτελεί μια οικονομικά, αλλά και πρακτικά συμφέρουσα λύση στο πρόβλημα της ρύπανσης των υπογείων υδάτων.



Εικόνα 1-1: Τυπική δομή Διαπερατού Αντιδρώντος Φράγματος
(Πηγή: www.powellassociates.com)

Η τεχνολογία των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων είναι μια νέα μέθοδος εξυγίανσης του υπόγειου νερού και περιλαμβάνει φυσικοχημική και βιολογική in situ επεξεργασία. Οι πλέον συνήθεις διεργασίες είναι: οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, προσρόφησης, ιονανταλλαγής και βιοαποδόμησης. Τα αντιδρώντα υλικά τοποθετούνται υπογείως κατάντι του πλουμίου ρύπανσης, αναγκάζοντάς το να αλληλεπιδράσει με αυτά, καθώς παρεμβαίνουν στην πορεία του.

Έτσι, επιτυγχάνεται εξυγίανση χωρίς πολυδάπανες γεωτρήσεις και άντληση νερού, αφού γίνεται εκμετάλλευση της φυσικής ροής, καθώς το φράγμα τοποθετείται σε σημείο που ανήκει στην πορεία της ροής αυτής, χωρίς να απαιτείται άλλη εξωτερική παρέμβαση. Γενικότερα, αυτή η οικονομικά συμφέρουσα τεχνολογία επιβαρύνει το περιβάλλον πολύ λιγότερο από άλλες μεθόδους. Η τυπική δομή ενός Διαπερατού Αντιδρώντος Φράγματος περιγράφεται στην Εικόνα 1-1.



1.2 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Τα Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα αποτελούν μια αναπτυσσόμενη τεχνολογία εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπογείου νερού. Στην πράξη χαρακτηρίζονται ως μια *in situ* παθητική ζώνη επεξεργασίας, η οποία πληρώνεται με το εκάστοτε αντιδρών υλικό, το οποίο έχει τη δυνατότητα να αποδομεί, να μετατρέπει ή να ακινητοποιεί τους ρύπους, καθώς το υπόγειο νερό ρέει διαμέσου αυτής. Τα φράγματα αυτά τοποθετούνται κάτω από το έδαφος ως αντικαταστάσιμες κατασκευές, σε διάταξη κάθετη με την κατεύθυνση της ροής του ρυπασμένου ύδατος, το οποίο εκμεταλλευόμενο τη φυσική υπόγεια ροή, το νερό εξυγιαίνεται παθητικά, χωρίς να απαιτείται καμία επιπλέον προσθήκη ενέργειας στο σύστημα. Σε σχέση με τη θέση της πηγής ρύπανσης, το φράγμα μπορεί να τοποθετηθεί είτε κατάντι της πηγής, ώστε να αποφευχθεί ο σχηματισμός πλουμίου, είτε κατάντη του δημιουργούμενου πλουμίου, με σκοπό τη μη εξάπλωση αυτού.

1.3 ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Αν και οι φυσικοχημικές και βιολογικές αρχές των φραγμάτων έχουν μελετηθεί τα τελευταία χρόνια, όπως θα περιγραφεί και στο Κεφάλαιο 2, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται πλέον στις μεθόδους κατασκευής, εξ' αιτίας της ύπαρξης πολύ απλών τεχνικών, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υδροφορείς βάθους ως και 20 μέτρων. Σε μεγαλύτερα βάθη, απαιτούνται πιο πολύπλοκες μέθοδοι, όπως τα συστήματα που βασίζονται σε πηγάδια και θα περιγραφούν στη συνέχεια, ώστε να επιτευχθούν τα οικονομικά οφέλη που προσφέρονται.

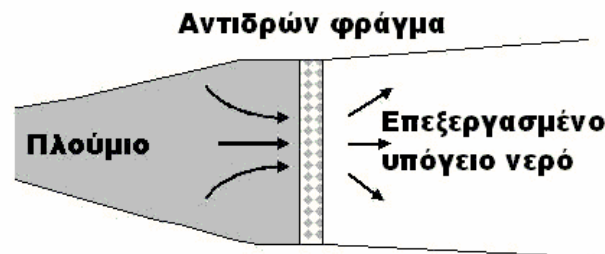
Οι κύριοι τύποι Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων είναι οι εξής:

-  Συνεχόμενα αντιδρώντα φράγματα, μέσω των οποίων διέρχεται το υπόγειο νερό,
-  Συστήματα χοάνης - πύλης, στα οποία μόνο συγκεκριμένες πύλες είναι διαπερατές από το υπόγειο νερό.

Εκτός από το χαμηλό κόστος τους, τα αντιδρώντα φράγματα έχουν και άλλα οφέλη, όπως τη δυνατότητα ημιμόνιμης εγκατάστασης μέσα στη ρυπασμένη περιοχή και την άμεση εκκίνηση της λειτουργίας αμέσως μετά την εγκατάσταση.

Ενεργή Τάφρος Υψηλής Διαπερατότητας

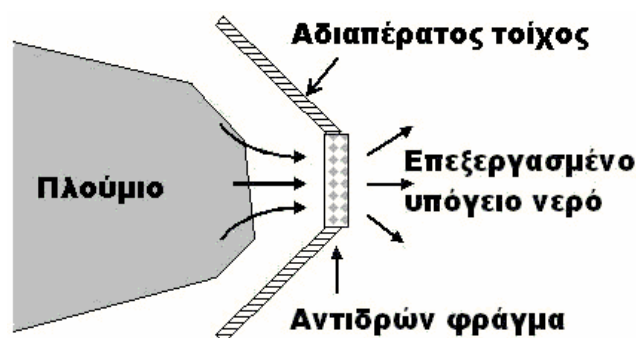
Αποτελεί την απλούστερη των μορφών και συναντάται συνηθέστερα. Η τάφρος πληρώνεται με το αντιδρών υλικό, διαπερατότητας μεγαλύτερης του εδάφους και τοποθετείται με τέτοιο τρόπο, ώστε να καλύπτεται ολόκληρο το εύρος του ρυπασμένου πλουμίου, το οποίο λόγω φυσικής κλίσης κινείται διαμέσου της τάφρου και αντιδρά με το υλικό. (Εικόνα 1-2).



Εικόνα 1-2: Ενεργή Τάφρος Υψηλής Διαπερατότητας
(Πηγή: www.envirottools.org)

Συστήματα Χοάνης - Θύρας (Funnel and Gate)

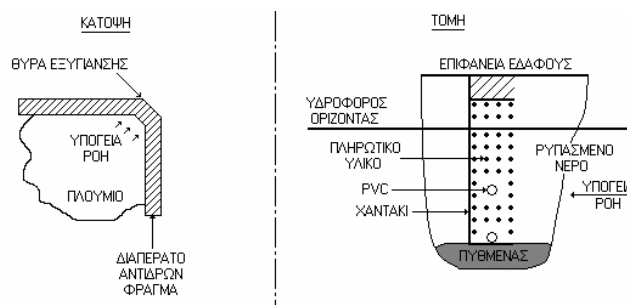
Αποτελεί τη μέθοδο παθητικής εξυγίανσης, η οποία χρησιμοποιεί φράγματα μικρής διαπερατότητας, με σκοπό να τροποποιηθεί η ροή του υπογείου νερού, ώστε αυτό να ρέει διαμέσου κενών υψηλής διαπερατότητας και να αντιδράσει με το υλικό. (Εικόνα 1-3).



Εικόνα 1-3: Συστήματα Χοάνης - Θύρας
(Πηγή: www.envirottools.org)

✚ Συστήματα Τάφρου - Θύρας (Trench and Gate)

Η μέθοδος αυτή αποτελεί τροποποίηση της προηγούμενης (Funnel and Gate) και ενδείκνυται για περιπτώσεις χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους. Η διαφοροποίηση της μεθόδου σε σχέση με την προηγούμενη είναι η προσθήκη τάφρων αποστράγγισης υψηλής υδραυλικής διαπερατότητας κατά μήκος του διαπερατού φράγματος (ανάντη) και μια συστοιχία επαναδιήθησης στα κατάντη της διόδου. (Εικόνα 1-4). Κατά αυτόν τον τρόπο, η ζώνη εγκλεισμού του πλουμίου μεγαλώνει, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αποστράγγιση της ρυπασμένης ζώνης και να αποφεύγεται η κίνηση των ρύπων γύρω ή κάτω από τους διαπερατούς τοίχους.



Εικόνα 1-4: Συστήματα Τάφρου - Θύρας
(Πηγή: www.rtdf.org)

1.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Οι βασικές παράμετροι, που θα πρέπει να πληρούνται στη δομή ενός αντιδρώντος φράγματος είναι:

- ✚ Η δυνατότητα αντικατάστασης των υλικών, όπου αυτό χρειάζεται.
- ✚ Η υψηλότερη διαπερατότητα από αυτήν του υπεδάφους.
- ✚ Η σταθερότητα απέναντι σε λεπτόκοκκα, που ίσως περάσουν στο φράγμα.
- ✚ Η μεγάλη διάρκεια ζωής.

Η επιλογή της κατασκευαστικής τεχνικής εξαρτάται κυρίως από τα παρακάτω χαρακτηριστικά της περιοχής:

- ✚ Βάθος, το οποίο ίσως αποτελεί σημαντικότερο παράγοντα, αφού όσο μεγαλύτερο είναι αυτό, τόσο πιο εξειδικευμένος πρέπει να είναι ο εξοπλισμός, τόσο μεγαλύτερος ο χρόνος κατασκευής, καθώς και τόσο υψηλότερο θα είναι το τελικό κόστος.
- ✚ Γεωτεχνικές παρατηρήσεις, όπως συνοχή των στρωμάτων και παρουσία κροκάλων, υπόγειες κατασκευές και κτίρια, τα οποία καθορίζουν την επιλογή της τεχνικής.

- ✚ Εκσκαφή, αφού μαζί με την απόρριψη του εδάφους (ρυπασμένου ή όχι), απαιτούν επιπλέον χώρο απόθεσης, αυξάνοντας το κόστος.
- ✚ Υγιεινή και ασφάλεια, ειδικά όταν επιβάλλεται η είσοδος και παραμονή προσωπικού στις γεωτρήσεις.

Σε απλές περιπτώσεις, λάκκος σκάβεται μέχρι βάθους 8 μέτρων και ταυτόχρονα γεμίζεται με το αντιδρών υλικό. Σε πιο πολύπλοκες περιπτώσεις, η «καρδιά» του φράγματος είναι το σημείο στο οποίο βρίσκεται το υλικό, ενώ χαλίκι χρησιμοποιείται ως φίλτρο ενάντια στα λεπτόκοκκα υλικά, που τυχόν θα παρεισφρύσουν στα αντιδρώντα υλικά. Για την αποφυγή εισαγωγής οξυγόνου από τον αέρα, πάνω από το αντιδρών φράγμα τοποθετείται υλικό χαμηλής διαπερατότητας. Η συνολική διαπερατότητα του φράγματος θα πρέπει να είναι υψηλότερη από αυτήν της περιοχής, ώστε το υπόγειο νερό να αναγκαστεί να περάσει από το φράγμα και όχι να το προσπελάσει.

1.4.1 Απαιτούμενα δεδομένα για τον ορθό σχεδιασμό και την κατασκευή των PRB's

Τα απαραίτητα δεδομένα για ένα ορθό σχεδιασμό ενός μεμονωμένου ή ενός συστήματος Ενεργών Διαπερατών Φραγμάτων χωρίζονται σε αυτά του εδάφους, του νερού και του ρύπου.

Τα χαρακτηριστικά του εδάφους είναι:

- ✚ Η υδραυλική κλίση.
- ✚ Το βάθος, όπου βρίσκεται το αδιαπέρατο στρώμα.
- ✚ Η γεωλογία της περιοχής.
- ✚ Η διαπερατότητα του εδάφους.
- ✚ Η ικανότητα εξισορόπησης των αλλαγών του pH.

Τα χαρακτηριστικά του νερού είναι:

- ✚ Το βάθος, όπου βρίσκεται ο υδροφόρος ορίζοντας.
- ✚ Η υδρογεωλογία του υπογείου νερού.
- ✚ Η ποιότητα του νερού.
- ✚ Ο ρυθμός της ροής.
- ✚ Η κατεύθυνση της ροής.

Τέλος, απαραίτητα δεδομένα για τον ορθό σχεδιασμό και την κατασκευή ενός Ενεργού Διαπερατού Φράγματος είναι τα χαρακτηριστικά του ρύπου και πιο συγκεκριμένα:

- ✚ Το είδος.
- ✚ Ο ρυθμός αποδόμησης.
- ✚ Το βάθος, στο οποίο βρίσκεται το αντιδρών υλικό.
- ✚ Η έκταση που καλύπτει.
- ✚ Η συγκέντρωσή του.

Με βάση το ρυθμό ροής διαμέσου του φράγματος και το ρυθμό αποδόμησης του ρύπου, ανάλογα με το αντιδρών μέσο, προκύπτει ο απαιτούμενος χρόνος παραμονής στη ζώνη επεξεργασίας για την επίτευξη των στόχων της εξυγίανσης, που με τη σειρά του οδηγεί στην επιλογή του πάχους της ζώνης επεξεργασίας.

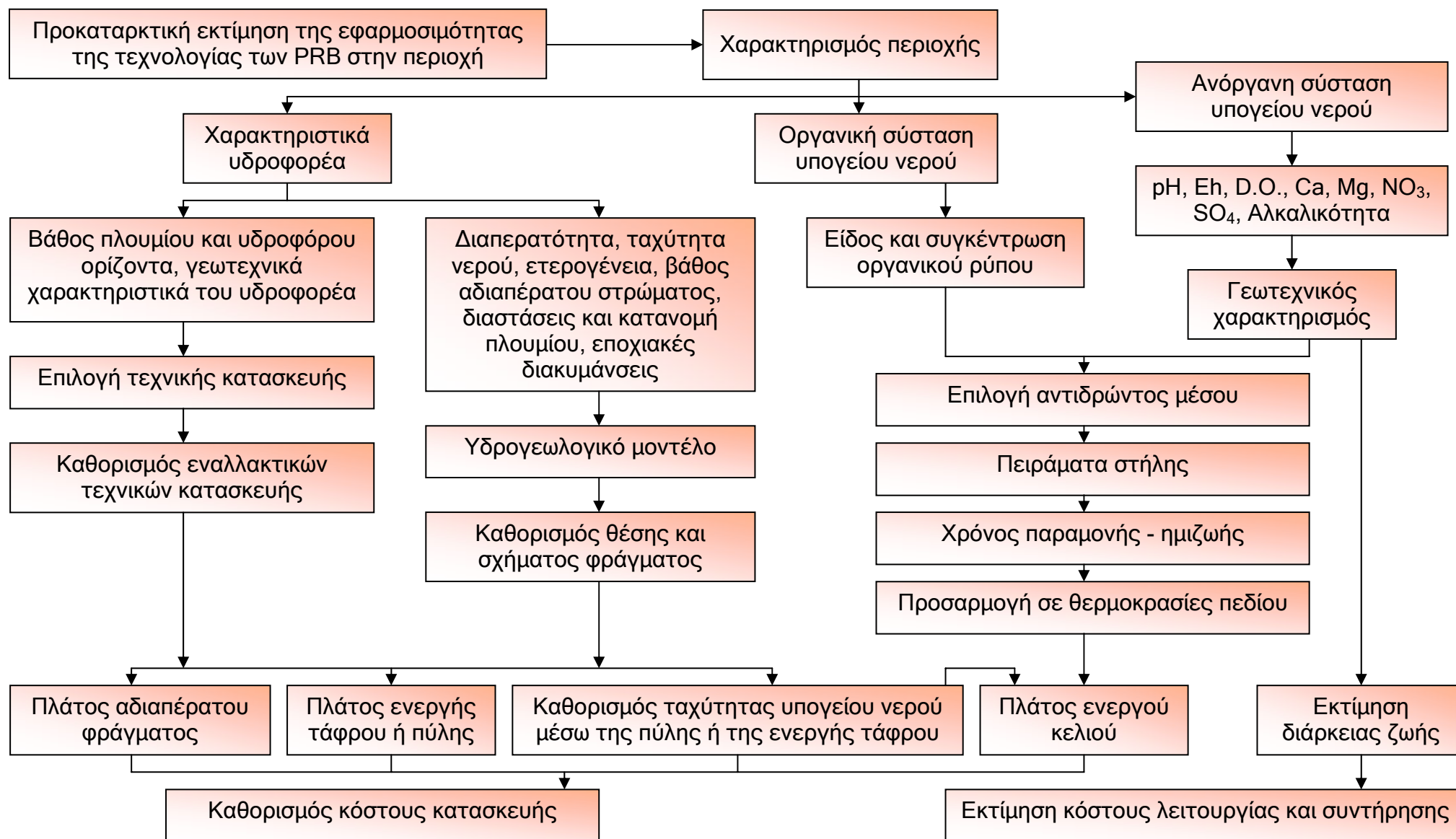
Για την επίτευξη αυτού, απαιτούνται συγχρόνως εργαστηριακές δοκιμές και χαρακτηρισμός της τοποθεσίας προς εξυγίανση. Συγκεντρωτικά, τα βήματα σχεδιασμού ενός Έργου Αντιδρώντος Φράγματος περιγράφονται στο παρακάτω διάγραμμα ροής. (Διάγραμμα 1-1).

1.4.2 Στόχοι κατά το σχεδιασμό των PRB's

Οι δύο κυριότεροι σχεδιαστικοί τύποι των Ενεργών Αντιδρώντων Φραγμάτων είναι η Ενεργή Τάφρος Υψηλής Διαπερατότητας και τα Συστήματα Χοάνης - Θύρας. Η υδραυλική συμπεριφορά των δύο αυτών σχεδιαστικών τύπων βασίζεται στην υδραυλική αγωγιμότητα όλης της κατασκευής, συμπεριλαμβάνοντας, δηλαδή, την αγωγιμότητα των στρωμάτων που δρουν σαν φίλτρα και του ιδίου του αντιδρώντος μέσου. Η συνολική αγωγιμότητα του φράγματος πρέπει να είναι υποχρεωτικά τουλάχιστον διπλάσια αυτής του υδροφορέα, ενώ ενδείκνυται να είναι δεκαπλάσια, λόγω των περιοριστικών παραγόντων, οι οποίοι θα ελαττώσουν την αγωγιμότητα με το χρόνο.

Οι κυριότεροι περιοριστικοί παράγοντες είναι οι ακόλουθοι:

- ✚ Εισροή και κατακάθιση λεπτόκοκκων εδαφικών σωματιδίων, τα οποία θα φράξουν τους πόρους του φράγματος και θα μειώσουν την αγωγιμότητα.
- ✚ Κατακρήμνιση ανθρακικών, όπως ανθρακικό ασβέστιο ή μαγνήσιο, οξείδια ή υδροξείδια του σιδήρου, στο στρώμα που δρα σαν φίλτρο ή στο αντιδρών μέσο.
- ✚ Ανεξέλεγκτη ανάπτυξη μικροοργανισμών (bio-clogging).



Διάγραμμα 1-1: Διάγραμμα ροής για το σχεδιασμό Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων (www.estcp.org)

Οι ακόλουθοι σχεδιαστικοί στόχοι αφορούν κυρίως τη χρήση ενεργού άνθρακα σαν πληρωτικό μέσο, αλλά οι περισσότεροι από αυτούς μπορούν να φανούν χρήσιμοι στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μονοσθενής σίδηρος ή άλλα υλικά ως αντιδρώντα μέσα.

Οι κύριοι σχεδιαστικοί στόχοι είναι:

- ✚ Η αποφυγή της εισροής λεπτόκοκκων εδαφικών σωματιδίων με την εγκατάσταση φίλτρων ανάμεσα στο πληρωτικό μέσο και το έδαφος, με βάση τα γνωστά κριτήρια για τα εδαφικά φίλτρα.
- ✚ Η αποφυγή των αλλαγών στις φυσικοχημικές ιδιότητες του υπόγειου νερού, όπως στη θερμοκρασία, στην πίεση, στο pH, στο δυναμικό οξειδοαναγωγής (redox), στα θρεπτικά, αφού ίσως προκαλέσουν την ανεξέλεγκτη ανάπτυξη μικροοργανισμών ή την κατακρήμνιση μετάλλων.
- ✚ Ο σχεδιασμός ενός συστήματος στο φράγμα που θα επιτρέπει την απομάκρυνση και αντικατάσταση του μέσου επεξεργασίας μετά από μια περίοδο μερικών ετών.
- ✚ Ο σχεδιασμός ενός συστήματος σωληνώσεων στο φράγμα, που θα επιτρέπει την εισαγωγή νερού ή αέρα για τη διάλυση των συσσωματωμάτων που έχουν σχηματιστεί ή για την ανάμιξη του πληρωτικού μέσου με ανατάραξη.
- ✚ Ο σχεδιασμός ανοιγμάτων για επιθεώρηση, απομάκρυνση ή δειγματοληψία του αντιδρώντος μέσου.

Η παραπάνω λίστα των στόχων σχεδιασμού μπορεί να μην εφαρμόζεται σε κάθε περίπτωση. Με βάση τις ιδιαιτερότητες και τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής, τη φύση της ρύπανσης και το σκοπό της εξυγίανσης, θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν πρόσθετοι στόχοι σχεδιασμού.

1.4.3 Διεργασίες που μειώνουν την απόδοση των PRB's σε σχέση με το χρόνο

Οι διεργασίες που επηρεάζουν τη μακροχρόνια απόδοση των υπόγειων διαπερατών φραγμάτων είναι οι ακόλουθες:

Επικάλυψη της επιφάνειας του αντιδρώντος υλικού από:

- ✚ Καθιζήσεις δευτερευόντων ανόργανων μετάλλων.
- ✚ Διάβρωση.

Φράξιμο των πόρων του αντιδρώντος υλικού από:

- ✚ Καθιζήσεις δευτερευόντων ανόργανων μετάλλων.
- ✚ Δημιουργία αερίων (H_2).
- ✚ Παραγωγή βιομάζας.

Μείωση της αντιδραστικότητας

- ✚ Προερχόμενη από τη μείωση της ικανότητας ρόφησης του αντιδρώντος μέσου (Οριακή ικανότητα προσρόφησης).
- ✚ Από τη διάλυση των αντιδρώντων υλικών.

1.4.4 Ιδανικές Τοποθεσίες για την Εγκατάσταση Ενεργών Διαπερατών Φραγμάτων

Οι ιδανικές τοποθεσίες για την εγκατάσταση Ενεργών Διαπερατών Φραγμάτων έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- ✚ Η ρύπανση είναι σε μικρό βάθος (μικρότερο των 15m).
- ✚ Είναι σχετικά πορώδης.
- ✚ Τα εδάφη είναι αμμώδη, αργιλώδη ή μίγματα άμμου-αργίλου, αφού η ετερογένεια της περιοχής δεν προκαλεί προβλήματα.
- ✚ Παρουσία αδιαπέρατου στρώματος κάτω από την περιοχή ρύπανσης.

1.5 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ PRB'S - MONITORING

Τα Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα κατασκευάζονται κάτω από αυστηρούς κανονισμούς, στα πλαίσια των οποίων ανήκει και η ύπαρξη προγράμματος διασφάλισης ποιότητας σε κάθε δείγμα υπογείου νερού. Η διασφάλιση αυτή θα προσαρμόσει τη λειτουργία τους βάσει κανονισμών, καθώς και θα αξιολογήσει την απόδοσή τους. Κατά την εγκατάσταση του συστήματος, επιλέγεται η συχνότητα παρακολούθησης, τα σημεία και ο τρόπος δειγματοληψίας, με βάση τις ιδιαιτερότητες της περιοχής. Γενικότερα, τα πηγάδια παρακολούθησης που θα χρειαστεί να εγκατασταθούν, είναι χρήσιμα στη διαπίστωση εάν:

- ✚ Οι ρύποι αλληλεπιδρούν με το φράγμα.
- ✚ Οι συγκεντρώσεις των ρύπων έχουν μεταβληθεί.
- ✚ Οι στόχοι εξυγίανσης έχουν επιτευχθεί.

Όταν η εγκατάσταση πηγαδιών παρακολούθησης έχει ως σκοπό την εξασφάλιση της μακροβιότητας του έργου, πραγματοποιούνται οι παρακάτω έλεγχοι:

- ✚ Υδραυλικός έλεγχος.
- ✚ Έλεγχος χημείας του υπογείου ύδατος.
- ✚ Εξέταση του αντιδρώντος υλικού.

Γενικότερα, τα πηγάδια τοποθετούνται στις παρακάτω θέσεις, με βάση το φράγμα και τον τοίχο:

- ✚ Κατάντη της εκροής από τη ζώνη των αντιδραστηρίων.
- ✚ Σε κάθε άκρο του τοίχου.
- ✚ Ανάντη του τοίχου.

Τυπικά, τα κριτήρια λειτουργίας της παρακολούθησης ορίζονται από τους νόμους της εκάστοτε περιοχής. Οι παράγοντες που προσδιορίζουν μια σωστή λειτουργία παρακολούθησης αφορούν τα ακόλουθα:

- ✚ Τους σημαντικότερους κατά περίπτωση ρύπους.
- ✚ Ενδεχόμενα δευτερογενή προϊόντα ρύπανσης.
- ✚ Παράγοντες ποιότητας του ύδατος, όπως το pH και η θερμοκρασία.

Εκτός από τους ρύπους, τα προϊόντα τους και τους παράγοντες της ποιότητας του νερού, που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα πρέπει να παρουσιαστεί και η απόδοση της παρακολούθησης. Αυτή χρησιμοποιείται για να επιβεβαιωθεί ότι το φράγμα λειτουργεί με βάση το σχεδιασμό του, οπότε αξιολογείται και η απόδοση αυτού. Ενδεχόμενη μεταβολή σε κάποιες από τις παρακολουθούμενες παραμέτρους μπορεί να οδηγήσει σε επανασχεδιασμό των μηχανισμών του φράγματος. Οι παράμετροι αυτές είναι:

- ✚ Υδρολογικές παράμετροι, όπως η μεταβλητότητα αυτού με το χρόνο.
- ✚ Μετρήσεις υδραυλικού ύψους.
- ✚ Μέτρηση της ροής στο πεδίο.
- ✚ Μελέτες ιχνηθετών, όπου αυτοί χρησιμοποιούνται.
- ✚ Μέτρηση της συγκέντρωσης ιζημάτων στην επιφάνεια του πληρωτικού υλικού.
- ✚ Φωτοηλεκτρική φασματοσκοπία.
- ✚ Οξειδοαναγωγικό δυναμικό (redox).
- ✚ Διαλυμένο οξυγόνο

Η γνώση των παραμέτρων αυτών βοηθά στο να επιβεβαιωθεί η σωστή κατασκευή, αλλά και να ανιχνευθούν τα παρακάτω:

- ✚ Η εξασθένιση της αντιδραστικότητας
- ✚ Η μείωση της διαπερατότητας
- ✚ Η μείωση του χρόνου συγκράτησης στη ζώνη των αντιδραστηρίων.
- ✚ Τυχόν βραχυκύκλωμα της ζώνης των αντιδραστηρίων.
- ✚ Τυχούσα διαρροή στους τοίχους του φράγματος.

1.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ PRB's

- ✚ Η in-situ εξυγίανση του ρυπασμένου εδάφους και υπογείου νερού γίνεται παθητικά με τη βοήθεια των φυσικών ιδιοτήτων ροής της περιοχής.
- ✚ Δεν απαιτείται ή καταναλώνεται εξωτερική ενέργεια.
- ✚ Η τοποθεσία μπορεί να χρησιμοποιείται παραγωγικά κατά τη διάρκεια της εξυγίανσης.
- ✚ Δεν απαιτούνται επίγειες κατασκευές εκτός από τα πηγάδια παρακολούθησης.
- ✚ Δεν απαιτείται ακριβής προσδιορισμός της πηγής ρύπανσης.
- ✚ Το σχέδιο ροής του υπογείου νερού στην περιοχή αλλάζει ελάχιστα.
- ✚ Το κόστος επεξεργασίας του υπόγειου νερού είναι σχεδόν το $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$ του κόστους επεξεργασίας των συστημάτων άντλησης και επεξεργασίας (pump and treat). Το αρχικό κόστος μπορεί να είναι υψηλό, λόγω της κατασκευής σε σχέση με ένα σύστημα pump and treat, αλλά κατά τη συνολική διάρκεια του έργου παρατηρείται σημαντικό οικονομικό όφελος, λόγω μειωμένων λειτουργικών εξόδων, εξόδων συντήρησης και παρακολούθησης. Στην επόμενη παράγραφο υπάρχει περιγραφή συστημάτων άντλησης και επεξεργασίας (pump and treat), καθώς και οικονομική σύγκριση αυτών με τα συστήματα Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων.
- ✚ Είναι σχεδιασμένα για πολυετή λειτουργία χωρίς συντήρηση και λειτουργικά έξοδα (πιθανόν να χρειαστεί αντικατάσταση του αντιδρώντος μέσου κάθε 10 ως 20 χρόνια).
- ✚ Μπορούν να τροποποιηθούν ανάλογα με το ρύπο και το επιθυμητό επίπεδο επεξεργασίας.

1.7 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ / ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΩΝ PRB's

- ✚ Αυξημένο κόστος κατασκευής και εγκατάστασης.
- ✚ Με βάση τη σύγχρονη τεχνολογία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βάθη μέχρι τα 15 m.
- ✚ Μπορεί να μειωθεί η διαπερατότητά τους εξ' αιτίας βιολογικής ή χημικής καθίζησης και να χρειαστεί συντήρηση ή και αντικατάσταση του αντιδρώντος μέσου.
- ✚ Απαιτείται λεπτομερής χαρακτηρισμός του πλουμίου των ρύπων.
- ✚ Το πλάτος τους πρέπει να υπερβαίνει σημαντικά το πλάτος του πλουμίου για την επίτευξη πλήρους εγκλεισμού του και χαρακτηρισμός ως αντισυμβατικά σε περιπτώσεις πλουμιών μεγάλου πλάτους (πάνω από 300m).

- + Χαρακτηρισμός ως αντιοικονομικά σε περιπτώσεις που απαιτείται μεγάλος όγκος αντιδρώντος υλικού.
- + Δεν είναι αποδοτικά για σχετικά πολύ μικρές ή πολύ μεγάλες ταχύτητες υπογείου νερού.
- + Είναι δύσκολο να κατασκευαστούν, όταν υπάρχουν επίγειες κατασκευές ή υπόγειες χρήσεις.
- + Είναι δύσκολο να κατασκευαστούν, όταν είναι πολύ λεπτό το αδιαπέρατο στρώμα κάτω από αυτά.
- + Είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν, όταν η υπόγεια λιθολογία εμποδίζει την κατασκευή τους.

1.8 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΜΕΤΑΞΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΆΝΤΛΗΣΗΣ - ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΤΑ ΔΙΑΠΕΡΑΤΑ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ

Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία, την οποία «συναγωνίζεται» αυτή των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων, είναι τα συστήματα Άντλησης - Επεξεργασίας (pump-and-treat). Η σύγκριση του κόστους κάθε τεχνολογίας θα πρέπει να γίνει με εξέταση των επιμέρους παραμέτρων που επηρεάζουν τη συνολική δαπάνη. Οι παράμετροι αυτές είναι:

- + το κόστος της μελέτης,
- + το κόστος της εγκατάστασης,
- + το κόστος της λειτουργίας,
- + το κόστος της αντικατάστασης,
- + το κόστος monitoring και
- + το κόστος της απομάκρυνσης.

1.8.1 Κόστος μελέτης

Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα

Για να εγκατασταθεί ένα σύστημα Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων θα πρέπει να γίνει πλήρης χαρτογράφηση του υπεδάφους της περιοχής, σε συνδυασμό με μελέτη της συμπεριφοράς του υπογείου νερού (ταχύτητα ροής, κλίσεις κ.α.). Στη συνέχεια, με βάση το είδος του ρύπου, θα πρέπει να επιλεγεί το αντιδρών υλικό. Τέλος, ανάλογα με τις παραπάνω παρατηρήσεις, επιλέγεται η περιοχή εγκατάστασης του φράγματος.

Συστήματα Άντλησης - Επεξεργασίας

Για να εγκατασταθεί ένα σύστημα Άντλησης - Επεξεργασίας θα πρέπει αρχικά να γίνουν δοκιμαστικές γεωτρήσεις σε διάφορα σημεία, ώστε να χαρτογραφηθούν τα σημεία με μεγάλη παρουσία ελαιωδών (hot-spots). Στη συνέχεια, με βάση την υδρογεωλογία της περιοχής, θα πρέπει να γίνει η επιλογή των σημείων, όπου θα ανοιχτούν οι γεωτρήσεις, καθώς και το είδος αυτών (άντλησης ή παρατήρησης).

Το κόστος της μελέτης για την εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ενός συστήματος Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων.

1.8.2 Κόστος εγκατάστασης

Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα

Ανάλογα με τη μέθοδο εκσκαφής και τοποθέτησης του φράγματος, το κόστος της εγκατάστασης μπορεί να ποικίλλει. Γενικότερα, η κατασκευή ενός Διαπερατού Αντιδρώντος Φράγματος περιλαμβάνει την εκσκαφή ποσότητας του εδάφους και την επανατοποθέτησή του, μαζί με το αντιδρών υλικό. Συνήθως, οι διαστάσεις του χαντακιού που θα πρέπει να ανοιχτεί είναι της τάξης των 100 μέτρων μήκος, 10 μέτρων βάθος και πλάτος, οπότε ο συνολικός όγκος εξαγόμενου εδάφους είναι περίπου 10,000 m³. Η ποσότητα αυτή στη συνέχεια θα ανακατευθεί με το αντιδρών υλικό και θα επιστρέψει στο χαντάκι.

Έτσι, το κόστος εγκατάστασης για τα Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα υπολογίζεται από τις εργατώρες που θα καταβληθούν στο χειριστή του εκσκαφέα και του συνεργείου του, καθώς επίσης και από το σχετικά χαμηλό κόστος του αντιδρώντος υλικού.

Συστήματα Άντλησης - Επεξεργασίας

Ανάλογα με την επιφάνεια και τη γεωλογία της περιοχής, επιλέγεται ο αριθμός και η θέση των γεωτρήσεων. Κατά προσέγγιση, για μια περιοχή 40 στρεμμάτων, απαιτούνται περίπου 50 πηγάδια άντλησης, καθώς επίσης και άλλα 70 πηγάδια παρατήρησης. Η πλειοψηφία των πηγαδιών παρατήρησης χωροθετείται στα όρια της εγκατάστασης, οπότε ο αριθμός των φρεατίων παρατήρησης αυξάνεται ανάλογα με το μήκος της περιμέτρου της εγκατάστασης. Σε ένα ήδη διαμορφωμένο εργοτάξιο είναι πολύ δύσκολο για το γεωτρύπανο να κινηθεί σε όλους τους χώρους, όπου απαιτείται διάνοιξη πηγαδιού.

Έτσι, εκτός από την επίπονη γεώτρηση σε μεγάλο βάθος, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η δυσκολία κίνησης αυτού, με ό,τι αυτό συνεπάγεται (καθυστερήσεις, μετατροπές σε μονάδες και άλλες εργασίες). Αφού ανοιχθούν οι γεωτρήσεις, θα πρέπει να τοποθετηθεί το εσωτερικό πλαστικό περίβλημα σε όλα τα πηγάδια, καθώς επίσης να γίνει η εξωτερική διαμόρφωση αυτών, αφού θα πρέπει να έχουν πώμα ασφαλείας, τιμεντένια βάση, αλλά και σήμανση για αποφυγή ατυχημάτων. Επιπλέον, θα πρέπει να εγκατασταθεί και κεντρικό σύστημα δημιουργίας υποπίεσης, το οποίο θα εξυπηρετεί όλα τα πηγάδια άντλησης, καθώς και επιπλέον μελλοντικά πηγάδια, που τυχόν θα εγκατασταθούν. Το κόστος ενός τέτοιου συστήματος για 40 περίπου πηγάδια άντλησης είναι της τάξης δεκάδων χιλιάδων €. Σε περιπτώσεις άντλησης σε βάθη μεγαλύτερα των 10 μέτρων, απαιτείται η χρήση ειδικών πνευματικών αντλιών, οι οποίες λειτουργούν ανεξάρτητα από το σύστημα, με χρήση ενός κομπρεσέρ αέρα. Έτσι, το κόστος εγκατάστασης για τα συστήματα Άντλησης - Επεξεργασίας υπολογίζεται από το κόστος του κεντρικού συστήματος άντλησης, συμπεριλαμβανομένων των χιλιομέτρων πλαστικών σωλήνων, που συνδέουν το σύστημα με τα πηγάδια, από τις εργατοώρες που θα καταβληθούν στο χειριστή του γεωτρήσανου και του συνεργείου του, από το κόστος των υλικών των πηγαδιών και της τοποθέτησής τους, καθώς και από το κόστος των πνευματικών αντλιών και του κομπρεσέρ.

Το κόστος εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος είναι πάρα πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ενός συστήματος Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων.

1.8.3 Κόστος λειτουργίας

Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα

Το γεγονός ότι η εξυγίανση επιτυγχάνεται παθητικά, λόγω της υπόγειας ροής, εκμηδενίζει τα λειτουργικά κόστη.

Συστήματα Άντλησης - Επεξεργασίας

Αντίστοιχα με το κόστος της εγκατάστασης, το κόστος λειτουργίας ενός συστήματος άντλησης - επεξεργασίας είναι επίσης υψηλό. Οι απαιτήσεις σε ενέργεια του κεντρικού συστήματος άντλησης είναι τεράστιες, δεδομένου πως παράγεται υποπίεση ικανή να αντλεί ταυτόχρονα από 40 περίπου γεωτρήσεις. Το ίδιο ισχύει και για τις ενεργειακές απαιτήσεις του κομπρεσέρ των πνευματικών αντλιών.

Σε περίπτωση που παρατηρηθεί ρύπος σε περιοχή όπου υπάρχουν μόνο πηγάδια παρατήρησης, δηλαδή πηγάδια χωρίς αντλητική ικανότητα, θα πρέπει το προϊόν στα σημεία αυτά να απομακρυνθεί, οπότε υπάρχει σε εφεδρεία μια μικρής κλίμακας κινητή μονάδα άντλησης ελαιωδών, η οποία έχει τη δυνατότητα να συνδέεται με τα πηγάδια, να αντλεί και να επιστρέφει στην αρχική της θέση.

Το κόστος της λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος είναι πάρα πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο μηδενικό ενός συστήματος Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων.

1.8.4 Κόστος αντικατάστασης

Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα

Λόγω της μικρής διάρκειας χρήσης της τεχνολογίας, δεν έχει καταστεί ακόμη η ανάγκη αντικατάστασης του πληρωτικού υλικού λόγω κορεσμού, είναι όμως βέβαιο πως σε βάθος χρόνου (>20 έτη) αυτό θα είναι απαραίτητο. Ενδεχομένως να παρουσιαστεί περίπτωση ανάγκης αντικατάστασης του υλικού με άλλο, με σκοπό την πιο εντατική ή εντελώς διαφορετική εξυγίανση. Όπως περιγράφεται στη συνέχεια, η τεχνολογία της «κασέτας», η αντικατάσταση είναι χαρακτηριστικά εύκολη με ιδιαίτερα χαμηλό κόστος.

Συστήματα Άντλησης - Επεξεργασίας

Κατά τη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να προκύψουν έκτακτες ανάγκες λόγω ατυχημάτων. Ιδιαίτερα στο χώρο ενός διυλιστηρίου, όπου κινούνται κατά κύριο λόγο οχήματα μεγάλου βάρους, ελλοχεύει ο κίνδυνος καταστροφής σωληνώσεων είτε και ολόκληρου πηγαδιού. Τα έξοδα, όμως αυτά, θεωρούνται αμελητέα και περιλαμβάνονται στον προϋπολογισμό της λειτουργίας οποιασδήποτε εγκατάστασης.

Το κόστος αντικατάστασης σε ένα τέτοιο σύστημα είναι πολύ μικρότερο από το αντίστοιχο ενός συστήματος Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων.

1.8.5 Κόστος monitoring

Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα

Κατά τη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος απαιτείται παρατήρηση και ανάλυση του εκρέομένου ύδατος ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η δειγματοληψία και η χημική ανάλυση των δειγμάτων είναι διαδικασίες απλές με χαμηλό κόστος.

Συστήματα Άντλησης - Επεξεργασίας

Ένα τέτοιο σύστημα λειτουργεί 16 ώρες το 24ωρο και απαιτείται η παρουσία τουλάχιστον 2 εργαζομένων. Για τη μελέτη της συμπεριφοράς του υπογείου νερού απαιτείται συνεχής έλεγχος της στάθμης του νερού και των ελαιωδών από το προσωπικό και στατιστική ανάλυση των μετρήσεων αυτών. Ο έλεγχος γίνεται με τη χρήση σταθμόμετρου, το οποίο υπολογίζει τη στάθμη κάθε φάσης (ελαιώδη και υδατική) σε κάθε πηγάδι. Οι μετρήσεις γίνονται καθημερινά και ταυτόχρονα αναλύονται στατιστικά, ώστε να υπάρχει σαφής εικόνα της τάσης κάθε πηγαδιού να συγκεντρώνει ελαιώδη. Γενικότερα, η συνολική λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος βασίζεται στο monitoring, οπότε σε αυτά τα έξοδα υπολογίζονται η αμοιβή του μόνιμου προσωπικού, η αγορά του σταθμομέτρου, καθώς επίσης τα λειτουργικά έξοδα της ανάλυσης.

Το κόστος για το monitoring ενός τέτοιου συστήματος είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ενός συστήματος Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων.

1.8.6 Κόστος απομάκρυνσης

Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα

Αφού επιτευχθεί πλήρης εξυγίανση, το πεδίο θα πρέπει να επιστρέψει στην πρότερη κατάστασή του. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να απομακρυνθεί το έδαφος, μαζί με το αντιδρών υλικό και να αντικατασταθούν από καθαρό έδαφος, αντίστοιχο με το αρχικό. Η αφαίρεση του εδάφους, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, γίνεται με την εφαρμογή της τεχνολογίας αφαίρεσης «κασέτας» με πολύ χαμηλό κόστος, ενώ δεν υπάρχει άλλο τμήμα της εγκατάστασης, που θα πρέπει να αφαιρεθεί.

Συστήματα Άντλησης - Επεξεργασίας

Στην αντίστοιχη περίπτωση, εκτός από το κόστος μεταφοράς της εγκατάστασης (κεντρικό σύστημα άντλησης, πνευματικές αντλίες, κομπρεσέρ, κινητή μονάδα), θα πρέπει να υπολογιστεί και το κόστος επαναφοράς των γεωτρήσεων στην πρότερή τους κατάσταση, το οποίο είναι αρκετά υψηλό.

Το κόστος απομάκρυνσης μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ενός συστήματος Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων.

1.8.7 Συνολικό κόστος

Συγκρίνοντας τα επιμέρους κόστη που αναφέρθηκαν πιο πάνω, καθίσταται σαφές, πως η χρήση συστημάτων Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων είναι πολύ πιο οικονομική από τη χρήση συστημάτων Άντλησης - Επεξεργασίας. Βάσει βιβλιογραφίας, η διαφορά υπολογίζεται περίπου στο διπλάσιο.

Στον Πίνακα 1-1 γίνεται μια συγκεντρωτική σύγκριση του κόστους ανάμεσα στα Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα και στα συστήματα Άντλησης - Επεξεργασίας. Η σύγκριση γίνεται με κλίμακα των αριθμό € σε κάθε περίπτωση.

Πίνακας 1-1: Σύγκριση κόστους μεταξύ PRB's και pump-and-treat

| | | <i>Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα</i> | <i>Σύστημα Άντλησης και Επεξεργασίας</i> |
|---------------|----------------|---|---|
| ΚΟΣΤΟΣ | Μελέτης | € (1€) | €€€ (3€) |
| | Εγκατάστασης | €€ (2€) | €€€€€ (5€) |
| | Λειτουργίας | 0 (0€) | €€€€ (4€) |
| | Αντικατάστασης | €€€ (3€) | € (1€) |
| | Monitoring | € (1€) | €€€ (3€) |
| | Απομάκρυνσης | €€ (2€) | €€€€ (4€) |
| | ΣΥΝΟΛΟ | 9 x € | 20 x € |

Βάσει του Πίνακα 1-1, προκύπτει το συμπέρασμα πως το κόστος εγκατάστασης ενός συστήματος Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων είναι λιγότερο από το μισό του αντίστοιχου για ένα σύστημα Άντλησης - Επεξεργασίας.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Κεφάλαιο 2

2.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες, βάσει των οποίων μπορεί να σχεδιαστεί ένα Διαπερατό Αντιδρών Φράγμα, ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του χώρου και τις απαιτήσεις εξυγίανσης.

2.1.1 Τεχνολογία αδιαπέρατων φραγμάτων

Στην περίπτωση αυτή, το αντιδρών υλικό τοποθετείται στο λάκκο με τη βοήθεια απλών εκσκαφών. Τα στοιχεία της χοάνης, σε συστήματα χοάνης - πύλης, είναι αδιαπέρατα και κατασκευάζονται με τις μεθόδους που περιγράφηκαν προηγουμένως. Από τη βιβλιογραφία [Gravelding, 1998], εντοπίζεται μια περίπτωση, όπου κατασκευάστηκε ένα σύστημα χοάνης - πύλης, μήκους 400 μέτρων, στο οποίο η χοάνη αποτελείτο από σωρούς χαλυβδόφυλλων. Τέσσερα κελιά, μήκους 12 μέτρων το καθένα, χρησιμοποιήθηκαν ως πύλες και περιείχαν σίδηρο.

Με βάση τον χρόνο παραμονής, ο οποίος υπολογίστηκε με βάση τη χημεία μεταξύ πληρωτικού μέσου και υπεδάφους, τους δείκτες της αντίδρασης μεταξύ τους και τον επιθυμητό στόχο εξυγίανσης, υπολογίστηκε και το πάχος του κελιού (0.6 - 1.8 μέτρα), οπότε χρειάζονταν 580 τόνοι σιδήρου. Το κόστος εξυγίανσης υπολογίστηκε περίπου στα 160-200 €/m² για το φράγμα, ενώ το αντίστοιχο κόστος για την πύλη ήταν 700-800 €/m².

Ένα άλλο παράδειγμα είναι η περίπτωση σε εργοτάξιο στην Καρλσρούη της Γερμανίας, όπου ένα παρόμοιο σύστημα χοάνης - πύλης κατασκευάστηκε, ώστε ο υδροφορέας να απαλλαχθεί από ΡΑΗ και βενζίνη [Birke et al., 2003]. Η χοάνη είχε μήκος 240 μέτρα και σε 19 μέτρα βάθος υπήρχαν ατσάλινα φύλλα, που εισήχθησαν στο έδαφος με τη βοήθεια ενός «αθόρυβου» γεωτρήπανου (Silent Piler), όπως φαίνεται και στην εικόνα, ώστε να μην επηρεαστούν τα ιστορικά κτίρια της περιοχής.

Τα συγκεκριμένα γεωτρύπανα δε δημιουργούν δονήσεις κατά την εκσκαφή, οπότε είναι κατάλληλα για περιοχές με κτίρια χαμηλής συνοχής. Οι πύλες είχαν τη μορφή γεωτρήσεων με διάμετρο 2,5 μέτρα και χρησιμοποιήθηκε ενεργός άνθρακας ως πληρωτικό υλικό.



*Εικόνα 2-1: Silent Piler («Αθόρυβο» γεωτρύπανο)
(Πηγή: www2.eng.cam.ac.uk)*

2.1.2 Λεπτά αντιδρώντα φράγματα

Η τεχνική αυτή συνδυάζει την κατασκευή χαντακιών με τη χρήση σωρών από φύλλα ατσαλιού. Πάσσαλοι πλάτους περίπου 20 εκατοστών και μήκους 0.4 - 1 μέτρο, εισέρχονται στο έδαφος και στο κενό που δημιουργείται, τοποθετείται το αντιδρών υλικό. Έτσι, μια σειρά από πάνελ κατασκευάζεται και συνθέτει το συνεχές αντιδρών φράγμα. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η ελάχιστη απαίτησή της σε χώρο, η μη αναγκαιότητα εξαγωγής χώματος ή παρέμβασης στον υδροφορέα και ότι μπορεί να εφαρμοστεί ακόμη και σε βάθη της τάξης των 25 μέτρων. [Ecker et al. 2000].

2.1.3 Γεωτρήσεις και ανάμιξη σε μεγάλο βάθος

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, συνεχόμενες κυκλικές κολώνες που περιέχουν αντιδρών υλικό μπορούν να εγκατασταθούν, δημιουργώντας μεγαλύτερα σε μήκος φράγματα. Συνήθως, ένας μεγάλος μεταλλικός κύλινδρος καθελκύεται προς το έδαφος, το χώμα αφαιρείται και στη θέση του τοποθετείται το αντιδρών υλικό. Η ανάμιξη σε μεγάλο βάθος αποτελεί μέθοδο κατά την οποία, το έδαφος ανακατεύεται με την τσιμεντολόαση χωρίς εξαγωγή του πρώτου από το έδαφος. [Gavaskar et al., 2000].

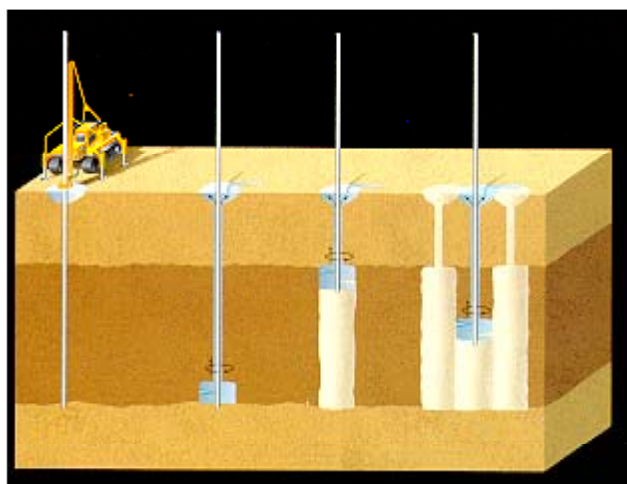
Μεγάλου μήκους τρυπάνια, όπως φαίνονται στην Εικόνα 2-2, εισέρχονται στο έδαφος, δημιουργώντας δίοδο για την τσιμεντολόαση, ώστε αυτή να καταλήξει στο σημείο, όπου θα βρίσκεται το αντιδρών φράγμα.



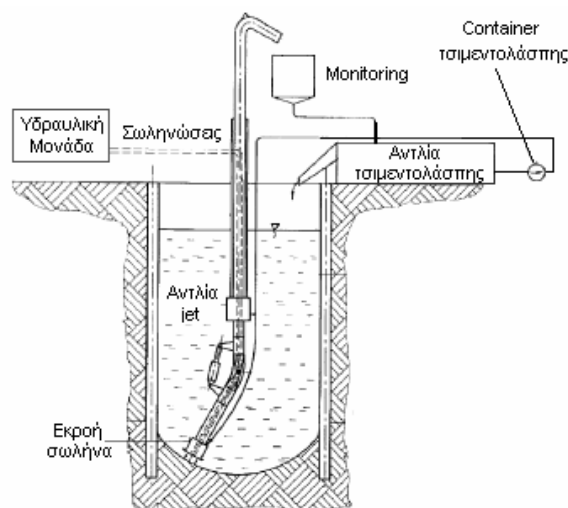
Εικόνα 2-2: Τρυπάνια που χρησιμοποιούνται σε γεωτρήσεις μεγάλου βάθους
(Πηγή: www.eti.ca)

2.1.4 Τεχνολογία “jet”

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί jets υψηλής πίεσης και αντλίες. Το εξάρτημα με το οποίο γίνεται η εκσκαφή συνδέεται με το σωλήνα της γεώτρησης μέσω μιας άρθρωσης και ενός άλλου εύκαμπτου σωλήνα. Έτσι, επιτρέπεται στο σωλήνα να φτάνει σε κάθε άκρη του χαντακιού με τη βοήθεια ενός υδραυλικού μηχανισμού, ώστε να επιτευχθεί το κατάλληλο μήκος της εκσκαφής. Τσιμεντολάσπη υπό υψηλή πίεση μπορεί να αφαιρέσει τα χαμηλής συνοχής στρώματα, ενώ για τα ισχυρότερα χρησιμοποιείται δράπανο. Έτσι, επιτυγχάνεται κατασκευή χαντακιού και ταυτόχρονη τοποθέτηση του αντιδρώντος υλικού. Το φράγμα που κατασκευάζεται είναι ένα υβρίδιο μεταξύ αντιδρώντος φράγματος και συστήματος υψηλής πίεσης [Ο’Hannesin, 2001]. Η μορφή ενός τέτοιου φράγματος περιγράφεται στην Εικόνα 2-3, ενώ η μορφή του φαίνεται στην Εικόνα 2-4.



Εικόνα 2-3: Τρόπος κατασκευής φραγμάτων τεχνολογίας jet
(Πηγή: www.itrcweb.org, 2002)



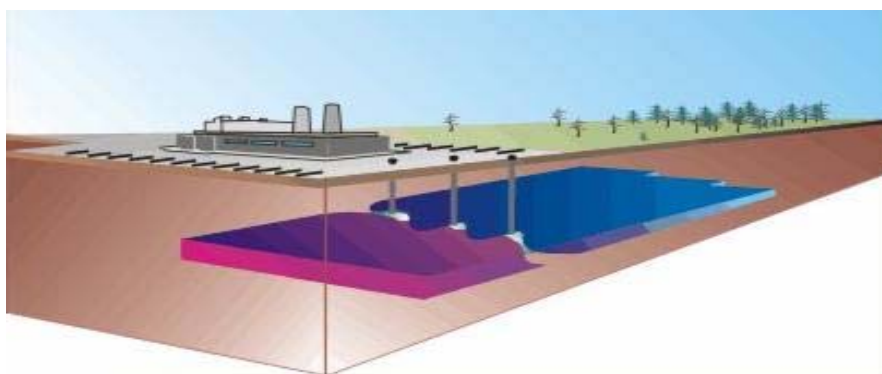
Εικόνα 2-4: Περιγραφή τεχνολογίας jet
(Πηγή: Debreczeni and Meggyes, 1999)

2.1.5 Εφαρμογή των αντιδρώντων φραγμάτων σε ήδη υπάρχοντα συστήματα συγκράτησης

Στην περίπτωση αυτή, στους ήδη υπάρχοντες τοίχους πραγματοποιούνται διατρήσεις, στις οποίες τοποθετείται το αντιδρών υλικό [Bradl et al., 1999], οπότε το σύστημα μετατρέπεται στο αντίστοιχο χοάνης και θύρας, ώστε το υπόγειο νερό να εξυγιαίνεται χωρίς τη χρήση της πολυδάπανης άντλησης.

2.1.6 Συστήματα βασισμένα σε πηγάδια

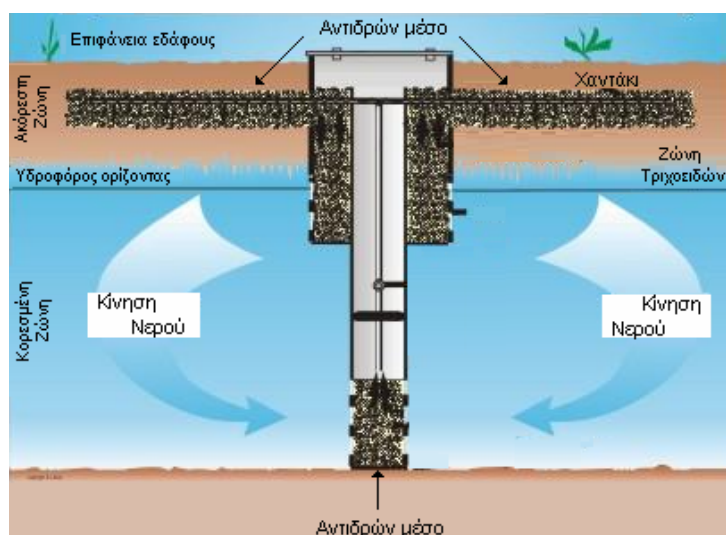
Στη συγκεκριμένη τεχνολογία προτιμάται η χρήση συστάδας πηγαδιών αντί για φράγματα [Mayer et al., 2006]. Η λύση αυτή προτείνεται σε περιπτώσεις, όπου για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους δεν είναι δυνατή η χρήση της τεχνολογίας αντιδρώντων φραγμάτων. Ο τρόπος με τον οποίο τα πηγάδια διανέμονται στην περιοχή, συγκροτώντας ένα σύστημα Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων φαίνεται στην Εικόνα 2-5.



Εικόνα 2-5: Συστάδα πηγαδιών ως Αντιδρών Φράγμα
(Πηγή: www.iegtechnologies.co.uk)

Η σειρά των πηγαδιών μπορεί, είτε να δημιουργεί τη θύρα στο σύστημα χοάνης - θύρας, είτε να συμπεριφέρεται σαν σύστημα in-situ αντιδραστηρίων, είτε να απελευθερώνει ουσίες, οι οποίες ενισχύουν διάφορες βιολογικές διαδικασίες. Η χρήση πηγαδιών αντί φράγματος είναι πολύ πιο συμφέρουσα οικονομικά, καθώς επίσης επιτρέπει εξυγίανση σε βάθη μεγαλύτερα των 16 μέτρων, που αποτελούν όριο στα συμβατικά ενεργά φράγματα. Αφού η παρουσία και η κίνηση του πλουμίου χαρτογραφηθεί πλήρως, επιλέγονται τα σημεία, στα οποία θα γίνουν οι γεωτρήσεις, αφού απαιτείται όλο το πλούμιο να περάσει από το αντιδραστήριο.

Η απόσταση μεταξύ των πηγαδιών θα πρέπει να είναι διπλάσια της διαμέτρου του πηγαδιού. Στα πηγάδια τοποθετείται αντιδρών υλικό χαμηλότερης υδραυλικής αντίστασης από το υπέδαφος, αναγκάζοντας τη ροή του υπογείου νερού να συγκλίνει προς αυτά. Η κατεύθυνση του υπογείου νερού, καθώς και ένα τέτοιο σύστημα περιγράφονται στην Εικόνα 2-6.



Εικόνα 2-6: Φορά του νερού κατά την εφαρμογή Φραγμάτων βασισμένων σε πηγάδια
(Πηγή: www.iegtechnologies.co.uk)

Στην περίπτωση, όπου ο χρόνος παραμονής στο φράγμα είναι σχετικά μεγάλος, απαιτούνται περισσότερες σειρές πηγαδιών.

2.1.7 Συστήματα έγχυσης

Η έγχυση με υψηλή πίεση αντιδρώντων υλικών στο έδαφος δεν επηρεάζεται από τους γεωμετρικούς περιορισμούς που εμπεριέχει η κατασκευή ενός φράγματος, αφού τα αντιδρώντα υλικά σκορπίζονται στην περιοχή ρύπανσης μέσω υψηλής πίεσης και όχι μέσω τοποθέτησης σε λάκκους και γεωτρήσεις.

Τα συστήματα αυτά αποτελούν μια ενδιαφέρουσα και πολύ ευέλικτη τεχνική, υπό την προϋπόθεση ότι η περιοχή, στην οποία κινείται το πλούμιο, έχει χαρτογραφηθεί πλήρως. Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι, πως εξ' αιτίας της διασποράς των υλικών στο υπέδαφος, δεν είναι δυνατή η συλλογή και επαναχρησιμοποίησή τους. Έτσι, σε περίπτωση περαιτέρω εξυγίανσης της περιοχής, χρειάζεται είτε εκ νέου έγχυση πληρωτικού υλικού, είτε επιλογή άλλης μεθόδου [Jing et al., 2007].

2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Οι πλέον συνηθισμένες μέθοδοι κατασκευής αδιαπέρατων τοίχων είναι οι παρακάτω:

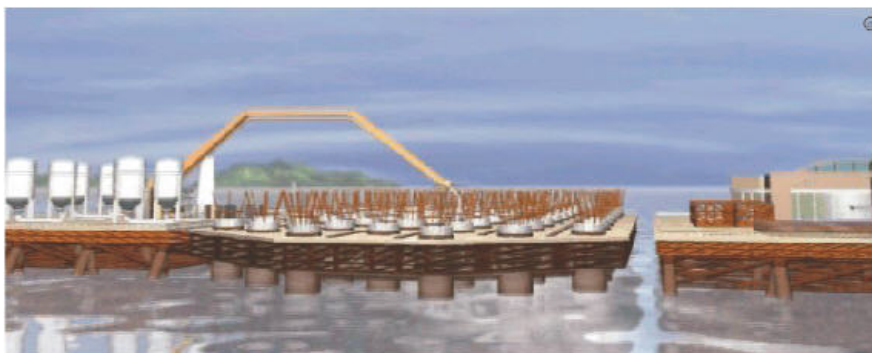
- ✚ Εκσκαφή τάφρων, με χρήση υγρών στερεοποίησης και κατασκευή τοίχου-διάφραγμα (μονής φάσης τοίχος-διάφραγμα) ή επιπλέον χρήση άλλων υλικών και κατασκευή διπλής φάσης τοίχου-διάφραγμα.
- ✚ Κατασκευή λεπτής σχισμής, η οποία αποτελεί μια μικρής κλίμακας γεώτρηση που οδηγεί μια δοκό στο έδαφος, ώστε να γεμίσει ο χώρος με πυκνό τσιμέντο.
- ✚ Κατασκευή γεωτρήσεων σε σειρά, τα οποία γεμίζονται με τσιμέντο και δημιουργούν μια συστάδα αντιδρώντων στηλών.
- ✚ Τοποθέτηση αντιδρώντων υλικών στο έδαφος σε τυχαία σημεία.

2.2.1 Μονής φάσης φράγμα

Αποτελούνται από καλούπια πάχους 0,4 - 1 m, τα οποία εξάγονται από το έδαφος, ενώ τσιμέντο ταχείας πήξεως εισάγεται σε αυτά, ώστε να σταθεροποιηθεί το φράγμα. Συνήθως, η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι αυτή του “pilgrim’s race”, όπου αφού τα καλούπια αριθμηθούν κατά σειρά, αρχικά σκάβονται και γεμίζονται με τσιμέντο αυτά που φέρουν περιττό αύξοντα αριθμό (1, 3, 5 κτλ).

Μετά από 36-48 ώρες και μόλις το τσιμέντο πήξει, γεμίζονται τα υπόλοιπα καλούπια, με τρόπο τέτοιο ώστε να μην αφήνονται κενά μεταξύ τους, αφού ακόμη και οι ελάχιστες ατέλειες είναι δυνατό να επηρεάσουν την απόδοση του φράγματος. Η διάταξη των καλουπιών φαίνεται στην Εικόνα 2-7.

Για παράδειγμα, από μια τρύπα εμβαδού 1m^2 μπορεί να περάσει τόσο υπόγειο νερό, όσο και ένα από υψηλής ποιότητας αδιαπέρατο φράγμα, εμβαδού 100.000 m^2 [Ghezzi et al. 1999].



Εικόνα 2-7: Διάταξη καλουπιών με διαχωρισμό των μονών από τα ζυγά
(Πηγή: www.saramadu.com)

Έτσι, δημιουργείται ένα στεγανό φράγμα, το οποίο έχει τη δυνατότητα να εξυγιαίνει όλη την ποσότητα του νερού που αλληλεπιδρά μαζί του, χωρίς να παρατηρούνται απώλειες. Αυτή είναι και η βασική κατασκευή, σύμφωνα με την οποία έχουν γίνει οι τροποποιήσεις που περιγράφονται στη συνέχεια, έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση της εξυγίανσης.

2.2.2 Διπλής φάσης φράγμα

Ο τύπος αυτός κατασκευάζεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση, το έδαφος αφαιρείται και ταυτόχρονα μπετονίτης σταθεροποιεί το φράγμα. Στη δεύτερη φάση, ο μπετονίτης αντικαθίσταται από τσιμέντο με τη βοήθεια ειδικών σωλήνων. Η πυκνότητα του τσιμέντου πρέπει να υπερτερεί αυτής του μπετονίτη κατά 500 kg/m^3 , ώστε να επιτευχθεί η αντικατάστασή του.

2.2.3 Σύνθετο αδιαπέρατο φράγμα

Στις δύο παραπάνω περιπτώσεις, επιπλέον υλικά μπορούσαν να εισέρθουν στο φράγμα, ώστε να αυξηθεί η μηχανική αντοχή του, καθώς και η στεγανότητά του. Σωροί από ατσάλινα φύλλα, γεωμεμβράνες και γυαλιά είναι μερικά από τα υλικά, που έχουν χρησιμοποιηθεί, με πιο συνηθισμένες τις γεωμεμβράνες. Τα υλικά αυτά προστίθενται στο φρέσκο μείγμα μπετονίτη-τσιμέντου, με τη βοήθεια ειδικών μηχανών, ενώ με συγκεκριμένες κατασκευές επιτυγχάνεται η στεγανότητα μεταξύ των υλικών.

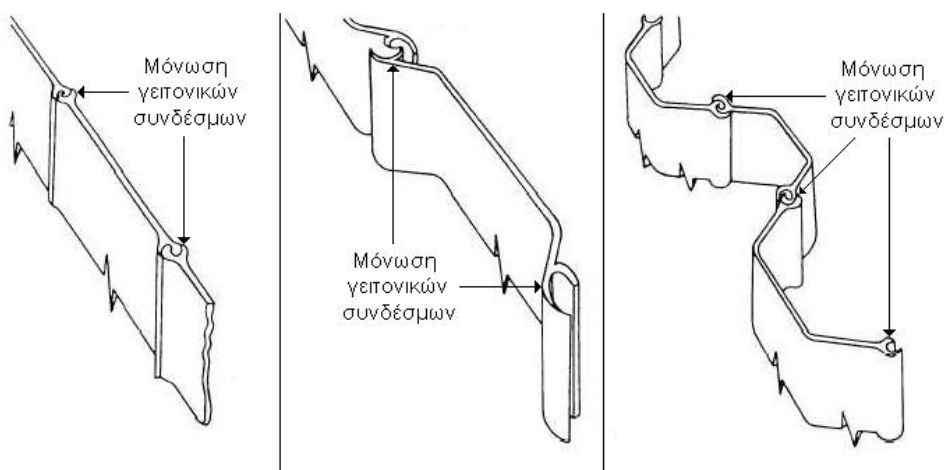
2.2.4 Λεπτά φράγματα

Αρχικά σωροί από χαλυβδόφυλλα και στη συνέχεια βαρύτερα ατσάλινα δοκάρια διασκορπίζονται και ανακινούνται στο έδαφος, ενώ την ίδια στιγμή εισάγεται ένα μείγμα τσιμέντου, αργίλου και νερού.

Τα πάνελ κατασκευάζονται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να παρέχουν 100% επικάλυψη και στεγανότητα για το φράγμα. Η ανακίνηση των στρωμάτων άμμου και χαλικιών καθιστά το μέσο ακόμη πιο συμπαγές, μειώνοντας τη διαπερατότητά του. Το μείγμα αργίλου και τσιμέντου συνήθως διεισδύει στους πόρους του εδάφους της περιοχής και τελικά το ενεργό πάχος του φράγματος προκύπτει να είναι το διπλάσιο του αρχικού.

2.2.5 Φράγματα από σωρούς μεταλλικών φύλλων

Κατασκευάζονται με ατσάλι, τσιμέντο, αλουμίνιο ή ξύλο και συνδέονται μεταξύ τους στεγανά με μεταλλικά μέσα. Συνήθως χρησιμοποιούνται σωροί ατσαλιού, οι οποίες κατασκευάζονται εύκολα σε μικρό χρονικό διάστημα και συγκρατούν μεγάλα φορτία, χωρίς να απαιτείται απόρριψη ρυπασμένου εδάφους. Η σκουριά που αναπτύσσεται και η στεγανότητα μεταξύ των φύλλων είναι οι δύο τομείς, στους οποίους θα πρέπει να δοθεί η δέουσα προσοχή, ώστε να εξασφαλιστεί η απόλυτα σωστή λειτουργία του φράγματος. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση μεταλλικών μέσων 1^{ης} διαλογής μπορεί να αυξάνει το κόστος, όμως η επιλογή ανοξείδωτων υλικών θα αποτρέψει την εμφάνιση σκουριάς, η απομάκρυνση της οποίας θα αποδειχθεί ακόμα πιο δαπανηρή από τον εξοπλισμό με καλής ποιότητας μέσα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ακόμα και η παραμικρή διαρροή σε ένα Διαπερατό Αντιδρών Φράγμα μπορεί να το καταστήσει μη αποτελεσματικό, οπότε δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη στεγανότητα μεταξύ των φύλλων. Τη λύση στο πρόβλημα αυτό μπορεί να δώσει μια πολύ απλή κατασκευαστική μετατροπή των φύλλων, τα οποία αφού τοποθετηθούν σε ειδική πρέσα, αποκτούν κυματοειδές προφίλ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-8.



Εικόνα 2-8: Διάφοροι τύποι μόνωσης μεταξύ γειτονικών συνδέσμων
(Πηγή: www.tpum.com)

Παρά την απλότητα της κατασκευής, η μέθοδος αυτή έχει πατενταριστεί από την Waterloo Barrier Inc. του Καναδά με το όνομα Waterloo Barrier®.

2.2.6 Μη διαπερατά φράγματα με χρήση πασσάλων και υψηλή πίεση

Όπως και στο φράγμα μονής φάσης, υφίσταται διαχωρισμός των περιττών από τα άρτια πάνελ για λόγους στεγανότητας, αφού αυτά που φέρουν περιττό αύξοντα αριθμό βυθίζονται πρώτα και τα αντίστοιχα με άρτιο αριθμό βυθίζονται στη συνέχεια, ερχόμενα σε άμεση επαφή με τα προηγούμενα. Τα μη διαπερατά φράγματα μπορούν να κατασκευαστούν με χρήση τσιμέντου απ' ευθείας από τη μπετονιέρα, με ταυτόχρονη έγχυση αέρα υπό υψηλή πίεση. Ο αέρας εισάγεται, ώστε να δημιουργηθεί κάτω από τη ζώνη ρύπανσης ένας χώρος απόθεσης του εδάφους. Στη συνέχεια, το ρυπασμένο έδαφος, αφού εξυγιανθεί και σταθεροποιηθεί, εναποτίθεται στο χώρο που δημιουργήθηκε προηγουμένως.

2.2.7 Φράγματα έγχυσης

Η έγχυση στερεοποιητικού υγρού στο έδαφος γεμίζει τους πόρους και της ρωγμές, μειώνοντας ταυτόχρονα τη διαπερατότητα. Τσιμέντο, τεχνίτες ρητίνες, καθώς και υλικά με ιδιότητες παραπλήσιες του γυαλιού, των οποίων η συμβατότητα με το υπόγειο νερό είναι επιβεβαιωμένη, εισάγονται με τη βοήθεια γεωτρήσεων. Η απόσταση αυτών εξαρτάται από τη διαπερατότητα, το ιξώδες του υλικού, καθώς και από τη μέγιστη επιτρεπτή πίεση εισαγωγής.

2.2.8 Παγωμένα φράγματα

Τα παγωμένα φράγματα κατασκευάζονται με εισαγωγή σωλήνων στο έδαφος, στους οποίους κυκλοφορεί ψυκτικό υγρό ή υγρό άζωτο. Παγώνοντας το έδαφος, δημιουργείται μια κλειστή και υδατοστεγής περιοχή. Η εγκατάσταση των παγωμένων φραγμάτων απαιτεί ελάχιστη εξόρυξη χώματος και η χρήση τους σταματάει με διακοπή της παροχής ψυκτικού υλικού, ώστε το έδαφος να ανακτήσει την αρχική του θερμοκρασία. Βρίσκουν εφαρμογή σε πολύ μεγάλα βάθη, της τάξης μερικών εκατοντάδων μέτρων και είναι εξίσου αποτελεσματικά σε οποιοδήποτε είδος υπεδάφους.



Εικόνα 2-9: Διάταξη παγωμένων φραγμάτων
(Πηγή: <http://www.arcticfoundations.com>)

2.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

2.3.1 Γενικά περί γεωμετρίας φράγματος

Με τον όρο γεωμετρία περιγράφονται:

- ✚ Οι διαστάσεις των αδιαπέρατων τοίχων και των διόδων.
- ✚ Η θέση και ο αριθμός των διόδων.
- ✚ Η γωνία μεταξύ των πλευρών των φραγμάτων.
- ✚ Ο προσανατολισμός του συστήματος Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων ως προς την υδραυλική κλίση της περιοχής.

Δύο βασικοί παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη διαμόρφωση τέτοιων συστημάτων είναι η εκροή στη δίοδο και ο χρόνος συγκράτησης του ρυπασμένου νερού. Οι δύο παράμετροι αυτές είναι αντιστρόφως ανάλογες, οπότε η επίτευξη της μεγιστοποίησης της ζώνης εγκλεισμού του πλουμίου, θα πρέπει να βασίζεται στο επίπεδο της επεξεργασίας αυτού. Η εκροή στη δίοδο θα πρέπει να μεγιστοποιείται, ώστε η ζώνη εγκλεισμού του πλουμίου να γίνεται το δυνατότερο ευρεία. Ο χρόνος συγκράτησης του ρυπασμένου υπόγειου νερού στη δίοδο να γίνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερος, ώστε να μειωθούν ανάλογα οι συγκεντρώσεις του ρύπου σε αυτό.

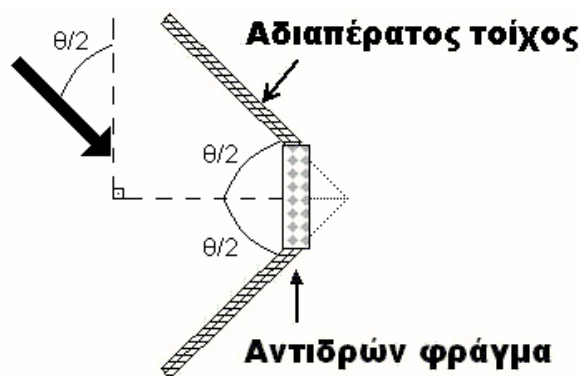
Επίδραση του πλάτους του φράγματος: Καθώς μεγαλώνει το πλάτος του φράγματος, αντίστοιχα αυξάνεται η εκροή από τη δίοδο, ενώ η ζώνη εγκλεισμού ευρύνεται. Η εκροή δεν αυξάνεται ανάλογα με το πλάτος του φράγματος. Από την άλλη, το ποσοστό του νερού που περνάει από τη δίοδο μειώνεται, ενώ όσο αυξάνεται το πλάτος του φράγματος, τόσο περισσότερο νερό ανακλάται γύρω από τις άκρες αυτού.

Επίδραση του πλάτους της διόδου: Προφανώς, όσο η δίοδος μεγαλώνει σε σχέση με το φράγμα, η εκροή και το πλάτος της ζώνης εγκλεισμού αυξάνουν, με αποτέλεσμα την αύξηση και του ανάλογου βαθμού εξυγίανσης.

Επίδραση της υδραυλικής αγωγιμότητας της διόδου: Όπως έχει ήδη αναφερθεί στους περιορισμούς της χρήσης των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων, η υδραυλική αγωγιμότητα του πληρωτικού υλικού θα πρέπει να είναι τουλάχιστον η διπλάσια αυτής του εδάφους. Υπάρχει ένας επιπλέον περιορισμός, όμως, αφού για υδραυλικές αγωγιμότητες μεγαλύτερες του 10πλάσιου παρατηρούνται πολύ μικρότερες ειδικές επιφάνειες, πάνω στις οποίες γίνεται η αλληλεπίδραση, οπότε μειώνεται και η απόδοση του συστήματος.

Τοποθέτηση του φράγματος στο χώρο για βέλτιστη εξυγίανση: Η εκροή από τη διόδο ενός συστήματος Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων χωρίς να σχηματίζεται γωνία μεταξύ αυτών, εξαρτάται από το μήκος της πύλης. Εξετάζοντας τη γενικότερη των περιπτώσεων, όπου το φράγμα δεν είναι κάθετο στην υδραυλική κλίση, το κάθετο προβαλλόμενο πλάτος του φράγματος στην κλίση της περιοχής σχετίζεται εξίσου με τη γωνία κορυφής και το προσανατολισμό ως προς την υδραυλική κλίση. Η εξάρτηση του πλάτους του φράγματος από τη γωνία κορυφής και το μήκος του τοίχου, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-10, δίνεται στην Εξίσωση 2-1:

$$W_{\text{φράγμα}} = W_{\text{διόδου}} + 2 \cdot L \cdot \sin(\theta/2) \quad (\text{Εξίσωση 2-1})$$



Εικόνα 2-10: Κλίση του αδιαπέρατου τοίχου ως προς το φράγμα

Για σταθερού μήκους τοίχο, το πλάτος του φράγματος είναι μέγιστο για διάταξη σε ευθεία ($\theta=180^\circ$) και μειώνεται ανάλογα με τη γωνία.

Αν το φράγμα προβληθεί κάθετα στην κλίση της περιοχής, το πλάτος του δίνεται από την εξίσωση 2-2:

$$W_{\text{φράγμα κάθετο}} = W_{\text{φράγμα}} \cdot \sin\varphi \quad (\text{Εξίσωση 2-2})$$

Όπου: φ η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του φράγματος και της κλίσης της περιοχής. Προφανώς, όταν αυτά είναι κάθετα μεταξύ τους, η τιμή του ημιτόνου μεγιστοποιείται (1) και ανάλογα προκύπτει το μέγιστο προβαλλόμενο πλάτος.

Για όλους τους προσανατολισμούς ως προς την κλίση της περιοχής, η μέγιστη παροχή εμφανίζεται για την ευθεία γωνία (180°). Η αλλαγή δεν είναι σημαντική για το διάστημα μεταξύ 127° και 233° , όμως παρατηρούνται αξιοσημείωτες μεταβολές για γωνίες εκτός του προηγούμενου διαστήματος. Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα, πως η πιο αποτελεσματική διαμόρφωση είναι το φράγμα σε ευθεία, αλλά και γωνίες που είναι στο διάστημα $[127^\circ, 233^\circ]$ είναι εξίσου αποτελεσματικές.

Για όλες τις γωνίες κορυφής, η μέγιστη παροχή εμφανίζεται όταν το φράγμα είναι κάθετο στην κλίση της περιοχής. Για ένα φράγμα με γνωστή γωνία κορυφής, η παροχή από τη δίοδο, όταν το φράγμα δεν είναι κάθετο στην κλίση της περιοχής, είναι το γινόμενο του ημιτόνου της γωνίας που σχηματίζει το φράγμα με την κλίση της περιοχής, με την παροχή από τη δίοδο για φράγμα κάθετο στην κλίση της περιοχής. Η σχέση ισχύει για συμμετρικά φράγματα και όχι απαραίτητα για ασύμμετρα.

Στην περίπτωση που τα συμμετρικά φράγματα είναι περισσότερο αποτελεσματικά από τα μη συμμετρικά για μια γωνία με την κλίση της περιοχής, τότε είναι περισσότερο αποτελεσματικά και για κάθε άλλη γωνία. Αν και η μέγιστη παροχή εμφανίζεται σε φράγμα κάθετο στην κλίση της περιοχής, η παροχή μειώνεται λιγότερο από 15% για προσανατολισμούς με απόκλιση μέχρι και 30° από την κάθετο. Η παροχή της διόδου για τοίχους με δεδομένο μήκος μπορεί περίπου να μεγιστοποιηθεί αν χρησιμοποιηθούν γωνίες κορυφής $180 \pm 50^\circ$ και προσανατολίζοντας το φράγμα μέσα στις 30° από την κάθετο με την υδραυλική κλίση της περιοχής.

2.3.2 Επίδραση της διαμόρφωσης του Φράγματος ως προς τη ζώνη εγκλεισμού

Σχεδιάζοντας ένα σύστημα Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων μπορεί να θεωρηθεί ως στόχος η επιλογή εκείνης της διαμόρφωσης, που οδηγεί στην μεγαλύτερη παροχή ανά μήκος αδιαπέρατου τοίχου στο φράγμα. Το πλάτος της ζώνης εγκλεισμού, πέρα από την περιοχή κοντά στο φράγμα είναι ανάλογο με την παροχή στη δίοδο, έτσι μεγιστοποιώντας την παροχή, μεγιστοποιείται αντίστοιχα και το πλάτος της ζώνης εγκλεισμού. Το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους κατασκευής ενός φράγματος είναι ανάλογο με το μήκος των αδιαπέρατων τοίχων που εγκαθίστανται, συνεπώς το κόστος μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, αν χρησιμοποιηθούν διαμορφώσεις που δημιουργούν μέγιστη παροχή ανά μονάδα μήκους του τοίχου. Η διαμόρφωση που οδηγεί σε μέγιστη παροχή ανά μονάδα μήκους του τοίχου είναι το φράγμα με γωνία 180° προσανατολισμένο κάθετο στην κλίση της περιοχής.

Σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να μην είναι εφικτό να κατασκευαστεί ένα σύστημα Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων με αυτή τη μορφή λόγω περιορισμών πρόσβασης, όπως η υπάρχουσα υποδομή ή κάποια όρια ιδιοκτησίας. Επιπρόσθετα, σε άλλες περιπτώσεις ο στόχος μπορεί να είναι διαφορετικός από το να μεγιστοποιηθεί το πλάτος της ζώνης εγκλεισμού.

Η γεωμετρία αυτών των συστημάτων και ο προσανατολισμός ως προς την κλίση της περιοχής επηρεάζουν το μέγεθος και το σχήμα της ζώνης εγκλεισμού πλησίον του φράγματος, συγχρόνως όμως επηρεάζουν και το πλάτος της ζώνης αυτής μακρύτερα από την περιοχή του φράγματος.

Αν η ζώνη ρύπανσης είναι κοντά στο φράγμα, τότε θα είναι επωφελές να επιλεγεί μια διαμόρφωση που μεγιστοποιεί το μέγεθος της ζώνης εγκλεισμού κοντά στο φράγμα, ακόμα και αν αυτή δε μεγιστοποιεί το πλάτος αυτής μακριά του. Οι διευθύνσεις της ροής του υπόγειου ύδατος μεταβάλλονται με το χρόνο, λόγω των φυσικών διακυμάνσεων στην εκροή, του εμπλουτισμού και των ανθρωπογενών επιδράσεων. Καθώς οι διευθύνσεις ροής μεταβάλλονται, η ζώνη εγκλεισμού του φράγματος αλλάζει επίσης. Για το λόγο αυτό είναι πιθανό, όταν η ζώνη ρύπανσης βρίσκεται στη ζώνη εγκλεισμού, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ροής, να μη συμβαίνει το ίδιο εάν αυτές αλλάξουν.

2.3.3 Συμπεράσματα για τη Γεωμετρία των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων

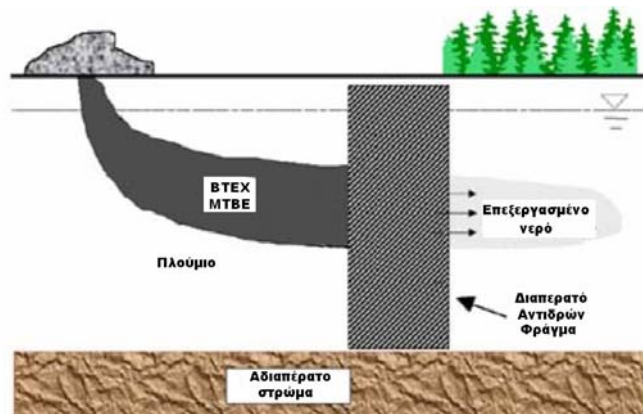
Η μοντελοποίηση με ροή δύο διαστάσεων των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων σε έναν ομογενή, ισοτροπικό υδροφορέα καταδεικνύει πως το πλάτος της ζώνης εγκλεισμού που παράγεται σε ένα τέτοιο σύστημα φραγμάτων είναι ανάλογο της παροχής από τη δίοδο. Η παροχή αυτή μπορεί να αυξηθεί, αν μεγαλώσουν ανάλογα το πλάτος, το μήκος και η υδραυλική αγωγιμότητα της διόδου, καθώς και το πλάτος του φράγματος. Για δεδομένο μήκος αδιαπέρατου τοίχου, η αποτελεσματικότερη διαμόρφωση σε έναν ισοτροπικό υδροφορέα είναι ένα φράγμα με πλευρές σε ευθεία γωνία, προσανατολισμένες κάθετα στην υδραυλική κλίση της περιοχής. Ωστόσο, άλλες διαμορφώσεις εμφανίζουν μεγαλύτερες ζώνες εγκλεισμού κοντά στο φράγμα.

Σε περιπτώσεις, όπου η διεύθυνση της υδραυλικής κλίσης της περιοχής ποικίλει, η περιοχή που καταλαμβάνει η ζώνη εγκλεισμού σε ολόκληρη την ακτίνα μεταβολής της διεύθυνσης ροής εξαρτάται αυστηρά από τη διαμόρφωση του φράγματος. Σχήματα διαφορετικά από φράγματα των 180° παράγουν μεγαλύτερη σύνθετη ζώνη εγκλεισμού σε ολόκληρη την ακτίνα μεταβολής της διεύθυνσης της ροής. Η ισορροπία μεταξύ της μεγιστοποίησης του μεγέθους της ζώνης εγκλεισμού για μια δίοδο και της μεγιστοποίησης του χρόνου συγκράτησης του ρυπασμένου υπόγειου ύδατος μέσα από τη δίοδο, είναι απαραίτητο να επιτευχθεί. Ωστόσο, ο χρόνος συγκράτησης μπορεί εύκολα να αυξηθεί χωρίς ουσιαστική επίδραση στη ζώνη εγκλεισμού, κάνοντας τις διόδους μακρύτερες σε κατεύθυνση παράλληλη με τη ροή.

Εναλλακτικά, μεγάλοι χρόνοι συγκράτησης επιτυγχάνονται αν η ζώνη της πηγής ρύπανσης περιβληθεί ολοκληρωτικά από αδιαπεράτους τοίχους, εκτός από ένα άνοιγμα που περιλαμβάνει in situ αντιδραστήρα και βρίσκεται στον κατάντη τοίχο.

2.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη διάταξη Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων είναι η οριζόντια, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-11. Στην περίπτωση αυτή, η υδραυλική αγωγιμότητα, η ετερογενής μορφή του υδροφορέα, καθώς και η διάχυση μπορούν να αγνοηθούν.



Εικόνα 2-11: Οριζόντια διάταξη Διαπερατού Αντιδρώντος Φράγματος
(Πηγή: www.eti.ca)

Η ταχύτητα του υπόγειου νερού μέσα στον υδροφορέα εκτιμάται από δοκιμές με δείγματα από το πεδίο, ενώ ταυτόχρονα εκτιμάται και η ικανότητα αντίδρασης του ενεργού υλικού. Εξ' αρχής γίνεται η παραδοχή ότι οι αντιδράσεις ακολουθούν κινητική 1^{ης} τάξης. Έτσι, ο απαιτούμενος χρόνος παραμονής του ρύπου στο σύστημα προσδιορίζεται από την Εξίσωση 2-3.

$$\frac{C_e}{C_{in}} = e^{-(k_r t)} \quad (\text{Εξίσωση 2-3})$$

όπου:

k_r : σταθερά ρυθμού αντίδρασης στο αντιδρών υλικό

C_{in} : συγκέντρωση εισερχόμενου ρύπου

C_e : επιθυμητή συγκέντρωση του ρύπου στην εκροή

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς το χρόνο, προκύπτει η Εξίσωση 2-4.

$$t = -\frac{1}{k_r} \ln \frac{C_e}{C_{in}} \quad (\text{Εξίσωση 2-4})$$

Βάσει της παραπάνω εξίσωσης και της έκφρασης της ταχύτητας ως λόγο της διανυόμενης απόστασης προς το χρόνο, προκύπτει το ελάχιστο πάχος του φράγματος με επίλυση της Εξίσωσης 2-5.

$$L_{PRB} = \frac{v}{k_r} \ln \frac{C_e}{C_{in}} \quad (\text{Εξίσωση 2-5})$$

όπου:

v : η ταχύτητα του υπόγειου νερού στο φράγμα

Αν είναι διαθέσιμες επιπλέον πληροφορίες, όπως ο συντελεστής διάχυσης και οι ισόθερμες της προσρόφησης, οι οποίες αναλύονται στο Κεφάλαιο 6, τότε προτιμάται η Εξίσωση 2-6 για τον υπολογισμό του πάχους της ενεργής ζώνης του φράγματος του συστήματος.

$$L_{disp} = \frac{2D}{v \cdot (1 - \sqrt{1 + 4k \frac{D}{v^2}})} \cdot \ln \frac{C_e}{C_{in}} \quad (\text{Εξίσωση 2-6})$$

όπου:

D : ο συντελεστής διάχυσης

k : η σταθερά του ρυθμού της αντίδρασης συνδυασμένης φάσης υγρού με στερεό, όπου περιλαμβάνεται και το φαινόμενο της ρόφησης

Στην περίπτωση, όπου οι αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα επί του αντιδρώντος υλικού, τότε οι συντελεστές k_r και k από τις Εξισώσεις 2-5 και 2-6 αντίστοιχα, ταυτίζονται και προκύπτει ο λόγος των δύο μηκών που υπολογίστηκαν και ισούται με το συντελεστή διόρθωσης CF_{disp} . (Εξίσωση 2-7).

$$\frac{L_{disp}}{L_{PRB}} = CF_{disp} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + 2\lambda} - 1} \quad (\text{Εξίσωση 2-7})$$

όπου:

λ : η σταθερά που ισούται με $\frac{2Dk}{v^2}$

Θεωρητικά, για τον υπολογισμό του πάχους της ενεργής ζώνης του φράγματος (L), αθροίζονται τα L_{PRB} με το CF_{disp} . (Εξίσωση 2-8).

$$L = L_{PRB} + CF_{disp} \quad (\text{Εξίσωση 2-8})$$

Πρακτικά, για τον υπολογισμό του τελικού πάχους της ενεργής ζώνης του φράγματος, πολλαπλασιάζεται το πάχος L με έναν άλλο συντελεστή διόρθωσης ασφαλείας.

Ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται, ώστε να αποφευχθούν αβεβαιότητες εξ' αιτίας των παρακάτω παραγόντων:

- ✚ Ταχύτητα του υπογείου νερού.
- ✚ Συγκέντρωση του ρυπαντή στην εισροή του φράγματος.
- ✚ Ακριβής τιμή της σταθεράς του ρυθμού αντίδρασης.
- ✚ Μακροπρόθεσμη διάσπαση του ενεργού υλικού της πύλης.

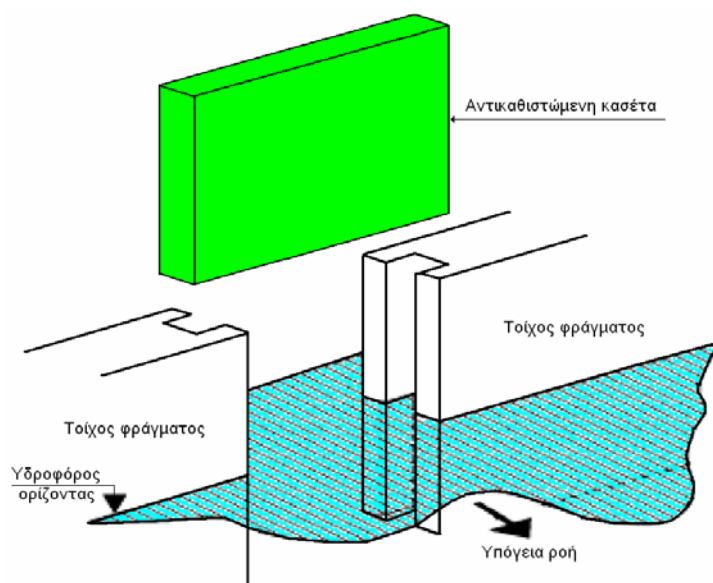
Συνήθεις τιμές του συντελεστή διόρθωσης κυμαίνονται μεταξύ 1,5 και 2,5. Για περιπτώσεις ετερογενών υδροφόρων πετρωμάτων, η τιμή του συντελεστή μπορεί ακόμα και να διπλασιαστεί, αφού όσο αυξάνεται η ετερογένεια του πετρώματος, τόσο μεγαλώνει και ο συντελεστής. Ένα επιπλέον πρόβλημα κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων είναι η αλλαγή της ροής, ανάλογα με τα κλιματικά φαινόμενα και τις εποχές. Έτσι, σε περιπτώσεις μεταβολής της απορροής, παρατηρείται ανομοιόμορφη κατανομή της μεταφοράς μάζας στην περιοχή του φράγματος, καθιστώντας την απόδοσή του μειωμένη. Για τέτοιες περιπτώσεις θα πρέπει κατά την εγκατάσταση του φράγματος να ληφθούν τα κατάλληλα προληπτικά μέτρα, όπως σήραγγες εύκολης πρόσβασης στο εσωτερικό του φράγματος, καθώς και πηγάδια άντλησης, ώστε να μπορεί να μεταβληθεί η πορεία του υπογείου νερού.

2.5 ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΟΣ ΜΕΣΟΥ

Ένα από τα μειονεκτήματα της χρήσης των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων είναι η αντικατάσταση του πληρωτικού υλικού, αφού σε περίπτωση ανεξέλεγκτης τοποθέτησης αυτού κατά την εγκατάσταση είναι πολύ δύσκολο και δαπανηρό, να συλλεγεί από το υπέδαφος το προς απόσυρση αντιδρών μέσο. Δυσχερέστερη περίπτωση είναι η εγκατάσταση φράγματος με χρήση της τεχνολογίας jet, οπότε και το αντιδρών υλικό διασκορπίζεται σε τυχαία σημεία στο υπέδαφος. Επιπρόσθετα, η επανατοποθέτηση του νέου υλικού φέρει τις ίδιες δυσκολίες με αυτές κατά την πρώτη εγκατάσταση.

Λύση στο πρόβλημα αυτό μπορεί να φέρει μια καινοτόμος τεχνολογία, η οποία διευκολύνει την αντικατάσταση του πληρωτικού υλικού, μειώνοντας σημαντικά και το κόστος. Ο τρόπος που ενδείκνυται από οικονομικής και πρακτικής απόψεως ονομάζεται «αντικατάσταση κασέτας» και απαιτεί προσαρμογή της εγκατάστασης κατά την κατασκευή. Η «κασέτα» αποτελεί τον όγκο του αντιδρώντος μέσου, το οποίο περιορίζεται χωρικά, ώστε να είναι δυνατή η απομόνωσή του από το υπόλοιπο έδαφος.

Οπότε, κατά την κατασκευή του φράγματος, θα πρέπει να ληφθούν συγκεκριμένα μέτρα, έτσι ώστε το φράγμα να τοποθετείται στο υπέδαφος, επιτρέποντας ταυτόχρονα την αποκόλλησή του από αυτό ανά πάσα περίπτωση. Έτσι, όταν επέλθει η ανάγκη αντικατάστασης του πληρωτικού υλικού, η αρχική «κασέτα» αντικαθίσταται από νέα, η οποία έχει τις ίδιες διαστάσεις και τοποθετείται εύκολα. Στην Εικόνα 2-12 φαίνεται η διάταξη του Διαπερατού Αντιδρώντος Φράγματος, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνολογία της «αντικατάστασης κασέτας». Χαρακτηριστικά, φαίνονται οι εγκοπές επί του τοίχου, όπου και εφαρμόζει η «κασέτα», μη αφήνοντας κενά μεταξύ αυτής και του τοίχου, εξασφαλίζοντας απόλυτη επεξεργασία του διερχόμενου νερού από το φράγμα.



Εικόνα 2-12: Αντικαθιστώμενη κασέτα Διαπερατού Αντιδρώντος Φράγματος
(Πηγή: Suthersan, S. 1997)

Η εφαρμογή της τεχνολογίας των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων έχει βρει εφαρμογή τα τελευταία 20 χρόνια, οπότε και ο αποδοτικός χρόνος ζωής του πληρωτικού υλικού δεν έχει ελεγχθεί ακόμη. Η αναγκαιότητα, όμως, της εύκολης αντικατάστασης του αντιδρώντος μέσου υφίσταται ήδη, αφού είναι πιθανό να απαιτηθεί είτε αλλαγή αυτού για λόγους καλύτερης απόδοσης, είτε ενίσχυση του ήδη υπάρχοντος με προσθήκη καταλυτών, είτε απλά αντικατάστασή του με άλλο υλικό για διαφορετικού είδους εξυγίανση.

Για παράδειγμα, σε ένα πεδίο, όπου εφαρμόζεται η τεχνολογία των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων για εξυγίανση αυτού από πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες, μπορεί να εμφανιστεί η ανάγκη απομάκρυνσης βαρέων μετάλλων, τα οποία εντοπίστηκαν αφού εγκαταστάθηκε το φράγμα.

2.6 ΧΡΟΝΟΣ ΖΩΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

Γενικότερα, στις παραμέτρους επιλογής εγκατάστασης ενός Διαπερατού Αντιδρώντος Φράγματος ανήκουν και δύο διαφορετικοί χρόνοι:

- ✚ Ο χρόνος ζωής του υλικού, για τον οποίο, όπως αναφέρθηκε και πριν, δεν υπάρχουν στοιχεία λόγω της βραχύχρονης χρήσης αυτών και
- ✚ Ο χρόνος παραμονής του ρυπασμένου υπογείου νερού στη ζώνη επεξεργασίας, ο οποίος εξαρτάται από τον τύπο της εξυγίανσης που απαιτείται, τις φυσικοχημικές ιδιότητες του ρύπου, καθώς και από τη συγκέντρωση αυτών στο υπόγειο νερό. Μια γενική σχέση προσδιορισμού του χρόνου αυτού, η οποία έχει αναπτυχθεί για την περίπτωση που λαμβάνει χώρα βιοαποδόμηση των υπαρχόντων ρύπων με κινητική 1^{ης} τάξης είναι η εξής:

$$N_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln \frac{C_{eff}}{C_{inf}}}{\ln(1/2)} \quad (\text{Εξίσωση 2-9})$$

- όπου: $N_{1/2}$ ο αριθμός των χρόνων ημιζωής που απαιτούνται
 C_{eff} η επιθυμητή συγκέντρωση του ρύπου στο επεξεργασμένο νερό [$M \cdot L^{-3}$]
 C_{inf} η αρχική συγκέντρωση του ρύπου στο υπόγειο νερό [$M \cdot L^{-3}$].

2.7 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΖΩΗΣ ΕΝΟΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΥ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΟΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

2.7.1 Χρόνος ζωής Διαπερατού Αντιδρώντος Φράγματος

Ο χρόνος ζωής ενός φράγματος υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$t_s = \frac{d}{v_a} \cdot R \quad (\text{Εξίσωση 2-10})$$

όπου:

- d: το πάχος της διόδου
 v_a : η ταχύτητα ροής του υπογείου νερού
R: ο παράγοντας καθυστέρησης

2.7.2 Παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο ζωής του Φράγματος

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο ζωής του φράγματος είναι:

Η σύσταση του υπογείου νερού, όπου παρατηρείται:

- ✚ Ανταγωνιστική επίδραση: τα συστατικά του φυσικού υπογείου νερού και οι ρύποι συναγωνίζονται για τις θέσεις προσρόφησης.
- ✚ Καθίζηση των δευτερευόντων ανόργανων συστατικών, όπου ένα στρώμα εμποδίζει την πρόσβαση στις επιφάνειες μεταβάλλοντας την κινητική της αντίδρασης.

Ο σχηματισμός της βιομάζας, που έχει σαν αποτέλεσμα:

- ✚ Αρνητική επίδραση μέσω παγίδευσης των πόρων
- ✚ Θετική επίδραση με βιολογική αποδόμηση των προσροφημένων ρύπων

2.8 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΩΝ PRB'S ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

2.8.1 Η Περίπτωση του Offenbach (Birke et al., 2003).

Θέμα:

Σκοπός της εφαρμογής των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων ήταν η ανάπτυξη και ο έλεγχος ενός φράγματος, ώστε ο υδροφορέας να εξυγιανθεί από BTEX και PAH's (Poly Aromatic Hydrocarbons).

Ρύποι:

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-13, η περιοχή βρίσκεται κοντά στον ποταμό Main στο Offenbach της Γερμανίας και χρησιμοποιούνταν ως εργοστάσιο παραγωγής πίσσας, οπότε ανιχνεύθηκαν BTEX και πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH's).

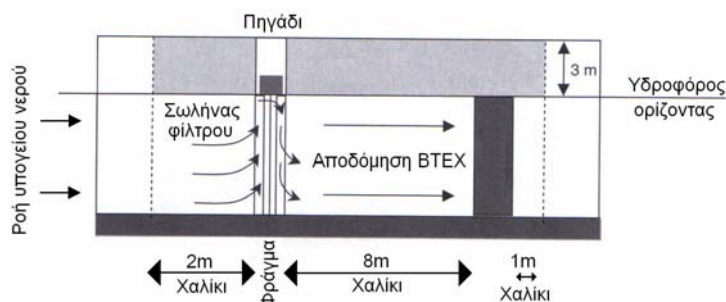


Εικόνα 2-13: Κάτοψη περιοχής μελέτης
(Πηγή: www.rubin-online.de)

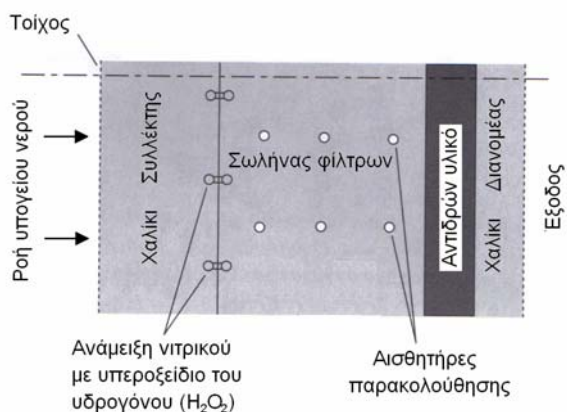
Στα κατάντι του ποταμού μετρήθηκε συγκέντρωση βενζολίου της τάξης των 4.000 mg/l, ενώ η ελαιώδης φάση που εμφανιζόταν στον υδροφόρο ορίζοντα είχε πάχος μεταξύ 20 και 80 cm αντίστοιχα. Τέλος, εξ' αιτίας των λιμναζόντων υδάτων του ποταμού, παρατηρήθηκε υδροφοβικότητα, που είχε σαν αποτέλεσμα διαφορετική τάση προσρόφησης όσο αφορά BTEX και PAH's.

Τύπος φράγματος και αντιδρώντος υλικού:

Όπως φαίνεται και στις Εικόνες 2-14 και 2-15, χρησιμοποιήθηκε σύστημα χοάνης - πύλης και ως αντιδρών υλικό επιλέχθηκε ενεργός άνθρακας και προσθήκη δεκτών ηλεκτρονίων, οι οποίοι απαιτούνται ώστε να διεξαχθεί η μικροβιακή δραστηριότητα. Το φράγμα είχε μήκος 120 μέτρων και βρισκόταν σχεδόν κάθετα στην κατεύθυνση ροής του υπογείου νερού και τοποθετήθηκε στα κατάντη του πλουμίου της ρύπανσης. Η πύλη είχε σχεδόν τετράγωνο σχήμα με μήκος και πάχος ίσο με 10 μέτρα, ενώ η κατασκευή έγινε με τη διαδικασία απόθεσης σωρών. Επιπλέον, τοποθετήθηκαν σωληνώσεις, οι οποίες φέρουν τους απαιτούμενους ηλεκτρονικούς δότες και είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους σε ένα ενιαίο δίκτυο. Στα 8 μέτρα του πάχους του φράγματος, στα οποία έχει τοποθετηθεί το αντιδρών υλικό, αλλά και χαλίκι, παρατηρείται χρόνος παραμονής της τάξης της 1½ μέρας, όπου και το BTEX αποδομείται.



Εικόνα 2-14: Κάτοψη φράγματος
(Πηγή: www.rubin-online.de)



Εικόνα 2-15: Τομή φράγματος
(Πηγή: www.rubin-online.de)

2.8.2 Η Περίπτωση της Pantex (United States Department of Energy, 2007)

Το Υπουργείο Ενέργειας και Πυρηνικής Ασφάλειας των Ηνωμένων Πολιτειών προετοιμάζεται να εφαρμόσει μια τακτική εξυγίανσης του υπόγειου ύδατος στην περιοχή των εγκαταστάσεων της Pantex στην πολιτεία του Texas. Οι εγκαταστάσεις βρίσκονται σε απόσταση 25 χιλιομέτρων βορειοανατολικά του Amarillo (TE). Στις αρχές της δεκαετίας του '40 λειτούργησαν στην περιοχή εργοστάσια παραγωγής πυρομαχικών στην υπηρεσία του Αμερικανικού στρατού. Μετά το τέλος του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου, τα εργοστάσια έμειναν ανενεργά ως και το 1949, όταν και η εγκατάσταση πέρασε στην ιδιοκτησία του Πολυτεχνείου του Texas (TEXAS TECH UNIVERSITY - T.T.U.), το οποίο με τη σειρά του παραχώρησε την εκμετάλλευση της περιοχής στην Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας. Έτσι, ιδρύθηκε η εταιρεία Pantex, η οποία μέχρι και σήμερα συναρμολογεί και αποσυναρμολογεί όλα τα πυρηνικά όπλα των Ηνωμένων Πολιτειών. Μοιραία, διαρκείς διαρροές κατά τη λειτουργία της εγκατάστασης προκάλεσαν την έντονη επιβάρυνση του υδροφορέα της περιοχής με τοξικές - κυρίως εκρηκτικές - ουσίες, οι οποίες αρχικά κατέληγαν σε παρακείμενους λάκκους, καταλήγοντας τελικά στο υπόγειο νερό. Στην περιοχή έχει ήδη εγκατασταθεί σύστημα Άντλησης - Επεξεργασίας (pump-and-treat) για τον περιορισμό του δημιουργούμενου πλούμιου. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα συστήματα Άντλησης - Επεξεργασίας έχουν σχετικά χαμηλό βαθμό απόδοσης, οπότε και σε διάφορες γεωτρήσεις στην περιοχή παρουσιάστηκε πλούμιο, το οποίο διέφυγε από την εγκατάσταση.

Έτσι, προέκυψε η ανάγκη εύρεσης νέας, αποδοτικότερης λύσης.

Οι προτεινόμενες από το Υπουργείο λύσεις είναι οι εξής:

- Καμία δράση
- Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα
- *In-situ* βιοαποδόμηση

Λύση χωρίς δράση

Στην περίπτωση αυτή δε θα ληφθούν επιπλέον μέτρα για την απομάκρυνση των ρύπων από το υπόγειο νερό. Το ήδη υπάρχον πλούμιο θα γίνει ακόμα μεγαλύτερο, αφού εγκλωβισμένοι στην ακόρεστη ζώνη ρύποι θα καταλήξουν στο υπόγειο νερό, το οποίο θα συνεχίσει να επεξεργάζεται με τη χρήση των αντλιών, οξύνοντας περαιτέρω το πρόβλημα.

Χρήση Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων




Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ένα διάλυμα sodium dithionite μπορεί να εισαχθεί στο υπέδαφος, αντιδρώντας με τον υπάρχοντα σίδηρο. Υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες, ο μηδενικού σθένους σίδηρος (Fe^0) μετατρέπεται σε δισθενή σίδηρο (Fe^{2+}), ο οποίος αποτελεί ένα από τα πλέον δημοφιλή και αποδοτικά πληρωτικά υλικά στα συστήματα Αντιδρώντων Φραγμάτων. Η μέθοδος κατασκευής του φράγματος που ενδείκνυται στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η κατασκευή συστάδας πηγαδιών, τα οποία φέρουν το πληρωτικό υλικό και δημιουργούν την πύλη του φράγματος. Κατόπιν υπολογισμών, βάσει δεδομένων της υδρογεωλογίας, αλλά και αναλύσεων του πλουμίου, επιλέχθηκε η τοποθέτηση 112 πηγαδιών σε σειρά, με νότιο προσανατολισμό, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-17.

Χρήση *in-situ* βιοαποδόμησης

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, θα εγκατασταθούν δυο σειρές 56 συνολικά πηγαδιών, τα οποία βρίσκονται σε συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους. Η επιλογή της μεθόδου αυτής έγινε, αφού σε πιλοτικό επίπεδο, η *in-situ* βιοαποδόμηση είναι σε θέση να εξυγιάνει σε μεγάλο βαθμό ρυπαντές εκρηκτικής φύσης.

Σύγκριση μεταξύ μεθόδων

Τα κριτήρια για τη σύγκριση μεταξύ των προτεινόμενων μεθόδων είναι τα εξής:

-  Αποδοτικότητα
-  Ευελιξία
-  Κόστος

Λύση χωρίς δράση

Στην περίπτωση αυτή, η αποδοτικότητα της εξυγίανσης, όπως σχολιάστηκε και προηγουμένως, δεν είναι ικανοποιητική, ενώ και η ευελιξία αυτής είναι σχετικά περιορισμένη, αφού σε περίπτωση εμφάνισης νέου πλουμίου, η μόνη λύση είναι η διάνοιξη επιπλέον πηγαδιών. Όσο αφορά το κόστος, όπως αναλύθηκε και προηγουμένως, δε μεταβάλλεται και συνεχίζει να είναι πάντα υψηλό.

Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα

Στην περίπτωση αυτή, η αποδοτικότητα της εξυγίανσης είναι αρκετά υψηλή, αφού όσο νερό περνάει από την πύλη εξυγιαίνεται, ενώ το υπόλοιπο δεν την προσπελαύνει, αλλά

επιστρέφει λόγω τύρβης και επαναντιδρά με το φράγμα, μειώνοντας όμως ταυτόχρονα και το χρόνο ζωής αυτού. Η ευελιξία της μεθόδου έχει αναλυθεί και σε άλλο κεφάλαιο, αφού στην περίπτωση διαφορετικού τύπου εξυγίανσης, το αντιδρών υλικό μπορεί να αλλάξει πολύ εύκολα, χωρίς υψηλό κόστος.

Χρήση in-situ βιοαποδόμησης

Πρόσφατες μελέτες (United States Department of Energy, 2007) απέδειξαν, πως είναι δυνατή η χρήση in situ ενισχυμένης βιοαποδόμησης για την εξυγίανση του υπεδάφους από εκρηκτικές ύλες. Η κυριότερη τροχοπέδη για τη χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η διασπορά διαφόρων προϊόντων μεταβολισμού στο υπόγειο νερό. Παρόλα αυτά, η in-situ επεξεργασία μπορεί να επιτύχει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε περιπτώσεις όπως αυτή της Pantex. Η εναλλακτική αυτή λύση θα προκαλούσε βραχυπρόθεσμη αποδοτικότητα στην εξυγίανση της περιοχής, υποβαθμίζοντας του ρυπαντές στο μέγιστο δυνατό, εμποδίζοντάς τους να καταλήξουν στον υδροφορέα της περιοχής Ogallala, από όπου τροφοδοτούνται οι τοπικές αγροτικές γεωτρήσεις. Δύο παράλληλες σειρές κάθετων πηγαδιών εισαγωγής θα μπορούσαν να εγκατασταθούν, με τον αριθμό των γεωτρήσεων να φτάνει περίπου τις 60, με βάθος ως και 100 μέτρα.

Πρόταση εξυγίανσης

Όπως καθορίστηκε από την αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων προηγουμένως, τα χαρακτηριστικά της υδρογεωλογίας της περιοχής, η πρόταση της εξυγίανσης μέσω Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων κρίνεται ως η αποδοτικότερη. Πιο συγκεκριμένα, η συγκεκριμένη μέθοδος, βάσει πιλοτικών δοκιμών στην περιοχή, αποδείχθηκε πως μπορεί να μειώσει άμεσα τις συγκεντρώσεις εκρηκτικών υλών. Οι εγκαταστάσεις της Pantex βρίσκονται βορειοδυτικά της περιοχής ρύπανσης, όπου και παρατηρείται ταχύτερη πλευρική υπόγεια ροή, την οποία μπορεί να εκμεταλλευτεί μια κατασκευή χοάνης - πύλης σε ένα σύστημα Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων. Η συνιστώμενη εναλλακτική λύση θα επιτύχει τους στόχους της εξυγίανσης με τους παρακάτω τρόπους:

- Καθιέρωση ζώνης των ιδιαίτερα μειωμένων όρων.
- Ενθάρρυνση της αύξησης γηγενών μικροβίων, απαραίτητων στην επεξεργασία.
- Υποβιβάζοντας τα συστατικά, ειδικά στα σημεία διαφυγής υπογείου νερού προς τον υδροφορέα της Ogallala.

*ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΡΥΠΩΝ (BTEX, MTBE)**Κεφάλαιο 3***3.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Στη συγκεκριμένη μελέτη, η ρύπανση του υδροφορέα οφείλεται στους υδρογονάνθρακες, που προέρχονται από πετρελαιοειδή, όπως το BTEX και το MTBE. Γενικότερα, οι διαρροές σε δεξαμενές αποθήκευσης προϊόντων πετρελαίου, κυρίως σε διυλιστήρια και πρατήρια καυσίμων, εντείνουν το πρόβλημα της ρύπανσης των υδροφορέων. Οι διαρροές οφείλονται κυρίως σε πρόκληση οπών στο περίβλημα των δεξαμενών και σωληνώσεων, ιδιαιτέρως όταν αυτές είναι αρκετά παλαιές, είτε λόγω ατυχημάτων, είτε λόγω διάβρωσης του υλικού. Στη δεύτερη περίπτωση, η διαρροή μπορεί να προέρχεται από μια μικρή τρύπα της δεξαμενής, είτε στη δυσμενέστερη περίπτωση υπογείων σωληνώσεων, οπότε το πρόβλημα δεν είναι ορατό και ο ρύπος με την επίδραση των δυναμικών κινήσεων του υδρολογικού κύκλου, συγκεντρώνεται στον υδροφορέα και εντοπίζεται μέσω πηγαδιών παρατήρησης, αφού περάσει σημαντικό χρονικό διάστημα από την εκκίνησή της.

Η εμφάνιση ελαιωδών στον υδροφόρο ορίζοντα είναι ορισμένες φορές ο μόνος τρόπος για να διαπιστωθεί κάποια διαρροή, κυρίως σε περιπτώσεις υπογείων αγωγών. Τα προϊόντα του διυλιστηρίου ανήκουν στην κατηγορία των υγρών σε μη υδατώδη φάση (NON AQUEOUS PHASE LIQUIDS - NAPLs), τα οποία δε διαλύονται εντός του υπόγειου νερού. Αυτά τα μη αναμειγνυόμενα ρευστά έχουν διαφορετική συμπεριφορά και διαφορετικές ιδιότητες όταν βρίσκονται εντός του υπεδάφους, σε σύγκριση με τα ρευστά, που αναμειγνύονται με το υπόγειο ύδωρ. Στην περίπτωση, που παρατηρηθεί ανάμειξη κάποιου ρευστού με το υπόγειο νερό, τα συστατικά της ζώνης ρύπανσης είναι συνήθως δύσκολο να διακριθούν με γυμνό μάτι και ταξιδεύουν μαζί με το υπόγειο νερό. Το αντίθετο συμβαίνει με τα NAPLs, τα οποία είναι ορατά, βρίσκονται σε μορφή ελαίου και η μετακίνησή τους εξαρτάται από τη βαρύτητα, την άνωση και τις δυνάμεις τριχοειδών φαινομένων. Από τη στιγμή που τα NAPLs εισέλθουν στο έδαφος, μπορούν να κινηθούν σε αυτό ανάλογα με τις ιδιότητές τους και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Έτσι, τα NAPLs χωρίζονται σε αυτά που κινούνται ως αέρια, ως ελεύθερη μη υδατική φάση και ως διαλυμένα στο υπόγειο νερό φάση.

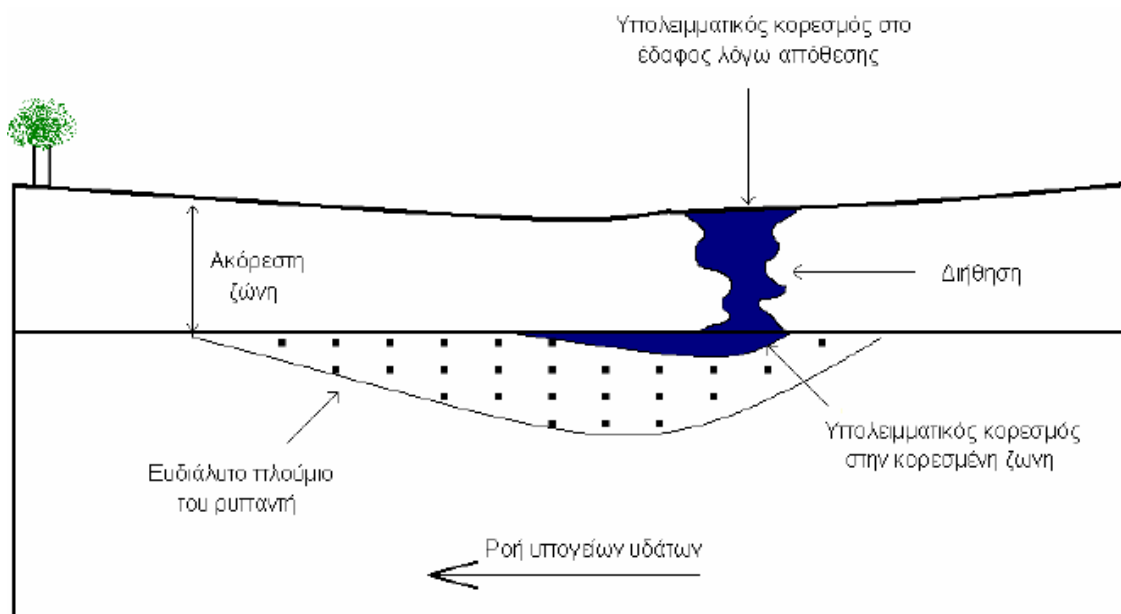
3.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ NAPLs

Οι βασικοί τύποι NAPLs είναι:

- ✚ LNAPLs, με ειδική βαρύτητα μικρότερη αυτής του ύδατος (επιπλέοντα)
- ✚ DNAPLs, με ειδική βαρύτητα μεγαλύτερη αυτής του ύδατος

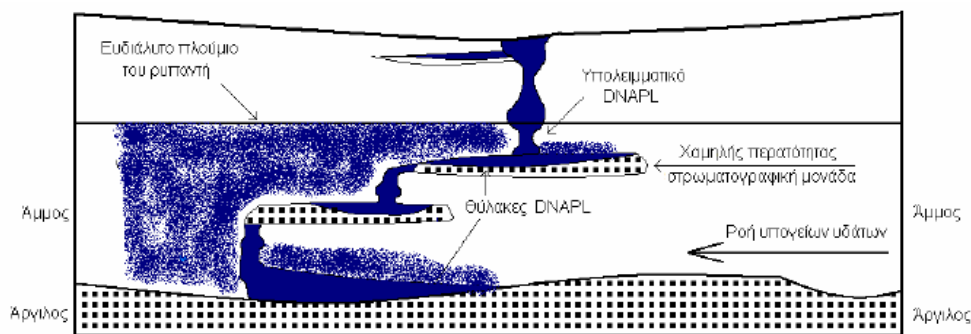
Η συμπεριφορά των NAPLs εντός του υπεδάφους ποικίλει. Τα ελαφρά (LNAPLs) ταξιδεύουν εντός της ακόρεστης ζώνης με καθοδική πορεία και επιπλέουν επί του υδροφόρου ορίζοντα, δημιουργώντας ταυτόχρονα υπολειμματικό κορεσμό, τόσο στην ακόρεστη ζώνη, όσο και στην κορεσμένη. (Εικόνα 3-1).

Ο υπολειμματικός κορεσμός (Residual saturation) είναι μια από τις κύριες παραμέτρους σε προβλήματα εξυγίανσης υπογείων υδάτων και ορίζεται ως το κλάσμα του ολικού όγκου των πόρων που καταλαμβάνεται από υπολειμματικό NAPL.



Εικόνα 3-1: Συμπεριφορά LNAPLs στο υπέδαφος
(Πηγή: www.clu-in.org)

Τα βαρύτερα προϊόντα (DNAPLs) ταξιδεύουν εντός της κορεσμένης ζώνης, με καθοδική πορεία, δημιουργώντας θύλακες σε στρώματα χαμηλής περατότητας, επί των οποίων επικάθονται (Εικόνα 3-2).



Εικόνα 3-2: Συμπεριφορά DNAPLs στο υπέδαφος
(Πηγή: www.clu-in.org)

Τα NAPLs εισέρχονται εντός του εδαφικού υλικού λόγω των υδροστατικών πιέσεων που εξασκούν τα ίδια στο πορώδες υλικό. Αρχικά, τα NAPLs εμφανίζονται υπό συνεχή μορφή από την πηγή ρύπανσης και χαρακτηρίζονται ως NAPLs «ελεύθερης φάσης» (Free phase NAPLs). Με τη χρονική εξασθένιση της πηγής, τα NAPLs είναι δυνατόν να αφήσουν την «ελεύθερη φάση» και να εμφανίζονται υπό μορφή φυσαλίδων-σταγόνων, εντός του πορώδους υλικού.

Η μελέτη των NAPLs έχει λάβει ιδιαίτερη προσοχή, λόγω της δυσκολίας εξυγίανσης εδαφών με υπολειμματικά NAPLs, τα οποία δρουν εντός του υπεδάφους ως συνεχείς πηγές ρύπανσης, που διαλύονται εντός του υπογείου ύδατος. Η βενζίνη, το diesel, η κηροζίνη και γενικά όλοι οι τύποι καυσίμων αποτελούνται από υδρογονάνθρακες, οι οποίοι είναι ελαφρύτεροι του νερού και ανήκουν στα LNAPL's, ενώ περιέχουν σε αρκετά μεγάλο ποσοστό τη συστάδα ενώσεων, που είναι γνωστή ως BTEX.

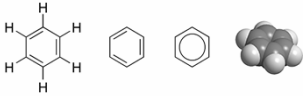

3.3 BTEX

Το BTEX αποτελεί αρκτικόλεξο για τις ουσίες βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλο-βενζόλιο και ξυλόλιο (BENZENE, TOLUENE, ETHYL-BENZENE, XYLENES). Οι ενώσεις αυτές αποτελούν μονοκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, είναι εξαιρετικά πτητικές, υδατοδιαλυτές και παρουσιάζουν μεγάλη κινητικότητα.

3.3.1 Βενζόλιο

Το βενζόλιο (Benzene) είναι καρκινογόνο, ανήκει στους οργανικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, είναι διάφανο και εύφλεκτο υγρό, ενώ έχει χαρακτηριστική οσμή. Το βενζόλιο δε χρησιμοποιείται πλέον ως πρόσθετο της βενζίνης και του αργού πετρελαίου, προστίθεται όμως στην παραγωγή φαρμάκων, πλαστικών και χρωμάτων. Ανήκει στην κατηγορία των ήδη απαγορευμένων ενώσεων. Οι πιο σημαντικές ιδιότητες του βενζολίου συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3-1.

Πίνακας 3-1: Ιδιότητες του βενζολίου

| Βενζόλιο (Benzene) | |
|---|--|
|  | |
| Γενικά | |
| Μοριακός τύπος | C ₆ H ₆ |
| Μοριακό βάρος | 78.11 g/mol |
| Ιδιότητες | |
| Πυκνότητα | 0.8786 g/cm ³ |
| Διαλυτότητα | 1 750 mg/l (25 °C) |
| Σημείο τήξεως | 5.5 °C |
| Σημείο βρασμού | 80.1 °C |
| Ιξώδες | 0.652 cP (20 °C) |
| Επικινδυνότητα | |
| Ευρωπαϊκή Ένωση | Flammable (F) |
| | Carc. Cat. 1 |
| | Muta. Cat. 2 |
| | Toxic (T) |
| N.F.P.A. 704 |  |
| Flashpoint | - 11 °C |
| Σημείο αυτανάφλεξης | 561 °C |

(Πηγή: wikipedia.org)

Χρήση

Μέχρι και τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, το βενζόλιο χρησίμευε ως aftershave, εξ' αιτίας της ευχάριστης μυρωδιάς του. Μετά το 1920, χρησιμοποιήθηκε στη βιομηχανία, καθώς και στην παρασκευή του πρώτου καφέ decaffeinate, όμως οι προφανείς παρενέργειές του οδήγησαν στην αντικατάστασή του και στις δύο περιπτώσεις. Σαν πρόσθετο της βενζίνης, το βενζόλιο αυξάνει τον αριθμό των οκτανίων, όμως η πιθανότητα να βρεθεί μέσω του καυσίμου στο υπόγειο νερό, οδήγησε τις Ηνωμένες Πολιτείες, καθώς και την Ευρωπαϊκή Ένωση να θεσπίσουν αυστηρότερους νόμους, μειώνοντας τη συγκέντρωση βενζολίου στη βενζίνη στο 1%. Η πλέον διαδεδομένη χρήση του στην παραγωγή άλλων χημικών, όπως το στυρένιο, που χρησιμοποιείται στην παραγωγή πλαστικών και άλλων πολυμερών, φαινολών για κόλλες και ρητίνες, καθώς και κυκλοεξανίου, το οποίο χρησιμοποιείται στην παραγωγή νάιλον.

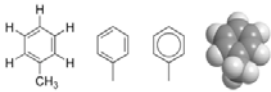

Επιπτώσεις στην υγεία

Η εισπνοή πολύ μεγάλων ποσοτήτων βενζολίου μπορεί να προκαλέσει θάνατο, ενώ σε μικρότερες ποσότητες προκαλεί ζαλάδες, πονοκεφάλους και ταχυκαρδίες. Η κατανάλωση τροφών που περιέχουν μεγάλες ποσότητες βενζολίου μπορεί να προκαλέσει εμετούς, υπνηλία και ενδεχομένως θάνατο. Η χειρότερη επίπτωση εξ' αιτίας συνεχούς έκθεσης σε βενζόλιο είναι στο αίμα, αφού μπορεί να προκαλέσει μείωση ερυθρών αιμοσφαιρίων, καθώς επίσης να καταστρέφει το μυελό των οστών και να εξασθενίσει το ανοσοποιητικό σύστημα. Το Υπουργείο Υγείας των Η.Π.Α. κατηγοριοποιεί το βενζόλιο σαν καρκινογενές για τον άνθρωπο, αφού συνεχής έκθεση σε υψηλά επίπεδα στον αέρα μπορεί να προκαλέσει την οξεία μυελώδη λευχαιμία. Το μέγιστο επιτρεπτό όριο βενζολίου στο πόσιμο νερό είναι 5 μg/l, ενώ για τον εισπνεόμενο αέρα το όριο είναι 1 ppm για 8ωρη παραμονή στο χώρο, για 40 ώρες την εβδομάδα.

3.3.2 Τολουόλιο

Το τολουόλιο (Toluene), γνωστό και ως μεθυλο-βενζόλιο είναι ένας αρωματικός υδρογονάνθρακας, με χαρακτηριστική οσμή. Το τολουόλιο χρησιμοποιείται ως διαλύτης στη βιομηχανία και οι πιο σημαντικές ιδιότητές του συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3-2.

Πίνακας 3-2: Ιδιότητες του τολουολίου

| Τολουόλιο (Toluene) | |
|---|--|
|  | |
| Γενικά | |
| Μοριακός τύπος | C ₇ H ₈ |
| Μοριακό βάρος | 92.14 g/mol |
| Ιδιότητες | |
| Πυκνότητα | 0.8669 g/cm ³ |
| Διαλυτότητα | 520 mg/l (25 °C) |
| Σημείο τήξεως | -95 °C |
| Σημείο βρασμού | 110.6 °C |
| Ιξώδες | 0.59 cP (20 °C) |
| Επικινδυνότητα | |
| Ευρωπαϊκή Ένωση | Flammable (F+) |
| N.F.P.A. 704 |  |

(Πηγή: wikipedia.org)

Χρήσεις

Το τολουόλιο αποτελεί κοινό διαλύτη για χρώματα, πλαστικό, μελάνι, κόλλες, δέρματα και άλλα χημικά παράγωγα. Χρησιμοποιείται επίσης στην παραγωγή του αφρού της πολυουρεθάνης, φαινολών και όπως ήδη αναφέρθηκε στην παραγωγή TNT. Όπως και το βενζόλιο, μπορεί να αυξήσει τα οκτάνια σε καύσιμα μηχανών εσωτερικής καύσης.

Τοξικότητα και μεταβολισμός

Η εισπνοή μικρών ποσοτήτων ατμών τολουολίου μπορεί να μην αποδεικνύεται τοξική, όμως σε μεγάλες ποσότητες προκαλεί ναυτίες, ενώ συχνή και διαρκής εισπνοή του για μεγάλα χρονικά διαστήματα μπορεί να προκαλέσει μη αναστρέψιμες εγκεφαλικές βλάβες. Το τολουόλιο δεν εισέρχεται στο ανθρώπινο σώμα μόνο μέσω της εισπνοής, αλλά και μέσω της επαφής του ανθρώπου με το έδαφος.

Η πολύ μικρή διαλυτότητα του τολουολίου στο νερό επηρεάζει και το μεταβολισμό του στο ανθρώπινο σώμα, αφού δεν μπορεί να εξαχθεί από αυτό μέσω των ούρων ή των κοπράνων. Έτσι, κατά το μεταβολισμό του, 95% οξειδώνεται σε βενζοϊκή αλκοόλη, ενώ το υπόλοιπο 5% είναι υπεύθυνο για τις σοβαρές βλάβες των κυττάρων. Το όριο που έχει θεσπιστεί για συγκεντρώσεις τολουολίου για το πόσιμο νερό είναι 0.8 mg/l.

3.3.3 Αιθυλο-βενζόλιο

Το αιθυλο-βενζόλιο (Ethyl benzene), είναι ένας αρωματικός υδρογονάνθρακας, διάφανος, σχετικά αδιάλυτος στο νερό με χαρακτηριστική οσμή, ενώ χρησιμοποιείται κυρίως στην πετροχημική βιομηχανία. Οι πιο σημαντικές ιδιότητες του αιθυλο-βενζολίου συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3-3.

Πίνακας 3-3: Ιδιότητες του αιθυλο-βενζολίου

| Αιθυλο-βενζόλιο (Ethyl benzene) | |
|---|---|
|  | |
| Γενικά | |
| Μοριακός τύπος | C ₈ H ₁₀ |
| Μοριακό βάρος | 106.16 g/mol |
| Ιδιότητες | |
| Πυκνότητα | 0.867 g/cm ³ |
| Διαλυτότητα | 187 g/l (25 °C) |
| Σημείο τήξεως | -95 °C |
| Σημείο βρασμού | 136 °C |
| Ιξώδες | 0.669 cP (20 °C) |
| Επικινδυνότητα | |
| Ευρωπαϊκή Ένωση | Flammable (F) |
| N.F.P.A. 704 |  |
| Flashpoint | 15-20 °C |

(Πηγή: wikipedia.org)

Χημικές ιδιότητες

Το αιθυλο-βενζόλιο είναι ένα εύφλεκτο και εκρηκτικό υγρό, οι ατμοί του είναι βαρύτεροι από τον αέρα, ενώ σε υγρή μορφή, επιπλέει στην επιφάνεια του νερού και μπορεί να προκαλέσει ανάφλεξη και φωτιά. Σε έκρηξη μπορεί να προκαλέσει ερεθισμούς και να προκαλέσει τοξικά αέρια, ενώ μπορεί να αντιδράσει και με οξειδωτικά υλικά. Είναι διαλυτό στο οινόπνευμα και στους αιθέρες, εξατμίζεται σε θερμοκρασία δωματίου και καίγεται εύκολα, καθώς επίσης κινείται εύκολα στον αέρα από το νερό και το έδαφος, ενώ βρίσκεται κυρίως σαν ατμός στον αέρα.

Χρήσεις

Το αιθυλο-βενζόλιο βρίσκει κυρίως χρήση στην παραγωγή στυρενίου και συνθετικών πολυμερών, καθώς επίσης και σαν διαλύτης, σαν συστατικό της ασφάλτου, συνθετικών ελαστικών, καυσίμων, χρωμάτων, μελανιών και καπνού. Επιπλέον, αποτελεί συστατικό άλλων χημικών, όπως η ακετοφαινόλη, το δι-αιθυλο-βενζόλιο, τα θειικά οξέα του αιθυλο-βενζολίου, όπως και άλφα-μεθυλο-βενζοϊκή αλκοόλη.





Επιπτώσεις στην υγεία

Η έκθεση σε αιθυλο-βενζόλιο μπορεί να ερεθίσει τα μάτια, το συκώτι και το αναπνευστικό σύστημα. Σε μεγάλες συγκεντρώσεις προκαλούνται ζαλάδες και λιποθυμίες, ενώ σε ακόμη υψηλότερα επίπεδα μπορεί να προκληθεί θάνατος. Καθώς εισπνέεται αέρας που περιέχει αιθυλο-βενζόλιο, αυτό εισέρχεται στο σώμα μέσω των πνευμόνων, ενώ το ίδιο συμβαίνει και μέσω του στομαχίου κατά την κατάποση φαγητού. Στην υγρή φάση, μπορεί να εισέλθει στον οργανισμό μέσω του δέρματος. Το όριο που έχει θεσπιστεί για συγκεντρώσεις αιθυλο-βενζολίου για το πόσιμο νερό είναι 0.3 mg/l.

3.3.4 Ξυλόλιο

Με τον όρο ξυλόλιο περιγράφεται μια ομάδα τριών συστατικών της βενζίνης, η οποία περιλαμβάνει τα όρθο- (ο), μέτα- (m), πάρα- (p) ισομερή του δι-μεθυλο-βενζολίου. Τα γράμματα ο, m, p συμβολίζουν αντίστοιχα το άτομο άνθρακα του μορίου του βενζολίου, στο οποίο συνδέεται το κάθε μεθύλιο. Οι πιο σημαντικές ιδιότητες των ξυλολίων συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3-4.

Πίνακας 3-4: Ιδιότητες των ξυλολίων

| Ξυλόλιο (Xylene) | | | |
|---|--|------------------------|------------------------|
| <div><div></div><div></div><div></div><div><div>1,2-dimethylbenzene (ortho-xylene)</div><div>1,3-dimethylbenzene (meta-xylene)</div><div>1,4-dimethylbenzene (para-xylene)</div></div></div> | | | |
| Γενικά | | | |
| Μοριακός τύπος | C ₈ H ₁₀ | | |
| Μοριακό βάρος | 106.16 g/mol | | |
| Ιδιότητες | | | |
| | όρθο-ξυλόλιο | μέτα-ξυλόλιο | πάρα-ξυλόλιο |
| Πυκνότητα | 0.88 g/cm ³ | 0.86 g/cm ³ | 0.86 g/cm ³ |
| Διαλυτότητα | 167 mg/l | 157 mg/l | 180 mg/l |
| Σημείο τήξεως | -25 °C | -48 °C | 13 °C |
| Σημείο βρασμού | 144 °C | 139 °C | 138 °C |
| Επικινδυνότητα | | | |
| Ευρωπαϊκή Ένωση | Flammable (F) | | |
| | Harmful (Xn) | | |
| N.F.P.A. 704 |  | | |

(Πηγή: wikipedia.org)

Χρήσεις

Οι χημικές βιομηχανίες παράγουν ξυλόλιο από πετρέλαιο, αφού αποτελεί ένα από τα 30 πρώτα σε παραγωγή χημικά στις Η.Π.Α. και χρησιμοποιείται ως διαλύτης σε βιομηχανίες εκτύπωσης, ελαστικών και δερμάτων. Πιο συγκεκριμένα, το πάρα-ξυλόλιο συμβάλει στην παραγωγή τετραθαλικού οξέος, το οποίο χρησιμοποιείται στην παραγωγή άλλων πολυμερών. Επιπλέον, βρίσκει εφαρμογή ως γυαλιστικό του χάλυβα, εντομοκτόνο, πρόσθετο χρωμάτων, βερνικιών, ενώ ανιχνεύεται σε μικρές ποσότητες σε καύσιμα αυτοκινήτων και αεροπλάνων.

Επιπτώσεις στην υγεία


Το ξυλόλιο επηρεάζει κυρίως τον εγκέφαλο, αφού για μικρές περιόδους έκθεσης (έως και 14 μέρες) σε μεγάλο επίπεδο προκαλούνται πονοκέφαλοι, αδυναμία των μυών, ζαλάδες και χάσιμο ισορροπίας, ενώ είναι επίσης υπεύθυνο για ερεθισμούς σε δέρμα, μάτια και αναπνευστικό σύστημα, δηλαδή δυσκολία στην αναπνοή, μειωμένες αντιδράσεις, κενά μνήμης, πόνοι στο στομάχι και σε πολύ υψηλά επίπεδα προκαλείται θάνατος.

Εκτός από την απ'ευθείας έκθεση σε αυτό, ο άνθρωπος μπορεί να μολυνθεί ερχόμενος σε επαφή με ρυπασμένο - λόγω διαρροών πετρελαϊκών προϊόντων - έδαφος, οπότε εκτός της επαφής ανθρώπου - ξυλολίου μέσω του εδάφους εγκυμονεί ο κίνδυνος μόλυνσης εξ'αιτίας ρυπασμένου νερού. Το όριο που έχει θεσπιστεί για συγκεντρώσεις ξυλολίου για το πόσιμο νερό είναι 0.6 mg/l.

3.4 MTBE

Το MTBE (Methyl Tert-Butyl Ether) αποτελεί ένα ευδιάλυτο χημικό συστατικό, το οποίο παράγεται από τη χημική αντίδραση της μεθανόλης και του ισοβουτυλενίου και χρησιμοποιείται κυρίως σαν πρόσθετο οξυγόνου καυσίμων μηχανών εσωτερικής καύσης. Στην οργανική χημεία συναντάται σαν φτηνός διαλύτης με ιδιότητες παραπλήσιες του δι-αιθυλ-αιθέρα, αλλά με υψηλότερο σημείο βρασμού και μικρότερη διαλυτότητα στο νερό. Οι πιο σημαντικές ιδιότητες του MTBE συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3-5.

Πίνακας 3-5: Ιδιότητες του MTBE

| Methyl Tert-Butyl Ether (MTBE) | |
|--|---|
| $ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 - \text{C} - \text{O} - \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} $ | |
| Γενικά | |
| Μοριακός τύπος | C ₅ H ₁₂ O |
| Μοριακό βάρος | 88.15 g/mol |
| Ιδιότητες | |
| Πυκνότητα | 0.7404 g/cm ³ |
| Διαλυτότητα | 51,260 mg/l (25 °C) |
| Σημείο τήξεως | -109 °C |
| Σημείο βρασμού | 55.2 °C |
| Επικινδυνότητα | |
| Ευρωπαϊκή Ένωση | Flammable (F) |
| N.F.P.A. 704 |  |
| Flashpoint | -28 °C |

(Πηγή: wikipedia.org)

Εναλλακτικές ουσίες

Υπάρχουν άλλες ουσίες, που προσθέτουν οξυγόνο στα καύσιμα, όπως η αιθανόλη και άλλοι αιθέρες. Ο λόγος που χρησιμοποιείται το MTBE είναι κυρίως οικονομικός, αφού συντίθεται ως παραπροϊόν από την προσθήκη μεθανόλης σε ισοβουτιλένιο. Η αιθανόλη είναι γνωστή σαν ένα ασφαλές εναλλακτικό διάλυμα και είναι το ίδιο μη-τοξική όσο το MTBE, σε αντίθεση όμως είναι πολική, απομακρύνοντας τους μη-πολικούς υδρογονάνθρακες από τη βενζίνη, πρόβλημα το οποίο το MTBE δεν προκαλεί. Οι πτητικοί υδρογονάνθρακες από τη βενζίνη αποτελούν έντονα καρκινογόνες ενώσεις και είναι από τους βασικότερους συντελεστές του φωτοχημικού νέφους. Το περιεχόμενο του κρασιού σε αιθανόλη οδήγησε την Ευρωπαϊκή Ένωση να θεσπίσει κανονισμό, σύμφωνα με τον οποίο, τα χαμηλής ποιότητας κρασιά να επαναδιυλίζονται σε αιθανόλη. Το 2003 στις Ηνωμένες Πολιτείες και πιο συγκεκριμένα στην Καλιφόρνια, η οποία είναι πρώτη σε παραγωγή κρασιού στη χώρα, ξεκίνησε η πιλοτική αντικατάσταση του MTBE με αιθανόλη, παράδειγμα το οποίο ακολούθησαν και άλλες πολιτείες.

Η υψηλής ποιότητας βενζίνη αποτελεί επίσης εναλλακτική λύση προς το MTBE. Επίσης, χρησιμοποιείται το ισο-οκτάνιο, το οποίο μπορεί να παραχθεί μέσω απλών μετατροπών στα παραδοσιακά εργοστάσια παραγωγής MTBE. Το ισο-οκτάνιο αποτελεί τη βέλτιστη λύση, αφού είναι ελαφρύτερη της συμβατικής βενζίνης και είναι η μόνιμη αναφορά στη βαθμίδα των οκτανίων.

Μακροσκοπικά, το πετρέλαιο diesel αποτελεί επίσης εναλλακτική λύση αντί του MTBE, αν και απαιτούνται σοβαρές μετατροπές στους βενζινοκινητήρες, ώστε να λειτουργούν με το συγκεκριμένο καύσιμο. Τέλος, πλην της αιθανόλης και του diesel, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης ηπιότερων καυσίμων με παρόμοιες ιδιότητες, όπως η βιοαιθανόλη και το biodiesel, σε εναρμόνιση με τη γενική τάση προς τα βιοκαύσιμα, ως εναλλακτικές πηγές ενέργειας.

3.5 ΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΡΥΠΟΥ

Όπως φαίνεται και στις παραπάνω παραγράφους, όλα τα συστατικά του ρύπου, τα οποία θα διαλυθούν στο νερό, είναι διάφανα, οπότε για την επίτευξη άμεση οπτικής επαφής με το ρυπασμένο νερό θα πρέπει το τελικό διάλυμα να έχει χρωματιστεί. Για το λόγο αυτό θα χρησιμοποιηθεί ο αδρανής δείκτης methyl red σε συνδυασμό με νιτρική αμμωνία, οπότε και το νερό αποκτά χρώμα πορτοκαλο-κόκκινο.

3.5.1 Δείκτης methyl red

Η συγκεκριμένη ουσία χρησιμοποιείται ευρέως σαν δείκτης του pH, αφού για τιμές του pH μικρότερες του 4.4 το διάλυμα παίρνει χρώμα κόκκινο, ενώ για τιμές άνω του 6.2 το χρώμα που παρατηρείται είναι το πορτοκαλί. Ο χημικός τύπος του methyl red είναι $C_{15}H_{15}N_3O_2$ και το μοριακό του βάρος είναι 269.299 g/mol. Ποσότητα μικρότερη των 100 mg της συγκεκριμένης σκόνης σε όγκο διαλύματος 10 λίτρων είναι ικανή να προσδώσει το αναμενόμενο χρώμα.

3.5.2 Νιτρική αμμωνία

Για να δημιουργηθεί το κατάλληλο από πλευράς pH περιβάλλον, θα πρέπει στο υδατικό διάλυμα να προστεθεί και νιτρική αμμωνία, ώστε τελικά το διάλυμα να αποκτήσει το χαρακτηριστικό χρώμα. Η νιτρική αμμωνία (Ammonium nitrate) έχει χημικό τύπο NH_4NO_3 και το μοριακό της βάρος είναι 80 g/mol, ενώ είναι σε στερεή μορφή. Στο τελικό υδατικό διάλυμα του ρύπου, προστίθεται ποσότητα της τάξης των 5 γραμμαρίων, ώστε να ανέβει το pH και να αλλάξει το χρώμα του διαλύματος, εξ'αιτίας της παρουσίας του δείκτη methyl red.

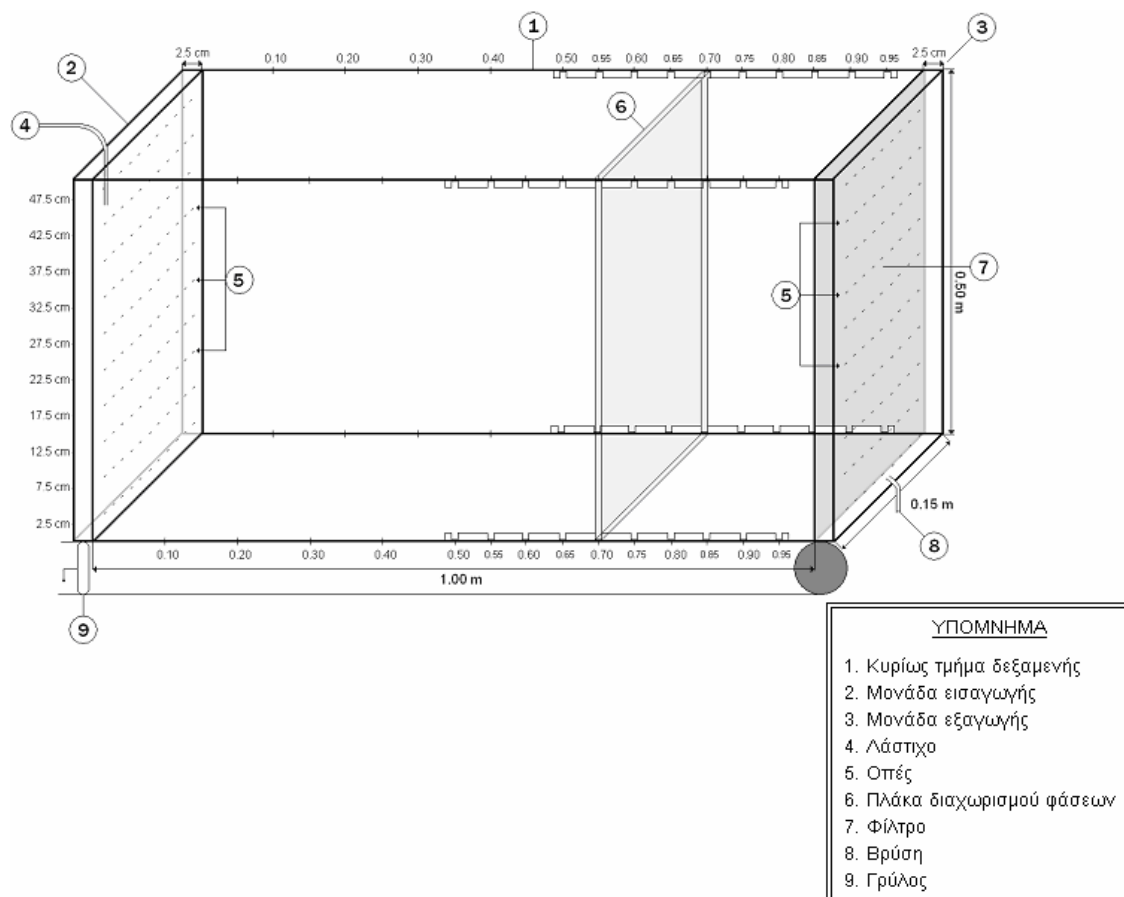
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ

Κεφάλαιο 4

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Για τον έλεγχο της αποδοτικότητας του φράγματος, θα πρέπει να γίνει μοντελοποίηση του προς εξέταση υδροφορέα σε μικρότερη κλίμακα, οπότε κατασκευάστηκε πιλοτική δεξαμενή. Το υλικό, το οποίο επιλέχθηκε για τη δεξαμενή είναι το διάφανο plexiglass, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα του άμεσου οπτικού ελέγχου του εσωτερικού της δεξαμενής κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι διαστάσεις της δεξαμενής είναι 1.00m x 0.50m x 0.15m, ενώ το πάχος του φύλλου plexiglass είναι 1 εκατοστό. Η αναλογία μήκους προς πλάτος έπρεπε να είναι της τάξης 100:20, βάσει βιβλιογραφίας [Kechavarzi et al., 2004]. Το ύψος επιλέχθηκε στα 50 εκατοστά, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στην αποτύπωση των ορίων του υδροφορέα, όπως θα περιγραφεί και στη συνέχεια.

Στην Εικόνα 4-1 περιγράφεται γραφικά η μορφή της πιλοτικής δεξαμενής.



Εικόνα 4-1: Πλήρης περιγραφή της πιλοτικής δεξαμενής

Στην Εικόνα 4-2 φαίνεται η φωτογραφία της πιλοτικής δεξαμενής.



Εικόνα 4-2: Φωτογραφία της δεξαμενής

4.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ

Όπως φαίνεται και στο υπόμνημα της Εικόνας 4-1, η δεξαμενή χωρίζεται σε 3 βασικά τμήματα:

- Τη μονάδα εισαγωγής,
- Το κυρίως τμήμα και
- Τη μονάδα εξαγωγής.

4.2.1 Μονάδα εισαγωγής

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-3, η μονάδα εισαγωγής αποτελεί τα πρώτα 2,5 εκατοστά της δεξαμενής και καταλήγει σε πλάκα διαστάσεων όμοιων με αυτές της δεξαμενής (0.50m x 0.15m), η οποία είναι διάτρητη, έτσι ώστε το νερό να μπορεί να εισέρχεται στη δεξαμενή από τις οπές, οι οποίες βρίσκονται σε συγκεκριμένα σημεία. Το νερό εισάγεται, μέσω της αντλίας, στη μονάδα εισαγωγής με λάστιχο από το ανοιχτό άνω μέρος αυτής, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-1 και πιο συγκεκριμένα στο σημείο 4.



Εικόνα 4-3: Μονάδα εισαγωγής

Καθώς το νερό εισέρχεται στη μονάδα, αρχικά ο ρυθμός τροφοδοσίας αυτής είναι μεγαλύτερος αυτού της εξόδου, οπότε παρατηρείται ανύψωση της στάθμης. Προσαρμόζοντας την εισροή μέσω της αντλίας, η οποία περιγράφεται αργότερα, οι δύο προαναφερθέντες ρυθμοί εξισώνονται, οπότε η στάθμη σταθεροποιείται στο σημείο που έχει επιλεγεί. Έτσι, η τροφοδοσία του κυρίως τμήματος γίνεται από όλες τις οπές, οι οποίες βρίσκονται από τη στάθμη και κάτω.

4.2.2 Κυρίως τμήμα

Το κυρίως τμήμα, αποτελεί την «καρδιά» της δεξαμενής, έχει μήκος 1 μέτρο και μεσολαβεί των μονάδων εισαγωγής και εξαγωγής. Στο κυρίως τμήμα τοποθετείται το έδαφος, καθώς και το πληρωτικό υλικό και σε αυτό μελετάται η υδραυλική συμπεριφορά, καθώς και οι μηχανισμοί εξυγίανσης του φράγματος. Τα πρώτα 50 εκατοστά του κυρίως τμήματος είναι εντελώς άδεια, ενώ από το $\frac{1}{2}$ μέτρο και μετά παρατηρούνται ειδικές εγκοπές («δόντια»), οι οποίες βρίσκονται σε απόσταση 5 εκατοστών μεταξύ τους και σκοπό έχουν τη συγκράτηση της πλάκας διαχωρισμού των φάσεων, όπως θα περιγραφεί και στη συνέχεια.

4.2.3 Μονάδα εξαγωγής

Η μονάδα εξαγωγής αποτελεί τον «καθρέφτη» της μονάδας εισαγωγής, αφού έχει ακριβώς τις ίδιες διαστάσεις, αλλά διαφορετική διεύθυνση (Εικόνα 4-4). Η μονάδα

υποδέχεται το νερό μέσω των οπών και το συγκεντρώνει στο εσωτερικό της, ενώ η μοναδική της διαφοροποίηση με αυτήν της εισαγωγής είναι η παρουσία βρύσης, ώστε να τηρείται το υδατικό ισοζύγιο και να συλλέγεται το δείγμα.



Εικόνα 4-4: Μονάδα εξαγωγής

Στο κάτω μέρος της μονάδας εξόδου υπάρχει μια άρθρωση, σκοπός της οποίας είναι η ανύψωση της μονάδας εισαγωγής και η επίτευξη κλίσης της δεξαμενής (Εικόνα 4-5).



Εικόνα 4-5: Άρθρωση δεξαμενής

4.2.4 Λάστιχο - αντλία

Το λάστιχο είναι συνδεδεμένο με την αντλία και μεταφέρει το νερό στη μονάδα εισαγωγής. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-6, η κεφαλή της αντλίας στροβιλίζεται δεξιόστροφα, οπότε αντλεί από τα λάστιχα στα αριστερά και εκφορτίζει προς τα δεξιά.



Εικόνα 4-6: Περισταλτική αντλία

Έτσι, η αντλία συνδέεται από αριστερά με τις δεξαμενές τροφοδοσίας, από τις οποίες αντλεί το ρυπασμένο νερό και το οδηγεί στο λάστιχο δεξιά της, από όπου αυτό καταλήγει στη μονάδα εισαγωγής. Η περισταλτική αντλία μπορεί να ρυθμιστεί σε συγκεκριμένες στροφές ανά λεπτό, ώστε να υπάρχει σταθερή παροχή νερού στη δεξαμενή εισαγωγής. Το αποτέλεσμα της σταθερής εισροής νερού, σε συνδυασμό με σταθερή εκροή είναι η απόλυτη τήρηση του υδατικού ισοζυγίου, οπότε και μπορεί να οριστεί μόνιμος υδροφορέας, με σταθερές συνθήκες ροής.

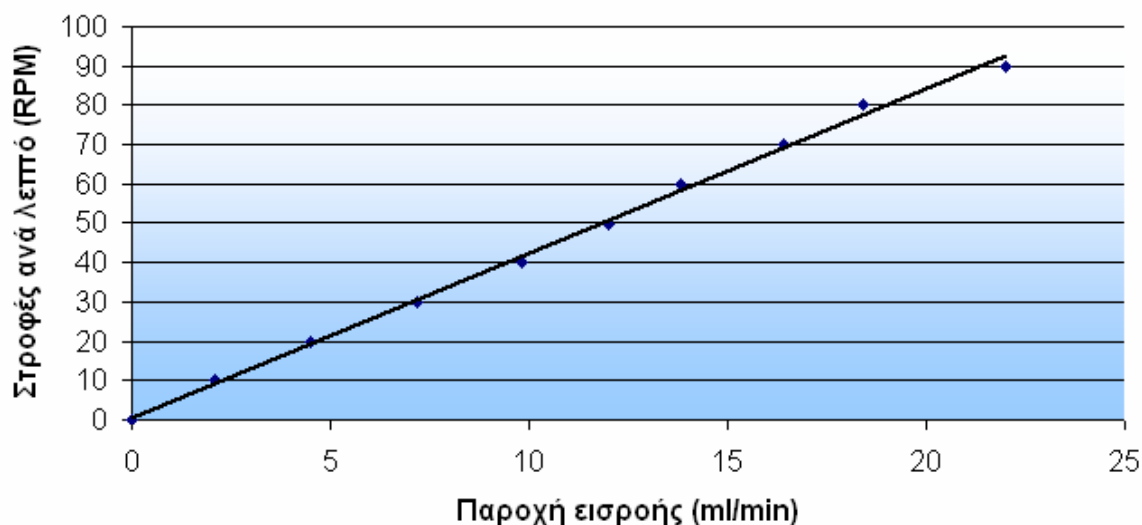
Προτού ξεκινήσουν τα πειράματα, η αντλία βαθμονομήθηκε για το συγκεκριμένο ρευστό που θα μεταφέρει. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης φαίνονται στον Πίνακα 4-1.

Πίνακας 4-1: Βαθμονόμηση περισταλτικής αντλίας

| Παροχή εισροής (ml/min) | Στροφές ανά λεπτό (RPM) |
|----------------------------|----------------------------|
| 0.0 | 0 |
| 2.1 | 10 |
| 4.5 | 20 |
| 7.2 | 30 |
| 9.8 | 40 |
| 12.0 | 50 |
| 13.8 | 60 |
| 16.4 | 70 |
| 18.4 | 80 |
| 22.0 | 90 |

Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης παρίστανται στο Διάγραμμα 4-1.

Βαθμονόμηση Περισταλτικής Αντλίας



Διάγραμμα 4-1: Αποτελέσματα βαθμονόμησης περισταλτικής αντλίας

Με τη μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων υπολογίστηκε η εξίσωση της ευθείας που αντιπροσωπεύει ορθότερα τη συσχέτιση μεταξύ παροχής και στροφών:

$$y = 4.1814x + 0.5936 \quad (\text{Εξίσωση 4-1})$$

Έτσι, για οποιαδήποτε τιμή του x (Παροχή Εισροής), μπορεί να υπολογιστεί η αντίστοιχη τιμή των στροφών στην αντλία (y), με βάση την Εξίσωση 4-1.

Από τη φύση του διαγράμματος, θα αναμενόταν η εξίσωση της ευθείας να είναι της μορφής $y = ax$ και να μην υπάρχει επιπλέον όρος, όπως το 0.5936 στην Εξίσωση 4-1. Ο παραπάνω όρος περιγράφει τη μετατόπιση της ευθείας από την αρχή των αξόνων και επί του άξονα y , η μετατόπιση αυτή σε σύγκριση με τη μέγιστη τιμή του συγκεκριμένου άξονα είναι 2 τάξεις μεγέθους μικρότερη, οπότε και θεωρείται αμελητέα. Άλλωστε, ο συντελεστής διόρθωσης της ευθείας (R^2) είναι ίσος με 0.9975, οπότε το σφάλμα της μεθόδου είναι ελάχιστο.

4.2.5 Οπές

Η πλάκα, η οποία χωρίζει τις μονάδες εισαγωγής και εξαγωγής από το κυρίως τμήμα της δεξαμενής, είναι διάτρητη, ώστε να μπορεί να τροφοδοτεί ή να αποφορτίζει, αντίστοιχα το κυρίως τμήμα της.



Εικόνα 4-7: Οπές εισαγωγής και εξαγωγής

Για πρακτικούς λόγους, είναι αδύνατη η εισροή ή εκροή νερού από όλο το εμβαδό της πλάκας. Έτσι, οι οπές έχουν δημιουργηθεί σε καθορισμένα σημεία της εκάστοτε πλάκας. Πιο συγκεκριμένα, σε απόσταση 2,5 - 5 - 7,5....45 - 47,5 εκατοστών από τη βάση τις δεξαμενής στην εισροή και την εκροή υπάρχουν οριζόντιες ομάδες οπών, των οποίων η διάμετρος είναι περίπου 1 χιλιοστό. Σε κάθε διαφορετική απόσταση έχουν δημιουργηθεί 10 οπές, ώστε το νερό να εισέρχεται ή να εξέρχεται αντίστοιχα από όλο το πλάτος της πλάκας. Για να θεωρηθεί ομοιογενής η εκροή του νερού, οπότε να διατηρείται και συγκεκριμένος ρυθμός αυτής, επιβάλλεται η λήψη μέτρων, που θα εξασφαλίζουν την ορθή λειτουργία των οπών, δεν θα τους επιτρέπεται, δηλαδή, να κλείνουν από το έδαφος με το οποίο έρχονται σε επαφή. Η λύση είναι η τοποθέτηση στρώματος κοσκινισμένων χαλικιών, όπου έχει απομακρυνθεί μεγάλη ποσότητα της παιπάλης, η οποία έχει επίσης την ιδιότητα να κλείνει τις τρύπες λόγω της υφής της .

4.2.6 Πλάκα διαχωρισμού φάσεων

Η τοποθέτηση του φράγματος σε ένα έδαφος αποτελεί ίσως την πιο επίπονη διαδικασία, αφού απαιτείται εκσκαφή, γεωτρήσεις και άλλες δαπανηρές διαδικασίες, οι οποίες περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 2. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού στη συγκεκριμένη διάταξη, επινοήθηκε ένας απλός τρόπος κατασκευής του φράγματος. Έτσι, όταν η δεξαμενή είναι άδεια, τοποθετείται σε κάποιο σημείο μια πλάκα. Η πλάκα διαχωρισμού των φάσεων (Εικόνα 4-8), όπως ονομάζεται, αποτελείται από το ίδιο υλικό με τη δεξαμενή (plexiglass) έχει πάχος 1cm και διαστάσεις ίσες με τις εσωτερικές αυτής (0.50m x 0.15m). Ο ρόλος της πλάκας αυτής είναι να χωρίζει το κυρίως τμήμα της δεξαμενής σε δύο μέρη, όπου στα ανάντη θα τοποθετείται καθαρό χώμα και στα κατόντη το πληρωτικό υλικό, σε ανάμειξη με το χώμα. Μετά την τοποθέτηση, η πλάκα αφαιρείται και οι δύο φάσεις ενώνονται, αποτελώντας ένα συνεχές έδαφος.



Εικόνα 4-8: Πλάκα διαχωρισμού φάσεων

Επιπρόσθετα, η πλάκα χρησιμοποιείται και για την τοποθέτηση του στρώματος χαλικών, ώστε να μην αχρηστεύονται οι οπές στην έξοδο. Έτσι, αφού η πλάκα τοποθετηθεί στο τελευταίο ζεύγος «δοντιών», κατάντι αυτή γεμίζεται η δεξαμενή με χαλίκια, ενώ ανάντι τοποθετείται το πληρωτικό υλικό ή το έδαφος. Τελικά, αφού η διαχωριστική πλάκα αφαιρεθεί, τα τελευταία 5 εκατοστά της δεξαμενής αποτελούνται από χαλίκια. Το σημείο, όπου θα τοποθετηθεί η πλάκα, καθορίζει και το μήκος της αντιδρούσας πύλης του φράγματος, ενώ για την εύκολη τοποθέτησή του προβλέφθηκε εξ' αρχής η παρουσία «δοντιών» (Εικόνα 4-9), σε συγκεκριμένες αποστάσεις από τη βάση της δεξαμενής. Έτσι, αν η πλάκα τοποθετηθεί στο πρώτο ζεύγος «δοντιών», δηλαδή σε απόσταση 50 εκατοστών από τη βάση, το μήκος της πύλης θα είναι: $100\text{cm} - 50\text{cm} - 5\text{cm} = 45\text{ cm}$. Τα τελευταία 5 εκατοστά αποτελούνται από τα χαλίκια, όπως και προαναφέρθηκε. Αντίστοιχα, αν η πλάκα τοποθετηθεί στο δεύτερο ζεύγος «δοντιών», το μήκος της αντιδρούσας πύλης θα είναι: $100\text{cm} - 60\text{cm} = 40\text{ cm}$, και ούτω καθεξής.



Εικόνα 4-9: «Δόντια» αγκίστρωσης της πλάκας

Στο πείραμα με χρήση κομπόστ ως πληρωτικού υλικού, η αναλογία εδάφους/ κομπόστ ήταν 50/ 45, ενώ στο αντίστοιχο του διατομήτη η αναλογία ήταν 85/ 10. Στην Εικόνα 4-11 φαίνεται η χρήση της διαχωριστικής πλάκας, αφού τοποθετηθεί το έδαφος και πριν τη χρήση πληρωτικού υλικού και χαλικιών.



Εικόνα 4-10: Διάρθρωση της δεξαμενής με χρήση της διαχωριστικής πλάκας

4.2.7 Βρύση

Αφού το νερό περάσει όλο το μήκος του κυρίως τμήματος της δεξαμενής, καταλήγει στη μονάδα εξαγωγής. Δεδομένης της συνεχούς εισροής προς τη δεξαμενή, θα πρέπει να υπάρξει εκτόνωση του περιεχομένου της μονάδας εξαγωγής. Έτσι, στον πυθμένα αυτής έχει τοποθετηθεί βρύση, η οποία οδηγεί το νερό, που συγκεντρώνεται, εκτός δεξαμενής.



Εικόνα 4-11: Βρύση εκτόνωσης

Για να επιτευχθεί εξίσωση του ρυθμού της εισροής με αυτόν της εκροής, θα πρέπει να υπάρχει δυνατότητα ακριβούς καθορισμού ενός από τους ρυθμούς. Η εκροή γίνεται από τη βρύση, της οποίας η παροχή μεταβάλλεται βάσει αναλογικής στρόφιγγας, οπότε η επίτευξη σταθερής εκροής σε κάθε περίπτωση είναι αδύνατη.

Έτσι, στρέφεται η στρόφιγγα της βρύσης μέχρι και το $\frac{1}{4}$ του τεταρτημορίου αυτής και υπολογίζεται η παροχή στις συγκεκριμένες συνθήκες. Στη συνέχεια και βάσει της βαθμονόμησης της περισταλτικής αντλίας που περιγράφηκε προηγουμένως, εισάγεται στην Εξίσωση 4-1 η παροχή της εξόδου και προκύπτει ο αριθμός των στροφών, όπου πρέπει να ρυθμιστεί η αντλία για να επιτευχθεί εξίσωση μεταξύ των ρυθμών εισροής και εκροής. Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, το προς ανάλυση διάλυμα συλλέγεται απ'ευθείας από τη βρύση και φυλάσσεται σε χαμηλή θερμοκρασία (4°C) και σε σκιά, έως ότου να αναλυθεί η σύστασή του.

4.2.8 Γρύλος

Γενικότερα, η ροή του υπογείου νερού εξαρτάται κυρίως από τη βαρύτητα. Έτσι, αν εισάγουμε νερό στη δεξαμενή, η οποία είναι παράλληλη με το έδαφος, το νερό αυτό θα καταλήξει στον πυθμένα και λόγω τριχοειδών φαινομένων θα αρχίσει να εξαπλώνεται και στο υπόλοιπο έδαφος. Δίνοντας, όμως, κάποια κλίση ως προς το έδαφος στη δεξαμενή, η κάθετη δύναμη της βαρύτητας θα χωριστεί σε δύο συνιστώσες: μια κάθετη και μια οριζόντια ως προς τη δεξαμενή, αμφότερες μικρότερες της αρχικής (Εικόνα 4-12).



Εικόνα 4-12: Γρύλος

Για να δοθεί η συγκεκριμένη κλίση, θα πρέπει να υπάρξει ανύψωση του αριστερού τμήματος της δεξαμενής με τη βοήθεια του τοποθετημένου γρύλου (Εικόνα 4-13) και ταυτόχρονα η κυκλική κίνηση του δεξιού μέρους μέσω της άρθρωσης (Εικόνα 4-6), η οποία αναφέρθηκε πριν.

4.2.9 Δεξαμενές τροφοδοσίας

Όπως προαναφέρθηκε, ο ρύπος μεταφέρεται από την περισταλτική αντλία προς τη δεξαμενή μέσω ελαστικών. Οι ιδιαιτερότητες του ρύπου (τοξικότητα, πτητικότητα κ.α.) έχρισαν απαραίτητη τη χρήση δεξαμενών, όπου θα παρασκευάζεται και θα αποθηκεύεται

ο ρύπος κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι δεξαμενές που χρησιμοποιήθηκαν είχαν χωρητικότητα 12 και 4 λίτρων αντίστοιχα και φαίνονται στην Εικόνα 4-13.



Εικόνα 4-13: Δεξαμενή τροφοδοσίας

Όπως και η κύρια δεξαμενή, έτσι και αυτές της τροφοδοσίας είναι κατασκευασμένες από plexiglass και στον πυθμένα τους έχει προσαρμοστεί βρύση, ώστε να μπορεί να ληφθεί δείγμα από αυτές. Η διάμετρος κάθε δεξαμενής είναι 30 εκατοστά, ενώ μεταξύ τους οι δεξαμενές διαφέρουν μόνο στο ύψος. Όπως θα εξηγηθεί και αναλυτικότερα στη συνέχεια, για την αποφυγή της εμφάνισης του φαινομένου head-space, αλλά και για να περιοριστούν στο ελάχιστο οι διαρροές λόγω εξάτμισης, προσαρμόζονται στις δεξαμενές, αλλά και στις μονάδες εισαγωγής και εξαγωγής, κομμάτια φελιζόλ. Τα κομμάτια αυτά είναι τυλιγμένα με parafilm, ενώ οι διαστάσεις τους είναι οι ίδιες με τις εσωτερικές των δεξαμενών, ώστε να εφαρμόζουν το δυνατό καλύτερα σε αυτές.

4.2.10 Κατασκευές για περιορισμό της εξάτμισης

Κατά το σχεδιασμό του πειράματος, η παράμετρος που χρειάστηκε περισσότερη συζήτηση από τις άλλες ήταν η εξάτμιση των ιδιαίτερα πτητικών ρύπων. Η τελική λύση στο πρόβλημα αυτό δόθηκε με τη βοήθεια κατασκευών από φελιζόλ. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-14, κατασκευάστηκαν καπάκια για τις δεξαμενές, στα οποία αφού καλύφθηκαν με parafilm, έγιναν 3 οπές. Στην πρώτη τοποθετήθηκε το λάστιχο, από το οποίο αντλούνταν ο ρύπος, στη δεύτερη προσαρμόστηκε μια βίδα μήκους 10 εκατοστών, ώστε να μπορεί να ανελκύεται το καπάκι. Τέλος, η τρίτη οπή έγινε για να τοποθετηθεί στο εσωτερικό της δεξαμενής ο αναδευτήρας.

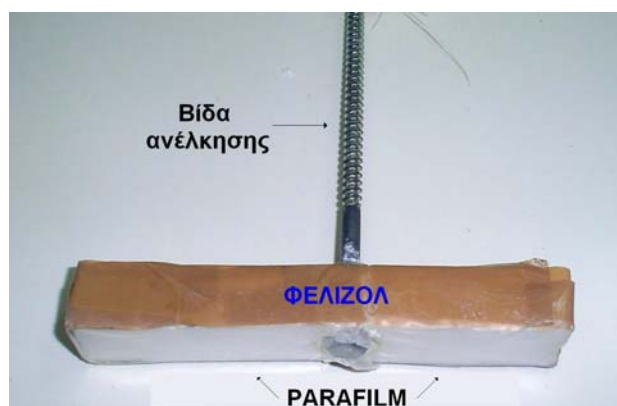


Εικόνα 4-14: Καπάκι δεξαμενής τροφοδοσίας

Στην Εικόνα 4-15 φαίνεται το καπάκι της μονάδας εισαγωγής, στο οποίο έχουν γίνει δύο οπές, μία για το λάστιχο της τροφοδοσίας και η άλλη για την εισαγωγή της βίδας, όπως αναφέρθηκε και στο καπάκι της δεξαμενής τροφοδοσίας. Η μόνη διαφορά του καπακιού της μονάδας εξαγωγής, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-16, είναι η απουσία οπής για λάστιχο, αφού στην έξοδο το δείγμα λαμβάνεται από τη βρύση.



Εικόνα 4-15: Καπάκι μονάδας εισαγωγής

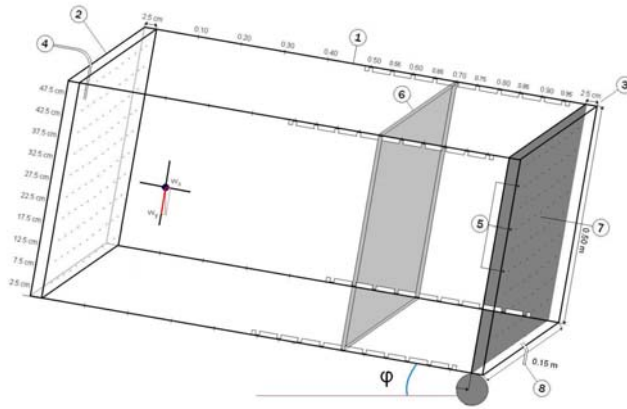


Εικόνα 4-16: Καπάκι μονάδας εξαγωγής

4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΡΥΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

Στην Εικόνα 4-17 φαίνεται η δεξαμενή υπό κλίση ϕ μοιρών.

Λόγω της κλίσης που δίνεται στη δεξαμενή, το νερό μετακινείται μέσα σε αυτή, εξ' αιτίας των οριζοντίων και καθέτων συνιστωσών ως προς το μήκος και το ύψος της αντίστοιχα.



Εικόνα 4-17: Η δεξαμενή υπό κλίση φ° και η δημιουργία συνιστωσών του βάρους

Η οριζόντια συνιστώσα της βαρύτητας θα οδηγήσει το νερό παράλληλα με το έδαφος και με κατεύθυνση προς την μονάδα εξαγωγής, ενώ η κάθετη θα συνεχίζει να το κατευθύνει προς τον πυθμένα, σαν δύναμη, όμως, έχει μικρότερο μέτρο της ολικής. Το μέτρο της κάθε συνιστώσας μπορεί να υπολογιστεί, αφού είναι ανάλογο της γωνίας κλίσης. Έτσι, η κάθετη δύναμη ισούται με:

$$W_y = W_{ολική} \cdot \cos\varphi \quad (\text{Εξίσωση 4-2})$$

ενώ η οριζόντια είναι ίση με:

$$W_x = W_{ολική} \cdot \sin\varphi \quad (\text{Εξίσωση 4-1})$$

Βάσει των παραπάνω εξισώσεων, όσο η κλίση μεγαλώνει, τόσο αυξάνεται και το μέτρο της οριζόντιας συνιστώσας (W_x) και αντιστρόφως, το μέτρο της κάθετης συνιστώσας ελαττώνεται. Η μέγιστη εφικτή κλίση, που υπολογίστηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων και μπορεί να δοθεί στη δεξαμενή είναι της τάξης των 20° , αφού για μεγαλύτερες κλίσεις παρατηρήθηκαν προβλήματα στη σταθερότητα του εδάφους, καθώς και εμφάνιση του υδροφορέα πάνω από το έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, η κλίση στη δεξαμενή δίνεται αφού αυτή πληρωθεί με χώμα και αντιδρών υλικό. Έτσι, όταν η κλίση αυτή ξεπέρασε το όριο των 20° , το ανώτερο στρώμα του εδάφους μετακινήθηκε βίαια, λόγω του μεγάλου μέτρου της συνιστώσας W_x , με αποτέλεσμα την μετακίνηση χώματος με κατεύθυνση, αφενός μεν εκτός δεξαμενής, αφετέρου δε προς τη μονάδα εξαγωγής, δημιουργώντας πρόβλημα τόσο στο συλλεχθέν διάλυμα, όσο και στις οπές εκφόρτισης της δεξαμενής. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη κλίση δίνεται στη δεξαμενή, σε τόσο ψηλότερο σημείο παρατηρείται η εκροή του κυρίως τμήματος αυτής. Το μέγιστο ύψος της μονάδας εξαγωγής ανέρχεται στα 47,5 εκατοστά. Σε περίπτωση που το νερό φτάσει σε ψηλότερο επίπεδο, παρατηρείται έξοδος αυτού από την επιφάνεια του εδάφους, σε μήκος που ανήκει στο κυρίως τμήμα της δεξαμενής.

ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΑ ΥΛΙΚΑ

Κεφάλαιο 5

5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΠΛΗΡΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΟΥ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΟΣ ΚΕΛΙΟΥ

Στη συγκεκριμένη μελέτη, τα υλικά που επιλέχθηκαν ώστε να απομακρύνουν τους πετρελαϊκούς ρύπους από το υπόγειο νερό είναι το κομπόστ και ο διατομίτης. Η επιλογή αυτή έγινε βάσει βιβλιογραφίας [Gavaskar et al, 2000], ενώ η απόδοση των συγκεκριμένων υλικών ελέγχθηκε σε πειράματα καθέτων στηλών και τύπου batch.

Το αντιδρών κελί είναι το τμήμα του υδροφορέα που τροποποιείται, ώστε να περιέχει το προς αντίδραση υλικό, διαμέσου του οποίου θα κινηθεί το πλούμιο των ρυπαντών και θα επεξεργαστεί. Σε ένα σύστημα Ενεργής Τάφρου, το αντιδρών κελί εκτείνεται σε όλο το πλάτος του φράγματος, ενώ σε συστήματα Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων αποτελεί ένα μόνο μικρό τμήμα του πλάτους του φράγματος. Το προς αντίδραση υλικό αποδομεί, προσροφά, καταβυθίζει ή απομακρύνει χλωριωμένους διαλύτες, μέταλλα, ραδιενεργές ουσίες, πτητικούς οργανικούς υδρογονάνθρακες και άλλους ρύπους.

Πιο συγκεκριμένα, η δίοδος μπορεί να περιέχει:

- ✚ Χημικά αντιδραστήρια για την αποδόμηση πτητικών υδρογονανθράκων.
- ✚ Θρεπτικό υλικό και οξυγόνο για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, οι οποίοι συμμετέχουν στη βιοαποδόμηση.
- ✚ Ροφητικά υλικά για τη συγκράτηση των ρύπων.
- ✚ Ζεόλιθους, οι οποίοι βοηθούν στην απομάκρυνση βαρέων μετάλλων μέσω ιονανταλλαγής.
- ✚ Ασβεστόλιθο για την ουδετεροποίηση του pH.
- ✚ Μέταλλα μηδενικού σθένους, τα οποία δρουν ως δότες ηλεκτρονίων για την αβιοτική αναγωγική αφαλογόνωση των υδρογονανθράκων και το σχηματισμό μη-τοξικών ή ακινητοποιημένων ουσιών.

Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στα φράγματα εξαρτώνται από παραμέτρους, όπως το pH, το δυναμικό οξειδοαναγωγής (redox), τις συγκεντρώσεις και την κινητική των αντιδράσεων.

Με βάση τις διεργασίες που πραγματοποιούνται με τη χρήση των διαφόρων υλικών πλήρωσης, διακρίνονται οι παρακάτω κατηγορίες αντιδρώντων μέσων:

1^η κατηγορία

Στην κατηγορία αυτή τροποποιούνται οι συνθήκες του pH και Eh στο υλικό κάτω από την επιφάνεια. Αυτές οι αλλαγές επηρεάζουν τη διαλυτότητα του pH ή την οξειδοαναγωγή των ευαίσθητων ειδών, το ρυθμό των αντιδράσεων υποβάθμισης. Επίσης, μερικές ομάδες οργανικών συστατικών, όπως οι αρωματικές ενώσεις που προέρχονται από τη βενζίνη, είναι πιο εύκολα βιοαποδομήσιμες κάτω από αερόβιες συνθήκες, παρά σε αναερόβιες. [Wilson et al., 2004]. Τροποποιώντας τις οξειδοαναγωγικές συνθήκες είναι δυνατό να αυξηθούν οι ρυθμοί υποβάθμισης αυτών των συστατικών. Πιο συγκεκριμένα, στη βιβλιογραφία [Hölscher et al. 2003] γίνεται αναφορά σε συγκεκριμένα βακτήρια, τα οποία υποβαθμίζουν το τριχλωροαιθυλένιο και άλλους χλωριωμένους υδρογονάνθρακες κάτω από αερόβιες συνθήκες. Ένας *in situ* αντιδραστήρας, που περιλαμβάνει τους συγκεκριμένους μικροοργανισμούς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε έναν αερόβιο υδροφορέα ή να συνδυαστεί με έναν αντιδραστήρα που αερίζει το πλούμιο. Οι ρυθμοί των αβιοτικών αντιδράσεων επηρεάζονται επίσης από την οξειδοαναγωγική κατάσταση.

2^η κατηγορία

Στην κατηγορία αυτή των *in situ* αντιδραστήρων περιλαμβάνονται υλικά που προκαλούν κατακρήμνιση, με αποτέλεσμα την ακινητοποίηση του ρύπου. Έτσι, για παράδειγμα, σε έναν τέτοιο αντιδραστήρα θα μπορούσε να τοποθετηθεί ορυκτό φωσφορικού ασβεστίου, η διάλυση του οποίου θα αυξήσει τη συγκέντρωση το φωσφόρου και τελικά θα προκαλέσει κατακρήμνιση των εναποθέσεων ορυκτού φωσφόρου. [Xu et al., 2006].

3^η κατηγορία

Στην κατηγορία αυτή των *in situ* αντιδραστήρων τα υλικά απομακρύνονται από τη φάση διάλυσης μέσω ρόφησης. Έτσι, είναι δυνατή η χρήση ενεργού άνθρακα, ώστε να απομακρυνθούν οι υδροφοβικές οργανικές ουσίες, καθώς επίσης ζεολιθικές ρητίνες, οι οποίες απομακρύνουν τους ιοντικούς ρύπους από το υπόγειο νερό. Το γεγονός, ότι η ρόφηση είναι αντιστρεπτή, καθιστά αναγκαία την περιοδική απομάκρυνση και αντικατάσταση του χρησιμοποιούμενου υλικού.

4^η κατηγορία

Στην κατηγορία αυτή παρατηρείται τροφοδοσία σε θρεπτικά, η διαθεσιμότητα των οποίων περιορίζει τους ρυθμούς της βιοαποδόμησης. Επιπλέον, παρατηρείται

εντατικοποίηση της βιοαποδόμησης, εξ' αιτίας των στραγγισμάτων των στερεών υλικών, τα οποία φέρουν διαλυμένο θρεπτικό υλικό.

5^η κατηγορία

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν *in situ* αντιδραστήρες, όπου λαμβάνουν χώρα διαδικασίες φυσικής απομάκρυνσης και μετασχηματισμού. Έτσι, με διοχέτευση αέρα στο υπόγειο νερό, μπορεί να επιτευχθεί απομάκρυνση των πτητικών ουσιών από αυτό.

Στον Πίνακα 5-1 που ακολουθεί, περιέχονται τα αντιδρώντα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως για ανόργανους ρύπους.

Πίνακας 5-1: Αντιδρώντα υλικά που χρησιμοποιούνται για ανόργανους ρύπους

| Πληρωτικό υλικό | Ρυπαντής | Διεργασίες | Εφαρμογή |
|----------------------------|--|-----------------------|--------------|
| Fe ⁰ | CrO ₄ ²⁻ | Αναγωγή/ Κατακρήμνιση | Πιλοτική |
| Ζεόλιθοι | CrO ₄ ²⁻ / SO ₄ ²⁺ | Απορρόφηση/ Αναγωγή | Εργαστηριακή |
| Fe ⁰ / Ζεόλιθοι | CrO ₄ ²⁻ | Απορρόφηση/ Αναγωγή | Εργαστηριακή |
| Hydroxylapatite | Pb ²⁺ | Κατακρήμνιση | Πεδίο |
| Hydroxylapatite | Zn ²⁺ | Απορρόφηση | Εργαστηριακή |
| Hydroxylapatite | Cd ²⁺ | Συν-κατακρήμνιση | Εργαστηριακή |
| Ασβεστόλιθος | UO ²⁺ | Συν-κατακρήμνιση | Εργαστηριακή |
| Ιπτάμενη τέφρα | UO ²⁺ | Συν-κατακρήμνιση | Εργαστηριακή |

Πίνακας 5-1: Αντιδρώντα υλικά που χρησιμοποιούνται για ανόργανους ρύπους (συνέχεια)

| Πληρωτικό υλικό | Ρυπαντής | Διεργασίες | Εφαρμογή |
|--------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------|
| Fe ⁰ | UO ²⁺ | Αναγωγή/ Κατακρήμνιση | Εργαστηριακή |
| Fe ⁰ | TcO ₄ ⁻ | Αναγωγή/ Κατακρήμνιση | Εργαστηριακή |
| Κυτταρίνη | UO ²⁺ | Αναγωγή/ Κατακρήμνιση | Εργαστηριακή |
| Οξειδία Fe ²⁺ | MoO ₄ ²⁺ | Απορρόφηση | Εργαστηριακή |
| Ζεόλιθοι | ⁹⁰ Sr ²⁺ | Απορρόφηση | Εργαστηριακή |
| Fe ⁰ | NO ₃ ⁻ | Αναγωγή | Εργαστηριακή |
| Πριονίδι | NO ₃ ⁻ | Αναγωγή | Πεδίο |
| Οξειδία Fe / Ca | PO ₄ ⁻ | Απορρόφηση | Εργαστηριακή |

(Πηγή: Birke and Roehl, 2001)

Στον Πίνακα 5-2 που ακολουθεί, περιέχονται τα αντιδρώντα υλικά που χρησιμοποιούνται για οργανικούς ρύπους.

Πίνακας 5-2: Αντιδρώντα υλικά που χρησιμοποιούνται για οργανικούς ρύπους

| Πληρωτικό υλικό | Ρυπαντής | Διεργασίες | Εφαρμογή |
|--|-------------------------------|------------------------|--------------|
| Fe ⁰ , Al ⁰ , Pd | CHC, FCHC | Αφαλογόνωση | Πιλοτική |
| Fe ⁰ & βακτήρια | CHC | Αφαλογόνωση/ Αποδόμηση | Εργαστηριακή |
| Ζεόλιθοι & βακτήρια | TCE | Απορρόφηση/ Αποδόμηση | Εργαστηριακή |
| Ζεόλιθοι | MTBE, CHCl ₃ , TCE | Απορρόφηση | Εργαστηριακή |
| Ζεόλιθοι | PCE, PAH | Απορρόφηση | Πιλοτική |
| Fe ⁰ / Ζεόλιθοι | PCE | Απορρόφηση, Αναγωγή | Εργαστηριακή |
| Οργανο-μπετονίτης | TCE, Benzene, Phenols | Απορρόφηση | Εργαστηριακή |
| ORC | BTEX | Αποδόμηση | Πεδίο |
| Ενεργός Άνθρακας | PAH | Απορρόφηση | Εργαστηριακή |
| Διατομίτης | Toluene | Απορρόφηση | Εργαστηριακή |
| Κομπόστ | BTEX, MTBE | Απορρόφηση | Εργαστηριακή |

(Πηγή: Birke and Roehl, 2001)

5.2 ΚΟΜΠΟΣΤ

Κομπόστ ορίζεται ως το στερεό υπόλειμμα που προκύπτει από την διαδικασία της κομποστοποίησης. Ο όρος περιγράφει κυρίως την οργανική ουσία, στην οποία ενδέχεται να υπάρχουν ορισμένοι αδρανείς μολυσματικοί παράγοντες. Το κομπόστ χρησιμοποιείται κυρίως ως εδαφοβελτιωτικό και σε μικρή κλίμακα στην γεωργία ως λίπασμα, είτε καθαρό, είτε ως πρόσθετο σε αναλογία. Σε άλλες περιπτώσεις εναποτίθεται σε χώρους υγειονομικής ταφής ως αδρανές πλέον υλικό.

Γενικά, τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του κομπόστ ποικίλουν ανάλογα με την αρχική ύλη, που διατέθηκε για λιπασματοποίηση, τις συνθήκες, οι οποίες επικράτησαν κατά τη διαδικασία και την έκταση της αποδόμησης. Το κομπόστ έχει σκούρο χρώμα, ευθραυστη, χωμάτινη υφή και οσμή που μοιάζουν με αυτές του εδάφους. Το τελικό προϊόν δεν έχει καμία σχέση, όσο αφορά τη φυσική μορφή, με αυτή του αρχικού οργανικού υλικού από το οποίο παράχθηκε. Το καλής ποιότητας κομπόστ έχει απαλλαγεί από ζιζάνια και παθογόνους μικροοργανισμούς.

Μερικά από τα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν το κομπόστ από τα άλλα οργανικά υλικά είναι:

- Το χρώμα του, το οποίο ποικίλει από σκούρο καφέ ως μαύρο.
- Ο χαμηλός λόγος C/N σε σχέση με άλλα οργανικά υλικά.
- Η συνεχώς μεταβαλλόμενη σύνθεσή του, εξ' αιτίας της δράσης των μικροοργανισμών, ακόμα και μετά το στάδιο της ωρίμανσης.
- Η υψηλή ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων και προσρόφησης νερού.

Η κομποστοποίηση Αστικών Στερεών Απορριμμάτων αποτελεί μια μέθοδο, η οποία τα τελευταία είκοσι χρόνια έχει μελετηθεί αρκετά, ενώ μια πληθώρα τεχνολογιών έχει αναπτυχθεί γύρω από την βελτίωση τόσο καθ' αυτής της διεργασίας, όσο και της προκατεργασίας της πρώτης ύλης. Ειδικότερα διαδικασίες διαχωρισμού, ελάττωσης του μεγέθους και προετοιμασίας των υλικών, αλλά και βιολογικής επεξεργασίας αυτών πριν την κομποστοποίηση, αποτελούν τις κυριότερες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν και συνεχίζουν να μελετούνται και να βελτιώνονται μέχρι σήμερα. Ορισμένες από τις τεχνολογίες αυτές αναπτύχθηκαν αρχικά για άλλους σκοπούς και στη συνέχεια υιοθετήθηκαν και προσαρμόστηκαν για την επεξεργασία των Α.Σ.Α. Έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί σε αρκετές χώρες, τόσο σχετικά με τον έλεγχο της διεργασίας για την διερεύνηση των παραμέτρων της, φυσικών και χημικών, αλλά και για την ανάπτυξη μεθόδων έλεγχου των ιδιοτήτων αυτών. Τα θερμοκρασιακά δεδομένα αποτελούν μια απλή και χρήσιμη μέθοδο για παρακολούθηση της διεργασίας της κομποστοποίησης χωρίς την ανάγκη προεπεξεργασίας του δειγμάτων

Στην Ελλάδα πιο συγκεκριμένα έχουν κατασκευαστεί τρεις μονάδες κομποστοποίησης Α.Σ.Α. οι οποίες αποτελούν μέρος εγκαταστάσεων μηχανικής διαλογής, ανακύκλωσης και κομποστοποίησης αστικών στερεών απορριμμάτων (Καλαμάτα, Χανιά, Αθήνα).

Το κομπόστ, που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα λήφθηκε από τη μονάδα κομποστοποίησης της EnviTec στα Χανιά και τα χαρακτηριστικά του αναφέρονται στον Πίνακα 5-3.

Πίνακας 5-3: Χαρακτηριστικά Compost

| Ιδιότητα | Τιμή |
|-------------------|-----------------------------|
| Πτητικά στερεά | 43.04 % w/w |
| Υγρασία (130° C) | 37.20 % w/w |
| pH | 8.7 |
| TKN | 2 % w/w |
| Μικροβιακό φορτίο | 1.5 x 10 ⁶ CFU's |

Το εργοστάσιο κομποστοποίησης EnviTec διεξήγαγε ελέγχους φυτοτοξικότητας και τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά, δηλαδή το συγκεκριμένο κομπόστ είναι μη φυτοτοξικό.



Εικόνα 5-1: Όψη κομπόστ

(Πηγή: www.denvergov.org)

5.3 ΔΙΑΤΟΜΙΤΗΣ

5.3.1 Γενικά για το διατομίτη

Ο διατομίτης αποτελεί ένα φυσικό ορυκτό, το οποίο εξ' αιτίας της μαλακής φύσης του μπορεί εύκολα να αλεστεί και να πάρει τη δομή σκόνης. Αυτή η άσπρου χρώματος σκόνη έχει υφή παρόμοια με την ελαφρόπετρα και έχει χαμηλό ειδικό βάρος, εξ' αιτίας του υψηλού της πορώδους. Η πιο συνηθισμένη χημική σύνθεση του διατομίτη είναι:

86% πυρίτιο, 5% νάτριο, 3% μαγνήσιο και 2% σίδηρος.

Ο διατομίτης αποτελείται από ορυκτά υπολείμματα των διατόμων, έναν τύπο αλγών με σκληρό κέλυφος και χρησιμοποιείται στην ενίσχυση της διήθησης, ως ήπιο λιπαντικό, ως προσροφητής υγρών, καθώς και σαν συστατικό του δυναμίτη. Δεδομένης της αντοχής του σε υψηλές θερμοκρασίες, συχνά χρησιμοποιείται και ως μονωτής θερμότητας.



Εικόνα 5-2: Όψη διατομίτη

(Πηγή: www.csun.edu)

5.3.2 Χαρακτηριστικά και χρήσεις

Η αξιοποίηση των διατομιτών στηρίζεται στη χημική και ορυκτολογική τους σύσταση, το μέγεθος των κόκκων, το σχήμα των διατόμων και στα δευτερεύοντα συστατικά τους. Οι διατομίτες έχουν υψηλό πορώδες, πολύ χαμηλό ειδικό βάρος, πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και εξαιρετικές διηθητικές ιδιότητες.

Οι αρχικές εφαρμογές των διατομιτών αφορούσαν στην προσρόφηση, τη λείανση και τη μόνωση. Σήμερα, εκτός από τα παραπάνω, οι σπουδαιότερες χρήσεις των κατά σειρά σπουδαιότητας, είναι οι ακόλουθες:

- Ως βοηθητικά φίλτρα για βιομηχανίες ποτών, ζάχαρης, φιλτράρισμα πόσιμου ύδατος και υδάτινων αποβλήτων, στη χημική και στη φαρμακευτική βιομηχανία, στην παραγωγή ελαίων κα.
- Ως πληρωτικό και μονωτικό υλικό, εμφανίζεται σε μονωτικά και οικοδομικά υλικά, μέσα καθαρισμού και στύλωσης, συνθετικά υλικά, πρώτη ύλη της βιομηχανίας ελαστικών, χάρτου, χρωμάτων, φαρμακευτικών και καλλυντικών και
- Ως αντιπηκτική μάζα στη βιομηχανία λιπασμάτων.

Στο εμπόριο οι διατομίτες δεν διατίθενται συνήθως στην μορφή που εξορύσσονται, λόγω της παρουσίας των δευτερευόντων συστατικών, αλλά υφίστανται συνήθως εξευγενισμό με διάφορες μεθόδους επεξεργασίας. Γενικά, ισχύουσες προδιαγραφές δεν υπάρχουν. Ενδεικτικά μια συνηθισμένη μορφή επεξεργασίας είναι η πύρωση στους 750° C για την απομάκρυνση του νερού και οργανικών συστατικών.

Οι τρεις πιο συνηθισμένες μορφές του διατομίτη που χρησιμοποιούνται στο εμπόριο είναι οι εξής:

Φυσικό υλικό :

Το ακατέργαστο μετάλλευμα αλέθεται, ξηραίνεται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και ταξινομείται για να αφαιρεθεί ξένη ύλη και για να παραγάγει ποικιλία από διαφορετικά σε μέγεθος σωματίδια. Αυτές οι φυσικές σκόνες, που αποτελούνται κυρίως από άμορφο πυρίτιο, είναι γενικά υπόλευκες στο χρώμα.

Αποτεφρωμένο υλικό:

Αυτά τα προϊόντα παράγονται από το φυσικό υλικό με πύρωση, ή συμπύκνωση, σε υψηλότερες θερμοκρασίες, συνήθως πάνω 900° C, αλλά κυμαίνονται από 400-1200 °C σε απλό ή περιστροφικό κλίβανο.

Μετά την πύρωση, η διατομική γη υποβάλλεται σε περαιτέρω επεξεργασία για τη δημιουργία προϊόντων με επιλεγμένα μεγέθη σωματιδίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενισχύσεις διηθητικών φίλτρων, ως πολυλειτουργικά υλικά πληρώσεως και ως συσσωματώματα για απορρόφηση υγρών από διαρροές κλπ. Κατά τη διάρκεια της πύρωσης οιοσδήποτε οργανικές και πτητικές ουσίες απομακρύνονται και το χρώμα αλλάζει χαρακτηριστικά από υπόλευκο σε σκούρο ροζ, λόγω της οξειδωσης μετάλλων και κυρίως σιδήρου που περιέχονται στο φυσικό υλικό ως προσμίξεις.

Flux-αποτεφρωμένο υλικό:

Αυτά τα προϊόντα παράγονται επίσης από το φυσικό υλικό με πύρωση σε περιστροφικό κλίβανο. Θερμοκρασίες πάνω από 900° C εφαρμόζονται, με την παρουσία όμως χημικών αλάτων, συνήθως σόδας (ανθρακικό άλας νατρίου). Κατά τη διάρκεια της Flux-πύρωσης το μέγεθος των σωματιδίων των διατομιτών αυξάνεται περαιτέρω λόγω συσσώρευσης, και σε πολλές περιπτώσεις αποκτούν ανοικτό λευκό χρώμα, ανάλογα με τις συνθήκες που επιλέγονται. Η περαιτέρω άλεση και ο διαχωρισμός αέρα ελέγχουν την τελική κατανομή μεγέθους μορίων για να παράγουν ενισχυμένα διηθητικά φίλτρα, σχετικά υψηλής διαπερατότητας και εκλεπτυσμένα λευκά πολυσύνθετα υλικά πληρώσεως.

5.3.3 Χρήσεις διατομίτη ως προσροφητικό υλικό-Διεθνής επιστημονική εμπειρία

Μια από τις πιο ισχυρές διεργασίες επεξεργασίας καθαρισμού ρυπασμένων υδάτων είναι η προσρόφηση. Εξαιτίας του χαμηλού σχετικά κόστους εφαρμογής σε σχέση με άλλες μεθόδους επεξεργασίας και της ελαχιστοποίησης ανεπιθύμητων και συχνά επικίνδυνων παραπροϊόντων που προκύπτουν από άλλες διεργασίες όπως η χημική οξειδωση, η προσρόφηση έχει καθιερωθεί και ως μια από τις πιο δημοφιλείς και ασφαλείς μεθόδους επεξεργασίας.

Το πιο δημοφιλές προσροφητικό που χρησιμοποιείται σήμερα με μεγάλη επιτυχία είναι ο ενεργός άνθρακας. Παρόλα αυτά όμως, ο ενεργός άνθρακας θεωρείται ένα ακριβό προσροφητικό, το οποίο κάνει πολλές φορές την επεξεργασία ρυπασμένων υδάτων ένα προκλητικό από οικονομική άποψη βήμα, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες. Έτσι, λόγω αυτού του γεγονότος έχουν γίνει διάφορες μελέτες που είχαν ως στόχο την αντικατάσταση του ενεργού άνθρακα με άλλα φυσικά και πιο οικονομικά προσροφητικά υλικά όπως είναι οι διατομίτες και η διατομική γη.

Οι Khraisheh et al. (2004), εξέτασαν τη χρήση διατομίτη και τροποποιημένου με οξείδιο του μαγγανίου διατομίτη (Mn-διατομίτη), για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από

υδάτινα απόβλητα. Διαποτίζοντας την επιφάνεια του διατομίτη με οξείδιο του μαγγανίου παρατηρήθηκε υπερδιπλασιασμός της επιφάνειας του προσροφητή. Μελέτες ισορροπίας απέδειξαν ότι ο Mn-διατομίτης παρουσίασε υψηλότερη ικανότητα απομάκρυνσης των Pb^{2+} , Cu^{2+} και Cd^{2+} από το νερό σε σχέση με τον ανεπεξέργαστο διατομίτη. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η προσροφητική ικανότητα του Mn-διατομίτη αυξήθηκε, μειώνοντας την ποσότητα των οξειδίων του μαγγανίου που τοποθετήθηκαν στην επιφάνεια. Με ηλεκτρονική μικροσκόπηση που έγινε στα δείγματα του διατομίτη και του Mn-διατομίτη, μελετήθηκε η δομή του διατομίτη πριν και μετά την επεξεργασία με οξείδιο του μαγγανίου. Τέλος, μέσω της κινητικής της προσρόφησης επιβεβαιώθηκε η αποτελεσματικότητα της χημικής επεξεργασίας με μαγγάνιο, η οποία βελτίωσε εξίσου σημαντικά τις διηθητικές δυνατότητες του διατομίτη.

Οι Chia-Cheng Wu et al. (2005), εξέτασαν τη χρήση ενός επιφανειακά τροποποιημένου διατομίτη για την απομάκρυνση αρσενικού (As) από το νερό. Το προσροφητικό αυτό χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να αντικαταστήσει άλλες υπάρχουσες μεθόδους επεξεργασίας, όπως είναι ο χημικός διαχωρισμός και ο διαχωρισμός με μεμβράνες, οι οποίες έχουν ως κυριότερα μειονεκτήματα την παραγωγή τοξικής λάσπης και το πολύ υψηλό κόστος, αντίστοιχα. Ο αποτεφρωμένος (calcined) διατομίτης επιλέχθηκε ως υλικό, λόγω της υψηλής του διαπερατότητας και στη συνέχεια τροποποιήθηκε με υδροξείδιο του σιδήρου υπό θερμοκρασία δωματίου. Ο ανεπεξέργαστος διατομίτης και τα επεξεργασμένα προϊόντα χαρακτηρίστηκαν και ελέγχθηκαν για την προσροφητική τους ικανότητα. Η σκόνη του διατομίτη και του αποτεφρωμένου διατομίτη (650-850 °C) χαρακτηρίστηκαν ως εξαιρετικά πορώδη. Η δομή των πόρων παρέμεινε σχεδόν ανεπηρέαστη ακόμα και όταν ο περιεχόμενος σίδηρος και η επιφάνεια αυξήθηκαν σημαντικά μετά την τροποποίηση. Επιπλέον, η μελέτη έδειξε πως ο τροποποιημένος διατομίτης φαίνεται να έχει καλύτερη προσροφητική ικανότητα για χρόνο ισορροπίας 15 ώρες. Τέλος, συμπεράστηκε ότι, λόγω του μεγάλου πορώδους, της σταθερότητάς του και της εύκολης αναγέννησής του (μεταβάλλοντας τις τιμές του pH στην βασική περιοχή και επαναλαμβάνοντας την διαδικασία τροποποίησης), ο επιφανειακά τροποποιημένος διατομίτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά ως προσροφητικό φίλτρο σε συστήματα σταθερής κλίνης για την απομάκρυνση αρσενικού από ρυπασμένα ύδατα.

Οι Y. Yang et al. (2003), μελέτησαν τις ιδιότητες προσρόφησης της ουροκινάσης (μιας σημαντικής φαρμακευτικής ουσίας η οποία μπορεί να υποστεί εμπλουτισμό μέσω της προσρόφησης της από διάλυμα ουρίας), στην επιφάνεια δύο τοπικών διατομιτών από τις περιοχές Zhejiang και Jilin της Κίνας. Οι δύο διατομίτες υπέστησαν τροποποίηση με

θέρμανση στους 400, 800, 950 και 1150 °C, ενώ ο Zhejiang-διατομίτης υπέστη και τροποποίηση με πλύση οξέος (υδροχλωρικού οξέος) για εξευγενισμό. Ένα από τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής ήταν ότι, η θέρμανση του διατομίτη σε υψηλές θερμοκρασίες (>900 °C), προκαλεί μείωση της επιφάνειάς του και μηδενισμό του μικροπορώδους, με αποτέλεσμα η προσρόφηση να λαμβάνει χώρα μόνο στην εξωτερική επιφάνεια του διατομίτη και έτσι να παρατηρείται μείωση της προσροφητικής του ικανότητας. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι με την θέρμανση στους 400 °C, οι ισοηλεκτρικές τιμές της επιφάνειας του διατομίτη μειώθηκαν στο ελάχιστο και η προσροφηθείσα ποσότητα της ουροκινάσης έφτασε την μέγιστη τιμή της.

Οι M.A. Al-Ghouti et al. (2003), μελέτησαν τη δυνατότητα χρήσης του διατομίτη για την απομάκρυνση προβληματικών ενεργών χρωστικών όπως το ενεργό μαύρο και ενεργό κίτρινο, καθώς και βασικών χρωστικών από λύματα υφαντουργίας όπως το κυανό του μεθυλενίου. Ερευνήθηκαν τα φυσικά χαρακτηριστικά του διατομίτη όπως το pH, pH_{zpc} και η επιφάνεια, η FTIR (Fourier transform infrared) και η SEM (scanning electron microscopy). Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το επιφανειακό φορτίο του διατομίτη μειώθηκε όταν αυξήθηκε το pH του διαλύματος με τη μέγιστη απομάκρυνση του MB από το υδατικό διάλυμα να συμβαίνει σε βασικό pH (περίπου 10 με 11). Οι ισόθερμες προσρόφησης του MB, του RB και του RY κατασκευάστηκαν για διάφορες τιμές pH, αρχικής συγκέντρωσης χρωστικών και μεγέθους σωματιδίων. Τα πειραματικά δεδομένα προσαρμόστηκαν στα μοντέλα του Langmuir, του Freundlich και του Henry. Η μελέτη υπέδειξε ότι στην προσρόφηση χρωστικών σε διατομίτη, σημαντικό ρόλο παίζουν οι ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις και προτάθηκε ένα προσχέδιο του μηχανισμού προσρόφησης του κυανού του μεθυλενίου στον διατομίτη. Τα αποτελέσματα δείχνουν μια σημαντική αποτελεσματικότητα του διατομίτη στην απομάκρυνση του κυανού του μεθυλενίου με μεγαλύτερη ποσοστιαία απομάκρυνση 99.9 % από υδατικό διάλυμα με αρχική συγκέντρωση 100 mg/dm^3 , ενώ για τις άλλες χρωστικές η αποτελεσματικότητα του διατομίτη ήταν μικρότερη. Γενικά η δραστηριότητα των παραπάνω χρωστικών με τον διατομίτη είχε την εξής σειρά:

Κυανό του μεθυλενίου > Ενεργό μαύρο > Ενεργό κίτρινο.

Η μέγιστη ικανότητα προσρόφησης των χρωστικών στον διατομίτη παρατηρήθηκε μετά από χρόνο ισορροπίας 48 ωρών και παρατηρήθηκε ότι το μέγεθος των σωματιδίων δεν είχε ιδιαίτερη επιρροή στην αποτελεσματικότητα της προσρόφησης σε αντίθεση με το pH.

Οι M.A.M. Khraisheh et al. (2005), μελέτησαν την απομάκρυνση των χρωστικών, κυανού του μεθυλενίου, ενεργού μαύρου και ενεργού κίτρινου από υδατικό διάλυμα με χρήση φυσικού ανεπεξέργαστου διατομίτη και αποτεφρωμένου (calcined) στους 980 °C διατομίτη. Οι μελέτες αυτές αποδεικνύουν την σημασία των διάφορων λειτουργικών-ενεργών ομάδων στον μηχανισμό της προσρόφησης σε διατομίτη και τον ρόλο της κατανομής των πόρων στην προσρόφηση των χρωστικών. Οι ισόθερμες προσρόφησης του Henry και του Freundlich χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς της προσρόφησης, η οποία ήταν εξαρτημένη από το pH του διαλύματος. Η απομάκρυνση των ιονισμένων ενεργών ομάδων από την επιφάνεια του διατομίτη αύξησε την τιμή του pH_{zpc} . Οι αναλύσεις FTIR, SEM και XRD (X-ray Diffraction) έδειξαν σημαντική μείωση των χαρακτηριστικών Si-OH κορυφών μετά την πύρωση στους 980 °C. Η απομάκρυνση των ομάδων υδροξυλίου από την επιφάνεια του διατομίτη οδήγησε σε μείωση της προσρόφησης. Ήταν εμφανές από το pH και τις αναλύσεις των υπέρυθρων φασμάτων, ότι ο μηχανισμός της προσρόφησης του κυανού του μεθυλενίου και του ενεργού κίτρινου διέφερε από αυτόν του ενεργού μαύρου. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν, ότι ο αποτεφρωμένος διατομίτης παρουσίασε ανεπαρκή ικανότητα προσρόφησης των χρωστικών και αυτό γιατί οι περισσότερες ομάδες υδροξυλίου που βρίσκονται αρχικά στον φυσικό διατομίτη απομακρύνθηκαν με την πύρωση. Έτσι βγήκε το συμπέρασμα ότι οι ομάδες σιλανόλης (Si-OH) είναι οι κυρίαρχες ενεργές ομάδες που είναι υπεύθυνες για το μεγαλύτερο μέρος της προσρόφησης των χρωστικών στον διατομίτη, ιδιαίτερα για τα μόρια του κυανού του μεθυλενίου. Παρόλα αυτά, βρέθηκε ότι και οι πόροι του διατομίτη παίζουν σημαντικό ρόλο στην προσρόφηση των χρωστικών ουσιών. Η διαδικασία της τροποποίησης με πύρωση του φυσικού διατομίτη άλλαξε την επιφάνεια, το πορώδες, τις ιδιότητες διάχυσης και την πρόσβαση στα εσωτερικά σημεία του, με αποτέλεσμα να επηρεαστεί η απόδοση της προσρόφησης. Μετά την πύρωση στους 980 °C παρατηρήθηκε σημαντική αλλαγή στις ιδιότητες της επιφάνειας και του μικροπορώδους του διατομίτη.

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ

Κεφάλαιο 6




6.1 ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ

Η προσρόφηση είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα υγρό ή ένα αέριο συσσωρεύεται στην επιφάνεια ενός στερεού ή ενός υγρού σε κάποιες περιπτώσεις (προσροφητής), δημιουργώντας μια ατομική ή μοριακή ταινία (προσροφημένη ουσία). Ο όρος προσρόφηση εφαρμόζεται όταν μέρος του ρύπου, που μεταφέρεται μέσω του κινούμενου ρευστού, προσκολλάται στα εδαφικά σωματίδια. Σαν διεργασία διαφοροποιείται της απορρόφησης, όπου η ουσία διασκορπίζεται σε ένα υγρό ή ένα στερεό, δημιουργώντας ένα νέο διάλυμα. Ο όρος προσρόφηση καλύπτει και τις δύο διαδικασίες, ενώ η εκρόφηση αποτελεί την αντίστροφη διαδικασία. Η προσρόφηση συναντάται στα περισσότερα φυσικά, βιολογικά και χημικά συστήματα, ενώ χρησιμοποιείται ευρέως και σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπως η παραγωγή ενεργού άνθρακα και συνθετικών ρητινών, καθώς και στην εξυγίανση του νερού. Η προσρόφηση και η ιονανταλλαγή αποτελούν διεργασίες ρόφησης, όπου ορισμένοι προσροφητές μεταφέρονται επιλεκτικά από τη ρευστή φάση στην επιφάνεια αδιάλυτων μορίων.

Σε περίπτωση που η προσρόφηση συμβαίνει άμεσα, δηλαδή η διαλυμένη ουσία στο ρευστό βρίσκεται σε ισορροπία με την προσροφημένη, η ισόθερμη της προσρόφησης είναι της μορφής:

$$I=I(c) \text{ (Εξίσωση 6-1)}$$

Οι τρεις βασικές μορφές ισόθερμων προσρόφησης είναι οι εξής:

| | | | |
|---|---------------------|-------------------------------------|---------------|
|  | Ισόθερμη Freundlich | $I = a_2 \cdot c^{a_3}$ | (Εξίσωση 6-2) |
|  | Γραμμική ισόθερμη | $I = a_1 \cdot c$ | (Εξίσωση 6-3) |
|  | Ισόθερμη Langmuir | $I = a_4 \cdot c / (1+a_5 \cdot c)$ | (Εξίσωση 6-4) |

6.1.1 Ισόθερμη Freundlich

$$\frac{dI(c)}{dc} = \beta \cdot c^\gamma \text{ (Εξίσωση 6-5)}$$

όπου: β, γ σταθερές

ή

$$q_e = K \cdot C_e^{(1/n)} \text{ (Εξίσωση 6-6)}$$

όπου:





q_e η ποσότητα της προσροφημένης ουσίας ανά μάζα του προσροφητικού υλικού,

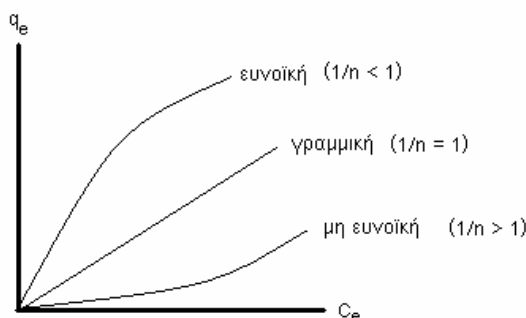
C_e η συγκέντρωση της προσροφημένης ουσίας στο διάλυμα,

K ο συντελεστής κατανομής, που αποτελεί ένδειξη της μέγιστης δυνατής προσροφόμενης ποσότητας,

$1/n$ η αδιάστατη παράμετρος, που αποτελεί ένδειξη της ενέργειας της προσρόφησης.

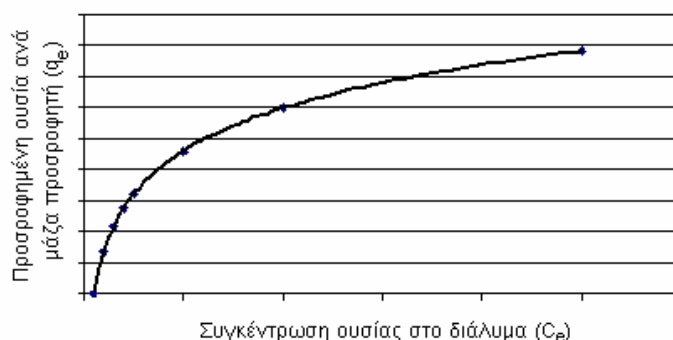
Με βάση την τιμή του $1/n$, διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις προσρόφησης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6-1.

-  $1/n \rightarrow 0$, η προσρόφηση είναι μη αντιστρεπτή.
-  $1/n = 1$, η ισόθερμη είναι γραμμική.
-  $1/n < 1$, η ισόθερμη θεωρείται ευνοϊκή.
-  $1/n > 1$, η ισόθερμη θεωρείται μη ευνοϊκή.



Εικόνα 6-1: Ταξινόμηση ισόθερμων προσρόφησης Freundlich βάσει του $1/n$
(Πηγή: www.cbu.edu)

Η Ισόθερμη Freundlich παριστά συνήθως την προσροφημένη ποσότητα ανά βάρος προσροφητή, προς τη συγκέντρωση του ρευστού στην ισορροπία. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6-2, το τυπικό γράφημα της Ισόθερμης Freundlich παρουσιάζει παρεμφερή συμπεριφορά με αυτό της μικροβιακής ανάπτυξης σε σχέση με τη συγκέντρωση των θρεπτικών.



Εικόνα 6-2: Τυπικό γράφημα Ισόθερμης Freundlich

Η ισόθερμη Freundlich χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση προσρόφησης αραιών διαλυμάτων με χαμηλές συγκεντρώσεις για τη μοντελοποίηση προσρόφησης οργανικών χημικών και σε περιπτώσεις, όπου η ταυτότητα της διαλυμένης ουσίας παραμένει άγνωστη. Σε περιπτώσεις εξυγίανσης εδαφών και υπογείων υδάτων, η ισόθερμη είναι ευνοϊκή ή γραμμική.

Λογαριθμίζοντας τη βασική εξίσωση της ισόθερμης Freundlich, προκύπτει:

$$\log q_e = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad (\text{Εξίσωση 6-7})$$

Οι όροι K και $1/n$ μπορούν να προσδιοριστούν από την κλίση και την τεταγμένη επί την αρχή της ευθείας των ελαχίστων τετραγώνων, που προκύπτει από πειραματικά δεδομένα προσρόφησης σε συνδυασμό με την παραπάνω εξίσωση. Υπάρχουν πολλά πειραματικά δεδομένα τα οποία συνηγορούν στο ότι η ισόθερμη χαμηλών συγκεντρώσεων υδρόφοβων οργανικών ρύπων σε εδάφη είναι γραμμική, όπως θα περιγραφεί και στη συνέχεια και περιγράφεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$q_e = K_d \cdot C_e \quad (\text{Εξίσωση 6-8})$$

6.1.2 Γραμμική Ισόθερμη

Η γραμμική ισόθερμη είναι η απλούστερη από πλευράς υπολογισμών, αφού όπως φαίνεται και από την εξίσωσή της αποτελεί εκφυλισμένη περίπτωση της Ισόθερμης Freundlich, όταν η σταθερά γ είναι ίση με το μηδέν. Αυτό το είδος ισόθερμης χρησιμοποιείται συνήθως για τη μοντελοποίηση ραδιενεργών ουσιών.

$$\frac{dI(c)}{dc} = a \quad (\text{Εξίσωση 6-9})$$

όπου a σταθερά

ή

$$q_e = K_d \cdot C_e \quad (\text{Εξίσωση 6-10})$$

όπου:

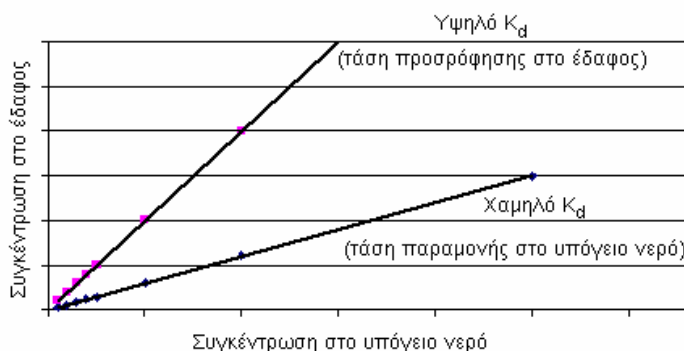
q_e η ποσότητα της ουσίας που έχει προσροφηθεί ανά μάζα προσροφητικού υλικού,

K_d ο συντελεστής γραμμικής προσρόφησης,

C_e η συγκέντρωση της προσροφημένης στο διάλυμα ουσίας.

Ο συντελεστής γραμμικής προσρόφησης K_d αντιστοιχεί στην κλίση της ευθείας που αποτελεί τη γραφική παράσταση της γραμμικής ισόθερμης προσρόφησης. Ως εκ τούτου, σε περίπτωση έντονης κλίσης της γραμμής, αποδεικνύεται μεγάλη τάση προσρόφησης στο

έδαφος, οπότε αυξάνεται και η τιμή του K_d . Από την άλλη, μικρή κλίση της γραμμικής ισόθερμης αντιστοιχεί σε αντίστοιχα χαμηλή τιμή του K_d , αποδεικνύοντας, πως η εξεταζόμενη ουσία παρουσιάζει την τάση να παραμένει στο υπόγειο νερό. (Εικόνα 6-3).



Εικόνα 6-3: Κατανομή δύο διαφορετικών ουσιών στο υπέδαφος

Ο συντελεστής γραμμικής προσρόφησης K_d μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά από βιβλιογραφικές πηγές ή να εκτιμηθεί μέσω του συντελεστή κατανομής οργανικού άνθρακα K_{oc} . Ο συντελεστής αυτός αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για την τύχη και τη μεταφορά των οργανικών ρύπων και ορίζεται ως η κλίση της καμπύλης $K_d = f(f_{oc})$ από την ακόλουθη σχέση:

$$K_{oc} = \left(\frac{\partial K_d}{\partial f_{oc}} \right) \quad (\text{Εξίσωση 6-11})$$

Πολλές πειραματικές μελέτες έδειξαν, πως για την προσρόφηση υδρόφοβων οργανικών ρύπων από εδάφη και ιζήματα, η συνάρτηση $K_d = f(f_{oc})$ είναι γραμμική, επομένως ισχύει ότι:

$$K_{oc} = \frac{K_d}{f_{oc}} \quad (\text{Εξίσωση 6-12})$$

όπου,

K_{oc} ο συντελεστής κατανομής του οργανικού άνθρακα

K_d ο συντελεστής γραμμικής προσρόφησης

f_{oc} η περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανικό άνθρακα

Η σχέση αυτή προϋποθέτει γραμμική ισόθερμη, η οποία ισχύει όσο $f_{oc} > 1\%$ κατά βάρος του εδάφους και C_e είναι μικρότερη του ελάχιστου μεταξύ $10^{-5} M$ και το $\frac{1}{2}$ της υδατικής διαλυτότητας S του ρύπου. ($C_e < 10^{-5}$ ή $C_e < S/2$). Η διακύμανση του K_{oc} είναι πολύ μικρότερη από αυτή του K_d . Το K_{oc} διαφέρει μόνο κατά 3-5 φορές, ανάλογα με τη φύση του προσροφητικού υλικού και σχετίζεται με το συντελεστή κατανομής οκτανόλης - νερού (K_{ow}) και την υδατική διαλυτότητα του ρύπου.

Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής κατανομής οργανικού άνθρακα μιας ουσίας μπορεί να προσδιοριστεί από εμπειρικές σχέσεις που περιλαμβάνουν, είτε τη διαλυτότητα του ρύπου

στο νερό, είτε το συντελεστή κατανομής οκτανόλης - νερού. Ο τελευταίος προσδιορίζεται πειραματικά, εκφράζοντας την κατανομή μιας ουσίας μεταξύ της οκτανόλης και του νερού, τα οποία βρίσκονται σε επαφή υπό συνθήκες ισορροπίας, ενώ αποτελεί και μέτρο της υδροφοβικότητας της προς εξέταση ουσίας. Όσο υδροφοβικότερη είναι η ουσία, τόσο μικρότερη είναι και η διαλυτότητα της και τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση της για προσρόφηση σε στερεά σωματίδια. Ειδικότερα, για τους οργανικούς ρύπους έχει αναπτυχθεί η «υδροφοβική» θεωρία, σύμφωνα με την οποία η προσρόφηση αυτών σε εδαφικά σωματίδια οφείλεται πλήρως στην υδροφοβικότητά τους, όταν η περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανικό άνθρακα είναι μεγαλύτερη ή ίση του 1%. Αντίθετα, αν $f_{oc} < 1\%$ κατά βάρος του εδάφους, τότε δεν είναι βέβαιο αν η οργανική ύλη θα είναι επικρατούσα επιφάνεια προσρόφησης του ρύπου. Έτσι, υπάρχει κάποια κρίσιμη συγκέντρωση οργανικού άνθρακα f_{oc}^* , στην οποία η προσρόφηση του οργανικού ρύπου θα οφείλεται κατά 50% στην ανόργανη επιφάνεια του προσροφητικού υλικού και κατά 50% στην οργανική επιφάνεια αυτού και ισχύει:

$$f_{oc}^* = \frac{S_a}{200 \cdot K_{ow}^{0.84}} \quad (\text{Εξίσωση 6-13})$$

όπου,

S_a η ειδική επιφάνεια του προσροφητικού υλικού

K_{ow} ο συντελεστής κατανομής οκτανόλης - νερού του ρύπου.

Εάν η προσρόφηση στην ανόργανη επιφάνεια του προσροφητικού υλικού είναι σημαντική, τότε ισχύει πως:

$$K_d = f_{oc} \cdot K_{oc} + f_{io} \cdot K_{io} \quad (\text{Εξίσωση 6-14})$$

όπου,

f_{io} το κλάσμα της ανόργανης ύλης του προσροφητικού υλικού

K_{io} ο συντελεστής κατανομής του ρύπου στην ανόργανη επιφάνεια του υλικού.

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$K_d = f_{oc} \cdot K_{oc} + f_{io} \cdot S_a \cdot K_s \quad (\text{Εξίσωση 6-15})$$

όπου,

K_s ο συντελεστής προσρόφησης βάσει της ειδικής επιφάνειας.

Με βάση τα παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα, πως η προσρόφηση ρύπων με χαμηλό K_{ow} σε ένα συγκεκριμένο προσροφητικό υλικό επηρεάζεται κυρίως από το K_{io} . Αντίθετα, η προσρόφηση ρύπων υψηλού K_{ow} σε ένα συγκεκριμένο προσροφητικό υλικό επηρεάζεται κυρίως από το K_{oc} .

6.1.3 Ισόθερμη Langmuir

$$\frac{dI(c)}{dc} = \frac{\mu \cdot \delta}{(1 + \delta \cdot c)^2} \quad (\text{Εξίσωση 6-16})$$

όπου: μ, δ σταθερές

ή

$$q_e = \frac{Q \cdot b \cdot C_e}{1 + b \cdot C_e} \quad (\text{Εξίσωση 6-17})$$

όπου,

q_e η ποσότητα της προσροφημένης ουσίας ανά μάζα του προσροφητικού υλικού

C_e η συγκέντρωση της προσροφημένης ουσίας στο διάλυμα

Q, b οι παράμετροι της ισόθερμης Langmuir

Η εξίσωση που περιγράφει το μοντέλο Langmuir είναι δυνατό να γίνει γραμμική με αντιστροφή της παραπάνω εξίσωσης και διαχωρισμό των μεταβλητών. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει η εξής εξίσωση:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b \cdot Q} + \frac{C_e}{Q} \quad (\text{Εξίσωση 6-18})$$

Ο υπολογισμός των παραμέτρων b και Q επιτυγχάνεται με γραμμική παλινδρόμηση. Ο όρος $1/Q$ είναι η κλίση της ευθείας που προκύπτει, ενώ ο όρος $1/(b \cdot Q)$ είναι η τομή της ευθείας με τον άξονα y .

Αποτέλεσμα της προσρόφησης είναι η επιβράδυνση των ρύπων μέσα στο υπέδαφος, δηλαδή η μείωση της ταχύτητας μεταφοράς τους σε σχέση με την ταχύτητα ροής του υπογείου νερού. Η επιβράδυνση αυτή εκφράζεται με τη βοήθεια ενός συντελεστή επιβράδυνσης R , ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$R = \frac{C_\delta + C_\pi}{C_\delta} \quad (\text{Εξίσωση 6-19})$$

όπου:

C_δ η συγκέντρωση των διαλυμένων συστατικών

C_π η συγκέντρωση των προσροφημένων συστατικών

Ο ρυθμός, με τον οποίο ένας ρύπος, που έχει την τάση να προσροφάται στο εδαφικό υλικό του υδροφορέα, κινείται μέσα σε αυτόν είναι ίσος με την ταχύτητα ροής του υπογείου νερού, διαιρεμένη με το συντελεστή επιβράδυνσης. Για παράδειγμα, αν ο συντελεστής επιβράδυνσης ενός συστατικού είναι 4, το πλούμιο των διαλυμένων συστατικών των ρύπων θα κινηθεί με ταχύτητα ίση με το $\frac{1}{4}$ της ταχύτητας ροής του υπογείου νερού.

Στην παραπάνω εξίσωση, η συγκέντρωση εκφράζεται ως μάζα συστατικού ανά όγκο συνολικού πορώδους μέσου. Ο όγκος του πορώδους μέσου, ο οποίος αποκαλείται επίσης όγκος υδροφορέα, περιλαμβάνει τόσο τα εδαφικά σωματίδια, όσο και το εδαφικό νερό. Βάσει αυτού, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να μετατραπεί έτσι ώστε να περιέχει τους όρους της υδατικής συγκέντρωσης C_e , της προσροφημένης συγκέντρωσης C_a , του πορώδους ε , του συντελεστή γραμμικής προσρόφησης K_d και της πυκνότητας του ξηρού εδάφους ρ_b .

$$R = \frac{(C_e \cdot \varepsilon) + (C_a \cdot \rho_b)}{C_e \cdot \varepsilon} \quad (\text{Εξίσωση 6-20})$$

Δεχόμενοι ότι $K_d = \frac{C_a}{C_e}$, τότε η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται ως εξής:

$$R = 1 + K_d \frac{\rho_b}{\varepsilon} \quad (\text{Εξίσωση 6-21})$$

Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί ότι ο συντελεστής επιβράδυνσης χρησιμοποιείται αυστηρά μόνο όταν υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ των C_a και C_e . Η κινητικότητα διαφόρων ρύπων βάσει του φαινομένου της επιβράδυνσης περιγράφεται στον Πίνακα 6-1. Αξίζει να αναφερθεί ότι υψηλά διαλυτά συστατικά παρουσιάζουν χαμηλό παράγοντα επιβράδυνσης.

Πίνακας 6-1: Ταξινόμηση κινητικότητας διαφόρων ρύπων βάσει του R.

| R | 1.4 - 2 | 3 - 6 | 9 - 20 | 40 - 100 | > 100 |
|--------------|------------------------------|--------------------|------------|----------|-----------------------------|
| Κινητικότητα | Πολύ έντονη | Έντονη | Μέτρια | Χαμηλή | Μηδενική |
| Ρύποι | Φαινόλες, αλκοόλες, ακετόνες | TCA, TCE, βενζόλιο | Ναφθαλένια | Πυρένιο | PCB's, χλωριωμένες διοξίνες |

(Πηγή: Suthersan S., 1997)

6.2 Η ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ ΣΤΑ ΔΙΑΠΕΡΑΤΑ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ

Ένας από τους μηχανισμούς που δρουν κατά την εφαρμογή των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων είναι και αυτός της προσρόφησης. Έτσι, χρησιμοποιώντας κομπόστ ή οργανικό άνθρακα, οι οργανικοί ρύποι προσκολλώνται στην ειδική επιφάνεια αυτών, η οποία μπορεί να είναι της τάξης των $1.000 \text{ m}^2/\text{g}$. Η κινητική της αντίδρασής τους χαρακτηρίζεται από ελεγχόμενη διάχυση, αφού ανάλογα με τη δυνατότητα του ρύπου να αλληλεπιδρά με το πληρωτικό υλικό σε συγκεκριμένο χρόνο, τόσο αποδοτική ή όχι χαρακτηρίζεται η διαδικασία.

Η προσρόφηση των υδροφοβικών οργανικών ρύπων από την υδατική φάση αυξάνει όσο μειώνεται η διαλυτότητα των συστατικών (ή όσο αυξάνει ο συντελεστής διαχωρισμού οκτανόλης/ νερού, K_{ow}) και όσο αυξάνεται το ποσοστό του οργανικού άνθρακα στα στερεά

του υδροφορέα, f_{oc} . Φυσικά υλικά που περιέχουν μεγάλες ποσότητες σε οργανικό άνθρακα, όπως είναι το κάρβουνο και ο ασφαλώδης σχιστόλιθος προκαλούν σημαντική επιβράδυνση των οργανικών ρύπων στο υπόγειο νερό. Αυτά τα υλικά με τις υψηλές ικανότητες ρόφησης είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν στην παθητική απομάκρυνση των ισχυρά υδροφοβικών συστατικών που εμφανίζονται στο υπόγειο νερό.

Για να είναι επιτυχής η χρήση του κομπόστ ή του διατομίτη σε διαπερατούς τοίχους ή Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα, θα πρέπει να ελεγχθούν οι ιδιότητες του πληρωτικού υλικού, ώστε να επιτευχθεί η ιδανική διαπερατότητα του φράγματος σε συνδυασμό με τη μέγιστη προσροφητική ικανότητα του πληρωτικού υλικού. Τόσο η διαπερατότητα, όσο και η απόδοση της προσρόφησης εξαρτώνται από το μέγεθος των κόκκων του προσροφητή, δηλαδή η διαπερατότητα αυξάνεται ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων και τα ποσοστά προσρόφησης μειώνονται όταν αυξάνεται το τετράγωνο του μεγέθους των κόκκων.

Γενικά, μια οικονομικά ωφέλιμη εξυγίανση ενός υπόγειου υδροφορέα που εφαρμόζεται στο πεδίο και βασίζεται στην προσρόφηση των συστατικών, πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- ✚ Μεγάλους κύκλους αναγέννησης, της τάξης των 3-10 ετών. Για το λόγο αυτό απαιτούνται υψηλές ροφητικές ή προσροφητικές ικανότητες συνδυαζόμενες με βιολογική ή αβιοτική αποδόμηση των λιγότερο ροφόμενων συστατικών.
- ✚ Σχετικά υψηλή διαπερατότητα σε σύγκριση με αυτή του υδροφορέα, με σκοπό να αποφευχθούν απότομες υδραυλικές κλίσεις.
- ✚ Γρήγορη ροφητική κινητική με σκοπό να επιτευχθούν μεγάλοι παράγοντες ρόφησης, ακόμα και αν οι ταχύτητες ροής του υπογείου νερού είναι σχετικά υψηλές.
- ✚ Αποφυγή της μείωσης της διαπερατότητας ή της βιοχημικής επίστρωσης του προσροφητικού υλικού λόγω της ανταγωνιστικής προσρόφησης των διαλυμένων οργανικών σωματιδίων ή της ανάπτυξης ενός βιολογικού στρώματος, που θα φράξει τους προσροφητικούς πόρους.

Ο γενικός τύπος που υπολογίζει τον παράγοντα καθυστέρησης R , είναι ο εξής:

$$R = 1 + \frac{\rho}{n} \cdot \frac{\partial F(c)}{\partial c} = \frac{v_a}{v_s} \quad (\text{Εξίσωση 6-22})$$

όπου:

$F(c)$: η ισόθερμη προσρόφηση (γραμμική, Freundlich, Langmuir)

v_a : η ταχύτητα ροής του υπογείου νερού

v_s : η ταχύτητα μεταφοράς των ρύπων

Η επιβράδυνση των ρύπων σε ένα ροφητικό διαπερατό τοίχο μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει του συντελεστή ρόφησης K_d :

$$R_d = 1 + K_d \cdot \frac{\rho}{n} \quad (\text{Εξίσωση 6-23})$$

όπου:

ρ : η αντιπροσωπευτική πυκνότητα

n : το πορώδες του φίλτρου

R_d : ο παράγων καθυστέρησης

K_d : ο λόγος των συγκεντρώσεων των προσροφόμενων ρύπων προς αυτών της υδατικής φάσης.

Αν η ρόφηση δεν είναι γραμμική, ο K_d μπορεί να υπολογιστεί χονδρικά βάσει της ισόθερμης του Freundlich, όπως περιγράφεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$K_d = \frac{C_s}{C_w} = K_F \cdot C_w^{(1/n)-1} \quad (\text{Εξίσωση 6-24})$$

όπου:

C_s : η συγκέντρωση ισορροπίας της διαλυμένης ουσίας στη στερεή φάση

C_w : η συγκέντρωση ισορροπίας της διαλυμένης ουσίας στην υγρή φάση

K_F : ο συντελεστής ρόφησης του Freundlich

6.3 ΜΙΚΡΟΒΙΑΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ

Κλειστή καλλιέργεια θεωρείται εκείνη, που αναπτύσσεται σε περιορισμένο χώρο με περιορισμένη ποσότητα θρεπτικού υλικού (Compost, MTBE, BTEX) και για καθορισμένο χρόνο.

6.3.1 Αύξηση σε μη περιοριστικές συνθήκες περιβάλλοντος

Όλα τα θρεπτικά συστατικά βρίσκονται σε ποσότητες μη περιοριστικές, οπότε ευνοείται η ανάπτυξη και ταυτόχρονα η κυτταρική διαίρεση, οπότε κάθε νέο κύτταρο αναπτύσσεται και διαιρείται με εκθετική αύξηση.

Η ανάπτυξη των κυττάρων εκφράζεται με την εξής γεωμετρική πρόοδο:

$2^0, 2^1, 2^2, 2^3, 2^4, \dots, 2^n$, μετά από n διχοτομήσεις.

Δηλαδή, αν ξεκινώντας υπήρχαν N_0 κύτταρα, μετά από n γενεές θα εμφανίζονταν $N_0 \cdot 2^n$ κύτταρα.

$$N = N_0 \cdot 2^n \quad (\text{Εξίσωση 6-25})$$

Λογαριθμίζοντας την παραπάνω εξίσωση, μπορεί να γραφεί η ανάπτυξη κυττάρων μέσω γραμμικής συσχέτισης:

$$\ln N = \ln N_0 + n \cdot \ln 2 \quad (\text{Εξίσωση 6-26})$$

Το χρονικό διάστημα, που απαιτείται για τον διπλασιασμό της καλλιέργειας ονομάζεται χρόνος διπλασιασμού (doubling time) και συμβολίζεται με t_d .

Αλγεβρικά, ο χρόνος αυτός ισούται με το λόγο του χρόνου της ανάπτυξης προς τον αριθμό των διχοτομήσεων, οπότε και η Εξίσωση 6-26 μπορεί να μετατραπεί ως εξής:

$$N = N_0 \cdot 2^{t/t_d} \quad (\text{Εξίσωση 6-27})$$

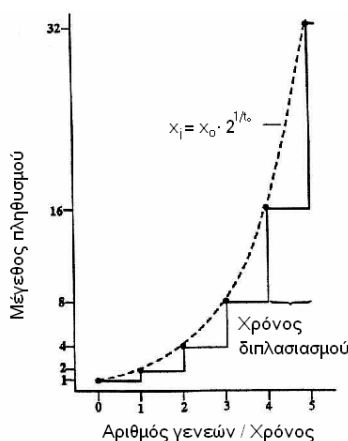
Ειδικός Ρυθμός Ανάπτυξης μ (growth rate) ονομάζεται η μεταβολή του αριθμού των κυττάρων ή της κυτταρικής βιομάζας στην μονάδα του χρόνου. Η παραγωγή θυγατρικών κυττάρων γίνεται κυρίως κατά την φάση της εκθετικής ανάπτυξης, όπου η παραδοχή της «εξισορροπημένης ανάπτυξης» ισχύει. Γι' αυτό το λόγο σε βιολογικά συστήματα χρησιμοποιούνται πολύ συχνά οι ειδικοί ρυθμοί ανάπτυξης κυττάρων ή παραγωγής προϊόντων.

Εάν dx/dt είναι ο ρυθμός ανάπτυξης βιομάζας και x είναι η συγκέντρωση της αρχικής βιομάζας, τότε ορίζεται ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης (specific growth rate) μ , ως:

$$\frac{dx}{dt} = \mu x \quad (\text{Εξίσωση 6-28})$$

Υποθέτοντας ότι ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης είναι σταθερός, με ολοκλήρωση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης προκύπτει:

$$x(t) = x_0 \exp[\mu(t - t_0)] \quad (\text{Εξίσωση 6-29})$$



Εικόνα 6-4: Εκθετική αύξηση σε κλειστό σύστημα

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6-4, η καμπύλη περιγράφει την αύξηση ενός μεγάλου σε μέγεθος πληθυσμού.

Η εξίσωση προφανώς προβλέπει συνεχή αύξηση της βιομάζας δεδομένου ότι δεν λαμβάνει υπόψη την κατανάλωση του υποστρώματος. Από την εξίσωση αυτή μπορεί να προκύψει ο χρόνος διπλασιασμού (doubling time) της καλλιέργειας, t_d .

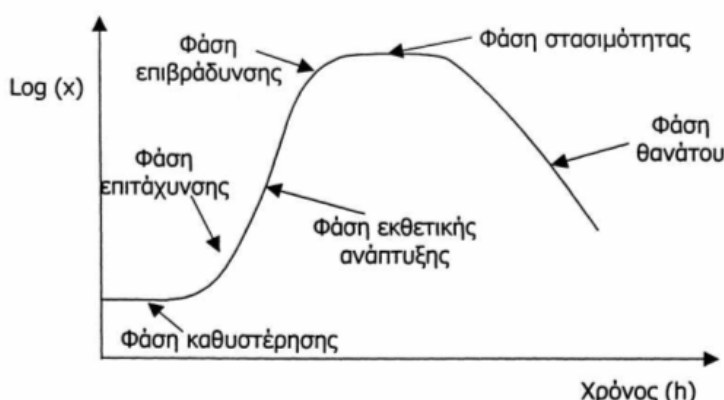
$$x(t_d) = 2x_o = x_o \exp(\mu \cdot t_d) \Rightarrow 2 = \exp(\mu \cdot t_d) \Rightarrow t_d = \frac{\ln 2}{\mu} \Rightarrow t_d = \frac{0.6931}{\mu}$$

(Εξίσωση 6-30)

6.3.2 Αύξηση σε περιοριστικές συνθήκες περιβάλλοντος

Στην περίπτωση αυτή, ανάλογα με την ποσότητα του θρεπτικού υλικού (εν προκειμένω το κομπόστ), ρυθμίζεται και η αύξηση της καλλιέργειας.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6-5, κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας μικροοργανισμών σε κλειστό σύστημα, παρατηρούνται οι εξής φάσεις:



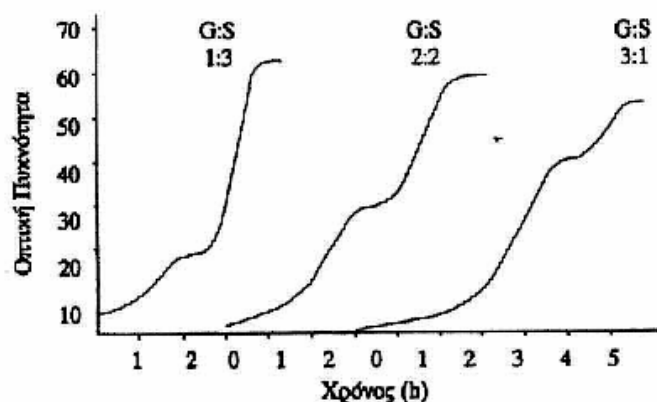
Εικόνα 6-5: Φάσεις μικροβιακής ανάπτυξης σε κλειστό σύστημα

- i. Λανθάνουσα φάση ή φάση καθυστέρησης (lag phase), όπου οι μικροοργανισμοί προσαρμόζονται στις καινούργιες συνθήκες ανάπτυξης.
- ii. Φάση επιτάχυνσης είναι η φάση όπου αρχίζει η ανάπτυξη του οργανισμού και παρατηρείται συνεχής αύξηση του μ σε μ_{max} .
- iii. Φάση εκθετικής ανάπτυξης (exponential phase) όπου η ανάπτυξη γίνεται στο μέγιστο δυνατό ρυθμό και η παραδοχή της «ισορροπημένης ανάπτυξης» ισχύει. Το μ_{max} είναι σταθερό.
- iv. Φάση της επιβράδυνσης (declining growth phase (deceleration phase) όπου το υπόστρωμα λιγοστεύει σημαντικά ή έχουμε την παρουσία υψηλής συγκέντρωσης κάποιου αναστολέα / παρεμποδιστή.
- v. Φάση στασιμότητας (stationary phase) όπου δεν έχουμε ανάπτυξη ή ακριβέστερα ο

ρυθμός ανάπτυξης είναι ίσος με το μηδέν.

vi. Φάση απόπτωσης ή θανάτου (death phase) όπου έχουμε λύση των μικροοργανισμών, που οδηγεί στην μείωση της βιομάζας και ακολουθεί συνήθως κινητική πρώτης τάξης (μ = αρνητικός).

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6-6, όταν το θρεπτικό υπόστρωμα περιέχει μείγμα πηγών άνθρακα, τότε μπορεί να παρατηρηθεί το φαινόμενο διπλού κύκλου αύξησης ή καμπύλη δύο φάσεων, το οποίο ονομάζεται φαινόμενο διαύξησης.

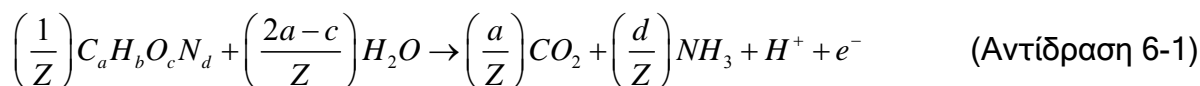


Εικόνα 6-6: Διαφασική αύξηση της E. Coli λόγω παρουσίας γλυκόζης και σορβιτόλης

6.3.3 Συσχέτιση βιοαποδόμησης με τη λειτουργία αντιδραστήρων Slurry.

Η φιλοσοφία της βιολογικής εξυγίανσης κατά τη χρήση της τεχνολογίας των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων είναι αντίστοιχη αυτής των βιοαντιδραστήρων Slurry. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι οι ίδιες και στις δύο περιπτώσεις και περιγράφονται παρακάτω:

🌈 Αντίδραση όταν ο οργανικός ρύπος δρα ως δότης ηλεκτρονίων:



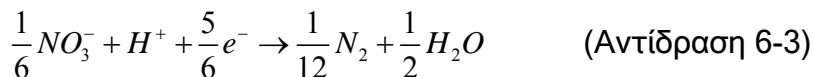
όπου,

a,b,c,d ο αριθμός των ατόμων C,H,O,N στο μόριο του ρύπου, αντίστοιχα
Z $4a+b-2c-3d$

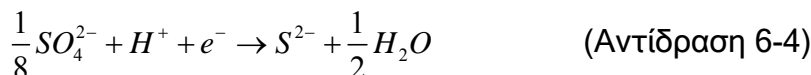
🌈 Αντίδραση όταν το οξυγόνο είναι δέκτης ηλεκτρονίων:



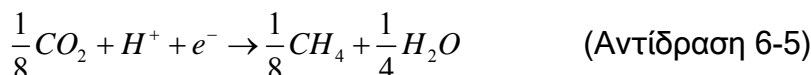
✚ Αντίδραση όταν τα νιτρικά είναι δέκτες ηλεκτρονίων:



✚ Αντίδραση όταν τα θειικά είναι δέκτες ηλεκτρονίων:

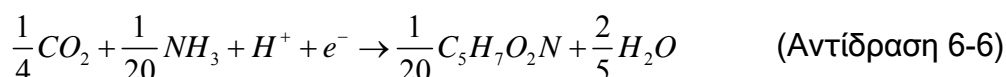


✚ Αντίδραση όταν το διοξείδιο του άνθρακα είναι δέκτης ηλεκτρονίων:

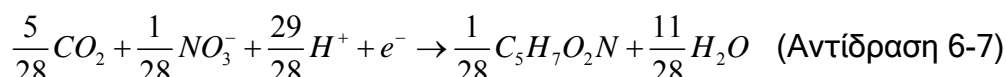


Εξίσωση σύνθεσης βιομάζας:

✚ Αντίδραση όταν πηγή αζώτου είναι η αμμωνία:



✚ Αντίδραση όταν πηγή αζώτου είναι τα νιτρικά:



Η συνολική αντίδραση που λαμβάνει χώρα υπό συνθήκες αντιδραστήρα slurry, υπολογίζεται από το άθροισμα των παραπάνω επιμέρους αντιδράσεων:



όπου,

H_D η αντίδραση οξειδωσης του ρύπου

f_c το ποσοστό του ρύπου που μετατρέπεται σε ενέργεια,

H_A η αντίδραση του δέκτη ηλεκτρονίων,

f_s ο συντελεστής παραγωγής βιομάζας, με τυπική τιμή το $\frac{1}{2}$,

C_s η αντίδραση που περιγράφει τη στοιχειομετρία για την παραγωγή βιομάζας.

Το άθροισμα του μετατρεπόμενου σε ενέργεια ρύπου συν το συντελεστή παραγωγής βιομάζας θα πρέπει να ισούται με τη μονάδα:

$$f_c + f_s = 1 \quad (\text{Εξίσωση 6-34})$$

Οι αντιδραστήρες slurry λειτουργούν ως αντιδραστήρες διαλείποντος έργου, οπότε ισχύει κινητική 1^{ης} τάξης ως προς την αποδόμηση των ρύπων.

$$C = C_0 \cdot e^{-kt} \quad (\text{Εξίσωση 6-35})$$

όπου,

C_0 η αρχική συγκέντρωση του ρύπου,

C η συγκέντρωση του ρύπου τη χρονική στιγμή t ,

k η σταθερά της κινητικής 1^{ης} τάξης,

t η χρονική στιγμή της σύγκρισης των συγκεντρώσεων.

6.4 ΒΙΟΑΠΟΔΟΜΗΣΗ

6.4.1 *In Situ* βιο-απορρύπανση / Μηχανισμοί βιο-μετατροπής (*In Situ* Bioremediation)

Με τον όρο «*in situ* βιο-αποκατάσταση» εννοούμε την «επί τόπου» χρήση βιολογικών διεργασιών για τον καθαρισμό τοξικών και επικίνδυνων οργανικών ενώσεων που βρίσκονται στο υπέδαφος. Βιολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο φυσικό περιβάλλον μπορούν να μετατρέψουν (και να αδρανοποιήσουν ή να αποδομήσουν) οργανικές ενώσεις σε ρυπασμένες περιοχές. Ανοργανοποίηση (mineralization) των οργανικού C, N, P, S (και άλλων στοιχείων) σε CO₂ ή ανόργανες ενώσεις των N, P & S είναι η επιθυμητή βιολογικά καταλυτική μετατροπή των ρύπων. Οι ρυπαίνουσες οργανικές ενώσεις παραμένουν για μεγάλα χρονικά διαστήματα ανέπαφες στο υπέδαφος γιατί δεν υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες για μικροβιακή δραστηριότητα (ανάπτυξη/αποδόμηση).

6.4.2 Μικροβιακός μεταβολισμός

Ο σχεδιασμός διεργασιών βιοαποκατάστασης απαιτεί τον προσδιορισμό των απαιτούμενων αντιδράσεων βιο-αποδόμησης ή βιο-μετασχηματισμού που πρέπει να υποβληθούν οι ρύποι. Γενικά, υπάρχουν αερόβιες και αναερόβιες διεργασίες. Αερόβιοι βιο-μετασχηματισμοί λαμβάνουν χώρα με την παρουσία μοριακού οξυγόνου (O₂) που δρα σαν δέκτης ηλεκτρονίων. Η μορφή αυτή μεταβολισμού είναι γνωστή και ως αερόβια αναπνοή. Υπό την έλλειψη μοριακού οξυγόνου λαμβάνουν χώρα αναερόβιες διεργασίες που διαχωρίζονται σε: αναερόβια αναπνοή, ζύμωση και μεθανική ζύμωση. Η αναερόβια αναπνοή χρησιμοποιεί οξειδωμένες ανόργανες ενώσεις ή οργανικές ενώσεις (πλην του O₂). Ενώ, η ζύμωση είναι ο απλούστερος μηχανισμός για την παραγωγή ενέργειας από βακτήρια. Σε αυτή την περίπτωση οργανικές ουσίες είναι συγχρόνως δότες και δέκτες ηλεκτρονίων. Λαμβάνει χώρα μόνο κάτω από καθαρά αναερόβιες συνθήκες. Η διεργασία διατηρεί ένα οξειδο-αναγωγικό ισοζύγιο. Το επίπεδο οξείδωσης των αντιδρώντων είναι το ίδιο με αυτό των προϊόντων. Επομένως το υπόστρωμα μετατρέπεται σε τελικές ενώσεις που είναι άλλες περισσότερο (από το υπόστρωμα) και άλλες λιγότερο οξειδωμένες. Τα τελικά προϊόντα είναι συνήθως οργανικά οξέα, αλκοόλες, κετόνες και αέρια όπως το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα.

Πίνακας 6-2: Διάφορα είδη μεταβολισμού

| Ηλεκτρονιακός δότης | Ηλεκτρονιακός δέκτης | Τελικά προϊόντα |
|---|-------------------------------|--|
| Αερόβια αναπνοή | | |
| Οργανικό υπόστρωμα (βενζόλιο, τολουόλιο) | O ₂ | CO ₂ , H ₂ O |
| NH ₄ | O ₂ | NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , H ₂ O |
| Fe ²⁺ | O ₂ | Fe ³⁺ |
| S ²⁻ | O ₂ | SO ₄ ²⁻ |
| Αναερόβια αναπνοή | | |
| Οργανικό υπόστρωμα (τολουόλιο, φαινόλες) | NO ₃ ⁻ | N ₂ , CO ₂ , H ₂ O, Cl ⁻ |
| Οργανικό υπόστρωμα (βενζόλιο, 3-χλωροαιθάνιο) | SO ₄ ²⁻ | S ²⁻ , H ₂ O, CO ₂ , Cl ⁻ |
| H ₂ | SO ₄ ²⁻ | S ₂ ⁻ , H ₂ O |
| H ₂ | CO ₂ | CH ₄ , H ₂ O |
| Ζύμωση | | |
| Οργανικό υπόστρωμα | Οργανικά κλάσματα | CO ₂ , CH ₄ |

Η χρήση χλωριωμένων οργανικών ενώσεων σαν δέκτες ηλεκτρονίων κατά την διάρκεια της αναερόβιας αναπνοής είναι μια σχετικά πρόσφατη πειραματική παρατήρηση. Επίσης συχνά παρατηρείται συμμεταβολισμός (cometabolism). Στην πραγματικότητα ο συμμεταβολισμός δεν είναι μεταβολισμός της οργανικής ένωσης, αλλά ο μετασχηματισμός της κατά τη διάρκεια χρήσης άλλων θρεπτικών ουσιών από τους μικροοργανισμούς. Ρύποι που μετασχηματίζονται με συμμεταβολισμό ποτέ δεν ανοργανοποιούνται πλήρως. Ευτυχώς, όμως, τα προϊόντα του συμμεταβολισμού είναι υποστρώματα σε άλλους μικροοργανισμούς. Ο μετασχηματισμός ενός ρύπου δεν σημαίνει αναγκαστικά και ελάττωση της τοξικότητας. Αν όλα τα τοξικά χαρακτηριστικά μιας οργανικής ένωσης απομακρύνονται με βιο-μετασχηματισμό, τότε αναφέρεται σαν αποτοξίνωση (detoxification). Επειδή ο ρυθμός συμμεταβολισμού είναι συνήθως αργός, γίνεται κάθε προσπάθεια αύξησής του. Ο εμπλουτισμός με οργανικές ενώσεις που εύκολα ανοργανοποιούνται είναι μια επιτυχημένη τεχνική (αύξηση της παραγωγής ενζύμων που προκαλούν τον συμμεταβολισμό των ρύπων). Οι μικροοργανισμοί μπορούν να καταλύουν μία σειρά αντιδράσεων που οδηγούν στην αποκατάσταση του περιβάλλοντος.

6.4.3 Μηχανισμοί απορρόφησης των NAPL's από μικροοργανισμούς

Τα NAPL's είναι ελάχιστα διαλυτά στο νερό. Επομένως γεννάται η ερώτηση «Πως οι μικροοργανισμοί αφομοιώνουν τα NAPL's και πως τα ένζυμα μετατρέπουν τους ρύπους;». Υπενθυμίζεται ότι ο συνήθης μηχανισμός για μακρομόρια (δηλ. διάσπαση του

υδατοδιαλυτού μέρους του μακρομόριου) δεν ισχύει για τα σχετικού χαμηλού μοριακού βάρους συστατικά που υπάρχουν στα NAPL's.

Τρεις μηχανισμοί έχουν διαπιστωθεί και εστιάζονται στην μεταφορά των ρυπαντών από το περιβάλλον στην κυτταρική επιφάνεια:

- i. Μόνο το ποσοστό του ρύπου που είναι διαλυμένο στο νερό (όσο μικρό και να είναι) βιοαποδομείται και μόλις αφομοιωθεί από τους μικροοργανισμούς, ο ρυθμός βιοαποδόμησης (στο βαθμό που είναι σχετικά γρήγορος) καθίσταται ίσος με τον ρυθμό διάλυσης του ρύπου από την οργανική φάση (NAPL) στην υδατική φάση. Ο ρυθμός βιοαποδόμησης αυξάνει στην αρχή (όταν η βιομάζα είναι χαμηλή) και μετά από λίγο σταθεροποιείται (και ισούται με τον ρυθμό διάλυσης) όταν η βιομάζα αυξηθεί.
- ii. Ο μικροοργανισμός εκκρίνει ουσίες (κυρίως bio-surfactants) που μετατρέπουν τη μη υδατική φάση σε σταγόνες μεγέθους μικρότερου του 1 μm . Η διεργασία αυτή συχνά ονομάζεται και ψευδο-διάλυση (pseudosolubilization). Τα μικρά αυτά σταγονίδια (από 0,1 ως 1 μm) αφομοιώνονται άμεσα από τους μικρο-οργανισμούς. Όσο πιο μικρά είναι τα σταγονίδια τόσο πιο γρήγορη είναι η αφομοίωση τους από τους μικροοργανισμούς.
- iii. Οι μικροοργανισμοί έρχονται σε κατευθείαν επαφή με τα NAPL's, στην επιφάνεια των οποίων αναπτύσσονται οι μικροοργανισμοί και οι χημικές ενώσεις που είναι στο σημείο επαφής (ή πολύ πλησίον) περνούν κατευθείαν στο κυτταρόπλασμα.

Και οι τρεις μηχανισμοί έχουν παρατηρηθεί σε μικροβιακές καλλιέργειες.

6.5 ΒΙΟΑΠΟΔΟΜΗΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

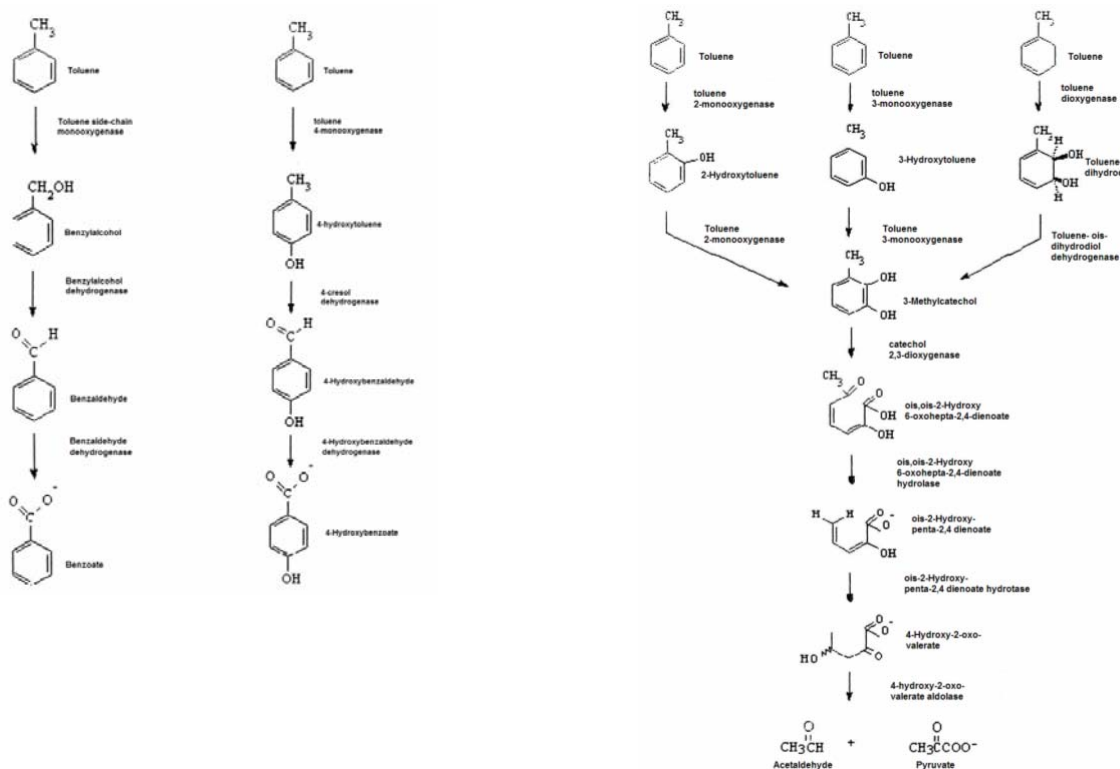
Η παγκόσμια παραγωγή αργού πετρελαίου είναι μεγαλύτερη από $2 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{έτος}$. Συχνά παρατηρείται ρύπανση υδατικών και χερσαίων οικοσυστημάτων από πετρελαιοειδή. Η διάθεση μικρών ποσοτήτων στην καθημερινή ζωή στο περιβάλλον καλύπτει περίπου το 90% του συνολικού ποσού που διατίθεται στο περιβάλλον. Το άλλο 10% προέρχεται από ατυχήματα.

Γενικά, οι υδρογονάνθρακες του αργού πετρελαίου κατατάσσονται σε αλκάνια (n- & i-), κυκλικά αλκάνια, αρωματικούς υδρογονάνθρακες πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, ασφαλτένια και ρητίνες (resins). Επίσης, στο αργό πετρέλαιο υπάρχει και παρουσία ενώσεων που περιέχουν N και S. Τα αλκάνια παράγονται κυρίως κατά την επεξεργασία του αργού πετρελαίου.

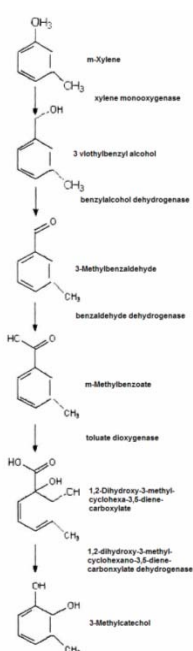
6.5.1 Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες

Μηχανισμός Βιοαποδόμησης:

Ο μηχανισμός περιλαμβάνει δύο βήματα. Πρώτα έχουμε την ενεργοποίηση του δακτυλίου και μετά την διάσπαση του (με την προσθήκη οξυγόνου και υπό την δράση του ενζύμου οξυγονάση). Τα εναλλακτικά μεταβολικά μονοπάτια του τολουολίου είναι τα εξής:



Τα εναλλακτικά μεταβολικά μονοπάτια του ξυλενίου είναι τα εξής:

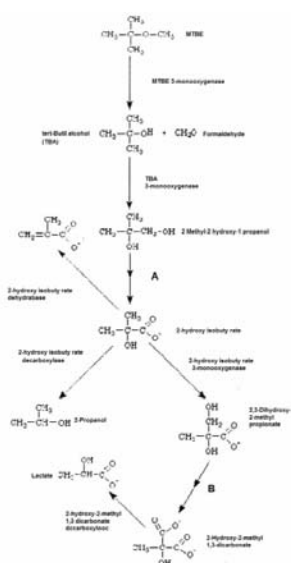


6.5.2 Βιοαποδόμηση MTBE

Η παγκόσμια παραγωγή του MTBE έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία 15 χρόνια. Το 1995 το MTBE ήταν η 3^η κατά σειρά οργανική ένωση με τον μεγαλύτερο όγκο παραγωγής στις ΗΠΑ ($>8 \times 10^9$ kg).

Λόγω της εξαιρετικής διαλυτότητας, πτητικότητας και κινητικότητας του MTBE, η ένωση αυτή δημιουργεί ένα πραγματικό κίνδυνο ρύπανσης των υπογείων υδάτων. Το MTBE είναι περισσότερο διαλυτό από το BTEX και έχει μικρότερη απορροφητικότητα από το έδαφος. Σε μελέτες πεδίου που έγιναν, διαπιστώθηκε ότι το MTBE μεταφέρεται με την ίδια ταχύτητα που μεταφέρονται οι συντηρητικοί ιχνηθέτες (conservative tracers) στα υπόγεια νερά.

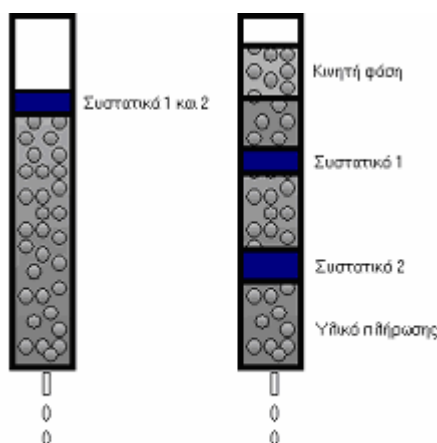
Το MTBE δεν διασπάται εύκολα στα υπόγεια νερά κάτω από αερόβιες ή αναερόβιες συνθήκες. Κάτω από συνθήκες μεθανογένεσης έχει παρατηρηθεί η βιοδιάσπαση του MTBE σε TBA. Αερόβια βιοδιάσπαση μετά από λανθάνουσα περίοδο >180 μέρες έχει παρατηρηθεί με συσσώρευση του ενδιάμεσου TBA και στη συνέχεια βιοδιάσπαση του τελευταίου με χαμηλότερο ρυθμό.



*ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ**Κεφάλαιο 7***7.1 ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ**

Ο «χρωματογραφικός» διαχωρισμός των συστατικών ενός μίγματος είναι ένα σύνηθες φαινόμενο στη φύση. Η διάχυση και μεταφορά μιγμάτων αερίων ή υγρών δια μέσου πετρωμάτων είναι γνωστό ότι οδηγεί στην επιλεκτική κατακράτηση κάποιων συστατικών. Ως αναλυτική εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από το βοτανολόγο Tswett, ο οποίος στην προσπάθειά του να διαχωρίσει διαλύματα φυτικών χρωστικών ουσιών, τα διοχέτευσε διαμέσου γυάλινων στηλών, οι οποίες περιείχαν ανθρακικό ασβέστιο σε λεπτή διασπορά. Απεδείχθη, ότι επιμέρους συστατικά διαχωρίζονταν κατά την κίνηση του διαλύματος μέσα στη στήλη, δημιουργώντας έγχρωμες ζώνες. Έτσι δημιουργήθηκε ο όρος χρωματογραφία.

Σήμερα η χρωματογραφία στην ενόργανη μορφή της αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνική για το διαχωρισμό μιγμάτων και την ταυτοποίηση των συστατικών τους σε αναλυτικό και παρασκευαστικό επίπεδο. Σχηματική παράσταση χρωματογραφικού διαχωρισμού παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-1. Το μίγμα εισάγεται εντός στήλης πληρωμένης με μια στατική φάση στερεή ή υγρή και κινείται κατά μήκος της, διαλυμένο σε κατάλληλη υγρή ή αέρια φάση, η οποία ονομάζεται κινητή. Οι δύο φάσεις επιλέγονται, ώστε τα συστατικά του μίγματος που πρόκειται να αναλυθεί, να έχουν διαφορετική συνάφεια με κάθε μία από αυτές. Ένα συστατικό, που είναι ευδιάλυτο ή προσροφάται ευκολότερα στη σταθερή φάση, θα χρειαστεί περισσότερο χρόνο να την διανύσει συγκριτικά με κάποιο άλλο περιορισμένης διαλυτότητας. Η διαφορετική κινητικότητα των συστατικών οδηγεί στο διαχωρισμό τους και τη δημιουργία ξεχωριστών ζωνών στο χώρο. Ο διαχωρισμός, δηλαδή, επιτυγχάνεται στη βάση της διαφορετικής κατανομής των συστατικών ανάμεσα στις δύο αυτές φάσεις. Τα συστατικά που παραμένουν στην κινούμενη φάση, περισσότερο διαπερνούν τη χρωματογραφική στήλη και εξέρχονται γρηγορότερα από εκείνα που παραμένουν προσροφημένα ή διαλυμένα περισσότερο χρόνο στη σταθερή φάση.



Εικόνα 7-1: Σχηματική παράσταση χρωματογραφικού διαχωρισμού

7.1.1 Ταξινόμηση των βασικών χρωματογραφικών τεχνικών

Οι χρωματογραφικές τεχνικές ταξινομούνται ανάλογα με τη φυσική κατάσταση της κινητής φάσης, τη φύση και τη μορφή της στατικής φάσης και το φυσικοχημικό μηχανισμό διαχωρισμού των συστατικών.

Ανάλογα με τη φύση της κινητής φάσης, η χρωματογραφία διακρίνεται σε αέρια (Gas Chromatography, GC) και υγρή (Liquid Chromatography, LC). Τελευταία έχει αναπτυχθεί η υπερκρίσιμη χρωματογραφία (Supercritical Fluid Chromatography, SFC), όπου ως κινούμενη φάση χρησιμοποιείται ένα αέριο σε υπερκρίσιμη κατάσταση, συνήθως το διοξείδιο του άνθρακα. Σε συνδυασμό με τη φύση της στατικής φάσης, η χρωματογραφία διακρίνεται σε υγρή-υγρή (LLC), υγρή στερεή (LSC), αέρια-στερεή (GSC) και αέρια-υγρή (GLC).

Ανάλογα με το είδος των φυσικοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά το διαχωρισμό, οι χρωματογραφικές τεχνικές διακρίνονται σε:

- Χρωματογραφία προσρόφησης (adsorption)
- Χρωματογραφία κατανομής (partition)
- Χρωματογραφία ιοντοεναλλαγής (ion exchange)
- Χρωματογραφία μοριακού αποκλεισμού (size exclusion)

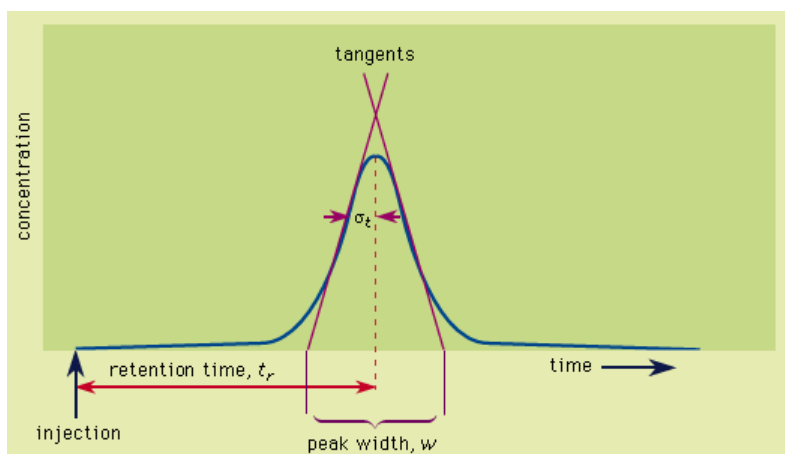
Αναλυτικότερα,

Στη χρωματογραφία προσρόφησης, βασική διεργασία είναι η προσρόφηση και εκρόφηση συστατικών σε μια στερεή στατική φάση. Η κινητή φάση μπορεί να είναι αέριο ή υγρό. Η διαφορετική τάση προσρόφησης ανάμεσα στα συστατικά του μίγματος εξασφαλίζει το διαχωρισμό.

Στη χρωματογραφία κατανομής, η στατική φάση είναι μια λεπτή στοιβάδα υγρού, που καλύπτει μια στερεή επιφάνεια - υπόστρωμα. Η κινούμενη φάση μπορεί να είναι υγρό ή αέριο. Η διαφορετική διαλυτότητα των συστατικών του μίγματος στη στατική φάση, αποτελεί τη βάση διαχωρισμού αυτών. Στη χρωματογραφία ιοντοεναλλαγής, η στατική φάση είναι μια ρητίνη με ικανότητα ιοντο-εναλλαγής και η κινητή φάση είναι υγρή. Ο διαχωρισμός στηρίζεται στην ισορροπία της εναλλαγής των ιόντων ανάμεσα στα συστατικά του μείγματος και στη στατική φάση, στην οποία συγκρατούνται ηλεκτροστατικά τα ιοντικά συστατικά του μείγματος. Χρησιμοποιείται κυρίως στον προσδιορισμό ανόργανων ιόντων σε διαλύματα. Η χρωματογραφία μοριακού αποκλεισμού συνήθως αναφέρεται και ως χρωματογραφία πηκτής. Τα μόρια των συστατικών του μείγματος διαχωρίζονται ανάλογα με το μέγεθος τους, καθώς με τη βοήθεια της υγρής κινούμενης φάσης διέρχονται μέσω των πόρων ενός πολυμερούς. Τα μόρια με μεγάλο μέγεθος κινούνται μόνο στους μεγάλους πόρους σε αντίθεση με τα μικρότερα, τα οποία καθυστερούν στο δίκτυο των μικρών πόρων. Στην έξοδο της στήλης, τα μόρια φτάνουν διατεταγμένα σύμφωνα με το μέγεθός τους, ή για μόρια συστατικών που ανήκουν στην ίδια χημική κατηγορία, σύμφωνα με το μοριακό τους βάρος. Προϋπόθεση αποτελεί η έλλειψη αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στα συστατικά του δείγματος και το υλικό της χρωματογραφικής στήλης. Χρησιμοποιείται κυρίως για τον προσδιορισμό του μοριακού βάρους μιγμάτων και ως παρασκευαστική τεχνική στο διαχωρισμό μεγαλομορίων.

7.1.2 Το χρωματογράφημα

Στην ενόργανη χρωματογραφική ανάλυση, η σύσταση της κινητής φάσης, όπως αυτή εξέρχεται από τη χρωματογραφική στήλη, παρακολουθείται συνεχώς από μια διάταξη, η οποία ονομάζεται ανιχνευτής. Ο ανιχνευτής είναι ευαίσθητος σε κάποια ιδιότητα των συστατικών του μείγματος, η οποία επιλέγεται, ώστε να είναι εύκολα μετρήσιμη, αλλά και να έχει τιμές για τα συστατικά που αναλύονται διαφορετικές από εκείνες της κινούμενης φάσης. Όταν εκλούεται μόνο κινητή φάση, το σήμα του ανιχνευτή ρυθμίζεται σε μηδενική τιμή. Με την εμφάνιση κάποιου συστατικού, το σήμα αλλάζει και δημιουργείται μια κορυφή. Η καμπύλη αυτή αποτελεί το προφίλ έκλουσης του συστατικού και σε ιδανική ανάλυση έχει μορφή κανονικής κατά Gauss κατανομής, δεδομένου ότι ανάλογης μορφής είναι και η κατανομή του πληθυσμού στο μέτωπο κίνησης των μέσα στη στήλη. Εικόνα 7-2. Το διάγραμμα του προφίλ έκλουσης των συστατικών ενός μίγματος συναρτήσει του χρόνου ονομάζεται χρωματογράφημα.



Εικόνα 7-2: Χρωματογραφική κορυφή

7.1.3 Κατανομή των συστατικών ανάμεσα στις φάσεις

Τα συστατικά του μείγματος, η κινητή φάση και η σταθερή φάση αποτελούν ένα σύστημα τριών συστατικών. Ενώ μεταξύ της κινούμενης και της σταθερής φάσης δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις, τα μόρια των συστατικών του μείγματος αλληλεπιδρούν με εκείνα της σταθερής φάσης και κατανέμονται ανάμεσα στις δύο φάσεις κάθε χρονική στιγμή.

Η κατανομή των συστατικών ανάμεσα στις δυο φάσεις περιγράφεται στην κατάσταση ισορροπίας ως:

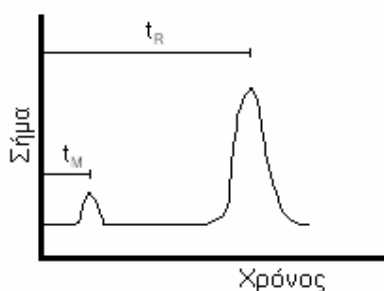
$$C_s = K \cdot C_m$$

Όπου C_m και C_s οι συγκεντρώσεις του συστατικού στη κινητή (m) και στη στατική φάση (s) αντίστοιχα. Η σταθερά K ονομάζεται συντελεστής κατανομής. Η ισορροπία που αποκαθίσταται είναι φυσικά δυναμική, δηλαδή μόρια του κάθε συστατικού μετακινούνται ανάμεσα στις δύο φάσεις. Η τιμή του συντελεστή κατανομής καθορίζει το χρόνο που «δαπανά» ένα συστατικό στην κινητή και στη στάσιμη φάση. Αν η τιμή του K είναι μεγάλη, τότε και ο αριθμός των μορίων του συστατικού στη στατική φάση θα είναι μεγαλύτερος από αυτόν στην κινητή. Συνεπώς, τα μόρια του συστατικού αυτού θα βρίσκονται περισσότερο χρόνο στη στατική φάση. Επομένως, αν δύο συστατικά έχουν διαφορετικούς συντελεστές K ως προς μια στατική φάση, τότε είναι δυνατός ο χρωματογραφικός διαχωρισμός τους.

7.1.4 Χρόνος συγκράτησης

Η ταχύτητα των συστατικών ενός μείγματος μέσα σε μια χρωματογραφική στήλη καθορίζεται από τρεις παράγοντες: Τη γραμμική ταχύτητα της κινητής φάσης, το λόγο του όγκου της στατικής φάσης προς τον όγκο της κινητής και το συντελεστή κατανομής. Οι

δύο πρώτοι παράγοντες είναι ίδιοι για όλα τα συστατικά, ενώ ο τρίτος είναι χαρακτηριστικός για κάθε συστατικό. Έτσι, για ένα δεδομένο χρωματογραφικό σύστημα, κάθε συστατικό κινείται με τη δική του χαρακτηριστική ταχύτητα και εξέρχεται από τη χρωματογραφική στήλη σε ένα χαρακτηριστικό χρόνο, ο οποίος ονομάζεται χρόνος συγκράτησης ή έκλουσης (t_R). Ο χρόνος αυτός χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση του συστατικού. Ο χρόνος συγκράτησης ενός συστατικού, το οποίο δεν αλληλεπιδρά με τη στατική φάση ονομάζεται νεκρός χρόνος (t_M) και ισούται με το χρόνο κίνησης της κινητής φάσης μέσα στη στήλη. Ο χρωματογραφικός χρόνος συγκράτησης ενός συστατικού φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 7-3.

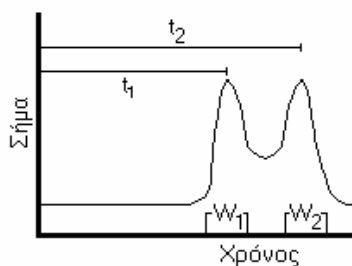


Εικόνα 7-3: Χρωματογραφικός χρόνος συγκράτησης συστατικού

7.1.5 Η διαχωριστική ικανότητα

Η διαχωριστική ικανότητα αποτελεί το κυριότερο μέγεθος χαρακτηρισμού της ικανότητας μιας χρωματογραφικής στήλης να διαχωρίζει συστατικά με παρόμοια χημικά χαρακτηριστικά, επομένως και ιδιότητες. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο στην περίπτωση των αναλύσεων δειγμάτων από οργανικά ορυκτά καύσιμα, λόγω της ύπαρξης ιδιαίτερα μεγάλου αριθμού συστατικών σε αυτά, αλλά και της χημικής τους συγγένειας. Η διαχωριστική ικανότητα προσδιορίζεται συνήθως για ένα ζεύγος συστατικών του μείγματος, ο διαχωρισμός του οποίου είναι ιδιαίτερα δύσκολος.

Ποσοτικά για τις χρωματογραφικές κορυφές της Εικόνας 7-4, η διαχωριστική ικανότητα ορίζεται ως:



Εικόνα 7-4: Προσδιορισμός διαχωριστικής ικανότητας

Το ζητούμενο σε μια ανάλυση είναι η εξασφάλιση του λεγόμενου διαχωρισμού γραμμής βάσης, η οποία αντιστοιχεί σε διαχωριστική ικανότητα μεγαλύτερη του 1.5.

7.1.6 Ποιοτική και ποσοτική χρωματογραφική ανάλυση

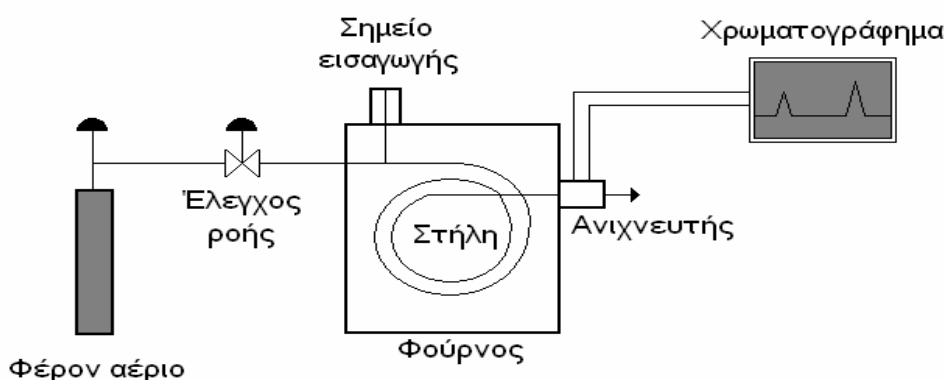
Η ποιοτική ανάλυση έχει στόχο τον προσδιορισμό των ενώσεων που υπάρχουν σε ένα μείγμα, ενώ η ποσοτική τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας των συστατικών στο μείγμα. Ο ποιοτικός προσδιορισμός των συστατικών βασίζεται στους χρόνους συγκράτησης αυτών, δεδομένου ότι υπό τις ίδιες χρωματογραφικές συνθήκες, ο χρόνος αυτός είναι χαρακτηριστικός για ένα συστατικό. Οι χρόνοι συγκράτησης προσδιορίζονται πειραματικά, χρησιμοποιώντας πρότυπες ενώσεις. Βέβαια, ίδιους χρόνους συγκράτησης μπορούν να εμφανίσουν περισσότερα του ενός συστατικά. Πρέπει να τονιστεί, ότι η εμφάνιση χρωματογραφικής κορυφής σε κάποιο χρόνο, που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο συστατικό δεν αποτελεί μονοσήμαντη απόδειξη της ύπαρξής του στο αναλυμένο μείγμα. Για δείγματα, όπως αυτά των ορυκτών καυσίμων, λόγω του μεγάλου αριθμού των συστατικών και της χημικής συγγένειας μεταξύ αυτών, η οποία οδηγεί σε κοντινούς χρόνους συγκράτησης, η ταυτοποίηση με μόνο κριτήριο το χρόνο συγκράτησης είναι προβληματική ως αδύνατη. Λύση στο πρόβλημα αυτό δίνει η χρήση ανιχνευτών ικανών να προσδιορίζουν την ταυτότητα των εκλούμενων συστατικών. Τέτοιοι ανιχνευτές είναι ο φασματογράφος μάζας και το υπέρυθρο και υπεριώδες φασματοφωτόμετρο. Ειδικά ο φασματογράφος μάζας συνδεδεμένος με αέριο χρωματογράφο έχει καθιερωθεί ως αναλυτικό σύστημα με την πλέον ευρεία εφαρμογή στην ποιοτική ανάλυση σύνθετων μειγμάτων.

Η ποσοτική ανάλυση στηρίζεται στην αναλογία του εμβαδού της κορυφής με τη συγκέντρωση ή τη μάζα των αναλυμένων συστατικών. Ο λόγος της συγκέντρωσης προς το εμβαδόν ονομάζεται συντελεστής απόκρισης και προσδιορίζεται πειραματικά με αναλύσεις δειγμάτων γνωστής σύστασης. Η ποσοτική αυτή μεθοδολογία ονομάζεται βαθμονόμηση εξωτερικού προτύπου. Σε αναλύσεις με ιδιαίτερες απαιτήσεις ακρίβειας, όπως στην ανάλυση συστατικών σε ίχνη ή όταν οι συνθήκες ανάλυσης δεν είναι σταθερές, χρησιμοποιείται η τεχνική του εσωτερικού προτύπου. Σύμφωνα με αυτή στο άγνωστο μείγμα προστίθεται σε γνωστή συγκέντρωση ένα νέο συστατικό. Στο χρωματογράφημα του μείγματος αυτού σε σχετικές επιφάνειες των κορυφών του νέου συστατικού και του αρχικού μείγματος παραμένουν σταθερές.

7.2 ΑΕΡΙΑ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ

7.2.1 Αρχή Αέριας Χρωματογραφίας

Η αέρια χρωματογραφία- και κυρίως η αέρια-υγρή χρωματογραφία σχετίζεται με ένα δείγμα που εξατμίζεται και εισάγεται στη χρωματογραφική στήλη. Το δείγμα μετακινείται στη στήλη με τη βοήθεια μιας αδρανούς, αέριας, ευκίνητης φάσης. Η στήλη έχει μια υγρή σταθερή φάση, η οποία είναι ροφημένη στην επιφάνεια ενός αδρανούς στερεού. Τα συστατικά του δείγματος κατανέμονται μεταξύ της κινητής και της στατικής φάσης. Η συνεχής ρόφηση-εκρόφηση από την αέρια στη στερεή ή υγρή φάση μειώνει την ταχύτητα με την οποία κάθε συστατικό περνάει τη στήλη. Η μείωση της ταχύτητας κάθε ουσίας που περιλαμβάνεται στο δείγμα εξαρτάται από τις ιδιότητες της ουσίας, όπως η πτητικότητα, η πολικότητα και άλλες. Με αυτό τον τρόπο η κάθε ουσία περνάει με διαφορετική ταχύτητα μέσα από την στήλη διαχωρισμού διαχωριζόμενη από τις υπόλοιπες. Η στήλη είναι τοποθετημένη σε ένα θερμοστατούμενο θάλαμο και διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία που επιλέγεται ανάλογα με τη φύση και τα συστατικά του δείγματος. Στην Εικόνα 7-5 παρουσιάζεται σχηματικά ένας αέριος χρωματογράφος.



Εικόνα 7-5: Σχηματική περιγραφή του αέριου χρωματογράφου
(Πηγή: www.pollutionissues.com)



Εικόνα 7-6: Φωτογραφία ενός αέριου χρωματογράφου
(Πηγή: www.dartmouth.edu)

7.2.2 Βασικές έννοιες

- *Φέρον αέριο*

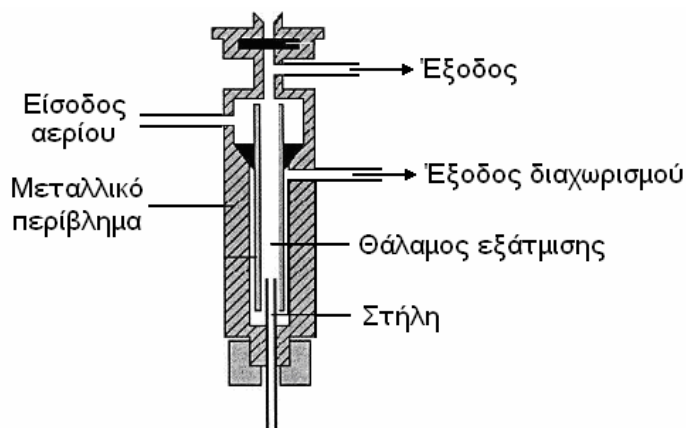
Το φέρον αέριο πρέπει να είναι χημικά αδρανές. Τα αέρια που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι το ήλιο, υδρογόνο και το άζωτο. Η επιλογή του φέροντος αερίου εξαρτάται από το είδος του χρησιμοποιούμενου ανιχνευτή και τη φύση των συστατικών του μείγματος. Η παροχή ρυθμίζεται, ώστε να είναι σταθερή, διότι επηρεάζει το χρόνο συγκράτησης των συστατικών. Επιπρόσθετα, η παροχή επιλέγεται, ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη διαχωριστική ικανότητα της στήλης σε συνδυασμό με το είδος του αερίου και τη θερμοκρασία της ανάλυσης.

- *Σύστημα εισαγωγής δείγματος*

Για την καλύτερη απόδοση της στήλης, το δείγμα δε θα πρέπει να έχει μεγάλο μέγεθος και θα πρέπει να εισάγεται στη στήλη ως ατμός σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η αργή εισαγωγή μεγάλων δειγμάτων προκαλεί διεύρυνση των κορυφών και μειώνει την ποιότητα της ανάλυσης. Η συνηθισμένη μέθοδος είναι η χρήση μικροσύριγγας για την εισαγωγή του δείγματος, μέσω ενός πλαστικού διαφράγματος στο σημείο πριν από τη στήλη, όπου υπάρχει σημείο αεριοποίησης του δείγματος. Η θερμοκρασία σε αυτό είναι συνήθως 50 °C πάνω από σημείο βρασμού του λιγότερο πτητικού συστατικού του δείγματος. Για τις πληρωμένες στήλες, η ποσότητα του δείγματος είναι από 0.1 μl έως και 20 μl. Οι τριχοειδείς στήλες, ωστόσο, απαιτούν ακόμα μικρότερη ποσότητα δείγματος, συνήθως 10⁻³ μl. Για τις τριχοειδείς στήλες χρησιμοποιείται η μέθοδος εισαγωγής split / splitless (με διαχωρισμό ή όχι), όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 6-3. Για μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά και ευχέρεια στη χρήση, τα σύγχρονα όργανα αέριας χρωματογραφίας μπορούν να εφοδιαστούν και με αυτόματο δειγματολήπτη.

- *Σύστημα εισαγωγής split / splitless*

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7-7, μόνο ένα μέρος από το δείγμα, που έχει εξατμιστεί, εισέρχεται στη στήλη, ενώ το μεγαλύτερο μέρος εξέρχεται από την έξοδο διαχωρισμού (split outlet). Η έξοδος κάτω από το διάφραγμα (septum purge outlet) χρησιμεύει στον καθαρισμό του, ώστε να μην περνούν διαρροές από αυτό στη στήλη.



Εικόνα 7-7: Σύστημα εισαγωγής split/ splitless
(Πηγή: www.cartage.org.lb)

- **Στήλες**

Υπάρχουν δύο γενικοί τύποι στηλών, οι στήλες με πληρωτικό υλικό (packed) και οι τριχοειδείς (capillary). Οι πρώτες είναι σωλήνες με εσωτερική διάμετρο 1.6 έως 6 mm και μήκος 1 έως 2 m, κατασκευασμένες από γυαλί, μέταλλο (ανοξείδωτο, χαλκό, αλουμίνιο) ή Teflon και γεμισμένες με πληρωτικό υλικό (ζεόλιθο, διατομική γη, silica gel, αλουμίνα, μοριακές sieves και ενεργό άνθρακα). Οι τριχοειδείς στήλες έχουν εσωτερική διάμετρο λίγων δεκάτων του μικρόμετρου, ενώ υπάρχουν δύο διαθέσιμοι τύποι:

- Οι στήλες ανοικτού σωλήνα με επικάλυψη τοιχωμάτων (WALL-COATED OPEN TUBULAR - **W.C.O.T.**) και
- Οι στήλες ανοικτού σωλήνα με επικάλυψη υλικού στήριξης (SUPPORT COATED OPEN TUBULAR - **S.C.O.T.**).

Οι πρώτες αποτελούνται από έναν τριχοειδή σωλήνα, του οποίου τα τοιχώματα επικαλύπτονται από μια υγρή ακίνητη φάση. Στις στήλες ανοικτού σωλήνα με επικάλυψη υλικού στήριξης, το εσωτερικό τοίχωμα του τριχοειδούς σωλήνα επικαλύπτεται με ένα λεπτό στρώμα υλικού υποστήριξης, όπως η διατομική γη, πάνω στο οποίο είναι ροφημένη η ακίνητη φάση.

Οι **S.C.O.T.** στήλες είναι συνήθως λιγότερο αποτελεσματικές από τις **W.C.O.T.**, αλλά και οι δύο τύποι τριχοειδών στηλών είναι καλύτερες από αυτές με πληρωτικό υλικό. Τα όργανα που χρησιμοποιούν την πρώτη κατηγορία στηλών ονομάζονται χρωματογράφοι αέριας-στερεάς φάσης (**GSC**) και αυτοί που χρησιμοποιούν το δεύτερο είδος στήλης χρωματογράφοι αέριας-υγρής φάσης (**GLC**).

Το 1979 κατασκευάστηκε ένας νέος τύπος **W.C.O.T.** στήλης, η στήλη ανοικτού σωλήνα τηγμένης πυριτίας (**FUSED SILICA OPEN TUBULAR - F.S.O.T.**). Αυτή έχει πιο λεπτά τοιχώματα από τις γυάλινες τριχοειδείς στήλες και είναι πιο ανθεκτικές λόγω του στρώματος πολυαμιδίου. Οι στήλες αυτές είναι εύκαμπτες και μπορούν να τυλίγονται σε σπείρες.

- *Θερμοκρασία ανάλυσης*

Για ακριβείς μετρήσεις, η θερμοκρασία της στήλης πρέπει να ελέγχεται ως τα δέκατα του βαθμού. Η βέλτιστη θερμοκρασία της στήλης εξαρτάται από το σημείο βρασμού του δείγματος. Σα γενικός κανόνας ισχύει ότι μία θερμοκρασία λίγο μεγαλύτερη από το μέσο σημείο βρασμού του δείγματος δίνει χρόνο εξαγωγής από 2 έως 30 λεπτά. Οι μικρές θερμοκρασίες δίνουν καλή ανάλυση, αλλά αυξάνουν τους χρόνους εξαγωγής. Ο χρόνος που χρειάζεται μια ουσία να διατρέξει τη στήλη ελαττώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Γι' αυτό το λόγο συνήθως χρησιμοποιούνται ανεβασμένες θερμοκρασίες που εξασφαλίζουν εξάτμιση ευρύτερου φάσματος ουσιών και μειώνουν το χρόνο της ανάλυσης. Αν ένα δείγμα έχει ευρεία περιοχή βρασμού, τότε είναι χρήσιμο ένα θερμοκρασιακό πρόγραμμα. Η θερμοκρασία της στήλης αυξάνεται (είτε συνεχόμενα, είτε βηματικά), καθώς προχωρά ο διαχωρισμός.

7.2.3 Ανιχνευτές

Στην αέρια χρωματογραφία μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι ανιχνευτών που επιλέγονται ανάλογα με την εφαρμογή. Διαφορετικοί ανιχνευτές δίνουν διαφορετική επιλεκτικότητα. Ένας μη επιλεκτικός ανιχνευτής ανταποκρίνεται σε όλες τις ενώσεις, εκτός από το φέρον αέριο, ενώ ένας επιλεκτικός ανιχνευτής ανταποκρίνεται σε μια ομάδα ενώσεων, με μία κοινή φυσική ή χημική ιδιότητα, τη στιγμή που ένας εξειδικευμένος ανιχνευτής ανταποκρίνεται σε μια συγκεκριμένη χημική ένωση. Οι ανιχνευτές μπορούν εξάλλου να ομαδοποιηθούν σε ανιχνευτές συγκέντρωσης και ανιχνευτές ροής μάζας. Το σήμα ενός ανιχνευτή συγκέντρωσης σχετίζεται με τη συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στον ανιχνευτή και μειώνεται όταν γίνεται αραίωση με βοηθητικό αέριο, ώστε να διατηρείται σταθερή η πίεση. Το δείγμα συνήθως δεν καταστρέφεται στους ανιχνευτές αυτού του είδους. Οι ανιχνευτές μάζας συνήθως καταστρέφουν το δείγμα και το σήμα σχετίζεται με το ρυθμό με τον οποίο τα μόρια της διαλυμένης ουσίας εισέρχονται στον ανιχνευτή. Η απόκριση ενός τέτοιου ανιχνευτή δεν επηρεάζεται από το βοηθητικό αέριο. Στον Πίνακα 7-1 παρουσιάζονται οι πιο γνωστοί ανιχνευτές αέριας χρωματογραφίας.

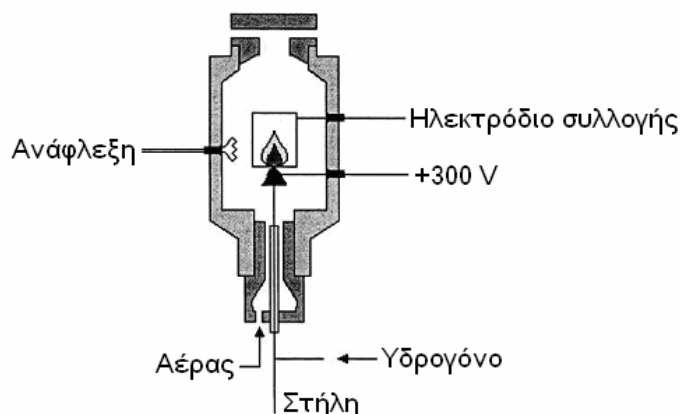
Πίνακας 7-1 : Τύποι ανιχνευτών αέριας χρωματογραφίας

| Ανιχνευτής | Τύπος | Αέρια | Επιλεκτικότητα | Όριο ανίχνευσης |
|-------------------------------------|--------------|----------------------|-------------------------------|-----------------|
| Ιονισμού φλόγας (FID) | Ροής μάζας | Υδρογόνο και αέρας | Οργανικές ουσίες | 0 pg |
| Θερμικής αγωγιμότητας (TCD) | Συγκέντρωσης | Αναφοράς | Γενικής χρήσης | 1 ng |
| Σύλληψης ηλεκτρονίων (ECD) | Συγκέντρωσης | Make-up | Νιτρικά, ανυδρίτες, κυανιούχα | 50 fg |
| Αζώτου - Φωσφόρου (NPD) | Ροής μάζας | Υδρογόνο και αέρας | Άζωτο, φώσφορος | 10 pg |
| Φωτομετρίας φλόγας (FPD) | Ροής μάζας | Υδρογόνο και αέρας | Θείο, φώσφορος βόριο, χρώμιο | 100 pg |
| Φωτοϊονισμού (PID) | Συγκέντρωσης | Make-up | Αλειφατικοί, κετόνες, αμίνες | 2 pg |
| Θαλάμου ηλεκτρολυτικής αγωγιμότητας | Ροής μάζας | Υδρογόνο και οξυγόνο | Άζωτο, νιτροζαμίνες, θείο | |

7.2.3.1 Ανιχνευτής Ιονισμού Φλόγας (F.I.D.)

Η εκροή από τη στήλη αναμιγνύεται με αέρα και υδρογόνο και αναφλέγεται. Όταν καίγονται σε φλόγα οι οργανικές ενώσεις, προκύπτουν ιόντα και ηλεκτρόνια που άγουν τον ηλεκτρισμό μέσω της φλόγας. Στη μια άκρη του θαλάμου καύσης εφαρμόζεται ισχυρό ηλεκτρικό δυναμικό, ενώ πάνω από τη φλόγα τοποθετείται ένα ηλεκτρόδιο συλλογής: Το ρεύμα που προκύπτει από την πυρόλυση των οργανικών ενώσεων μετράται. Οι ανιχνευτές ιονισμού φλόγας έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία στη μάζα από ότι στη συγκέντρωση. Έτσι, προκύπτει το πλεονέκτημα πως αλλαγές στη ροή της κινούμενης φάσης δεν επηρεάζουν την απόκριση του ανιχνευτή. Ο F.I.D., που παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-8, είναι ο ανιχνευτής που χρησιμοποιείται συνήθως για την ανάλυση των οργανικών ενώσεων. Έχει

υψηλή ευαισθησία, μεγάλη περιοχή γραμμικής απόκρισης και χαμηλό θόρυβο. Είναι εύχρηστος και ανθεκτικός, αλλά δυστυχώς καταστρέφει το δείγμα.



Εικόνα 7-8: Ανιχνευτής ιονισμού φλόγας FID
(Πηγή: www.chem.unl.edu)

7.2.3.2 Ανιχνευτής Θερμικής Αγωγιμότητας (T.C.D.)

Ο ανιχνευτής αυτός έχει δύο θαλάμους, στον πρώτο από τους οποίους περνάει καθαρό φέρον αέριο και στο δεύτερο το φέρον αέριο από τη στήλη διαχωρισμού. Η θερμική αγωγιμότητα του αερίου που προέρχεται από τη στήλη μειώνεται κατά τη διάρκεια έκλουσης των ουσιών του δείγματος. Η μείωση της θερμικής αγωγιμότητας αυξάνει τη θερμοκρασία της αντίστασης στον ένα θάλαμο και αυτό με τη σειρά του μειώνει την ένταση του διερχομένου ρεύματος. Λαμβάνεται, έτσι, ένα ηλεκτρικό σήμα που σχετίζεται με την ποσότητα της εκλούμενης ουσίας. Προκειμένου να αυξηθεί η ευαισθησία της μέτρησης με τους ανιχνευτές T.C.D. χρησιμοποιείται ως φέρον αέριο υδρογόνο ή ήλιο, τα οποία έχουν δεκαπλάσια αγωγιμότητα από τις προς ανίχνευση οργανικές ουσίες και πολύ μεγαλύτερη από τα υπόλοιπα εναλλακτικά φέροντα αέρια, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7-2.

Πίνακας 7-2: Θερμική αγωγιμότητα επιλεγμένων αερίων και ευαισθησία TCD ανιχνευτή

| Αέριο | Θερμική αγωγιμότητα | Σχετική ευαισθησία |
|--|---------------------|--------------------|
| Φέρον Αέριο | | |
| Άζωτο (N ₂) | 18 | |
| Υδρογόνο (H ₂) | 128 | |
| Ήλιο (He) | 100 | |
| Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂) | 12.7 | |
| Αργό (Ar) | 12.5 | |

| Αέριο | Θερμική αγωγιμότητα | Σχετική ευαισθησία |
|--------------------------|---------------------|--------------------|
| Τυπικά Αέρια σε Δείγματα | | |
| n-Βουτάνιο | 17.5 | 85 |
| Κυκλοεξάνιο | 10.1 | 114 |
| Βενζόλιο | 9.9 | 100 |
| Χλωροφόρμιο | 6 | 108 |
| Αιθάνιο | 17.5 | 51 |
| Οξικός Αιθυλεστέρας | 9.9 | 111 |

Ο αναλυτής TCD είναι κατάλληλος για πολλές ενώσεις, έχει όμως μικρή ευαισθησία.

7.2.3.3 Ανιχνευτής Δέσμευσης Ηλεκτρονίων (E.C.D.)

Ο ανιχνευτής E.C.D. μετράει τη ροή ρεύματος μεταξύ δύο ηλεκτροδίων που προκαλείται από τον ιονισμό του φέροντος αερίου με ραδιενέργεια. Το φέρον αέριο μπορεί να είναι είτε ήλιο (He), είτε άζωτο (N₂).

7.2.3.4 Ανιχνευτής Φωτοϊονισμού (P.I.D.)

Ο ανιχνευτής P.I.D. μετράει τη ροή ρεύματος μεταξύ δύο ηλεκτροδίων που προκαλείται από τον ιονισμό του αερίου με UV υψηλής ενέργειας. Νεότερα συστήματα λειτουργούν σε θερμοκρασίες μέχρι 300 °C. Χρησιμοποιείται με επιτυχία για τον προσδιορισμό ενός ευρέος φάσματος αλιφατικών και οργανικών ενώσεων και έχει μεγαλύτερη ευαισθησία από τον αναλυτή FID. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα είναι ότι δεν καταστρέφει το δείγμα και έτσι ο ανιχνευτής PID μπορεί να ακολουθείται από άλλο τύπο ανιχνευτή.

7.3 ΜΙΚΡΟΕΚΧΥΛΙΣΗ ΣΤΕΡΕΗΣ ΦΑΣΗΣ (SPME)

Η μικροεκχύλιση στερεής φάσης χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των BTEX και του MTBE σε υδατικά διαλύματα. Γίνεται με χρήση της ίνας Supelco (SPME fiber assembly 100 μm Polydimethylsiloxane coating for manual holder, red).

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι:

- Μεταφορά 4 ml δείγματος στο χρησιμοποιούμενο για την ανάλυση δοχείο.
- Προσθήκη 1gr NaCl, το οποίο έχει προηγουμένως τοποθετηθεί στον φούρνο στους 250 °C.

- Εισαγωγή μαγνητικού αναδευτήρα στο δοχείο.
- Τοποθέτηση της ίνα στο δοχείο, έτσι ώστε κατά τη διαδικασία απορρόφησης η ίνα να μην έρχεται σε επαφή με το διάλυμα
- Τοποθέτηση του συστήματος ίνα-δοχείο στο λουτρό θερμοστάτησης.
- Εξαγωγή της ίνας, ώστε να αρχίσει η απορρόφηση η οποία διαρκεί 10 min.
- Τοποθέτηση της ίνας στο GC για το στάδιο της εκρόφησης και ανάλυσης
- Η διαδικασία της εκρόφησης διαρκεί 5 min, κατόπιν η ίνα αφαιρείται από τον εισαγωγέα του GC.



Εικόνα 7-9: Ίνα, δοχείο ανάλυσης, μαγνητικός αναδευτήρας

Η ανάλυση πραγματοποιείται σε αέριο χρωματογράφο (Perkin Elmer 8700) με ανιχνευτή ιονισμού φλόγας (FID), ο οποίος συνδέεται με υπολογιστή όπου γίνεται χρήση του λογισμικού Millenium για την λήψη των χρωματογραφημάτων. Η στήλη που χρησιμοποιείται είναι η CP-SIL 5 CB-MS (30 x 0,32 x 0,25).

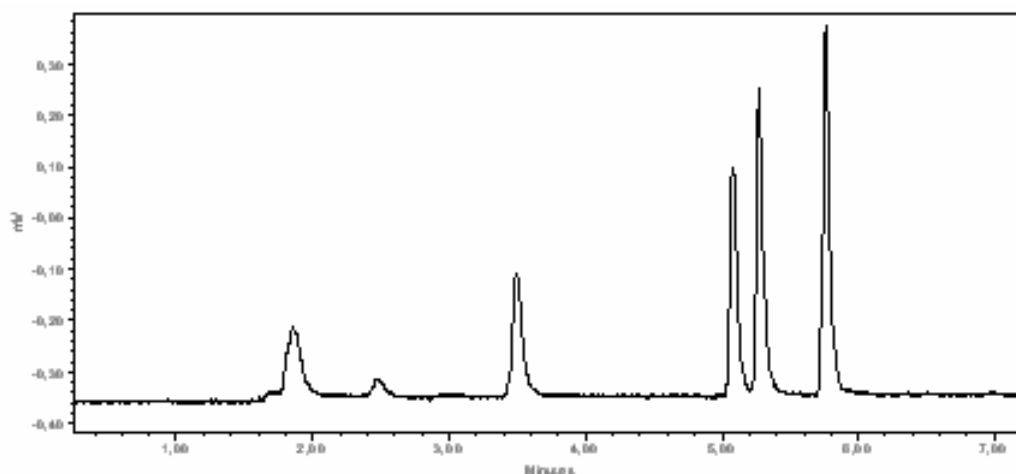


Εικόνα 7-10: Αέριος Χρωματογράφος Perkin Elmer 8700

Οι συνθήκες ανάλυσης είναι (μέθοδος 0 BTEX_H2O):

- Θερμοκρασία εισαγωγέα: 250 °C
- Θερμοκρασία ανιχνευτή: 300 °C
- Αρχική θερμοκρασία: 35 °C
- Ρυθμός ανόδου: 5 °C/min
- Τελική θερμοκρασία: 300 °C
- Χρόνος παραμονής: 10 min
- Πίεση (carrier 2): 8 psi
- Αρχικά splitless και split στα 8 min (1/20)

Ένα τυπικό χρωματογράφημα με τις ανωτέρω συνθήκες είναι το ακόλουθο:

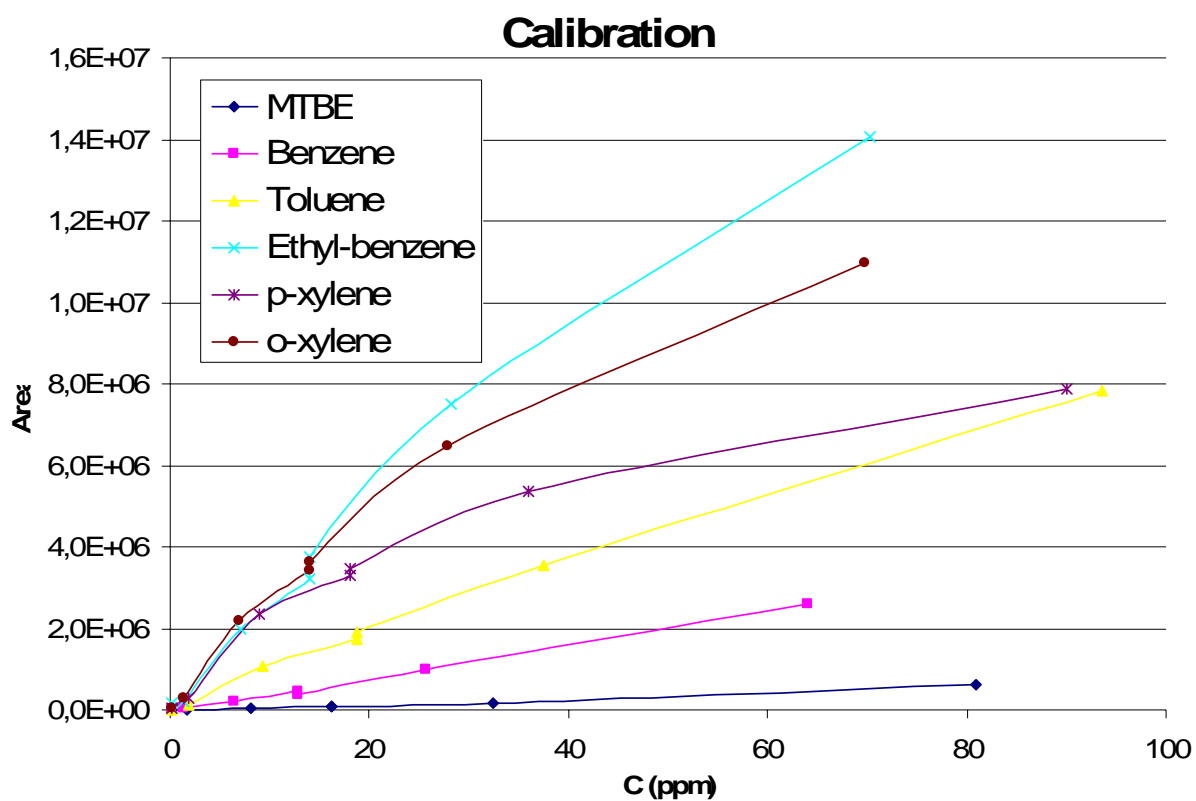


Εικόνα 7-11: Χρωματογράφημα των MTBE-BTEX με τη μέθοδο SPME

Οι αποκρίσεις των συστατικών είναι:

- MTBE, στα 1,9 min
- Βενζόλιο, στα 2,5 min
- Τολουόλιο, στα 3,5 min
- Αιθυλ-βενζόλιο, στα 5,1 min
- p-ξυλόλιο, στα 5,3 min
- o-ξυλόλιο, στα 5,8 min

Σύμφωνα με την παραπάνω μέθοδο, παρασκευάστηκαν και αναλύθηκαν πρότυπα διαλύματα γνωστής συγκέντρωσης για την κατασκευή καμπύλων βαθμονόμησης, οι οποίες παρατίθενται στη συνέχεια.



Εικόνα 7-12: Διάγραμμα βαθμονόμησης για το BTEX και το MTBE

*ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ**Κεφάλαιο 8***8.1 ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ**

Ο σκοπός της σειράς των πειραμάτων είναι η εξακρίβωση και ο προσδιορισμός του δυναμικού των αντιδρώντων υλικών (κομπόστ και διατομίτης) στην εξυγίανση του υπογείου νερού από πετρελαϊκούς ρύπους. Έτσι, η κεντρική δεξαμενή παίζει το ρόλο του προς εξυγίανση πεδίου, ενώ η ροή του υπογείου νερού προσομοιάζεται χάρη στη χρήση της περισταλτικής αντλίας και των δεξαμενών τροφοδοσίας.

Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, προέκυψαν διάφορες δυσκολίες προσομοίωσης, των οποίων η λύση δόθηκε βάσει ενδεδειγμένης μελέτης των φαινομένων και αναζήτησης στη σχετική βιβλιογραφία. Το σημαντικότερο των προβλημάτων ήταν η πτητικότητα του ρύπου σε συνδυασμό με το φαινόμενο head-space, το οποίο περιγράφεται στη συνέχεια.

8.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HEAD-SPACE

Αναλυτικότερα, εξ' αιτίας της πτητικότητας, το ρυπασμένο νερό θα έπρεπε να τοποθετηθεί σε κλειστό δοχείο, ώστε να μη διαφεύγει ο ρύπος στην ατμόσφαιρα. Ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση, δημιουργείται head-space, φαινόμενο κατά το οποίο, καθώς η στάθμη του νερού υποχωρεί, το κενό μεταξύ αυτής και του πώματος συλλέγει το ρύπο σε αέρια μορφή, με αποτέλεσμα το νερό να μην έχει την επιθυμητή σύσταση. Σχηματικά, το φαινόμενο του head-space περιγράφεται στις παρακάτω εικόνες.

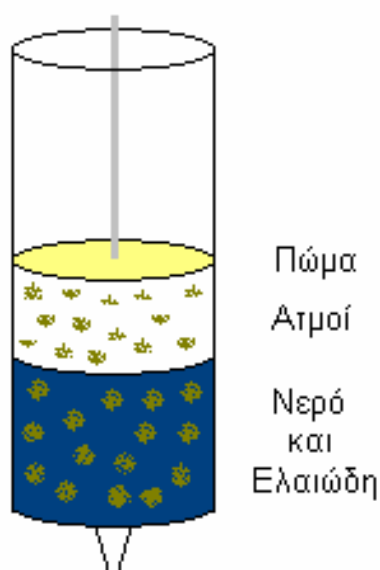
Σε κυλινδρική δεξαμενή, η οποία διαθέτει σταθερό πώμα, τοποθετούνται συγκεκριμένες ποσότητες νερού και ελαιωδών (BTX και MTBE), τα οποία αλληλεπιδρούν με το νερό, δημιουργώντας διάλυμα με την επιθυμητή συγκέντρωση. Όσο το στρώμα αυτό έρχεται σε επαφή με το πώμα, δεν υπάρχει αλληλεπίδραση του διαλύματος με τον ατμοσφαιρικό αέρα. (Εικόνα 8-1).



Σχήμα 8-1: Αλληλεπίδραση ελαιωδών μόνο με το νερό

Αντλώντας το περιεχόμενο της δεξαμενής, το πώμα διατηρείται στη θέση του, ενώ η στάθμη του διαλύματος νερού και ελαιωδών υποχωρεί, δημιουργώντας έναν κενό χώρο μεταξύ του διαλύματος και του πώματος.

Λόγω της υψηλής πτητικότητας των ελαιωδών, το κενό αυτό γεμίζει με ατμούς BTEX και MTBE, δημιουργώντας το φαινόμενο head-space (Εικόνα 8-2), μειώνοντας έτσι τη συγκέντρωση του διαλύματος, αφού πλέον υπάρχει μικρότερη ποσότητα ρύπου για να αντιδράσει με το νερό.



Εικόνα 8-2: Φαινόμενο head-space

Ο τρόπος για να αποφευχθεί το φαινόμενο του head-space είναι η διαρκής μετακίνηση του πώματος παράλληλα με την πτώση της στάθμης καθόλη τη διάρκεια του πειράματος, καθώς επίσης και η προσθήκη ικανής ποσότητας μεθανόλης (0.5% v/v), ώστε οι ρύποι να διαλύονται σε μεγαλύτερο βαθμό και να μην εξατμίζονται.

8.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΡΥΠΟΥ

Βάσει χημικών αναλύσεων δειγμάτων νερού από τον υπόγειο υδροφορέα του πεδίου, οι συγκεντρώσεις των συστατικών του ρύπου ήταν οι ακόλουθοι:

Πίνακας 8-1: Συγκεντρώσεις των συστατικών του BTEX και του MTBE στο ρύπο

| | Βενζόλιο | Τολουόλιο | Αιθυλο- βενζόλιο | ο - Ξυλένιο | π - Ξυλένιο | MTBE |
|-----------------------|----------|-----------|---------------------|----------------|----------------|--------|
| Συγκέντρωση (mg/l) | 35-45 | 20-40 | 15 | 10-20 | 10-20 | 80-100 |

Στη συνέχεια παρατίθενται οι υπολογισμοί της απαιτούμενης ποσότητας του κάθε συστατικού του ρύπου σε δεξαμενή όγκου 1 λίτρου, για την παρασκευή του τελικού διαλύματος σε μονάδες όγκου και όχι μάζας, αφού όλα τα συστατικά είναι σε υγρή μορφή.

Γενικότερα, η συγκέντρωση του κάθε συστατικού γίνεται με όγκο αναφοράς αυτόν της δεξαμενής, οπότε θα υπολογιστεί ο επιμέρους όγκος κάθε συστατικού σε διάλυμα συνολικού όγκου 4 και 12 λίτρων, αφού αυτή είναι και η χωρητικότητα των διαθέσιμων δεξαμενών.

Έστω: C η επιθυμητή συγκέντρωση του εκάστοτε συστατικού στο τελικό διάλυμα,

M_r το μοριακό βάρος του συστατικού,

M η συγκέντρωση του συστατικού σε καθαρή μορφή (molarity),

V ο όγκος της δεξαμενής και

V_p ο απαιτούμενος όγκος του εκάστοτε συστατικού για να επιτευχθεί η συγκέντρωση C.

Ο όγκος αυτός υπολογίζεται βάσει της παρακάτω εξίσωσης:

$$V_p = \frac{C \cdot V}{M_r \cdot M} = \frac{\frac{mg}{L} \cdot L}{\frac{g}{mol} \cdot \frac{mol}{L}} = \frac{mg \cdot L}{1000mg} = mL \quad (\text{Εξίσωση 8-1})$$

Όπως φαίνεται και από το ανάπτυγμα της εξίσωσης 8-1, εξ' αιτίας της απλοποίησης των μονάδων, ο απαιτούμενος όγκος υπολογίζεται σε mL.

Πιο συγκεκριμένα, για κάθε συστατικό του ρύπου και για τα δύο μεγέθη δεξαμενών, ο αντίστοιχος απαιτούμενος όγκος υπολογίζεται σύμφωνα με τον Πίνακα 8-2.

Πίνακας 8-2: Όγκος των συστατικών του BTEX και του MTBE στο ρύπο

| | Βενζόλιο | Τολουόλιο | Αιθυλο-βενζόλιο | ο - Ξυλένιο | π - Ξυλένιο | MTBE |
|---------------------------------|----------|-----------|-----------------|-------------|-------------|-------|
| Απαιτούμενος όγκος για 12L (mL) | 1.367 | 1.389 | 1.384 | 1.364 | 1.394 | 1.644 |
| Απαιτούμενος όγκος για 4L (mL) | 0.456 | 0.463 | 0.461 | 0.454 | 0.464 | 0.548 |

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί, πως στο τελικό διάλυμα προστίθεται μεθανόλη με σκοπό την καλύτερη διάλυση των συστατικών του ρύπου στο τελικό διάλυμα, αφού όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, τα συστατικά του ρύπου είναι δυσδιάλυτα στο νερό. Η αναλογία των συγκεντρώσεων v/v είναι της τάξης του 0.5%, δηλαδή στη δεξαμενή των 12 λίτρων προστίθενται 24 mL μεθανόλης, ενώ στην δεξαμενή των 4 λίτρων τοποθετούνται αντίστοιχα 8 mL.

8.4 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΡΥΠΟΥ, ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ

8.4.1 Προετοιμασία ρύπου και τροφοδοσίας

Αφού παρασκευαστεί ο ρύπος για την κάθε δεξαμενή, ακολουθεί η παρασκευή του τελικού διαλύματος. Έτσι, γεμίζεται η δεξαμενή των 12 λίτρων με 10 λίτρα καθαρού νερού, στο οποίο στη συνέχεια προστίθεται νιτρική αμμωνία και ο οξινομετρικός δείκτης methyl red, ώστε το διάλυμα να αποκτήσει χαρακτηριστικό πορτοκαλο-κόκκινο χρώμα.

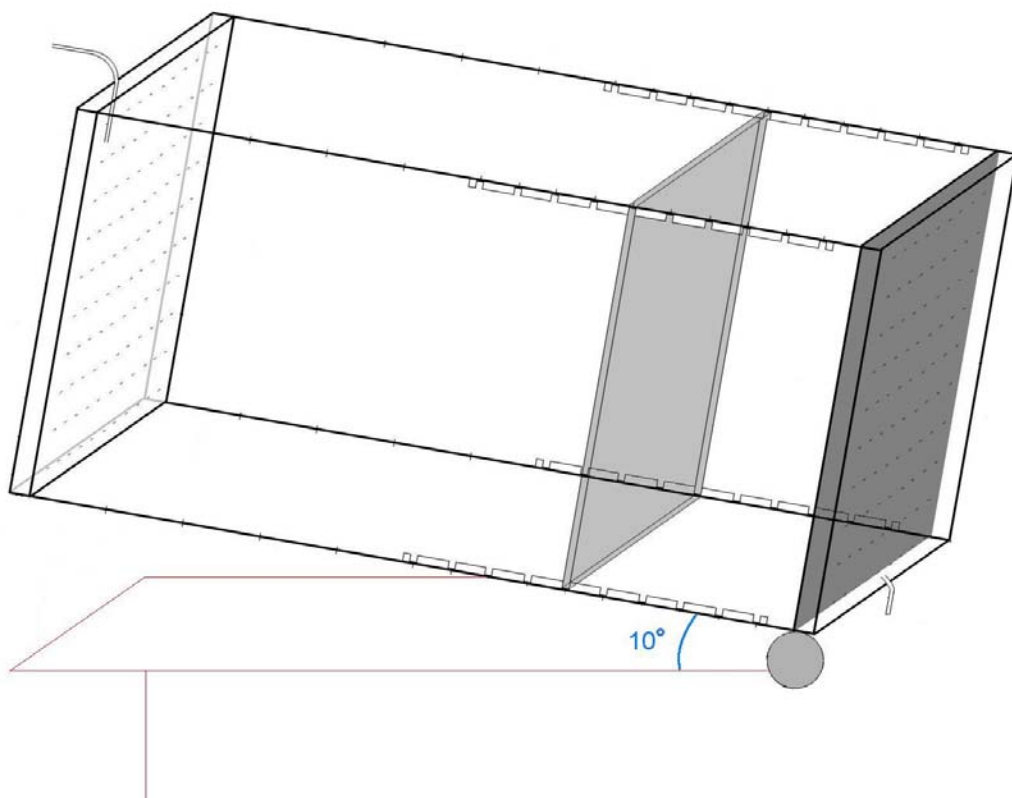
Το περιεχόμενο της ογκομετρικής φιάλης του 1 λίτρου, στην οποία παρασκευάσθηκε ο ρύπος προστίθεται στη δεξαμενή, ενώ στην ίδια φιάλη τοποθετείται άλλο ένα λίτρο νερό, το οποίο την ξεπλένει και αδειάζεται στη δεξαμενή τροφοδοσίας, το περιεχόμενο της οποίας έχει όγκο 12 λίτρα. Αντίστοιχα προετοιμάζεται και η δεξαμενή των 4 λίτρων.

Αφού δημιουργηθεί το τελικό διάλυμα, προσαρμόζονται στη δεξαμενή, καθώς και στις μονάδες εισαγωγής και εξαγωγής τα καπάκια από φελιζόλ, τα οποία αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Με την εκκίνηση της λειτουργίας της αντλίας, ξεκινά και η μεταφορά του ρυπασμένου νερού από τη δεξαμενή τροφοδοσίας προς την κεντρική. Καθώς το νερό λιγοστεύει στην τροφοδοσία, η στάθμη του υποχωρεί, συμπαρασύροντας και το υπερκείμενο στρώμα ελαιωδών.

8.4.2 Προσαρμογή πιλοτικής δεξαμενής

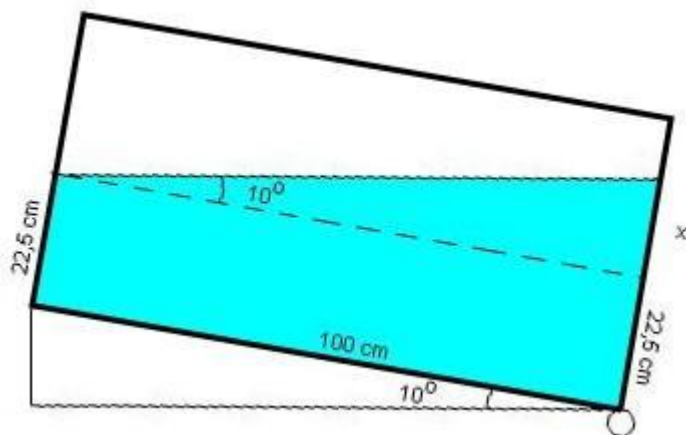
Τοποθετείται ποσότητα χαλικιών και άμμου της τάξης των 40 λίτρων στην κεντρική δεξαμενή, η οποία με τη βοήθεια του γρύλου, αποκτά κλίση 10° (Εικόνα 8-3). Η κλίση αυτή επιλέχθηκε κατόπιν θεωρητικών δοκιμών σε διάφορες κλίσεις, οι οποίες εμφανίζονται στο προς μοντελοποίηση πεδίο, αφού πέραν της υπολογιστικής διευκόλυνσης που παρέχει, είναι και η συνηθέστερη που συναντάται στο συγκεκριμένο πεδίο. Στην επιφάνεια του εδάφους τοποθετούνται χαλίκια, με σκοπό να εμποδιστούν οι ιδιαίτερα πτητικοί ρύποι από το να διαφύγουν στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 8-3: Η πιλοτική δεξαμενή υπό κλίση 10°

Η εισαγωγή του νερού μπορεί να γίνει από οποιοδήποτε σημείο, όμως πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν, πως η έξοδός του από το κυρίως τμήμα προς τη μονάδα εξόδου θα γίνει από τις οπές, οι οποίες δε βρίσκονται στο ίδιο ύψος, αλλά πιο ψηλά, λόγω της κλίσης της δεξαμενής.

Για το λόγο αυτό, η επιλογή του σημείου εισόδου θα πρέπει να γίνει σε κάποιο χαμηλό σημείο, οπότε επιλέγεται το ύψος των 22,5 εκατοστών, το οποίο βρίσκεται περίπου στη μέση. Διατηρώντας την κλίση στις 10° , η κίνηση του νερού μέσα στη δεξαμενή φαίνεται στην Εικόνα 8-4.



Εικόνα 8-4: Κλίση δεξαμενής 10° και συμπεριφορά νερού

Η υπερύψωση του σημείου εξόδου σε σχέση με αυτό της εισόδου συμβολίζεται με x και ισούται με το γινόμενο της εφαπτομένης των 10° επί το μήκος της δεξαμενής (100 εκατοστά).

Το σημείο αποφόρτισης του κυρίως τμήματος θα γίνει σε απόσταση από τη βάση της μονάδας εξόδου:

$$(22,5 + \tan 10^\circ \cdot 100) \text{ cm} = (22,5 + 17,6) \text{ cm} = 40,1 \text{ cm}.$$

Σε περίπτωση που το νερό εισαχθεί από τις οπές στο ύψος των 42,5 εκατοστών και στη δεξαμενή δοθεί κλίση της τάξης των 10° , η απορροή θα γίνει σε απόσταση από τη βάση της μονάδας εξόδου:

$$(42,5 + \tan 10^\circ \cdot 100) \text{ cm} = (42,5 + 17,6) \text{ cm} = 60,1 \text{ cm} > 50 \text{ cm}.$$

Γνωρίζοντας, πως το ύψος της δεξαμενής είναι 50 εκατοστά, απορρίπτεται ο συγκεκριμένος συνδυασμός ύψους εισόδου και κλίσης, αφού η έξοδος του νερού θα γίνει εκτός των ορίων της μονάδας εξόδου.

8.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

8.5.1 Τυφλό

Η προσροφητική ικανότητα του εδάφους σε συνδυασμό με την υψηλή πτητικότητα των ρύπων, καθιστούν αναγκαία τη διεξαγωγή «τυφλού» πειράματος, βάσει του οποίου θα υπολογιστεί το δυναμικό του εδάφους αυτού στην κατακράτηση του ρύπου. Έτσι, τοποθετείται στη δεξαμενή μόνο άμμος και χαλίκια και αφήνεται να περάσει το ρυπασμένο νερό. Κατά τη διεξαγωγή του συγκεκριμένου πειράματος είναι δυνατός ο υπολογισμός διαφόρων ιδιοτήτων του χώματος, όπως το πορώδες και η υδραυλική του διαπερατότητα.

Το ισοζύγιο της ποσότητας του ρύπου στο συγκεκριμένο πείραμα είναι το εξής:

$$M_{in} = M_{out} + M_{αντιδρών} \quad (\text{Εξίσωση 8-2})$$

Όπου:

M_{in} η ποσότητα του εισερχόμενου ρύπου ($M_{in} = C_{in} \cdot V$)

M_{out} η ποσότητα του εξερχόμενου ρύπου ($M_{out} = C_{out} \cdot V$)

$M_{αντιδρών}$ η ποσότητα του ρύπου που δεν κατέληξε στην εκροή ($M_{αντιδρών} = C_{αντιδρών} \cdot V$)

Η ερμηνεία του ισοζυγίου αυτού διαφοροποιείται στην περίπτωση της διεξαγωγής «τυφλού» πειράματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο όρος $M_{αντιδρών}$ αντιστοιχεί στην ποσότητα που προσροφάται από το έδαφος, χωρίς την παρουσία αντιδρώντος υλικού, καθώς επίσης και στην ποσότητα του ρύπου, η οποία εξατμίζεται λόγω της υψηλής πτητικότητάς του.

Έτσι, για να τηρηθεί το ισοζύγιο του ρύπου στο «τυφλό», θα πρέπει η αρχική ποσότητα αυτού να ισούται με το άθροισμα της τελικής συν τις όποιες απώλειες.

$$M_{in} = M_{out} + M_{απωλειών}$$

Όπου:

$M_{απωλειών}$ η ποσότητα των απωλειών ($M_{απωλειών} = C_{απωλειών} \cdot V$)

Η μάζα των απωλειών ισούται με τη διαφορά της ποσότητας του εισερχόμενου ρύπου μείον αυτή του εξερχόμενου. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην ποσότητα του ρύπου που προσροφήθηκε, καθώς και στην αντίστοιχη ποσότητα που εξατμίστηκε. Η ποσότητα αυτή θα ληφθεί υπ' όψιν στη συνέχεια, αφού θα πρέπει να αφαιρείται από τη $M_{\text{αντιδρών}}$ στις υπόλοιπες περιπτώσεις, διότι οι απώλειες αυτές είναι γενικές, δηλαδή παρουσιάζονται ανεξάρτητα από την ποσότητα αντιδρώντος υλικού στη δεξαμενή και δεν υπάρχει άλλος τρόπος να υπολογιστούν.

Αφού ο όγκος αναφοράς V είναι ο ίδιος σε κάθε πείραμα ($V=40$ L), ο όρος αυτός μπορεί να απλοποιηθεί και η μάζα στο ισοζύγιο να αντικατασταθεί από τη συγκέντρωση, οπότε:

$$C_{\text{in}} = C_{\text{out}} + C_{\text{αντιδρών}}$$

Όπου:

C_{in} η συγκέντρωση του εισερχόμενου ρύπου

C_{out} η συγκέντρωση του εξερχόμενου ρύπου

$C_{\text{αντιδρών}}$ η συγκέντρωση του ρύπου που δεν κατέληξε στην εκροή

8.5.2 Τοποθέτηση κομπόστ ως αντιδρών υλικό

Αφού γίνουν οι όποιοι υπολογισμοί σε 100% έδαφος, η δεξαμενή αδειάζει και προτού επαναπληρωθεί με χώμα, τοποθετείται η πλάκα διαχωρισμού των φάσεων. Το πάχος του στρώματος του πληρωτικού υλικού καθορίζει και το σημείο στο οποίο θα τοποθετηθεί η πλάκα.

Στο πείραμα με το κομπόστ, η πλάκα τοποθετήθηκε στο πρώτο ζεύγος «δοντιών», οπότε το πάχος του φράγματος ήταν 45 cm. Τα τελευταία 5 εκατοστά, όπως προαναφέρθηκε, πληρώθηκαν με χαλίκια.

Ακολουθώντας τη διαδικασία του πειράματος, ο ρύπος εισάγεται στην κεντρική δεξαμενή. Όπως και στο τυφλό, η αρχική συγκέντρωση C_{in} , παραμένει η ίδια, ενώ στη συνέχεια καταγράφεται η συγκέντρωση στην εκροή (C_{out}) και τελικά υπολογίζεται η $C_{\text{αντιδρών}}$, η οποία ισούται με τη συνολική ποσότητα του ρύπου, που δεν κατέληξε στην εκροή. Αν από τη συγκέντρωση αυτή αφαιρεθεί η $C_{\text{απωλειών}}$ από το «τυφλό», τότε προκύπτει η συγκέντρωση του ρύπου που κατακρατήθηκε αποκλειστικά από το κομπόστ.

8.5.3 Τοποθέτηση διατομίτη ως αντιδρών υλικό

Λόγω της μεγάλης προσροφητικής ικανότητας του διατομίτη, αλλά και του γεγονότος πως η εξεύρεση μεγάλων ποσοτήτων του συγκεκριμένου ορυκτού είναι αρκετά δύσκολη, στο συγκεκριμένο πείραμα το πάχος του φράγματος ήταν μόλις 10 εκατοστά. Ο διατομίτης παρελήφθη στη φυσική του μορφή και στη συνέχεια αλέστηκε, ώστε να αποκτήσει δομή αντίστοιχη του εδάφους. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στο πείραμα με το κομπόστ, χρησιμοποιήθηκε και σε αυτήν την περίπτωση.

8.5.4 Δειγματοληψία

Ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνεται το δείγμα από την έξοδο είναι πολύ σημαντικός και καθόλη τη διεξαγωγή του πειράματος τηρούνταν ακριβώς η ίδια μέθοδος, ώστε τυχόν σφάλματα να απαλείφονται. Έτσι, αφού το σύστημα έχει ισορροπήσει, τη στιγμή της δειγματοληψίας λαμβάνεται όλο το περιεχόμενο της μονάδας εξόδου. Στη συνέχεια, το συλλεχθέν δείγμα ομογενοποιείται και τοποθετείται σε σκούρα φιάλη όγκου 40 mL, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις, για να ελεγχθεί η ακρίβεια των αναλύσεων, έγινε αραίωση του δείγματος με καθαρό νερό.

ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ / ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κεφάλαιο 9

9.1 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

Το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν η θαλασσινή άμμος, ενώ στην επιφάνεια του εδάφους, αλλά και πριν την εξαγωγή τοποθετήθηκαν χαλίκια. Οι κοκκομετρικές αναλύσεις κάθε υλικού έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Ανάλυσης Ρευστών και Πυρήνων Υπογείων Ταμιευτήρων του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Οι υδραυλικές αγωγιμότητες του κάθε υλικού υπολογίσθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.

9.1.1 Αποτελέσματα κοκκομετρικών αναλύσεων

- Άμμος

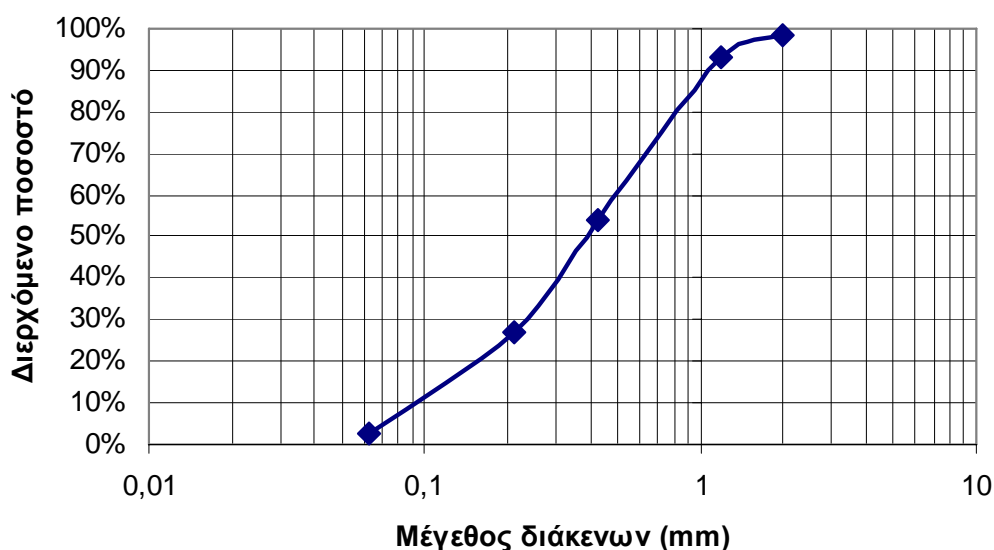
Η συνολική προς ανάλυση ποσότητα ήταν 480.8 γραμμάρια, ενώ τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διάκενα μεγέθους 2, 1.18, 0.425, 0.212 και 0.063 mm.

Αφού μετρηθεί η ποσότητα που απέμεινε μετά την κοσκίνιση, υπολογίζεται το διερχόμενο ποσοστό, το οποίο ισούται με το λόγο της διαφοράς της συνολικής προς ανάλυση ποσότητας μείον το άθροισμα των μαζών του δείγματος που έχουν περάσει από το κόσκινο δια την αρχική ποσότητα.

Στον Πίνακα 9-1 και στο Διάγραμμα 9-1, που προκύπτει, φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Πίνακας 9-1: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης στην άμμο

| Μέγεθος διάκενων (mm) | Παραμένουσα ποσότητα (g) | Διερχόμενο ποσοστό |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 2.000 | 8.9 | 98.1% |
| 1.180 | 23.9 | 93.2% |
| 0.425 | 187.5 | 54.2% |
| 0.212 | 130.7 | 27.0% |
| 0.063 | 117.6 | 2.5% |
| υπόλοιπο | 12.2 | - |



Διάγραμμα 9-1: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης στην άμμο

Για τον έλεγχο της ομοιομορφίας και της διαβάθμισης του εδάφους, υπολογίζεται από το διάγραμμα η ενεργή διάμετρος, το μέγεθος, δηλαδή, των διάκενων από τα οποία διέρχεται το 10% ($d_{10} = 0.09\text{mm}$), καθώς και το 60% του δείγματος ($d_{60} = 0.5\text{mm}$). Έτσι, υπολογίζεται ο συντελεστής ομοιομορφίας C_u , ο οποίος ισούται με το λόγο d_{60} / d_{10} . Αν ο λόγος αυτός είναι μικρότερος από 5, τότε το έδαφος θεωρείται ομοιόμορφο.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0.48}{0.10} = 4.8 < 5, \text{ οπότε το έδαφος θεωρείται καλά διαβαθμισμένο.}$$

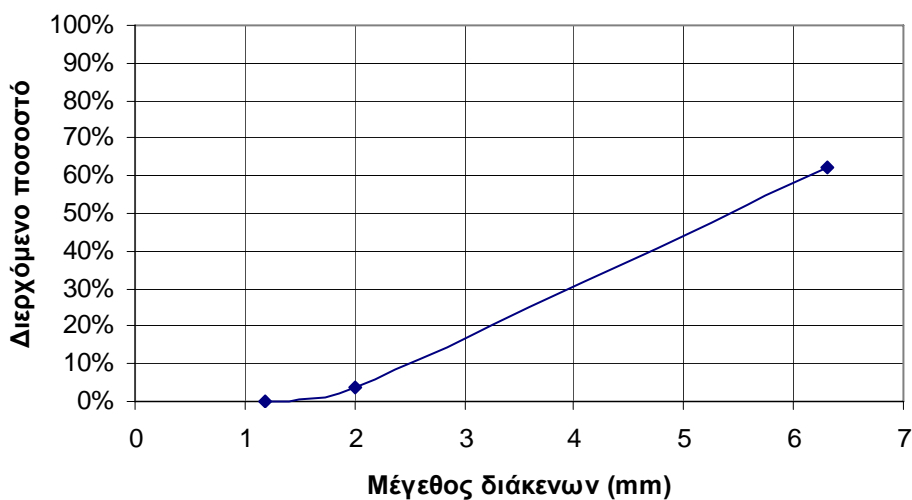
- Χαλίκια

Η συνολική προς ανάλυση ποσότητα ήταν 967.7 γραμμάρια, ενώ τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διάκενα μεγέθους 6.3, 2 και 1.18 mm.

Στον Πίνακα 9-2 και στο Διάγραμμα 9-2, που προκύπτει, φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Πίνακας 9-2: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης στα χαλίκια

| Μέγεθος διάκενων (mm) | Παραμένουσα ποσότητα (g) | Διερχόμενο ποσοστό |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 6.30 | 366.7 | 62.1% |
| 2.00 | 566.7 | 3.5% |
| 1.18 | 34.3 | 0 |



Διάγραμμα 9-2: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης στα χαλίκια

Στη συγκεκριμένη περίπτωση:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{6.3}{2.3} = 2.74 < 5, \text{ οπότε το έδαφος θεωρείται καλά διαβαθμισμένο.}$$

9.1.2 Αποτελέσματα αναλύσεων υδροπερατότητας

- Άμμος

Η μέθοδος, που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της υδροπερατότητας της άμμου, ήταν αυτή του μεταβλητού φορτίου, αφού η αναμενόμενη τιμή της είναι μικρότερη από 10^{-4} m/s. Ο υπολογισμός της υδραυλικής κλίσης γίνεται με τη βοήθεια τριών μανομετρικών σωλήνων, οι οποίοι μετρούν το υδραυλικό φορτίο, καθώς επίσης τροφοδοτούν τη συσκευή με νερό.

Οι σταθερές παράμετροι κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν οι εξής:

Εμβαδόν διατομής μανομετρικού σωλήνα, **a: 0.0724 cm²**

Μήκος κυψέλης, **L: 13.075 cm**

Εσωτερική διάμετρος κυψέλης, **δ_κ: 9.96 cm**

Ύψος «σημείου 1» από υπερχειλίση δεξαμενής βύθισης, **h₁: 118 cm**

Ύψος «σημείου 2» από υπερχειλίση δεξαμενής βύθισης, **h₂: 38 cm**

Ύψος «σημείου 3» από υπερχειλίση δεξαμενής βύθισης, **h₃: 66.963 cm**

Σύμφωνα με τον ορισμό της στιγμιαίας υδραυλικής κλίσης,

$$i = \frac{y - h_o}{L}, \text{ όπου } h_o \text{ το ύψος υπερχειλίσης (mm) και}$$

L η απόσταση των δύο υποδοχών στην κυψέλη (mm).

Ο όγκος του νερού, που διαρρέει μέσω του δείγματος σε χρόνο dt ισούται με:

$$dV = -a \cdot dy$$

Αντικαθιστώντας στο Νόμο Darcy ($dV = A \cdot k \cdot i \cdot dt$) τα παραπάνω, προκύπτει:

$$\begin{aligned} -a \cdot dy &= A \cdot k \cdot \frac{y - h_o}{L} \cdot dt \Rightarrow \\ \Rightarrow -\frac{1}{y - h_o} \cdot dy &= \frac{A \cdot k}{a \cdot L} \cdot dt \Rightarrow \\ \Rightarrow \int_{y_a}^{y_b} \frac{1}{y - h_o} \cdot dy &= \int_{t_a}^{t_b} \frac{A \cdot k}{a \cdot L} \cdot dt \Rightarrow \\ \Rightarrow \ln \frac{y_a - h_o}{y_b - h_o} &= \frac{A \cdot k}{a \cdot L} \cdot (t_b - t_a) \end{aligned}$$

Τελικά, η υδροπερατότητα υπολογίζεται βάσει του τύπου:

$$k = 0.02304 \cdot \frac{a \cdot L}{A \cdot (t_b - t_a)} \cdot \lg \frac{y_a - h_o}{y_b - h_o} \text{ (m/s)}$$

Κατά τη συγκεκριμένη ανάλυση έγιναν τρεις μετρήσεις, τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 9-3.

Πίνακας 9-3: Αποτελέσματα αναλύσεων υδραυλικής αγωγιμότητας για την άμμο

| | Απόσταση | Χρόνος (sec) | Κ _Τ (m/s) | Μέση τιμή |
|------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| | h ₁₂ | 49 | 2.81 x 10 ⁻⁶ | 2.51 x 10 ⁻⁶ |
| 1 ^η μέτρηση | h ₁₃ | 21 | 3.28 x 10 ⁻⁶ | |
| | h ₃₂ | 28 | 2.46 x 10 ⁻⁶ | |
| | h ₁₂ | 22 | 6.26 x 10 ⁻⁶ | 5.51 x 10 ⁻⁶ |
| 2 ^η μέτρηση | h ₁₃ | 11 | 6.26 x 10 ⁻⁶ | |
| | h ₃₂ | 11 | 6.26 x 10 ⁻⁶ | |
| | h ₁₂ | 7 | 1.97 x 10 ⁻⁵ | 1.76 x 10 ⁻⁵ |
| 3 ^η μέτρηση | h ₁₃ | 3 | 2.30 x 10 ⁻⁵ | |
| | h ₃₂ | 4 | 1.72 x 10 ⁻⁵ | |

Στη συνέχεια, βάσει των δεδομένων προκύπτει ο συντελεστής υδροπερατότητας K για την άμμο.

$$K = 8.53 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

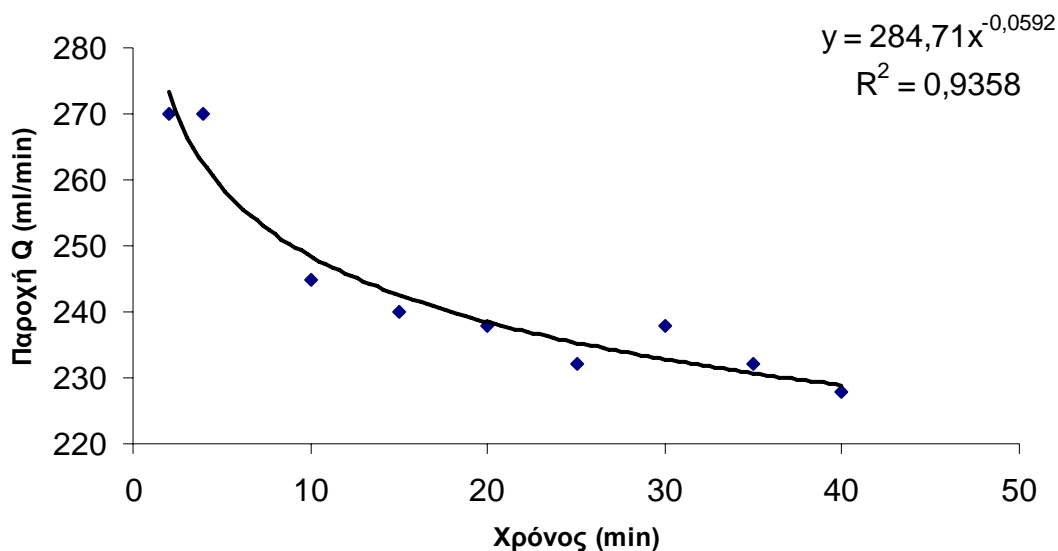
- Χαλίκια

Λόγω της διαφορετικής φύσης των χαλικιών σε σύγκριση με την άμμο, η ανάλυση έγινε σε διαφορετική διάταξη, βάσει της μεθόδου του σταθερού φορτίου. Έτσι, η ανάλυση των χαλικιών διήρκεσε 40 λεπτά, κατά τη διάρκεια των οποίων υπολογίζονταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα οι εκρεόμενοι από τη συσκευή όγκοι νερού. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-4.

Πίνακας 9-4: Αποτελέσματα ανάλυσης υδραυλικής αγωγιμότητας στα χαλίκια

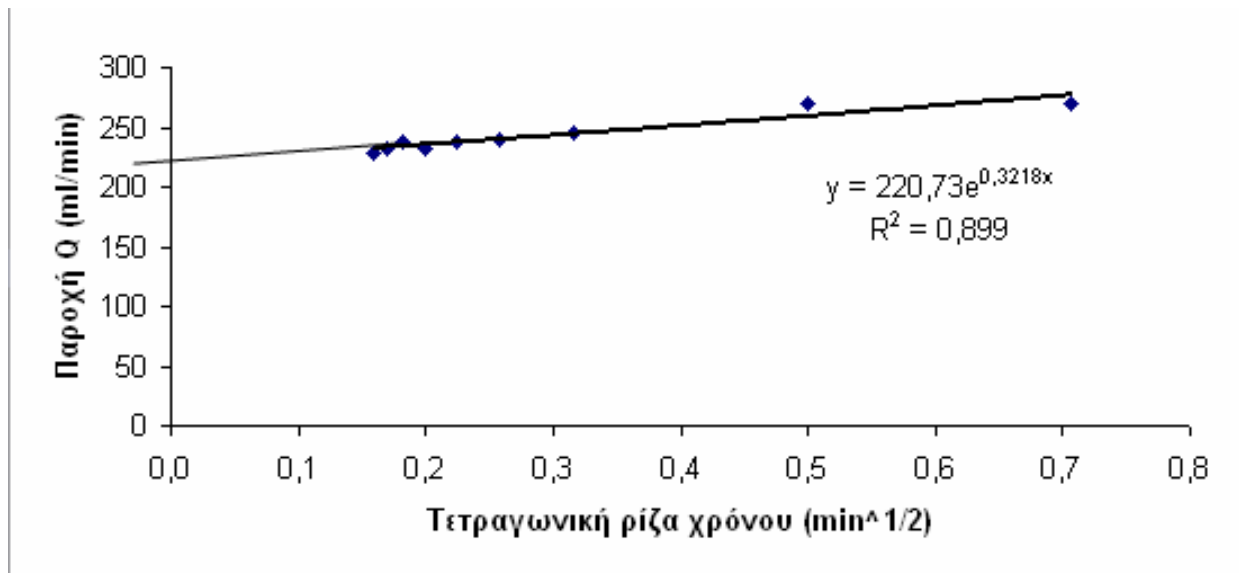
| Χρόνος t (min) | Δt (min) | Όγκος V (ml) | ΔV (ml) | Παροχή Q (ml/min) |
|-------------------|-------------|-----------------|------------|----------------------|
| 2 | 2 | 540 | 540 | 270 |
| 4 | 2 | 1 080 | 540 | 270 |
| 6 | 2 | 1 530 | 450 | 225 |
| 8 | 2 | 2 000 | 470 | 235 |
| 10 | 2 | 2 490 | 490 | 245 |
| 15 | 5 | 3 690 | 1 200 | 240 |
| 20 | 5 | 4 880 | 1 190 | 238 |
| 25 | 5 | 6 040 | 1 160 | 232 |
| 30 | 5 | 7 230 | 1 190 | 238 |
| 35 | 5 | 8 390 | 1 160 | 232 |
| 40 | 5 | 9 530 | 1 140 | 228 |

Οι τιμές της παροχής για τους χρόνους 6 και 8 λεπτών απορρίπτονται, αφού είναι προφανές πως κατά τη μέτρηση υπήρξε σφάλμα.



Διάγραμμα 9-3: Αποτελέσματα ανάλυσης υδραυλικής αγωγιμότητας στα χαλίκια

Αν στο Διάγραμμα 5-3 αντικατασταθεί ο άξονας x με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου, τότε προκύπτει το Διάγραμμα 5-4.



Διάγραμμα 9-4: Σύγκριση παροχής με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου

Προεκτείνοντας τη γραμμή, αυτή τέμνει τον άξονα y στο σημείο $Q_0 = 220.73 \text{ ml/min}$.

Τελικά, η υδροπερατότητα υπολογίζεται βάσει του τύπου:

$$k = \frac{Q}{6000 \cdot A \cdot i}$$

Έτσι, προκύπτει, πως ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας K για τα χαλίκια είναι:

$$K = 0.083 \text{ m/s}$$

9.2 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΑΕΡΙΟΥ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΟΥ

Οι αναλύσεις των δειγμάτων ως προς τα BTEX και το MTBE διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Ταμιευτήρων του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης στον αέριο χρωματογράφο Perkin Elmer 8700 με ανιχνευτή ιονισμού φλόγας με χρήση της ίνας Supelco (SPME fiber assembly 100 μm Polydimethylsiloxane coating for manual holder, red). Η στήλη που χρησιμοποιήθηκε ήταν η: BP20/ SGE (30 min, 0.32 mm, 0.5 μm).

9.2.1 Βαθμονόμηση αέριου χρωματογράφου

Για τη βαθμονόμηση του χρωματογράφου χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα διαφόρων συγκεντρώσεων. Το αρχικό δείγμα παρασκευάστηκε στο εργαστήριο, με σκοπό η τελική του σύσταση να αποτελείται από όλα τα συστατικά του ρύπου με συγκέντρωση 100 ppm. Πιο συγκεκριμένα, η συγκέντρωση κάθε συστατικού στο αρχικό διάλυμα ήταν:

| 100 ppm | MTBE | Βενζόλιο | Τολουόλιο | Αιθυλο βενζόλιο | π-ξυλόλιο | ο-ξυλόλιο |
|-------------------|--------|----------|-----------|-----------------|-----------|-----------|
| Συγκέντρωση (ppm) | 161,80 | 128,00 | 187,10 | 140,70 | 180,00 | 139,60 |

Τα επόμενα δείγματα παρασκευάστηκαν με διαδοχικές αραιώσεις του αρχικού. Έτσι, το διάλυμα με συγκέντρωση 50 ppm αποτελεί 1:1 αραιώση του αρχικού.

| 50 ppm | MTBE | Βενζόλιο | Τολουόλιο | Αιθυλο βενζόλιο | π-ξυλόλιο | ο-ξυλόλιο |
|-------------------|-------|----------|-----------|-----------------|-----------|-----------|
| Συγκέντρωση (ppm) | 80,90 | 64,00 | 93,55 | 70,35 | 90,00 | 69,80 |

Τα υπόλοιπα διαλύματα είχαν τις παρακάτω συγκεντρώσεις:

| 40 ppm | MTBE | Βενζόλιο | Τολουόλιο | Αιθυλο βενζόλιο | π-ξυλόλιο | ο-ξυλόλιο |
|-------------------|-------|----------|-----------|-----------------|-----------|-----------|
| Συγκέντρωση (ppm) | 64,72 | 51,20 | 74,84 | 56,28 | 72,00 | 55,84 |

| 20 ppm | MTBE | Βενζόλιο | Τολουόλιο | Αιθυλο βενζόλιο | π-ξυλόλιο | ο-ξυλόλιο |
|-------------------|-------|----------|-----------|-----------------|-----------|-----------|
| Συγκέντρωση (ppm) | 32,36 | 25,60 | 37,42 | 28,14 | 36,00 | 27,92 |

| 10 ppm | MTBE | Βενζόλιο | Τολουόλιο | Αιθυλο βενζόλιο | π-ξυλόλιο | ο-ξυλόλιο |
|-------------------|-------|----------|-----------|-----------------|-----------|-----------|
| Συγκέντρωση (ppm) | 16,18 | 12,80 | 18,71 | 14,07 | 18,00 | 13,96 |

| 5 ppm | MTBE | Βενζόλιο | Τολουόλιο | Αιθυλο βενζόλιο | π- ξυλόλιο | ο- ξυλόλιο |
|----------------------|------|----------|-----------|--------------------|---------------|---------------|
| Συγκέντρωση (ppm) | 8,09 | 6,40 | 9,36 | 7,04 | 9,00 | 6,98 |

| 2 ppm | MTBE | Βενζόλιο | Τολουόλιο | Αιθυλο βενζόλιο | π- ξυλόλιο | ο- ξυλόλιο |
|----------------------|------|----------|-----------|--------------------|---------------|---------------|
| Συγκέντρωση (ppm) | 3,24 | 2,56 | 3,74 | 2,82 | 3,60 | 2,80 |

| 1 ppm | MTBE | Βενζόλιο | Τολουόλιο | Αιθυλο βενζόλιο | π- ξυλόλιο | ο- ξυλόλιο |
|----------------------|------|----------|-----------|--------------------|---------------|---------------|
| Συγκέντρωση (ppm) | 1,62 | 1,28 | 1,87 | 1,41 | 1,80 | 1,40 |

| 0.1 ppm | MTBE | Βενζόλιο | Τολουόλιο | Αιθυλο βενζόλιο | π- ξυλόλιο | ο- ξυλόλιο |
|----------------------|------|----------|-----------|--------------------|---------------|---------------|
| Συγκέντρωση (ppm) | 0,16 | 0,13 | 0,19 | 0,14 | 0,18 | 0,14 |

Τα 7 παραπάνω διαλύματα αναλύθηκαν, όμως για τη βαθμονόμηση του οργάνου χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές από 0.1 ως 10 ppm, αφού αφενός μεν παρουσίασαν μεγαλύτερη ομοιογένεια, αφετέρου δε όλα τα προς ανάλυση δείγματα αραιώθηκαν, ώστε να παρουσιάζουν τελική συγκέντρωση μεταξύ 0.1 και 10 ppm. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-5:

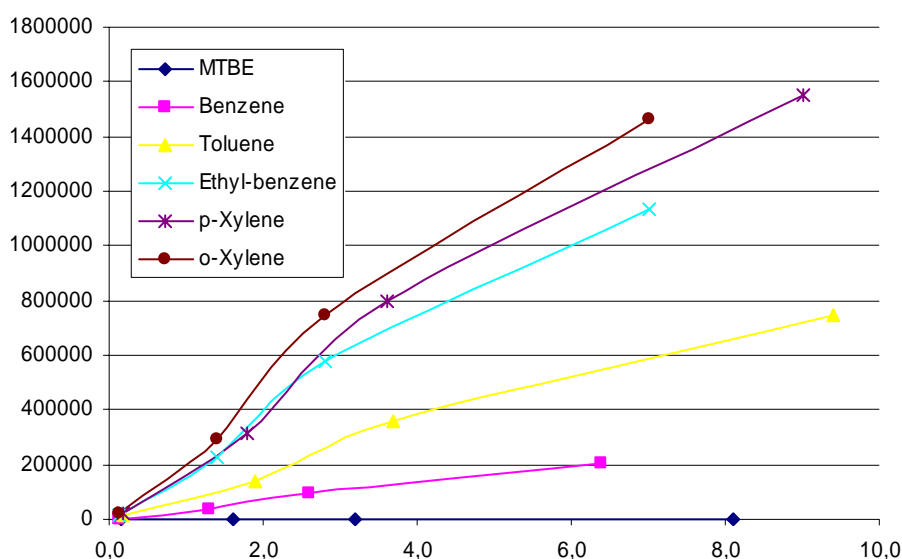
Πίνακας 9-5: Αποτελέσματα βαθμονόμησης του χρωματογράφου

| MTBE | | benzene | | toluene | | Όνομα αρχείου |
|------|--------|---------|---------|---------|-----------|------------------|
| ppm | area | ppm | Area | ppm | area | |
| 3.2 | 22 710 | 2.6 | 44 299 | 3.7 | 166 623 | cal_2ppm_07_09 |
| 8.1 | 45 109 | 6.4 | 207 884 | 9.4 | 1 069 333 | cal_5ppm_06_09 |
| 1.6 | 14 364 | 1.3 | 33 485 | 1.9 | 140 680 | cal_1ppm_07_09 |
| 0.2 | 2 917 | 0.1 | 2 100 | 0.2 | 12 463 | cal_01ppm_07_09 |
| 1.6 | 14 500 | 1.3 | 26 300 | 1.9 | 115 000 | cal_1ppm_11_09 |
| 3.2 | 26 395 | 2.6 | 75 821 | 3.7 | 285 588 | Newcal_2ppm_24_9 |
| 8.1 | 76 202 | 6.4 | 208 504 | 9.4 | 749 752 | cal_5ppm_25_09 |
| 3.2 | 29 298 | 2.6 | 95 805 | 3.7 | 360 368 | cal_2ppm_01_10 |
| 1.6 | 13 216 | 1.3 | 36 590 | 1.9 | 141 982 | cal_1ppm_02_10 |

Πίνακας 9-5: Αποτελέσματα βαθμονόμησης του χρωματογράφου (συνέχεια)

| ethyl-benzene | | p-xylene | | o-xylene | | Όνομα αρχείου |
|---------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|------------------|
| ppm | area | ppm | area | ppm | area | |
| 2.8 | 241 281 | 3.6 | 326 568 | 2.8 | 335 433 | cal_2ppm_07_09 |
| 7.0 | 1 965 637 | 9.0 | 2 361 003 | 7.0 | 2 170 444 | cal_5ppm_06_09 |
| 1.4 | 211 917 | 1.8 | 294 799 | 1.4 | 291 029 | cal_1ppm_07_09 |
| 0.1 | 16 397 | 0.2 | 23 606 | 0.1 | 21 955 | cal_01ppm_07_09 |
| 1.4 | 158 000 | 1.8 | 214 000 | 1.4 | 241 000 | cal_1ppm_11_09 |
| 2.8 | 464 695 | 3.6 | 646 440 | 2.8 | 601 770 | Newcal_2ppm_24_9 |
| 7.0 | 1 135 770 | 9.0 | 1 549 625 | 7.0 | 1 462 637 | cal_5ppm_25_09 |
| 2.8 | 580 685 | 3.6 | 795 350 | 2.8 | 747 173 | cal_2ppm_01_10 |
| 1.4 | 225 632 | 1.8 | 311 324 | 1.4 | 295 391 | cal_1ppm_02_10 |

Το διάγραμμα της βαθμονόμησης φαίνεται παρακάτω.



Διάγραμμα 9-5: Βαθμονόμηση χρωματογράφου για συγκεντρώσεις 0-10 ppm

Έτσι, στην εξίσωση που προκύπτει για κάθε συστατικό του ρύπου, θέτοντας ως άγνωστο y την εκάστοτε συγκέντρωση και αντικαθιστώντας όπου x το εμβαδό που υπολογίστηκε σε κάθε χρωματογράφημα, προκύπτει η αντίστοιχη συγκέντρωση, βάσει της βαθμονόμησης του οργάνου.

Βάσει της βαθμονόμησης του αναλυτή, προκύπτει πως η ακρίβεια των μετρήσεων είναι της τάξης των ± 0.5 ppm.

9.3 ΑΝΑΛΥΣΗ MTBE

Η εξίσωση για το MTBE είναι της μορφής:

$$y = 0.0001 x + 0.2256 \quad (\text{Εξίσωση 9-1})$$

$$\text{με } R^2 = 0.9968$$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το χρωματογράφημα για κάθε πείραμα είναι τα εξής:

9.3.1 MTBE Τυφλό

Πίνακας 9-6: Αποτελέσματα προσδιορισμού του MTBE στο τυφλό στην είσοδο

| ΕΙΣΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------|-----------------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Αραίωση 1:9) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 17_1_eis | 8 031 | 1.03 | 10.29 | Απορρίπτεται | 17.08.07 (80 ppm) |
| 17_2_eis | 42 875 | 4.51 | 45.13 | Απορρίπτεται | |
| 17_3_eis | 73 411 | 7.57 | 75.67 | | |
| 17_4_eis | 78 857 | 8.11 | 81.11 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 78.39 | | |
| 20_1_eis | 93 330 | 9.56 | 95.59 | | 20.08.07 (100 ppm) |
| 20_2_eis | 104 428 | 10.67 | 106.68 | | |
| 20_3_eis | 59 772 | 6.20 | 62.03 | Απορρίπτεται | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 101.14 | | |
| 21_1_eis | 71 836 | 7.41 | 74.09 | | 21.08.07 (80 ppm) |
| 21_2_eis | 80 508 | 8.28 | 82.76 | | |
| 21_3_eis | 74 566 | 7.68 | 76.82 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 77.89 | | |

Οι δύο πρώτες τιμές απορρίπτονται, αφού είναι προφανές και βάσει των επομένων, πως το σύστημα δεν είχε ισορροπήσει ακόμη όταν ελήφθησαν αυτά τα δείγματα. Η συγκέντρωση την πρώτη ημέρα (17.08.07) είναι της τάξης των 80 ppm. Τη 2^η ημέρα παρατηρείται το εξής παράδοξο* η συγκέντρωση του MTBE στην είσοδο φαίνεται πως είναι μεγαλύτερη των 100 ppm, γεγονός φαινομενικά αδύνατο, αφού τα διαλύματα θεωρητικά είχαν συγκέντρωση 100 ppm.

Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στην προσθήκη ελάχιστα περισσότερης ποσότητας διαλύτη κατά την παρασκευή του διαλύματος. Τέλος, κατά την 3^η ημέρα δεν παρατηρείται κάτι διαφορετικό στην είσοδο, η συγκέντρωση της οποίας είναι της τάξης των 80 ppm και πάλι.

Πίνακας 9-7: Αποτελέσματα προσδιορισμού του MTBE στο τυφλό στην έξοδο

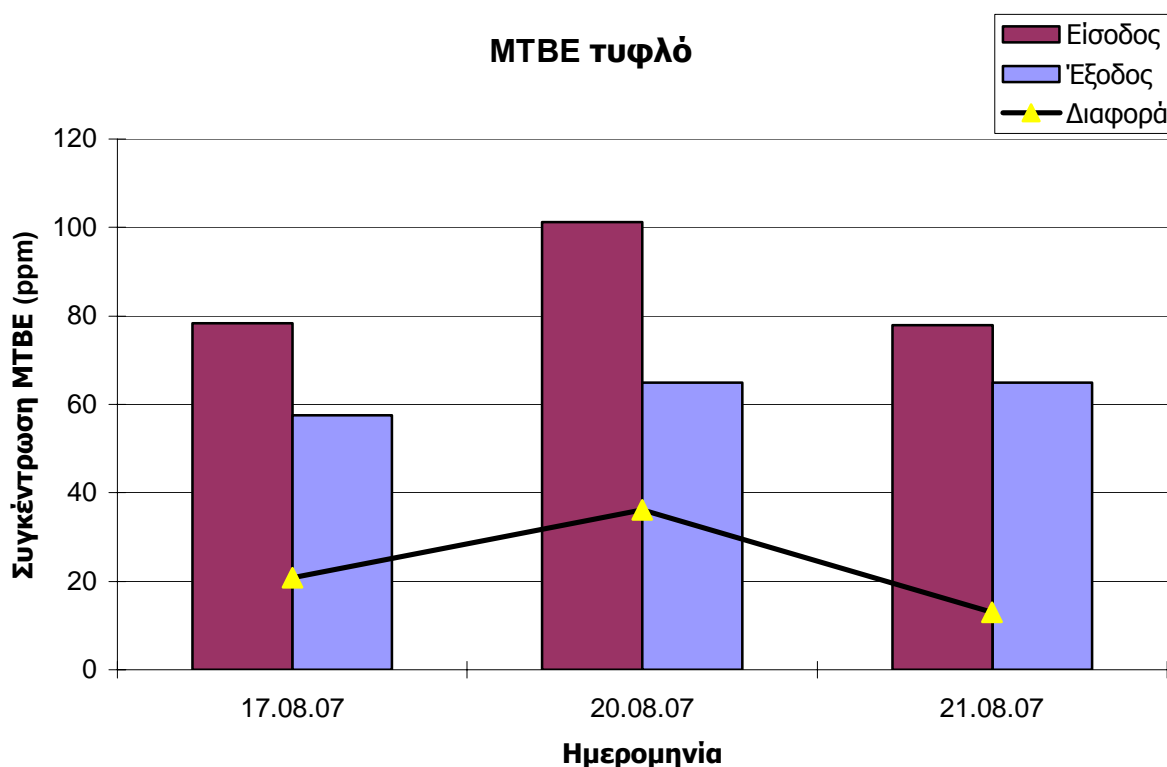
| ΈΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---|--------------------------|--------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 17_3_exo | 193 687 | 19.59 | 58.78 | Αραίωση 1:2 | 17.08.07 |
| 17_4_exo | 250 659 | 25.29 | 50.58 | Αραίωση 1:1 | |
| 17_5_exo | 314 918 | 31.72 | 63.43 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 57.60 | | |
| 20_1_exo | 226 508 | 22.88 | 68.63 | Αραίωση 1:2 | 20.08.07 |
| 20_2_exo | 316 283 | 31.85 | 63.71 | Αραίωση 1:1 | |
| 20_3_exo | 415 136 | 41.74 | 62.61 | Αραίωση 2:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 64.98 | | |
| 21_1_exo | 432 213 | 43.45 | 65.17 | Αραίωση 2:1 | 21.08.07 |
| 21_2_exo | 624 775 | 62.70 | 62.70 | Αραίωση 1:1 | |
| 21_3_exo | 442 607 | 44.49 | 66.73 | Αραίωση 2:1 | |
| 21_4_exo | 532 139 | 53.44 | 53.44 | Απορρίπτεται | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 64.87 | | |

Οι σκέψεις για διαφυγή του ρύπου εξ' αιτίας της υψηλής του πτητικότητας γίνονται στο σημείο αυτό για πρώτη φορά γεγονός. Έτσι, κατά την 1^η ημέρα παρατηρούνται στην εκροή συγκεντρώσεις της τάξης των 60 ppm, ενώ τη 2^η και την 3^η ημέρα υπολογίζονται στα 65 ppm. Στον Πίνακα 9-8 γίνεται αναφορά των συγκεντρώσεων εισόδου και εξόδου, ώστε να υπολογισθούν η εξατμίσση του MTBE από το έδαφος, καθώς και το προσροφητικό δυναμικό αυτού ως προς το διαλύτη.

Πίνακας 9-8: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του MTBE στο τυφλό

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | |
|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά Συγκέντρωσης (ppm) |
| 17.08.07 | 78.39 | 57.60 | 20.79 |
| 20.08.07 | 101.14 | 64.98 | 36.16 |
| 21.08.07 | 77.89 | 64.87 | 13.02 |

Όπως προκύπτει και από τον παραπάνω πίνακα, αλλά και από το Διάγραμμα 9-6, δεν υπάρχει κάποια σταθερή διαφορά στη συγκέντρωση, γεγονός αναμενόμενο, αφού ήταν γνωστό εξ' αρχής, πως ο ρύπος δεν συμπαρασύρεται μόνο από το υπόγειο νερό, αλλά μέρος αυτού εγκλωβίζεται στο έδαφος. Έτσι, ενώ τη 2^η μέρα παρατηρείται μεγάλη διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου, στη συνέχεια και αφού το σύστημα ισορροπεί πλήρως, η διαφορά αυτή παγιώνεται στα 13 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα MTBE που δεν καταλήγει στην έξοδο είναι της τάξης των **25ppm**.



Διάγραμμα 9-6: Μεταβολή συγκεντρώσεων του MTBE στο τυφλό

9.3.2 MTBE στο κομπόστ

Στον Πίνακα 9-9 καταγράφονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του MTBE των δειγμάτων εισόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με κομπόστ.

Πίνακας 9-9: Αποτελέσματα προσδιορισμού του MTBE στο κομπόστ στην είσοδο

| ΕΙΣΟΔΟΣ | | | | | |
|-----------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|------------|--------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Αραίωση 1:9) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Ημερομηνία | Σχόλια |
| 18_1_eis | 88 247 | 9.05 | 90.50 | 18.09.07 | |
| 21_1_eis | 86 366 | 8.86 | 88.62 | 21.09.07 | |

Κατά τη διάρκεια του πειράματος κομπόστ, η συγκέντρωση του MTBE στην είσοδο ήταν της τάξης των 90 ppm.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 9-10 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του MTBE των δειγμάτων εξόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με κομπόστ.

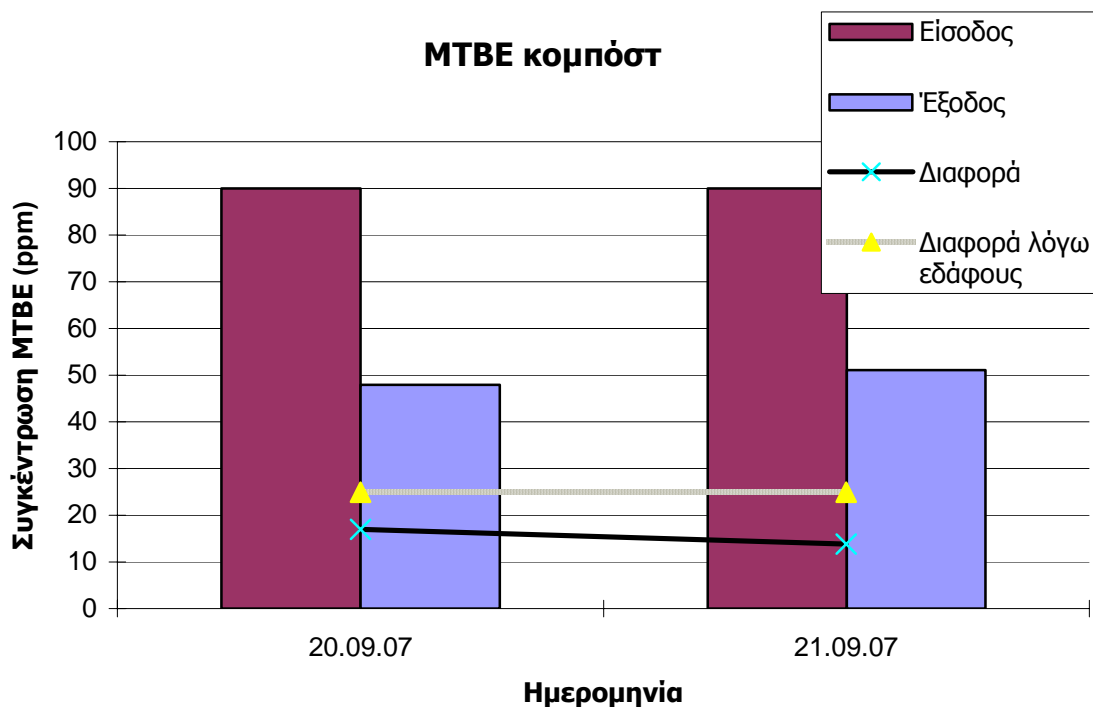
Πίνακας 9-10: Αποτελέσματα προσδιορισμού του MTBE στο κομπόστ στην έξοδο

| ΕΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---|--------------------------|--------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 18_2_exo | 3 008 | 0.53 | 0.53 | Απορρίπτεται | 18.09.07 |
| 19_1_exo | 6 964 | 0.92 | 0.92 | Απορρίπτεται | 19.09.07 |
| 19_2_exo | 32 965 | 3.52 | 3.52 | Απορρίπτεται | |
| 20_1_exo | 70 461 | 7.27 | 43.63 | Αραίωση 1:5 | 20.09.07 |
| 20_2_exo | 128 523 | 13.08 | 52.31 | Αραίωση 1:3 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 47.97 | | |
| 21_1_exo | 167 921 | 17.02 | 51.05 | Αραίωση 1:2 | 21.09.07 |
| 21_2_exo | 253 989 | 25.62 | 51.25 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 51.15 | | |

Πίνακας 9-11: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του MTBE στο κομπόστ

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά λόγω εξάτμισης και προσρόφησης εδάφους (ppm) | Δυναμικό εξυγίανσης του κομπόστ (ppm) |
| 20.09.07 | 90.00 | 47.97 | 25.00 | 17.03 |
| 21.09.07 | 90.00 | 51.15 | 25.00 | 13.85 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | 15.44 |

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αλλά και στο Διάγραμμα 9-7, υπάρχει σταθερή διαφορά στη συγκέντρωση. Έτσι και την 1^η και τη 2^η μέρα παρατηρείται σταθερή διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου, η οποία είναι της τάξης των 15 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα MTBE, η οποία συγκρατείται από το κομπόστ είναι της τάξης των **15ppm**.



Διάγραμμα 9-7: Μεταβολή συγκεντρώσεων του MTBE στο κομπόστ

Συμπερασματικά, η απόδοση του κομπόστ και μόνο για την εξυγίανση του συγκεκριμένου εδάφους από το MTBE είναι:

$$\text{Απόδοση κομπόστ στο MTBE: } \frac{C_{out}}{C_{in}} \times 100\% = \frac{15.44 \text{ ppm}}{90 \text{ ppm}} \times 100\% = 17.15\%$$

9.3.3 MTBE στο διατομήτη

Στο πείραμα προσρόφησης από διατομήτη, λήφθηκε μόνο ένα δείγμα εισόδου, αφού σε αντίθεση με τις προηγούμενες αναλύσεις, επιλέχθηκε μια και μόνη συγκέντρωση ρύπου καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

Έτσι, κατά την ανάλυση μετρήθηκε εμβαδό ίσο με 72 594 τετραγωνικές μονάδες, επιφάνεια που αντιστοιχεί σε 7.485 ppm. Δεδομένης της 1:9 αραιώσης, η συγκέντρωση του MTBE στο αρχικό διάλυμα ήταν 74.85 ppm.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 9-12 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του MTBE των δειγμάτων εξόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με διατομήτη.

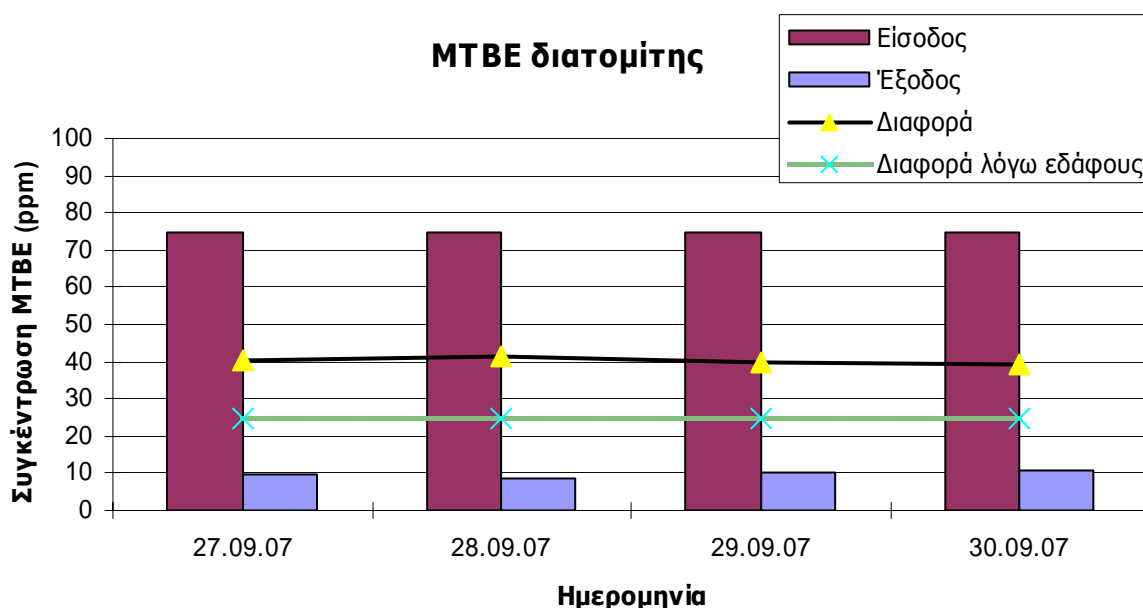
Πίνακας 9-12: Αποτελέσματα προσδιορισμού του MTBE στο διατομήτη στην έξοδο

| ΈΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---|--------------------------|--------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 27_1_exo | 29 501 | 3.18 | 9.53 | Αραίωση 1:2 | 27.09.07 |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 9.53 | | |
| 28_1_exo | 41 744 | 4.40 | 8.80 | Αραίωση 1:1 | 28.09.07 |
| 28_2_exo | 18 211 | 2.05 | 8.19 | Αραίωση 1:3 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 8.50 | | |
| 29_1_exo | 45 738 | 4.80 | 9.60 | Αραίωση 1:1 | 29.09.07 |
| 29_2_exo | 49 862 | 5.21 | 10.42 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 10.01 | | |
| 30_1_exo | 103 224 | 10.55 | 10.55 | | 30.09.07 |
| 30_2_exo | 264 373 | 26.66 | 26.66 | Απορρίπτεται | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 10.55 | | |

Πίνακας 9-13: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του MTBE στο διατομίτη

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά λόγω εξάτμισης και προσρόφησης εδάφους (ppm) | Δυναμικό εξυγίανσης του κομπόστ (ppm) |
| 27.09.07 | 74.85 | 9.53 | 25.00 | 40.32 |
| 28.09.07 | 74.85 | 8.50 | 25.00 | 41.35 |
| 29.09.07 | 74.85 | 10.01 | 25.00 | 39.84 |
| 30.09.07 | 74.85 | 10.55 | 25.00 | 39.3 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | 40.2 |

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αλλά και στο Διάγραμμα 9-8, υπάρχει σταθερή διαφορά στη συγκέντρωση. Έτσι και τις 4 ημέρες παρατηρείται σταθερή διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου, η οποία είναι της τάξης των 40 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα MTBE, η οποία συγκρατείται από το διατομίτη είναι της τάξης των 40ppm.



Διάγραμμα 9-8: Μεταβολή συγκεντρώσεων του MTBE στο διατομίτη

Συμπερασματικά, η απόδοση του διατομίτη και μόνο για την εξυγίανση του συγκεκριμένου εδάφους από το MTBE είναι:

$$\text{Απόδοση διατομίτη στο MTBE: } \frac{C_{out}}{C_{in}} \times 100\% = \frac{40.2 \text{ ppm}}{74.85 \text{ ppm}} \times 100\% = 53.71\%$$

9.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΕΝΖΟΛΙΟΥ

Η εξίσωση για το βενζόλιο είναι της μορφής:

$$y = 3 \cdot 10^{-5} x + 0.2681 \quad (\text{Εξίσωση 9-2})$$

$$\text{με } R^2 = 0.9974$$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το χρωματογράφημα για κάθε πείραμα είναι τα εξής:

9.4.1 Βενζόλιο Τυφλό

Πίνακας 9-14: Αποτελέσματα προσδιορισμού του βενζολίου στο τυφλό στην είσοδο

| ΕΙΣΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------|----------------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Αραίωση 1:9) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 17_1_eis | 6 176 | 0.4534 | 4.53 | Απορρίπτεται | 17.08.07 (35 ppm) |
| 17_2_eis | 102 718 | 3.3496 | 33.50 | | |
| 17_3_eis | 88 836 | 2.9333 | 29.33 | | |
| 17_4_eis | 105 916 | 3.4456 | 34.46 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 32.43 | | |
| 20_1_eis | 258 731 | 8.0300 | 80.30 | Απορρίπτεται | 20.08.07 (45 ppm) |
| 20_2_eis | 309 407 | 9.5503 | 95.50 | | |
| 20_3_eis | 196 848 | 6.1735 | 61.74 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | | | |
| 21_1_eis | 117 300 | 3.7871 | 37.87 | | 21.08.07 (40 ppm) |
| 21_2_eis | 134 577 | 4.3054 | 43.05 | | |
| 21_3_eis | 113 275 | 3.6663 | 36.66 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 39.19 | | |

Η 1^η τιμή απορρίπτεται, αφού είναι προφανές και βάσει των επομένων, πως το σύστημα δεν είχε ισορροπήσει ακόμη όταν λήφθηκε αυτό το δείγμα. Το διάλυμα που παρασκευάστηκε για τη 2^η ημέρα, περιείχε θεωρητικά 45ppm βενζολίου, όμως κατά την ανάλυση προέκυψε πως η συγκέντρωση που μετρήθηκε ήταν η διπλάσια (90 ppm).

Δεδομένων των υπολοίπων αποτελεσμάτων για τη συγκεκριμένη ημέρα συμπεραίνεται πως έγινε σφάλμα κατά την παρασκευή του ρύπου και οι συγκεκριμένες τιμές δε λαμβάνονται υπ' όψιν. Η συγκέντρωση την πρώτη ημέρα (17.08.07) είναι της τάξης των 35 ppm και την 3^η ημέρα είναι περίπου 40 ppm.

Πίνακας 9-15: Αποτελέσματα προσδιορισμού του βενζολίου στο τυφλό στην έξοδο

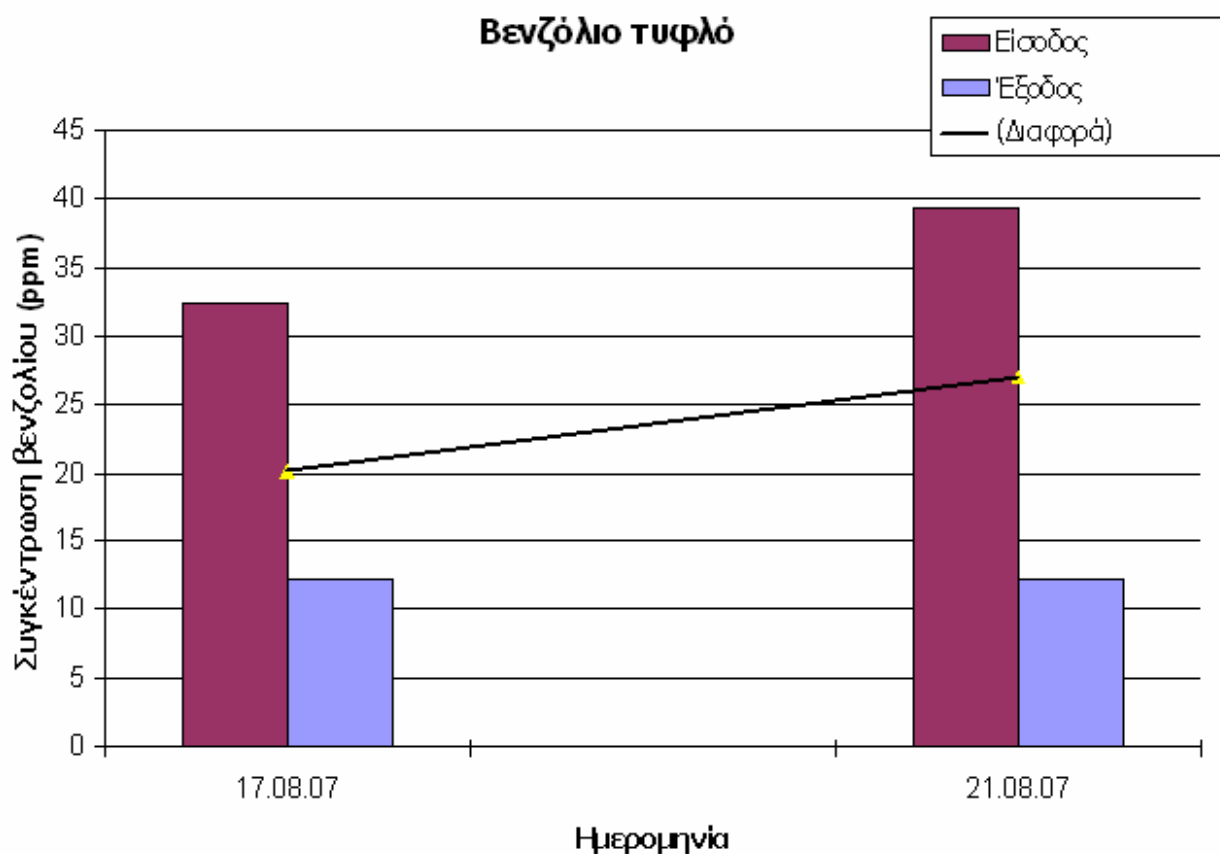
| ΈΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---|--------------------------|--------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 17_3_exo | 114 156 | 3.69 | 11.08 | Αραίωση 1:2 | 17.08.07 |
| 17_4_exo | 169 491 | 5.35 | 10.71 | Αραίωση 1:1 | |
| 17_5_exo | 242 300 | 7.54 | 15.07 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 12.29 | | |
| 20_1_exo | 130 893 | 4.19 | 12.58 | Αραίωση 1:2 | 20.08.07 |
| 20_2_exo | 212 625 | 6.65 | 13.29 | Αραίωση 1:1 | |
| 20_3_exo | 323 006 | 9.96 | 14.94 | Αραίωση 2:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 13.60 | | |
| 21_1_exo | 256 196 | 7.95 | 11.93 | Αραίωση 2:1 | 21.08.07 |
| 21_2_exo | 381 383 | 11.71 | 11.71 | Αραίωση 1:1 | |
| 21_3_exo | 376 103 | 11.55 | 17.33 | Απορρίπτεται | |
| 21_4_exo | 433 321 | 13.27 | 13.27 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 12.30 | | |

Τα συστατικά του BTEX, λόγω της πολύ υψηλής πτητικότητάς τους εξατμίζονται, οπότε είναι και λογικό στην έξοδο να παρατηρούνται συγκεντρώσεις της τάξης των 10 ppm, όταν στην είσοδο η τροφοδοσία είναι ίση με 40 ppm.

Πίνακας 9-16: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του βενζολίου στο τυφλό

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | |
|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά Συγκέντρωσης (ppm) |
| 17.08.07 | 32.43 | 12.29 | 20.14 |
| 20.08.07 | 90.00 | 13.60 | 76.40 |
| 21.08.07 | 39.19 | 12.30 | 26.89 |

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αλλά και στο Διάγραμμα 9-9, υπάρχει διαφορά της τάξης των 25ppm στις συγκεντρώσεις μεταξύ 1^{ης} και 3^{ης} ημέρας, ενώ όπως εξηγήθηκε και προηγουμένως, η 2^η ημέρα δε λαμβάνεται υπ' όψιν. Έτσι, ενώ τη 1^η μέρα παρατηρείται διαφορά 20ppm μεταξύ εισόδου και εξόδου, στη συνέχεια και αφού το σύστημα ισορροπεί πλήρως, η διαφορά αυτή παγιώνεται στα 25 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα βενζολίου που δεν καταλήγει στην έξοδο είναι της τάξης των **25ppm**.



Διάγραμμα 9-9: Μεταβολή συγκεντρώσεων του βενζολίου στο τυφλό

9.4.2 Βενζόλιο στο κομπόστ

Στον Πίνακα 9-16 καταγράφονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του βενζολίου των δειγμάτων εισόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με κομπόστ.

Πίνακας 9-16: Αποτελέσματα προσδιορισμού του βενζολίου στο κομπόστ στην είσοδο

| ΕΙΣΟΔΟΣ | | | | | |
|-----------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|--------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Αραίωση 1:9) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 18_1_eis | 203 068 | 6.36 | 63.60 | | 18.09.07 |
| 21_1_eis | 216 693 | 6.77 | 67.69 | | 21.09.07 |

Κατά τη διάρκεια του πειράματος κομπόστ, η συγκέντρωση του βενζολίου στην είσοδο ήταν της τάξης των 65 ppm.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 9-17 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης το βενζολίου των δειγμάτων εξόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με κομπόστ.

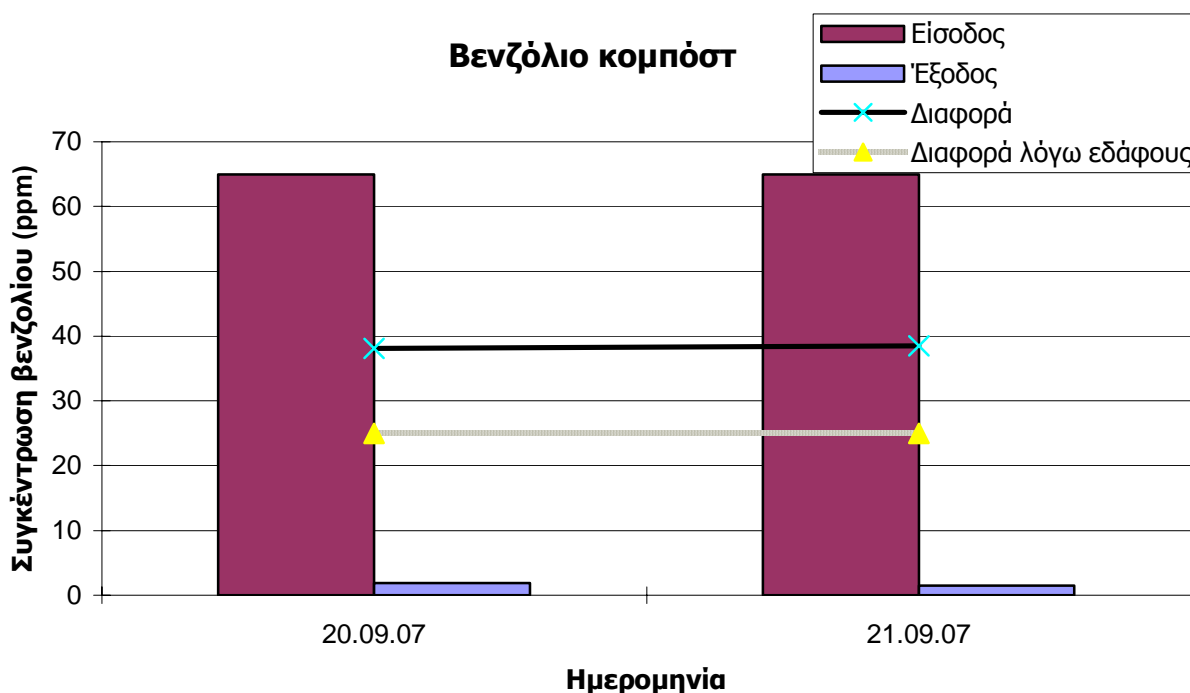
Πίνακας 9-17: Αποτελέσματα προσδιορισμού του βενζολίου στο κομπόστ στην έξοδο

| ΕΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---|--------------------------|--------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 18_2_exo | 1 924 | 0.33 | 0.33 | Απορρίπτεται | 18.09.07 |
| 19_1_exo | 1 568 | 0.32 | 0.32 | Απορρίπτεται | 19.09.07 |
| 19_2_exo | 2 182 | 0.33 | 0.33 | Απορρίπτεται | |
| 20_1_exo | 3 064 | 0.36 | 2.16 | Αραίωση 1:5 | 20.09.07 |
| 20_2_exo | 5 034 | 0.42 | 1.68 | Αραίωση 1:3 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 1.92 | | |
| 21_1_exo | 6 914 | 0.48 | 1.43 | Αραίωση 1:2 | 21.09.07 |
| 21_2_exo | 15 718 | 0.74 | 1.48 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 1.46 | | |

Πίνακας 9-18: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του βενζολίου στο κομπόστ

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά λόγω εξάτμισης και προσρόφησης εδάφους (ppm) | Δυναμικό εξυγίανσης του κομπόστ (ppm) |
| 20.09.07 | 65.00 | 1.92 | 25.00 | 38.08 |
| 21.09.07 | 65.00 | 1.46 | 25.00 | 38.54 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | 38.31 |

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αλλά και στο Διάγραμμα 9-10, υπάρχει σταθερή διαφορά στη συγκέντρωση. Έτσι και την 1^η και τη 2^η μέρα παρατηρείται σταθερή διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου, η οποία είναι της τάξης των 40 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα βενζολίου, που συγκρατείται από το κομπόστ είναι της τάξης των **40ppm**.



Διάγραμμα 9-10: Μεταβολή συγκεντρώσεων του βενζολίου στο κομπόστ

Συμπερασματικά, η απόδοση του κομπόστ και μόνο για την εξυγίανση του συγκεκριμένου εδάφους από το βενζόλιο είναι:

$$\text{Απόδοση κομπόστ στο βενζόλιο: } \frac{C_{out}}{C_{in}} \times 100\% = \frac{38.31 \text{ ppm}}{65 \text{ ppm}} \times 100\% = 58.94\%$$

9.4.3 Βενζόλιο στο διατομίτη

Κατά την ανάλυση μετρήθηκε εμβαδό ίσο με 148 881 τετραγωνικές μονάδες, επιφάνεια που αντιστοιχεί σε 4.734 ppm. Δεδομένης της 1:9 αραίωσης, η συγκέντρωση του βενζολίου στο αρχικό διάλυμα είναι 47.34 ppm.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 9-19 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του βενζολίου των δειγμάτων εξόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με διατομίτη.

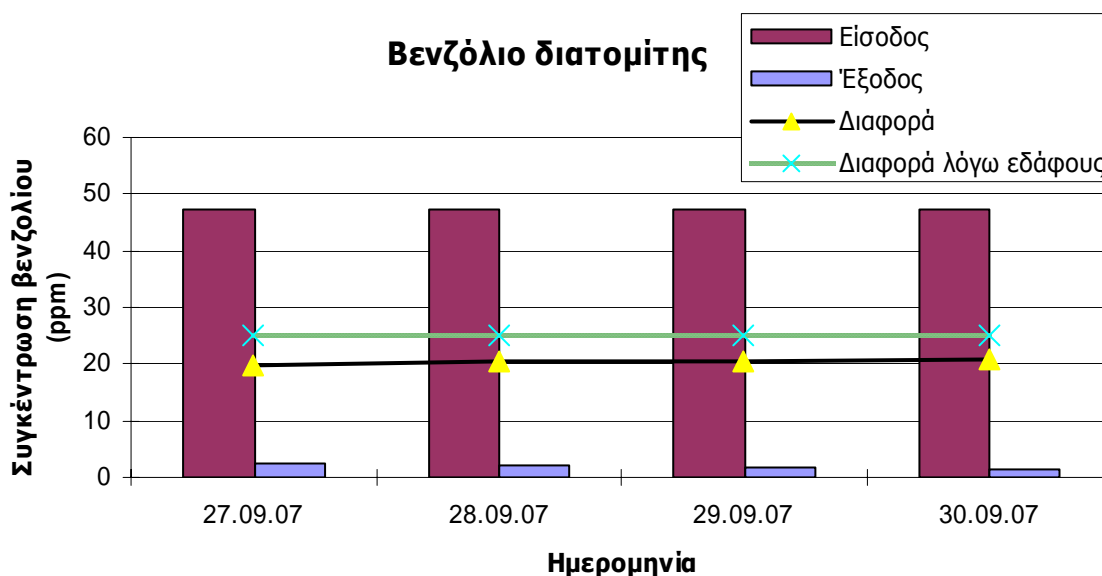
Πίνακας 9-19: Αποτελέσματα προσδιορισμού του βενζολίου στο διατομίτη στην έξοδο

| ΈΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---|--------------------------|--------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 27_1_exo | 19 736 | 0.86 | 2.58 | Αραίωση 1:2 | 27.09.07 |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 2.58 | | |
| 28_1_exo | 24 167 | 0.99 | 1.99 | Αραίωση 1:1 | 28.09.07 |
| 28_2_exo | 8 302 | 0.52 | 2.07 | Αραίωση 1:3 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 2.03 | | |
| 29_1_exo | 22 308 | 0.94 | 1.87 | Αραίωση 1:1 | 29.09.07 |
| 29_2_exo | 22 807 | 0.95 | 1.90 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 1.89 | | |
| 30_1_exo | 38 554 | 1.42 | 1.42 | | 30.09.07 |
| 30_2_exo | 150 379 | 4.78 | 4.78 | Απορρίπτεται | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 1.42 | | |

Πίνακας 9-20: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του βενζολίου στο διατομήτη

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά λόγω εξάτμισης και προσρόφησης εδάφους (ppm) | Δυναμικό εξυγίανσης του κομπόστ (ppm) |
| 27.09.07 | 47.34 | 2.58 | 25.00 | 19.76 |
| 28.09.07 | 47.34 | 2.03 | 25.00 | 20.31 |
| 29.09.07 | 47.34 | 1.89 | 25.00 | 20.45 |
| 30.09.07 | 47.34 | 1.42 | 25.00 | 20.92 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | 20.36 |

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αλλά και στο Διάγραμμα 9-11, υπάρχει σταθερή διαφορά στη συγκέντρωση. Έτσι και τις 4 ημέρες παρατηρείται σταθερή διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου, η οποία είναι της τάξης των 20 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα βενζολίου, που συγκρατείται από το διατομήτη είναι της τάξης των 20ppm.



Διάγραμμα 9-11: Μεταβολή συγκεντρώσεων του βενζολίου στο διατομήτη

Συμπερασματικά, η απόδοση του διατομήτη και μόνο για την εξυγίανση του συγκεκριμένου εδάφους από το βενζόλιο είναι:

$$\text{Απόδοση διατομήτη στο βενζόλιο: } \frac{C_{out}}{C_{in}} \times 100\% = \frac{20.36 \text{ ppm}}{47.34 \text{ ppm}} \times 100\% = 43.01\%$$

9.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΛΟΥΟΛΙΟΥ

Η εξίσωση για το τολουόλιο είναι της μορφής:

$$y = 8 \cdot 10^{-6} x + 0.824 \quad (\text{Εξίσωση 9-3})$$

$$\text{με } R^2 = 0.9993$$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το χρωματογράφημα για κάθε πείραμα είναι τα εξής:

9.5.1 Τολουόλιο Τυφλό

Πίνακας 9-21: Αποτελέσματα προσδιορισμού του τολουολίου στο τυφλό στην είσοδο

| ΕΙΣΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------|----------------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Αραίωση 1:9) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 17_1_eis | 12 039 | 0.92 | 9.20 | Απορρίπτεται | 17.08.07 (20 ppm) |
| 17_2_eis | 166 900 | 2.16 | 21.59 | | |
| 17_3_eis | 139 890 | 1.94 | 19.43 | | |
| 17_4_eis | 169 932 | 2.18 | 21.83 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 20.95 | | |
| 20_1_eis | 363 547 | 3.73 | 37.32 | | 20.08.07 (40 ppm) |
| 20_2_eis | 463 365 | 4.53 | 45.34 | Απορρίπτεται | |
| 20_3_eis | 500 030 | 4.82 | 48.24 | Απορρίπτεται | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 37.32 | | |
| 21_1_eis | 187 184 | 2.32 | 23.21 | | 21.08.07 (25 ppm) |
| 21_2_eis | 215 618 | 2.55 | 25.49 | | |
| 21_3_eis | 201 820 | 2.44 | 24.39 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 24.36 | | |

Η 1^η τιμή απορρίπτεται, αφού είναι προφανές και βάσει των επομένων, πως το σύστημα δεν είχε ισορροπήσει ακόμη όταν λήφθηκε αυτό το δείγμα. Η συγκέντρωση την πρώτη ημέρα (17.08.07) είναι της τάξης των 20 ppm, τη 2^η είναι 40 ppm και για το λόγο αυτό απορρίπτονται οι δύο επόμενες τιμές, που είναι μεγαλύτερες από τα 40ppm. Τέλος, την 3^η ημέρα η συγκέντρωση του τολουολίου στο διάλυμα είναι περίπου 25 ppm.

Πίνακας 9-22: Αποτελέσματα προσδιορισμού του τολουολίου στο τυφλό στην έξοδο

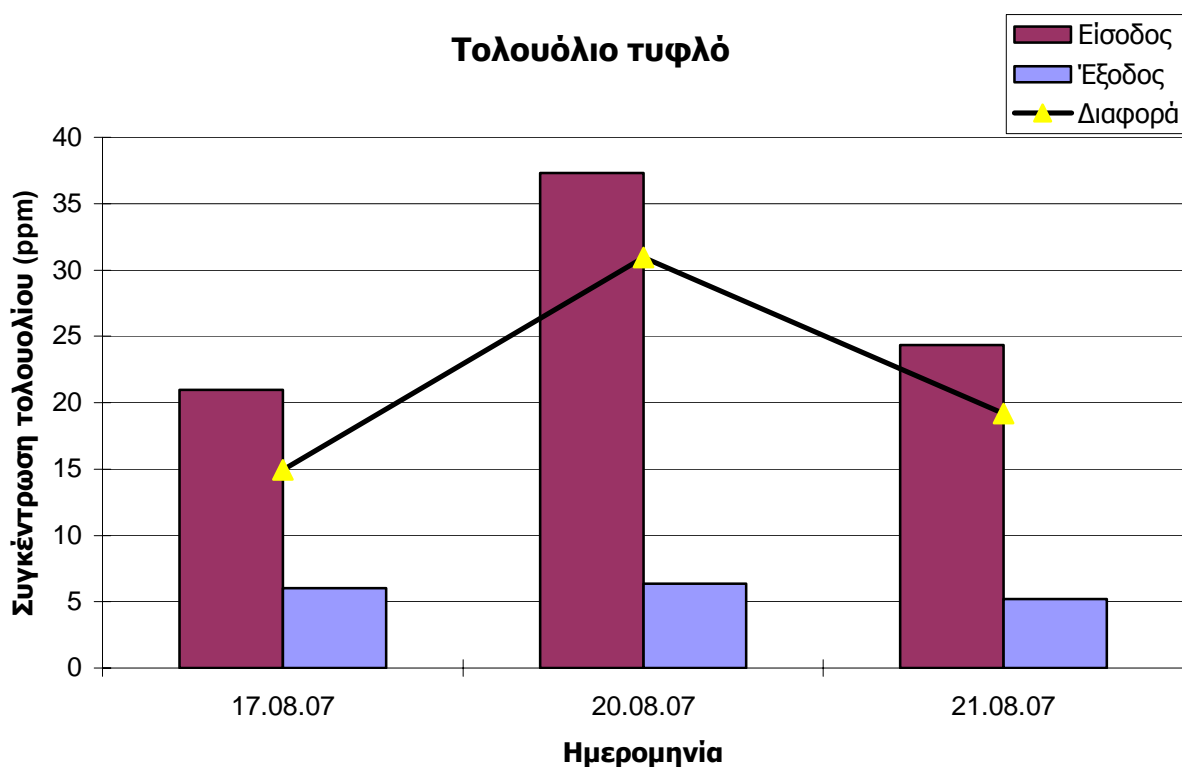
| ΈΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---|--------------------------|--------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 17_3_exo | 140 704 | 1.95 | 5.85 | Αραίωση 1:2 | 17.08.07 |
| 17_4_exo | 226 474 | 2.64 | 5.27 | Αραίωση 1:1 | |
| 17_5_exo | 330 172 | 3.47 | 6.93 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 6.02 | | |
| 20_1_exo | 175 643 | 2.23 | 6.69 | Αραίωση 1:2 | 20.08.07 |
| 20_2_exo | 272 220 | 3.00 | 6.00 | Αραίωση 1:1 | |
| 20_3_exo | 434 253 | 4.30 | 6.45 | Αραίωση 2:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 6.38 | | |
| 21_1_exo | 339 755 | 3.54 | 5.31 | Αραίωση 2:1 | 21.08.07 |
| 21_2_exo | 502 237 | 4.84 | 4.84 | Αραίωση 1:1 | |
| 21_3_exo | 514 881 | 4.94 | 7.41 | Απορρίπτεται | |
| 21_4_exo | 576 612 | 5.44 | 5.44 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 5.20 | | |

Τα συστατικά του ΒΤΕΧ, λόγω της πολύ υψηλής πτητικότητάς τους εξατμίζονται, οπότε είναι και λογικό στην έξοδο να παρατηρούνται συγκεντρώσεις της τάξης των 5 ppm, όταν στην είσοδο η τροφοδοσία είναι ίση με 40 ppm.

Πίνακας 9-23: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του τολουολίου στο τυφλό

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά Συγκέντρωσης (ppm) |
| 17.08.07 | 20.95 | 6.02 | 14.93 |
| 20.08.07 | 37.32 | 6.38 | 30.94 |
| 21.08.07 | 24.36 | 5.20 | 19.16 |

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αλλά και στο Διάγραμμα 9-12, υπάρχει διαφορά της τάξης των 15ppm στις συγκεντρώσεις. Έτσι, ενώ τη 1^η μέρα παρατηρείται διαφορά 15ppm μεταξύ εισόδου και εξόδου, στη συνέχεια και αφού εμφανίζεται μια κορυφή της τάξης των 30ppm, το σύστημα ισορροπεί πλήρως, και η διαφορά αυτή παγιώνεται στα 20 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα τολουολίου που δεν καταλήγει στην έξοδο είναι της τάξης των 20ppm.



Διάγραμμα 9-12: Μεταβολή συγκεντρώσεων του τολουολίου στο τυφλό

9.5.2 Τολουόλιο στο κομπόστ

Στον Πίνακα 9-24 καταγράφονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του τολουολίου των δειγμάτων εισόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με κομπόστ.

Πίνακας 9-24: Αποτελέσματα προσδιορισμού του τολουολίου στο κομπόστ στην είσοδο

| ΕΙΣΟΔΟΣ | | | | | |
|-----------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|--------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Αραίωση 1:9) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 18_1_eis | 418 089 | 4.17 | 41.70 | | 18.09.07 |
| 21_1_eis | 382 662 | 3.89 | 38.90 | | 21.09.07 |

Κατά τη διάρκεια του πειράματος κομπόστ, η συγκέντρωση του τολουολίου στην είσοδο ήταν της τάξης των 40 ppm.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 9-25 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του τολουολίου των δειγμάτων εξόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με κομπόστ.

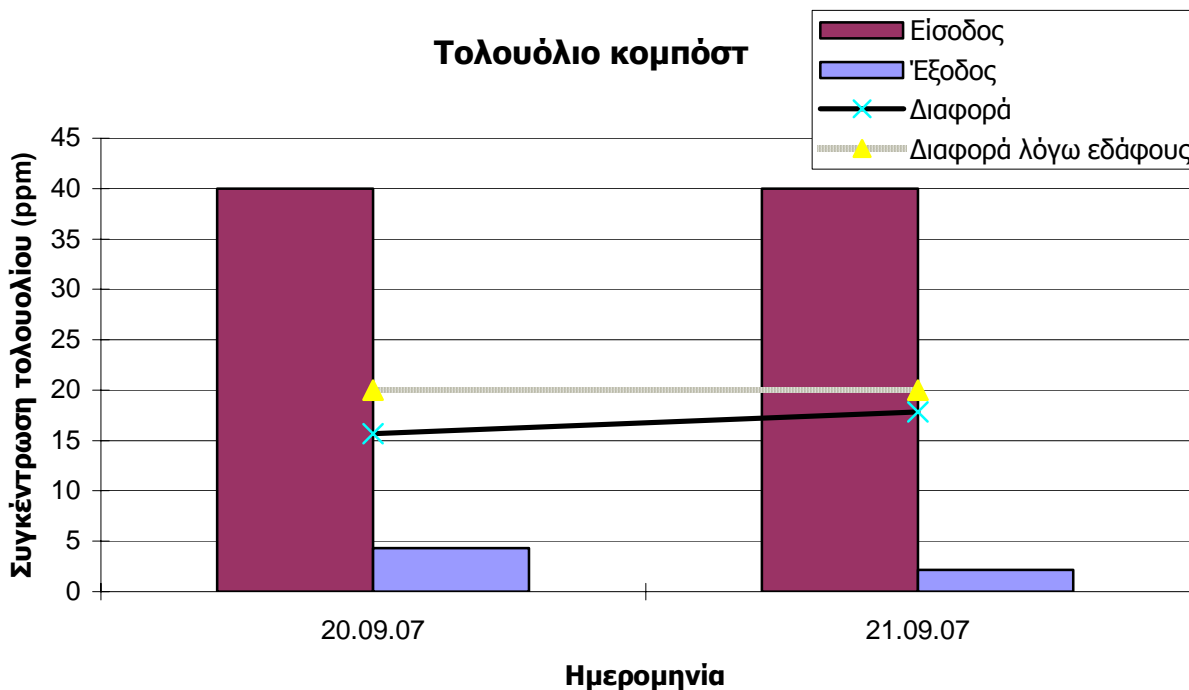
Πίνακας 9-25: Αποτελέσματα προσδιορισμού του τολουολίου στο κομπόστ στην έξοδο

| ΈΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---|--------------------------|--------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 18_2_exo | 4 682 | 0.86 | 0.86 | Απορρίπτεται | 18.09.07 |
| 19_1_exo | 1 911 | 0.84 | 0.84 | Απορρίπτεται | 19.09.07 |
| 19_2_exo | 2 831 | 0.85 | 0.85 | Απορρίπτεται | |
| 20_1_exo | 4 732 | 0.86 | 5.17 | Αραίωση 1:5 | 20.09.07 |
| 20_2_exo | 3 941 | 0.86 | 3.42 | Αραίωση 1:3 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 4.30 | | |
| 21_1_exo | 3 318 | 0.85 | 2.55 | Αραίωση 1:2 | 21.09.07 |
| 21_2_exo | 7 102 | 0.88 | 1.76 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 2.16 | | |

Πίνακας 9-26: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του τολουολίου στο κομπόστ

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά λόγω εξάτμισης και προσρόφησης εδάφους (ppm) | Δυναμικό εξυγίανσης του κομπόστ (ppm) |
| 20.09.07 | 40.00 | 4.30 | 20.00 | 15.70 |
| 21.09.07 | 40.00 | 2.16 | 20.00 | 17.84 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | 16.77 |

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αλλά και στο Διάγραμμα 9-13, υπάρχει σταθερή διαφορά στη συγκέντρωση. Έτσι και την 1^η και τη 2^η μέρα παρατηρείται σταθερή διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου, η οποία είναι της τάξης των 15 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα τολουολίου, που συγκρατείται από το κομπόστ είναι της τάξης των **15ppm**.



Διάγραμμα 9-13: Μεταβολή συγκεντρώσεων του τολουολίου στο κομπόστ

Συμπερασματικά, η απόδοση του κομπόστ και μόνο για την εξυγίανση του συγκεκριμένου εδάφους από το τολουόλιο είναι:

$$\text{Απόδοση κομπόστ στο τολουόλιο: } \frac{C_{out}}{C_{in}} \times 100\% = \frac{16.77 \text{ ppm}}{40 \text{ ppm}} \times 100\% = 41.92\%$$

9.5.3 Τολουόλιο στο διατομήτη

Κατά την ανάλυση μετρήθηκε εμβαδό ίσο με 264 864 τετραγωνικές μονάδες, επιφάνεια που αντιστοιχεί σε 2.943 ppm. Δεδομένης της 1:9 αραιώσης, η συγκέντρωση του τολουολίου στο αρχικό διάλυμα είναι 29.43 ppm.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 9-29 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του τολουολίου των δειγμάτων εξόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με διατομήτη.

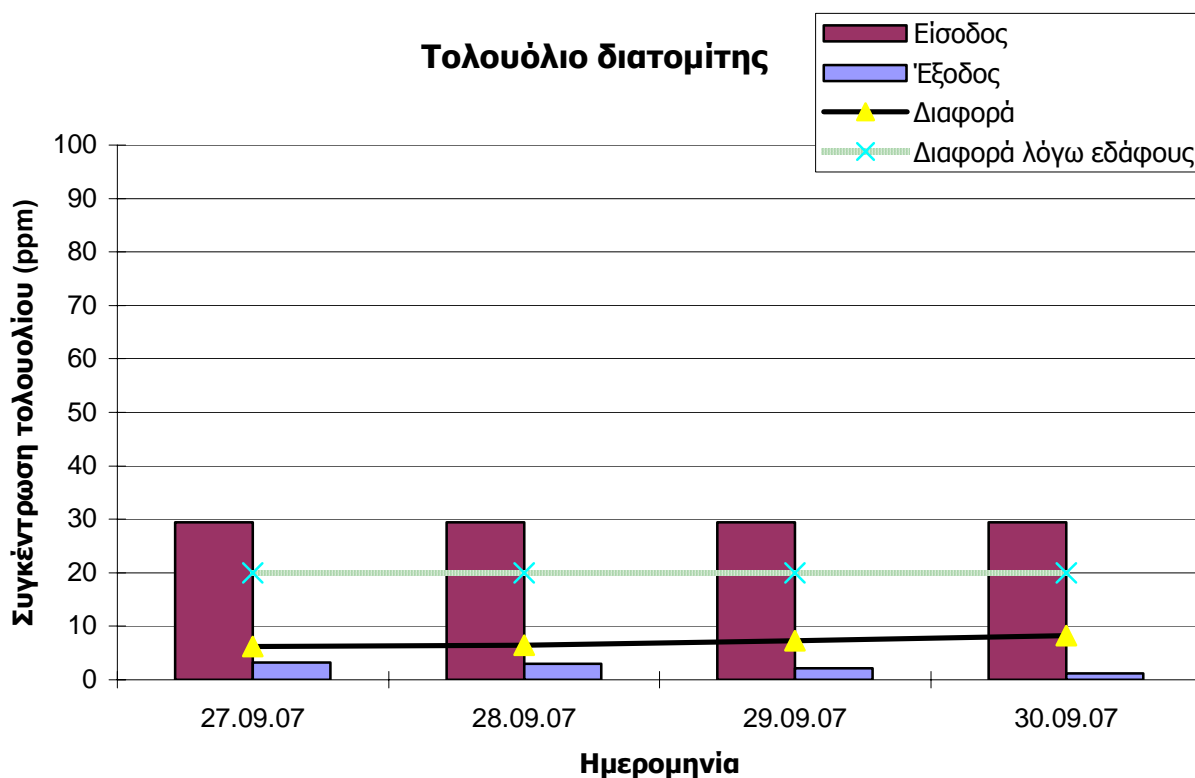
Πίνακας 9-29: Αποτελέσματα προσδιορισμού του τολουολίου στο διατομίτη στην έξοδο

| ΈΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---|--------------------------|--------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 27_1_exo | 29 336 | 1.06 | 3.18 | Αραίωση 1:2 | 27.09.07 |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 3.18 | | |
| 28_1_exo | 37 061 | 1.12 | 2.24 | Αραίωση 1:1 | 28.09.07 |
| 28_2_exo | 11 615 | 0.92 | 3.67 | Αραίωση 1:3 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 2.96 | | |
| 29_1_exo | 31 916 | 1.08 | 2.16 | Αραίωση 1:1 | 29.09.07 |
| 29_2_exo | 29 898 | 1.06 | 2.13 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 2.14 | | |
| 30_1_exo | 44 350 | 1.18 | 1.18 | | 30.09.07 |
| 30_2_exo | 183 225 | 2.29 | 2.29 | Απορρίπτεται | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 1.18 | | |

Πίνακας 9-30: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του τολουολίου στο διατομίτη

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά λόγω εξάτμισης και προσρόφησης εδάφους (ppm) | Δυναμικό εξυγίανσης του κομπόστ (ppm) |
| 27.09.07 | 29.43 | 3.18 | 20.00 | 6.25 |
| 28.09.07 | 29.43 | 2.96 | 20.00 | 6.47 |
| 29.09.07 | 29.43 | 2.14 | 20.00 | 7.29 |
| 30.09.07 | 29.43 | 1.18 | 20.00 | 8.25 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | 7.06 |

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αλλά και στο Διάγραμμα 9-14, υπάρχει σταθερή διαφορά στη συγκέντρωση. Έτσι και τις 4 ημέρες παρατηρείται σταθερή διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου, η οποία είναι της τάξης των 10 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα τολουολίου, που συγκρατείται από το διατομίτη είναι της τάξης των 10ppm.



Διάγραμμα 9-14: Μεταβολή συγκεντρώσεων του τολουολίου στο διατομίτη

Συμπερασματικά, η απόδοση του διατομίτη και μόνο για την εξυγίανση του συγκεκριμένου εδάφους από το τολουόλιο είναι:

$$\text{Απόδοση διατομίτη στο τολουόλιο: } \frac{C_{out}}{C_{in}} \times 100\% = \frac{7.06 \text{ ppm}}{29.43 \text{ ppm}} \times 100\% = 23.99\%$$

9.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΙΘΥΛΟ-ΒΕΝΖΟΛΙΟΥ

Η εξίσωση για το αιθυλο-βενζόλιο είναι της μορφής:

$$y = 3 \cdot 10^{-6} x + 0.8186 \quad (\text{Εξίσωση 9-4})$$

$$\text{με } R^2 = 0.9976$$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το χρωματογράφημα για κάθε πείραμα είναι τα εξής:

9.6.1 Αιθυλο-βενζόλιο Τυφλό

Πίνακας 9-31: Αποτελέσματα προσδιορισμού του αιθυλο-βενζολίου στο τυφλό στην είσοδο

| ΕΙΣΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------|----------------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Αραίωση 1:9) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 17_1_eis | 14 153 | 0.86 | 8.61 | Απορρίπτεται | 17.08.07 (15 ppm) |
| 17_2_eis | 175 299 | 1.34 | 13.44 | | |
| 17_3_eis | 146 385 | 1.26 | 12.58 | | |
| 17_4_eis | 178 848 | 1.36 | 13.55 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 13.19 | | |
| 20_1_eis | 374 979 | 1.94 | 19.44 | | 20.08.07 (15 ppm) |
| 20_2_eis | 518 896 | 2.38 | 23.75 | Απορρίπτεται | |
| 20_3_eis | 630 899 | 2.71 | 27.11 | Απορρίπτεται | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 19.44 | | |
| 21_1_eis | 198 756 | 1.41 | 14.15 | | 21.08.07 (15 ppm) |
| 21_2_eis | 248 027 | 1.56 | 15.63 | | |
| 21_3_eis | 270 473 | 1.63 | 16.30 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 15.36 | | |

Η 1^η τιμή απορρίπτεται, αφού είναι προφανές και βάσει των επομένων, πως το σύστημα δεν είχε ισορροπήσει ακόμη όταν λήφθηκε αυτό το δείγμα. Η συγκέντρωση για όλες τις ημέρες είναι της τάξης των 15 ppm και για το λόγο αυτό απορρίπτονται οι δύο επόμενες τιμές, που είναι μεγαλύτερες από τα 15ppm.

Πίνακας 9-32: Αποτελέσματα προσδιορισμού του αιθυλο-βενζολίου στο τυφλό στην έξοδο

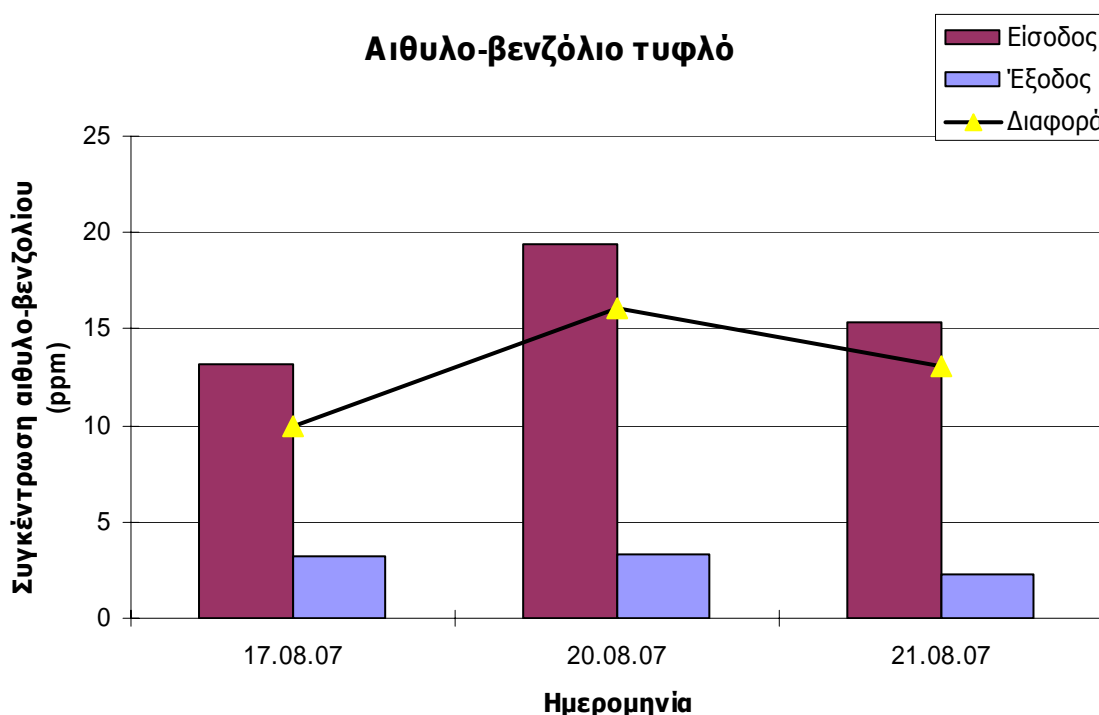
| ΈΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---|--------------------------|--------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 17_3_exo | 107 176 | 1.14 | 3.42 | Αραίωση 1:2 | 17.08.07 |
| 17_4_exo | 193 755 | 1.40 | 2.80 | Αραίωση 1:1 | |
| 17_5_exo | 309 240 | 1.75 | 3.49 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 3.24 | | |
| 20_1_exo | 157 009 | 1.29 | 3.87 | Αραίωση 1:2 | 20.08.07 |
| 20_2_exo | 240 124 | 1.54 | 3.08 | Αραίωση 1:1 | |
| 20_3_exo | 396 852 | 2.01 | 3.01 | Αραίωση 2:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 3.32 | | |
| 21_1_exo | 291 502 | 1.69 | 2.54 | Αραίωση 2:1 | 21.08.07 |
| 21_2_exo | 423 842 | 2.09 | 2.09 | Αραίωση 1:1 | |
| 21_3_exo | 452 347 | 2.18 | 3.26 | Απορρίπτεται | |
| 21_4_exo | 489 193 | 2.29 | 2.29 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 2.31 | | |

Τα συστατικά του ΒΤΕΧ, λόγω της πολύ υψηλής πτητικότητάς τους εξατμίζονται, οπότε είναι και λογικό στην έξοδο να παρατηρούνται συγκεντρώσεις της τάξης των 5 ppm, όταν στην είσοδο η τροφοδοσία είναι ίση με 15 ppm.

Πίνακας 9-33: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του αιθυλο-βενζολίου στο τυφλό

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά Συγκέντρωσης (ppm) |
| 17.08.07 | 13.19 | 3.24 | 9.95 |
| 20.08.07 | 19.44 | 3.32 | 16.12 |
| 21.08.07 | 15.36 | 2.31 | 13.05 |

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αλλά και στο Διάγραμμα 9-15, υπάρχει διαφορά της τάξης των 15ppm στις συγκεντρώσεις. Έτσι, ενώ τη 1^η μέρα παρατηρείται διαφορά 10ppm μεταξύ εισόδου και εξόδου, στη συνέχεια το σύστημα ισορροπεί πλήρως, και η διαφορά αυτή παγώνεται στα 15 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα αιθυλο-βενζολίου που δεν καταλήγει στην έξοδο είναι της τάξης των **15ppm**.



Διάγραμμα 9-15: Μεταβολή συγκεντρώσεων του αιθυλο-βενζολίου στο τυφλό

9.6.2 Αιθυλο-βενζόλιο στο κομπόστ

Στον Πίνακα 9-34 καταγράφονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ως προς το αιθυλο-βενζόλιο των δειγμάτων εισόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με κομπόστ.

Πίνακας 9-34: Αποτελέσματα προσδιορισμού του αιθυλο-βενζολίου στο κομπόστ στην είσοδο

| ΕΙΣΟΔΟΣ | | | | | |
|-----------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|--------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Αραίωση 1:9) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 18_1_eis | 442 973 | 2.15 | 21.48 | | 18.09.07 |
| 21_1_eis | 434 969 | 2.12 | 21.24 | | 21.09.07 |

Κατά τη διάρκεια του πειράματος κομπόστ, η συγκέντρωση του αιθυλο-βενζολίου στην είσοδο ήταν της τάξης των 20 ppm.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 9-35 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του αιθυλο-βενζολίου των δειγμάτων εξόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με κομπόστ.

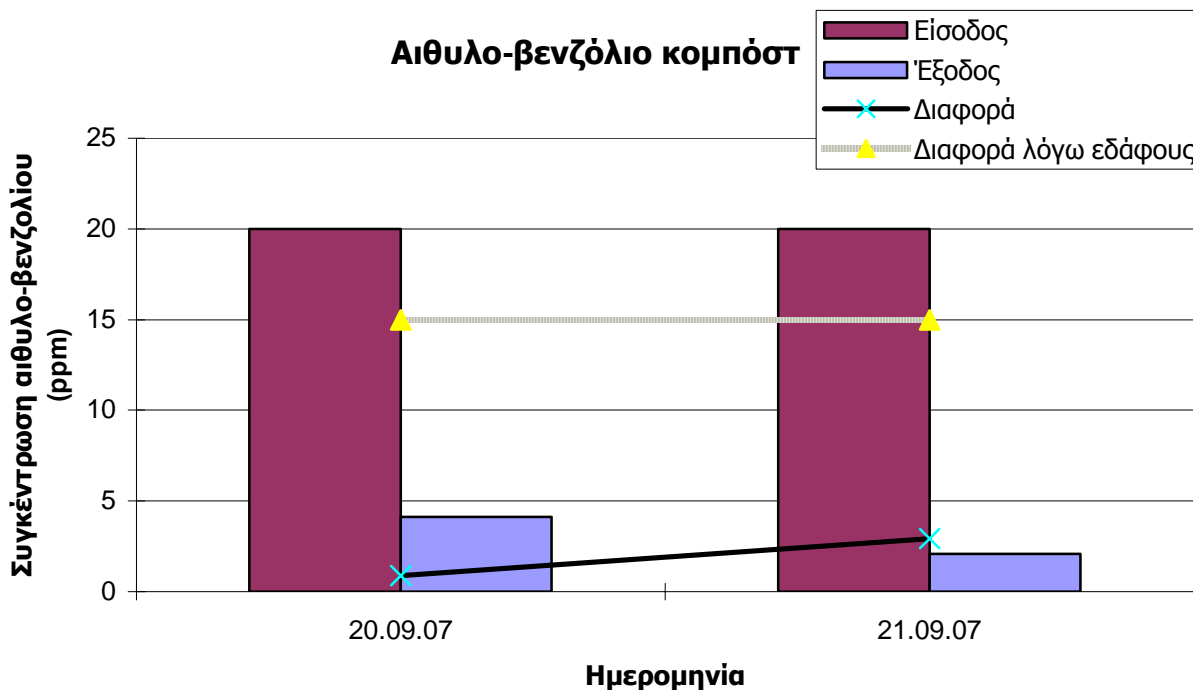
Πίνακας 9-35: Αποτελέσματα προσδιορισμού του αιθυλο-βενζολίου στο κομπόστ στην έξοδο

| ΈΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---|--------------------------|--------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 18_2_exo | 9 771 | 0.85 | 0.85 | Απορρίπτεται | 18.09.07 |
| 19_1_exo | 1 532 | 0.82 | 0.82 | Απορρίπτεται | 19.09.07 |
| 19_2_exo | 3 611 | 0.83 | 0.83 | Απορρίπτεται | |
| 20_1_exo | 2 457 | 0.83 | 4.96 | Αραίωση 1:5 | 20.09.07 |
| 20_2_exo | 1 497 | 0.82 | 3.29 | Αραίωση 1:3 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 4.12 | | |
| 21_1_exo | 2 761 | 0.83 | 2.48 | Αραίωση 1:2 | 21.09.07 |
| 21_2_exo | 4 841 | 0.83 | 1.67 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 2.08 | | |

Πίνακας 9-36: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του αιθυλο-βενζολίου στο κομπόστ

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά λόγω εξάτμισης και προσρόφησης εδάφους (ppm) | Δυναμικό εξυγίανσης του κομπόστ (ppm) |
| 20.09.07 | 20.00 | 4.12 | 15.00 | 0.88 |
| 21.09.07 | 20.00 | 2.08 | 15.00 | 2.92 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | 1.90 |

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αλλά και στο Διάγραμμα 9-16, υπάρχει σταθερή διαφορά στη συγκέντρωση. Έτσι και την 1^η και τη 2^η μέρα παρατηρείται σταθερή διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου, η οποία είναι της τάξης των 2 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα αιθυλο-βενζολίου, που συγκρατείται από το κομπόστ είναι της τάξης των **2ppm**.



Διάγραμμα 9-16: Μεταβολή συγκεντρώσεων του αιθυλο-βενζολίου στο κομπόστ

Συμπερασματικά, η απόδοση του κομπόστ και μόνο για την εξυγίανση του συγκεκριμένου εδάφους από το αιθυλο-βενζόλιο είναι:

$$\text{Απόδοση κομπόστ στο αιθυλο-βενζόλιο: } \frac{C_{out}}{C_{in}} \times 100\% = \frac{1.90 \text{ ppm}}{20 \text{ ppm}} \times 100\% = 9.50\%$$

9.6.3 Αιθυλο-βενζόλιο στο διατομήτη

Έτσι, κατά την ανάλυση μετρήθηκε εμβαδό ίσο με 319 541 τετραγωνικές μονάδες, επιφάνεια που αντιστοιχεί σε 1.777 ppm. Δεδομένης της 1:9 αραίωσης, η συγκέντρωση του αιθυλο-βενζολίου στο αρχικό διάλυμα είναι 17.77 ppm.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 9-37 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του αιθυλο-βενζολίου των δειγμάτων εξόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με διατομίτη.

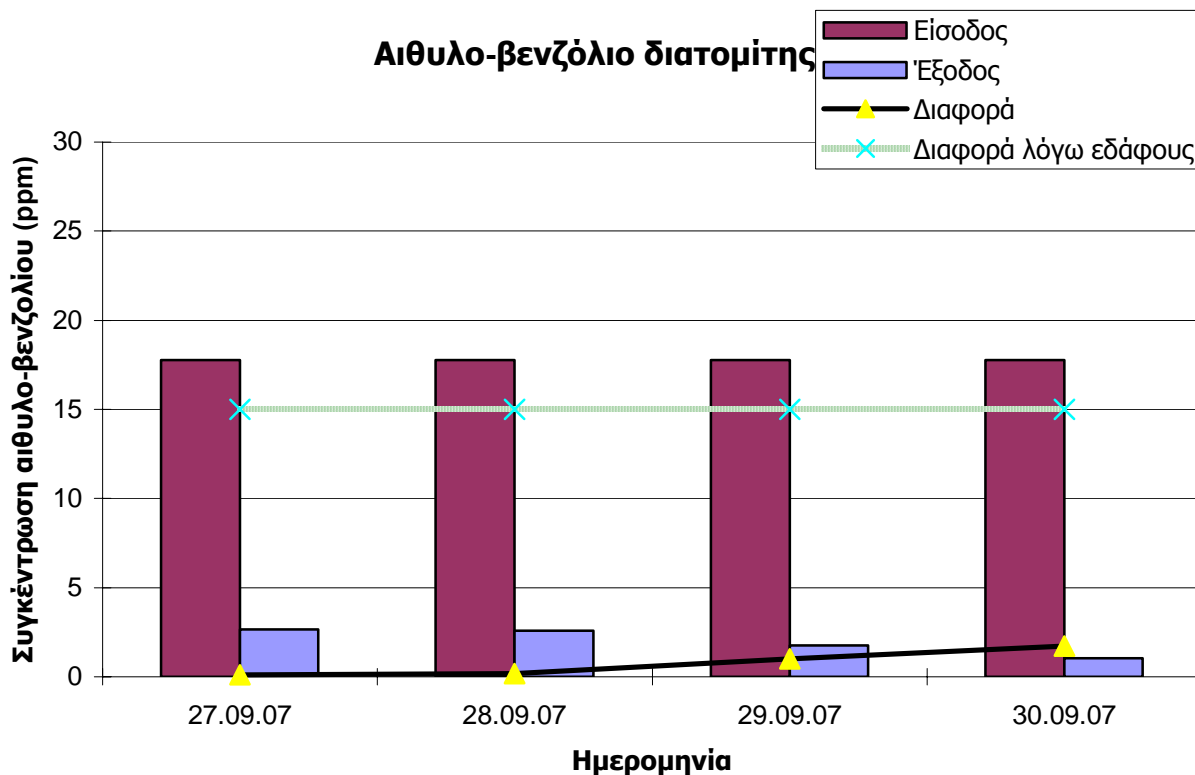
Πίνακας 9-37: Αποτελέσματα προσδιορισμού του αιθυλο-βενζολίου στο διατομίτη στην έξοδο

| ΈΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---|--------------------------|-------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 27_1_exo | 24 223 | 0.89 | 2.67 | Αραίωση 1:2 | 27.09.07 |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 2.67 | | |
| 28_1_exo | 28 474 | 0.90 | 1.81 | Αραίωση 1:1 | 28.09.07 |
| 28_2_exo | 7 029 | 0.84 | 3.36 | Αραίωση 1:3 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 2.58 | | |
| 29_1_exo | 21 803 | 0.88 | 1.77 | Αραίωση 1:1 | 29.09.07 |
| 29_2_exo | 15 132 | 0.86 | 1.73 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 1.75 | | |
| 30_1_exo | 39 160 | 0.94 | 0.94 | | 30.09.07 |
| 30_2_exo | 100 417 | 1.12 | 1.12 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 1.03 | | |

Πίνακας 9-38: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του αιθυλο-βενζολίου στο διατομίτη

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά λόγω εξάτμισης και προσρόφησης εδάφους (ppm) | Δυναμικό εξυγίανσης του κομπόστ (ppm) |
| 27.09.07 | 17.77 | 2.67 | 15.00 | 0.10 |
| 28.09.07 | 17.77 | 2.58 | 15.00 | 0.19 |
| 29.09.07 | 17.77 | 1.75 | 15.00 | 1.02 |
| 30.09.07 | 17.77 | 1.03 | 15.00 | 1.74 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | 0.76 |

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αλλά και στο Διάγραμμα 9-17, υπάρχει σταθερή διαφορά στη συγκέντρωση. Έτσι και τις 4 ημέρες παρατηρείται σταθερή διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου, η οποία είναι της τάξης του 1 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα αιθυλο-βενζολίου, που συγκρατείται από το διατομίτη είναι της τάξης του 1 ppm.



Διάγραμμα 9-17: Μεταβολή συγκεντρώσεων του αιθυλο-βενζολίου στο διατομίτη

Συμπερασματικά, η απόδοση του διατομίτη και μόνο για την εξυγίανση του συγκεκριμένου εδάφους από το αιθυλο-βενζόλιο είναι:

$$\text{Απόδοση διατομίτη στο αιθυλο-βενζόλιο: } \frac{C_{out}}{C_{in}} \times 100\% = \frac{0.76 \text{ ppm}}{17.77 \text{ ppm}} \times 100\% = 4.28\%$$

9.7 ΑΝΑΛΥΣΗ Π-ΞΥΛΟΛΙΟΥ

Η εξίσωση για το π-ξυλόλιο είναι της μορφής:

$$y = 6 \cdot 10^{-6} x + 0.0167 \quad (\text{Εξίσωση 9-5})$$

$$\text{με } R^2 = 0.9993$$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το χρωματογράφημα για κάθε πείραμα είναι τα εξής:

9.7.1 π-ξυλόλιο Τυφλό

Πίνακας 9-39: Αποτελέσματα προσδιορισμού του π-ξυλολίου στο τυφλό στην είσοδο

| ΕΙΣΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------|----------------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Αραίωση 1:9) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 17_1_eis | 15 492 | 0.11 | 1.10 | Απορρίπτεται | 17.08.07 (10 ppm) |
| 17_2_eis | 189 016 | 1.15 | 11.51 | | |
| 17_3_eis | 157 377 | 0.96 | 9.61 | | |
| 17_4_eis | 191 935 | 1.17 | 11.68 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 10.93 | | |
| 20_1_eis | 360 006 | 2.18 | 21.77 | | 20.08.07 (20 ppm) |
| 20_2_eis | 512 780 | 3.09 | 30.93 | Απορρίπτεται | |
| 20_3_eis | 624 393 | 3.76 | 37.63 | Απορρίπτεται | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 21.77 | | |
| 21_1_eis | 199 527 | 1.21 | 12.14 | | 21.08.07 (15 ppm) |
| 21_2_eis | 244 734 | 1.48 | 14.85 | | |
| 21_3_eis | 272 568 | 1.65 | 16.52 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 14.50 | | |

Η 1^η τιμή απορρίπτεται, αφού είναι προφανές και βάσει των επομένων, πως το σύστημα δεν είχε ισορροπήσει ακόμη όταν λήφθηκε αυτό το δείγμα. Η συγκέντρωση για την 1^η ημέρα είναι της τάξης των 10ppm, ενώ για τη 2^η ημέρα αναμενόταν συγκέντρωση της τάξης των 20 ppm και για το λόγο αυτό απορρίπτονται οι δύο επόμενες τιμές, που είναι μεγαλύτερες από τα 20ppm. Τέλος, κατά την 3^η ημέρα, η συγκέντρωση θεωρείται 15ppm.

Πίνακας 9-40: Αποτελέσματα προσδιορισμού του π-ξυλολίου στο τυφλό στην έξοδο

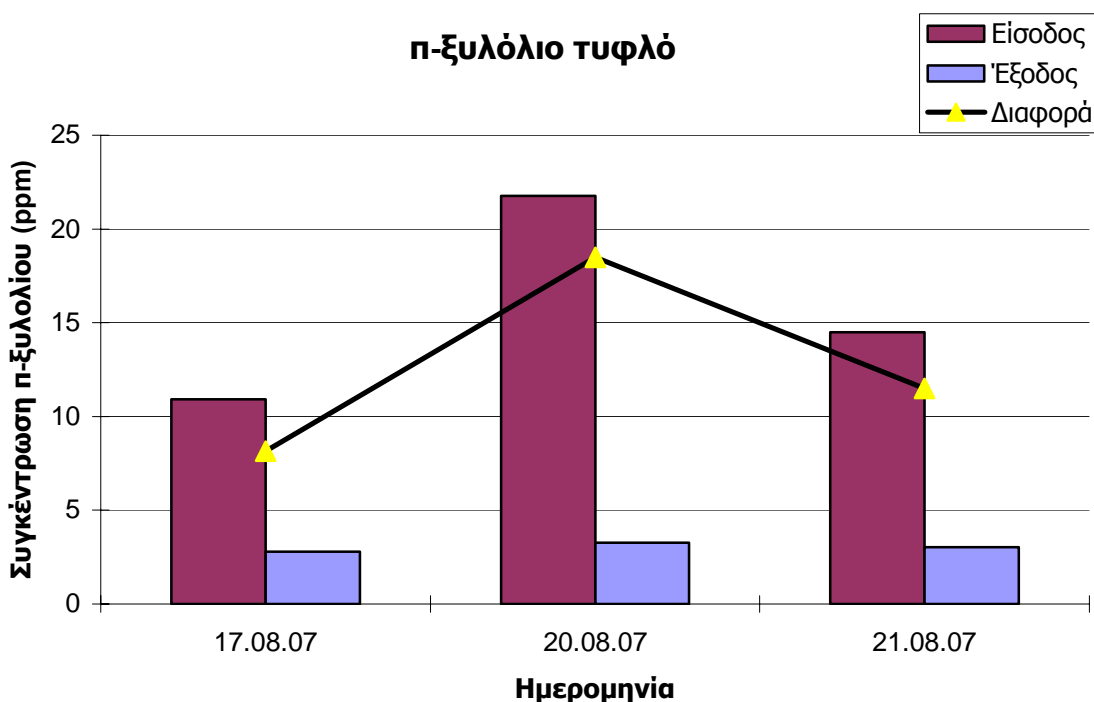
| ΈΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|---------|---|--------------------------|--------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 17_3_exo | 110 740 | 0.68 | 2.04 | Αραίωση 1:2 | 17.08.07 |
| 17_4_exo | 204 078 | 1.24 | 2.48 | Αραίωση 1:1 | |
| 17_5_exo | 319 034 | 1.93 | 3.86 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 2.79 | | |
| 20_1_exo | 167 419 | 1.02 | 3.06 | Αραίωση 1:2 | 20.08.07 |
| 20_2_exo | 248 022 | 1.50 | 3.01 | Αραίωση 1:1 | |
| 20_3_exo | 417 800 | 2.52 | 3.79 | Αραίωση 2:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 3.29 | | |
| 21_1_exo | 308 603 | 1.87 | 2.80 | Αραίωση 2:1 | 21.08.07 |
| 21_2_exo | 451 733 | 2.73 | 2.73 | Αραίωση 1:1 | |
| 21_3_exo | 541 033 | 3.10 | 4.65 | Απορρίπτεται | |
| 21_4_exo | 584 881 | 3.53 | 3.53 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 3.02 | | |

Τα συστατικά του ΒΤΕΧ, λόγω της πολύ υψηλής πτητικότητάς τους εξατμίζονται, οπότε είναι και λογικό στην έξοδο να παρατηρούνται συγκεντρώσεις της τάξης των 3 ppm, όταν στην είσοδο η τροφοδοσία είναι ίση με 15 ppm.

Πίνακας 9-41: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του π-ξυλολίου στο τυφλό

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά Συγκέντρωσης (ppm) |
| 17.08.07 | 10.93 | 2.79 | 8.14 |
| 20.08.07 | 21.77 | 3.29 | 18.48 |
| 21.08.07 | 14.50 | 3.02 | 11.48 |

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αλλά και στο Διάγραμμα 9-18, υπάρχει διαφορά της τάξης των 12ppm στις συγκεντρώσεις. Έτσι, ενώ τη 1^η μέρα παρατηρείται διαφορά 8ppm μεταξύ εισόδου και εξόδου, στη συνέχεια και αφού παρατηρείται μια κορυφή της τάξης των 20ppm, το σύστημα ισορροπεί πλήρως, και η διαφορά αυτή παγιώνεται στα 12 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα π-ξυλολίου που δεν καταλήγει στην έξοδο είναι της τάξης των 12ppm.



Διάγραμμα 9-18: Μεταβολή συγκεντρώσεων του π-ξυλολίου στο τυφλό

9.7.2 π-ξυλόλιο στο κομπόστ

Στον Πίνακα 9-42 καταγράφονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του π-ξυλολίου των δειγμάτων εισόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με κομπόστ.

Πίνακας 9-42: Αποτελέσματα προσδιορισμού του π-ξυλολίου στο κομπόστ στην είσοδο

| ΕΙΣΟΔΟΣ | | | | | |
|-----------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|--------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Αραίωση 1:9) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 18_1_eis | 546 245 | 3.29 | 32.94 | | 18.09.07 |
| 21_1_eis | 482 004 | 2.91 | 29.09 | | 21.09.07 |

Κατά τη διάρκεια του πειράματος κομπόστ, η συγκέντρωση του π-ξυλολίου στην είσοδο ήταν της τάξης των 30 ppm.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 9-43 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ως προς το π-ξυλόλιο των δειγμάτων εξόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με κομπόστ.

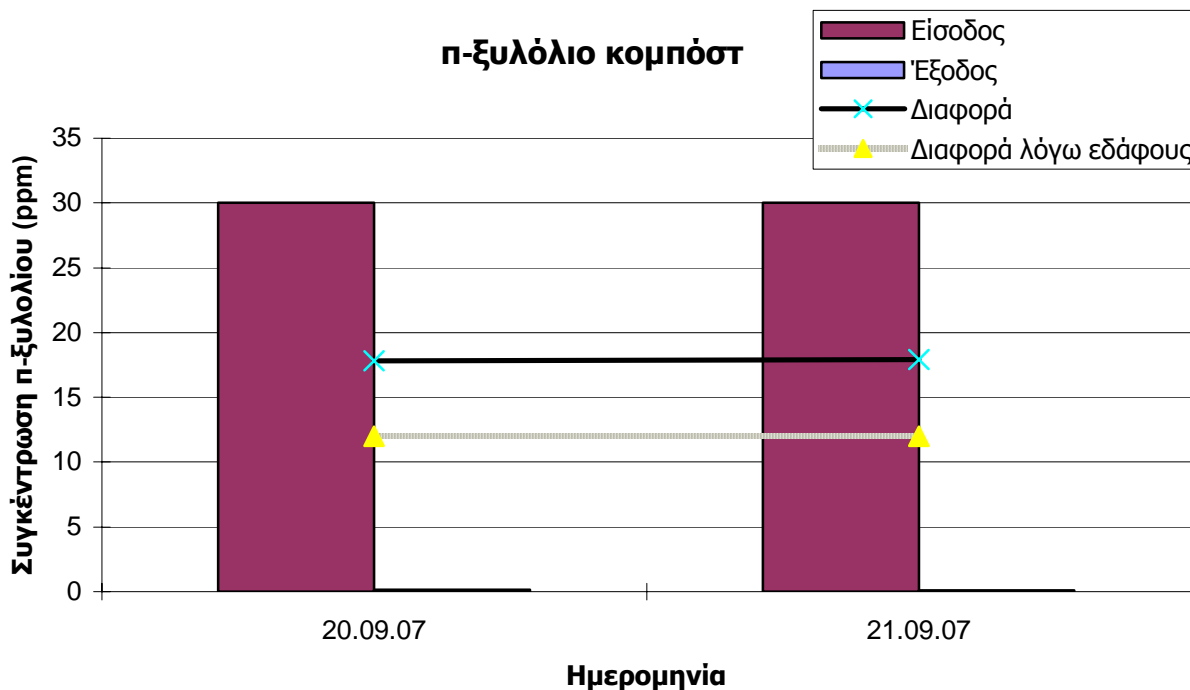
Πίνακας 9-43: Αποτελέσματα προσδιορισμού του π-ξυλολίου στο κομπόστ στην έξοδο

| ΈΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---|--------------------------|--------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 18_2_exo | 1 456 | 0.03 | 0.03 | Απορρίπτεται | 18.09.07 |
| 19_1_exo | 1 548 | 0.03 | 0.03 | Απορρίπτεται | 19.09.07 |
| 19_2_exo | 3 042 | 0.03 | 0.03 | Απορρίπτεται | |
| 20_1_exo | 2 860 | 0.03 | 0.20 | Αραίωση 1:5 | 20.09.07 |
| 20_2_exo | 1 711 | 0.03 | 0.11 | Αραίωση 1:3 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 0.16 | | |
| 21_1_exo | 2 117 | 0.03 | 0.09 | Αραίωση 1:2 | 21.09.07 |
| 21_2_exo | 4 197 | 0.04 | 0.08 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 0.08 | | |

Πίνακας 9-44: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του π-ξυλολίου στο κομπόστ

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά λόγω εξάτμισης και προσρόφησης εδάφους (ppm) | Δυναμικό εξυγίανσης του κομπόστ (ppm) |
| 20.09.07 | 30.00 | 0.16 | 12.00 | 17.84 |
| 21.09.07 | 30.00 | 0.08 | 12.00 | 17.92 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | 17.88 |

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αλλά και στο Διάγραμμα 9-19, υπάρχει σταθερή διαφορά στη συγκέντρωση. Έτσι και την 1^η και τη 2^η μέρα παρατηρείται σταθερή διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου, η οποία είναι της τάξης των 18 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα π-ξυλολίου, που συγκρατείται από το κομπόστ είναι της τάξης των **18ppm**.



Διάγραμμα 9-19: Μεταβολή συγκεντρώσεων του π-ξυλολίου στο κομπόστ

Συμπερασματικά, η απόδοση του κομπόστ και μόνο για την εξυγίανση του συγκεκριμένου εδάφους από το π-ξυλόλιο είναι:

$$\text{Απόδοση κομπόστ στο π-ξυλόλιο: } \frac{C_{out}}{C_{in}} \times 100\% = \frac{17.88 \text{ ppm}}{30 \text{ ppm}} \times 100\% = 59.60\%$$

9.7.3 π-ξυλόλιο στο διατομήτη

Έτσι, κατά την ανάλυση μετρήθηκε εμβαδό ίσο με 332 034 τετραγωνικές μονάδες, επιφάνεια που αντιστοιχεί σε 2.001 ppm. Δεδομένης της 1:9 αραίωσης, η συγκέντρωση του π-ξυλολίου στο αρχικό διάλυμα είναι 20.01 ppm.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 9-45 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του π-ξυλολίου των δειγμάτων εξόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με διατομή.

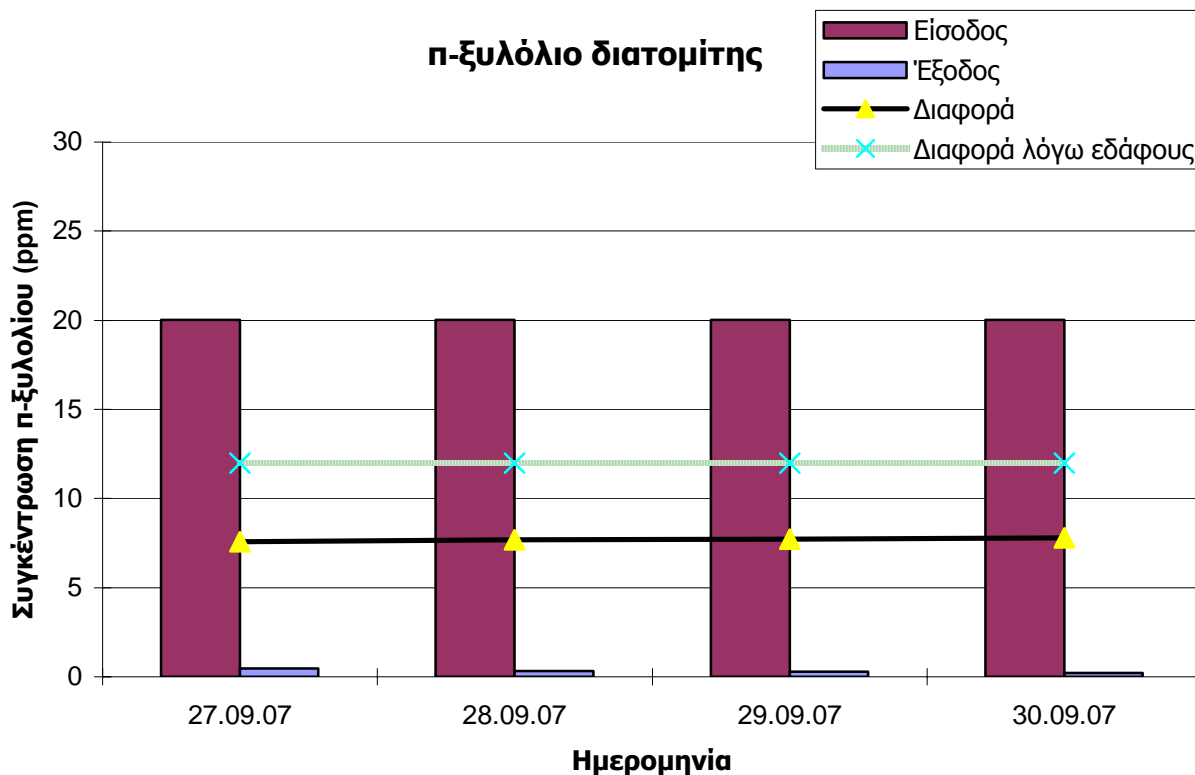
Πίνακας 9-45: Αποτελέσματα προσδιορισμού του π-ξυλολίου στο διατομή στην έξοδο

| ΈΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---|--------------------------|--------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 27_1_exo | 21 950 | 0.15 | 0.45 | Αραίωση 1:2 | 27.09.07 |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 0.45 | | |
| 28_1_exo | 28 925 | 0.19 | 0.38 | Αραίωση 1:1 | 28.09.07 |
| 28_2_exo | 9 573 | 0.07 | 0.30 | Αραίωση 1:3 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 0.34 | | |
| 29_1_exo | 24 028 | 0.16 | 0.32 | Αραίωση 1:1 | 29.09.07 |
| 29_2_exo | 21 149 | 0.14 | 0.29 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 0.30 | | |
| 30_1_exo | 34 021 | 0.22 | 0.22 | | 30.09.07 |
| 30_2_exo | 158 814 | 0.97 | 0.97 | Απορρίπτεται | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 0.22 | | |

Πίνακας 9-46: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του π-ξυλολίου στο διατομή

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά λόγω εξάτμισης και προσρόφησης εδάφους (ppm) | Δυναμικό εξυγίανσης του κομπόστ (ppm) |
| 27.09.07 | 20.01 | 0.45 | 12.00 | 7.56 |
| 28.09.07 | 20.01 | 0.34 | 12.00 | 7.67 |
| 29.09.07 | 20.01 | 0.30 | 12.00 | 7.71 |
| 30.09.07 | 20.01 | 0.22 | 12.00 | 7.79 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | 7.68 |

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αλλά και στο Διάγραμμα 9-20, υπάρχει σταθερή διαφορά στη συγκέντρωση. Έτσι και τις 4 ημέρες παρατηρείται σταθερή διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου, η οποία είναι της τάξης του 7.5 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα τολουολίου, που συγκρατείται από το διατομίτη είναι της τάξης του 7.5 ppm.



Διάγραμμα 9-20: Μεταβολή συγκεντρώσεων του π-ξυλολίου στο διατομίτη

Συμπερασματικά, η απόδοση του διατομίτη και μόνο για την εξυγίανση του συγκεκριμένου εδάφους από το π-ξυλόλιο είναι:

$$\text{Απόδοση διατομίτη στο π-ξυλόλιο: } \frac{C_{out}}{C_{in}} \times 100\% = \frac{7.68 \text{ ppm}}{20.01 \text{ ppm}} \times 100\% = 38.4\%$$

9.8 ΑΝΑΛΥΣΗ Ο-ΞΥΛΟΛΙΟΥ

Η εξίσωση για το ο-ξυλόλιο είναι της μορφής:

$$y = 3 \cdot 10^{-6} x + 0.4399 \quad (\text{Εξίσωση 9-6})$$

$$\text{με } R^2 = 0.9930$$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το χρωματογράφημα για κάθε πείραμα είναι τα εξής:

9.8.1 ο-ξυλόλιο Τυφλό

Πίνακας 9-47: Αποτελέσματα προσδιορισμού του ο-ξυλολίου στο τυφλό στην είσοδο

| ΕΙΣΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------|----------------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Αραίωση 1:9) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 17_1_eis | 23 085 | 0.51 | 5.09 | Απορρίπτεται | 17.08.07 (10 ppm) |
| 17_2_eis | 260 093 | 1.22 | 12.20 | | |
| 17_3_eis | 216 466 | 1.09 | 10.89 | | |
| 17_4_eis | 267 900 | 1.24 | 12.44 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 11.84 | | |
| 20_1_eis | 590 983 | 2.21 | 22.13 | | 20.08.07 (20 ppm) |
| 20_2_eis | 813 046 | 2.87 | 28.79 | Απορρίπτεται | |
| 20_3_eis | 1 015 586 | 3.48 | 34.87 | Απορρίπτεται | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 22.13 | | |
| 21_1_eis | 272 806 | 1.26 | 12.58 | | 21.08.07 (15 ppm) |
| 21_2_eis | 331 890 | 1.44 | 14.36 | | |
| 21_3_eis | 376 936 | 1.57 | 15.71 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 14.22 | | |

Η 1^η τιμή απορρίπτεται, αφού είναι προφανές και βάσει των επομένων, πως το σύστημα δεν είχε ισορροπήσει ακόμη όταν λήφθηκε αυτό το δείγμα. Η συγκέντρωση για την 1^η ημέρα είναι της τάξης των 10ppm, ενώ για τη 2^η ημέρα αναμενόταν συγκέντρωση της τάξης των 20 ppm και για το λόγο αυτό απορρίπτονται οι δύο επόμενες τιμές, που είναι μεγαλύτερες από τα 20ppm. Τέλος, κατά την 3^η ημέρα, η συγκέντρωση θεωρείται 15ppm.

Πίνακας 9-48: Αποτελέσματα προσδιορισμού του ο-ξυολίου στο τυφλό στην έξοδο

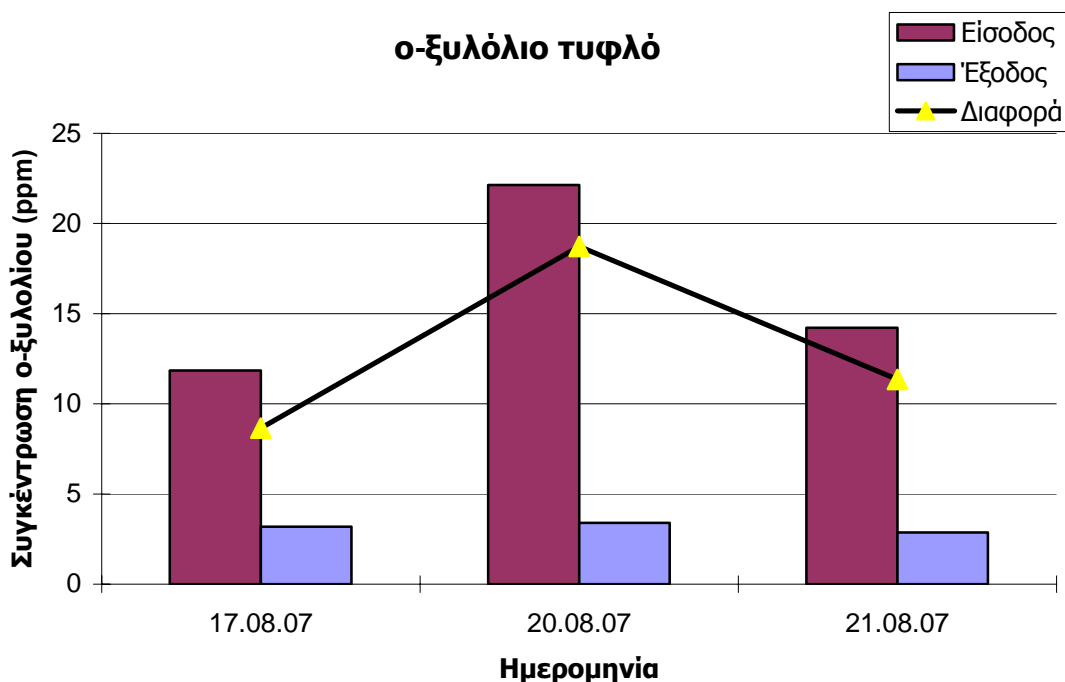
| ΈΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---|--------------------------|--------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 17_3_exo | 194 300 | 1.02 | 3.07 | Αραίωση 1:2 | 17.08.07 |
| 17_4_exo | 314 406 | 1.38 | 2.77 | Αραίωση 1:1 | |
| 17_5_exo | 467 765 | 1.84 | 3.69 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 3.18 | | |
| 20_1_exo | 253 200 | 1.20 | 3.60 | Αραίωση 1:2 | 20.08.07 |
| 20_2_exo | 386 498 | 1.60 | 3.20 | Αραίωση 1:1 | |
| 20_3_exo | 625 051 | 2.32 | 3.47 | Αραίωση 2:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 3.42 | | |
| 21_1_exo | 493 941 | 1.92 | 2.88 | Αραίωση 2:1 | 21.08.07 |
| 21_2_exo | 727 032 | 2.62 | 2.62 | Αραίωση 1:1 | |
| 21_3_exo | 775 749 | 2.77 | 4.15 | Απορρίπτεται | |
| 21_4_exo | 902 443 | 3.15 | 3.15 | | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 2.88 | | |

Τα συστατικά του ΒΤΕΧ, λόγω της πολύ υψηλής πτητικότητάς τους εξατμίζονται, οπότε είναι και λογικό στην έξοδο να παρατηρούνται συγκεντρώσεις της τάξης των 3 ppm, όταν στην είσοδο η τροφοδοσία είναι ίση με 15 ppm.

Πίνακας 9-49: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του ο-ξυολίου στο τυφλό

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά Συγκέντρωσης (ppm) |
| 17.08.07 | 11.84 | 3.18 | 8.66 |
| 20.08.07 | 22.13 | 3.42 | 18.71 |
| 21.08.07 | 14.22 | 2.88 | 11.34 |

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αλλά και στο Διάγραμμα 9-21, υπάρχει διαφορά της τάξης των 12ppm στις συγκεντρώσεις. Έτσι, ενώ τη 1^η μέρα παρατηρείται διαφορά 8ppm μεταξύ εισόδου και εξόδου, στη συνέχεια και αφού παρατηρείται μια κορυφή της τάξης των 18ppm, το σύστημα ισορροπεί πλήρως, και η διαφορά αυτή παγιώνεται στα 12 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα ο-ξυολίου που δεν καταλήγει στην έξοδο είναι της τάξης των 12ppm.



Διάγραμμα 9-21: Μεταβολή συγκεντρώσεων του ο-ξυολίου στο τυφλό

9.8.2 ο-ξυόλιο στο κομπόστ

Στον Πίνακα 9-50 καταγράφονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του ο-ξυολίου των δειγμάτων εισόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με κομπόστ.

Πίνακας 9-50: Αποτελέσματα προσδιορισμού του ο-ξυολίου στο κομπόστ στην είσοδο

| ΕΙΣΟΔΟΣ | | | | | |
|-----------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|--------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Αραίωση 1:9) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 18_1_eis | 685 307 | 2.50 | 24.96 | | 18.09.07 |
| 21_1_eis | 624 183 | 2.31 | 23.12 | | 21.09.07 |

Κατά τη διάρκεια του πειράματος κομπόστ, η συγκέντρωση του ο-ξυολίου στην είσοδο ήταν της τάξης των 25 ppm.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 9-51 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του ο-ξυολίου των δειγμάτων εξόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με κομπόστ.

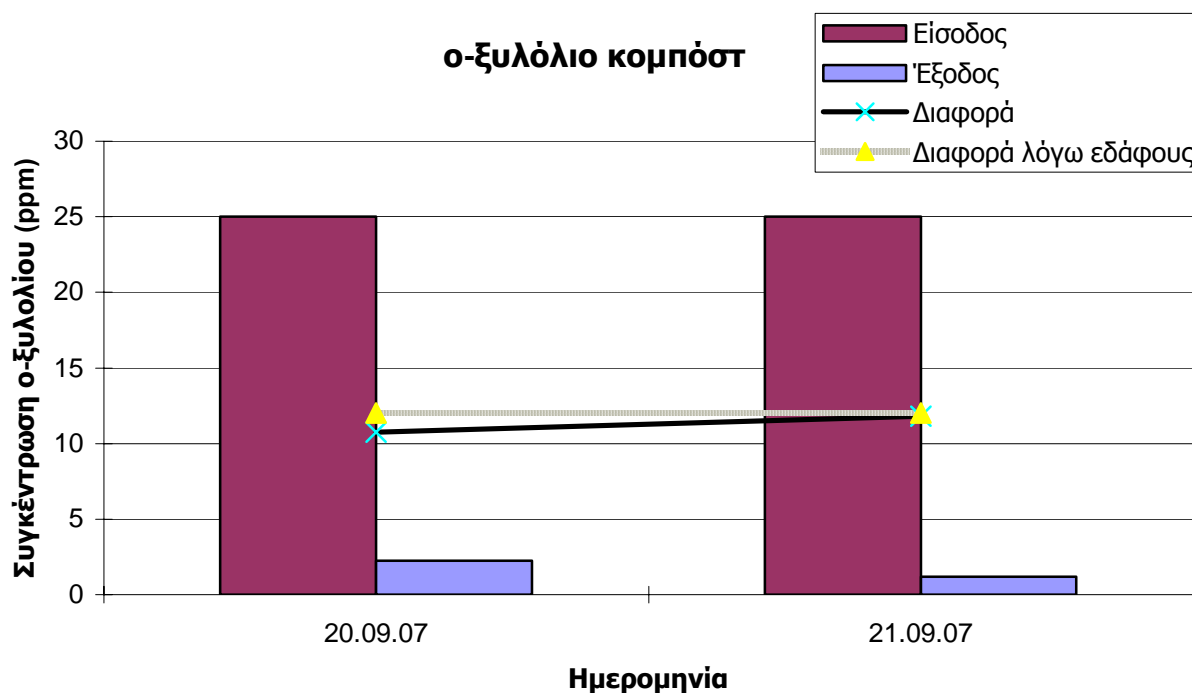
Πίνακας 9-51: Αποτελέσματα προσδιορισμού του ο-ξυολίου στο κομπόστ στην έξοδο

| ΈΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---|--------------------------|--------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 18_2_exo | 14 938 | 0.48 | 0.48 | Απορρίπτεται | 18.09.07 |
| 19_1_exo | 2 677 | 0.45 | 0.45 | Απορρίπτεται | 19.09.07 |
| 19_2_exo | 8 328 | 0.46 | 0.46 | Απορρίπτεται | |
| 20_1_exo | 4 591 | 0.45 | 2.72 | Αραίωση 1:5 | 20.09.07 |
| 20_2_exo | 3 291 | 0.45 | 1.80 | Αραίωση 1:3 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 2.26 | | |
| 21_1_exo | 8 104 | 0.46 | 1.39 | Αραίωση 1:2 | 21.09.07 |
| 21_2_exo | 14 032 | 0.48 | 0.96 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 1.18 | | |

Πίνακας 9-52: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του ο-ξυολίου στο κομπόστ

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά λόγω εξάτμισης και προσρόφησης εδάφους (ppm) | Δυναμικό εξυγίανσης του κομπόστ (ppm) |
| 20.09.07 | 25.00 | 2.26 | 12.00 | 10.74 |
| 21.09.07 | 25.00 | 1.18 | 12.00 | 11.82 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | 11.28 |

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αλλά και στο Διάγραμμα 9-22, υπάρχει σταθερή διαφορά στη συγκέντρωση. Έτσι και την 1^η και τη 2^η μέρα παρατηρείται σταθερή διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου, η οποία είναι της τάξης των 11 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα ο-ξυολίου, που συγκρατείται από το κομπόστ είναι της τάξης των **11ppm**.



Διάγραμμα 9-22: Μεταβολή συγκεντρώσεων του ο-ξυολίου στο κομπόστ

Συμπερασματικά, η απόδοση του κομπόστ και μόνο για την εξυγίανση του συγκεκριμένου εδάφους από το ο-ξυόλιο είναι:

$$\text{Απόδοση κομπόστ στο ο-ξυόλιο: } \frac{C_{out}}{C_{in}} \times 100\% = \frac{11.28 \text{ ppm}}{25 \text{ ppm}} \times 100\% = 45.12\%$$

9.8.3 ο-ξυόλιο στο διατομή

Έτσι, κατά την ανάλυση μετρήθηκε εμβαδό ίσο με 433 995 τετραγωνικές μονάδες, επιφάνεια που αντιστοιχεί σε 1.742 ppm. Δεδομένης της 1:9 αραιώσης, η συγκέντρωση του ο-ξυολίου στο αρχικό διάλυμα είναι 17.42 ppm.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 9-53 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του ο-ξυολίου των δειγμάτων εξόδου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος με διατομίτη.

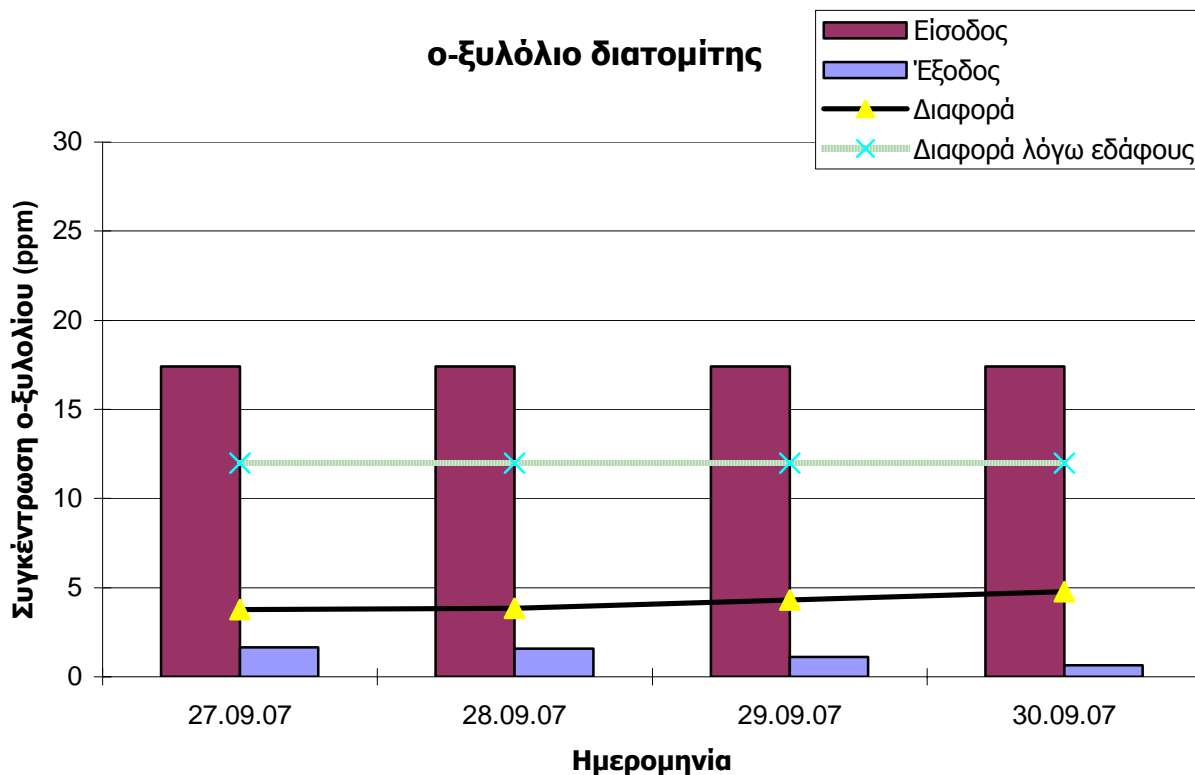
Πίνακας 9-53: Αποτελέσματα προσδιορισμού του ο-ξυολίου στο διατομίτη στην έξοδο

| ΈΞΟΔΟΣ | | | | | |
|------------------|------------------|---|--------------------------|--------------|------------|
| Όνομα δείγματος | Εμβαδόν (pixels) | Συγκέντρωση (Σε αραιωμένο δείγμα) (ppm) | Τελική Συγκέντρωση (ppm) | Σχόλια | Ημερομηνία |
| 27_1_exo | 36 127 | 0.55 | 1.64 | Αραίωση 1:2 | 27.09.07 |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 1.64 | | |
| 28_1_exo | 50 622 | 0.59 | 1.18 | Αραίωση 1:1 | 28.09.07 |
| 28_2_exo | 17 414 | 0.49 | 1.97 | Αραίωση 1:3 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 1.58 | | |
| 29_1_exo | 41 885 | 0.56 | 1.13 | Αραίωση 1:1 | 29.09.07 |
| 29_2_exo | 38 571 | 0.56 | 1.11 | Αραίωση 1:1 | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 1.12 | | |
| 30_1_exo | 65 410 | 0.64 | 0.64 | | 30.09.07 |
| 30_2_exo | 270 727 | 1.25 | 1.25 | Απορρίπτεται | |
| Μέση τιμή ημέρας | | | 0.64 | | |

Πίνακας 9-54: Διαφορές εισόδου - εξόδου στη συγκέντρωση του ο-ξυολίου στο διατομίτη

| ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|
| Ημερομηνία | Συγκέντρωση Εισόδου (ppm) | Συγκέντρωση Εξόδου (ppm) | Διαφορά λόγω εξάτμισης και προσρόφησης εδάφους (ppm) | Δυναμικό εξυγίανσης του κομπόστ (ppm) |
| 27.09.07 | 17.42 | 1.64 | 12.00 | 3.78 |
| 28.09.07 | 17.42 | 1.58 | 12.00 | 3.84 |
| 29.09.07 | 17.42 | 1.12 | 12.00 | 4.30 |
| 30.09.07 | 17.42 | 0.64 | 12.00 | 4.78 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | 4.18 |

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αλλά και στο Διάγραμμα 9-23, υπάρχει σταθερή διαφορά στη συγκέντρωση. Έτσι και τις 4 ημέρες παρατηρείται σταθερή διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου, η οποία είναι της τάξης των 4 ppm, οπότε συμπεραίνεται πως η ποσότητα ο-ξυολίου, που συγκρατείται από το διατομίτη είναι της τάξης των 4 ppm.



Διάγραμμα 9-23: Μεταβολή συγκεντρώσεων του ο-ξυολίου στο διατομίτη

Συμπερασματικά, η απόδοση του διατομίτη και μόνο για την εξυγίανση του συγκεκριμένου εδάφους από το ο-ξυόλιο είναι:

$$\text{Απόδοση διατομίτη στο ο-ξυόλιο: } \frac{C_{out}}{C_{in}} \times 100\% = \frac{4.18 \text{ ppm}}{17.42 \text{ ppm}} \times 100\% = 24.00\%$$

9.9 ΙΣΟΘΕΡΜΕΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ

Για την κατασκευή της ισόθερμης καμπύλης θα πρέπει να υπολογιστούν η ποσότητα της προσροφημένης ουσίας ανά μάζα του προσροφητικού υλικού και να συγκριθεί με τη συγκέντρωση του τελικού διαλύματος.

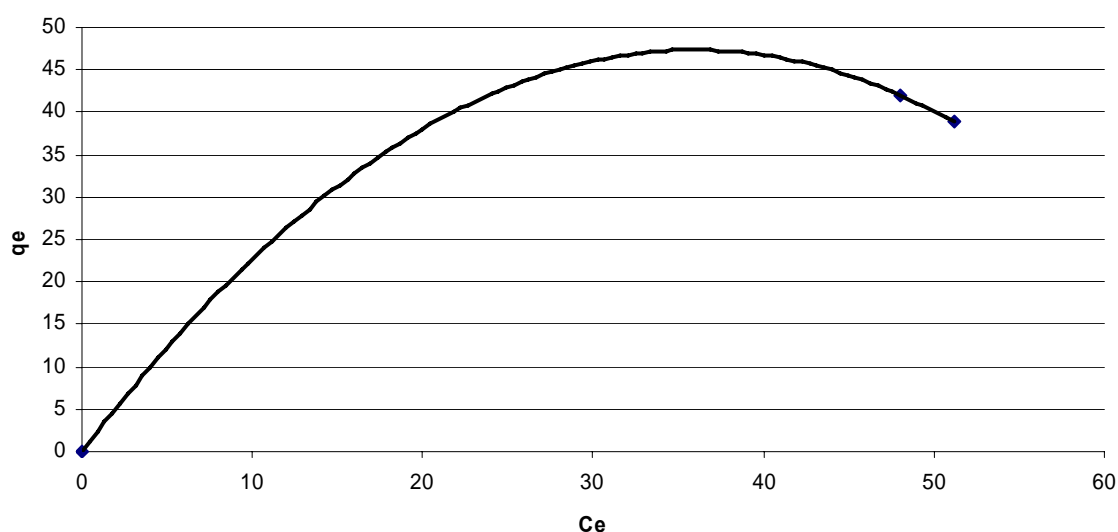
Η ποσότητα της προσροφημένης ουσίας ανά μάζα προσροφητικού υλικού υπολογίζεται βάσει της Εξίσωσης 9-7.

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) \cdot V}{m} \quad (\text{Εξίσωση 9-7})$$

Δεδομένου του ειδικού βάρους του κομπόστ, το οποίο ισούται με τη μονάδα, ο λόγος V/m απαλείφεται. Όσο αφορά στο διατομή, η πυκνότητά του είναι ίση με 0.425 kg/m^3 , οπότε ο λόγος V/m ισούται με 2.353 L/g .

- *MTBE κομπόστ*

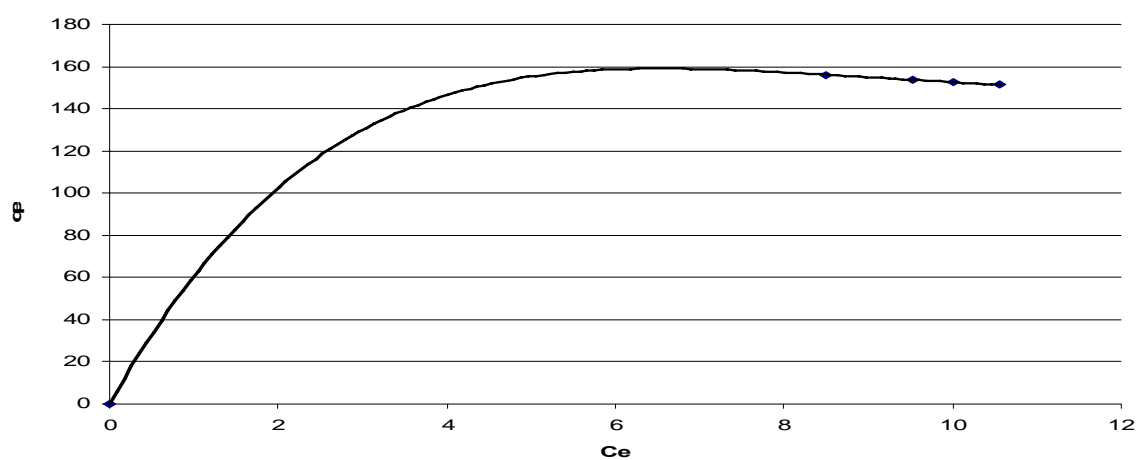
| Αρχική συγκέντρωση (C_o) | Τελική συγκέντρωση (C_e) | Ποσότητα προσροφημένης ουσίας (q_e) |
|------------------------------|------------------------------|---|
| 90.00 | 47.97 | 42.03 |
| 90.00 | 51.15 | 38.85 |



Διάγραμμα 9-24: Ισόθερμη προσρόφησης του MTBE στο κομπόστ

- *MTBE διατομίτης*

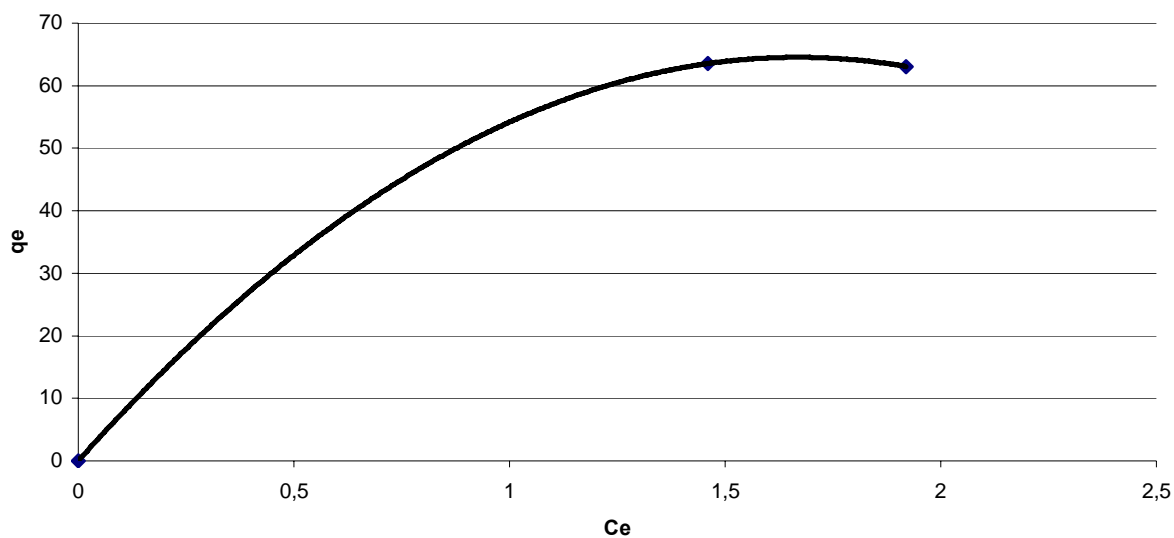
| Αρχική συγκέντρωση (C_o) | Τελική συγκέντρωση (C_e) | Ποσότητα προσροφημένης ουσίας (q_e) |
|------------------------------|------------------------------|---|
| 74.85 | 9.53 | 153.70 |
| 74.85 | 8.50 | 156.12 |
| 74.85 | 10.01 | 152.57 |
| 74.85 | 10.55 | 151.30 |



Διάγραμμα 9-25: Ισόθερμη προσρόφησης του MTBE στο διατομίτη

- *Βενζόλιο κομπόστ*

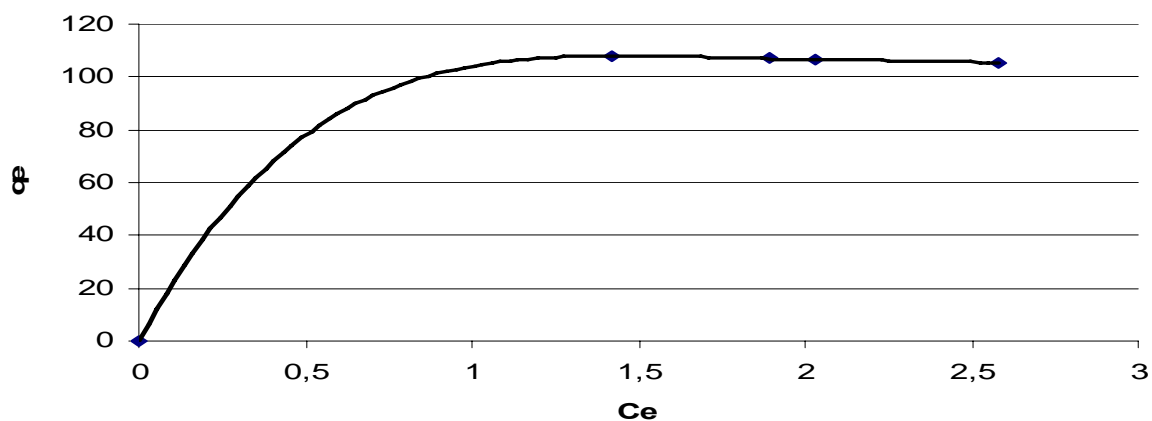
| Αρχική συγκέντρωση (C_o) | Τελική συγκέντρωση (C_e) | Ποσότητα προσροφημένης ουσίας (q_e) |
|------------------------------|------------------------------|---|
| 65.00 | 1.92 | 63.08 |
| 65.00 | 1.46 | 63.54 |



Διάγραμμα 9-26: Ισόθερμη προσρόφησης του βενζολίου στο κομπόστ

- Βενζόλιο διατομίτης

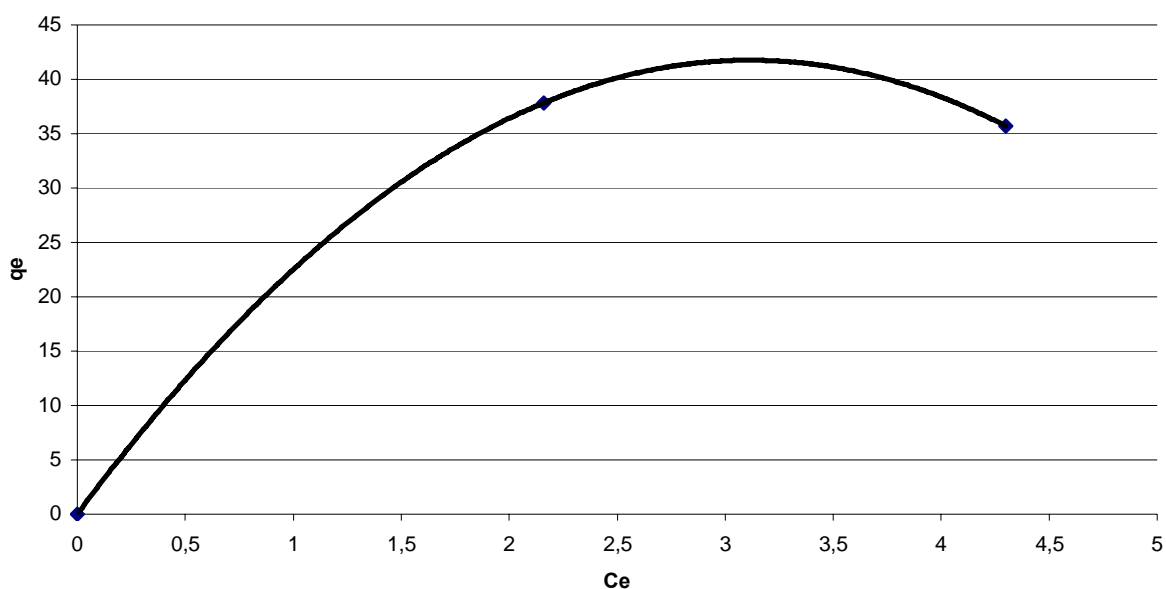
| Αρχική συγκέντρωση (C_o) | Τελική συγκέντρωση (C_e) | Ποσότητα προσροφημένης ουσίας (q_e) |
|------------------------------|------------------------------|---|
| 47.34 | 2.58 | 105.32 |
| 47.34 | 2.03 | 106.61 |
| 47.34 | 1.89 | 106.94 |
| 47.34 | 1.42 | 108.05 |



Διάγραμμα 9-27: Ισόθερμη προσρόφησης του βενζολίου στο διατομίτη

- Τολουόλιο κομπόστ

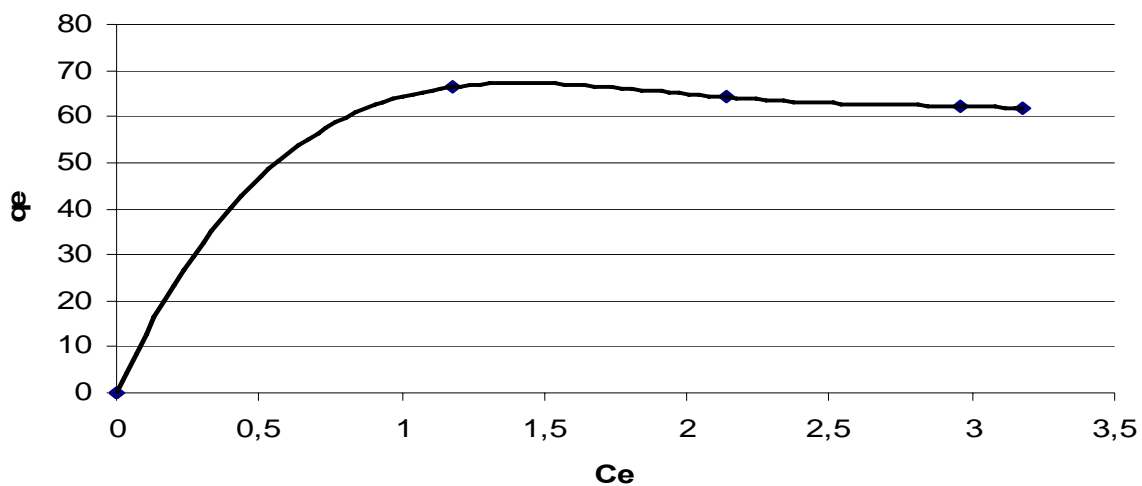
| Αρχική συγκέντρωση (C_o) | Τελική συγκέντρωση (C_e) | Ποσότητα προσροφημένης ουσίας (q_e) |
|------------------------------|------------------------------|---|
| 40.00 | 4.30 | 35.70 |
| 40.00 | 2.16 | 37.84 |



Διάγραμμα 9-28: Ισόθερμη προσρόφησης του τολουολίου στο κομπόστ

- Τολουόλιο διατομίτης

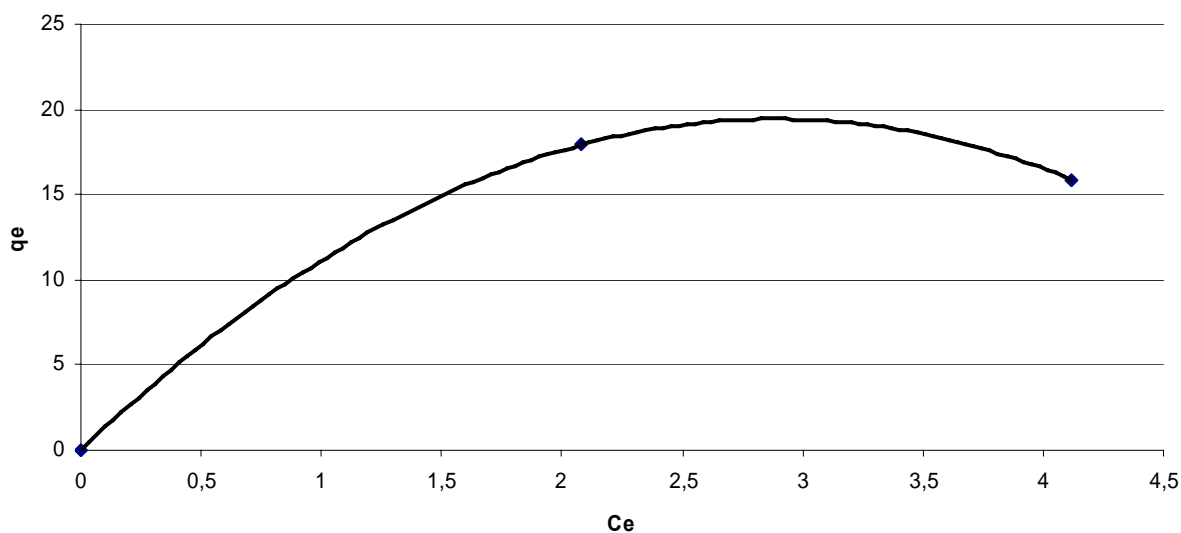
| Αρχική συγκέντρωση (C_o) | Τελική συγκέντρωση (C_e) | Ποσότητα προσροφημένης ουσίας (q_e) |
|------------------------------|------------------------------|---|
| 29.43 | 3.18 | 61.77 |
| 29.43 | 2.96 | 62.28 |
| 29.43 | 2.14 | 64.21 |
| 29.43 | 1.18 | 66.47 |



Διάγραμμα 9-29: Ισόθερμη προσρόφησης του τολουολίου στο διατομίτη

- Αιθυλο-βενζόλιο κομπόστ

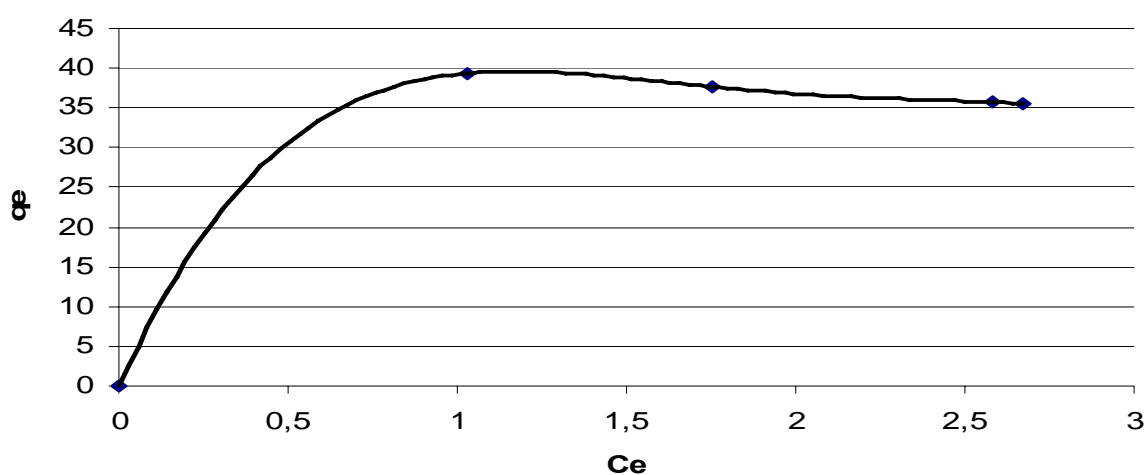
| Αρχική συγκέντρωση (C_o) | Τελική συγκέντρωση (C_e) | Ποσότητα προσροφημένης ουσίας (q_e) |
|------------------------------|------------------------------|---|
| 20 | 4.12 | 15.88 |
| 20 | 2.08 | 17.92 |



Διάγραμμα 9-30: Ισόθερμη προσρόφησης του αιθυλο-βενζολίου στο κομπόστ

- Αιθυλο-βενζόλιο διατομίτης

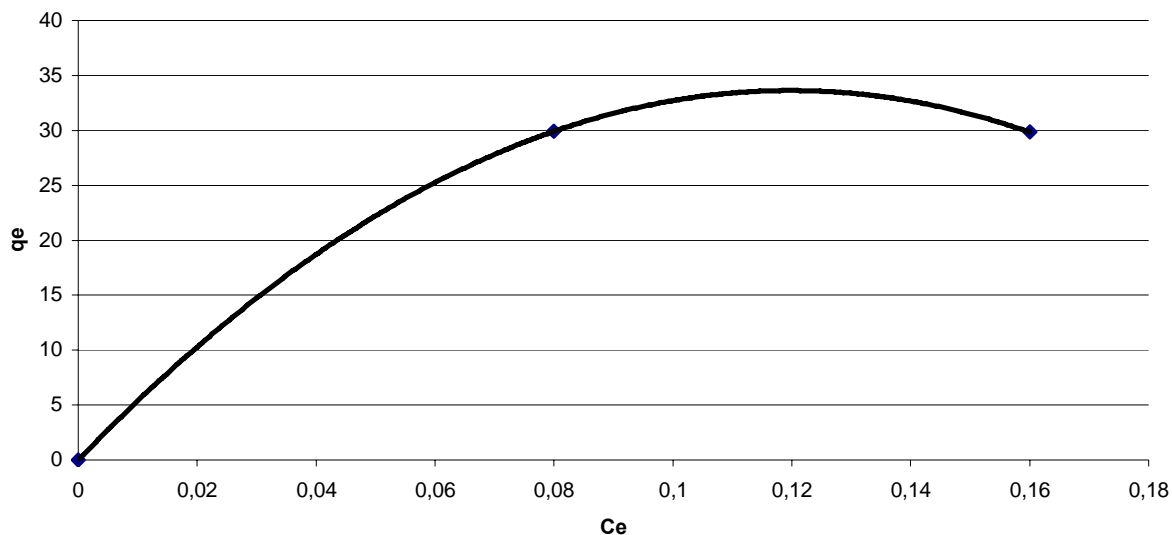
| Αρχική συγκέντρωση (C_o) | Τελική συγκέντρωση (C_e) | Ποσότητα προσροφημένης ουσίας (q_e) |
|------------------------------|------------------------------|---|
| 17.77 | 2.67 | 35.53 |
| 17.77 | 2.58 | 35.74 |
| 17.77 | 1.75 | 37.70 |
| 17.77 | 1.03 | 39.39 |



Διάγραμμα 9-31: Ισόθερμη προσρόφησης του αιθυλο-βενζολίου στο διατομίτη

- π-ξυλόλιο κομπόστ

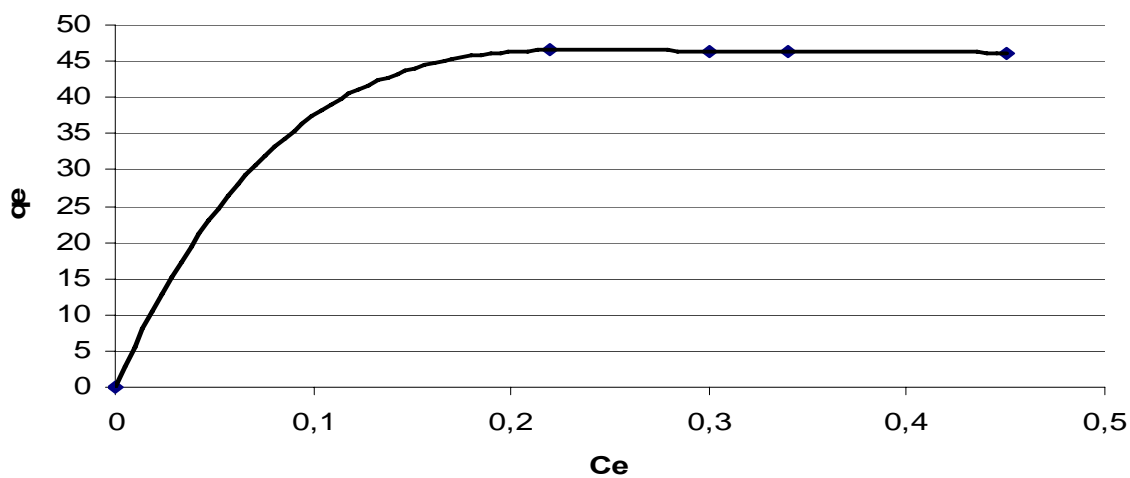
| Αρχική συγκέντρωση (C_o) | Τελική συγκέντρωση (C_e) | Ποσότητα προσροφημένης ουσίας (q_e) |
|------------------------------|------------------------------|---|
| 30 | 0.16 | 29.84 |
| 30 | 0.08 | 29.92 |



Διάγραμμα 9-32: Ισόθερμη προσρόφησης του π-ξυλολίου στο κομπόστ

- π-ξυλόλιο διατομίτης

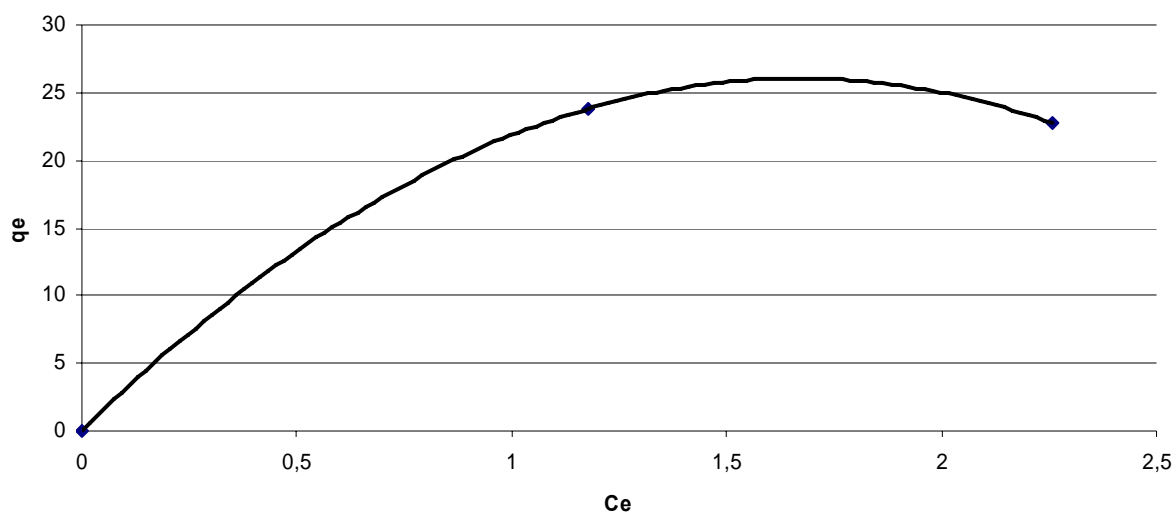
| Αρχική συγκέντρωση (C_o) | Τελική συγκέντρωση (C_e) | Ποσότητα προσροφημένης ουσίας (q_e) |
|------------------------------|------------------------------|---|
| 20.01 | 0.45 | 46.02 |
| 20.01 | 0.34 | 46.28 |
| 20.01 | 0.30 | 46.38 |
| 20.01 | 0.22 | 46.57 |



Διάγραμμα 9-33: Ισόθερμη προσρόφησης του π-ξυλολίου στο κομπόστ

- ο-ξυλόλιο κομπόστ

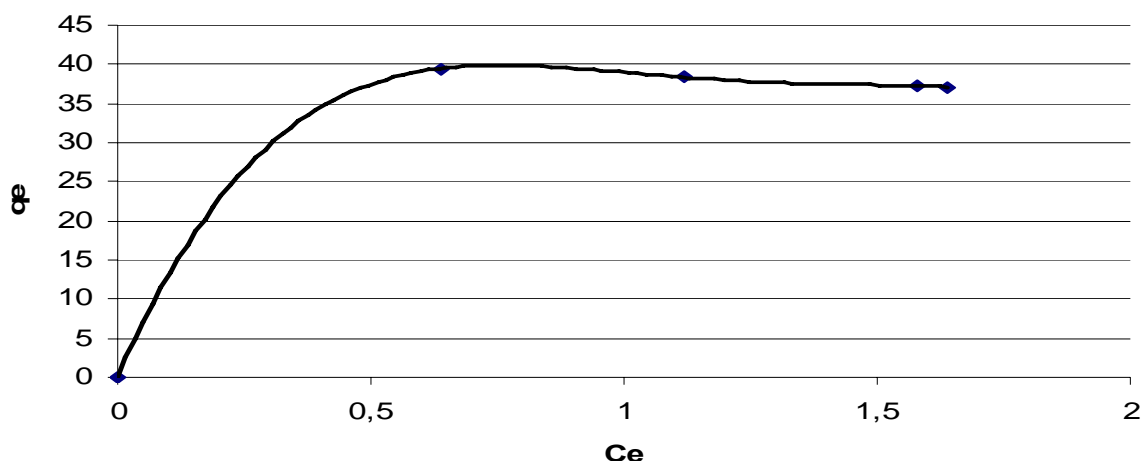
| Αρχική συγκέντρωση (C_o) | Τελική συγκέντρωση (C_e) | Ποσότητα προσροφημένης ουσίας (q_e) |
|------------------------------|------------------------------|---|
| 25 | 2.26 | 22.74 |
| 25 | 1.18 | 23.82 |



Διάγραμμα 9-34: Ισόθερμη προσρόφησης του ο-ξυλολίου στο κομπόστ

- ο-ξυλόλιο διατομίτης

| Αρχική συγκέντρωση (C_o) | Τελική συγκέντρωση (C_e) | Ποσότητα προσροφημένης ουσίας (q_e) |
|------------------------------|------------------------------|---|
| 17.42 | 1.64 | 37.13 |
| 17.42 | 1.58 | 37.27 |
| 17.42 | 1.12 | 38.35 |
| 17.42 | 0.64 | 39.48 |



Διάγραμμα 9-35: Ισόθερμη προσρόφησης του ο-ξυλολίου στο διατομίτη

Όπως προκύπτει από όλα τα διαγράμματα, τόσο με χρήση του κομπόστ, όσο και με χρήση του διατομίτη ως πληρωτικού υλικού για κάθε ρύπο, η ισόθερμη θεωρείται ευνοϊκή. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα για κάθε υλικό, προκύπτει το συμπέρασμα πως οι ισόθερμες στο κομπόστ είναι ευνοϊκότερες αυτών του διατομίτη, αφού σε κάθε περίπτωση οι ισόθερμες με προσροφητή το διατομίτη έχουν πιο απότομη σύγκλιση με την παράλληλη του άξονα x, σε αντίθεση με τις αντίστοιχες του κομπόστ, όπου η σύγκλιση είναι ομαλότερη.

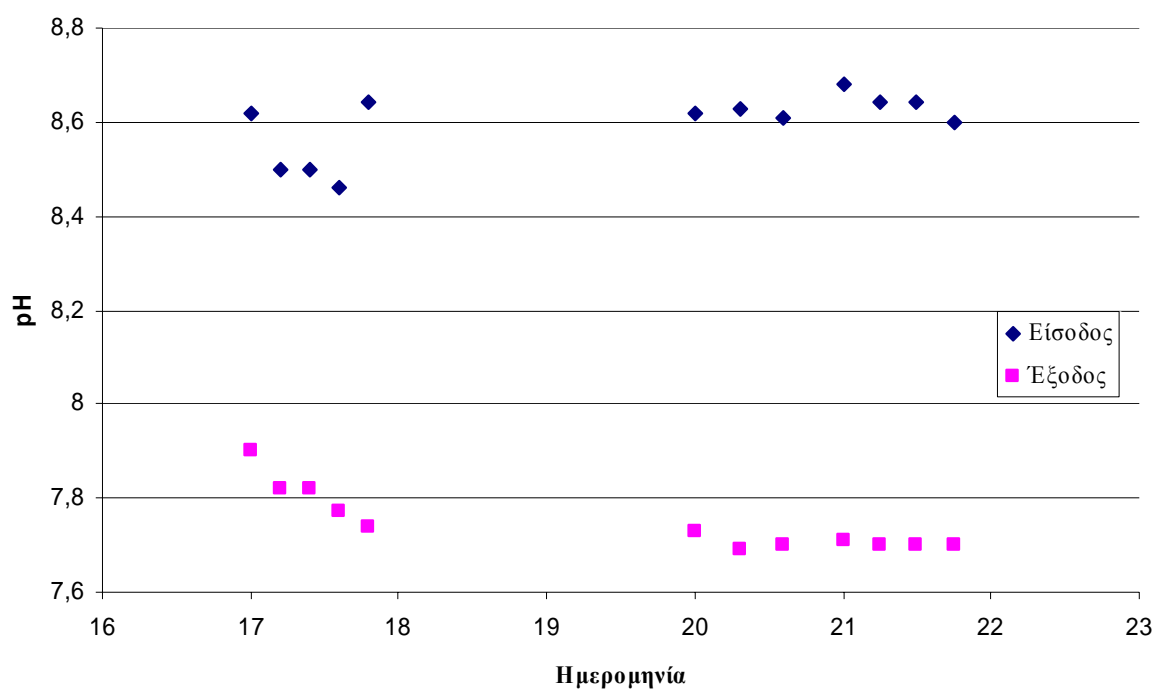
9.10 pH

Καθόλη τη διάρκεια της διεξαγωγής του πειράματος, σε κάθε λαμβανόμενο δείγμα, εισόδου και εξόδου, προτού το συλλεγόμενο δείγμα αναλυθεί, υπολογιζόταν και το pH αυτού. Ο λόγος ήταν ο έλεγχος της μεταβολής του pH, κυρίως εξ' αιτίας της χρήσης των μικροοργανισμών στο κομπόστ, αφού σε περίπτωση μεγάλης μεταβολής του δείκτη οξύτητας, δε θα θεωρούνταν περιβαλλοντικά φιλικά τα Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα.

Οι τιμές του pH για κάθε πείραμα φαίνονται στους Πίνακες 9-55, 9-56 και 9-57 και παρουσιάζονται γραφικά στα Διαγράμματα 9-36, 9-37 και 9-38.

Πίνακας 9-55: Μεταβολή pH κατά τη διεξαγωγή του τυφλού

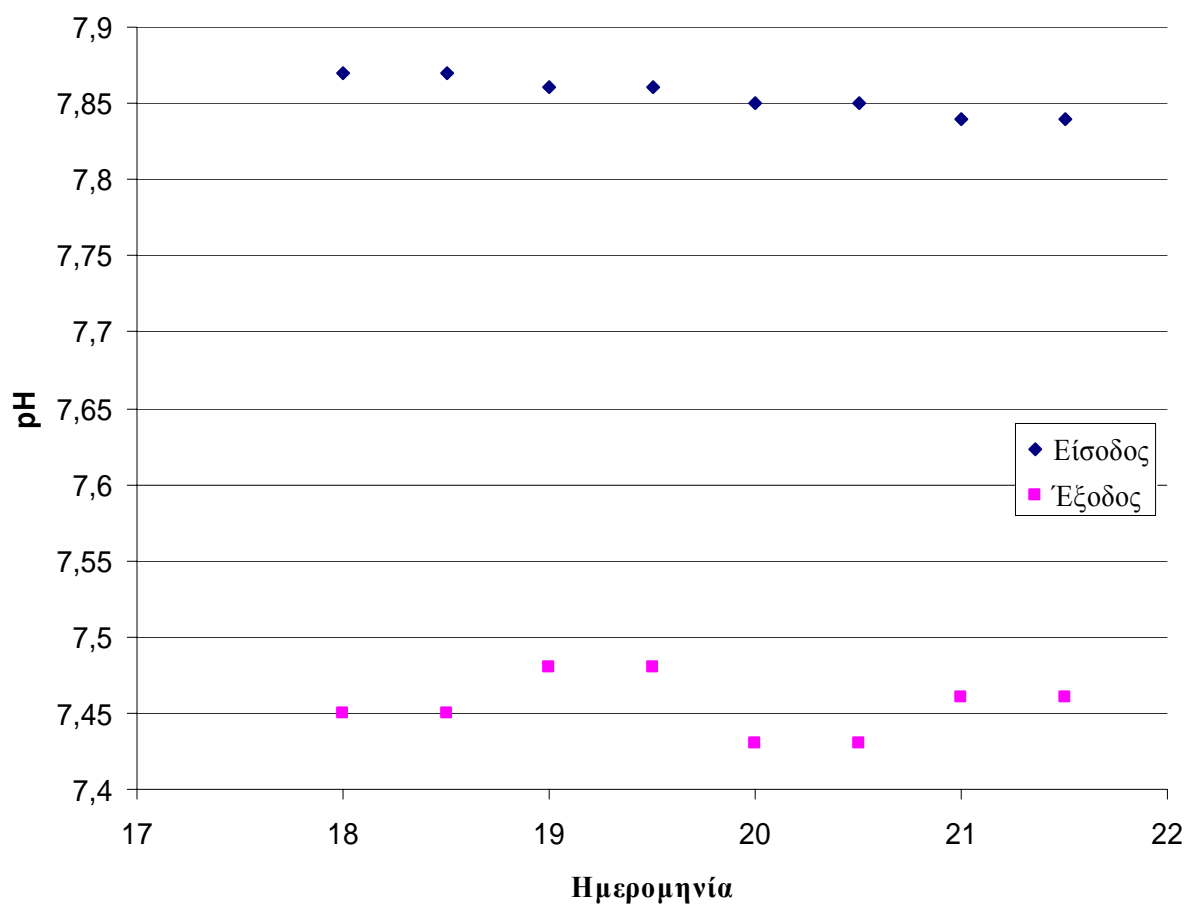
| Τυφλό | | |
|------------|---------|--------|
| Ημερομηνία | Είσοδος | Έξοδος |
| 17/08 | 8.62 | 7.90 |
| | 8.50 | 7.82 |
| | 8.50 | 7.82 |
| | 8.46 | 7.77 |
| | 8.64 | 7.74 |
| 20/08 | 8.62 | 7.73 |
| | 8.63 | 7.69 |
| | 8.61 | 7.70 |
| 21/08 | 8.68 | 7.71 |
| | 8.64 | 7.70 |
| | 8.64 | 7.70 |
| | 8.60 | 7.70 |



Διάγραμμα 9-36: Μεταβολή pH κατά τη διεξαγωγή του τυφλού

Πίνακας 9-56: Μεταβολή pH κατά τη διεξαγωγή του κομπόστ

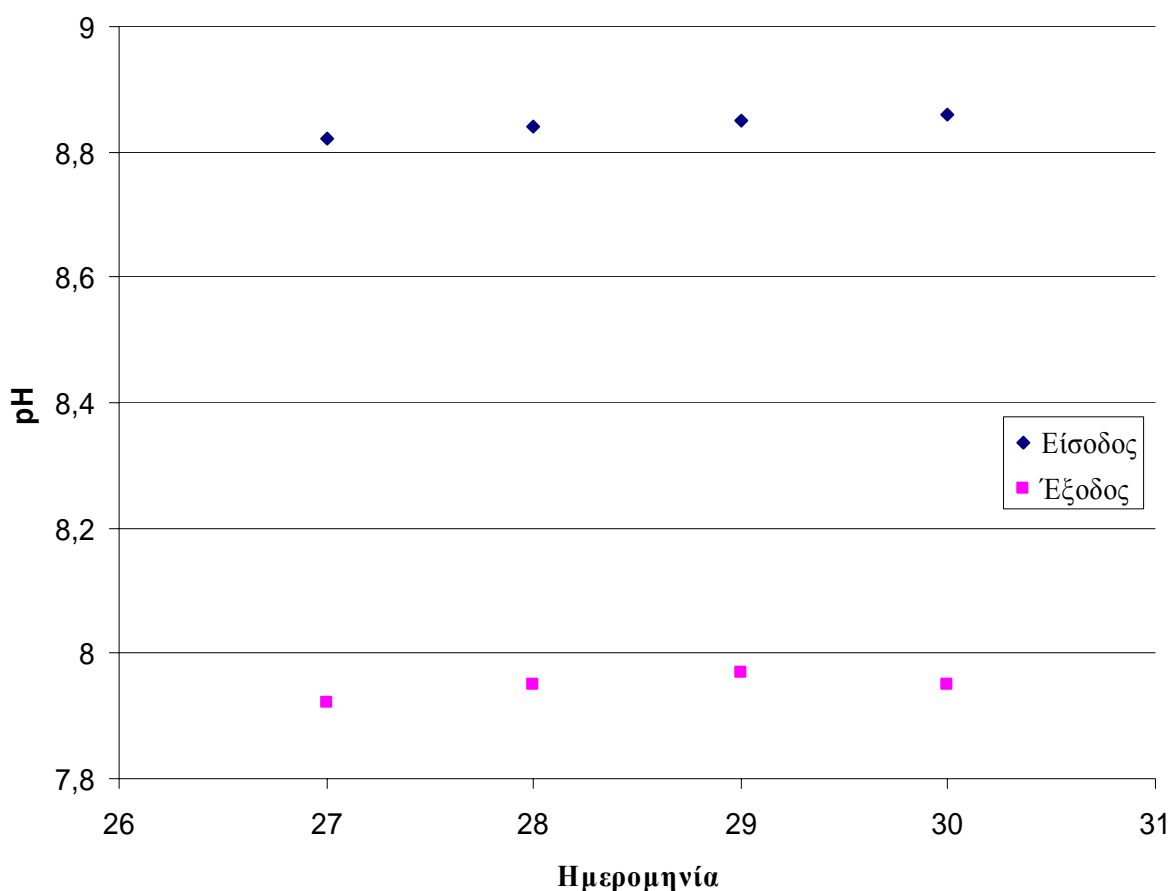
| Κομπόστ | | |
|------------|---------|--------|
| Ημερομηνία | Είσοδος | Έξοδος |
| 18/09 | 7.87 | 7.45 |
| | 7.87 | 7.45 |
| 19/09 | 7.86 | 7.48 |
| | 7.86 | 7.48 |
| 20/09 | 7.85 | 7.43 |
| | 7.85 | 7.43 |
| 21/09 | 7.84 | 7.46 |
| | 7.84 | 7.46 |



Διάγραμμα 9-37: Μεταβολή pH κατά τη διεξαγωγή του κομπόστ

Πίνακας 9-57: Μεταβολή pH κατά τη διεξαγωγή του διατομίτη

| Διατομίτης | | |
|------------|---------|--------|
| Ημερομηνία | Είσοδος | Έξοδος |
| 27/09 | 8.82 | 7.92 |
| 28/09 | 8.84 | 7.95 |
| 29/09 | 8.85 | 7.97 |
| 30/09 | 8.86 | 7.95 |



Διάγραμμα 9-38: Μεταβολή pH κατά τη διεξαγωγή του διατομίτη

Όπως φαίνεται και στους πίνακες και στα διαγράμματα, δεν υπήρξε καμία αξιόλογη μεταβολή του pH καθ' όλη τη διεξαγωγή του πειράματος. Η μείωση αυτού κατά ένα βαθμό οφείλεται στην αραίωση που υφίσταται ο ρύπος στον υδροφορέα. Άλλωστε, το υψηλό pH που παρατηρείται στην είσοδο οφείλεται στην παρουσία της νιτρικής αμμωνίας και του δείκτη methyl red στα πειράματα «Τυφλό» και «Διατομίτης», ώστε να είναι ορατό το ρυπασμένο νερό. Στο πείραμα «Κομπόστ», όπου δε χρησιμοποιήθηκε δείκτης, οι τιμές του pH είναι ακόμα πιο κοντά στο 7.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ / ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Κεφάλαιο 10

10.1 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα αποτελέσματα, που προέκυψαν όσον αφορά στην απόδοση του κάθε υλικού για κάθε ρύπο, εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 10-1.

Πίνακας 10-1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα απόδοσης κάθε υλικού

| | Απόδοση (%) | | |
|-----------------|-------------|------------|------------|
| Ρύπος | Κομπόστ | Διατομίτης | Μέσος όρος |
| MTBE | 17.15 | 53.71 | 35.43 |
| Βενζόλιο | 58.94 | 43.01 | 50.98 |
| Τολουόλιο | 41.92 | 23.99 | 32.96 |
| Αιθυλο-βενζόλιο | 9.50 | 4.28 | 6.89 |
| Π-ξυλόλιο | 59.60 | 38.40 | 49.00 |
| Ο-ξυλόλιο | 45.12 | 24.00 | 34.56 |
| Σ BTEX | 43.02 | 26.74 | 34.88 |

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 10-1 και τα δύο υλικά συμμετέχουν στην εξυγίανση του υπόγειου ύδατος, με το κομπόστ να είναι αποδοτικότερο στα BTEX συνολικά και το διατομίτη να αποδίδει καλύτερα στο MTBE.

Πιο συγκεκριμένα, η απομάκρυνση του MTBE εξ' αιτίας του κομπόστ είναι της τάξης του 17%, σε αντίθεση με το διατομίτη, ο οποίος ξεπερνά το 50%. Η διαλυτότητα στο νερό του συγκεκριμένου ρύπου είναι 51 260 mg/l, δηλαδή περίπου 6 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του κάθε συστατικού των BTEX. Παράλληλα, σε σύγκριση με τα BTEX, το MTBE έχει και το μικρότερο μοριακό βάρος (88.15 g/mol), πλην του βενζολίου. Επίσης, το MTBE είναι ο πλέον υδροφυλικός από τους υπόλοιπους ρύπους με συντελεστή κατανομής οκτανόλης - νερού $\lg K_{ow} = 1.06$.

Βάσει της πολύ υψηλής υδατοδιαλυτότητάς του, σε συνδυασμό με το μικρό μοριακό βάρος, είναι λογικό ο διατομίτης να προσροφά σε βαθμό μεγαλύτερο από αυτόν του κομποστ, αφού στο συγκεκριμένο πείραμα παρατηρήθηκε προσρόφηση των ρύπων σε πάχος φράγματος 10 εκατοστών, σε αντίθεση με το πείραμα του κομποστ, όπου το αντίστοιχο πάχος ήταν 45 εκατοστά.

Η υδροφιλικότητα του MTBE είναι και ο λόγος που δεν υπάρχει αντίστοιχος με το διατομίτη βαθμός απομάκρυνσης στο κομποστ. Έτσι, διατίθεται στο αντιδραστήριο μικρή ποσότητα για να αλληλεπιδράσει με αυτή, με αποτέλεσμα η τελική απόδοση του υλικού να είναι πολύ χαμηλή.

Και στις δύο περιπτώσεις, ο πλέον δύσκολα απομακρύνσιμος ρύπος είναι το αιθυλο-βενζόλιο, η απομάκρυνση του οποίου σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνά το 10%. Παρότι οι ιδιότητές του είναι παραπλήσιες με τα ξυλόλια και το τολουόλιο, η συμπεριφορά του είναι εντελώς διαφορετική.

Αυτό πιθανότατα οφείλεται στην τάση του αιθυλο-βενζολίου να επιπλέει στην επιφάνεια του νερού, ακόμα και αν έχει διαλυθεί πλήρως στον υδροφορέα, οπότε αν και στη δεξαμενή εισόδου η συγκέντρωσή του είναι η επιθυμητή, στην κεντρική δεξαμενή συγκεντρώνεται στην περιοχή του υδροφόρου ορίζοντα και κάποια ποσότητά του πιθανόν διαφεύγει προς την ακόρεστη ζώνη, η οποία δεν έρχεται σε επαφή με το φράγμα.

Η πραγματική τιμή της απόδοσης για το συγκεκριμένο ρύπο θα μπορέσει να υπολογιστεί μόνο στο πεδίο, όπου το ρυπασμένο νερό θα έχει συγκεκριμένη σύσταση και δε θα επηρεάζεται από την εξάτμιση ή άλλους παράγοντες.

Όσο αφορά το βενζόλιο, έχει ταυτόχρονα τη μεγαλύτερη διαλυτότητα από τα υπόλοιπα συστατικά του BTEX και το μικρότερο μοριακό βάρος. Παρά τη σχετικά μικρή του υδροφοβικότητα, στα αποτελέσματα και των δύο πειραμάτων έχει πολύ υψηλή απόδοση, γεγονός που αποδεικνύει πως στην τρισδιάστατη ροή, η προσρόφηση επηρεάζεται περισσότερο από τη συσχέτιση διαλυτότητας - μοριακού βάρους, παρά με την υδροφοβικότητα, όπως φάνηκε και στα πειράματα διαλείποντος έργου.

Ακόμα και η ελάχιστη μικροβιακή δραστηριότητα του κομπόστ με βιοαποδόμηση των ρύπων ήταν αναμενόμενο να επηρεάσει περισσότερο το βενζόλιο, το οποίο σε σύγκριση με τους υπόλοιπους ρύπους αποτελεί το βέλτιστο θρεπτικό υλικό.

Τα υπόλοιπα συστατικά των BTEX (τολουόλιο, ο και π ξυλόλια), το κομπόστ τα απομακρύνει κατά μέσο όρο με απόδοση 50%, με μέγιστη απομάκρυνση στο π-ξυλόλιο με 59% και ελάχιστη στο τολουόλιο με 42%. Από την άλλη, ο διατομίτης απομακρύνει τα BTEX σε ποσοστό 30%, με μέγιστη απομάκρυνση στο π-ξυλόλιο με 38%.

Το τολουόλιο και το ο-ξυλόλιο έχουν ακριβώς την ίδια συμπεριφορά και στα δύο πειράματα, δηλαδή 45% απομάκρυνση στο κομπόστ και 24% στο διατομίτη, αποτέλεσμα απόλυτα αναμενόμενο, αφού και ιδιότητες παραπλήσιες έχουν, αλλά και για τα δύο υπολογίστηκε ο συντελεστής οκτανόλης - νερού να είναι 2.77 και 2.69 αντίστοιχα.

Όσο αφορά στο pH, όπως σχολιάστηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, δεν παρατηρήθηκε κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή μεταξύ εισόδου και εξόδου, αφού και στο τυφλό και στα υπόλοιπα πειράματα, η μεταβολή του δείκτη οξύτητας είναι παρόμοιος, άρα κανένα από τα πληρωτικά υλικά δε μεταβάλλουν τις συνθήκες αλκαλικότητας.

10.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Κατόπιν της διεξαγωγής του συγκεκριμένου πειράματος είμαστε σε θέση να διαγνώσουμε την καταλληλότητα ενός συστήματος Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων με χρήση κομπόστ και διατομίτη στο πεδίο.

Δεδομένων των αποδόσεων των υλικών στην εξυγίανση του υπογείου ύδατος και της τιμής τους, η χρήση ενός συστήματος Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων πληρωμένων από κομπόστ και διατομίτη προτείνεται ανεπιφύλακτα για περιπτώσεις υδροφορέων ρυπασμένων από πετρελαϊκούς ρύπους, όπως τα BTEX και το MTBE.

Παρόλα τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα, επιβάλλεται η δοκιμή μιας τέτοιας διάταξης σε πιλοτική κλίμακα, ώστε να εξετασθούν και διάφορες άλλες παράμετροι, που δεν ήταν δυνατό να ελεγχθούν κατά την εργαστηριακή δοκιμή.

Πιο συγκεκριμένα, η τοποθέτηση του αντιδρώντος υλικού στο πεδίο αποτελεί σαφώς δυσκολότερη υπόθεση από την αντίστοιχη τοποθέτηση σε δεξαμενή όγκου 40 λίτρων. Έτσι, πέραν του επίπνου της εκσκαφής και της δημιουργίας της τάφρου, θα πρέπει να εξετασθεί το συγκεκριμένο πεδίο ως προς τη γεωλογία του, έτσι ώστε να επιλεγθεί ο καταλληλότερος τρόπος πλήρωσης του αντιδρώντος κελιού, βάσει των μεθόδων που περιγράφονται στο 2^ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Επίσης, βάσει της χαρτογράφησης του πλουμίου, μπορεί να επιλεγεί και η θέση των φρεατίων παρατήρησης, τα οποία τοποθετούνται κατάντι του φράγματος, από τα οποία θα λαμβάνεται δείγμα, ώστε να ελεγχθεί η απόδοση της κατασκευής.

Επιπλέον, η αντικατάσταση του αντιδρώντος μέσου επίσης δεν εξετάσθηκε στην παρούσα εργασία. Θα χρειαστεί ενδελεχής μελέτη των ιδιοτεροτήτων της γεωλογίας, αλλά και της υδρολογίας της περιοχής, ώστε να επιλεγθεί το κατάλληλο σημείο τοποθέτησης του φράγματος, καθώς επίσης και της αντικατάστασης των υλικών αυτού. Επιπρόσθετα, η εγκατάσταση του συγκεκριμένου συστήματος δε θα είναι βραχυπρόθεσμη, όπως στο εργαστήριο, αλλά σε βάθος χρόνου θα μπορέσει να ελεγχθεί η απόδοση του υλικού κατά τη διάρκεια της εξυγίανσης και, πιθανόν, να υπολογιστεί και ο χρόνος ζωής αυτού.

Επίσης, κατά την εφαρμογή της τεχνολογίας των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων στο πεδίο, η αρχική συγκέντρωση του δείγματος είναι σταθερή και δεν επηρεάζεται από την εξάτμιση. Η δειγματοληψία γίνεται από πηγάδι κατάντι του φράγματος και το δείγμα παραλαμβάνεται και αναλύεται πολύ εύκολα, χωρίς να είναι απαραίτητη η ομογενοποίηση και η αραιώση. Έτσι, δε θα είναι απαραίτητες κατασκευές, ώστε να μειώνονται οι απώλειες του δείγματος είτε στην είσοδο, είτε στην έξοδο.

Τέλος, ο χρόνος αντικατάστασης του κάθε μέσου μπορεί να ελεγχθεί κατά την εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος στο πεδίο, οπότε και η διεργασίες εξυγίανσης θα λαμβάνουν χώρα επί 24ώρου βάσεως για μεγάλο χρονικό διάστημα. Έτσι, με τον έλεγχο της εκροής θα μπορεί να προσδιοριστεί η μείωση της αποδοτικότητας κάποιου από τα υλικά, οπότε και θα αποφασισθεί η αλλαγή αυτού.

10.3 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ

10.3.1 Εφαρμογή στην εξυγίανση από πετρελαϊκούς ρύπους

Πέραν του συγκεκριμένου πειράματος, προτείνονται για μελλοντική μελέτη οι παρακάτω εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα,

- | Συνδυασμός του κομπόστ με το διατομίτη.

Όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα και τα δύο υλικά είναι σε θέση να εξυγιάνουν τους συγκεκριμένους ρύπους, οπότε μπορεί να ελεγχθεί η απόδοση παραλλήλων φραγμάτων κομπόστ και διατομίτη.

- | Έλεγχος διαφορετικών ποσοτήτων κάθε υλικού.

Η ποσότητα του κομπόστ που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν περίπου 15 λίτρα, ενώ η αντίστοιχη του διατομίτη ήταν 4 λίτρα, όταν ο συνολικός ενεργός όγκος της δεξαμενής είναι της τάξης των 40 λίτρων. Η κατασκευή της δεξαμενής επιτρέπει την επιλογή οποιονδήποτε συνδυασμών πάχους του φράγματος, χάρη στα δέκα ζεύγη «δοντιών» σε διαφορετικές αποστάσεις, στα οποία μπορεί να τοποθετηθεί η πλάκα διαχωρισμού των φάσεων.

- | Έλεγχος απόδοσης και άλλων υλικών (ενεργός άνθρακας, σίδηρος και άλλα).

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, το κομπόστ και ο διατομίτης δεν είναι τα μόνα υλικά που μπορούν να τοποθετηθούν σε φράγμα για την εξυγίανση του υπογείου νερού από πετρελαϊκούς ρύπους. Ο ενεργός άνθρακας, που αποτελεί τον πλέον συνήθη προσροφητή είναι ένα εναλλακτικό υλικό, το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε μια τέτοια διάταξη. Σε πολλές βιβλιογραφικές αναφορές (*Simon et al. 2001, Roehl et al. 2005*) αναφέρεται η χρήση σφαιριδίων σιδήρου μηδενικού σθένους (Fe^0) ως πληρωτικό υλικό φραγμάτων με κύριο μηχανισμό την ιονανταλλαγή. Τέλος, οι Tayeoon et al. το 2002, χρησιμοποίησαν ως πληρωτικό υλικό στην εξυγίανση του υπόγειου ύδατος την άμμο από την επεξεργασία των αποβλήτων χυτηρίου μετάλλων.

- | Μεγαλύτερης διάρκειας πειράματα για μακροχρόνιο έλεγχο της απόδοσης.

Η διάρκεια των πειραμάτων ήταν της τάξης των 4 ημερών. Από τη διεξαγωγή των πειραμάτων στήλης, όσο αφορά το κομπόστ, η μέγιστη δραστηριότητα των συγκεκριμένων μικροοργανισμών παρατηρείται μετά από 25 ημέρες. Για την επίτευξη του αποτελέσματος αυτού, θα πρέπει αρχικά το υπόγειο νερό να είναι πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά, η ποσότητα των οποίων σταδιακά θα μειώνεται, παράλληλα με αύξηση της συγκέντρωσης των ρύπων, ώστε οι μικροοργανισμοί να συνηθίσουν να τρέφονται από τα πετρελαϊκά προϊόντα. Έτσι, με την εκπαίδευση των μικροοργανισμών θα μπορέσει να επιτευχθεί μεγαλύτερος βαθμός βιοαποδόμησης των ρύπων, η οποία σε συνδυασμό με το προσροφητικό δυναμικό του υλικού, θα αυξήσει τη συνολική απόδοση εξυγίανσης του κομπόστ.

- | Επιλογή διαφορετικών πετρελαϊκών ρύπων, που διαλύονται στο νερό.

Η επιλογή των BTEX και του MTBE ως ρύπων αναφοράς στο συγκεκριμένο πείραμα έγινε βάσει της πολύ συχνής εμφάνισης αυτών στους υδροφορείς διυλιστηρίων. Υπάρχουν, όμως και άλλοι ρύποι που θα μπορούσαν να εξετασθούν. Ενδεικτικά αναφέρονται το TPH, τα PAH's και το TBA, τα οποία απαντώνται συχνά, λόγω διαρροών σε σταθμούς μεταφόρτωσης πετρελαίου και πρατήρια καυσίμων.

- | Έλεγχος της απόδοσης για διαφορετικές κλίσεις.

Η κλίση που επιλέχθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν ενδεικτική. Χάρη στο γρύλο που έχει προσαρμοστεί στη δεξαμενή, μπορεί να επιτευχθεί οποιαδήποτε εδαφική κλίση από 0 ως 20 μοίρες. Έτσι, ανάλογα με το προς μοντελοποίηση πεδίο, επιλέγεται και η αντίστοιχη κλίση.

- | Υπολογισμός συγκεντρώσεων του ρύπου στην ακόρεστη ζώνη.

Η ιδιαιτερότητα του αιθυλο-βενζολίου να συγκεντρώνεται στα ανώτερα στρώματα του υδροφορέα μπορεί να προκαλέσει διαφυγή του ρύπου στην ακόρεστη ζώνη, η οποία δεν ανήκει στη ζώνη επιρροής του φράγματος. Έτσι, ελέγχοντας τη συγκέντρωση των ρύπων στο ακόρεστο τμήμα, εξάγεται το συμπέρασμα για το αν απαιτείται περαιτέρω δράση για την εξυγίανση της περιοχής.

- | Λήψη «καρότων» από το φράγμα.

Οι διαφορές στις συγκεντρώσεις μεταξύ εισόδου και εξόδου οφείλονται στην προσρόφηση στο έδαφος, αλλά και στην εξάτμιση, χωρίς να μπορεί να υπολογιστεί το ποσοστό προσρόφησης και το αντίστοιχο της εξάτμισης. Έτσι, αν ληφθεί δείγμα από το έδαφος, στο οποίο, στη συνέχεια, μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα του προσροφημένου ρύπου, η οποία προφανώς θα είναι μικρότερη της διαφοράς μεταξύ εισόδου και εξόδου. Το υπόλοιπο της συγκεκριμένης διαφοράς θα αποτελεί την ποσότητα, η οποία εξατμίστηκε.

Ένας επιπλέον λόγος, που καθιστά τη λήψη «καρότου» από το φράγμα, είναι ο έλεγχος της μικροβιακής δραστηριότητας, σε περίπτωση χρησιμοποίησης κομπόστ. Έτσι, το δείγμα μπορεί να αναλυθεί ως προς τη μικροβιακή ανάπτυξη, αλλά και τη διαθεσιμότητα του θρεπτικού. Τα αποτελέσματα αυτά μπορεί να αποβούν ιδιαίτερα χρήσιμα, ώστε να βελτιστοποιηθούν οι συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος.

10.3.2 Άλλες εφαρμογές

Μετά τη χρήση της συγκεκριμένης δεξαμενής ως ενεργό φράγμα πλουμίου από πετρελαϊκούς ρύπους, επιβεβαιώθηκε η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί αυτή ως Διαπερατό Αντιδρών Φράγμα για την εξυγίανση του υπογείου νερού σε περιπτώσεις:

- | Διαρροές από ΧΥΤΑ.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως προς εξυγίανση νερό, δείγμα στραγγισμάτων από ΧΥΤΑ, τα οποία είτε θα προέρχονται από πεδίο, είτε από δεξαμενή αερόβιας χώνευσης. Λόγω της φύσης του ρύπου, η διεργασία που θα λάβει χώρα θα είναι κατά κύριο λόγο η ιονανταλλαγή, οπότε προτείνεται και η χρήση σφαιριδίων σιδήρου μηδενικού σθένους.

- | Διαρροές από χώρους απόθεσης λυμματολάσσης.

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, το νερό μπορεί να προέρχεται είτε από το πεδίο, είτε από πιλοτική δεξαμενή. Υψηλής απόδοσης προσροφητές, όπως ο διατομίτης και ο ενεργός άνθρακας προτείνονται για τη συγκεκριμένη περίπτωση.

- | Διαρροές βαρέων μετάλλων προς υπόγειους υδροφορείς.

Στην περίπτωση των βαρέων μετάλλων θα απαιτηθεί συνδυασμός όλων των μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί. Άλλωστε, η φιλοσοφία των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων αναπτύχθηκε, αρχικά, για τέτοιες περιπτώσεις και συνεχίζει να είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στην εξυγίανση του νερού από τους ρύπους αυτούς.

- | Διαρροές ραδιενεργών στραγγισμάτων προς υπόγειους υδροφορείς.

Όπως αναλύεται και στο Κεφάλαιο 2 η περίπτωση της Pantex, όπου εμφανίστηκε πλούσιο πυρηνικών αποβλήτων στο υπόγειο νερό, οι λύσεις που προτείνονται είναι η ανάπτυξη συγκεκριμένων μικροοργανισμών, καθώς και υποβιβασμός των συστατικών του ρύπου, με τη βοήθεια της ιονανταλλαγής.

- | Μεταβολή θερμοκρασίας του υπόγειου νερού για άλλες χρήσεις.

Η γεωθερμία μιας περιοχής μπορεί να αποτελέσει σημαντική πηγή ενέργειας για μια περιοχή. Υπάρχουν εναλλάκτες θερμότητας, οι οποίοι λειτουργούν ακόμα και με διαφορές θερμοκρασίας της τάξης των 10° C. Έτσι, είτε με τοποθέτηση παγωμένων φραγμάτων, όπως αναφέρονται και στο Κεφάλαιο 2, είτε με πολύ έντονη χρήση κομπόστ, ώστε οι δραστηριότητες των μικροοργανισμών να αυξήσουν σημαντικά τη θερμοκρασία, μπορεί να επιτευχθεί η απαιτούμενη διαφορά θερμοκρασίας.

Το βασικότερο πλεονέκτημα της χρήσης της συγκεκριμένης δεξαμενής σε κάθε περίπτωση είναι ο απόλυτος έλεγχος των υδρογεωλογικών καταστάσεων από το χρήστη, σε συνδυασμό με την προσομοίωση του πεδίου που μπορεί να επιτευχθεί σε έναν μεγάλο βαθμό.

Βιβλιογραφία

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΑΜΒΑΣΑΚΗΣ, Ι. «*Βιολογική απομάκρυνση BTEX και MTBE με χρήση διατομίτη σε πειράματα στήλης και διαλείποντος έργου*», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά, (2007).

ΓΑΡΜΠΗ, Σ. ΓΕΝΕΙΑΤΑΚΗΣ, Μ. «*Προσομοίωση Υπόγειας Ροής και Μεταφοράς Μάζας. Εξυγίανση Υπογείων Υδάτων εφαρμόζοντας την Τεχνολογία των Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων - Εφαρμογή Πεδίου σε Περίπτωση Ρύπανσης με Υδρογονάνθρακες Πετρελαίου (BTEX)*», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά, (2003).

ΓΙΔΑΡΑΚΟΣ, Ε. ΑΪΒΑΛΙΩΤΗ, Μ. «*Τεχνολογίες Αποκατάστασης Εδαφών και Υπογείων Υδάτων από Επικίνδυνους Ρύπους*», Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Εκδόσεις Ζυγός (2005).

ΜΑΥΡΑΚΗΣ, Ν. «*Βιολογική απομάκρυνση BTEX και MTBE με χρήση Compost σε πειράματα στήλης και διαλείποντος έργου*», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά, (2007).

ΜΟΥΧΤΑΡΟΠΟΥΛΟΣ, Π. «*Μελέτη ροής και παραγωγικότητας ελεύθερης φάσης LNAPL του υδροφορέα ενός διυλιστηρίου πετρελαίου*», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά, (2005).

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

AL-GHOUTI, M.A. ET AL. “*Adsorption studies on the decolouration of basic and reactive dyes by manganese oxides-modified diatomite*”. 4th European Congress of Chemical Engineering, Spain, (2003).

BEITINGER, E. BÜTOW, E. “*Pilotversuch zur Ermittlung der Standzeit einer Aktivkohle - Adsorberwand*”, ITVA-Symposium Altlasten, Kassel (1998).

BIRKE, V. BURMEIER, H. ROSENAU, D. *“Design, Construction, and Operation of Tailored Permeable Reactive Barriers”*. Pract. Periodical of Haz., Toxic, and Radioactive Waste Mgmt., Volume 7, Issue 4, pp. 264-280 (2003).

BRADL, H. B. BARTL, U. *“Reactive walls - a possible solution to the remediation of old landfills”*, 7th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia. Conference Proceedings, Vol. IV, pp. 525-540. (1999).

BWXT PANTEX, *“Engineering Evaluation/ Cost Analysis for Pantex In Situ Bioremediation Project”*, United States Department of Energy / National Nuclear Security Administration, (2007).

CHIA-CHENG, WU ET AL. *“Preparation and properties of diatomite composite super-absorbent”*, Polymers for Advanced Technologies, Vol. 18, Issue 3, Pages 184 - 193, (2005).

CUNNINGHAM, J. REINHARD, M. *“Injection-Extraction Treatment Well Pairs: An Alternative to Permeable Reactive Barriers”*, Dept. Civil and Environmental Engineering, Stanford University, (CA), (2002).

ECKER, M. GROOTERHORST, A. JANSEN, T. *“Mineralische Absorptionsmittel in Reaktiven Waenden entfernen Schwermetalle und Arsen”*. TerraTech pp. 59-60. (2000).

GAVASKAR, A., ET AL., *“Design guidance for application of permeable reactive barriers for groundwater remediation”*. Batelle Press, (2000).

GHEZZI, G. GHEZZI, P. PELLEGRINI, M. *“Use of a Cement-Bentonite-Slurry Plastic Diaphragm with HDPE Membrane for MSW Landfill”*, 7th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia, Conference Proceedings Vol. IV, pp 549-554, (1999).

GRAVELDING, D. *“Design and Construction of a 1200 Foot Funnel & Gate System”* Subsurface Barrier Technologies Conference: Engineering Advancements and Application Considerations for Innovative Barrier Technologies, Tucson, AZ. International Business Communications, Southborough, (MA), (1998).

HÖLSCHER, T. GÖRISCH, H. LORENZ, A. “*Reductive Dehalogenation of Chlorobenzene Congeners in Cell Extracts of Dehalococcoides sp.*” Fachgebiet Technische Biochemie, Institut für Biotechnologie, Technische Universität Berlin, (2003).

JING, L. STEPHANSSON, O. “*Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering: Theory and Applications*” Developments in Geotechnical Engineering, Issue 85, (2007).

KECHAVARZI, C. SOGA, K. ILLANGASEKARE, T. “*In-situ Permeability Measurement of a Contaminant Containment Wall*”, The Sixteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, Japan, (2005)

KHRAISHEH, M. AL-DEGES, Y. AND MCMINN, W. “*Remediation of wastewater containing heavy metals using raw and modified diatomite*”, Chemical Engineering Journal. Vol. 99, 177-184, (2004).

KHRAISHEH, M. “*Effect off OH and Silanol groups in the Removal of dyes from aqueous solution using diatomite*”, Water Research, vol. 39, (2005).

MAYER, K. BENNER, S. BLOWES, D. “*Process-based reactive transport modeling of a permeable reactive barrier for the treatment of mine drainage*”. Journal of Contaminant Hydrology, Volume 85, Issues 3-4, Pages 195-211 (2006).

O'HANNESIN, S. “*Groundwater Remediation Using In-Situ Treatment Walls*”, EnviroMetal Technologies, Inc. GWRTAC. 49 pp. (2001).

ROBERTSON, W. YEUNG, N. VAN DRIEL, P. LOMBARDO, P. “*High-Permeability Layers for Remediation of Ground Water; Go Wide, Not Deep*”, Groundwater Journal, Vol. 43, No 4, P. 574-581, (2005).

ROEHL, K. MEGGYES, T. SIMON, F. STEWART, D. “*Long-Term Performance Of Permeable Reactive Barriers*”, Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), Berlin, (2005).

SIMON, F. MEGGYES, T. "*Removal of Organic and Inorganic Pollutants from Groundwater using Permeable Reactive Barriers, Land Contamination and Reclamation*". Vol. 8, Iss. 2, (2000)

SIMON, F. MEGGYES, T. "*Removal of Organic and Inorganic Pollutants from Groundwater using Permeable Reactive Barriers, Land Contamination and Reclamation*". Vol. 8, Iss. 3 (2000).

SIMON, F. MEGGYES, T. McDONALD, C. TÜNNERMEIER T. "*In-situ Reactive Barriers versus Pump-and-treat methods for groundwater remediation*". Workshop held at the Federal Institute for Materials Research and Testing, Berlin, (2001).

SIMON, F. MEGGYES, T. McDONALD, C. "*Advanced groundwater remediation*", European Science Foundation, University of Leeds, (2002).

TAEYOON, L., CRAIG, H. "*Using waste foundry sands as reactive media in PRB's*", Geo Engineering Report, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison, (2002).

WILSON, L. BOUWER, E. "*Biodegradation of aromatic compounds under mixed oxygen/denitrifying conditions: a review*", Department of Geography and Environmental Engineering, The Johns Hopkins University, Baltimore, (2004).

XENIDIS, A. MOIROU, I. PASPALIARIS, N. "*Reactive materials and attenuation processes for permeable reactive barriers*", Ορυκτός Πλούτος, τεύχος 123, σελ . 35-48, (2002).

XU, Y. ET AL. "*Caspase-3 dependent activation of calcium-independent phospholipase A2 enhances cell migration in non-apoptotic ovarian cancer cells*", Journal Biol. Chem. Iss. 281, (2006).

YANG, Y. ET AL. "*Decolouring mechanism of Zhejiang diatomite · Application to printing and dyeing wastewater*", Environmental Chemistry Letters, Springer, Volume 3 (2003).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΜΕΤΑ ΤΑ ΔΙΑΠΕΡΑΤΑ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ

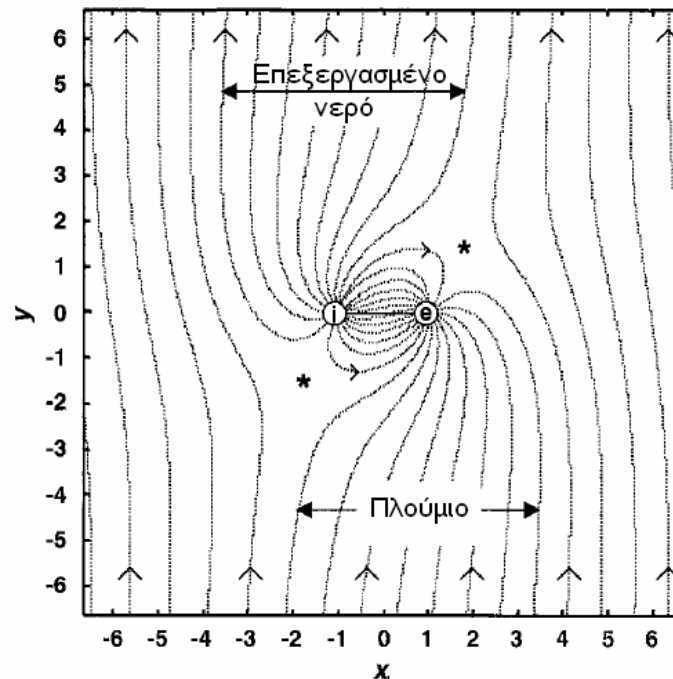
Παρά το πολύ πρόσφατο της χρήσης τους, τα Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα δεν αποτελούν πλέον την πιο σύγχρονη λύση για την εξυγίανση υδροφορέων. Δύο από τα κυριότερα μειονεκτήματα της χρήσης της τεχνολογίας αυτής στην εξυγίανση του υπόγειου ύδατος είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης, κυρίως σε περιπτώσεις βαθέων υδροφορέων, καθώς και η αβεβαιότητα στο χρόνο ζωής αυτών. Η χρήση ζευγών πηγαδιών εισαγωγής-εξαγωγής (Injection Extraction Treatment Well Pair - IETWP) προσφέρει τα ίδια σχεδόν πλεονεκτήματα με την τεχνολογία των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων, ξεπερνώντας και τις δυσκολίες που αναφέρθηκαν πριν.

Τρόπος λειτουργίας των IETWP

Τα ζεύγη πηγαδιών εισαγωγής-εξαγωγής αποτελούνται από ένα πηγάδι άντλησης και από άλλο ένα πηγάδι εμπλουτισμού, τα οποία λειτουργούν παράλληλα. Το ρυπασμένο νερό εγκλωβίζεται στη ζώνη επιρροής του πηγαδιού άντλησης και στη συνέχεια επεξεργάζεται είτε in-situ, είτε υπεργείως, ώστε να επιστρέψει με την αρωγή των πηγαδιών εμπλουτισμού. Οι λόγοι που η μέθοδος αυτή υπερτερεί των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων είναι οι εξής:

- Η εγκατάσταση του ζεύγους των πηγαδιών είναι πολύ πιο οικονομική από την εγκατάσταση ενός συστήματος Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ρύπανσης σε βάθος μεγαλύτερο των 16 μέτρων.
- Τα ζεύγη των πηγαδιών μπορούν να συνδυαστούν με διάφορες άλλες μεθόδους επεξεργασίας του υπογείου νερού, όπως η βιοαποδόμηση, η προσρόφηση και η κατάλυση.
- Η διάρκεια ζωής των ζευγών πηγαδιών και η σχετική τεχνολογία είναι πιο οικεία από αυτή των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων.
- Τα ζεύγη των πηγαδιών μπορούν να εξυγιαίνουν πλατιά πλούμια με σχετικά χαμηλούς ρυθμούς.

Στην Εικόνα A-1 φαίνεται η κάτοψη του προς εξυγίανση υδροφορέα που μελετήθηκε από τους Cunningham και Reinhard.

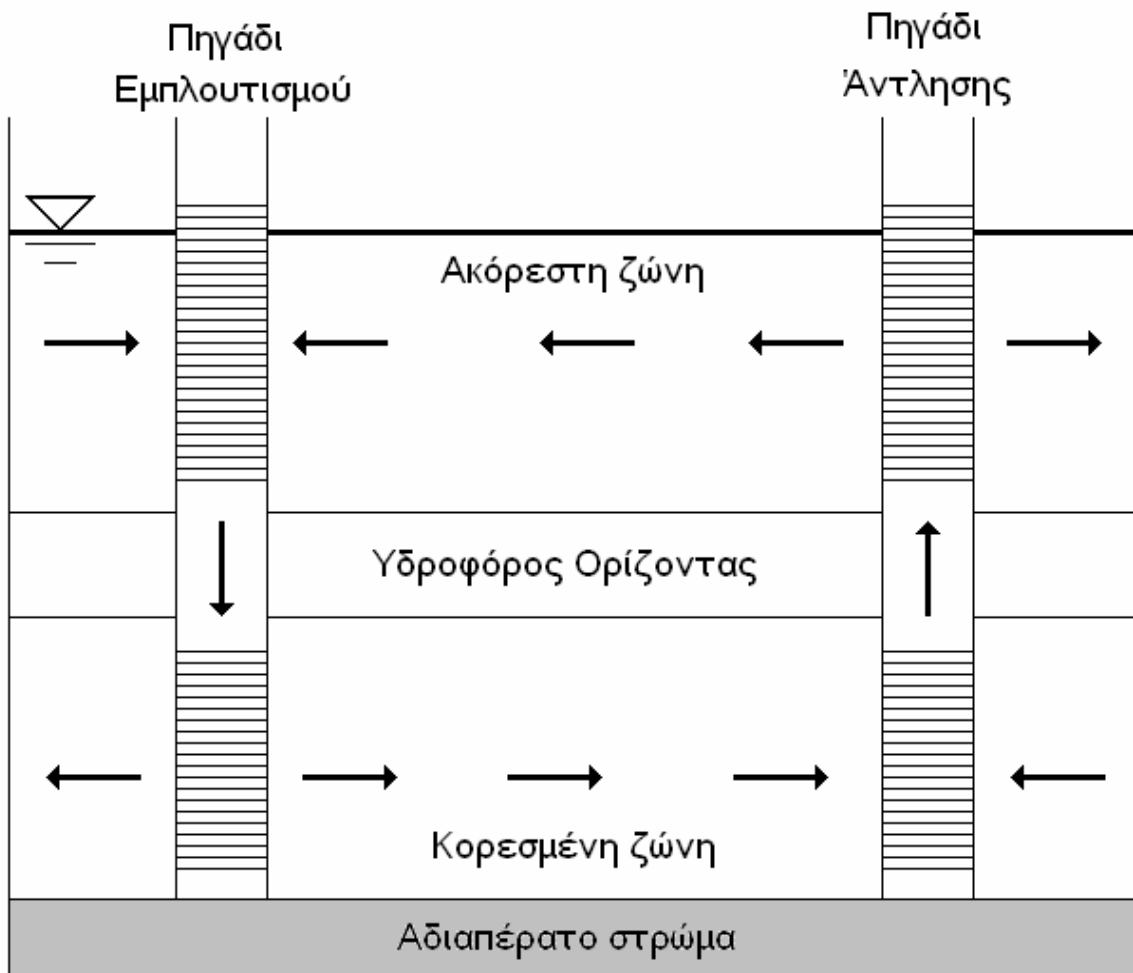


Εικόνα A-1: Κάτοψη του προς εξυγίανση υδροφορέα
(Πηγή: Cunningham J. Reinhard M., 2002)

Στη συγκεκριμένη εργασία, θεωρήθηκε πως ο υδροφορέας είναι ομογενής και έχει την ίδια υδραυλική αγωγιμότητα ($K = 5 \text{ m/day}$), το ίδιο πάχος ($H = 5\text{m}$) και την υδραυλική κλίση ($J = 0.0067$). Ο ρυθμός της άντλησης του ενός πηγαδιού είναι ίσος με το ρυθμό τροφοδοσίας του άλλου ($Q = 8.2 \text{ m}^3/\text{day}$). Η κατεύθυνση της ροής του υπογείου νερού ανήκει στον άξονα $+y$. Τα δύο πηγάδια αναπαρίστανται με τα σύμβολα i και e , ως πηγάδια εισόδου και εξόδου αντίστοιχα και έχουν τοποθετηθεί αντιδιαμετρικά σε σχέση με την αρχή των αξόνων (Σημείο $0,0$).

Όπως φαίνεται και από την Εικόνα A -1, τα δύο πηγάδια δρουν κατά τον ίδιο τρόπο με τα Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα, αφού η περιοχή ανάμεσα σε αυτά συμπεριφέρεται όπως η πύλη των φραγμάτων. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται είναι η μικρή αλλαγή στην κατεύθυνση του υπογείου νερού και οφείλεται στην εναλλαγή της ταχύτητας του υπογείου νερού, εξ' αιτίας της άντλησης και του εμπλουτισμού.

Λόγω των σοβαρών περιορισμών στην επιστροφή επεξεργασμένου νερού σε υδροφορείς, αλλά και το υψηλό κόστος μιας τέτοιας διεργασίας, οδήγησε στο σχεδιασμό *in-situ* ζευγών πηγαδιών εισαγωγής-εξαγωγής. Έτσι, το προς εξυγίανση νερό δεν ανέρχεται στην επιφάνεια, αλλά όπως φαίνεται και στην Εικόνα A-2, τα δύο πηγάδια λειτουργούν παράλληλα.



Εικόνα A-2: Λειτουργία *in situ* ζευγών πηγαδιών εισαγωγής-εξαγωγής
(Πηγή: Cunningham J. Reinhard M., 2002)

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα A-2, το ένα πηγάδι αντλεί από την κορεσμένη ζώνη και εκτονώνει στην ακόρεστη, σε αντίθεση με το πηγάδι εμπλουτισμού, το οποίο ασκεί πίεση στην ακόρεστη ζώνη, οδηγώντας το νερό από αυτή προς την κορεσμένη, όπου και εκτονώνεται. Έτσι, στην ακόρεστη ζώνη, το πηγάδι εμπλουτισμού λειτουργεί σαν πηγάδι άντλησης και το πηγάδι άντλησης δρα σαν πηγάδι εμπλουτισμού, ενώ στην κορεσμένη ζώνη ισχύει το αντίθετο.

Η ονομασία των πηγαδιών ως εμπλουτισμού και άντλησης αντίστοιχα έγινε με βάση τη λειτουργία τους στην κορεσμένη ζώνη. Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν στα πηγάδια είναι τα ίδια με αυτά που προτείνονται για τα Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα.

Πλεονεκτήματα των Ζευγών Πηγαδιών Εισαγωγής - Εξαγωγής

- ✚ Βρίσκουν εφαρμογή σε όλα τα βάθη υδροφορέων.
- ✚ Έχουν σχετικά χαμηλό κόστος εγκατάστασης.
- ✚ Μπορούν να λειτουργήσουν ως *in-situ* αντιδραστήρες.
- ✚ Έχουν τη δυνατότητα να εγκλωβίζουν πλατιά πλούμια με χαμηλούς ρυθμούς άντλησης.
- ✚ Είναι γνωστή η μακροπρόθεσμη λειτουργία τους.
- ✚ Μπορούν να αντιδράσουν αλληπάλληλα με το ρυπασμένο νερό, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλούς βαθμούς απόδοσης εξυγίανσης.
- ✚ Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με πολλές τεχνικές, ώστε να βρουν εφαρμογή σε διαφορετικούς ρυπαντές.

Μειονεκτήματα των Ζευγών Πηγαδιών Εισαγωγής - Εξαγωγής

- ✚ Έχουν σχετικά υψηλό λειτουργικό κόστος κατά την άντληση.
- ✚ Δεν μπορούν πάντοτε να λειτουργούν ως *in-situ* αντιδραστήρες.
- ✚ Είναι ενίοτε πιο ευαίσθητα από τα Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα σε συγκεκριμένα κρίσιμα δεδομένα, όπως η ετερογένεια της υδραυλικής αγωγιμότητας στον υδροφορέα.
- ✚ Το φράξιμο των πόρων (pore clogging) μπορεί να περιορίσει το επιτρεπτό ρυθμό εξυγίανσης (Q), καθώς και το πλάτος του εγκλωβισμένου πλουμίου (W).

Συμπεράσματα για τα ζεύγη πηγαδιών Εισαγωγής - Εξαγωγής

Τα ζεύγη πηγαδιών εισαγωγής-εξαγωγής λειτουργούν σαν υδραυλικά φράγματα, εξυγιαίνοντας το υπόγειο νερό, όπως και τα Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα. Τοποθετώντας δύο πηγάδια σε μικρή απόσταση μεταξύ τους και με χαμηλούς ρυθμούς άντλησης, μπορεί να εγκλωβίσει πλούμιο πλάτους πολλαπλάσιου της απόστασης μεταξύ των πηγαδιών. Επιπλέον, η εξυγίανση μπορεί να επιτευχθεί και *in-situ* κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Τέλος, τα ζεύγη πηγαδιών Εισαγωγής-Εξαγωγής έχουν μακροπρόθεσμη λειτουργία σε πάντοτε υψηλούς ρυθμούς απόδοσης.