ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ AIR-SPARGING ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΩΝ ΡΥΠΩΝ (BTEX)



Ευάγγελος Ι. Γάτσιος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΙΔΑΡΑΚΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

Εργαστήριο Διαχείρισης
Τοξικών & Επικίνδυνων Αποβλήτων

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Ε. ΓΙΔΑΡΑΚΟΣ
Ν. ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΗΣ
Δ. ΜΑΝΤΖΑΒΙΝΟΣ

ΧΑΝΙΑ 2011

Στους γονείς μου Γιάννη και Αθηνά,
στον αδελφό μου Μιχάλη,
στη γιαγιά μου Καλομοίρα.

‘’ Τότε όμως η Ποίηση; Τι αντιπροσωπεύει μέσα σε μια τέτοια κοινωνία; Απαντώ: τον μόνο χώρο όπου η δύναμη του αριθμού δεν έχει πέραση..’’

ΟΔΥΣΣΕΑΣ ΕΛΥΤΗΣ
(1911-1996)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους των οποίων η συμβολή ήταν καθοριστική για την εκπόνηση της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ευάγγελο Γιδαράκο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση του θέματος και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το αντικείμενο αυτό. Καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας μου υπήρξε πάντα πρόθυμος να με βοηθήσει με οποιοδήποτε πρόβλημα-απορία-σκέψη προέκυπτε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ. Μαρία Αϊβαλιώτη, που με την πολύτιμη εμπειρία και καθοδήγηση της, βοήθησε καθοριστικά στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Ακόμα, θα ήθελα ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κ. Νικόλαο Καλογεράκη και κ. Διονύσιο Μαντζαβίνο καθηγητές του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος.

Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω το προσωπικό του εργαστηρίου ''Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων'' για τη συνεργασίας τους κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Ευχαριστώ ιδιαίτερα, τη μεταπτυχιακή φοιτήτρια Κουσαΐτη Αθανασία της οποίας η συμβολή στις αναλύσεις των πειραμάτων ήταν πολύτιμη.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, αλλά και τους συμφοιτητές μου για την ηθική υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ρύπανση υπογείων υδάτων και εδαφών με πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες αποτελεί ένα σοβαρό πρόβλημα, το οποίο καλείται να αντιμετωπίσει κάθε διυλιστήριο ή εγκατάσταση αποθήκευσης πετρελαίου. Η μέθοδος Air Sparging είναι μια από τις πολλές μεθόδους εξυγίανσης που χρησιμοποιούνται σήμερα προς λύση αυτού του προβλήματος. Η τεχνολογία air sparging παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα που την καθιστούν εύκολη στην εφαρμογή της και ιδιαίτερα αποτελεσματική. Παρόλο που η τεχνολογία αυτή βρίσκεται ακόμη υπό ανάπτυξη και πολλές σχεδιαστικές και λειτουργικές παράμετροι αυτής πρέπει να μελετηθούν περαιτέρω, το air sparging θεωρείται μια πολλά υποσχόμενη και επιτυχής μέθοδος αποκατάστασης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η εφαρμογή της τεχνολογίας air sparging και συγκεκριμένα της in well Air Sparging σε πειραματική στήλη στο εργαστήριο με σκοπό την απομάκρυνση πετρελαϊκών ρύπων BTEX (Benzene –Toluene – Ethyl-benzene – Xylene). Σκοπός είναι η έρευνα και η συμπεριφορά του air sparging τόσο αποδοτικά όσο και οικονομικά κατά την αύξηση της παροχής του αέρα καθώς και η σύγκριση συνεχών και διακοπτόμενων αερισμών με τα ίδια κριτήρια, χρησιμοποιώντας μικρές παροχές αέρα. Η κατασκευή της στήλης και η πειραματική διαδικασία αναφέρεται σε μια κατηγορία του Air Sparging το in well air sparging. Αρχικά γίνεται περιγραφή για το στήσιμο της πειραματικής διάταξης και για την κατασκευή της στήλης στην οποία λαμβάνει χώρα το air sparging. Εν συνεχεία, γίνεται προσπάθεια για αποδοτική σύγκριση τριών παροχών αέρα που εφαρμόζονται στο σύστημα, η οποία περιλαμβάνει σύγκριση ως προς το χρόνο για απομάκρυνση συγκεκριμένης ποσότητας BTEX για κάθε εφαρμοζόμενη παροχή αέρα, καθώς και σύγκριση των τριών παροχών ως προς τη συγκέντωση του ρύπου που απομακρύνεται αναφορικά με τη ποσότητα του αέρα που παρέχεται στο σύστημα στη κάθε παροχή. Ακόμα, γίνεται οικονομική σύγκριση των τριών παροχών μεταξύ τους υπολογίζοντας τόσο το συνολικό κόστος κάθε μιας όσο και το κόστος που αναλογεί στην κάθε μια χωριστά για την απομάκρυνση ενός ppm BTEX .

Αρχικά, έλαβαν χώρα δυο πειράματα αρχικής συγκέντρωσης 60 ppm BTEX χωρίς αερισμό για μια ώρα και για 25 ώρες για να διαπιστωθεί αν υπάρχουν φυσικές απώλειες λόγω εξάτμισης του ρύπου μέσα από την στήλη. Στη συνέχεια, έγιναν 6 πειράματα αρχικής συγκέντρωσης 60 ppm BTEX σε παροχές αέρα 4,6,και 10 λίτρα/λεπτό τόσο σε συνεχή όσο και σε διακοπτόμενο αερισμό. Έλαβε χώρα επίσης ένα πείραμα σε συνεχή παροχή αέρα 14 λίτρα/λεπτό, η οποία αποτέλεσε την παροχή αντοχής για την στήλη και δεν μελετήθηκε περαιτέρω λόγω πιθανού κινδύνου ατυχήματος. Τέλος, έγιναν δυο πειράματα με συνεχή και διακοπτόμενο αερισμό στη μισή αρχική συγκέντρωση, δηλαδή 30 ppm BTEX με μια παροχή αέρα την 4 λίτρα/λεπτό.

Από τα αποτελέσματα του πειράματος διαπιστώθηκε ότι και οι τρεις παροχές αέρα τόσο σε συνεχή όσο και σε διακοπτόμενο αερισμό είναι ικανές και αποτελεσματικές για τον πρωταρχικό τους ρόλο ,τον καθαρισμό του νερού από τα BTEX. Η διαφορά τους έγκειται στο χρόνο λειτουργίας της κάθε μιας παροχής αέρα και στη ποσότητα αέρα που χρειάζεται να τροφοδοτηθεί το σύστημα για το καθαρισμό του νερού. Έτσι, προκύπτουν οι διαφορές ως προς την απόδοση και την οικονομικότητα για κάθε επιλογή που εξετάζεται. Τα δυο πρώτα πειράματα έδειξαν ότι δεν υπάρχουν φυσικές απώλειες λόγω εξάτμισης των υδρογονανθράκων με αποτέλεσμα η απομάκρυνσή τους από τη στήλη να οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στο air sparging.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της αποδοτικής σύγκρισης, ως προς το χρόνο για αρχική συγκέντρωση ρύπου 60 ppm, αύξηση της παροχής αέρα στο σύστημα συνεπάγεται και αύξηση στο ρυθμό εξάτμισης και επομένως μείωση του χρόνου μηδενισμού του ρύπου. Αυτό προέκυψε ξεκάθαρα από τα πειράματα του διεξήχθησαν. Διαπιστώθηκε ότι, αυξάνοντας την παροχή μειώνεται και ο χρόνος λειτουργίας του αερισμού. Όσον αφορά το χρόνο, συγκεκριμένα φάνηκε ότι η παροχή 10 λίτρα/λεπτό είναι η καλύτερη αφού είναι η

μεγαλύτερη που χρησιμοποιήθηκε και έχει τον μικρότερο χρόνο λειτουργίας του αερισμού μέχρι τον μηδενισμό του ρύπου. Επίσης όλοι οι συνεχόμενοι αερισμοί ήταν ταχύτεροι από τους αντίστοιχους διακοπτόμενους. Όσο αφορά, τα αποτελέσματα για την αποδοτική σύγκριση με αναφορά τη συγκέντρωση ρύπου που απομακρύνει κάθε λίτρο αέρα που τροφοδοτείται η στήλη, η μικρότερη παροχή που χρησιμοποιήθηκε δηλαδή τα 4 λίτρα/λεπτό είναι πιο αποδοτική. Ακόμα, διαπιστώθηκε ότι γι' αυτό το εύρος παροχών οι διακοπτόμενοι αερισμοί είναι πιο αποδοτικοί ως προς την απομάκρυνση του ρύπου ανά λίτρο αέρα που παρέχεται στο σύστημα σε σχέση με τους συνεχόμενους αερισμούς στις ίδιες παροχές.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της οικονομικής σύγκρισης, η παροχή 10 λίτρα /λεπτό αποδεικνύεται ως πιο οικονομική σε σχέση με τις άλλες δυο παροχές. Αυτό οφείλεται στο χρονικό διάστημα που εξοικονομείται δουλεύοντας με μεγαλύτερη παροχή καθώς και στην μικρή διαφορά ανάμεσα στην ισχύ που παρέχει το κομπρεσέρ αέρα παροχής 10 λίτρα/λεπτό σε σχέση με τα άλλα δυο κομπρεσέρ που διαθέτονται και εξετάζονται. Όπως αναμενόταν από τα χρονικά διαστήματα οι διακοπτόμενοι αερισμοί είναι οικονομικότεροι σε σχέση με τους αντίστοιχους συνεχείς.

Από τα αποτελέσματα για την εύρεση του κόστους ανά μάζα απομακρυσμένου ρύπου, αποδείχτηκε ότι η μεγαλύτερη παροχή (10λιτρα/λεπτο) και εδώ είχε το μικρότερο κόστος απομάκρυνσης. Ακόμα είναι φανερή η οικονομική διαφορά ανάμεσα σε διακοπτόμενους και συνεχείς αερισμούς με τους διακοπτόμενους να έχουν μικρότερο κόστος για την απομάκρυνση ενός ppm BTEX.

Τέλος, από τα πειράματα που έγιναν με 30 ppm BTEX ως αρχική συγκέντρωση, διαπιστώθηκε και σε αυτά η ίδια συμπεριφορά δηλαδή, για παροχή αέρα της τάξης 4 λίτρα/λεπτό ο συνεχόμενος αερισμός τελειώνει πιο γρήγορα από τον διακοπτόμενο .

ABSTRACT

Pollution in underground waters and grounds with oil hydrocarbons comprises a serious problem, which any refinery or petroleum storage facility is called to face. The air sparging method is one of the various sanitation methods that are used nowadays in order to solve this problem. The Air Sparging technology presents many advantages that render it easy to implement and highly effective. Although this technology is still under development and many design and operational parameters need to be studied further, air sparging is a promising and successful restoration method.

In the present thesis the application of air sparging technology is studied and specifically of in well Air Sparging in an experimental column in the laboratory so as to remove petroleum pollutants BTEX (Benzene –Toluene – Ethyl-benzene – Xylene). The aim is the research and behaviour of air sparging both efficiently and economically during the increase of air supply as well as the comparison of constant and pulsed air provision with the same criteria. The construction of the column and the experimental procedure refers to a certain category of Air Sparging, the in well Air Sparging. Initially, a description of the setup of the experimental applicator and the construction of the column is made. Afterwards, an attempt to compare three air supply rates that are applied in the system is made, an attempt which includes a comparison related to the time of the removal of a specific BTEX quantity for any applicable air supply, as well as the comparison of the three different rates related to the ppm of pollutant that is removed per litre of air that is supplied in the system. In addition, an economical comparison of the three supply rates is made counting not only the total cost of each but also the cost that is analogous to each one of them for the removal of a ppm BTEX.

First of all, two experiments were carried out with initial concentration 60 ppm BTEX without air provision for one hour and for 25 hours to check if there are ‘’natural’’ losses because of the evaporation of the pollutant from the column. Then, 6 experiments were conducted with initial concentration 60 ppm BTEX in air supply 4,6 and 10 litre/min. Another experiment was carried out in constant air 14 litre/min, which constituted the maximum provision endurance for the column and was not studied further due to a potential danger of an accident. Finally, two experiments were conducted with constant and pulsed air provision in half of the initial concentration that is to say 30 ppm BTEX with air supply 4 litres/min.

From the results of the experiment it was found that all three air supply rates both in constant and pulsed operation are capable and efficient for their primary role, the remediation of water from BTEX.Their difference guarantees the operation time of each air supply and litres of air that are needed to supply the system for the cleaning of water. Therefore, the differences arise as to the performance and economy for each choice that is examined. The first two experiments showed that there are no natural losses because of the evaporation of the contaminants, as a result their removal from the column was exclusively due to air sparging.

According to the results of the efficiency comparison, related to time for initial concentration of pollutant 60ppm, an increase in air supply in the system entails an increase in the evaporation pace and therefore a reduction in the removal time of the pollutant. This is clearly seen by the experiments that were conducted. It was found out that increasing the air supply, the necessary operation time is reduced. Regarding time, specifically the supply of 10 litres/min is the best since it is the highest that was used and has the less operation time for the nullification of the pollutant. Moreover, all the constant air provisions caused faster than the corresponding intermittent ones. Concerning the result of the efficient comparison with reference to the concentration of BTEX that each air litre removes, the smallest air supply that was used that is to say 4 litres/min is the most efficient. What is more, it is obvious that for this range of supply rates the pulsed

operation is more efficient as to the removal of ppm of pollutants per air litre that is provided in the system compared to the constant operation in the same supply rates.

According to the results of economical comparison, the provision of 10 litres/min is proved as the most economic one compared to the other two supplies. This is because of the period of time that is gained working with a bigger supply and of the small difference between the power that the air supply compressor works at 10 litres/min compared to the other two compressors that are available and examined. As was expected from the period of time, the pulsed operation is more economical that then corresponding constant one.

From the results of finding the cost per mass of the removed pollutant, it was proved that the biggest supply (10litres/min) had the lowest removal cost here too. The economical difference between the pulsed and the constant operations are also apparent with the pulsed one, having the lowest cost for the removal of a ppm BTEX.

Finally, from the experiments that were carried out with 30 ppm BTEX as initial concentration , the same behavior was found, that is to say in 4 litres/min air supply , the constant operation finishes faster in time than the pulsed.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 11

2. ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΙ ΡΥΠΟΙ 14
2.1 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ BTEX 14
2.1.1 Βενζόλιο 18
2.1.2 Τολουόλιο 21
2.1.3 Αιθυλοβενζόλιο 23
2.1.4 Ξυλόλιο 25
2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΣ 27
2.2.1 Απομάκρυνση από υπόγεια ύδατα, EX-SITU ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 28
2.2.1.1 Άντληση και επεξεργασία (pump-and-treat) 28
2.2.2 Απομάκρυνση από υπόγεια ύδατα, IN-SITU ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 31
2.2.2.1 Διαπερατά αντιδρώντα φράγματα 31
2.2.2.2 Air Sparging 33
2.2.2.3 Βιοαναρροφηση (bioslurping) 33

3. AIR SPARGING ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ 36
3.1 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ 36
3.2 IN- WELL AIR SPARGING I37
3.3 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ 38
3.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ 41
3.5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ 41
3.5.1 Εξάτμιση 41
3.5.2 Διάλυση 43
3.5.3 Προσρόφηση και εκρόφηση 43
3.6 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ -ΒΙΟΑΠΟΔΟΜΗΣΗ 45
3.7 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΚΙΝΗΣΗΣ 46
3.8 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ 47
3.9 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ AIR SPARGING 49
3.10 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ AIR SPARGING 54
3.10.1 Σχεδιασμός συστημάτων Air Sparging 55
3.10.1.1 Κατανομή αέρα (ζώνη επιρροής) 55
3.10.1.2 Βάθος εισαγωγής αέρα 57
3.10.1.3 Ρυθμός παροχής αέρα και πίεση διοχέτευσης 57
3.10.2 Τρόπος λειτουργίας συστήματος I59
3.11 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΗΓΑΔΙΩΝ AIR SPARGING 60
3.12 ΕΙΔΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΡΥΠΟΥ 62

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ 64
4.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΤΗΛΗΣ 65
4.2 ΔΙΕΞΑΓΩΜΕΝΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ 71
4.2.1 Η πειραματική διαδικασία 71
4.2.2 Παρασκευή ρύπου 73
4.2.3 Μετρήσεις πίεσης-παροχής με Μανόμετρο και Ροόμετρο 75
4.2.4 Δειγματοληψία 77
4.3 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 77
4.3.1 Αρχή Αέριας Χρωματογραφίας 78
4.3.2 Μικροέκχυλιση Στερεής Φάσης (SPME) 80

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ 84
5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ 84
-ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΧΩΡΙΣ ΑΕΡΙΣΜΟ 85
-ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΣΥΝΕΧΗ ΑΕΡΙΣΜΟ 60 PPM BTEX 87
-ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟ ΑΕΡΙΣΜΟ 60 PPM BTEX 91
-ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΕ ΣΥΝΕΧΗ ΚΑΙ ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟ ΑΕΡΙΣΜΟ 30 PPM BTEX……97
5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ-ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ 99
5.2.1 Επεξεργασία Αποτελεσμάτων..... 99
5.2.2 Α’ Σύγκριση-Αποδοτική 113
5.2.2.1 Σύγκριση Παροχών ως προς το Χρόνο 113
5.2.2.1.1 Εύρεση Καλύτερης Παροχής με αυτό το Κριτήριο 113
5.2.2.1.2 Σύγκριση Συνεχόμενου-Διακοπτόμενου Αερισμού 113
5.2.2.2 Σύγκριση ως προς τα Απομακρυνόμενα PPM Ρύπου Ανά Λί-
τρο Αέρα 115
5.2.2.2.1 Εύρεση Καλύτερης Παροχής με αυτό το Κριτήριο 115
5.2.2.2.2 Σύγκριση Συνεχόμενου-Διακοπτόμενου Αερισμού 115
5.2.3 Β’ Σύγκριση- Οικονομική 117
5.2.3.1 Εύρεση Κόστους Λειτουργίας για κάθε Επιλεγμένη Παροχή Αέρα 117
5.2.3.2 Υπολογισμός Κόστους Ανά Μάζα Απομακρυνόμενου Ρύπου 119

6 . ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 120
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 120
6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 122

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 123

1 . ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας όλο και πιο συχνά γίνεται αναφορά και κινήσεις για την προστασία του πλανήτη. Το περιβάλλον είτε ως μια τάση ‘’μόδας’’ είτε ως μιας πραγματικής ανησυχίας έγινε το επίκεντρο προσοχής ,μελέτης και προστασίας τόσο των κυβερνητικών πολιτικών όσο και του απλού πολίτη. Συνεχώς γίνεται λόγος για επιτρεπτά όρια και μέτρα κατά της ρύπανσης, μέτρα τα οποία πρέπει να αφορούν το άτομο σε ατομικό και συλλογικό επίπεδο ώστε να συνεχιστεί καλώς η βιωσιμότητα του πλανήτη Γη. Κρίνεται αναγκαία όχι μόνο η ανησυχία για διασφάλιση και προστασία του περιβάλλοντος ώστε να παραδοθεί άρτιο στις επόμενες γενεές αλλά και η στοχευμένη και πλήρως οργανωμένη δράση η οποία θα ενταχθεί ενάντια στον όρο ρύπανση και θα είναι υπέρμαχος της δημόσιας υγείας.

Ένα ιδιαίτερα συχνό φαινόμενο είναι η ρύπανση υπογείων υδάτων με πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες ,φαινόμενο το οποίο παρατηρείται σε όλες τις περιοχές που διαθέτουν εγκαταστάσεις διύλισης ή αποθήκευσης πετρελαίου. Υπέργειες και υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαϊκών προϊόντων, καθώς και σωληνώσεις μεταφοράς αυτών, οι οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνουν τα χιλιάδες χιλιόμετρα μήκος, αποτελούν τη βασική πηγή ρύπανσης του εδάφους και κατ’ επέκταση των υποκείμενων υδροφορέων, με αποτέλεσμα να ηχεί για τον όρο οικοσύστημα ο κώδων του κινδύνου.

Παρά τα μέτρα προστασίας που έχει θεσπίσει η πολιτεία, οι ποσότητες των οργανικών ενώσεων (όπως οι πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες) που καταλήγουν ετησίως σε υδάτινους αποδέκτες είτε εσκεμμένα είτε από ατύχημα, είναι αρκετές για να βλάψουν τόσο τον ανθρώπινο οργανισμό όσο και κάθε έμβια ζωή πάνω στο πλανήτη. Χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα κινδυνεύουν άμεσα με τελικό αποδέκτη τον άνθρωπο, ο οποίος πέρα της αναπνοής δέχεται μεγάλες ποσότητες επικινδύνων υδρογονανθράκων και μέσω της τροφικής αλυσίδας.

Κρίνεται έτσι αναγκαία η επεξεργασία και αποκατάσταση των ρυπασμένων εδαφών και κυρίως των υδάτινων αποδεκτών με τεχνικές αποδοτικές και οικονομικές οι οποίες φέρουν τα επιθυμητά αποτελέσματα εξυγίανσης σε σύντομο χρονικό διάστημα χωρίς περιβαλλοντικό κόστος.

Οι πετρελαϊκοί ρύποι παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά από πολλούς άλλους ρύπους υπογείων υδάτων, καθώς ανήκουν στα λεγόμενα Μη – Υδατικής Φάσης Υγρά (Non – Aqueous Phase Liquids – NAPL), τα οποία διαλύονται ελάχιστα στο νερό και ως εκ τούτου υπάρχουν μέσα σε αυτό ως ξεχωριστή φάση. Οι ρύποι αυτοί αποτελούνται από ελαφριά και πυκνά συστατικά ,τα οποία αντίστοιχα εκπροσωπούν τα LNAPL (Light Non – Aqueous Phase Liquids) και DNAPL (Dense Non – Aqueous Phase Liquids).

Τα LNAPL έχουν πυκνότητα μικρότερη από εκείνη του υπόγειου νερού με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν την τάση να συσσωρεύονται στην επιφάνεια των υδροφορέων σχηματίζοντας μια ελεύθερη ελαιώδη φάση [1].

Αντίθετα, τα DNAPL έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη από εκείνη του υπόγειου νερού με αποτέλεσμα να καταφέρνουν να διεισδύσουν στην κυρίως μάζα των υδροφορέων [1].

Γενικότερα, από τη στιγμή που τα NAPL θα εισέλθουν στο υπέδαφος μπορούν να κινηθούν σε αυτό ως αέρια φάση, ως ελεύθερη μη υδατική φάση ή ως διαλυμένη στο υπόγειο νερό φάση, ανάλογα με τις ιδιότητές τους και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Είναι ακόμη δυνατόν να καταλάβουν μέρος των εδαφικών πόρων και να αποτελέσουν προσροφημένη στα εδαφικά σωματίδια φάση, η οποία είναι γνωστή ως υπολειμματική ρύπανση .

Για την εξυγίανση των υπόγειων υδάτων από πετρελαϊκούς ρύπους όπως το BTEX (Benzene, Toluene, Ethyl-benzene, Xylenes) έχουν γίνει πολλές μελέτες και έχουν δοκιμαστεί αρκετές διεργασίες επιτυχώς. Διεργασίες όπως η εξάτμιση, η οξείδωση, η απορρόφηση και η βιοεξυγίανση-βιοαποδόμηση κατέχουν πρωτεύον ρόλο στο τομέα της εξυγίανσης και είναι ικανές να απομακρύνουν τους ρύπους σε οποιαδήποτε φάση και αν βρίσκονται μέσα στο υπέδαφος. Συγκεκριμένα, για την απομάκρυνση πτητικών NAPL, τα οποία βρίσκονται σε αέρια φάση μέσα στην ακόρεστη ζώνη, εφαρμόζεται ευρέως η τεχνική άντλησης και επεξεργασίας τους Soil Vapor Extraction (SVE), ενώ για την απομάκρυνση της ελεύθερης επιπλέουσας φάσης των LNAPL χρησιμοποιούνται ως επί των πλείστων βιοαναρροφητικές τεχνολογίες, όπως για παράδειγμα η τεχνική Bioslurping.

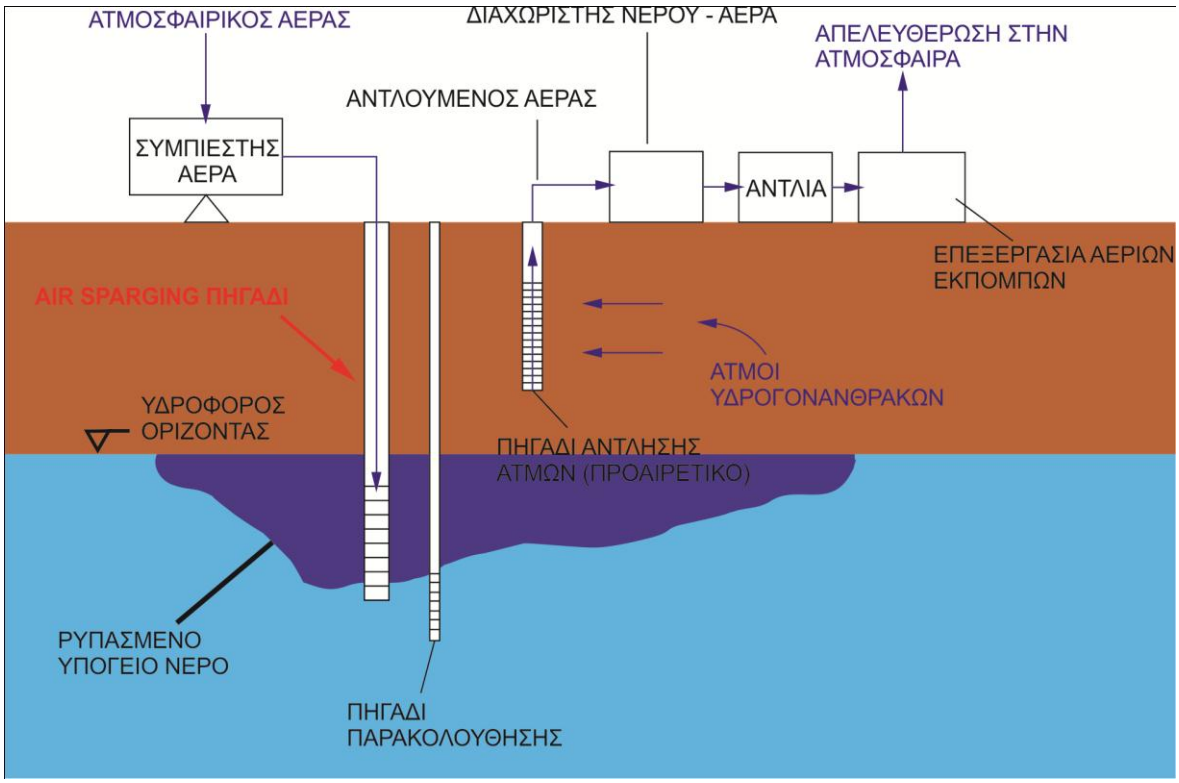
Η παρουσία των DNAPL για πολύ καιρό αντιμετωπιζόταν με κλασσικές μεθόδους εξυγίανσης υπογείων υδάτων, όπως για παράδειγμα την τεχνική pump-and-treat. Τα τελευταία χρόνια μια νέα τεχνολογία αποκατάστασης υπογείων υδάτων κέρδισε έδαφος, παρουσιάζοντας πολύ θετικά αποτελέσματα στην απομάκρυνση των DNAPL, καθώς και της λεγόμενης υπολειμματικής ρύπανσης. Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται Air Sparging – Διοχέτευση Αέρα . (Ο όρος Sparging δηλώνει μια διαδικασία που χρησιμοποιείται στη χημεία με την οποία ένα χημικά αδρανές αέριο διοχετεύεται σε ένα υγρό.)

Η μέθοδος Air-Sparging εκπροσωπεί μια σχετικά νέα και πολύ αποτελεσματική in –situ τεχνολογία εξυγίανσης υπόγειων υδάτων και εδάφους η οποία αφορά στη διοχέτευση αέρα (ή οξυγόνου) υπό πίεση στην κορεσμένη ζώνη του υπεδάφους με στόχο την εξάτμιση των υφιστάμενων ρύπων και την ενίσχυση της βιοαποικοδόμησης σε κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη ,αυξάνοντας παράλληλα τα επίπεδα συγκέντρωσης οξυγόνου.

Το οξυγόνο που διοχετεύεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα εξατμίζει τους ρύπους που είναι διαλυμένοι στο νερό και υπάρχουν εκεί ως ξεχωριστή υγρή φάση ή είναι προσροφημένοι πάνω σε κορεσμένα εδαφικά σωματίδια. Οι εξατμισμένοι ρύποι αρχίζουν να κινούνται ανοδικά προς την ακόρεστη ζώνη, από όπου και απομακρύνονται, χρησιμοποιώντας τεχνικές άντλησης ατμών από το έδαφος. Η διαδικασία μεταφοράς των διαλυμένων μη υδατικών πτητικών οργανικών συστατικών (Volatile Organic Compounds - VOC), τα οποία αρχικά βρίσκονται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, στην ακόρεστη ζώνη έχει συνδεθεί με τη χρήση ενός in-situ συστήματος απομάκρυνσης ατμών. Επιπλέον, η μέθοδος air sparging προωθεί την βιοαποικοδόμηση των οργανικών ρύπων τόσο στην κορεσμένη όσο και στην ακόρεστη ζώνη, αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις του οξυγόνου στο υπέδαφος [2] .

Η μέθοδος Air Sparging χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση πτητικών και ημι-πτητικών ρύπων από εδάφη και υπόγειους υδροφορείς, συμπεριλαμβανομένων:

- διαφόρων Καυσίμων όπως βενζίνη, ντίζελ και τα λοιπά.
- Πετρελαίου και λιπαντικών
- Πετρελαϊκών ρύπων όπως BTEX,MTBE,TAME
- Χλωριωμένων διαλυτών (PCE,TCE,DCE και τα λοιπά)



Εικόνα 1: Απεικόνιση της μεθόδου εξυγίανσης air sparging στο πεδίο.

Στη συνέχεια της παρούσας εργασίας θα παρουσιαστούν οι εξεταζόμενοι πετρελαϊκοί ρύποι BTEX με τα βασικά χαρακτηριστικά τους, καθώς και η μέθοδος Air Sparging και συγκεκριμένα η in –well Air Sparging και τα χαρακτηριστικά της , η οποία επιλέχτηκε για την απομάκρυνση αυτών των ρύπων. Επίσης, θα παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόστηκε η τεχνολογία Air Sparging, το πώς κατασκευάστηκε η εργαστηριακή στήλη καθώς και τα πειράματα που διεξήχθησαν για την βελτιστοποίηση αυτής της μεθόδου σε εργαστηριακή κλίμακα, τόσο ως προς την απόδοσή της όσο και ως προς την οικονομική της δυνατότητα. Οι μελέτες, τα πειράματα, τα αποτελέσματα καθώς και η κατασκευή της στήλης προσομοίωσης σε εργαστηριακή κλίμακα για την απεικόνιση της μεθόδου στο υπέδαφος εκφράζουν την **καινοτομία** της παρούσας εργασίας τόσο στον Ελλαδικό χώρο όσο και σε Παγκόσμιο επίπεδο.

2. ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΙ ΡΥΠΟΙ

Τα τελευταία δέκα κυρίως χρόνια η ύπαρξη των BTEX γίνεται όλο και περισσότερο εμφανής σε παγκόσμιο επίπεδο. Η εμφάνιση τους σε ποτάμια , λίμνες ακόμα και σε υπόγεια νερά έχει δημιουργήσει ανησυχία για τις πιθανές πηγές τους, την σταθερότητά τους και τις πιθανές δυσμενείς επιπτώσεις (αισθητικές ή τοξικές) στους αποδέκτες και στην υδρόβια ζωή.

Γενικότερα, οι διαρροές από 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.

2.1 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ BTEX

Τα BTEX είναι πτητικές οργανικές ενώσεις και αποτελούν μια από τις κύριες ομάδες διαλυτών οργανικών ενώσεων που συναντώνται στο έδαφος και το υπόγειο νερό. Εξαιτίας της πολικότητας αλλά κυρίως των διαλυτών χαρακτηριστικών τους, τα BTEX των πετρελαϊκών προϊόντων μπορούν να εισέλθουν στο έδαφος και το υπόγειο νερό και να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα ρύπανσης. Συνήθεις πηγές ρύπανσης του εδάφους και του υπογείου νερού με BTEX είναι διαρροές που σχετίζονται κυρίως με την απελευθέρωση προϊόντων πετρελαίου όπως βενζίνη, καύσιμο ντίζελ , πετρέλαιο κίνησης και θέρμανσης από δεξαμενές.

Η ομάδα των BTEX αποτελείται από το βενζόλιο, το αιθυλβενζόλιο, το τολουόλιο και τρία ισομερή του ξυλολίου, το πάρα-ξυλόλιο , το όρθο-ξυλόλιο και το μετά-ξυλόλιο. Αυτά τα οργανικά χημικά αποτελούν ένα αξιοσημείωτο ποσοστό των προϊόντων πετρελαίου. Η αιτία για την οποία τα BTEX, που εισέρχονται στο έδαφος και το υπόγειο νερό, θεωρούνται ένα τόσο σοβαρό πρόβλημα είναι το γεγονός ότι όλα έχουν κάποιες έντονες και μακροπρόθεσμες τοξικές επιπτώσεις. Χαρακτηριστικά το βενζόλιο είναι γνωστό για την καρκινογόνο του δράση.

Τύχη και Μεταφορά

Όταν οι υδρογονάνθρακες ελευθερωθούν στο περιβάλλον τόσο η σύσταση όσο και η συμπεριφορά τους καθορίζονται από ένα αριθμό φυσικοχημικών και βιολογικών διαδικασιών. Ο συνδυασμός των διαδικασιών αυτών αποκαλείται αποδόμηση και έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσής τους στο υπέδαφος και την αλλαγή της χημικής τους σύστασης. Οι διαδικασίες αποδόμησης περιλαμβάνουν όλες τις διεργασίες που έχουν ως αποτέλεσμα τη βιολογική, τη χημική και τη φυσική αποδόμηση των πετρελαϊκών ρύπων στο υπέδαφος . Η αποδόμηση πραγματοποιείται μέσω των παρακάτω μηχανισμών:

- της βιοαποδόμησης (microbial degradation),
- της εξάτμισης των ελαφριών συστατικών (volatilization),
- της ρόφησης των συστατικών στο έδαφος (sorption),
- της διάλυσης των συστατικών στο νερό (aqueous leaching) και
- των διαφόρων χημικών αντιδράσεων (chemical reactions).

Βιοαποδόμηση

Η αποικοδόμηση των BTEX επηρεάζει τη συγκέντρωσή τους στο έδαφος και το υπόγειο νερό. Η ύπαρξη μικροοργανισμών στο έδαφος καθιστά εφικτή την αερόβια αποδόμηση των BTEX. Αυτή η αποδόμηση θα μειώσει τη συγκέντρωσή τους στο έδαφος και το υπόγειο νερό. Οι τεχνικές βιοαποδόμησης προτείνονται μερικές φορές σαν ένα φυσικό μέσο εξυγίανσης .Με την προσθήκη θρεπτικών και οξυγόνου είναι δυνατόν να ενισχυθεί η διαδικασία της αποδόμησης. Η αναερόβια αποδόμηση έχει επανειλημμένως εφαρμοστεί όταν διαχειριζόμαστε το τολουόλιο, καθώς επίσης θα μπορούσε να αναφερθεί η πιθανότητα της αναερόβιας αποδόμησης και για τα ξυλένια. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τις μικροβιακές διαδικασίες είναι:

- η διαθεσιμότητα των δεκτών ηλεκτρονίων, (η ύπαρξη οξυγόνου βοηθά την αποδόμηση των υδρογονανθράκων σε αερόβιο μεταβολισμό και τα νιτρικά, ο σίδηρος, τα θειϊκά και το διοξείδιο του άνθρακα σε αναερόβιο).
- η περιεχόμενη υγρασία, η οποία βοηθά τους μικροοργανισμούς στην προμήθεια θρεπτικών και στην πέψη.
- το pH του εδάφους, εφόσον οι μικροοργανισμοί απαιτούν ένα συγκεκριμένο εύρος pH για να επιζήσουν (τιμή 5-9)
- η θερμοκρασία εδάφους στην οποία ευνοείται η μικροβιακή δραστηριότητα
- η διαθεσιμότητα των θρεπτικών όπως άζωτο και φώσφορος και η συγκέντρωση του ρύπου εφόσον υπερβολική ποσότητα ρύπου μειώνει το ρυθμό βιοαποδόμησης λόγω της επίδρασης της τοξικότητας.

Εξάτμιση

Η παρουσία των πτητικών οργανικών συστατικών στο υπέδαφος αποτελεί μια ένδειξη της ύπαρξης υδρογονανθράκων οι οποίοι εξατμίστηκαν. Η πηγή των συστατικών αυτών μπορεί να είναι είτε η «ελεύθερη φάση», η οποία είναι προσροφημένη πάνω στα εδαφικά σωματίδια είτε η διαλυμένη στο νερό φάση. Επειδή οι περισσότεροι ρύποι είναι ροφημένοι πάνω στα εδαφικά σωματίδια, η εκρόφηση είναι συχνά ο πρώτος μηχανισμός σε μια σειρά από διαδικασίες που λαμβάνουν μέρος πριν οι ρύποι εξατμιστούν στον αέρα. Οι περισσότεροι ρύποι εκροφούνται στο εδαφικό νερό και διαδοχικά διαχέονται στον εδαφικό αέρα και στη συνέχεια στην ατμόσφαιρα. Οι ροφημένες ενώσεις δεν μπορούν να φύγουν στην ατμόσφαιρα. Επομένως, ο έλεγχος μεταφοράς των ρύπων μέσω της εξάτμισης πρέπει να σχετίζεται με το περιεχόμενο των εδαφών σε οργανικό άνθρακα και με την κοκκομετρική κατανομής τους, δηλαδή τη διαθέσιμη επιφάνεια για ρόφηση. Το περιεχόμενο στο έδαφος νερό παρέχει ένα μέσο στο οποίο οι ρύποι μπορούν να εκροφηθούν. Η εξάτμιση ρύπων από την επιφάνεια του εδάφους λαμβάνει χώρα γρήγορα αλλά αυξανόμενου του βάθους γίνεται με πιο αργούς ρυθμούς λόγω του φαινομένου της διάχυσης. Επειδή η ταχύτητα κίνησης του αέρα και του νερού της ακόρεστης ζώνης είναι χαμηλή τα συστατικά που εξατμίστηκαν παραμένουν σε αυτή για μεγάλο χρονικό διάστημα. Τελικά τα πτητικά συστατικά μπορεί να οδηγηθούν στην ατμόσφαιρα, να επαναδιαλυθούν από το νερό της βροχής που διηθείται εντός του εδάφους, να προσροφηθούν από τα εδαφικά σωματίδια ή να καταναλωθούν μέσω της βιοαποδόμησης [3].

Οι δύο βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς των πετρελαϊκών ρύπων στο έδαφος είναι η εξάτμιση και η διήθησή τους στο υπόγειο νερό.

Ρόφηση {Απορρόφηση (absorption) και προσρόφηση (adsorption)}

Η προσρόφηση είναι η φυσική ή/και χημική διεργασία κατά την οποία μόρια ή ιόντα μιας υγρής ή μιας αέριας φάσης συσσωρεύονται σε μια διεπιφάνεια. Οι διεπιφάνειες που

ενδιαφέρουν σε προβλήματα εξυγίανσης εδαφών και υπογείων υδάτων είναι η διεπιφάνεια στερεού-υγρού, η διεπιφάνεια στερεού-αερίου, η διεπιφάνεια υγρού-αερίου και η διεπιφάνεια υγρού-υγρού. Η ουσία που συσσωρεύεται λέγεται προσρόφημα και η στερεή φάση στην επιφάνεια της οποίας λαμβάνει χώρα η προσρόφηση λέγεται προσροφητής. Σε περιπτώσεις ρύπανσης εδαφών και υπόγειων υδάτων ο κατ' εξοχήν προσροφητής είναι το έδαφος και τα γεωλογικά υλικά των υδροφορέων. Η προσρόφηση πραγματοποιείται όταν τα μόρια ενός αέριου ρύπου ή η «ελεύθερη φάση» και η διαλυμένη φάση αυτού συνδέονται με την επιφάνεια ενός εδαφικού σωματιδίου.

Ενώ η προσρόφηση είναι ένα επιφανειακό φαινόμενο η απορρόφηση (absorption) δεν είναι. Η απορρόφηση είναι η διεργασία κατά την οποία μια ουσία συσσωρεύεται μέσα σε μια άλλη φάση. Ο όρος ρόφηση (sorption) χρησιμοποιείται όταν δεν είναι επακριβώς γνωστό ποιο από τα δύο ή όταν και τα δύο φαινόμενα συμβαίνουν. Επίσης, ρόφηση είναι ο γενικός όρος για τη διεργασία κατά την οποία ένα συστατικό κινείται από μια φάση για να συγκεντρωθεί σε μια άλλη, ιδίως όταν η δεύτερη φάση είναι στερεά [16].

Η ρόφηση μπορεί να λάβει χώρα μεταξύ των οργανικών και των σωματιδίων του εδάφους. Τα BTEX δεν προσροφούνται στην εδαφική μήτρα τόσο ισχυρά όσο τα αλοιφατικά συστατικά (τα διαφορετικά αλκάνια) και είναι πιθανόν να μολύνουν μεγαλύτερους όγκους νερού. Η ρόφηση θα είναι ένας παράγοντας για τον προσδιορισμό της κίνησης των ρύπων μαζί με τη ροή του υπογείου νερού. Εάν κάποιος διαχειρίζεται μια ελαφρώς ρυπασμένη με βενζίνη περιοχή, η ρόφηση μπορεί να είναι ευνοϊκή για την παγίδευση του ρύπου με σκοπό την εξυγίανση και με αυτό τον τρόπο την αποφυγή της εξάπλωσης του . Σε αυτή την περίπτωση θα είναι αρκετά εύκολο να σκάψουμε και να απομακρύνουμε το ρυπασμένο έδαφος. Από την άλλη πλευρά, εάν κάποιος διαχειρίζεται μια περιοχή όπου η βενζίνη έχει διαλυθεί και τώρα είναι παρούσα σε μια μεγάλη έκταση, η ρόφηση δεν θα είναι ευνοϊκή επειδή θα είναι πιο δύσκολο να σκάψουμε μια τόσο μεγάλη ποσότητα εδάφους και κάποιος θα προτιμήσει να διαχειριστεί ένα μη ροφούμενο συστατικό, το οποίο είναι εύκολα διαθέσιμο για τεχνικές αποικοδόμησης.

Διάλυση στο υπόγειο νερό

Παράλληλα με την εξάτμιση, η βενζίνη θα αρχίσει να διαλύεται στο υπόγειο νερό. Συγκρινόμενα με τις άλλες κύριες ομάδες συστατικών της βενζίνης, όπως οι αλοιφατικές, τα BTEX είναι πολύ διαλυτά και η διαλυτότητα των διαφορετικών συστατικών των BTEX θα έχει μεγάλη επίδραση στις συγκεντρώσεις οι οποίες μπορεί να εμφανιστούν στο υπόγειο νερό .Όταν η βενζίνη διαλύεται σε μια υδατική φάση, θα είναι ικανή να μετακινηθεί μαζί με το υπόγειο νερό. Η κίνηση των διαλυμένων στο νερό υδρογονανθράκων πραγματοποιείται ανάλογα με τη ροή του νερού με ενδεχόμενη ρύπανση αποθεμάτων πόσιμου νερού.

Χημικές αντιδράσεις

Οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στη φύση (υδρόλυση, οξειδοαναγωγή) οδηγούν στην μείωση των ρύπων προκαλώντας χημική αποδόμηση μέσω αβιοτικών μετασχηματισμών.

Εν κατακλείδι, οι μηχανισμοί της τύχης και μεταφοράς επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά του ρύπου, τα οποία ποικίλουν ανάλογα με τα διαφορετικά συστατικά των BTEX. Γενικά, οι διαδικασίες της εξάτμισης, της διάλυσης , της αποικοδόμησης καθώς και οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα καθορίζουν τη συγκέντρωση των BTEX ενώ η ρόφηση και η διάλυση καθορίζουν τη μεταφορά τους στα συστήματα του εδάφους και του υπογείου νερού.

Αποτίμηση κινδύνου

Οι τοξικές επιδράσεις που έχουν τα BTEX στην ανθρώπινη υγεία φέρουν ανησυχία και έντονο προβληματισμό. Όλα τα συστατικά της ομάδας είναι εντόνως τοξικά και παρουσιάζουν αξιοσημείωτες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία σε υψηλές συγκεντρώσεις. Η έκθεση σε αυτά τα συστατικά από το υπόγειο νερό είναι συνήθως ελάχιστη αλλά οι εκθέσεις μπορεί να παραμείνουν για μεγάλη χρονική περίοδο (μακροπρόθεσμες επιπτώσεις).

Τα συστατικά των BTEX μπορούν να εισέλθουν στο σώμα διαμέσου της βρώσης ρυπασμένων φυτών, της αναπνοής ατμών του εδάφους, της πρόσληψης ρυπασμένου πόσιμου νερού και της έκθεσης της επιδερμίδας. Η πόση και η πλύση με νερό ρυπασμένο με οργανικά συστατικά μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα υγείας .

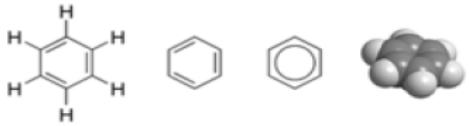
Οι περισσότερες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για το βενζόλιο, το οποίο εξ'άλλου έχει αποδειχθεί ως καρκινογενές. Το βενζόλιο θεωρείται ότι συνδέεται με τη λευχαιμία, η οποία είναι μια αρρώστια του κυκλοφορικού συστήματός μας στο αίμα.

Παράμετρος	Μέγιστη Τιμή (μg/L)
Benzene	<5
Ethylbenzene	<700
Toluene	<1000
Total Xylenes	<10000

Πίνακας 1: Μέγιστες επιτρεπτές τιμές συγκέντρωσης συστατικών BTEX στο υπόγειο νερό (EPA).

2.1.1 Βενζόλιο (Benzene)

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 απαγορευμένων ενώσεων από την EPA[15]. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται μερικές από τις βασικές ιδιότητες του βενζολίου.

Βενζόλιο	
	
Μοριακός Τύπος	C_6H_6
Μοριακό Βάρος	78.1121 g/mol
Ιδιότητες	
Πυκνότητα	0.8786 g/cm³, liquid
Σημείο τήξης	5.5 °C (278.6 K)
Σημείο βρασμού	80.1 °C (353.2 K)
Διαλυτότητα στο ύδωρ	1.79 g/L (25 °C)
Ιξώδες	0.652 cP at 20 °C
Σταθερά Henry	0.55 $kPam^3/mol$ (25°C)
Τάση ατμών	95.2 mm Hg (20°C)
Συντελεστής Κατανομής οκτανόλης-νερού	2.13 $logK_{ow}$ (20°C)
Επικινδυνότητα	
Ευρωπαϊκή Ένωση	Εύφλεκτο
	Καρκινογενές
	Μεταλλαξιογόνο
	Τοξικό
NFPA 704	
Σημείο ανάφλεξης	-11°C
Σημείο αυτανάφλεξης	561 °C

Πινακας 2: Οι πιο σημαντικές ιδιότητες του βενζολίου [4].

Ιστορία
Το βενζόλιο ανακαλύφθηκε το 1825 από το Βρετανό Michael Faraday, ο οποίος το απομόνωσε από το πετρέλαιο και το ονόμασε “bicarburet of hydrogen”. Το 1833, ο Γερμανός χημικός Eilhard Mitscherlich το κατασκεύασε με απόσταξη βενζοϊκού οξέος και ασβέστη. Το 1845, ο Βρετανός χημικός Charles Mansfield, σε συνεργασία με τον August Wilhelm von Hofmann, απομόνωσε το βενζόλιο από την πίσσα και 4 χρόνια αργότερα ξεκίνησε την πρώτη μαζική παραγωγή βενζολίου, βασιζόμενος στη μέθοδο απομόνωσης από πίσσα.

Δομή
Ο μοριακός τύπος του βενζολίου (C_6H_6) αποτελούσε μυστήριο για αρκετό καιρό αφότου ανακαλύφθηκε, αφού δεν υπήρχε εξήγηση για τον αριθμό ατόμων άνθρακα και υδρογόνου. Ο χημικός Friedrich August Kekulé von Stradonitz ήταν ο πρώτος που φαντάστηκε τη δομή του, δηλαδή την εναλλαγή της θέσης των διπλών δεσμών μεταξύ ατόμων άνθρακα.

Είναι πολύ γνωστή η ιστορία, όπου ο Kekulé ονειρεύθηκε ένα βράδυ τον Ουροβόρο, ένα αρχαίο σύμβολο, που παριστάνει ένα φίδι που δαγκώνει την ουρά του. Αφού ξύπνησε, εμπνεύσθηκε από την στάση του φιδιού και κατέληξε στη δομή δακτυλίου του βενζολίου.

Με τη βοήθεια ακτινών Χ ανακαλύφθηκε, πως όλοι οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων άνθρακα έχουν το ίδιο μήκος, ενώ είναι γνωστό, πως ο απλός δεσμός είναι μεγαλύτερος από το διπλό δεσμό.

Επιπρόσθετα, η απόσταση ανάμεσα σε δύο ενωμένα άτομα του βενζολίου είναι μεγαλύτερη από αυτή του διπλού δεσμού και ταυτόχρονα μικρότερη του μονού. Η περίπτωση αυτή ονομάζεται ηλεκτρονιακή μετακίνηση (electron delocalization).

Χρήση
Μέχρι και τις αρχές του 20ου αιώνα, το βενζόλιο χρησίμευε ως aftershave, εξαιτίας 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.

Ως 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 είναι στη 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. Λιγότερο συχνά χρησιμοποιείται στην παραγωγή ελαστικών, λιπαντικών, χρωμάτων, απορρυπαντικών, φαρμάκων, εκρηκτικών, εντομοκτόνων, καθώς επίσης και στον καπνό [4].

Επιπτώσεις στην υγεία
Η έκθεση σε βενζόλιο έχει πολύ σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία. Η εισπνοή πολύ μεγάλων ποσοτήτων μπορεί να προκαλέσει θάνατο, ενώ σε μικρότερες ποσότητες προκαλεί ζαλάδες, πονοκεφάλους και ταχυκαρδίες. Η κατανάλωση τροφών και ποτών που περιέχουν μεγάλες ποσότητες βενζολίου μπορεί να προκαλέσει εμετούς, ερεθισμούς στο στομάχι, υπνηλία και ενδεχομένως σε θάνατο.

Η χειρότερη επίπτωση εξαιτίας συνεχούς έκθεσης σε βενζόλιο είναι στο αίμα, αφού μπορεί να προκαλέσει μείωση ερυθρών αιμοσφαιρίων, οδηγώντας σε ανομία, καθώς επίσης να καταστρέψει το μυελό των οστών και να εξασθενίσει το ανοσοποιητικό σύστημα. Υπάρχουν περιπτώσεις διαταραχής του γυναικείου κύκλου, ενώ δεν είναι ακόμα γνωστό, εάν επηρεάζει τη γονιμότητα ή εγκύους. Πειράματα σε ζώα έδειξαν νεογνά μικρού βάρους, καθυστερημένη ανάπτυξη του σκελετού και καταστροφή του μυελού των οστών.

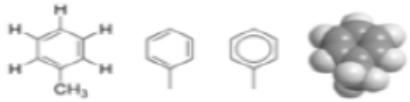
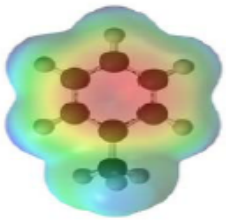
Το Υπουργείο Υγείας των Η.Π.Α. (D.H.H.S.) κατηγοριοποιεί το βενζόλιο σαν καρκινογόνο για τον άνθρωπο, αφού συνεχής έκθεση σε υψηλά επίπεδα στον αέρα μπορεί να προκαλέσει λευχαιμία και πιο συγκεκριμένα την Οξεία Μυελώδη Λευχαιμία.

Για τον εντοπισμό της έκθεσης σε βενζόλιο, έχουν αναπτυχθεί αρκετά tests, με ανίχνευση στην αναπνοή και στο αίμα. Και στις δύο περιπτώσεις, η εξέταση θα πρέπει να γίνεται σχετικά σύντομα από την έκθεση, αφού το βενζόλιο εξαφανίζεται αμέσως από το αίμα, ενώ εξαιτίας του μεταβολισμού του, μπορεί να εντοπιστεί και στα ούρα [4].

Σύμφωνα με την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency (E.P.A.)), το μέγιστο επιτρεπτό όριο βενζολίου στο πόσιμο νερό είναι 5 μg/l (0.005 mg/l), ενώ για τον εισπνεόμενο αέρα το όριο είναι 1 ppm για 8ωρη παραμονή στο χώρο, για 40 ώρες την εβδομάδα [4].

2.1.2 Τολουόλιο

Το Τολουόλιο (Toluene), γνωστό και ως μέθυλο-βενζόλιο είναι ένας αρωματικός υδρογονάνθρακας, σχεδόν αδιάλυτος στο νερό, με χαρακτηριστική οσμή. Χρησιμοποιείται κυρίως ως διαλύτης στη βιομηχανία. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται μερικές από τις βασικές ιδιότητες του Τολουολίου [5].

Τολουόλιο	
	
	
Μοριακός Τύπος	C_7H_8 ($C_6H_5CH_3$)
Μοριακό Βάρος	92.14 g / mol
Ιδιότητες	
Πυκνότητα	0.8669g/cm^3, liquid
Σημείο τήξης	-93 ° C
Σημείο βρασμού	110.6 ° C
Διαλυτότητα στο ύδωρ	0.053 g/100 mL (20-25 ° C)
Ιξώδες	0.590 cP (20 ° C)
Επικινδυνότητα	
Ευρωπαϊκή Ένωση	Εύφλεκτο
NFPA 704	
Σημείο ανάφλεξης	4°C

Πινακας 3: Ιδιότητες Τολουολίου[5].

Ιστορία

Το όνομα Τολουόλιο αρχικά προσδιόριζε την αρωματική ουσία, που προέρχεται από το δέντρο «Myroxylon balsam», από το οποίο απομονώθηκε η συγκεκριμένη ουσία για πρώτη φορά. Το όνομά του εμπνεύσθηκε ο Jöns Jakob Berzelius.

Χημικές ιδιότητες

Το Τολουόλιο αντιδρά σαν απλός αρωματικός υδρογονάνθρακας, ως ηλεκτρονιόφιλος αρωματικός υποκαταστάτης. Η μεθυλομάδα είναι περίπου 25 φορές πιο δραστική από το

απλό Βενζόλιο σε παρόμοιες αντιδράσεις. Σε περίπτωση νιτροποίησής του δίνει τα όρθο- και πάρα- νιτρο-τολουόλιο ισομερή, ενώ σε περίπτωση θέρμανσης προκύπτει το δι-νιτρο-τολουόλιο και τελικά το τρι-νιτρο-τολουόλιο, το οποίο κοινώς αποκαλείται TNT και αποτελεί εκρηκτική ύλη[5].

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 [5].

Τοξικότητα και μεταβολισμός

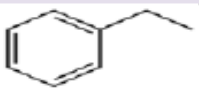
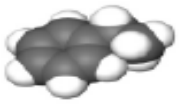
Η εισπνοή μικρών ποσοτήτων ατμών τολουολίου μπορεί να μην αποδεικνύεται τοξική, όμως σε μεγάλες ποσότητες προκαλεί ναυτίες, ενώ συχνή και διαρκής εισπνοή του για μεγάλα χρονικά διαστήματα μπορεί να προκαλέσει μη αναστρέψιμες εγκεφαλικές βλάβες. Το τολουόλιο δεν εισέρχεται στο ανθρώπινο σώμα μόνο μέσω της εισπνοής, αλλά και μέσω της επαφής του ανθρώπου με το έδαφος [7].

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 από την EPA για συγκεντρώσεις τολουολίου για το πόσιμο νερό είναι 0.8 mg/l [6]

2.1.3 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. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται μερικές από τις βασικές ιδιότητες του Αιθυλοβενζολίου.

Αιθυλο-βενζόλιο	
	
	
Μοριακός Τύπος	C_8H_{10}
Μοριακό Βάρος	106.167 g/mol
Ιδιότητες	
Πυκνότητα	0.867 g/cm^3, liquid
Σημείο τήξης	-95 °C (188 K)
Σημείο βρασμού	136 °C (409 K)
Διαλυτότητα στο ύδωρ	0.015 g/100 ml (20 °C)
Ιξώδες	0.669 cP (20 °C)
Σταθερά Henry	0.80 kPam^3/mol (25°C)
Τάση ατμών	9.5 mm Hg (20°C)
Συντελεστής Κατανομής οκτανόλης-νερού	3.15 $\log K_{ow}$ (20°C)
Επικινδυνότητα	
Ευρωπαϊκή Ένωση	Εύφλεκτο
NFPA 704	
Σημείο ανάφλεξης	15-20 °C

Πίνακας 4 : Βασικές ιδιότητες του αιθυλοβενζολιου[8].

Ιστορία

Το αιθυλο-βενζόλιο χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην πετροχημική βιομηχανία ως ενδιάμεσο συστατικό της παραγωγής στυρενίου, το οποίο αν πολυμεριστεί δίνει το πολυστυρένιο, που συνήθως χρησιμοποιείται ως πλαστικό.

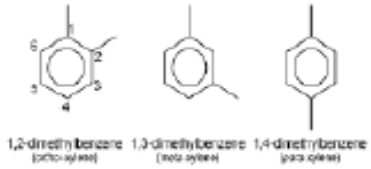
Χημικές ιδιότητες
Το Αιθυλο-βενζόλιο είναι ένα εύφλεκτο και εκρηκτικό υγρό, οι ατμοί του είναι βαρύτεροι από τον αέρα, ενώ σε υγρή μορφή, επιπλέει στην επιφάνεια του νερού και μπορεί να προκαλέσει ανάφλεξη και φωτιά. Σε ανάφλεξη, μπορεί να προκαλέσει ερεθισμούς και να απελευθερώσει τοξικά αέρια, ενώ μπορεί και να αντιδράσει με οξειδωτικά υλικά. Είναι διαλυτό σε αλκοόλ και αιθέρες, εξατμίζεται σε θερμοκρασία δωματίου και καίγεται εύκολα. Επίσης, βρίσκεται κυρίως σαν ατμός, αφού μεταφέρεται εύκολα στον αέρα από το νερό και το έδαφος[9].

Χρήσεις
Το αιθυλο-βενζόλιο βρίσκει κυρίως χρήση στην παραγωγή στυρενίου και συνθετικών πολυμερών, καθώς επίσης και ως διαλύτης, 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[9].

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 προκαλέσει παράλυση και ενδεχομένως, θάνατο. Καθώς εισπνέεται αέρας που περιέχει αιθυλο-βενζόλιο, αυτό εισέρχεται στο σώμα άμεσα, μέσω των πνευμόνων, ενώ το ίδιο συμβαίνει και μέσω του στομαχιού κατά την κατάποση φαγητού και ποτού. Στην υγρή φάση, μπορεί να εισέλθει στον οργανισμό μέσω του δέρματος, χωρίς να συμβαίνει το ίδιο με ατμούς αιθυλο-βενζολίου[9].Το όριο που έχει θεσπιστεί από την EPA για συγκεντρώσεις αιθυλο-βενζολίου για το πόσιμο νερό είναι 0.3 mg/l [10] .

2.1.4 Ξυλόλιο ή Ξυλένιο

Με τον όρο Ξυλόλιο ή Ξυλένιο περιγράφεται μια ομάδα τριών συστατικών της βενζίνης, η οποία περιλαμβάνει τα όρθο- (o), μέτα- (m), πάρα- (p) ισομερή του δι-μεθυλο-βενζολίου. Τα γράμματα o, m, p συμβολίζουν αντίστοιχα το άτομο άνθρακα του μορίου του βενζολίου, στο οποίο συνδέεται το κάθε μεθύλιο[11]. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται μερικές από τις βασικές ιδιότητες των Ξυλένιων .

Ξυλένιο				
				
Κοινό όνομα	Xylenes	*o*-Xylene	*m*-Xylene	*p*-Xylene
Συστηματικό όνομα	Dimethylbenzenes	1,2-Dimethylbenzene	1,3-Dimethylbenzene	1,4-Dimethylbenzene
Μοριακός Τύπος	C_8H_{10} ($C_6H_4C_2H_6$)			
Μοριακό Βάρος	106.16 g/mol			
Ιδιότητες				
Πυκνότητα	0.864 g/mL, (liquid)	0.88 g/mL, (liquid)	0.86 g/mL, (liquid)	0.86 g/mL, (liquid)
Σημείο τήξης	-47.4°C (226 K)	−25°C (248 K)	−48°C (225 K)	13°C (286 K)
Σημείο βρασμού	138.5°C (412 K)	144°C (417 K)	139°C (412 K)	138°C (411 K)
Διαλυτότητα στο ύδωρ	-	175 mg/l (25 °C)	157 mg/l (25 °C)	198mg/l (25 °C)
Σταθερά Henry	-	0.50kPam^3/mol (25°C)	-	0.71kPam^3/mol (25°C)
Τάση ατμών	-	6.6 mm Hg (20°C)	-	-
Συντελεστής Κατανομής οκτανόλης-νερού	-	2.77 $\log K_{ow}$ (20°C)	3.20 $\log K_{ow}$ (20°C)	3.15 $\log K_{ow}$ (20°C)
Επικινδυνότητα				
Ευρωπαϊκή Ένωση		Εύφλεκτο Επιβλαβή		
NFPA 704				
Σημείο ανάφλεξης	24 °C (75 °F)	17 °C (63 °F)	25 °C (77 °F)	25 °C (77 °F)

Πίνακας 5 :Ιδιότητες Ξυλενίων [11].

Ονοματολογία

Για να αριθμιστούν τα άτομα άνθρακα, ξεκινώντας από έναν από αυτούς που συνδέονται με το μεθύλιο, αριθμούμε με φορά προς το δεύτερο άτομο άνθρακα που φέρει μεθύλιο. Το όρθο-ξυλόλιο είναι το ισομερές, όπου το δεύτερο μεθύλιο συνδέεται με το αμέσως επόμενο άτομο άνθρακα από το πρώτο, έτσι κατά IUPAC ονομάζεται 1,2-δι-μεθυλο-

βενζόλιο. Αντίστοιχα, τα ισομερή μέτα- και πάρα-ξυλόλια ονομάζονται κατά IUPAC 1,3-δι-μεθυλο-βενζόλιο και 1,4-δι-μεθυλο-βενζόλιο.

Χημικές ιδιότητες
Το ξυλόλιο είναι ένα διάφανο και εύφλεκτο υγρό με χαρακτηριστική οσμή, το οποίο εμφανίζεται στο πετρέλαιο και στο κάρβουνο, ενώ σχηματίζεται κατά τη διάρκεια πυρκαγιών σε δάση. Οι χημικές ιδιότητες από ισομερές σε ισομερές διαφέρουν ελάχιστα.

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 [11],[12].

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 [13].

Εκτός από την απευθείας έκθεση σε αυτό, ο άνθρωπος μπορεί να εκτεθεί ερχόμενος σε επαφή με ρυπασμένο - λόγω διαρροών πετρελαϊκών προϊόντων – έδαφος, οπότε εκτός της επαφής ανθρώπου – Ξυλένιων μέσω του εδάφους εγκυμονεί ο κίνδυνος έκθεσης μέσω του ρυπασμένου νερού. Το όριο από την EPA που έχει θεσπιστεί για συγκεντρώσεις ξυλένιων για το πόσιμο νερό είναι 0.6 mg/l [12].

2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΦΟΣ

Η έντονη εμφάνιση προβλημάτων ρύπανσης του υπεδάφους σε συνδυασμό με τη μελέτη και την κατανόηση των μηχανισμών μεταφοράς και μετασχηματισμού των ρύπων μέσα σε αυτό, οδήγησαν σταδιακά στην ανάπτυξη πολλών αποτελεσματικών τεχνολογιών αποκατάστασης εδάφους και υπόγειων υδάτων. Οι υπάρχουσες τεχνολογίες είναι αρκετά εξειδικευμένες και είναι δυνατόν να ταξινομηθούν σε ξεχωριστές κατηγορίες, βάσει κάποιου συγκεκριμένου κριτηρίου. Για παράδειγμα, οι χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες μπορούν καταρχήν να διακριθούν σε **in-situ** και **ex-situ,** ανάλογα με το αν εφαρμόζονται απευθείας στο πεδίο (χωρίς απομάκρυνση του ρυπασμένου εδάφους ή υπόγειου νερού) ή αν περιλαμβάνουν την απομάκρυνση του ρυπασμένου μέσου και την επεξεργασία του μακριά από το πεδίο σε ειδικές εγκαταστάσεις.

Μια άλλου είδους διακριτοποίηση αφορά τους μηχανισμούς τους οποίους εκμεταλλεύεται κάθε τεχνολογία για την απομάκρυνση του εκάστοτε ρύπου, οι οποίοι αν είναι φυσικοί κατατάσσουν την αντίστοιχη τεχνολογία στις **φυσικές** μεθόδους επεξεργασίας εδαφών και υπόγειων υδάτων ,αν είναι χημικοί σε **χημικές** μεθόδους, αν είναι βιοτικοί στις μεθόδους **βιοεξυγίανσης**, κλπ. Επίσης, κατάταξη των τεχνολογιών αποκατάστασης εδαφών και υπόγειων υδάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί και βάσει της επίδρασής τους στον εκάστοτε ανεπιθύμητο ρύπο , η οποία μπορεί να περιλαμβάνει την πλήρη **καταστροφή** του (π.χ. βιοαποικοδόμηση), την **απομάκρυνση** του από το ρυπασμένο πεδίο (π.χ. τεχνολογία άντλησης εδαφικού αέρα), τη **δέσμευση** του (π.χ. φυτοεξυγίανση) ή απλά τον **περιορισμό** του (π.χ. ενεργοί αντιδρώντες τοίχοι)[14].

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας αποκατάστασης γίνεται βάσει ορισμένων σημαντικών κριτηρίων, μεταξύ των οποίων είναι τα ακόλουθα [14] :

- Ο τύπος και τα χαρακτηριστικά του υφιστάμενου ρύπου
- Τα χαρακτηριστικά του προς εξυγίανση πεδίου (π.χ. τύπος εδάφους, διαπερατότητα, τοπογραφία, υδρογεωλογία , κλίμα κ.α.)
- Ο εκάστοτε στόχος εξυγίανσης
- Το κόστος της προτεινόμενης τεχνολογίας (κόστος αρχικό, λειτουργικό και συντήρησης)

➢ Στην παρούσα εργασία γίνεται εστίαση στην αποκατάσταση των υπόγειων υδάτων αποκλειστικά.

2.2.1 EX-SITU ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

2.2.1.1 Άντληση και επεξεργασία (pump-and-treat)

Η αποκατάσταση ρυπασμένων υδροφορέων με άντληση και υπέργεια επεξεργασία του υπόγειου νερού αποτέλεσε για πολλά χρόνια τη μοναδική εφαρμοζόμενη τεχνολογία εξυγίανσης υπόγειων υδάτων. Βάσει αυτής, το ρυπασμένο υπόγειο νερό μεταφέρεται στην επιφάνεια του εδάφους (με κατάλληλα πηγάδια άντλησης), όπου επεξεργάζεται και στη συνέχεια επανατοποθετείται στο υπέδαφος ή καταλήγει σε επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες, επιτυγχάνοντας πολύ ικανοποιητικό βαθμό καθαρισμού του υπόγειου νερού και ταυτόχρονο περιορισμό της εξάπλωσης της ήδη υπάρχουσας ρύπανσης [14].

Βασικά χαρακτηριστικά
Η τεχνολογία άντλησης και επεξεργασίας μπορεί να σχεδιαστεί και να εφαρμοστεί σε ένα ρυπασμένο πεδίο με δυο βασικούς τρόπους, έτσι ώστε να επιτυγχάνει διαφορετικούς στόχους :

1. Τον περιορισμό του υπάρχοντος πλουμίου ρύπανσης
2. Την εξυγίανση του υπόγειου νερού

Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούνται πηγάδια άντλησης και πηγάδια διοχέτευσης νερού στον υπόγειο υδροφορέα , με στόχο τον έλεγχο και την αλλαγή της κατεύθυνσης της υπόγειας ροής, έτσι ώστε να αποτραπεί η εξάπλωση του υπάρχοντος πλουμίου ρύπανσης. Οι ρυθμοί άντλησης είναι γενικά χαμηλοί και συχνά χρησιμοποιούνται φράγματα, ανάντη ή κατάντη της πηγής ρύπανσης ,για ακόμη μεγαλύτερο περιορισμό του υπάρχοντος πλουμίου.

Στη δεύτερη περίπτωση, στόχος των χρησιμοποιουμένων πηγαδιών άντλησης είναι η απομάκρυνση όσο το δυνατόν μεγαλύτερων ποσοτήτων νερού, προκειμένου να επεξεργαστούν και να επαναδιοχετευτούν στον υδροφορέα. Οι ρυθμοί άντλησης είναι πολύ μεγάλοι και απαιτείται η εγκατάσταση ειδικής μονάδας επεξεργασίας του αντλούμενου νερού.

Ο σχεδιασμός συστημάτων άντλησης και επεξεργασίας είναι αρκετά πολύπλοκος, καθώς προϋποθέτει καλή γνώση των επικρατούντων υδρογεωλογικών συνθηκών του προς εξυγίανση πεδίου.

Βασικές υδρογεωλογικές και υδραυλικές παράμετροι σχεδιασμού και λειτουργίας συστημάτων άντλησης και επεξεργασίας υπόγειου νερού [18].

- Υδραυλική αγωγιμότητα : η ευκολία με την οποία κινείται το νερό στο υπέδαφος επηρεάζει το δυνατό ρυθμό της άντλησης του.

- Υδραυλική κλίση: επηρεάζει τη διεύθυνση κίνησης των ρύπων

- Μεταβασιμότητα (transmissivity): επηρεάζει τον δυνατό ρυθμό άντλησης του υπόγειου νερού

- Ταχύτητα ροής υπόγειου νερού: επηρεάζει τη διεύθυνση και την ταχύτητα ροής των ρύπων

- Πορώδες: επηρεάζει την υδραυλική αγωγιμότητα και την τύχη των ρύπων, βάσει των διάφορων φυσικών, χημικών και βιολογικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα

- Ενεργό πορώδες: επηρεάζει την ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού

- Συντελεστής αποθηκευτηκότητας : επηρεάζει την ποσότητα υπόγειου νερού που μπορεί να αντληθεί.

- Ειδική αποθηκευτικότητα: επηρεάζει την ποσότητα υπόγειου νερού που μπορεί να αντληθεί.

Η σημαντικότερη ίσως σχεδιαστική παράμετρος συστημάτων άντλησης και επεξεργασίας υπόγειων υδάτων είναι η ζώνη σύλληψης των πηγαδιών άντλησης. Η ζώνη σύλληψης αποτελεί την απόσταση γύρω από ένα πηγάδι άντλησης στην οποία πραγματοποιείται ροη του υπόγειου νερού προς το πηγάδι και παρατηρείται καταβιβασμός του υδροφόρου ορίζοντα. Η ακτίνα αυτή επηρεάζεται άμεσα από το ρυθμό άντλησης και τα χαρακτηριστικά του προς εξυγίανση υδροφορέα, ενώ παράλληλα καθορίζει τον αριθμό των απαιτούμενων πηγαδιών άντλησης και τη χωροθετησή τους στη ρυπασμένη περιοχή. Τυπικά, η συνολική ζώνη άντλησης του συστήματος θα πρέπει να υπερκαλύπτει την έκταση της υφιστάμενης ρύπανσης.

Οι βασικότερες διαθέσιμες τεχνολογίες επεξεργασίας υπόγειου νερού ρυπασμένου με οργανικούς ρύπους είναι οι εξής:

- Εκφύσηση με αέρα (air stripping)
- Προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα
- Εκφύσηση σε ατμό (vapor stripping)
- Χημική οξείδωση
- Βιοαποικοδόμηση
- Διήθηση σε μεμβράνες

Οι βασικότερες διαθέσιμες τεχνολογίες επεξεργασίας υπόγειου νερού ρυπασμένου με ανόργανους ρύπους είναι οι εξής :

- Καθίζηση
- Ιονανταλλαγή
- Προσρόφηση
- Αντίστροφη ώσμωση
- Εκφύσηση σε ατμό (vapor stripping)
- Χημική οξείδωση

<u>Δυνατότητες εφαρμογής</u>

Η τεχνολογία άντλησης και επεξεργασίας υπόγειων υδάτων αποτελεί μια αρκετά ευέλικτη μέθοδο εξυγίανσης, όσον αφορά την ποικιλία των ρύπων που μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά. Ο μοναδικός περιορισμός της είναι η διαλυτότητα του υφιστάμενου ρύπου οποία αν είναι μικρή καθιστά αδύνατη την απομάκρυνση του με άντληση του υπόγειου νερού. Σε αντίθετη περίπτωση, όπου η διαλυτότητα του υφιστάμενου ρύπου και η μεταφορά του στην επιφάνεια του εδάφους με την άντληση του υπόγειου νερού είναι μεγάλη, η αντιμετώπιση του είναι σχετικά εύκολη.

Ανάλογα με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του, επιλέγεται μια από τις πολυάριθμες τεχνολογίες επεξεργασίας νερού και αποβλήτων, επιτυγχάνοντας πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα εξυγίανσης [14] .

Πλεονεκτήματα

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας άντλησης και επεξεργασίας ρυπασμένων υδάτων είναι τα εξής :

- Μπορεί να επεξεργαστεί μεγάλη ποικιλία ρύπων, καθώς η επεξεργασία του ρυπασμένου νερού γίνεται υπέργεια, εφαρμόζοντας την καταλληλότερη τεχνολογία
- Επιτυγχάνει πολύ καλές αποδόσεις ,όσον αφορά στη μείωση της συγκέντρωσης του υφιστάμενου ρύπου στο αντλούμενο νερό
- Επιτυγχάνει περιορισμό της υφιστάμενης ρύπανσης, παράλληλα με την εξυγίανση του ρυπασμένου εδάφους
- Δεν επεμβαίνει ‘’χημικά’’ ή ΄΄βιολογικά΄΄ στο υπέδαφος (π.χ. με την προσθήκη χημικών ουσιών ή μικροοργανισμών)
- Αποτελεί σχετικά εύκολα ελεγχόμενη τεχνολογία εξυγίανσης

Μειονεκτήματα

Όσον αφορά στα μειονεκτήματα της άντλησης και επεξεργασίας υπόγειων υδάτων ,αυτά περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Απαιτείται σχετικά μεγάλος χρόνος εξυγίανσης , λόγω του φαινομένου tailing.
- Μετά την εφαρμογή της είναι πολύ πιθανό να παρατηρηθεί αύξηση της συγκέντρωσης των υφιστάμενων ρύπων στο υπόγειο νερό.
- Οι συγκεντρώσεις των ρύπων στο υπόγειο υδροφορέα κατά τη διάρκεια και μετά την εφαρμογή της, παραμένουν σχεδόν πάντα πάνω από τα επιθυμητά όρια.
- Παρουσιάζει υψηλό κόστος εφαρμογής σε σχέση με άλλες τεχνολογίες εξυγίανσης υπόγειων υδάτων.
- Είναι αποτελεσματική για την απομάκρυνση διαλυμένων κυρίως ρύπων
- Παρουσιάζει σχετικά δύσκολο σχεδιασμό.
- Δεν μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα και με μεγάλη απόδοση σε πεδία με πολύπλοκη υδρογεωλογία (π.χ. με παρουσία αδιαπέρατων στρωμάτων, ανομοιογένειας και ανισοτροπίας ή με πολύπλοκη ροη υπόγειου νερού) [14].

2.2.2 IN-SITU ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

2.2.2.1 Διαπερατά αντιδρώντα φράγματα

Τα διαπερατά αντιδρώντα φράγματα (Permeable Reactive Barriers-PRB) αποτελούν μια ιδιαίτερα πρόσφατη και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία in-situ επεξεργασίας υπόγειων υδάτων. Πρόκειται για κάθετους ‘’τοίχους’’ ,οι οποίοι τοποθετούνται κατάντη της πηγής ρύπανσης και αποτελούνται από διαπερατά αντιδρώντα υλικά, που επιτρέπουν τη διέλευση του νερού μέσα από αυτά ,αλλά ταυτόχρονα συγκρατούν, μετασχηματίζουν και γενικότερα ‘’εξουδετερώνουν’’ τους υφιστάμενους ρύπους. Ουσιαστικά λειτουργούν ως ένα είδος φίλτρου, το οποίο καθαρίζει το ρυπασμένο υπόγειο νερό που περνάει μέσα από αυτό [14].

Βασικά χαρακτηριστικά

Τα υπάρχοντα συστήματα διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο βασικές κατηγοριες[14] :

- Τάφροι υψηλής διαπερατότητας (permeable reactive trench)
- Φράγματα και πύλες (funnel and gate).

Τάφροι υψηλής διαπερατότητας (permeable reactive trench)

Τα συστήματα αυτά αποτελούν την πιο απλή εφαρμογή της τεχνολογίας διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων, καθώς αποτελούνται από μια τάφρο, η οποία γεμίζεται με κατάλληλο διαπερατό υλικό και εκτείνεται σε όλο το πλάτος του υφιστάμενου πλουμιού ρύπανσης. Τοποθετείται κατάντη της πηγής ρύπανσης ,έτσι ώστε το ρυπασμένο υπόγειο νερό να αναγκαστεί να περάσει μέσα από αυτήν και να εξυγιανθεί, με τη διεξαγωγή διαφόρων διεργασιών μεταφοράς μάζας ρύπων ή χημικών αντιδράσεων.

Φράγματα και πύλες (funnel and gate)

Αυτού του είδους τα συστήματα διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων στόχο έχουν ,εκτός από την εξυγίανση των υπόγειων υδάτων, τον έλεγχο και την αλλαγή της υπόγειας ροής. Αποτελούνται από δυο τάφρους, οι οποίες όμως συνίστανται από υλικό χαμηλής διαπερατότητας και ενώνονται με μια διαπερατή τάφρο, η οποία είναι κατασκευασμένη από κατάλληλο υλικό.

Οι δυο αδιαπέρατες τάφροι υποχρεώνουν το υπόγειο νερό να περάσει μέσα από μια ΄΄ζώνη΄΄ υψηλής διαπερατότητας (πύλη) , όπου επεξεργάζεται κατάλληλα. Με τον έλεγχο της υπόγειας ροής, αποτρέπεται η διαφυγή ρυπασμένου ,νερού περιφερειακά του συστήματος, καθώς επίσης μειώνεται και το απαιτούμενο μήκος της διαπερατής τάφρου με το αντιδρών υλικό.

Οι βασικότερες σχεδιαστικές παράμετροι των συστημάτων φραγμάτων και πυλών περιλαμβάνουν τα εξής:

- Το μήκος και την περιεχομένη γωνία των αδιαπέρατων φραγμάτων
- Το μήκος και το πάχος της πύλης
- Τη διαπερατότητα της πύλης

Γενικότερα, για ένα σωστό σχεδιασμό και μια επιτυχή χρήση συστημάτων διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων για την εξυγίανση υπόγειων υδάτων πρέπει να προσδιοριστούν δυο ειδών παράμετροι:

- Τα χαρακτηριστικά των υφιστάμενων ρύπων (πηγή, έκταση, χωρική κατανομή, χημικές και φυσικές ιδιότητες, συγκέντρωση, κτλ)

- Οι ιδιότητες του ρυπασμένου υδροφορέα (γεωλογικά χαρακτηριστικά, διεύθυνση ροής υπόγειου νερού, υδραυλική αγωγιμότητα, διαπερατότητα, γεωχημικά χαρακτηριστικά, ομοιογένεια, ισοτροπία, κτλ) [14].

Δυνατότητες εφαρμογής

Τα υπόγεια διαπερατά αντιδρώντα φράγματα μπορούν να εγκατασταθούν και να παρουσιάσουν ικανοποιητική απόδοση εξυγίανσης σε εδάφη αμμώδη ,αργιλώδη ή σε συνδυασμό αυτών των δυο εδαφικών τύπων. Το πορώδες του υδροφορέα πρέπει να είναι ικανοποιητικό και η ενδεχόμενη ετερογένεια της ευρύτερης περιοχής εξυγίανσης να μην προκαλεί προβλήματα εγκατάστασης των φραγμάτων ή ομαλής ροής του υπόγειου νερού. Επίσης, το υφιστάμενο πλούμιο ρύπανσης πρέπει να βρίσκεται σε σχετικά μικρό βάθος (<16 m) και κάτω από αυτό να υπάρχει αδιαπέρατο στρώμα, ώστε να μην υπάρχει περίπτωση διαφυγής ρύπων κάτω από το τοποθετημένο διαπερατό αντιδρών φράγμα.

Όσον αφορά στο είδος των ρύπων που μπορούν να αντιμετωπιστούν επιτυχώς από τα συστήματα διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων ,αυτοί περιλαμβάνουν μια ευρεία ποικιλία χημικών ουσιών. Δεδομένου ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός διεργασιών επεξεργασίας στις διαπερατές τάφρους ή πύλες(π.χ. προσρόφηση, καθίζηση, εκφύσηση, κτλ), μπορούν να απομακρυνθούν πολλοί και διαφορετικοί ρύποι υπόγειων υδάτων, από πτητικούς ή χλωριωμένους υδρογονάνθρακες έως και βαρέα μέταλλα [14].

Πλεονεκτήματα

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των συστημάτων διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων είναι τα εξής :

- Αποτελούν in-situ τεχνολογία, η οποία δεν προϋποθέτει την άντληση του ρυπασμένου νερού και τη μεταφορά του σε ειδικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας μειώνοντας σημαντικά το απαιτούμενο κόστος εφαρμογής
- Αποτελούν παθητική τεχνολογία επεξεργασίας, η οποία δεν απαιτεί την κατανάλωση ενέργειας, αλλά μόνο περιοδική παρακολούθηση
- Επιφέρουν σχεδόν μηδενική επέμβαση στην επιφάνεια του εδάφους, επιτρέποντας τη χρήση του προς εξυγίανση πεδίου
- Δεν απαιτούν τον ακριβή προσδιορισμό της πηγής ρύπανσης
- Μπορούν να αντιμετωπίσουν μεγάλο εύρος ρύπων
- Έχουν ελάχιστες απαιτήσεις σε συντήρηση και ιδιαίτερα χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο μακροπρόθεσμα αποσβένει το σχετικά υψηλό κόστος εγκατάστασης τους

Μειονεκτήματα

Όσον αφορά στα κυριότερα μειονεκτήματα των συστημάτων διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων, αυτά περιλαμβάνουν τα εξης[14]:

- Απαιτούν πολύ λεπτομερή και ακριβή χαρακτηρισμό του προς εξυγίανση υδροφορία και των υφιστάμενων ρύπων
- Μπορούν να αντιμετωπίσουν επιτυχώς κυρίως ρηχά πλούμια ρύπανσης (σε βάθος < 16 m)
- Παρουσιάζουν υψηλό κόστος κατασκευής και εγκατάστασης
- Η μικροβιακή δραστηριότητα είναι δυνατόν να περιορίσει την απόδοση τους ,λόγω φαινομένων ΄΄φραξίματος΄΄
- Δεν μπορούν να εγκατασταθούν σε περιοχές με υπάρχουσες επίγειες κατασκευές ή με πολύπλοκα γεωλογικά χαρακτηριστικά (π.χ. παρουσία ρηγμάτων ,αδιαπέρατων φακών ,κτλ)
- Παρουσιάζουν υπερβολικό κόστος εφαρμογής στην περίπτωση ύπαρξης μεγάλου πλουμίου ρύπανσης (πλάτους μεγαλυτέρου από 300 m) ή απαίτησης μεγάλων ποσοτήτων αντιδρώντος υλικού
- Δεν είναι αποτελεσματικά όταν επικρατούν που χαμηλές ή πολύ υψηλές ταχύτητες ροής του υπόγειου νερού
- Ίσως να απαιτείται έλεγχος του pH

2.2.2.2 Air Sparging

Η μέθοδος air sparging εκπροσωπεί μια σχετικά νέα και πολύ αποτελεσματική τεχνολογία εξυγίανσης υπόγειων υδάτων ,η οποία σε γενικές γραμμές, αφορά στη διοχέτευση αέρα μέσα στο υπέδαφος με στόχο την εξάτμιση των υφιστάμενων ρύπων και την ενίσχυση της βιοαποικοδόμησης. Στις πλείστες των περιπτώσεων ο ανεπιθύμητος ρύπος, ο οποίος επιχειρείται να απομακρυνθεί με την μέθοδο air sparging, είναι οι οργανικές πτητικές ενώσεις [14].

- Η συγκεκριμένη μέθοδος επιλέγεται ως προς διερεύνηση στην παρούσα εργασία γι' αυτό το λόγο παρατίθενται σε επομένη ενότητα αναλυτικά και λεπτομερώς όλα τα (τεχνικά λειτουργικά και οικονομικά) γνωρίσματα και χαρακτηριστικά της.

2.2.2.3 Βιοαναρρόφηση (bioslurping)

Η βιοαναρρόφηση (bioslurping) αποτελεί μια νέα και ιδιαίτερα αποτελεσματική τεχνολογία, η οποία εφαρμόζεται κυρίως για την αποκατάσταση υδροφορέων που έχουν ρυπανθεί από πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες. Στην πραγματικότητα, επιτυγχάνει την ταυτόχρονη εξυγίανση δυο διαφορετικών μέσων , του εδάφους και των υπόγειων υδάτων, καθώς συνδυάζει στοιχειά τριών διαφορετικών διεργασιών:

- Της άντλησης ελεύθερης φάσης (LNAPL) υπό κενό
- Της άντλησης εδαφικού αέρα (soil vapor extraction)
- Του βιοαερισμού (bioventing)

Με τη διεργασία της άντλησης υπό κενό, επιτυγχάνεται η ανάκτηση των υφιστάμενων ποσοτήτων ελαιωδών που ΄΄επιπλέουν΄΄ στον υπόγειο υδροφορέα, με όσο το δυνατόν μικρότερη άντληση υπόγειου νερού, ενώ με τις τεχνολογίες της άντλησης εδαφικού αέρα και του βιοαερισμού της ακόρεστης ζώνης ενισχύεται η βιοαποικοδόμηση πτητικών οργανικών ρύπων [14].

Βασικά χαρακτηριστικά

Η βασική ιδέα της τεχνολογίας της βιοαναρρόφησης είναι η απομάκρυνση ελαφριών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (LNAPL) ,οι οποίοι έχουν συσσωρευτεί στον υδροφόρο ορίζοντα, υπό την μορφή ελεύθερης ελαιώδους φάσης. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ειδικά πηγάδια, τα οποία έχουν διάτρητο περίβλημα στο ύψος του υδροφόρου ορίζοντα.

Αρχικά πραγματοποιείται απομάκρυνση ελαιωδών και νερού, καθώς οι διαθέσιμες ποσότητες ελαιωδών μειώνονται, λαμβάνει χώρα άντληση του περιβάλλοντος εδαφικού αέρα.

Οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει η τεχνολογία της βιοαναρρόφησης και την καθιστούν αποτελεσματικότερη από άλλες κοινές μεθόδους άντλησης ελαιωδών είναι οι εξής:

- Δεν προκαλεί πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα ή ανάπτυξη του λεγόμενου ΄΄κώνου΄΄ άντλησης, με αποτέλεσμα την αποφυγή οποιουδήποτε είδους ανάμιξης της ελεύθερης ελαιώδους φάσης με τον κύριο όγκο του υπόγειου υδροφορέα

- Επιδρά και στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους ,με την εφαρμογή της τεχνολογίας άντλησης εδαφικού αέρα και την πρόκληση φυσικού βιοαερισμού στου εδάφους, ενισχύοντας τη διεργασία της βιοαποικοδόμησης

Ένα τυπικό σύστημα βιοαναρρόφησης αποτελείται από τα ακόλουθα τμηματα[14] :

- Αντλία
- Πηγάδια άντλησης ελεύθερης φάσης και εδαφικού αέρα
- Διαχωριστή αεριών-υγρών
- Διαχωριστή ελαιωδών-νερού
- Σύστημα επεξεργασίας αερίων-νερού

Για το σωστό σχεδιασμό και την αποδοτική λειτουργιά συστημάτων βιοαναρροφητικής τεχνολογίας απαιτείται η γνώση δυο ειδών παραμέτρων :

- Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του προς εξυγίανση πεδίου (π.χ. βάθος και διακύμανση υδροφόρου ορίζοντα, διεύθυνση υπόγειας ροής, υγρασία και διαπερατότητα εδάφους , κα)
- Χαρακτηριστικά της υφιστάμενης ελεύθερης ελαιώδους φάσης (π.χ. έκταση, όγκος, κατεύθυνση, και ταχύτητα ροής ,σύσταση , και άλλα).

Δυνατότητες εφαρμογής

Δυστυχώς , οι δυνατότητες εφαρμογής της βιοαναρροφητικής τεχνολογίας είναι αρκετά περιορισμένες. Η εν λόγω τεχνολογία είναι σχεδόν αποκλειστικά εφαρμόσιμη και αποτελεσματική στην περίπτωση παρουσίας ελαφριών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (NAPL) σε υπόγειους υδροφορείς. Παρόλα αυτά, η μεγάλη απόδοση που παρουσιάζει, σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη επεξεργασία της ακόρεστης ζώνης, την καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλή και χρήσιμη.

Όσον αφορά στα χαρακτηριστικά του προς εξυγίανση πεδίου, που ευνοούν την εφαρμογή της βιοαναρροφητικής τεχνολογίας, αυτά είναι ελάχιστα. Οι βασικότεροι περιοριστικοί παράγοντες σχετίζονται με τη διαπερατότητα του εδάφους, την υγρασία και τα βάθος της

υφιστάμενης ελεύθερης ελαιώδους φάσης, το οποίο δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να υπερβαίνει τα 10 m[14].

Πλεονεκτήματα

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας της βιοαναρρόφησης είναι τα εξής [14] :

- Επιτυγχάνει ιδιαίτερα αποτελεσματική ανάκτηση της υφιστάμενης ελεύθερης ελαιώδους φάσης, λόγω της ασκούμενης υποπίεσης.
- Αποτρέπει τη διείσδυση της ελεύθερης φάσης στον υδροφορέα και γενικότερα στην πτώση της στάθμης του υδροφορέα, λόγω της οριζόντιας ροής της κατά τη διάρκεια της άντλησης της.
- Ελαχιστοποιεί την ποσότητα του αντλούμενου υπόγειου νερού, μειώνοντας σημαντικά τον όγκο του προς επεξεργασία υγρού και το κόστος της όλης διεργασίας.
- Ενισχύει τη διεργασία της βιοαποικοδόμησης στην ακόρεστη ζώνη.
- Τα συστήματα της μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν και να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή της διεργασίας του βιοαερισμού.
- Μπορεί να εφαρμοστεί με χρήση κινητών μονάδων.
- Με κατάλληλη εφαρμογή (π.χ. με μικρούς ρυθμούς άντλησης του εδαφικού αέρα ή του υπόγειου νερού) είναι δυνατόν να μην απαιτείται μονάδα επεξεργασίας αερίων ή νερού.
- Με κατάλληλο σχεδιασμό μπορεί να ελέγξει την κίνηση της υπάρχουσας ελεύθερης ελαιώδους φάσης.

Μειονεκτήματα

Όσον αφορά στα μειονεκτήματα της βιοαναρρόφησης ,αυτά περιλαμβάνουν τα ακόλουθα [14]:

- Εφαρμόζεται μόνο για την περίπτωση ρύπων που ανήκουν στην κατηγορία των LNAPL
- Δεν είναι αποτελεσματική στην περίπτωση που ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο από 7,5 m
- Παρουσιάζει χαμηλή απόδοση σε εδάφη με μικρή διαπερατότητα και χαμηλά ποσοστά υγρασίας, καθώς σε αυτήν την περίπτωση μειώνεται η αποτελεσματικότητα της διεργασίας του βιοαερισμού και της βιοαποικοδόμησης
- Απαιτεί την επεξεργασία του αντλούμενου νερού και του εδαφικού αέρα, αυξάνοντας σημαντικά το κόστος εφαρμογής της
- Απαιτεί στενή παρακολούθηση και συχνή συντήρηση των εγκατεστημένων συστημάτων
- Τα πηγάδια που χρησιμοποιούνται κατά την εφαρμογή της είναι δυνατόν να παρουσιάσουν προβλήματα ΄΄φραξίματος΄΄
- Δεν μπορεί να αντιμετωπίσει τη λεγόμενη ΄΄υπολειμματική ΄΄ ρύπανση (προσροφημένους ρύπους).

3. AIR SPARGING ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Η μέθοδος Air Sparging εκπροσωπεί μια σχετικά νέα και πολύ αποτελεσματική τεχνολογία εξυγίανσης υπόγειων υδάτων ,η οποία σε γενικές γραμμές, αφορά στη διοχέτευση αέρα μέσα στο υπέδαφος με στόχο την εξάτμιση των υφιστάμενων ρύπων και την ενίσχυση της βιοαποικοδόμησης. Στις πλείστες των περιπτώσεων ο ανεπιθύμητος ρύπος, ο οποίος επιχειρείται να απομακρυνθεί με την μέθοδο air sparging, είναι οι οργανικές πτητικές ενώσεις.

Επιλέχτηκε αυτή η μέθοδος τόσο για την πολύ καλή αποτελεσματικότητά της όσο και για τη μικρότερη οικονομική επιβάρυνση που έχει σε σχέση με τις άλλες μεθόδους εξυγίανσης, καθώς και για την ευκολία ως προς την εργαστηριακή της μελέτη. Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε χρήση της μεθόδου in-well air sparging.

3.1 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Προς το παρόν υπάρχουν δυο ευρείες προσεγγίσεις της μεθόδου Air Sparging ,όσον αφορά στην απομάκρυνση πτητικών οργανικών ενώσεων από την κορεσμένη ζώνη. Η μια περιλαμβάνει τη χρήση μεμονωμένων πηγαδιών διοχέτευσης αέρα ,τοποθετημένων σε όλη την ζώνη ρύπανσης, για την απομάκρυνση των πτητικών συστατικών από μια μεγάλη περιοχή. Τα πηγάδια καταλήγουν σ'ένα στενό διάκενο, που τοποθετείται στον πυθμένα του υδροφορέα ή κάτω από το βαθύτερο ρυπασμένο τμήμα του υδροφορέα, από το οποίο και γίνεται η εισαγωγή του αέρα [14].

Ο συμπιεσμένος αέρας ωθείται μέσα από το πηγάδι και ρέει ακτινικά προς τα έξω και προς τα πάνω, μέσα στο έδαφος. Καθώς οι φυσαλίδες αέρα κινούνται μέσα στο έδαφος, τα πτητικά συστατικά που είναι διαλυμένα στο υπόγειο νερό ή προσροφημένα στην επιφάνεια των κόκκων του εδάφους, εξατμίζονται και παρασύρονται στην ακόρεστη ζώνη μαζί με τις φυσαλίδες του αέρα. Η διαδικασία εισαγωγής αέρα αυξάνει τις συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου, γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του ρυθμού αποικοδόμησης ουσιών, σε διατάραξη των κόκκων του εδάφους, καθώς και σε αύξηση της πιθανότητας διάλυσης και εξάτμισης των DNAPL. Αν τα πηγάδια τοποθετηθούν κατάλληλα, τα συσσωρευμένα DNAPL και τα συσσωματώματα τους μπορούν να μειωθούν δραστικά.

Παραλλαγή αυτής της προσέγγισης της μεθόδου air sparging αποτελεί η τεχνολογία **in well air sparging.** Σε αυτήν την τεχνολογία χρησιμοποιούνται μεν μεμονωμένα πηγάδια διοχέτευσης αέρα στην κορεσμένη ζώνη, με τη διαφορά όμως ότι ο παρεχόμενος αέρας δε βγαίνει από το πηγάδι προς το έδαφος, αλλά παραμένει μέσα σε αυτό. Αυτή η τροποποιημένη τεχνολογία φαίνεται να είναι εξίσου αποτελεσματική με την τυπική μέθοδο Air Sparging και ιδιαίτερα λειτουργική στην περίπτωση ύπαρξης μεγάλου βάθους υδροφορέα και εδάφους με χαμηλή διαπερατοτητα[14].

Η δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιεί μια ή περισσότερες ''κουρτίνες'' αερισμού (air curtains) προσανατολισμένες σε κατάλληλες γωνίες ως προς τη ροη του ρυπασμένου νερού,έτσι ώστε να απομακρύνονται τα πτητικά συστατικά από το υπόγειο νερό, καθώς αυτά περνούν μέσα από αυτές. Οι κουρτίνες αερισμού μπορούν να δημιουργηθούν γεμίζοντας τάφρους με κατάλληλο πορώδες υλικό. Οι τάφροι διαθέτουν έναν οριζόντιο διάτρητο σωλήνα κοντά στον πυθμένα τους για παροχή αέρα. Καθώς το υπόγειο νερό κινείται μέσα στην τάφρο, οι ανερχόμενες φυσαλίδες αέρα παρασύρουν τις πτητικές ουσίες προς την επιφανεια. Τυπικα, χρειάζεται και ο συνδυασμός ενός συστήματος ανάκτησης των αερίων.

Μια άλλη τεχνολογία Air Sparging είναι η τεχνολογία οριζοντίων πηγαδιών, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί πολύ αποτελεσματικά, αυξάνοντας τη δυνατότητα πρόσβασης στο

υπέδαφος, έτσι επιτρέπει αποτελεσματικότερη διοχέτευση αέρα στο υπέδαφος, μεγαλύτερη απομάκρυνση των υφιστάμενων ρύπων και ανάκτηση των παραγόμενων ατμών.

Άλλες διαφοροποιήσεις ενός τυπικού συστήματος Air Sparging ,οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη αύξηση της εξάτμισης και την ενεργοποίηση της βιοαποικοδόμησης είναι [14]:

- Θέρμανση του εδάφους
- Διοχέτευση ζεστού αέρα
- Διοχέτευση ατμού
- Παροχή θρεπτικών
- Κορεσμός με αλκοόλη

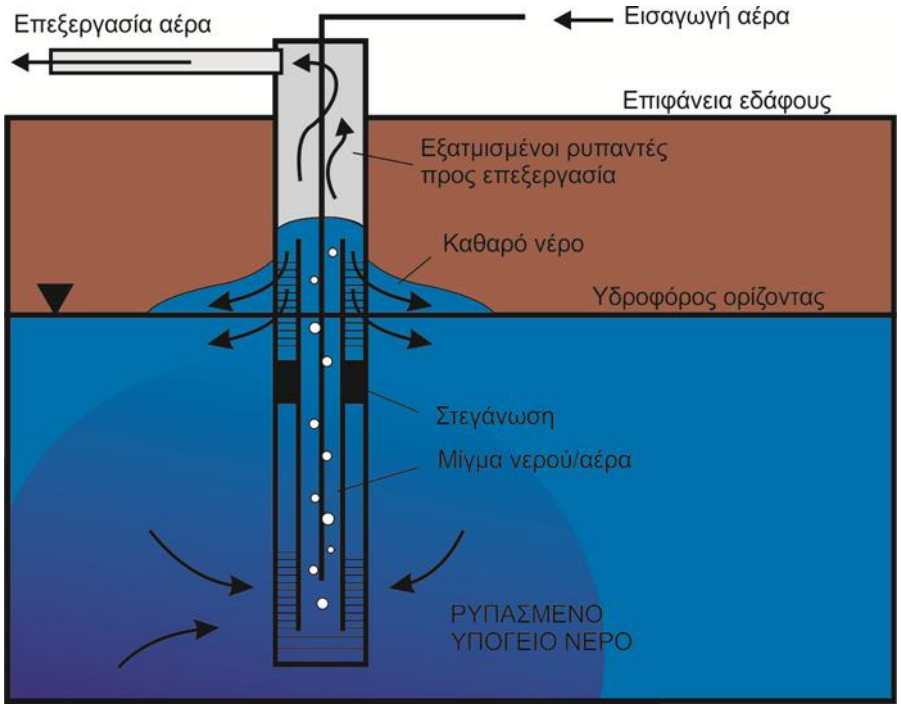
Εκτός από αυτές τις διαφοροποιήσεις, μπορούν να πραγματοποιηθούν και άλλες μετατροπές στην τεχνολογία Air Sparging, οι οποίες είναι δυνατόν να βελτιώσουν την απόδοση της και σχετίζονται με την γεωμετρία των δικτύων των πηγαδιών διοχέτευσης αέρα και άντλησης ατμών, το συνδυασμό οριζόντιων και κατακόρυφων πηγαδιών και την εγκατάσταση οριζόντιων πηγαδιών κάθετα στην υπόγεια ροη.

3.2 IN- WELL AIR SPARGING

Στη παρούσα εργασία έγινε χρήση της μεθόδου Air Sparging και συγκεκριμένα της in well air sparging.Η in well air sparging μέθοδος διακρίνεται από το τυπικό Air Sparging επειδή οι όλες διεργασίες λαμβάνουν αποκλειστικά μέρος σε νερό και μόνο και όχι σε κορεσμένο έδαφος από νερό. Δηλαδή, ενώ σε ένα τυπικό σύστημα Air Sparging τροφοδοτείται η ρυπασμένη κορεσμένη ζώνη με αέρα, στο in-well ο αέρας δεν εξέρχεται από το πηγάδι προς το κορεσμένο χώμα με νερό αλλά παραμένει μέσα σε αυτό. Στο in –well έχουμε ένα πηγάδι το οποίο παρέχει αέρα αποκλειστικά και μόνο στο νερό, αφού στο κάτω μέρος του πηγαδιού υπάρχουν φίλτρα τα οποία ‘’ροφούν’’ το νερό από την κορεσμένη και ρυπασμένη περιοχή και στη συνέχεια το νερό αυτό έρχεται σε επαφή με τον αέρα ο οποίος παρέχεται στο πηγάδι και κυκλοφορεί στο σύστημα. Έτσι, το ρυπασμένο νερό ανέρχεται προς το πάνω μέρος του πηγαδίου και διαχωρίζεται με αποτέλεσμα οι ρυπασμένοι πτητικοί ατμοί να συλλέγονται από σύστημα επεξεργασίας αυτών ενώ το καθαρό πλέον υπόλοιπο νερό ξαναπέφτει στην κορεσμένη ζώνη [19].

Έτσι, έγινε χρήση in well στα πειράματα αφού όπως μπορεί να διαπιστώσει κανείς από την κατασκευή της στήλης, στο κάτω μέρος της υπήρχε μόνο ρυπασμένο νερό και όχι χώμα (έγινε προσπάθεια να μπει και χώμα για να μπορούσε να ερευνηθεί και το τυπικό σύστημα Air Sparging, αλλά έφραζε ο σωλήνας διοχέτευσης αέρα). Ακόμα, σε ένα τυπικό σύστημα Air Sparging υφίσταται η ακτίνα επιρροής ενώ στο σύστημα του πειράματος δεν έχει υπόσταση αυτή η έννοια.

Γενικά τώρα, η τροποποίηση αυτή (in –well) αναπτύχθηκε ως ένα μέσο για τη χρήση του αέρα ως μεταφορέα των ρύπων και για να ξεπεραστούν οι δυσκολίες σε έγχυση αέρα όταν δεν υπάρχουν κατάλληλοι γεωλογικοί σχηματισμοί. Μπορούν ακόμα να ξεπεραστούν προβλήματα λόγω περιορισμών στο βάθος και επιπλέον το καθαρό νερό, εμπλουτισμένο με διαλυμένο οξυγόνο που επιστρέφει, μπορεί να βοηθήσει στην βιοαποικοδόμηση.



Εικόνα 2 : Απεικόνιση in well πηγαδιού air sparging.

3.3 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Σε γενικές γραμμές, η μέθοδος Air Sparging μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές όπου τα υπόγεια ύδατα και/ ή το κορεσμένο έδαφος έχει ρυπανθεί με πτητικούς, ημι-πτητικούς και/ ή με μη πτητικούς, αλλά αερόβια αποικοδομήσιμους, οργανικούς ρύπους. Η μέθοδος Air Sparging μπορεί ακόμη να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις όπου η απομάκρυνση νερού, με στόχο την δυνατότητα εφαρμογής της τεχνικής άντλησης και επεξεργασίας (pump-and-treat), δεν είναι εφικτή. Παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων αποτελούν περιοχές με σημαντικούς υδροφορείς και ζώνες ρύπανσης μεγάλου πάχους. Όταν είναι παρόντα πυκνά μη υδατικής φάσης υγρά (DNAPL), η βαθιά διείσδυση της μη υδατικής ρύπανσης ίσως να απαιτεί την απομάκρυνση υπερβολικών ποσοτήτων νερού, η οποία να μην είναι πρακτική.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μια μεγάλη ποικιλία πτητικών, ημι-πτητικών και μη πτητικών οργανικών ρύπων, οι οποίοι είναι διαλυμένοι, σε ελεύθερη φάση, προσροφημένοι ή και σε αέρια φάση, μπορεί να επεξεργαστεί με τη μέθοδο Air Sparging. Η μέθοδος Air Sparging είναι εφαρμόσιμη και αποτελεσματική και στην επεξεργασία λιγότερο πτητικών και/ ή

δυνατά προσροφημένων χημικών ουσιών, τα οποία δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν μόνο με τη χρήση της τεχνικής άντλησης ατμών [18].

Οι κύριοι ρύποι που επηρεάζονται από τις διεργασίες εξάτμισης και βιοαποικοδόμησης, που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου air sparging είναι οι εξής [18]:

- Διάφορα καύσιμα, όπως βενζίνη, ντίζελ, κτλ.
- Πετρέλαιο και λιπαντικά.
- Συστατικά BTEX.
- Χλωριωμένοι διαλύτες (PCE, TCE, DCE, κτλ).

Συχνά εφαρμόζεται ένα τροποποιημένο σύστημα Air Sparging, το οποίο χρησιμοποιεί μια γεννήτρια όζοντος σε συνδυασμό με την τυπική τεχνική Air Sparging, με στόχο να επεκτείνει την ικανότητα της μεθόδου να επεξεργαστεί και άλλους ρύπους, όπως χλωριωμένες φαινόλες (PCP), αλκοόλες, κετόνες και άλλους βιομηχανικούς διαλύτες. Το όζον που διοχετεύεται στο έδαφος έχει την ικανότητα να διασπά τους δεσμούς του χλωρίου και να κάνει έτσι δυνατή την βιοαποικοδόμηση των συστατικών που παράγονται [2].

Η επιτυχία της εφαρμογής της μεθόδου Air Sparging εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να διοχετεύσει αποτελεσματικά αέρα στην προς επεξεργασία περιοχή και την ικανότητα των υπόγειων σχηματισμών να μεταφέρουν αποτελεσματικά τον παρεχόμενο αέρα. Για το λόγο αυτό, οι συνθήκες πεδίου που ευνοούν την εφαρμογή της τεχνολογίας Air Sparging περιλαμβάνουν χονδρόκοκκα (συνήθως μεγάλης διαπερατότητας), ομοιογενή εδαφικά υλικά, τα οποία επιτρέπουν την αποτελεσματική επαφή του αέρα και των προς επεξεργασία σωματιδίων του εδάφους. Λεπτόκοκκα εδάφη με μικρή διαπερατότητα περιορίζουν τη μεταφορά του αέρα στο υπέδαφος, περιορίζοντας παράλληλα την αποτελεσματικότητα της παροχής αέρα και της ανάκτησης ατμών. Επιπλέον, η ετερογένεια, λόγω της παρουσίας διαφόρων λιθολογικών σχηματισμών και πετρωμάτων, μπορεί να περιορίσει την αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας αυτής. Για παράδειγμα, ένα η περισσότερα στρώματα χαμηλής διαπερατότητας, τα οποία βρίσκονται ανάμεσα στον υδροφόρο ορίζοντα και τον πυθμένα του υδροφορέα θα περιόριζαν την ικανότητα των πηγαδιών άντλησης ατμών να απομακρύνουν τους εξατμισμένους ρύπους που θα έπρεπε να κινούνται ανοδικά προς την ακόρεστη ζώνη [2].

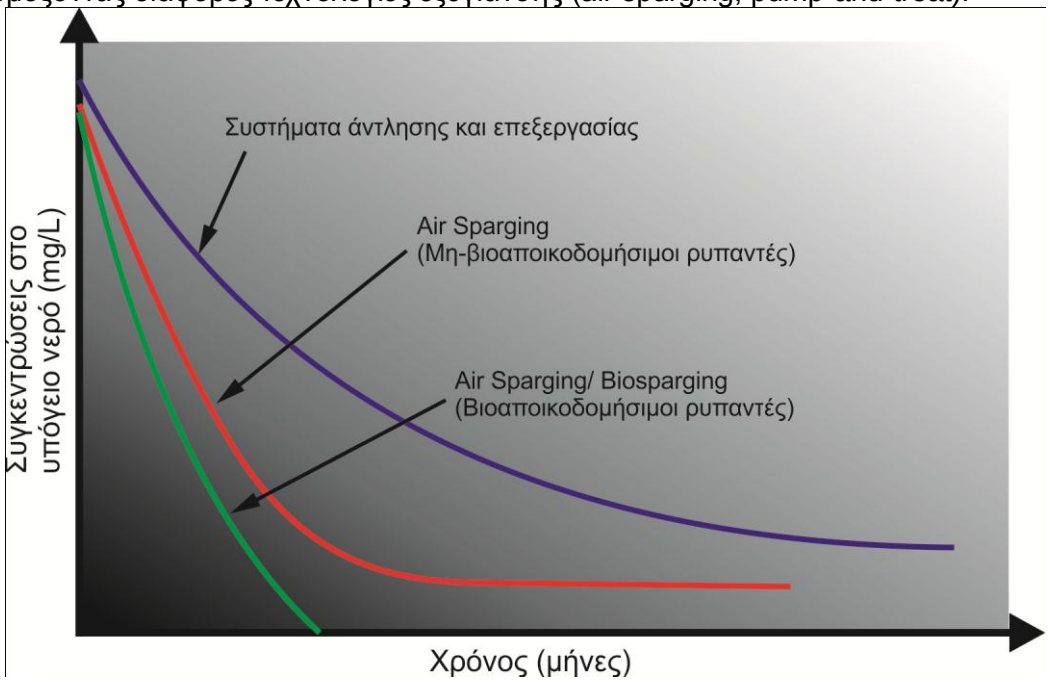
Ακόμη, για την επιτυχημένη εφαρμογή της μεθόδου Air Sparging απαιτούνται σχετικά μεγάλα πάχη κορεσμένης ζώνης και βάθη υδροφορέα μεγαλύτερα από 1,5m. Το πάχος της κορεσμένης ζώνης και το βάθος κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, όπου θα διοχετευτεί ο αέρας, είναι παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν την περιοχή επιρροής ενός πηγαδιού Air Sparging. Η μέθοδος Air Sparging, ως μια μέθοδος εξυγίανσης ίσως να είναι ανέφικτη ή μη συμφέρουσα όταν κάποιες από τις παραπάνω αποστάσεις είναι μικρές και ως αποτέλεσμα ο αριθμός των σημείων διοχέτευσης αέρα που θα απαιτηθεί για να εξασφαλιστεί αποτελεσματική παροχή αέρα σε όλη την ρυπασμένη περιοχή είναι απαγορευτικός από οικονομικής πλευράς [2].

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι βασικότεροι παράγοντες που καθορίζουν τη δυνατότητα εφαρμογής της τεχνολογίας Air Sparging σε ένα οποιοδήποτε ρυπασμένο πεδίο, καθώς και οι επιθυμητές τιμές αυτών.

Παράγοντας	Παράμετρος	Όρια / Επιθυμητές τιμές
Ρύπος	Πτητικότητα	> 5mm Hg
	Διαλυτότητα	< 20.000 mg/L
	Βιοαποικοδομησιμότητα	BOD_5 > 0,1 mg/L
Γεωλογία	Ομοιογένεια	Απουσία αδιαπέρατων στρωμάτων. Αν υπάρχει στρωματοποίηση αυξάνεται η υδραυλική αγωγιμότητα πάνω από το σημείο εισαγωγής του αέρα.
	Υδραυλική αγωγιμότητα	> 10^{-5} cm/s αν ο λόγος οριζόντιας προς κάθετης υδραυλικής αγωγιμότητας είναι < 2:1 > 10^{-4} cm/s αν ο λόγος οριζόντιας προς κάθετης υδραυλικής αγωγιμότητας είναι > 3:1
Φυσικά χαρακτηριστικά	Βάθος εισαγωγής αέρα	> 1,2m, < 6m
	Βάθος υδροφόρου ορίζοντα	> 1,2m

Πίνακας 6: Καθοριστικοί παράγοντες εφαρμοσιμότητας της τεχνολογίας air sparging [20].

Όπως έχει αποδειχθεί τα συστήματα Air Sparging που έχουν σχεδιαστεί κατά τον οικονομικότερο και βέλτιστο, ως προς την άντληση των παραγόμενων ατμών, δυνατό τρόπο επιτυγχάνουν πλήρη εξυγίανση σε βάθος χρόνου 0,5 έως και 3 χρόνων, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες πεδίου και το είδος του ρύπου. Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8) παρουσιάζεται ένα προσεγγιστικό διάγραμμα της μείωσης της συγκέντρωσης διαφόρων ειδών ρύπων (βιοαποικοδομήσιμων και μη), η οποία μπορεί να επιτευχτεί εφαρμόζοντας διάφορες τεχνολογίες εξυγίανσης (air sparging, pump-and-treat).



Σχήμα 1: Ρυθμοί εξυγίανσης διαφόρων ειδών ρύπων κατά τη διάρκεια εφαρμογής in situ air sparging [18].

Τέλος , το κόστος εφαρμογής της μεθόδου Air Sparging ποικίλει ανάλογα με τις εκάστοτε μεθοδολογίες και τροποποιήσεις που χρησιμοποιούνται, ανεξάρτητα από το αν

πραγματοποιείται άντληση των παραγόμενων ατμών ή αν απαιτείται επεξεργασία αυτών [2].

3.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ

Κατά την εφαρμογή της τεχνολογίας Air Sparging, λαμβάνουν χώρα τα ακόλουθα φαινόμενα [20] :

- Αυξημένη οξυγόνωση: ο διοχετευόμενος αέρας εμπλουτίζει την κορεσμένη, αλλά και την ακόρεστη ζώνη του εδάφους, ενισχύοντας τη βιοαποικοδόμηση των οργανικών ρύπων

- Αυξημένη διάλυση: η διαταραχή που προκαλείται από την υπό πίεση διοχέτευση του αέρα στον υδροφορέα ευνοεί την εκρόφηση των προσροφημένων στα εδαφικά σωματίδια ρύπων και τη διάλυση τους στο υπόγειο νερό. Με τον τρόπο αυτό γίνεται πιο εύκολη τόσο η εξάτμιση τους, όσο και η βιοαποικοδόμηση τους.

- Εξάτμιση: η παρουσία αέρα στο υπέδαφος ενισχύει την εξάτμιση των προσροφημένων οργανικών ρύπων, προωθώντας την απομάκρυνση της εναπομείνουσας ρύπανσης

- Εκφύσηση (air stripping) : η αυξημένη διοχέτευση αέρα μέσα στο κορεσμένο έδαφος ουσιαστικά προσομοιώνει τη διαδικασία της εκφύσησης, κατά την οποία πραγματοποιείται μεταφορά μάζας ρύπων από την υγρή στην αέρια φάση

- Φυσική μετατόπιση : σε υψηλές πιέσεις και παροχές ο εισαγόμενος αέρας είναι δυνατόν να προκαλέσει έντονη ανάμειξη και μετατόπιση του υπόγειου νερού, προκαλώντας τη μεταφορά και τη διασπορά των υπάρχοντων ρύπων

Οι κύριοι μηχανισμοί, που είναι υπεύθυνοι για την απομάκρυνση των οργανικών πτητικών ρύπων (VOC) κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου Air Sparging είναι οι ακόλουθοι [21]:

1. Η μεταφορά μάζας των VOCs από μια φάση σε μια άλλη,

2. Ο μετασχηματισμός των VOCs σε μη επικίνδυνες ουσίες,

3. Η διακίνηση των VOCs.

Οι πλέον σημαντικοί μηχανισμοί μεταφοράς μάζας των VOCs, κατά την εφαρμογή της μεθόδου Air Sparging, είναι η εξάτμιση, η διάλυση και η προσρόφηση/ εκρόφηση. Ο μετασχηματισμός των VOCs σε μη επικίνδυνες ουσίες πραγματοποιείται παρουσία μικροοργανισμών και οφείλεται στο φαινόμενο της βιοαποικοδόμησης, ενώ οι διαδικασίες διακίνησης των VOCs περιλαμβάνουν τη συμμεταφορά, τη διάχυση (μοριακή διάχυση) και τη διασπορά (μηχανική διασπορά)

3.5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ

3.5.1 Εξάτμιση

Ο όρος εξάτμιση εκφράζει το φαινόμενο της μεταφοράς των συστατικών, που βρίσκονται στην υγρή φάση, στην αέρια φάση και εκπροσωπεί την κυρίαρχη διεργασία που λαμβάνει

χώρα κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου Air Sparging. Η διαδικασία Air Sparging διαταράσσει την ισορροπία ανάμεσα στην υγρή και την αέρια φάση, μέσω της διοχέτευσης αέρα, γεγονός το οποίο αυξάνει τη συγκέντρωση των VOCs στην αέρια φάση. Αν και τις περισσότερες φορές, η αντίσταση που παρουσιάζει μια οργανική πτητική ένωση στην εξάτμισή της είναι αμελητέα, στην περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου Air Sparging, λόγω πρόκλησης ενός υπό-επιφανειακού αερισμού μέσω της διάχυσης του διοχετευόμενου αέρα, η αντίσταση που παρουσιάζεται στην εξάτμιση είναι σημαντική. Συγκεκριμένα, ο λόγος των συντελεστών μεταφοράς μάζας στην αέρια προς την υγρή φάση είναι της τάξης του 38:110 [21].

Η τάση εξάτμισης ενός συγκεκριμένου ρύπου καθορίζεται από την τάση ατμών του και τη σταθερά του νόμου του Henry. Ένας ρύπος θεωρείται ότι μπορεί να επεξεργαστεί με τη μέθοδο Air Sparging όταν η τάση ατμών του είναι μεγαλύτερη από 5mm Hg και η σταθερά Henry μεγαλύτερη από 10-5 atm m^3/ mol. Χαρακτηριστικοί ρύποι με τέτοιες ιδιότητες είναι τα BTEX.

Η εξάτμιση εξαρτάται από διαφορετικές συνθήκες, ανάλογα με το αν ο ρύπος είναι διαλυμένος σε οργανικό διαλύτη ή σε νερό. Ο νόμος του Raoult ισχύει στην ακόρεστη ζώνη, όταν ο ρύπος υπάρχει υπό τη μορφή ενός συστατικού που είναι αναμεμιγμένο με μια οργανική φάση. Αυτός ο νόμος, ο οποίος ισχύει σε συνθήκες ισορροπίας, δηλώνει ότι η μερική πίεση των ατμών ενός οποιοδήποτε ρύπου, πάνω από ένα μη υδατικής φάσης υγρό (NAPL), ισούται με το γραμμομοριακό κλάσμα του ρύπου στο NAPL, πολλαπλασιασμένο με την τάση ατμών του καθαρού ρύπου:

$$P_i = P_{vp} X_i$$

όπου : Pi είναι η μερική πίεση του ρύπου i (atm), P_{vp} είναι η τάση ατμού του καθαρού συστατικού (atm) και Xi είναι το γραμμομοριακό κλάσμα του ρύπου i στο μίγμα.

Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση ατμών του ρύπου, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα ο ρύπος να υπάρχει στην αέρια φάση. Η ποσότητα της μάζας του ρύπου που μπορεί να απομακρυνθεί από ένα πηγάδι άντλησης ατμών στην ακόρεστη ζώνη υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το νόμο του Raoult σε συνδυασμό με το νόμο ιδανικών αερίων και την εξίσωση τοπικής ισορροπίας. Παρόλα αυτά, έχει αποδειχθεί ότι ο νόμος του Raoult, σε συνδυασμό με τις συνθήκες τοπικής ισορροπίας, δεν προβλέπει ικανοποιητικά και με ακρίβεια την ποσότητα της μάζας που αφαιρείται όταν οι συγκεντρώσεις είναι χαμηλές, όταν εμφανίζεται ετερογένεια στην υπόγεια ροή ή όταν υπάρχουν περιορισμοί μεταφοράς μάζας από την υδατική ή τη στερεή φάση στην αέρια [21].

Η κατανομή των VOCs στην αέρια και στην υγρή φάση καθορίζεται από το νόμο του Henry, όταν βρίσκονται διαλυμένοι στο νερό, όπως στην περίπτωση της κορεσμένης ζώνης. Ο νόμος του Henry δηλώνει ότι υπό συνθήκες ισορροπίας η μερική πίεση ενός αερίου (π.χ. πτητικού χημικού), πάνω από το νερό, είναι ανάλογη με την συγκέντρωση του χημικού στην υγρή φάση:

$$P_g = H_c C_i$$

όπου: P_g είναι η μερική πίεση του αερίου (atm), Hc είναι η σταθερά Henry (atm m^3/ mol) και Ci είναι η συγκέντρωση του χημικού στην υγρή φάση (mol/ m^3).

Όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά Henry, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα ο ρύπος να υπάρχει στην αέρια φάση, σε συνθήκες ισορροπίας. Παρόλα αυτά, σε συστήματα, όπου πραγματοποιείται διάχυση του αέρα, όπως στη μέθοδο air sparging, δεν επικρατούν συνθήκες ισορροπίας, λόγω του ότι, με την άνοδο του αέρα στην ακόρεστη ζώνη, οι συγκεντρώσεις του ρύπου στην αέρια φάση μεταβάλλονται. Η σταθερά Henry κάθε ρύπου βοηθάει στο να εκτιμηθεί το κατά πόσο ο αέρας που διοχετεύεται στο υπέδαφος θα

κορεστεί από τον ρύπο, πριν φτάσει στα πηγάδια άντλησης των ατμών. Όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά Henry για ένα VOC, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα από αυτόν μπορεί να δεσμευτεί από τις φυσαλίδες του αέρα που κινούνται ανοδικά. Η σταθερά Henry μιας συγκεκριμένης χημικής ουσίας μπορεί να αυξηθεί, αυξάνοντας τη θερμοκρασία, δεδομένου ότι η τάση ατμών εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία. Παρόλο που μεγαλύτερες τιμές της σταθεράς Henry έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο ποσοστό εμφάνισης VOC στην αέρια φάση, έχει αποδειχθεί ότι μια αυξημένη τιμή της σταθεράς Henry δεν μειώνει σημαντικά τον ολικό χρόνο εξυγίανσης, μια και το μεγαλύτερο μέρος της εξάτμισης του ρύπου πραγματοποιείται στα αρχικά στάδια εφαρμογής της μεθόδου Air Sparging. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων σταδίων της διεργασίας Air Sparging, η εναπομένουσα ρύπανση, η οποία δεν βρίσκεται σε απευθείας επαφή με τον διοχετευόμενο αέρα δεν είναι δυνατόν να εξατμιστεί. Παρόλα αυτά, γνωρίζοντας τον ρυθμό εξάτμισης μπορεί να γίνει μια εκτίμηση του ρυθμού με τον οποίο θα απομακρυνθεί η πλειονότητα της υπάρχουσας ρύπανσης [21].

3.5.2 Διάλυση

Τα LNAPL διαλύονται μερικώς στο υπόγειο νερό, ανάλογα με την υδατική διαλυτότητα που παρουσιάζουν. Η διάλυση στο υπόγειο νερό συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί ισορροπία, οπότε και παρατηρείται η μέγιστη συγκέντρωση του ρύπου σε διαλυμένη φάση. Οι διακυμάνσεις του υδροφόρου ορίζοντα ίσως να προκαλέσουν μετατροπή των LNAPL που επιπλέουν στην επιφάνεια του υδροφορέα και δημιουργία των λεγόμενων “ganglia” ή κάποιων φακών LNAPL, μέσα στο πορώδες μέσο στο οποίο βρίσκονται. Τα LNAPL μπορεί να δεσμευτούν λόγω των τάσεων που παρατηρούνται στις διεπιφάνειες αέρα – LNAPL και νερού – LNAPL, προκαλώντας την εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων ρύπου στην ζώνη επικράτησης των τριχοειδών φαινομένων.

Από διάφορες μελέτες έχει αποδειχτεί ότι με την παραδοχή της ισορροπίας δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια ο ρυθμός διάλυσης. Παράλληλα, θεωρείται δεδομένο ότι τα μοντέλα μεταφοράς μάζας υπό μη σταθερές συνθήκες δεν είναι ικανά να περιγράψουν με ακρίβεια τον ρυθμό διάλυσης. Τα μοντέλα αυτά παρουσιάζουν σημαντικές καθυστερήσεις στην διαδικασία διάλυσης, εφόσον η μεταφορά μάζας ελαττώνεται όταν μειώνεται η συγκέντρωση του ρύπου. Κάποιες έρευνες έδειξαν ότι ,η μη σταθερών συνθηκών μεταφορά μάζας μεταξύ LNAPL και νερού επηρεάζει τις συγκεντρώσεις των οργανικών ενώσεων στην περίπτωση που παρατηρείται διαρροή ρυπαντή, υψηλές ταχύτητες Darcy, χαμηλές συγκεντρώσεις εναπομεινάντων LNAPL και μεγάλα μεγέθη κηλίδων, που συχνά προκαλούνται λόγω της ετερογένειας των υδροφορέων. Ο χρόνος εξυγίανσης και ο προς επεξεργασία όγκος νερού, που υπολογίζεται, προκύπτει ότι είναι μεγαλύτερος όταν γίνεται η παραδοχή ύπαρξης μη σταθερών συνθηκών, παρά όταν γίνεται η υπόθεση επικράτησης σταθερών συνθηκών [21].

Έχει αποδειχθεί ότι, ενώ η εξάτμιση είναι η κυρίαρχη διεργασία απομάκρυνσης των LNAPL κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων εφαρμογής της μεθόδου Air Sparging η διεργασία αυτή στη συνέχεια περιορίζεται από τη διάλυση, στο μέσο και στο τέλος της εφαρμογής της μεθόδου. Γενικά, εάν το νερό είναι ήρεμο, η κλίση (gradient) της συγκέντρωσης θα είναι μεγαλύτερη στην επιφάνεια και η διάλυση θα είναι αργή. Παρόλα αυτά, αν λαμβάνει χώρα διοχέτευση αέρα στο υπέδαφος η ανάμιξη αυξάνεται. Κατά τη διάρκεια του Air Sparging, παρατηρείται η εμφάνιση ενός συνεργιστικού φαινομένου, λόγω της παράλληλης επίδρασης της απομάκρυνσης του ρύπου στην αέρια φάση, που προκαλείται από το μηχανισμό της συμμεταφοράς και της ανάμιξης που πραγματοποιείται στην υγρή φάση [21].

3.5.3 Προσρόφηση και εκρόφηση

Η προσρόφηση και η εκρόφηση ενός ρύπου είναι πολύ σημαντικοί μηχανισμοί, οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν πρόκειται να ποσοτικοποιηθούν οι ρυθμοί απομάκρυνσης της μάζας του ρύπου, λόγω της διοχέτευσης αέρα στο υπέδαφος με την μέθοδο Air Sparging. Οι οργανικοί ρύποι μπορούν να προσροφηθούν σε ένα πολύ λεπτό στρώμα στα εκτεθειμένα στον αέρα τμήματα του εδάφους ή να προσροφηθούν σε ένα λεπτό στρώμα φυσικής οργανικής ύλης, που αναπτύσσεται στις εδαφικές επιφάνειες. Τα μη πολωμένα μόρια έλκονται περισσότερο από το εδαφικό οργανικό υλικό παρά από τις επιφάνειες ορυκτών. Η προσρόφηση των BTEX αυξάνεται με την παρουσία οργανικής ύλης στο έδαφος. Ο λόγος των μερικών συντελεστών προσρόφησης και εκρόφησης είναι υψηλότερος σε εδάφη που περιέχουν σημαντικές ποσότητες οργανικής ύλης. Αν ο λόγος αυτός είναι ίσος ή μικρότερος από τη μονάδα, το εδαφικό μέσο δεν παρουσιάζει ικανότητα συνοχής, γεγονός από το οποίο προκύπτει ότι η προσρόφηση είναι αντιστρέψιμη [21].

Η ποσότητα ενός οργανικού ρύπου που προσροφάται στο έδαφος εξαρτάται κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό από την ποσότητα της οργανικής ύλης, που υπάρχει σε αυτό . Ο μερικός συντελεστής προσρόφησης (partition adsorption coefficient) K_p είναι εκείνος που συχνά χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ποσότητας του ρύπου που προσροφάται και σχετίζεται εμπειρικά με το οργανικό κλάσμα στο έδαφος f_{oc} και τον κανονικοποιημένο μερικό συντελεστή K_{oc}, όπως φαίνεται στη σχέση που ακολουθεί:

$$K_p = K_{oc} f_{oc}$$

Η ποσότητα της οργανικής ύλης που υπάρχει σε βαθιά υπεδάφη είναι γενικά μικρή και συχνά μικρότερη από 0,1%, γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι ο βαθμός προσρόφησης ενός ρύπου σε βαθιά εδάφη δεν καθορίζεται από το περιεχόμενο του εδάφους σε οργανική ύλη. Ακόμη και οι γυμνές εδαφικές επιφάνειες προσροφούν υδρογονάνθρακες, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, το είδος του υδρογονάνθρακα και τη συγκέντρωσή του. Για παράδειγμα, όσο μεγαλύτερη είναι η υδροφοβικότητα και το μοριακό βάρος του ρύπου, τόσο πιο πιθανόν είναι να προσροφηθεί αυτός ο ρύπος. Το νερό έλκεται πολύ περισσότερο από τον εαυτό του παρά από μη πολωμένα οργανικά συστατικά, κάνοντας τα υδροφοβικά οργανικά συστατικά να απομακρύνονται από το διάλυμα και να προσροφούνται πάνω στις επιφάνειες του εδάφους. Η υδροφοβικότητα μετράται με τη βοήθεια της σταθεράς κατανομής οκτανόλης/ νερού, Kow, η οποία είναι ιδιότητα της προσροφούμενης ουσίας

Όσο μεγαλύτερη είναι σταθερά Kow, τόσο πιο υδροφοβικός είναι ο ρύπος [21].

Η ποσότητα του ρύπου που προσροφάται στο έδαφος εξαρτάται επίσης από την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, επειδή το νερό ανταγωνίζεται το ρύπο στην κατάληψη των σημείων προσρόφησης. Όσο μεγαλύτερη είναι η υγρασία, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα προσροφημένου οργανικού ρύπου απομακρύνεται από το έδαφος. Αυτή η απομάκρυνση πραγματοποιείται λόγω της ισχυρής δίπολης αλληλεπίδρασης ανάμεσα στα μόρια του νερού και την πολική επιφάνεια των εδαφικών σωματιδίων, η οποία αποτρέπει την προσρόφηση των μη πολωμένων VOCs.

Οι ισχυρές αυτές πολικές αλληλεπιδράσεις στη συνέχεια επικρατούν, λόγω σχετικά ασθενών δυνάμεων Van der Waals ανάμεσα στο προσροφημένο VOC και την επιφάνεια του εδάφους. Καθώς το νερό περνάει μέσα από το σύστημα, τα NAPL απομακρύνονται, μέχρι το σημείο στο οποίο η προσρόφηση είναι τόσο δυνατή που δεν μπορεί να αντιστραφεί. Ο βαθμός απομάκρυνσης των NAPL λόγω της παρουσίας του νερού εξαρτάται ακόμη από το κινηματικό ιξώδες του νερού και την διαπερατότητα του εδάφους [21].

Ανάμεσα στις διάφορες ισόθερμες προσρόφησης που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, η ισόθερμη Freundlich είναι εκείνη που χρησιμοποιείται συχνότερα για την περιγραφή της

σχέσης ανάμεσα στον μη πολωμένο προσροφημένο οργανικό ρύπο και τη συγκέντρωση του ρύπου στο διάλυμα σε ισορροπία. Αυτή η ισόθερμη εκφράζεται μαθηματικά ως εξής:

$$C_s = KC_e^N$$

Όπου: Cs είναι η μάζα του ρύπου που προσροφάται ανά μάζα εδάφους (mg/Kg), K είναι η σταθερά απορρόφησης σε ισορροπία (mg/Kg)(mg/l)-1/N, Ce είναι η συγκέντρωση του διαλύματος σε ισορροπία μετά την προσρόφηση (mg/ l) και N είναι η σταθερά που περιγράφει την ένταση της προσρόφησης.

Οι προσροφημένοι ρύποι πρέπει να εκροφηθούν πριν διαλυθούν και/ ή να εξατμιστούν κατά τη διάρκεια του Air Sparging. Έχει παρατηρηθεί ότι η προσρόφηση των μη πολωμένων οργανικών ουσιών είναι αντιστρέψιμη για τις συγκεντρώσεις που συναντώνται σε φυσικά νερά. Αυτό το συμπέρασμα είναι σύμφωνο με το γεγονός ότι η προσρόφηση μη πολωμένων οργανικών ουσιών είναι μεγαλύτερη όταν το περιεχόμενο σε οργανική ύλη του εδάφους είναι μεγαλύτερο και η υγρασία μικρή. Στην ακόρεστη ζώνη είναι πιθανότερο να υπάρχει έδαφος με υψηλό περιεχόμενο οργανικού άνθρακα και για το λόγο αυτό είναι πιθανότερο να πραγματοποιηθεί προσρόφηση των VOC σε αυτήν. Ενώ η προσρόφηση είναι μεγαλύτερη σε ακόρεστα εδάφη, η κυρίαρχη διεργασία σε αυτά είναι η εξάτμιση. Αν προσροφηθούν μεγάλες ποσότητες VOC στην ακόρεστη ζώνη, θα χρειαστεί να γίνει εκρόφηση και διάλυση, προκειμένου να πραγματοποιηθεί απομάκρυνση των ρύπων κατά τη διάρκεια εφαρμογής του Air Sparging. Παρόλα αυτά, μικρές τάσεις προσρόφησης υδροφοβικών οργανικών ρύπων σε υδροφορείς ,γενικά, ευνοούν την αποτελεσματική απομάκρυνσή τους με τη μέθοδο Air Sparging [21].

3.6 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ

Βιοαποδόμηση

Η βιοαποδόμηση είναι ο μηχανισμός μετασχηματισμού ενός ρύπου, που μπορεί να λάβει χώρα τόσο στην ακόρεστη, όσο και στην κορεσμένη ζώνη του υπεδάφους. Τα περισσότερα συστατικά των προϊόντων πετρελαίου είναι βιοαποδομήσιμα. Η σπουδαιότητα της βιοαποικοδόμησης κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου Air Sparging είναι για πολλούς υπό αμφισβήτηση και τα περισσότερα μοντέλα Air Sparging δεν τη λαμβάνουν υπόψη, λόγω του ότι χρειάζονται σημαντικές ποσότητες διαλυμένου οξυγόνου (Dissolved Oxygen - DO) προκειμένου να προκληθεί πλήρης μετασχηματισμός των οργανικών συστατικών. Η ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για τον πλήρη μετασχηματισμό ενός γραμμαρίου υδρογονάνθρακα ποικίλει από 3 έως 3,5γραμμάρια. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη βιοαποδόμηση είναι η θερμοκρασία και ο ρυθμός διοχέτευσης αέρα. Ο θερμός αέρας ίσως να αυξήσει την μικροβιακή ανάπτυξη και να βελτιώσει την βιοαποδόμηση των ρύπων. Ο διοχετευόμενος αέρας αυξάνει τα επίπεδα του διαλυμένου οξυγόνου. Παρόλα αυτά, μεγάλες τιμές πίεσης του διοχετευόμενου αέρα ίσως περιορίσουν τον εμπλουτισμό σε οξυγόνο, παρεμποδίζοντας το σχηματισμό φυσαλίδων. Περιορίζοντας την πίεση άντλησης στα αντίστοιχα πηγάδια άντλησης των ατμών, έχει αποδειχθεί ότι ευνοείται η διάλυση του οξυγόνου [21].

Μελέτες έχουν δείξει μείωση της βενζίνης σε ρηχούς υδροφορείς από 9,83 Kg σε 2,25 Kg, μέσα σε χρονικό διάστημα 15 μηνών, χωρίς καμία επεξεργασία. Πειράματα που έγιναν έδειξαν ότι η βιοαποδόμηση ήταν ο πιο σημαντικός μηχανισμός στην εξασθένιση της ρύπανσης. Επίσης, βρέθηκε ότι υπήρχε μια άμεση σχέση ανάμεσα στην ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου και την ποσότητα βενζίνης, τολουένιου και ξυλένιων (Benzene – Toluene – Xylene - BTX), που υπήρχαν στο υπόγειο νερό. Στατιστικές αναλύσεις έδειξαν υψηλή αρνητική συσχέτιση ανάμεσα στα συνολικά BTEX και τον φυσικό λογάριθμο του διαλυμένου οξυγόνου. Πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το 80-100% των BTEX, με επίπεδα συγκέντρωσης 120-16.000 ppb, αποικοδομήθηκε με χρόνο ημιζωής 5-20 ημερών, όταν το διαλυμένο οξυγόνο ήταν μεγαλύτερο από 2ppm. Ο χρόνος ημιζωής της βιοαποικοδόμησης των BTEX ήταν 20-60 ημέρες, όταν το διαλυμένο οξυγόνο ήταν

λιγότερο από 2ppm, ενώ πολύ μικρή ή και καθόλου βιοαποικοδόμηση παρατηρήθηκε όταν τα επίπεδα του διαλυμένου οξυγόνου ήταν της τάξης των 0,5ppm ή και λιγότερο [21].

Άλλες μελέτες αναφέρουν ότι, σε ορισμένες περιπτώσεις όπου είχε παρατηρηθεί ότι σε μια ρυπασμένη περιοχή η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου ήταν 2ppm, μετά την εφαρμογή της μεθόδου Air Sparging και αφού πέρασε χρονικό διάστημα 16 μηνών, αυτή αυξήθηκε σε 10ppm σε ορισμένα σημεία. Αντίστοιχα, τα βακτήρια αποικοδόμησης των υδρογονανθράκων αυξήθηκαν 10 έως και 420 φορές, στα πηγάδια όπου παρατηρήθηκε αύξηση του διαλυμένου οξυγόνου [21].

Αν και η ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου που απαιτείται για αποτελεσματική βιοαποδόμηση δεν έχει προσδιοριστεί, είναι βέβαιο ότι η μέθοδος Air Sparging αυξάνει το περιεχόμενο σε διαλυμένο οξυγόνο στις ζώνες κορεσμένου εδάφους και στα υπόγεια ύδατα, γεγονός το οποίο κατ' επέκταση αυξάνει την βιοαποδόμηση των οργανικών συστατικών. Τα πλεονεκτήματα της βιοαποδόμησης κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου Air Sparging δεν έχουν ποσοτικοποιηθεί ικανοποιητικά και δεδομένου ότι κάτω από ορισμένες συνθήκες πεδίου η επίδραση της βιοαποδόμησης είναι πολύ σημαντική, η διεργασία αυτή θα έπρεπε λαμβάνεται υπόψη [21].

3.7 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΚΙΝΗΣΗΣ

Οι μηχανισμοί διακίνησης των ρύπων, δηλαδή η συμμεταφορά, η μηχανική διασπορά και η μοριακή διάχυση εκφράζουν την ολική μετακίνηση τους μέσα στο υπέδαφος, κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου Air Sparging. Ο όρος συμμεταφορά αναφέρεται στην κίνηση των αερίων ή των υγρών μαζί με τον αέρα ή το νερό μέσα στο οποίο βρίσκονται. Ο αέρας ή το νερό που κινείται αναγκάζει τους ρύπους να μετακινηθούν μαζί του, ανάλογα με την διαπερατότητα του εδάφους, η οποία σχετίζεται με το μέγεθος των σωματιδίων του, τον τύπο και τη δομή του εδάφους, το πορώδες και την υγρασία. Όπως έχει αποδειχθεί, η συμμεταφορά των ρύπων ενισχύει τους μηχανισμούς μεταφοράς μάζας [21].

Η βασική εξίσωση που περιγράφει τη ροή του ρύπου, λόγω του φαινομένου της συμμεταφοράς είναι η ακόλουθη

$$J = u_x \cdot \theta \cdot C$$

Όπου

$$u = \frac{K}{n} \cdot \frac{dh}{dx}$$

και εκφράζει τη μέση γραμμική ταχύτητα (L/T), C η συγκέντρωση του ρύπου και θ το πορώδες του εδάφους.

Η μηχανική διασπορά, η οποία είναι γνωστή ως διασπορά, αντιστοιχεί στην εξάπλωση ή τη διάλυση του ρύπου είτε στο υπόγειο νερό είτε στον εδαφικό αέρα, λόγω ανάμιξης. Ο αέρας που διοχετεύεται κατά τη διάρκεια του Air Sparging βοηθάει τη διαδικασία διασποράς. Η διασπορά του ρύπου βελτιώνει τη διαδικασία διάλυσης, αλλά παράλληλα αυξάνει την προσρόφηση των ρύπων, λόγω της αυξημένης επαφής με την επιφάνεια του εδάφους. Αυτές οι επιδράσεις της προσρόφησης δεν είναι σημαντικές λόγω της χαμηλής τάσης των μη πολωμένων οργανικών να προσροφούνται, όταν το περιεχόμενο σε οργανική ύλη είναι χαμηλό και η υγρασία είναι υψηλή [21].

Η ροή του ρύπου, λόγω μηχανικής διασποράς μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$J_H = -D_H \frac{dC}{dz}$$

όπου D_H είναι ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς (L^2T^{-1}), C η συγκέντρωση του ρύπου (M/L^3) και z η κάθετη απόσταση (L).

Η διαταραχή που δημιουργείται κατά τη διοχέτευση του αέρα στο υπέδαφος ευνοεί τόσο την συμμεταφορά, όσο και τη διασπορά των ρύπων, προωθώντας την ανάμιξη τους. Αυτή η ανάμιξη βοηθάει στην απομάκρυνση των διαλυμένων ρύπων από τη διεπιφάνεια νερού – NAPL, καθώς επίσης και στη διαδικασία διάλυσης. Η συμμεταφορά και η διασπορά των ρύπων ίσως να προκαλέσουν τη μεταφορά τους σε καθαρές περιοχές. Αυτή η ανεπιθύμητη μεταφορά παρεμποδίζεται σχεδιάζοντας ένα σύστημα Air Sparging, το οποίο χρησιμοποιεί κατάλληλες θετικές και αρνητικές πιέσεις αέρα στα πηγάδια διοχέτευσης αέρα και άντλησης ατμών και μεγιστοποιώντας την αρνητική πίεση στα σημεία υψηλής συγκέντρωσης ρύπου[21].

Ο αέρας που διοχετεύεται κατά τη διάρκεια του Air Sparging ίσως να παγιδευτεί μέσα στο έδαφος. Ακόμη και μια μικρή ποσότητα παγιδευμένου αέρα στο έδαφος μπορεί να καθυστερήσει την κίνηση του διαλυμένου αερίου, λόγω του καταμερισμού της διαλυμένης αέριας φάσης στην παγιδευμένη αέρια φάση. Παρόλα αυτά, αν προωθηθεί η συμμεταφορά και η διασπορά αυτής της παγιδευμένης ποσότητας αέρα, η ολική απομάκρυνση του ρύπου θα αυξηθεί, λόγω της αυξημένης ποσότητας ρύπου που έχει δεσμευτεί στην παγιδευμένη αέρια φάση [21].

Οι ρύποι που βρίσκονται σε ασυνεχείς εδαφικούς πόρους ίσως να μην έρθουν σε άμεση επαφή με τα μονοπάτια ροής του αέρα. Κατ' επέκταση, αυτοί οι ρύποι θα πρέπει να κινηθούν με μοριακή διάχυση και στη συνέχεια να μεταφερθούν μέσω συμμεταφοράς και διασποράς. Η διαδικασία διάχυσης αφορά στην μεταφορά των ρύπων από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης σε περιοχές χαμηλής συγκέντρωσης. Ο ρυθμός διάχυσης κυβερνάται από το νόμο του Fick και εξαρτάται από την καμπυλότητα και το μήκος των μονοπατιών μεταφοράς στο έδαφος.

$$J_D = -D_s(\theta) \frac{dC}{dz}$$

όπου D_s είναι ο συντελεστής μοριακής διάχυσης (L^2T^{-1}), C η συγκέντρωση (M/L^3) του ρύπου και z η κάθετη απόσταση (L).

Λόγω του ότι η διάχυση πραγματοποιείται αργά, ο απαιτούμενος χρόνος απομάκρυνσης των ρύπων αυξάνεται δραστικά. Στα πειράματα Air Sparging που έχουν πραγματοποιηθεί έχει παρατηρηθεί μια αποτελεσματική απομάκρυνση των ρύπων στα πρώτα στάδια της μεθόδου και στη συνέχεια μια αργή απομάκρυνση των ρύπων, η οποία αποδίδεται στη διεργασία διάχυσης [21].

3.8 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΩΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Εάν εφαρμοστεί σωστά, η μέθοδος Air Sparging μπορεί να αποτελέσει μια in-situ μέθοδο εξυγίανσης, η οποία απαιτεί ελάχιστες επεμβάσεις στις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα, παρουσιάζει λογικά χρονικά πλαίσια, μέσα στα οποία επιτυγχάνονται οι εκάστοτε στόχοι επεξεργασίας και έχει ιδιαίτερα χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης. Εξαλείφοντας την ανάγκη άντλησης και επιφανειακής επεξεργασίας του υπόγειου νερού, η μέθοδος Air Sparging μπορεί να αποτελέσει μια οικονομική εναλλακτική λύση στα συστήματα εξυγίανσης μέσω άντλησης και επεξεργασίας.

Μερικά από τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου Air Sparging είναι τα ακόλουθα [2],[22],[14] :

- Απομακρύνει πολύ αποτελεσματικά την υπολειμματική ρύπανση από τη κορεσμένη ζώνη του εδάφους.

- Η in-situ εφαρμογή έχει την ανάγκη ελάχιστου επιφανειακού χώρου για την εγκατάσταση βοηθητικού εξοπλισμού.

- Μπορεί να εφαρμοστεί σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες, όπως τις μεθόδους bioslurping, pump-and-treat και soil vapor extraction.

- Παράγει σχετικά μικρούς όγκους αποβλήτων, τα οποία απαιτούν ελάχιστη ή και καθόλου επεξεργασία.

- Χρησιμοποιεί άμεσα παραδοτέο εξοπλισμό, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του κόστους εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης.

- Απαιτεί μικρούς χρόνους εξυγίανσης, συνήθως λιγότερο από 1 χρόνο, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν.

- Είναι δυνατόν υπάρχοντα πηγάδια παρακολούθησης να μετατραπούν σε πηγάδια εφαρμογής της μεθόδου Air Sparging, μειώνοντας έτσι το κόστος εφαρμογής της μεθόδου.

- Η μέθοδος Air Sparging ξεπερνάει ένα βασικό περιορισμό που παρουσιάζουν τα συστήματα άντλησης και επεξεργασίας: τη μείωση των συγκεντρώσεων των VOC που απομακρύνονται με το χρόνο.

- Οι ρύποι απομακρύνονται ευκολότερα όταν βρίσκονται στην αέρια φάση από ότι όταν είναι διαλυμένοι στο υπόγειο νερό, φαινόμενο το οποίο εκμεταλλεύεται η μέθοδος Air Sparging.

- Η μέθοδος Air Sparging μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία των ρύπων που βρίσκονται στην ζώνη επικράτησης των τριχοειδών φαινομένων και / ή κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα (σε αντίθεση με τις απλές τεχνικές απομάκρυνσης των ατμών από το έδαφος).

- Λόγω του χαμηλού κόστους λειτουργίας και συντήρησης των συστημάτων Air Sparging, η εφαρμογή της τεχνολογίας είναι περισσότερο συμφέρουσα σε περιπτώσεις όπου είναι αναγκαία η επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων υπογειων υδάτων.

Αντίθετα, οι συνθήκες πεδίου, οι οποίες καθιστούν την εφαρμογή της μεθόδου Air Sparging αναποτελεσματική ή μη οικονομικά συμφέρουσα, περιλαμβάνουν [2],[14] :

- ΄Υπαρξη ρύπων που σχηματίζουν σύμπλοκα με τα εδαφικά συστατικά, μειώνοντας τους ρυθμούς εξάτμισης.

- Παρουσία λεπτόκοκκων, χαμηλής διαπερατότητας εδαφών πάνω από τον υδροφορέα , τα οποία παρεμποδίζουν τη μεταφορά των εξατμισμένων ρύπων από το υπόγειο νερό προς την ακόρεστη ζώνη και κατ΄ επέκταση την απόδοση των πηγαδιών άντλησης των ατμών.

- Παρουσία ετερογενών εδαφών, που ίσως να προκαλέσουν δημιουργία «καναλιών» (επικρατέστερων διαδρομών του αέρα μέσα από στρώματα μεγάλης αγωγιμότητας και μεταφορά αυτού μακριά από την περιοχή ρύπανσης) ή άλλων πολύπλοκων συνθηκών ροής του αέρα, οι οποίες να είναι δύσκολο να προβλεφθούν και/ ή να ελεγχθούν.

- ΄Υπαρξη μικρού βάθους και πάχους υδροφορέα, μια και στην περίπτωση αυτή ο αριθμός των απαιτούμενων πηγαδιών αυξάνεται σημαντικά (προκειμένου να καλυφτεί όλη η προς επεξεργασία περιοχή) και κατ' επέκταση αυξάνεται και το κόστος εφαρμογής της μεθόδου Air Sparging.

Ένας επιπρόσθετος περιορισμός των συστημάτων Air Sparging είναι ο σχεδιασμός και ο έλεγχος που απαιτείται, προκειμένου να επιτευχθεί ο εκάστοτε βέλτιστος ρυθμός παροχής αέρα (αριθμός των πηγαδιών και πιέσεις διοχέτευσης του αέρα) και να αποφευχθεί η εμφάνιση ανεπιθύμητων φαινομένων, όπως διαφυγή ατμών εκτός του πεδίου, έντονη ανάμιξη του υδροφορέα και κατ' επέκταση εξάπλωση της ζώνης ρύπανσης, φράξιμο του υδροφορέα και δημιουργία καναλιών. Το φράξιμο του υδροφορέα μπορεί να παρουσιαστεί στην περίπτωση που οι συγκεντρώσεις του σιδήρου ή της βιομάζας που εμφανίζονται λόγω διοχέτευσης του αέρα στο υπέδαφος αυξηθούν πάρα πολύ, προκαλώντας αλλαγές στα χαρακτηριστικά του υδροφορέα [2]. Ακόμη από οικονομικής άποψης πρέπει να εξεταστεί η ακριβής ποσότητα αέρα που πρέπει να δοθεί και χρειάζεται. ακριβώς ώστε να μην χάνεται αέρας άσκοπα ο οποίος δεν χρειάζεται ,άρα και να αποφευχθεί μια οικονομική ζημία.

Μερικά από τα μειονεκτήματα της μεθόδου Air Sparging είναι τα ακόλουθα [22] :

- Συνήθως, δεν είναι αποτελεσματική η εφαρμογή της για την απομάκρυνση ελαφρών μη υδατικής φάσης υγρών (LNAPL), τα οποία σχηματίζουν στρώμα πάχους μεγαλύτερο από 0,3m ή πυκνών NAPL (DNAPL), που βρίσκονται υπό τη μορφή ελεύθερης φάσης.

- Η παρουσία και η λειτουργία πηγαδιών άντλησης ατμών είναι συνήθως αναγκαίες, προκειμένου να προστατευθεί το κοντινό περιβάλλον από τυχόν τοξικούς ή εκρηκτικούς ατμούς.

- Αργιλώδη εδάφη και διαστρωματωμένες περιοχές περιορίζουν την απόδοση της μεθόδου , παρεμποδίζοντας την ομοιόμορφη κατανομή του διοχετευόμενου αέρα.

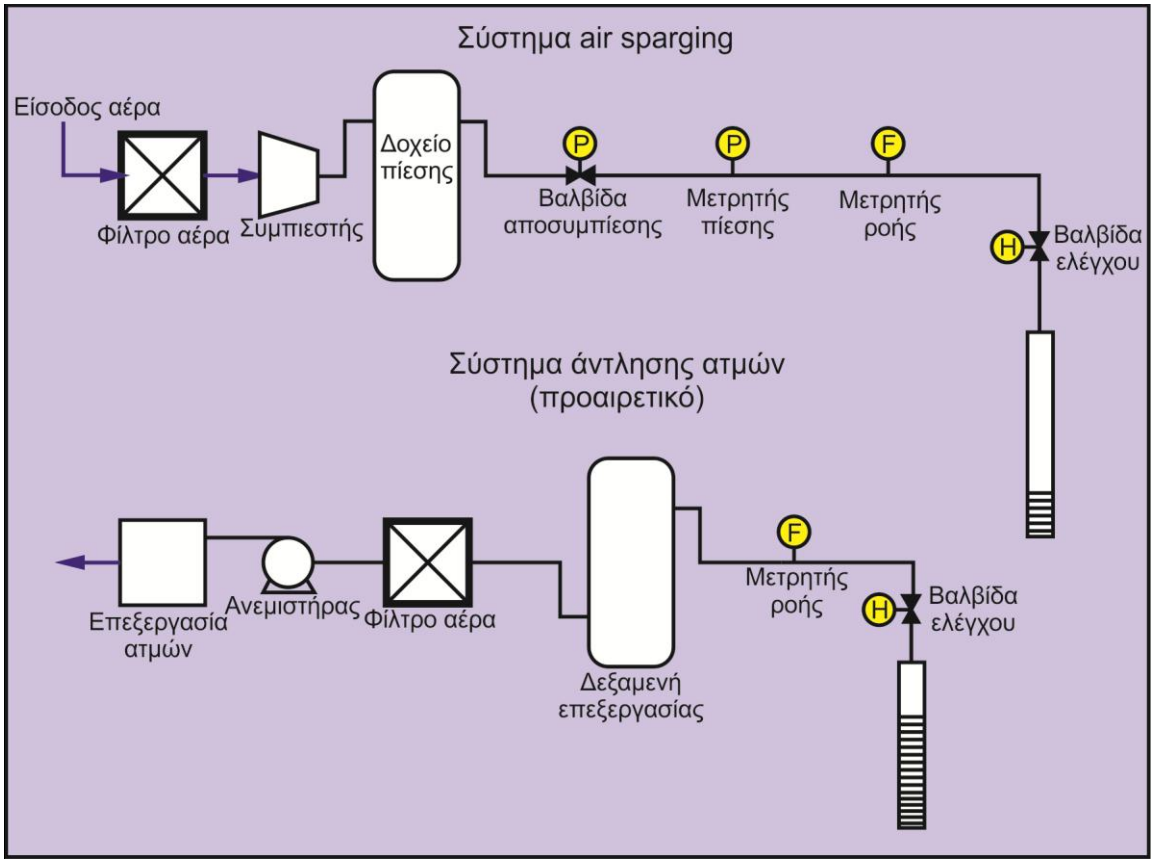
- Δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε περιορισμένους υδροφορείς, λόγω πιθανής μεταφοράς των πτητικών ρύπων σε περιοχές εκτός του πεδίου ρύπανσης.

- Είναι απαραίτητη η κατασκευή και η λειτουργία μιας πιλοτικής μονάδας πριν την πλήρη εφαρμογή της μεθόδου.

3.9 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ AIR SPARGING

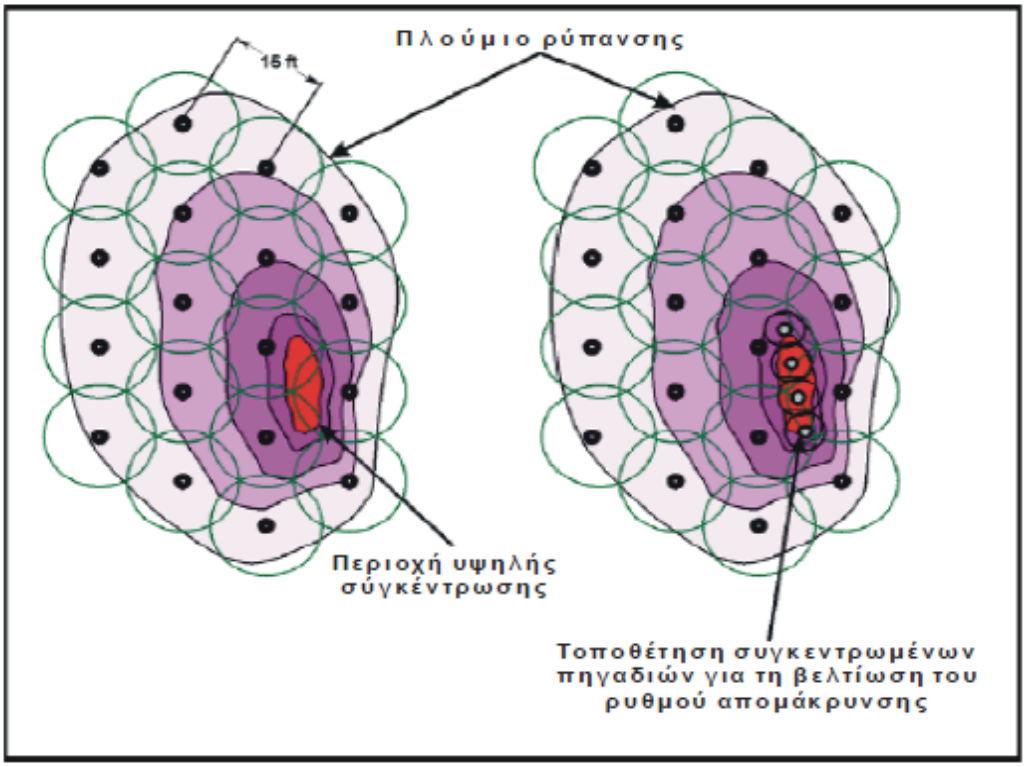
Τα κύρια τμήματα ενός συστήματος Air Sparging περιλαμβάνουν πηγάδια διοχέτευσης αέρα στο υπέδαφος, συμπιεστές αέρα για την παροχή αέρα και εξοπλισμό (σένσορες) παρακολούθησης. Τα πηγάδια διοχέτευσης αέρα μπορούν να είναι είτε κάθετα, είτε οριζόντια και τοποθετούνται κάτω από τη ζώνη ρύπανσης. Αν εγκριθεί, οι παραγόμενοι

ατμοί που βρίσκονται στην ακόρεστη ζώνη μπορούν να απελευθερώνονται στο περιβάλλον χωρίς περιορισμούς. Διαφορετικά, θα πρέπει να εγκατασταθούν πηγάδια άντλησης των ατμών αυτών και συστήματα επεξεργασίας τους, προτού απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα.



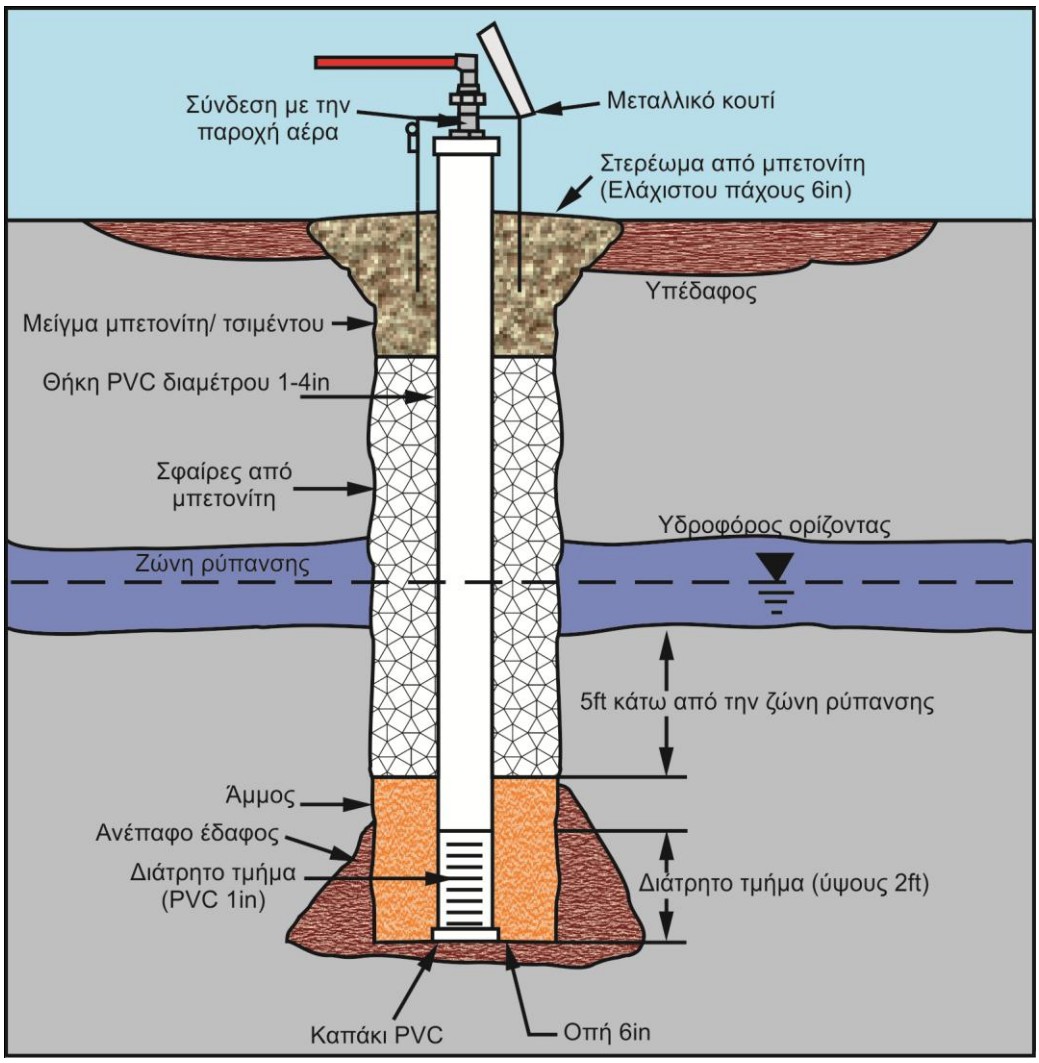
Εικόνα 3: Απεικόνιση των επιμέρους τμημάτων ενός συστήματος Air Sparging και άντλησης ατμών .

Ένα τυπικό σύστημα Air Sparging αποτελείται από ένα δίκτυο πηγαδιών διοχέτευσης αέρα, που είναι τοποθετημένα στην κορεσμένη ζώνη και ένα δίκτυο πηγαδιών άντλησης των ατμών ,που είναι τοποθετημένα στην ακόρεστη ζώνη. Το δίκτυο των πηγαδιών διοχέτευσης αέρα είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε όλη η ρυπασμένη περιοχή που χρειάζεται επεξεργασία να αερίζεται σε ικανοποιητικό βαθμό. Αυτό συνήθως απαιτεί τη δημιουργία ζωνών αλληλοεπικάλυψης των περιοχών επιρροής των πηγαδιών του δικτύου.



Εικόνα 4: Θέσεις τοποθέτησης πηγαδιών Air Sparging για την επεξεργασία ρυπασμένων εδαφών και υδροφορέων [23].

Για την παροχή οξυγόνου υπό πίεση χρησιμοποιούνται συμπιεστές αέρα, ενώ για τη δημιουργία αρνητικών πιέσεων και την απομάκρυνση των ατμών από το έδαφος χρησιμοποιούνται αντλίες κενού. Ένα επιφανειακό σύστημα έλεγχου των διαδικασιών χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση και τη ρύθμιση της παροχής αέρα και τον εξοπλισμό απομάκρυνσης των ατμών. Συνήθως είναι αναγκαίος ένας επιπρόσθετος εξοπλισμός διαχωρισμού υγρών και αερίων, συνδεδεμένος με το δίκτυο πηγαδιών άντλησης ατμών, καθώς και ένα σύστημα επεξεργασίας των ατμών που απομακρύνονται από το έδαφος. Οι ρυθμοί ροής και οι πιέσεις του αέρα που διοχετεύεται στο υπέδαφος εξαρτώνται από τις συνθήκες πεδίου που επικρατούν και έχουν ήδη εξερευνηθεί κατά τη διάρκεια της φάσης μελέτης του πεδίου και λειτουργίας ενός πιλοτικού συστήματος. Οι ρυθμοί αυτοί μπορούν να ρυθμιστούν και κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος σε κανονική κλίμακα, ανάλογα με τα αποτελέσματα και την απόδοση που παρουσιάζει το σύστημα [14].



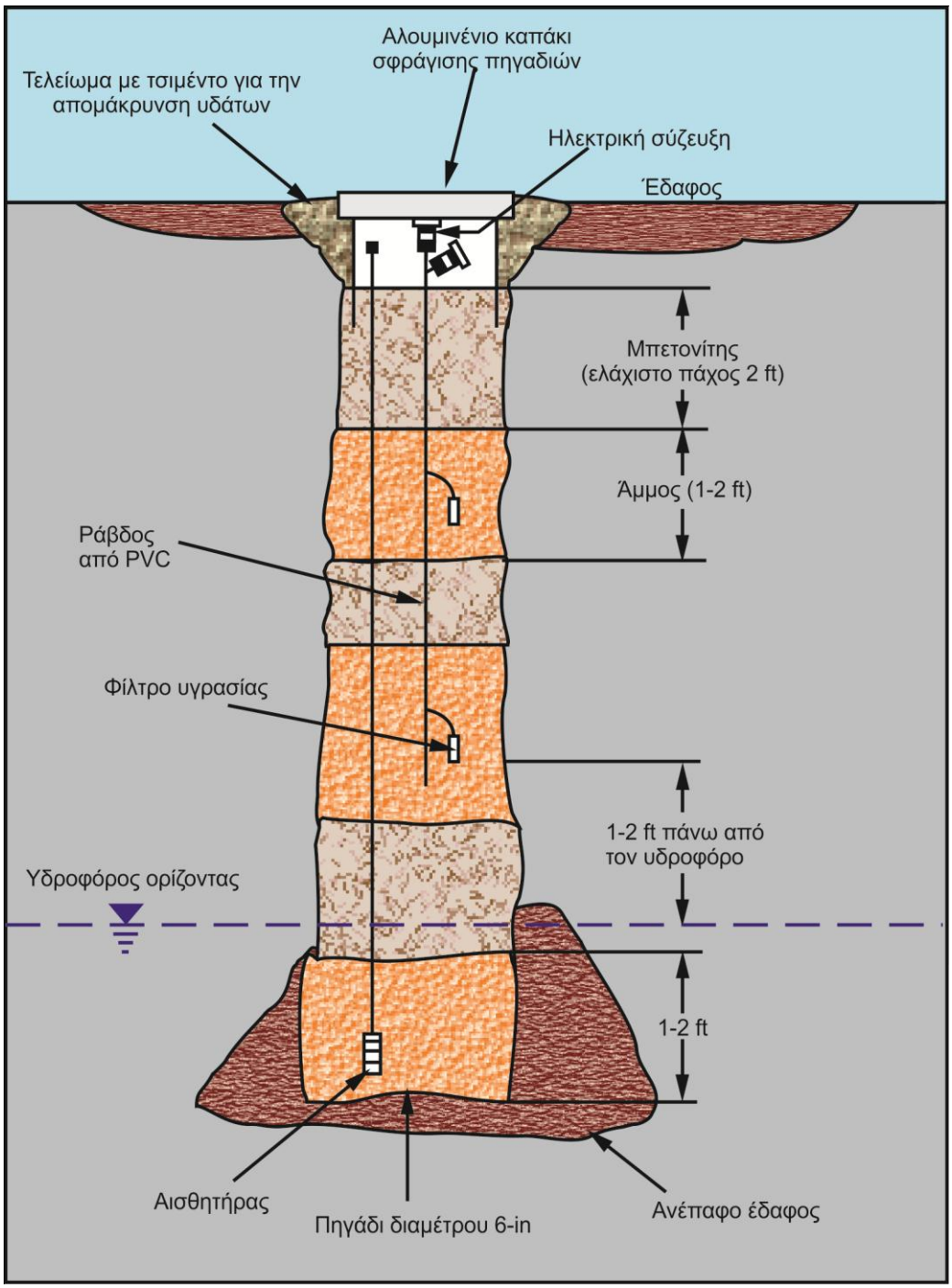
Εικόνα 5: Διατομή ενός τυπικού πηγαδιού Air Sparging.

Με την άντληση των ατμών απομακρύνονται οι περισσότερο πτητικοί ρύποι και γενικά αφαιρείται το μεγαλύτερο μέρος των ρύπων (κυρίως κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων εξυγίανσης). Όταν οι ρύποι που ήδη βρίσκονταν σε αέρια φάση και οι πολύ πτητικοί ρύποι έχουν αφαιρεθεί, ο ρυθμός απομάκρυνσης των ατμών μειώνεται και αυξάνεται ο ρυθμός της αποικοδόμησης, ο οποίος γίνεται κυρίαρχος παράγοντας στα επόμενα σταδία της εξυγίανσης. Αυτό οφείλεται στο ότι η απομάκρυνση των ρύπων κατά τη διάρκεια των τελικών σταδίων της εξυγίανσης είναι αποτέλεσμα της αποικοδόμησης των λιγότερο πτητικών, δυνατά προσροφημένων ρύπων. Οι ρυθμοί διοχέτευσης αέρα και βιοαποικοδόμησης σε ένα τυχαίο στάδιο της διεργασίας εξυγίανσης εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, όπως τη γεωλογία/υδρογεωλογία του πεδίου, τα χαρακτηριστικά των ρύπων και το σχεδιασμό του συστήματος Air Sparging [14].

Όπου απαιτείται επεξεργασία των ατμών που απομακρύνονται, τα πηγάδια άντλησης συνδέονται με ένα επιφανειακό σύστημα επεξεργασίας (βιοαντιδραστήρα, ενεργό άνθρακα κτλ). Τα συστήματα αυτά χρειάζονται περισσότερο στα αρχικά στάδια εφαρμογής της μεθόδου Air Sparging, εώς ότου η βιοαποικοδόμηση καταστεί η κυρίαρχη διεργασία απομάκρυνσης του ρύπου. Είναι δυνατόν οι εκπομπές των ατμών να διατηρηθούν κάτω από τα επιτρεπτά από τη νομοθεσία επίπεδα, ρυθμίζοντας κατάλληλα τους ρυθμούς διοχέτευσης αέρα και άντλησης των ατμών. Θέτοντας τα πηγάδια Air Sparging σε περιοδική λειτουργιά, με περίοδο που καθορίζεται από τα επίπεδα του διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό και των πτητικών συστατικών στην ακόρεστη ζώνη, μπορεί να

επιτευχτεί μεγιστοποίηση της βιοαποικοδόμησης, καθώς και ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων ποσοτήτων αέρα [14].

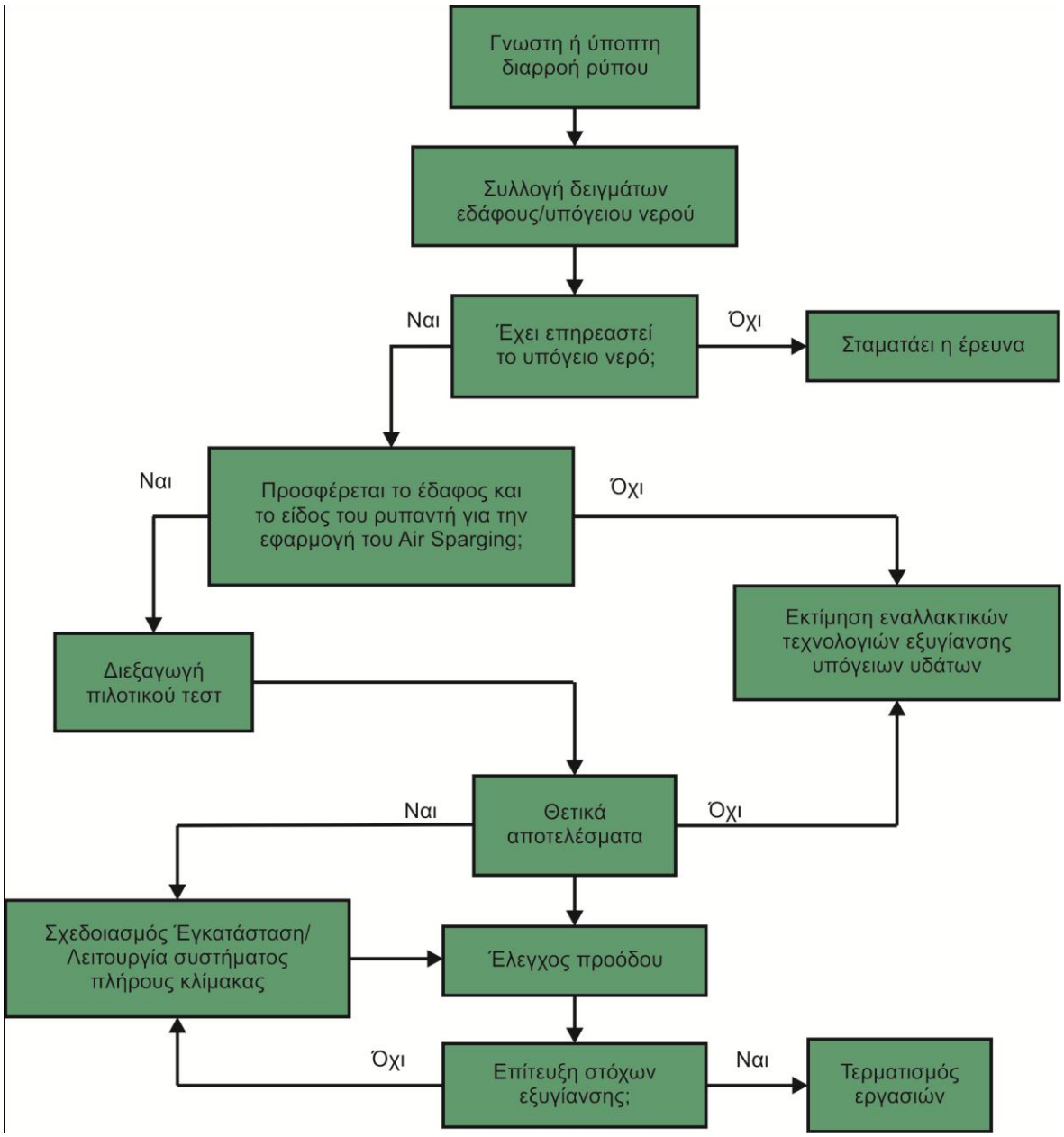
Τέλος ,για μια ολοκληρωμένη εφαρμογή της τεχνολογίας Air Sparging κρίνεται αναγκαία η εγκατάσταση και η λειτουργιά πηγαδιών παρακολούθησης ,μέσα στην υπό επεξεργασία περιοχή. Τα πηγάδια αυτά στόχο έχουν την μέτρηση κάποιων σημαντικών παραμέτρων, όπως για παράδειγμα της συγκέντρωσης των πτητικών ενώσεων στο υπόγειο νερό και τον εδαφικό αέρα. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος και την ορθή ρύθμιση των διαφόρων κρίσιμων παραμέτρων λειτουργίας [14].



Εικόνα 6: Διατομή τυπικού πηγαδιού παρακολούθησης .

3.10 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ AIR SPARGING

Η απόφαση εφαρμογής της τεχνολογίας Air Sparging για την αντιμετώπιση ενός συγκεκριμένου προβλήματος ρύπανσης υπογείων υδάτων βασίζεται στο δέντρο αποφάσεων που ακολουθεί (Σχήμα 2). Όπως φαίνεται, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και του υπάρχοντος ρύπου είναι τα βασικά κριτήρια, τα οποία καθορίζουν την καταλληλότητα ή μη της συγκεκριμένης μεθόδου για την εξυγίανση μιας ρυπανθήσας περιοχής.



Σχήμα 2: Δέντρο αποφάσεων για την εφαρμογή της μεθόδου Air Sparging [24].

Η γεωλογία, η υδρογεωλογία και η κατάσταση ρύπανσης της υπό εξέταση περιοχής θα πρέπει να μελετηθούν εξονυχιστικά, προκειμένου να κριθεί η δυνατότητα ή μη εφαρμογής της τεχνολογίας Air Sparging. Μέσα από έναν πλήρη χαρακτηρισμό του πεδίου και τη διεξαγωγή μιας ανάλυσης καταλληλότητας της μεθόδου Air Sparging, θα συλλεχθούν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την λήψη της τελικής απόφασης.

Εφόσον η μέθοδος Air Sparging κριθεί κατάλληλη, βάση των προαναφερθέντων κριτηρίων, τα στάδια που ακολουθούν είναι ο σχεδιασμός, η εγκατάσταση και η λειτουργία μιας μονάδας Air Sparging, αρχικά πιλοτικής και στη συνέχεια ευρείας κλίμακας. Τα στάδια αυτά είναι πολύ σημαντικά και θα πρέπει να τύχουν ιδιαίτερης προσοχής, δεδομένου ότι ο σωστός σχεδιασμός και η ασφαλής λειτουργία ενός συστήματος Air Sparging είναι τα στοιχεία που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα και την απόδοση της όλης τεχνολογίας.

3.10.1 Σχεδιασμός συστημάτων Air Sparging

Η ασφαλής και επιτυχημένη εγκατάσταση και λειτουργιά ενός συστήματος Air Sparging απαιτεί έναν προσεκτικό σχεδιασμό, ο οποίος θα βασιστεί σε λεπτομερείς μελέτες. Οι κύριες σχεδιαστικές παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν είναι οι εξής:

- Κατανομή αέρα (ζώνη επιρροής)
- Βάθος εισαγωγής αέρα
- Ρυθμός παροχής αέρα και πίεση διοχέτευσης
- Τρόπος λειτουργίας συστήματος
- Κατασκευή πηγαδιών Air Sparging
- Είδος και κατανομή ρύπων

3.10.1.1 Κατανομή αέρα (ζώνη επιρροής)

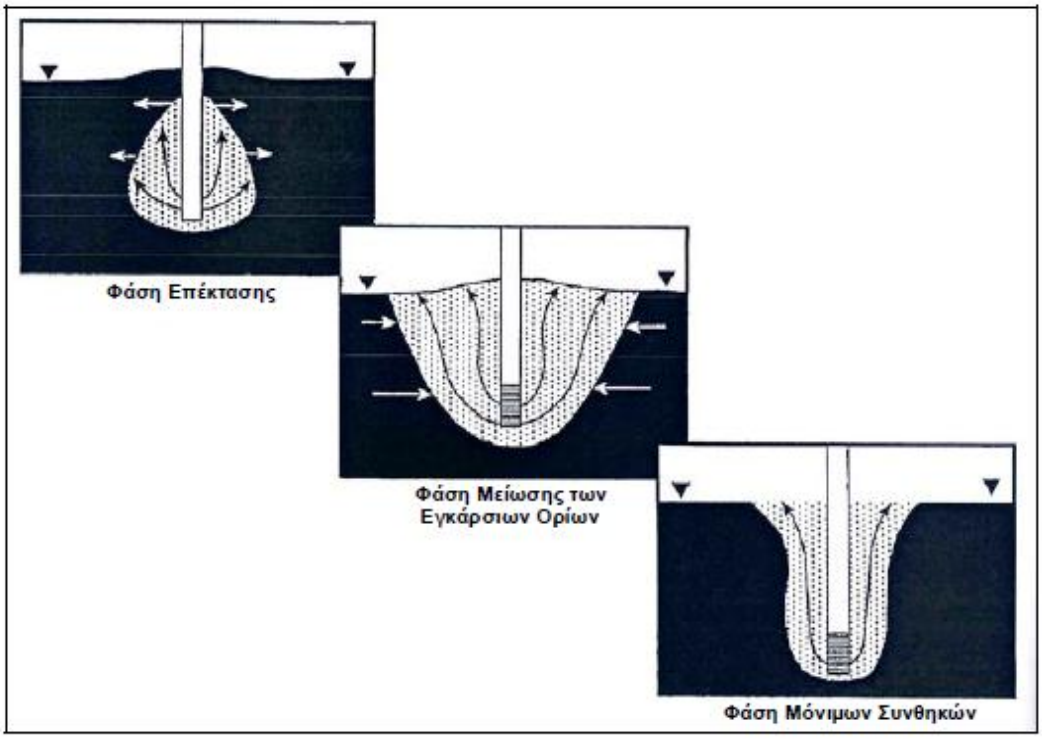
Η ζώνη επιρροής των πηγαδιών διοχέτευσης αέρα είναι μια από τις πλέον σημαντικές παραμέτρους σχεδιασμού ενός συστήματος Air Sparging. Η ζώνη αυτή ουσιαστικά εκπροσωπεί την κορεσμένη περιοχή γύρω από το πηγάδι, στην οποία κατανέμεται ο διοχετευόμενος αέρας και είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστεί, δεδομένης της ασυμμετρίας και της μεταβαλλόμενης πυκνότητας των καναλιών κατανομής του αέρα στο έδαφος. Η μορφή και η έκταση της ζώνης επιρροής εξαρτώνται άμεσα από τα χαρακτηριστικά του εδάφους (πορώδες, υδραυλική αγωγιμότητα, ομοιογένεια, κ.τ.λ.) και τις παραμέτρους διοχέτευσης του αέρα (παροχή και πίεση)[14].

Η εκτίμηση της ζώνης επιρροής ενός πηγαδιού διοχέτευσης αέρα σε ένα δεδομένο πεδίο είναι αναγκαία κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού ενός συστήματος Air Sparging ευρείας κλίμακας με πολλαπλά πηγάδια. Δεδομένης της έκτασης ρύπανσης των υπογείων υδάτων του προς αποκατάσταση πεδίου, θα πρέπει να προσδιοριστεί ο απαιτούμενος αριθμός πηγαδιών Air Sparging, καθώς και η διάταξη αυτών μέσα στο χώρο, που θα επιτύχουν την πλήρη «κάλυψη» και κατ΄ επέκταση την εξυγίανση όλης της ρυπανθήσας έκτασης. Ο αναγκαίος αυτός προσδιορισμός του αριθμού και της απόστασης των απαιτούμενων πηγαδιών Air Sparging είναι εφικτός μόνο αν είναι γνωστή η ζώνη επιρροής καθ' ενός από αυτά.

Για τον προσδιορισμό της ζώνης επιρροής έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής οι εξής κύριες μέθοδοι:

- Μέτρηση της πίεσης πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα.
- Μέτρηση της αύξησης της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου και του δυναμικου οξειδοαναγωγής στο υπόγειο νερό.
- Μέτρηση της αύξησης της συγκέντρωσης των πτητικών υδρογονανθράκων στην αέρια φάση στην ακόρεστη ζώνη.
- Μέτρηση της πίεσης κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα (η οποία στην περίπτωση που βρισκόμαστε μέσα στην ζώνη επιρροής θα είναι μεγαλύτερη από την υδροστατική πίεση).

- Μέτρηση της ανύψωσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα γύρω από το πηγάδι Air Sparging.
- Παρακολούθηση της μείωσης της συγκέντρωσης του ρύπου στο υπόγειο νερό.

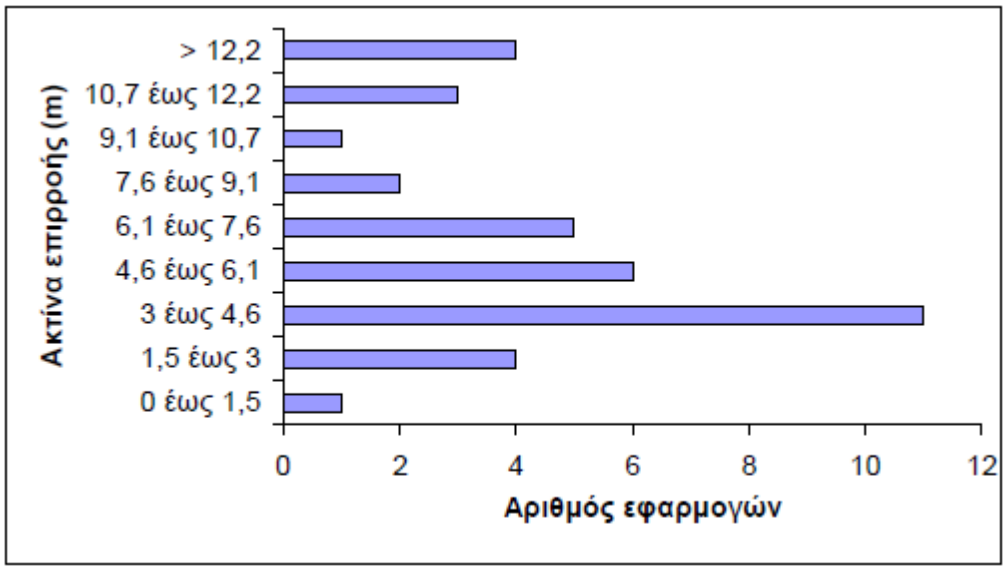


Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση των τριών φάσεων ανάπτυξης της ζώνης επιρροής ενός πηγαδιού Air Sparging [24].

Σε γενικές γραμμές, όσον αφορά τη μορφή και την έκταση της ζώνης επιρροής πηγαδιών Air Sparging, μελέτες αριθμητικής προσομοίωσης της μεθόδου έχουν εντοπίσει τρεις διαφορετικές φάσεις ανάπτυξης (Εικόνα 7). Οι φάσεις αυτές είναι οι εξής [18]:

- Φάση Επέκτασης, κατά τη διάρκεια της οποίας τα κάθετα και τα εγκάρσια όρια της ροής του αέρα αναπτύσσονται με τρόπο μεταβαλλόμενο.
- Φάση Μείωσης των Εγκάρσιων Ορίων, η οποία επίσης χαρακτηρίζεται από σημαντικές μεταβολές και είναι γνωστή ως «φάση κατάρρευσης».
- Φάση Μόνιμων Συνθηκών, κατά τη διάρκεια της οποίας το σύστημα παραμένει στατικό , εφόσον δεν αλλάζουν οι παράμετροι διοχέτευσης αέρα.

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας φάσης, η μορφή της ζώνης επιρροής είναι σχεδόν κωνική, ενώ η ακτίνα της μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να φτάσει ακόμη και τα 12m (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: Αναφερθείσες ζώνες (ακτίνες) επιρροής πηγαδιών Air Sparging σε σύνολο 37 εφαρμογών σε διαφορετικά πεδία [24].

3.10.1.2 Βάθος εισαγωγής αέρα

Μεταξύ όλων των σχεδιαστικών παραμέτρων ενός συστήματος Air Sparging, το βάθος εισαγωγής του αέρα ίσως είναι η πιο εύκολα προσδιορίσιμη παράμετρος, δεδομένου ότι καθορίζεται άμεσα από την κατανομή του υπάρχοντος ρύπου. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το βάθος αυτό βρίσκεται τουλάχιστον 0,3 – 0,6m χαμηλότερα από το βαθύτερο γνωστό σημείο ρύπανσης του υδροφορέα. Παρόλα αυτά, στην πραγματικότητα, το βάθος διοχέτευσης του αέρα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό και από τη στρωματοποίηση του εδάφους, καθώς για παράδειγμα η εισαγωγή αέρα κάτω από ζώνες χαμηλής διαπερατότητας πρέπει να αποφεύγεται. Η πρόσφατη εμπειρία καθορίζει ότι στις πλείστες των περιπτώσεων το βάθος διοχέτευσης αέρα θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 9 και 18m κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα [18],[14].

Το βάθος εισαγωγής του αέρα επηρεάζει την πίεση και την παροχή του διοχετευόμενου αέρα. Όσο πιο βαθιά βρίσκεται το σημείο παροχής του αέρα, τόσο πιο πολύ θα επεκταθεί η ζώνη επιρροής του πηγαδιού Air Sparging και επομένως θα απαιτηθεί μεγαλύτερη ποσότητα αέρα, προκειμένου να επιτευχθεί ένα ικανοποιητικό ποσοστό κορεσμού της ζώνης επιρροής σε αέρα [18].

3.10.1.3 Ρυθμός παροχής αέρα και πίεση διοχέτευσης

Ο ρυθμός παροχής και η πίεση διοχέτευσης του αέρα στον υδροφορέα εκπροσωπούν τις σημαντικότερες σχεδιαστικές και λειτουργικές παραμέτρους ενός συστήματος Air Sparging. Βάση αυτών επιλέγεται ο κατάλληλος εξοπλισμός εισαγωγής του αέρα και γενικότερα επιτυγχάνεται ο επιθυμητός αποτελεσματικός αερισμός του υπεδάφους. Ιδιαίτερα σπουδαία είναι η διαδικασία προσδιορισμού της κατάλληλης πίεσης, η οποία ουσιαστικά επικεντρώνεται στον εντοπισμό της ελάχιστης πίεσης που χρειάζεται για την εισαγωγή αέρα στο έδαφος και της μέγιστης πίεσης που επιτρέπεται να εφαρμοστεί στον υδροφορέα [25],[14].

Όσον αφορά την ελάχιστη πίεση που πρέπει να έχει ο διοχετευόμενος αέρας για να μπορέσει να επεκταθεί μέσα στο υπέδαφος, αυτή θα πρέπει να είναι ικανή να υπερνικήσει τα εξής [25],[14]:

- την υδροστατική πίεση της στήλης νερού που βρίσκεται μέσα στο πηγάδι Air Sparging ,
- την πίεση εισαγωγής αέρα μέσα στο εξωτερικό υλικό στήριξης του πηγαδιού (όταν υπάρχει),
- την πίεση εισαγωγής αέρα μέσα στον περιβάλλοντα γεωλογικό σχηματισμό,
- τις απώλειες πίεσης κατά μήκος των σωληνώσεων μεταφοράς του αέρα

Αμελώντας τις απώλειες πίεσης, έχει προκύψει η ακόλουθη σχέση προσδιορισμού της ελάχιστης πίεσης εισαγωγής αέρα στο υπέδαφος, Pmin [psig - pounds-force per square inch gauge] [25]:

$$P_{min} = 0.43H_h + P_{packing} + P_{formation}$$

όπου H_h είναι το βάθος από τον υδροφόρο ορίζοντα έως το σημείο εισαγωγής αέρα (ft) και $P_{packing}$ και $P_{formation}$ [psig] είναι οι πιέσεις εισαγωγής του αέρα για το δακτυλιοειδές εξωτερικό υλικό του πηγαδιού και τον υπάρχοντα γεωλογικό σχηματισμό, αντίστοιχα.

Για τυπικά πηγάδια και εφαρμογές της μεθόδου Air Sparging, οι πιέσεις $P_{packing}$ και $P_{formation}$ είναι μικρές. Συγκεκριμένα, οι πιέσεις εισαγωγής του αέρα είναι γενικά μικρότερες από 0,2 psig για άμμους, μικρότερες από 0,4 psig για λασπώδη εδάφη, αλλά και μεγαλύτερες από 1,5 psig για κάποια αργιλώδη εδάφη . Στην αρχή εφαρμογής της μεθόδου δεν είναι ασυνήθιστο για τους χρήστες του συστήματος να εφαρμόζουν πιέσεις μεγαλύτερες από την ελάχιστη πίεση κατά 5 έως 10 psig, προκειμένου να εκκινήσουν τη ροή του αέρα στο υπέδαφος πιο γρήγορα. Από αυτό το σημείο και μετά η πίεση εισαγωγής του αέρα μειώνεται σε τιμές περίπου ίσες με την ελάχιστη, καθώς προσεγγίζονται μόνιμες συνθήκες.

Εκτός από το κατώτερο όριο, υπάρχει και ένα ανώτερο όριο όσον αφορά την πίεση που μπορεί να έχει ο διοχετευόμενος αέρας σ' ένα πηγάδι Air Sparging. Δεδομένου ότι σε πολύ υψηλές πιέσεις διοχέτευσης αέρα στον υδροφορέα είναι δυνατόν να προκληθεί «φράξιμο» (fracturing) αυτού, τίθεται μια μέγιστη τιμή πίεσης, η οποία δεν πρέπει να ξεπεραστεί. Η πίεση, στην οποία μπορεί να λάβει χώρα φράξιμο του υδροφορέα και επομένως εκπροσωπεί τη μέγιστη δυνατή εφαρμοζόμενη πίεση, δίνεται από την ακόλουθη σχέση [25]:

$$P_{fracture} = 0.73D$$

όπου D είναι το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το σημείο εισαγωγής του αέρα (ft).

Μια άλλη σχέση προσδιορισμού της μέγιστης επιτρεπτής πίεσης διοχέτευσης αέρα είναι αυτή που παρουσιάζεται στη συνέχεια, η οποία είναι πιο πολύπλοκη και λαμβάνει υπόψη μεγέθη όπως το πορώδες και το ειδική βαρύτητα του εδάφους [24].

$$P_{max}[KPa] = H_1 \cdot G_s \cdot (1 - \varepsilon) \cdot 9.8 + H_2 \cdot G_s \cdot \varepsilon \cdot 9.8$$

όπου: H_1 = βάθος εισαγωγής του αέρα (m)
H_2 = πάχος υδροφορέα στο σημείο εισαγωγής του αέρα (m)
G_s = ειδική βαρύτητα του εδάφους (αδιάστατη)
ε = πορώδες του εδάφους

Πιέσεις μεγαλύτερες από την πίεση φραξίματος του υπάρχοντα γεωλογικού σχηματισμού μπορούν μεν να προκαλέσουν φράξιμο του υδροφορέα, αλλά καθώς η πίεση μειώνεται δραστικά σε λίγη μόλις απόσταση από το σημείο εισαγωγής του αέρα, η έκταση του φραξίματος περιορίζεται στην άμεσα κοντινή περιοχή που περιβάλλει το πηγάδι. Παρόλα αυτά, θεωρείται πολύ σημαντικό η πίεση του εισαγόμενου αέρα να κυμαίνεται αυστηρά

ανάμεσα στην ελάχιστη και τη μέγιστη δυνατή τιμή, προκειμένου να βελτιστοποιείται η απόδοση του συστήματος και να αποφεύγεται η εμφάνιση πιθανών προβλημάτων[25].

Όσον αφορά την παροχή του αέρα που εισάγεται στον υδροφορέα, θα πρέπει και αυτή να κυμαίνεται μεταξύ κάποιων λογικών ορίων. Τα όρια αυτά δεν ορίζονται απόλυτα από συγκεκριμένες εξισώσεις, αλλά αντίθετα έχουν καθοριστεί από την υπάρχουσα εμπειρία. Όπως έχει αποδειχθεί από διάφορες εφαρμογές της μεθόδου Air Sparging, η παροχή του διοχετευόμενου αέρα θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να αποκλείονται δυσάρεστα φαινόμενα, όπως:

- Η κίνηση και η απελευθέρωση των παραγόμενων ατμών στην επιφάνεια του εδάφους και/ ή την συσσώρευσή τους σε κτίρια, χαντάκια, κτλ..
- Η πρόκληση ανάμιξης των υπογείων υδάτων (λόγω της μετακίνησης του νερού από τον αέρα που διοχετεύεται), η οποία μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την μετακίνηση ή την εξάπλωση της ζώνης ρύπανσης.
- Η αυξημένη ανάμιξη (λόγω της μεγάλης παροχής αέρα) και κατ' επέκταση η αυξημένη μεταφορά μάζας των ρύπων στο υπόγειο νερό και την αέρια φάση.

Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων, η επιλεχθείσα παροχή αέρα θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητικός αερισμός του υδροφορέα (μεγάλες ζώνες επιρροής και υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό) και αρκετά μικρή, ώστε να μην προκαλείται ανεπιθύμητη διαταραχή των συνθηκών που επικρατούν στο υπέδαφος. Η αντίληψη ότι όσο περισσότερος αέρας διοχετεύεται στον υδροφορέα, τόσο καλύτερα αποτελέσματα εξυγίανσης επιτυγχάνονται δεν είναι απόλυτα σωστή [18].

Εκτός από τον κίνδυνο φραξίματος του υδροφορέα, άλλοι παράγοντες που περιορίζουν την παροχή του αέρα σ΄ ένα πηγάδι Air Sparging είναι [24],[14]:

- οι δυνατότητες του υπάρχοντος εξοπλισμού παροχής αέρα,
- οι δυνατότητες του συστήματος άντλησης των παραγόμενων ατμών (όπου υπάρχει)
- οι βιολογικοί περιορισμοί που αφορούν την ενίσχυση της βιοαποικοδόμησης και
- η πιθανή δημιουργία ανεπιθύμητων διεξόδων/ καναλιών αέρα.

Οι παροχές που επιλέγονται στις περισσότερες εφαρμογές Air Sparging κυμαίνονται μεταξύ 40 και 1100L/min [24], ενώ ως κατάλληλη παροχή έναρξης της λειτουργίας ενός συστήματος προτείνεται η τιμή των 565L/min [25].

3.10.2 Τρόπος λειτουργίας συστήματος

Μέχρι στιγμής, έχουν αναπτυχθεί δυο δυνατοί τρόποι λειτουργίας ενός συστήματος Air Sparging: η συνεχής λειτουργία και η περιοδική λειτουργία. Στην πρώτη περίπτωση η διοχέτευση του αέρα στον υδροφορέα λαμβάνει χώρα υπό σταθερές συνθήκες καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου, ενώ στη δεύτερη ο αέρας εισάγεται είτε ανά συγκεκριμένα τακτά χρονικά διαστήματα με σταθερή παροχή και πίεση, είτε συνεχώς με μεταβαλλόμενη πίεση και παροχή [14].

Σύμφωνα με πολλούς επιστήμονες, η περιοδική λειτουργία του συστήματος Air Sparging είναι ικανή να εξαλείψει μια σειρά αρνητικών φαινομένων, τα οποία εμφανίζονται κατά τη διάρκεια εφαρμογής της τεχνολογίας. Η υπάρχουσα βιβλιογραφία αποδεικνύει ότι, κατά τη διάρκεια εφαρμογής του Air Sparging, δυο βασικοί περιοριστικοί, ως προς την απόδοση του συστήματος, παράγοντες είναι δυνατόν να εμφανιστούν [14]:

- η αργή κινητική της διεργασίας μεταφοράς μάζας στη διεπιφάνεια νερού/ αέρα,
- ο μειωμένος ρυθμός μεταφοράς μάζας του ρύπου από την υδατική φάση στη διεπιφανεια νερού/ αέρα.

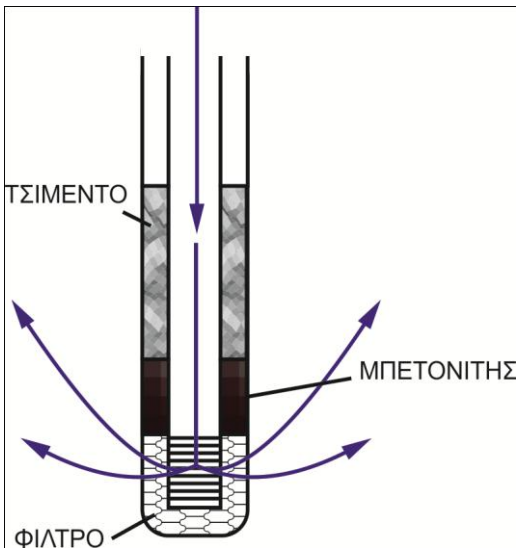
Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι η παρουσία καναλιών αέρα, τα οποία δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της διοχέτευσης αέρα στο υπέδαφος, εμποδίζουν τη ροή του νερού μέσα από τη ζώνη επιρροής ενός πηγαδιού Air Sparging. Η φυσική ροή του υπόγειου νερού επιβραδύνεται ή/ και αλλάζει κατεύθυνση, λόγω των μεταβολών του βαθμού κορεσμού και κατ' επέκταση της υδραυλικής διαπερατότητας, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται εξάπλωση ή μεταφορά του υπάρχοντος ρύπου σε άλλες περιοχές [18].

Τα παραπάνω ανεπιθύμητα φαινόμενα είναι δυνατόν να αποφευχθούν εφαρμόζοντας μια περιοδική λειτουργία του συστήματος Air Sparging [18]. Αν και η ορθότητα της παραπάνω δήλωσης αμφισβητείται από πολλούς, οι οποίοι υποστηρίζουν ότι η περιοδική λειτουργία των συστημάτων Air Sparging θα πρέπει να γίνεται μόνο σε περιπτώσεις όπου η συνεχής λειτουργία δεν είναι εφικτή, σε πολλές εφαρμογές έχει παρατηρηθεί ότι η περιοδική διοχέτευση αέρα στον υδροφορέα αυξάνει την επαφή αέρα/ νερού και ενισχύει τη διάχυση του ρύπου από την υδατική στην αέρια φάση, αυξάνοντας την ολική απόδοση του συστήματος [24].

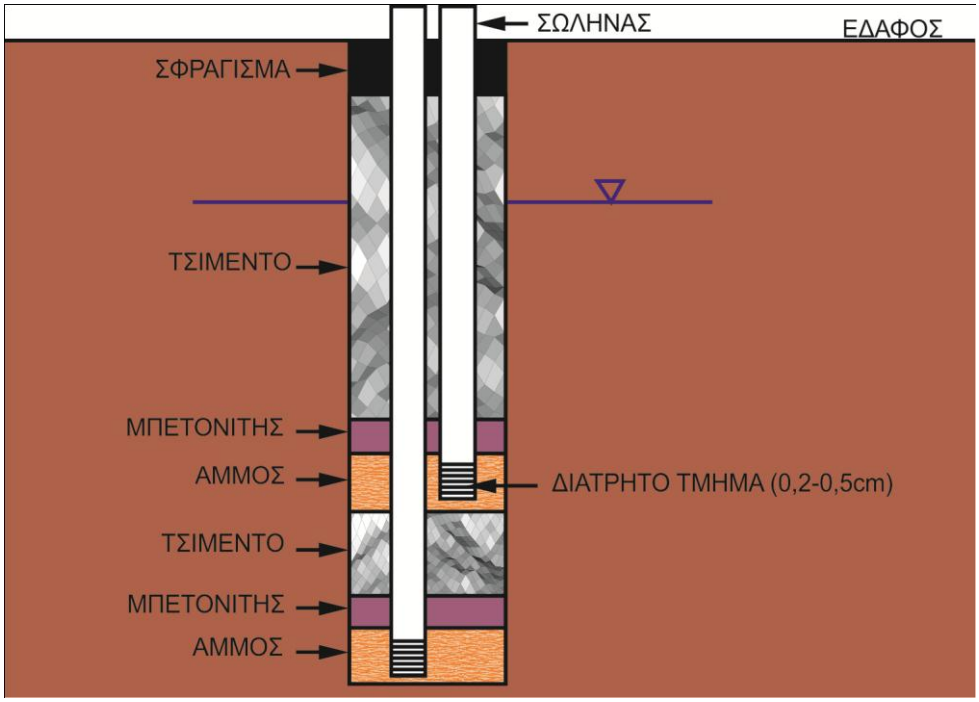
Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της περιοδικής διοχέτευσης αέρα στον υδροφορέα είναι η αυξημένη ανάμιξη του υπόγειου νερού, η οποία εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της φάσης κατάρρευσης της ανάπτυξης της ζώνης επιρροής ενός πηγαδιού Air Sparging. Σε αυτήν την φάση, ο ρυθμός διάχυσης του ρύπου από το υπόγειο νερό στην αέρια φάση είναι αυξημένος, γεγονός το οποίο αναπαράγεται κατά την περιοδική διοχέτευση αέρα και κατ' επέκταση κατά την επαναλαμβανόμενη ανάπτυξη της ζώνης επιρροής. Επιπλέον, στη φάση κατάρρευσης η ζώνη επιρροής είναι μέγιστη, ευνοώντας τον ευρύτερο αερισμό του υπόγειου νερού [18],[14].

3.11 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΗΓΑΔΙΩΝ AIR SPARGING

Τα πηγάδια διοχέτευσης αέρα θα πρέπει να είναι κατασκευασμένα με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτυγχάνουν την επιθυμητή κατανομή της ροής του αέρα στον εκάστοτε υπάρχοντα γεωλογικό σχηματισμό. Στις εικόνες 7 και 8 παρουσιάζονται συμβατικοί τρόποι σχεδιασμού και κατασκευής πηγαδιών Air Sparging υπό συνθήκες ρηχού σημείου εισαγωγής αέρα (βάθος μικρότερο από 6m κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα) και βαθιού σημείου εισαγωγής αέρα (βάθος μεγαλύτερο από 6m κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα), αντίστοιχα. Για την κατασκευή των πηγαδιών αυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σωλήνες και διάτρητα τμήματα από βινυλοχλωρίδιο (PVC) σε διάφορες διαμέτρους. Και στις δυο περιπτώσεις, το σημείο διοχέτευσης του αέρα θα πρέπει να εγκατασταθεί έπειτα από τη διεξαγωγή γεώτρησης και να είναι ''σφραγισμένο'' από ένα υπερκείμενο αδιαπέρατο υλικό (μπετονίτης), προκειμένου να αποφεύγεται η διαρροή του εισαγόμενου αέρα μέσα στο πηγάδι.



Εικόνα 7: Απεικόνιση του σημείου διοχέτευσης αέρα για ρηχές εφαρμογές .

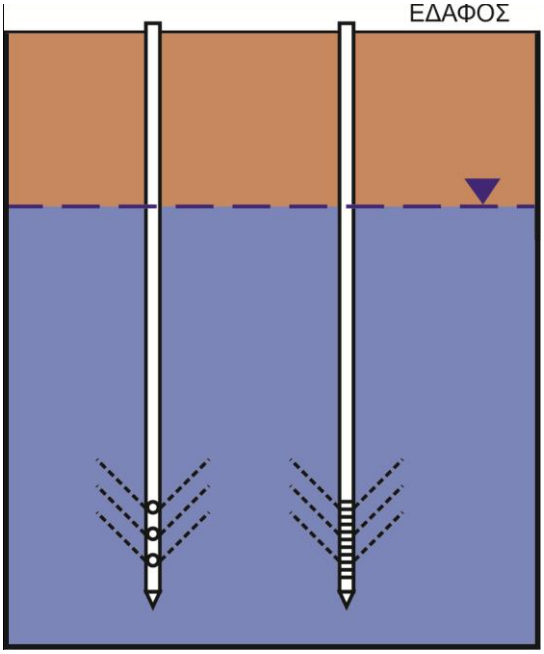


Εικόνα 8: Απεικόνιση του σημείου διοχέτευσης αέρα για βαθιές εφαρμογές .

Οι διάμετροι των πηγαδιών διοχέτευσης αέρα ποικίλουν από 2,55 έως 10 cm. Η απόδοση του συστήματος δεν αναμένεται να βελτιωθεί αν η διάμετρος των πηγαδιών αυξηθεί περαιτέρω [18]. Τα πηγάδια διαμέτρου 2,55 έως 5 cm θεωρούνται ως τα πλέον οικονομικά, λόγω του χαμηλού κόστους διάνοιξής τους. Παρόλα αυτά, όσο μειώνεται η διάμετρος των πηγαδιών, οι απώλειες πίεσης λόγω της ροής του αέρα μέσα στις σωληνώσεις αυξάνονται σημαντικά, ιδιαίτερα για μεγάλα βάθη διοχέτευσης αέρα.

Η δημιουργία σημείων διοχέτευσης αέρα στον υδροφορέα με τη χρήση σιδερένιων σωλήνων μικρής διαμέτρου, οι οποίες καρφώνονται στο έδαφος, ίσως καταστήσουν την όλη μέθοδο πιο οικονομική κάτω από ορισμένες συνθήκες (Εικόνα 9). Παρόλα αυτά, η απουσία στρώματος άμμου γύρω από σημείο εισαγωγής του αέρα είναι δυνατόν να προκαλέσει ‘’φράξιμο’’ του εδάφους, ειδικά σε περίπτωση περιοδικής λειτουργίας του

συστήματος. Συγκεκριμένα, η επαναλαμβανόμενη εξάπλωση και κατάρρευση της ζώνης επιρροής θα προκαλέσει ένα είδος «κοσκινίσματος» (sieving) του εδάφους, κατά τη διάρκεια του οποίου τα λεπτόκοκκα σωματίδια θα συσσωρευτούν γύρω από το σημείο εισαγωγής του αέρα και σταδιακά θα το φράξουν [14].



Εικόνα 9: Απεικόνιση πηγαδιών Air Sparging μικρής διαμέτρου [18].

Το διάτρητο τμήμα των σωλήνων διοχέτευσης αέρα θα πρέπει να είναι σε τέτοιο βάθος και να έχει τέτοιο μήκος, ώστε να μεγιστοποιεί τη ροή του εισαγόμενου αέρα σ΄ολόκληρη την ζώνη ρύπανσης. Για τυπικούς ρυθμούς ροής, το μεγαλύτερο ποσοστό του αέρα θα διαφύγει από τα πρώτα 30cm του διάτρητου τμήματος του σωλήνα[14].

3.12 ΕΙΔΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΡΥΠΟΥ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τεχνολογία Air Sparging είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην περίπτωση που οι ρύποι του υπόγειου νερού είναι πτητικοί ή ημι-πτητικοί. Επίσης, έχει αποδειχτεί ότι μπορεί να επιφέρει καλά αποτελέσματα και στην απομάκρυνση μη πτητικών αλλά αερόβια βιοαποδομήσιμων ρύπων. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό να είναι γνωστά το είδος και τα χαρακτηριστικά του υπάρχοντος ρύπου, όχι μόνο για σχεδιαστικούς λόγους (όπως τον προσδιορισμό της απαιτούμενης ποσότητας αέρα/ οξυγόνου) αλλά και γενικότερα για την εκτίμηση της καταλληλότητας εφαρμογής της μεθόδου Air Sparging σε ένα συγκεκριμένο πεδίο.

Όσον αφορά τη συγκέντρωση του ρύπου δεν υπάρχει κάποιο μέγιστο περιοριστικό όριο, το οποίο να καθορίζει την απόδοση της τεχνολογίας. Αντίθετα, η κατανομή του ρύπου είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς καθορίζει κατά ένα μεγάλο ποσοστό την εφαρμοσιμότητα και την αποτελεσματικότητα του Air Sparging. Έχει αποδειχθεί ότι η διοχέτευση αέρα σε υδροφορέα που παρουσιάζει ρύπανση από LNAPL, τα οποία σχηματίζουν ελεύθερη ελαιώδη φάση στην επιφάνεια του υδροφορέα δεν επιφέρει κανένα αποτέλεσμα εξυγίανσης. Τα βέλτιστα αποτελέσματα επιτυγχάνονται στην περίπτωση που ο ρύπος είναι διαλυμένος στο υπόγειο νερό και όσο το δυνατόν λιγότερο προσροφημένος σε διάφορα εδαφικά σωματίδια.

Τέλος, είναι επίσης αναγκαίο να προσδιοριστεί πλήρως η ζώνη ρύπανσης (θέση και έκταση) του υδροφορέα, προκειμένου να πραγματοποιηθεί κατάλληλος σχεδιασμός του συστήματος Air Sparging και συγκεκριμένα να γίνει σωστή επιλογή του βάθους διοχέτευσης του αέρα, του αριθμού των απαιτούμενων πηγαδιών και της χωροθέτησής αυτών στο πεδίο [14].

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στην παρούσα εργασία έλαβε χώρα όσο το δυνατό πλήρη προσομοίωση των συνθηκών πεδίου στο εργαστήριο για την εφαρμογή της μεθόδου Air Sparging. Συγκεκριμένα , έγινε χρήση της μεθόδου in well air-sparging γιατί όλες οι διεργασίες λαμβάνουν αποκλειστικά μέρος σε νερό και μόνο, και όχι σε κορεσμένο έδαφος. Τοποθετήθηκε αρχικά χώμα στο κάτω μέρος της στήλης μαζί με το νερό για να εξασφαλιστεί και ένα τυπικό σύστημα Air Sparging αλλά μετά από τα πρώτα πειράματα ο σωλήνας διοχέτευσης του αέρα έφραζε με χώμα και υπήρχε κίνδυνος για ατύχημα αφού δεν μπορούσε να εξέλθει ο αέρας από το σωλήνα. Έτσι αποκλειστικά έγινε επεξεργασία με in well σύστημα.

Ο αέρας που διοχετεύεται εξατμίζει από την μια τους πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες, στην προκειμένη περίπτωση τα BTEX και από την άλλη ενισχύει την βιοαποικοδόμηση στο χώρο (για το τυπικό σύστημα). Οι ατμοί ανέρχονται στην επιφάνεια του πεδίου με αποτέλεσμα είτε την απορρόφηση τους από πηγάδια άντλησης ατμών ,είτε αν είναι επιτρεπτό την εξαγωγή τους στην ατμόσφαιρα. Αντίστοιχα έλαβε χώρα και η προσομείωση στο εργαστήριο. Ο σωλήνας διοχέτευσης αέρα ήταν σαν το αντίστοιχο πηγάδι του πεδίου που μας παρείχε αέρα. Ενώ στο πεδίο υπάρχει κομπρεσέρ αέρα, στο εργαστήριο έγινε χρήση της βάνας αέρα, αφού ήταν επιθυμητές μικρές παροχές για τις ανάγκες του πειράματος.

Πηγάδια παρατήρησης δε θεωρήθηκαν αναγκαία αφού έγινε η δειγματοληψία από τα μέλη του εργαστηριου καθώς και η ανάλυση τους στο κατάλληλο όργανο. Τέλος, οι ατμοί διέφευγαν από την στήλη με εξάτμιση. Στην ουσία τοποθετήθηκε πάνω από το νερό, στρώμα χαλικιού και χώματος για προσομοίωση του πεδίου αλλά , πέρα του ότι στο πεδίο δεν συναντάται αυτή η στρωματοποίηση, για το συγκεκριμένο πείραμα η χρήση τους βοήθησε μόνο στο να μην εφίσταται γρήγορη φυσική εξάτμιση των υδρογονανθράκων στο χώρο (αντικείμενο μελέτης ήταν από την αρχή το νερό και το τι γίνεται σε αυτό σε πρώτη φάση, δηλαδή ήταν επιθυμητό να καθαριστεί το νερό και αυτή η διάταξη βοήθησε για όσο διαρκούσαν τα πειράματα να μην υπάρχουν απώλειες λόγω φυσικής εξάτμισης το οποίο αναφέρεται εκτενώς παρακάτω.

Δεν χρησιμοποιήθηκαν πηγάδια άντλησης των ατμών γιατί, εκτός του ότι δεν διαθέτονταν σύστημα επεξεργασίας των ατμών, δεν ήταν αντικείμενο μελέτης της εργασίας τι διαφεύγει από την στήλη, ενώ για λογούς υγείας υπήρχε ανοιχτό παράθυρο για μικρό χρονικό διάστημα. Το πεδίο προσημειώθηκε με την κατασκευή της στήλης και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε μεγάλα βάθη που βρίσκονται οι υπόγειοι υδροφορείς(συνήθως 2-15 μέτρα) από 15-28 βαθμοί κελσίου επετεύχθησαν με την χρήση κλιματιστικού στο χώρο του εργαστηρίου. Συνήθως οι θερμοκρασίες ήταν μεταξύ 22 και 25. Ήταν επιθυμητές τέτοιας κλίμακας χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες γιατί εκτός του ότι τέτοιες θερμοκρασίες συναντούνται σε μεγάλα βάθη υδροφορέων (και στο πειραμα αναζητήθηκε μια καλή προσημείωση του πεδίου), δεν ήταν αρεστές μεγαλύτερες λόγω της μεγάλης πτητικότητας των ρύπων(BTEX),αφού κατά την μεταφορά του ρύπου στην στήλη και κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων σίγουρα θα υπήρχαν απώλειες λόγω της γρήγορης εξάτμισης τους και θα υπήρχε δυσκολία στην συνέχιση των πειραμάτων και των αποτελεσμάτων (αφού κατά την μεταφορά τους στα δειγματοληπτικά μπουκάλια και από εκεί στο ψυγείο και αργότερα στο όργανο για την ανάλυση τους ,θα έρχονταν πάλι σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα).

Το ότι η προσημείωση της στήλης με το πεδίο ήταν επιτυχής φάνηκε από τις μηδενικές σχεδόν απώλειες της στήλης όταν έγινε έγχυση ρύπου και αφέθηκε 25 ώρες χωρίς παροχή αέρα. Διαπιστώθηκε εν συνεχεία από μετρήσεις ότι, όση ποσότητα ρύπου τοποθετήθηκε, τόση ανιχνεύτηκε και μετά από 25 ώρες δηλαδή οι απώλειες της στήλης ήταν μηδενικές. Αυτή η ένδειξη αποτέλεσε ένα καλό βήμα και μια καλή αρχή για το ξεκίνημα των πειραμάτων αφού ήταν γνωστό πλέον ότι το σύστημα Air Sparging και μόνο θα ήταν υπεύθυνο για την εξάτμιση των ρύπων και όχι μια κακή κατασκευή στην οποία θα υπήρχε φυσική εξάτμιση των πετρελαϊκών υδρογονανθράκων.

Έχοντας τη μονή δημοσίευση ‘’Petroleum mass removal from low permeability sediment using air sparging/soil vapor extraction: impact of continuous or pulsed operation’’("Αφαίρεση μάζας πετρελαίου από χαμηλής διαπερατότητας ιζήματα με χρήση Air Sparging και εξαγωγή ατμών από το έδαφος’’): επιπτώσεις της συνεχούς ή διακεκομμένης λειτουργίας" ,η οποία εφαρμοσμένη στο πεδίο καταλήγει στο ότι ο διακοπτόμενος αερισμός είναι πιο αποτελεσματικός από τον συνεχή και κάνει μια πρόταση ότι ίσως έχει μεγαλύτερη απομάκρυνση μάζα ρύπου καθώς και χαμηλότερο οικονομικό κόστος [17] ,έγινε απόδειξη μέσω των πειραμάτων με συγκεκριμένα στοιχειά-αποτελέσματα ακριβώς των διαφορών που υφίστανται μεταξύ τους τόσο αποδοτικά όσο και οικονομικά σε εργαστηριακή κλίμακα.

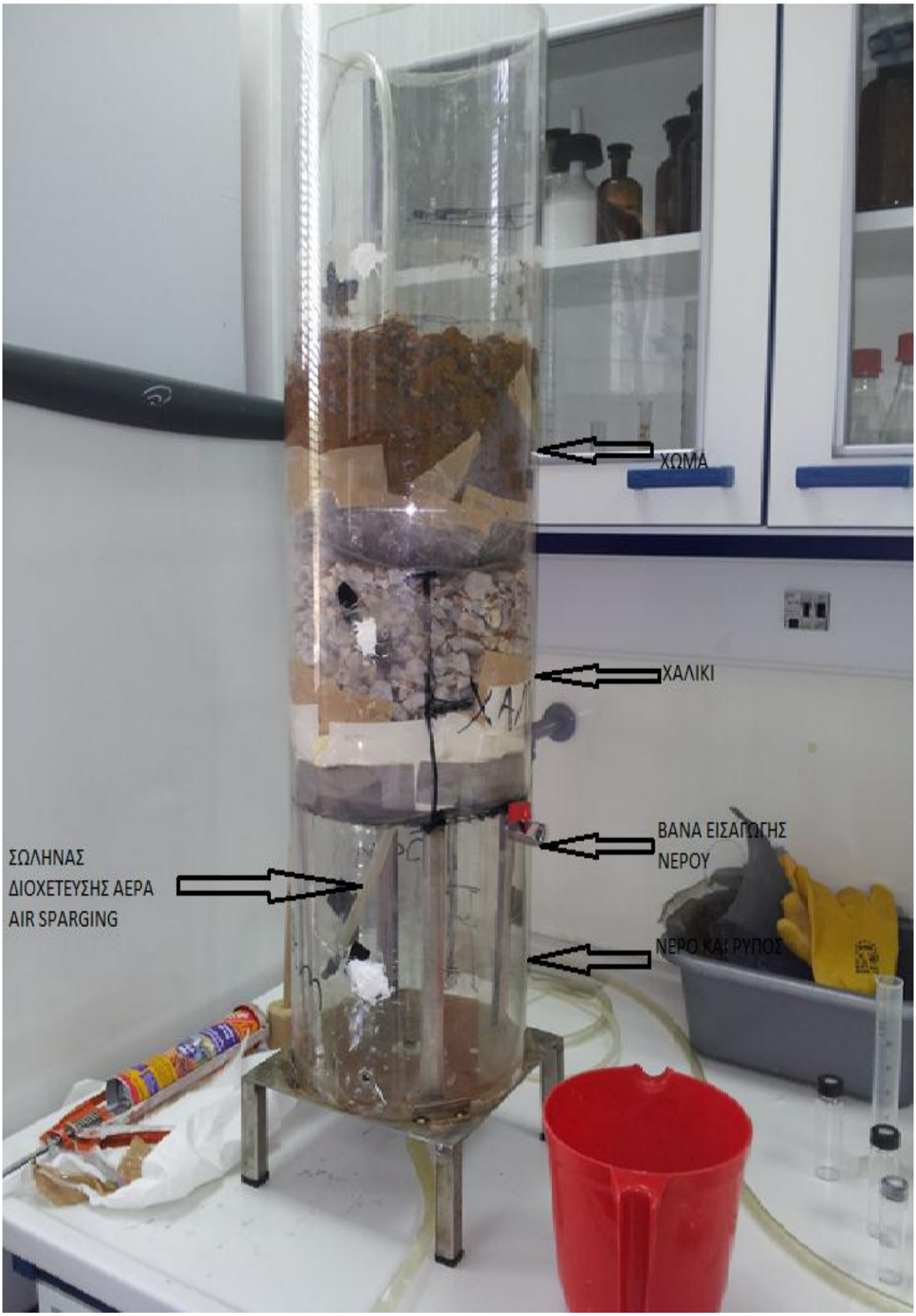
Η ύπαρξη της μεθόδου Air Sparging οδήγησε στην αναζήτηση, τι θα μπορούσε να γίνει ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοση της και να εξοικονομηθούν παράλληλα χρηματικοί πόροι από μια καλή χρήση της. Όπως ήταν ευρέως γνωστό τόσο από βιβλιογραφία, όσο και από πειράματα στο πεδίο όταν αυξάνεται η παροχή αέρα τόσο πιο γρήγορα απομακρύνεται ο ρύπος. Αυτό, ήδη ήταν γνωστό όμως εμφανίστηκε η εύλογη απορία γιατί τότε δεν δουλεύει κανείς με τις μέγιστες παροχές να τελειώνει και γρήγορα. Αυτή η σκέψη-απορία απαντήθηκε όμως παραπάνω στα μειονεκτήματα της μεγάλης παροχής αφού είτε το πεδίο δεν θα αντέχει τόσο μεγάλες παροχές είτε θα σπαταλούνταν αρκετός αέρας άσκοπα καθότι με αρκετά μικρότερη ποσότητα θα εμφανίζονταν τα ιδία αποτελέσματα έτσι θα υπήρχε σπάταλη οικονομική πλέον. Έτσι χρησιμοποιήθηκε ένα εύρος παροχών και εξετάστηκε ανά λίτρο αέρα που παρέχεται στο πείραμα τι απομάκρυνση ρύπου υπάρχει. Ακόμα συνδυάζοντας συγκεκριμένα κομπρεσέρ αέρα που παρέχουν αυτές τις παροχές καθώς και τον χρόνο που μηδενίζει το ρύπο η κάθε παροχή, το κόστος της εκάστοτε επιλογής και το κόστος ανά ppm συγκέντρωσης ρύπου που απομακρύνεται. Ακόμα δοκιμάστηκε πέρα του συνεχόμενου αερισμού και διακοπτόμενος να εξεταστούν οι γνώσεις από βιβλιογραφια ότι λειτουργεί με καλυτέρα αποτελέσματα έναντι του συνεχόμενου. Τέλος, ερευνήθηκε και μια μικρότερη συγκέντρωση ρύπου για να εξεταστεί πως θα συμπεριφερόταν σε μια συγκεκριμένη παροχή αέρα συνεχόμενη και διακοπτόμενη.

4.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΤΗΛΗΣ

Η κατασκευή της στήλης έγινε σε προσομοίωση με τις συνθήκες ενός πεδίου ρύπανσης. Στόχος της εργασίας ήταν η μελέτη της μεθόδου Air Sparging για υπόγειους υδροφορείς, έτσι έπρεπε να γίνει καλή αναπαράσταση ενός υπόγειου υδροφορέα και όλη η χρησιμοποιούμενη διάταξη της μεθόδου εξυγίανσης. Η στήλη που κατασκευάστηκε απαρτιζόταν από τρία μέρη. Το πρώτο μέρος απαρτιζόταν από νερό και τους πετρελαϊκούς ρύπους. Το δεύτερο από χαλίκι και το τρίτο από χώμα. Η συγκεκριμένη διάταξη είναι και η τελική αφού πέρασε από διάφορα αποτυχημένα στάδια (προβλήματα κυρίως στην κατασκευή της στήλης και στερέωσης του χώματος πάνω από το νερό) μέχρι να οριστικοποιηθεί.

Στην πραγματικότητα , για το in well πηγάδι δεν χρειάζεται καθόλου το χώμα και το χαλίκι πάνω από το νερό. Ήταν απλά ένας τρόπος να εμποδιστεί η απευθείας εξάτμιση των ρύπων στην ατμόσφαιρα καθώς και να περιγράφει η διάταξη ενός τυπικού συστήματος Air Sparging στο πεδίο. Με αυτή τη διάταξη αργότερα θα ήταν εφικτό τοποθετώντας χώμα στο νερό να γινόταν μελέτη σε μια κανονική διάταξη Air Sparging και επιπλέον θα

μπορούσε να εξεταστεί η προσρόφηση του χώματος σε BTEX. Αν γινόταν λόγος για ένα τυπικό σύστημα Air Sparging, το πρώτο μέρος αναπαριστά έναν κορεσμένο υπόγειο υδροφορέα (κορεσμένη ζώνη ,αν και δεν υπάρχει χώμα), ενώ τα άλλα δυο μέρη την ακόρεστη ζώνη του πεδίου. Βεβαίως και στο πεδίο δεν συναντάται αυτή η στρωματοποίηση και εξειδικευμένη διάταξη των στρωμάτων ,καθώς επίσης ποικίλει η γεωμορφολογία κάθε περιοχής, έτσι έγινε ότι καλύτερο από πλευρά ευκολίας για την κατασκευή της στήλης ώστε να ήταν εμφανής μια καλή αναπαράσταση του χώρου.



Εικόνα 10:Φωτογραφια της πειραματικής στήλης στο εργαστήριο και η διάταξη του in well Air Sparging.

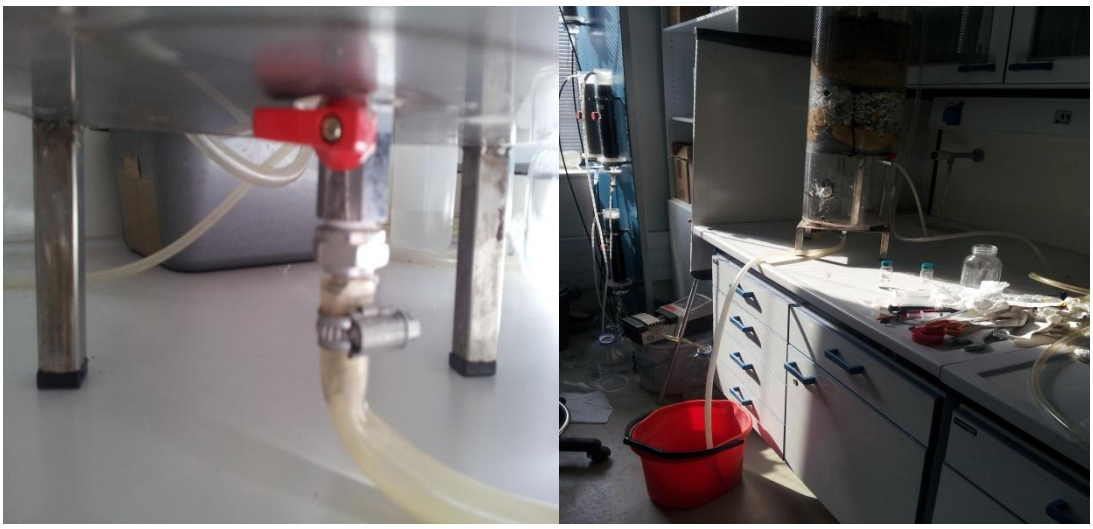
Η στήλη έχει ύψος 1 μέτρο και διάμετρο 25 εκατοστά. Το νερό στη στήλη έχει ύψος 25 εκατοστά, το χαλίκι 20 εκατοστά και το χώμα 35 εκατοστά αντίστοιχα. Η αναλογία των υψών κάθε μέρους ήταν τυχαία ,αφού και στο πεδίο δεν είναι γνωστό σε πιο ύψος κάθε φορά θα βρίσκεται ο ρυπασμένος υδροφορέας, αλλά και από πρακτικής άποψης γιατί το ύψος του χαλικιού πρέπει να ήταν αρκετό έτσι ώστε το χώμα να μην διαπερνά το χαλίκι και πέφτει μέσα στο νερό έτσι ώστε να μην υπήρχε βούλωμα του σωλήνα που διοχέτευε αέρα στην στήλη. Ακόμα ,το χώμα πρέπει να ήταν αρκετό γιατί στο πεδίο είναι συχνά αρκετά μεγάλο το ύψος του χώματος πάνω από τον υδροφορέα καθώς και στο ότι δεν ήταν επιθυμητή μικρή ποσότητα χώματος γιατί τότε θα υπήρχε γρηγορότερη διαφυγή των πτητικών υδρογονανθράκων στο εργαστήριο και θα προέκυπτε τότε θέμα κινδύνου υγείας.



Εικόνες 11,12: Φωτογραφίες από το χαλίκι στη στήλη και το χώμα.

Στην παρούσα εργασία έγινε εστίαση στην συγκέντρωση και εξάτμιση των ρύπων στο νερό ,δηλαδή ως πρώτο μέλημα να καθαριστεί ο υπόγειος υδροφορέας (δεν πάρθηκαν μετρήσεις από το χώμα ή τι ποσότητα υδρογονανθράκων και διαπερνά και φεύγει απο το χώμα).

Η στήλη έχει σχήμα κυλινδρικό και το πρώτο μέρος όπου γίνεται εισαγωγή του νερού και του ρύπου έχει χωρητικότητα 11,2 λίτρα. Η στήλη στηρίζεται πάνω σε μια μεταλλική ανοξείδωτη βάση με τέσσερα πόδια. Στο κάτω μέρος της στήλης υπάρχει ανοξείδωτη βάνα από την οποία αδειάζει η στήλη μετά το πέρας του κάθε πειράματος. Σωλήνας καταλήγει σε κουβά ο οποίος αδειάζει σε εξωτερικό χώρο και όχι σε χώρο εργαστηριού για διαφύλαξη της υγείας.



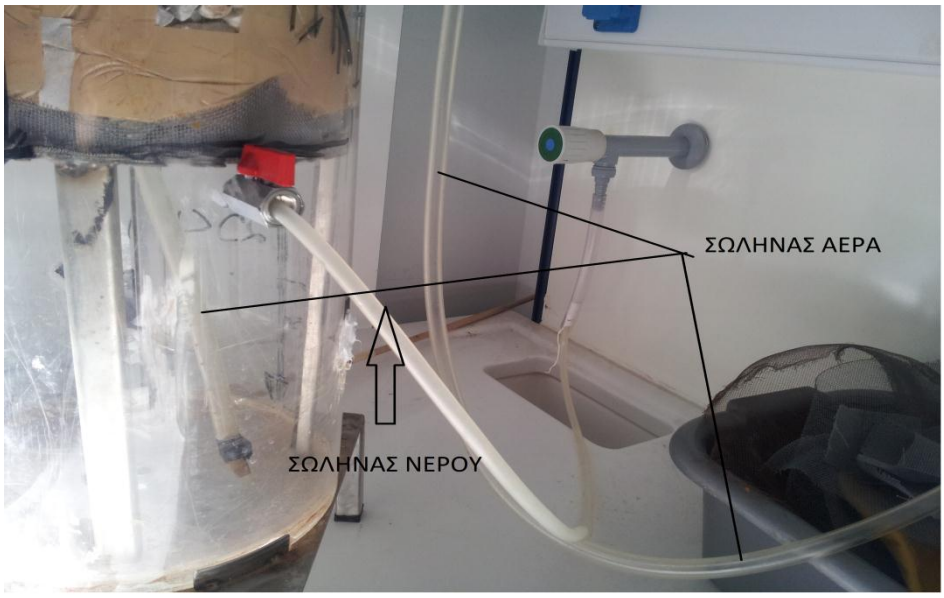
Εικόνα 13 :Φωτογραφία της κάτω βάνας προς διευκόλυνση του αδειάσματος της στήλης.
Εικόνα 14:Φωτογραφια μακρινή της διάταξης και του κουβά στον οποίο γινόταν το άδειασμα μετά το πέρας των πειραμάτων.

Στα 23 εκατοστά ύψους από τη βάση της στήλης υπάρχει και δεύτερη βάνα η οποία χρησιμεύει για το γέμισμα της στήλης με νερό. Αυτή η βάνα συνδέεται με βρύση στο εργαστήριο η οποία την τροφοδοτεί με νερό. Στα δέκα εκατοστά και περιμετρικά της στήλης υπάρχουν τρεις τρύπες γεμισμένες με σιλικόνη ,από τις οποίες γίνεται η έγχυση του ρύπου στο νερό με σύριγγα καθώς και η δειγματοληψία στο εκάστοτε χρονικό διάστημα.



Εικόνα 15: Φωτογραφία της στήλης καθώς γεμίζει με νερό .

Μετά το γέμισμα της στήλης με νερό, γινόταν η εισαγωγή του ρύπου.



Εικόνα 16: Φωτογραφία του δικτύου σωλήνων που χρησιμοποιήθηκαν.

Μέσα στην στήλη και σε ύψος 25 εκατοστών υπάρχει μια στρογγυλή αλουμινένια βάση η οποία στηρίζεται σε 4 πόδια και πάνω της στερεώνεται το χαλίκι και το χώμα. Πάνω από τη βάση τοποθετείται σήτα (4 φύλλα σήτας), πολύ μικρής διαμέτρου κενών έτσι ώστε να μην περνάει χώμα και χαλίκι μέσα στο χώρο του νερού και του ρύπου, προς αποφυγήν φραξίματος του σωλήνα που παρέχει αέρα στο σύστημα.



Εικόνα 17



Εικόνα 18



Εικόνα 19



Εικόνα 20

Εικόνες 17,18,19,20: Φωτογραφίες από δυο ειδή σήτας και φωτογραφία αλουμινένιας βάσης προς στήριξη του χαλικιού και του χώματος.

Ο σωλήνας που παρέχει αέρα περνά μέσα από το χώμα ,το χαλίκι και τη σήτα και καταλήγει στο τμήμα με το νερό και το ρύπο (γύρω στα 6 εκατοστά δηλαδή κάτω από τις τρύπες έκχυσης του ρύπου). Πριν το τέλος του σωλήνα έχουν ανοιχτεί τρύπες οι οποίες βοηθούν στην εξαγωγή του αέρα και στο τέλος του σωλήνα έχει εφαρμοστεί τάπα η οποία δεν αφήνει τον αέρα να περάσει μέσα από εκεί έτσι αναγκαστικά ο αέρας περνά από τις ανοιγμένες τρύπες με μορφή φυσαλίδων. Το άλλο μέρος του σωλήνα συνδέεται με την βάνα παροχής αέρα στο εργαστήριο. Τέλος, λαμβάνει χώρα η τοποθέτηση του χονδρόκοκκου χαλικιού (από νταμάρι της περιοχής Ακρωτηριου) και την τοποθέτηση του χώματος (από την περιοχή Ακρωτήρι Χανίων).



Εικόνα 21 : Φωτογραφία της γεμισμένης στήλης με νερό και ρύπο καθώς και του σωλήνα διοχέτευσης αέρα.

4.2 ΔΙΕΞΑΓΩΜΕΝΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

4.2.1 Η πειραματική διαδικασία.

Ο σκοπός της παρούσης εργασίας είναι μια ποιοτική –αποδοτική και οικονομική μελέτη της μεθόδου Air Sparging που ερευνήθηκε στο εργαστήριο. Αρχικά έλαβε χώρα το ‘’τυφλό’’ πείραμα, δηλαδή τοποθετηθήκαν 10 ppm συγκέντρωση ρύπου στην στήλη και αφέθηκε χωρίς παροχή αέρα για 25 ώρες. Σκοπός ήταν να διαπιστωθεί αν θα υπήρχαν φυσικές απώλειες του ρύπου. Ελάχιστες απώλειες ήταν επιθυμητές μετά από το πέρας τόσων ωρών, αλλά αν γίνονταν αντιληπτές μεγάλες απώλειες τότε θα συμπεραινόταν ότι η εξάτμιση που θα εφίστατο αν έτρεχαν τα πειράματα με αέρα δεν θα οφειλόταν αποκλειστικά στον αέρα που θα διοχετευόταν στο σύστημα αλλά και σε μια κακή κατασκευή της στήλης η οποία θα ευθυνόταν για ένα μέρος της εξάτμισης του ρύπου. Ακόμα, έγινε το ίδιο τυφλό πείραμα και για μια ώρα να διαπιστωθεί ξανά το ίδιο αποτέλεσμα ότι δηλαδή στην μια αυτή ώρα που συνήθως διαρκούσαν τα πειράματα δεν θα υπήρχε απώλεια λόγω φυσικής εξάτμισης.

Σε όλη την πειραματική διαδικασία γίνεται λόγος για ppm ως συγκέντρωση η οποία στην ουσία είναι mg/λίτρο.

Στη συνεχεία χωριστήκαν τα πειράματα σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη περιελάμβανε πειράματα συνεχόμενου αερισμού και η δεύτερη πειράματα διακοπτόμενου αερισμού. Από την βιβλιογραφία ήταν γνωστό ότι ο διακοπτόμενος αερισμός έχει καλυτέρα αποτελέσματα γι’αυτό το λόγο αποφασίστηκε να ληφθεί και αυτός προς εξέταση. Όπως προαναφέρθηκε, σκοπός ήταν ένας αποδοτικός έλεγχος γι'αυτό αναζητήθηκε ανάμεσα στις παραμέτρους η βέλτιστη είτε από θέμα συνεχόμενου ή διακοπτόμενου αερισμού, είτε από θέμα παροχής αέρα. Όσον αφορά τον συνεχόμενο αερισμό η αρχή έγινε με παροχή

4L/min ,γιατί αυτή ήταν η ελάχιστη παροχή που μπορούσε να εξασφαλίσει η βάνα αέρα του εργαστηριού. Στο πεδίο όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι παροχές αέρα είναι αρκετής μεγαλύτερης τάξης μεγέθους, αλλά σίγουρα η εφαρμογή τέτοιων παροχών αέρα θα κατέστρεφε την πειραματική στήλη. Έτσι έγινε η προσπάθεια να απαντηθεί το ερώτημα: αν αυξηθεί η παροχή τι γίνεται με τι απομάκρυνση του ρύπου; Αυξάνει αναλογικά; Συμφέρει να αυξηθεί; Όπως είναι ευρέως γνωστό αύξηση παροχής συνεπάγεται και αύξηση απομάκρυνσης ρύπων καθώς όμως και αύξηση κόστους. Έτσι στην προσπάθεια για απάντηση σε αυτά τα ερωτήματα έγινε η αρχή με τον συνεχόμενο αερισμό εξετάζοντας την ελάχιστη παροχή **4L/min** ,μετά την παροχή **6L/min**,έπειτα **10L/min** και τέλος την 14 L/min η οποία αποδείχτηκε αρκετά μεγάλη και επικίνδυνη για το σύστημα με αποτέλεσμα να μην ξαναχρησιμοποιηθεί σε μετέπειτα πειράματα. Έπειτα, προχώρησε η διαδικασία κάνοντας τα αντίστοιχα πειράματα ίδιων παροχών και για διακοπτόμενο αερισμό εξετάζοντας τον, στα χρονικά διαστήματα λειτουργιάς όπου μηδενιζόταν ο ρύπος στον συνεχόμενο αερισμό. Επειδή έγινε δειγματοληψία στον συνεχόμενο αερισμό ανά δέκα λεπτά, τώρα στον διακοπτόμενο τροφοδοτούνταν με αέρα η στήλη 5 λεπτά και αφηνόταν έπειτα σε ηρεμία για 5 λεπτά μέχρι να παρθεί το δείγμα. Έτσι αθροίζοντας τα 5αλεπτα αυτά λειτουργίας συγκρίθηκαν με τον χρόνο μηδενισμού του ρύπου για συνεχόμενο αερισμό και βγήκαν τα συμπεράσματα .

Όσον αφορά στην οικονομική προσέγγιση, αρχικά αναζητήθηκε να βρεθεί αν αυξηθεί η παροχή σε ένα κομπρεσέρ αέρα τότε αυξάνει και το κόστος του ρεύματος αναλογικά; Διαπιστώθηκε όμως ότι, κάθε κομπρεσέρ αέρα παράγει μόνο μια συγκεκριμένη παροχή αέρα και μόνο την πίεση μπορεί κανείς να μεταβάλει. Έτσι έγινε αναζήτηση τριών κομπρεσέρ αέρα 4,6 και 10 L/min παροχών και του λειτουργικού κόστους του καθενός αφού ήταν γνωστό πόση ισχύ καταναλώνει το καθένα και πόση ώρα θα λειτουργούσε μέχρι να μηδενιστεί ο ρύπος. Έτσι εύκολα θα γινόταν η κοστολόγηση της κάθε περίπτωσης μέσω του τύπου:

ΚΟΣΤΟΣ = KWATT · ΚΟΣΤΟΣ Kwh · ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Έπειτα, για να αρχίσει το πείραμα ακλουθούσε η έκχυση του ρύπου στη στήλη αφού πρώτα είχε γεμίσει με νερό. Η έκχυση ήταν συγκεκριμένη ανάλογα την ποσότητα του ρύπου σε ppm που είναι επιθυμητή για το κάθε πείραμα .Έτσι για 10 ppm BTEX τοποθετήθηκαν 56 ml πρότυπου ρύπου συγκέντρωσης 2000 ppm ,ο οποίος μέσα στα 11,2 λίτρα δείγματος είχε την επιθυμητή συγκέντρωση. Αντίστοιχα και για συγκέντρωση αργότερα 5 ppm τοποθετήθηκαν 28 ml πρότυπου ρύπου. Επόμενο βήμα ήταν η μέτρηση της επιθυμητής -κατάλληλης παροχής του αέρα που παρεχόταν στο πείραμα μέσω ενός ροόμετρου και ενδεικτικά η μέτρηση της πίεσης σε αυτήν την παροχή με ένα μανόμετρο. Μόλις είχε ρυθμιστεί η επιθυμητή παροχή αέρα μέσω της βάνας του εργαστηρίου τότε ξεκινούσε το πείραμα. Πάντα λαμβανόταν η αρχική μέτρηση συγκέντρωσης να διαπιστωθεί αν όντως υπήρχε επιθυμητή συγκέντρωση ρύπου στην στήλη. Εν συνεχεία, συνεχιζόταν το πείραμα κανονικά παίρνοντας ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα τα δείγματα .Τέλος, μετά το πέρας του πειράματος γινόταν άδειασμα της στήλης από την κάτω βάνα με τη βοήθεια ενός σωλήνα μέσα σε ένα κουβά ο οποίος στην συνεχεία αδειαζόταν. Η στήλη ξεπλενόταν έπειτα δύο φορές με καθαρό νερό να φύγουν τυχόν ρύποι που θα είχαν μείνει από το πείραμα καθώς επίσης τροφοδοτούνταν με αέρα για αρκετές ώρες ή μέρες μέχρι την διεξαγωγή του επόμενου πειράματος ώστε τυχόν εναπομείναντες ρυπογόνες ουσίες να εξατμίζονταν, ξέροντας ήδη την πολύ πτητική φύση των εκάστοτε πετρελαϊκών υδρογονανθράκων.

4.2.2 Παρασκευή ρύπου.



Εικόνα 22: Φωτογραφία πρότυπων ρύπων BTEX που χρησιμοποιήθηκαν προς την παρασκευή του δικού μας ρύπου.

Η παρασκευή του ρύπου γινόταν σε κωνική φιάλη 500 ml ,ώστε να υπάρχει αρκετό δείγμα (και να μην φτιάχνεται καθημερινά για κάθε νέο πείραμα) και στη συνέχεια διατηρούταν στο ψυγείο μέχρι ένα μηνά.

METHANOL	Density (kg/L)	MB (gr/mol)	Co (moles/L)	Vfinal (L)	Cfinal (ppm)	Cfinal (moles/L)	Vo (ml)
Benzene	0,878	78,11	11,24	0,5	2000	0,025604916	1,1390
Toluene	0,864	92,14	9,38	0,5	2000	0,021706099	1,1574
Ethylbenzene	0,867	106,17	8,17	0,5	2000	0,018837713	1,1534
m-xylene	0,864	106,17	8,14	0,5	2000	0,018837713	1,1574
o-xylene	0,879	106,17	8,28	0,5	2000	0,018837713	1,1377
p-xylene	0,861	106,17	8,11	0,5	2000	0,018837713	1,1614

Πίνακας 7:Υπολογιστικό φύλλο για την παρασκευή του πρότυπου ρύπου .

WATER	Co (mg/L)	MB (gr/mol)	Co (moles/L)	Vfinal (L)	Cfinal (ppm)	Cfinal (moles/L)	Vo (ml)
Benzene	2000	78,11	0,025604916	11,2	10	0,000128025	56,00
Toluene	2000	92,14	0,021706099	11,2	10	0,00010853	56,00
Ethylbenzene	2000	106,17	0,018837713	11,2	10	9,41886E-05	56,00
m-xylene	2000	106,17	0,018837713	11,2	10	9,41886E-05	56,00
o-xylene	2000	106,17	0,018837713	11,2	10	9,41886E-05	56,00
p-xylene	2000	106,17	0,018837713	11,2	10	9,41886E-05	56,00

Πίνακας 7: Υπολογισμός όγκου από το πρότυπο ρύπο που θα χρειαστεί για να υπάρξει η επιθυμητή συγκέντρωση μέσα στην στήλη (10 ppm από κάθε ρύπο).

Για να υπάρχει σε 11,2 λίτρα (νερού και ρύπου) ρύπος συγκέντρωσης 10 ppm τότε χρειάζονται 56 ml από τον παρασκευασμένο ρύπο συγκέντρωσης 2000 mg/L.Έτσι τοποθετούνταν αρχικά 10,64 λίτρα νερου(=11,2-0,56) και συμπληρώνονταν με 56 ml ρύπου.

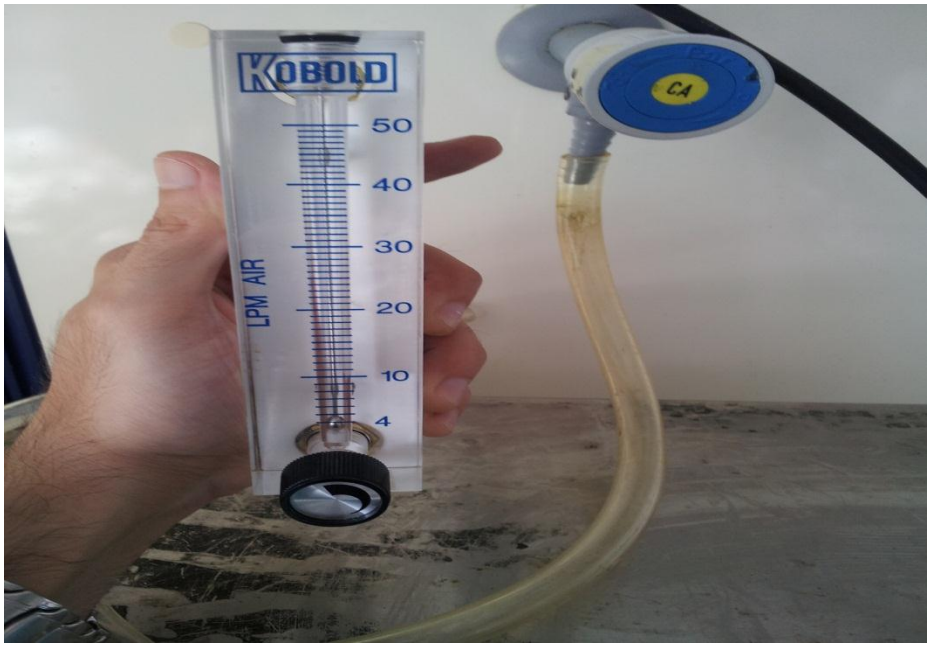
WATER	Co (mg/L)	MB (gr/mol)	Co (moles/L)	Vfinal (L)	Cfinal (ppm)	Cfinal (moles/L)	Vo (ml)
Benzene	2000	78,11	0,025604916	11,2	5	6,40123E-05	28,00
Toluene	2000	92,14	0,021706099	11,2	5	5,42652E-05	28,00
Ethylbenzene	2000	106,17	0,018837713	11,2	5	4,70943E-05	28,00
m-xylene	2000	106,17	0,018837713	11,2	5	4,70943E-05	28,00
o-xylene	2000	106,17	0,018837713	11,2	5	4,70943E-05	28,00
p-xylene	2000	106,17	0,018837713	11,2	5	4,70943E-05	28,00

Πίνακας 8:Υπολογισμος όγκου από το πρότυπο ρύπο που θα χρειαστεί για να υπάρξει η επιθυμητή συγκέντρωση μέσα στην στήλη (5 ppm από κάθε ρύπο).

Για να υπάρχει σε 11,2 λίτρα (νερού και ρύπου) ρύπος συγκέντρωσης 5 ppm τότε χρειάζονται 28 ml από τον παρασκευασμένο ρύπο συγκέντρωσης 2000 mg/L ή 2000 ppm.

4.2.3 Μετρήσεις πίεσης-παροχής με Μανόμετρο και Ροόμετρο.

Η επιθυμητή παροχή αέρα για κάθε πείραμα εφαρμοζόταν με την χρήση ενός ροομέτρου. Σε κάθε επιλεγμένη παροχή αέρα προς εξέταση ,μετριόταν και η αντίστοιχη πίεση της.



Εικόνα 23 : Φωτογραφία ροόμετρου –μετρητή παροχής αέρα της εικονιζόμενης βάνας του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε.

ΠΑΡΟΧΗ (L/min)	ΠΙΕΣΗ (bar)
4	**2**
6	**2**
10	**2**

Πίνακας 9 :Οι παροχές με τις αντίστοιχες πιέσεις που εξετάστηκαν.

Οι μεταβολές στην παροχή είναι αρκετά μικρές οπότε κατά την μέτρηση δεν παρατηρήθηκε διαφορά στην τιμή της πίεσης.



Εικόνα 24 :Φωτογραφία μανόμετρου-μετρητή πίεσης.



Εικόνα 25 : Φωτογραφία μανόμετρου και ροόμετρου που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.

4.2.4 Δειγματοληψία

Η δειγματοληψία ποικίλει χρονικά ανάλογα το είδος του αερισμού που χρησιμοποιούταν (συνεχόμενο ή διακοπτόμενο). Το δείγμα λαμβανόταν από σύριγγα 2 ml και τοποθετούνταν σε μικρό μπουκαλάκι. Στη συνέχεια τα δείγματα έμπαιναν στο ψυγείο όπου μπορούσαν να διατηρηθούν μέχρι 5 μέρες μέχρι να γίνει η ανάλυση τους με τη μέθοδο SPME. Πάντα σε όλα τα πειράματα μετά την έκχυση του ρύπου λαμβανόταν δείγμα C_0 για να εξεταστεί αν συμφωνούσε η συγκέντρωση του ρύπου που τοποθετήθηκε με αυτήν που έπρεπε να υπήρχε (10 ppm και αργότερα 5 ppm) για να γίνονται συγκρινόμενα τα αποτελέσματα. Για τον συνεχόμενο αερισμό τα δείγματα λαμβάνονταν ανά 10 λεπτά λειτουργιάς του αερισμού και έχοντας 2 λεπτά παύσης του αέρα ,αυτό γιατί έτσι αφήνονταν το σύστημα να ηρεμήσει (να φύγουν δηλαδή οι φυσαλίδες μέσα από την στήλη οι οποίες μέσα τους περιείχαν ρύπο και έπρεπε να ανέβουν στην επιφάνεια και μετά να εξατμιστούν) ενώ για τον διακοπτόμενο το δείγμα λαμβανόταν ανά 10 λεπτά έχοντας προηγηθεί 5 λεπτά λειτουργιάς του αερισμού και 5 λεπτά ανάπαυσης. Τέλος, για το πείραμα των 25 ωρών που έγινε χωρίς αερισμό για να ερευνηθεί αν η στήλη είχε απώλειες λόγω φυσικής εξάτμισης ,έγινε λήψη του C_0, μετά δείγματος στις 6 ώρες και ένα δείγμα στις 25 ώρες. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πείραμα χωρίς αερισμό ξαναέγινε τώρα για μια ώρα (0 λεπτά δειγμα,30 λεπτά και μια ώρα), γιατί τα πειράματα μας διαρκούσαν λίγο παραπάνω από μια ώρα έτσι θα γινόταν αντιληπτό στο επιθυμητό συγκεκριμένο διάστημα αν υπήρχαν φυσικές απώλειες λόγω εξάτμισης.

4.3 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Τα δείγματα που συλλέχθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων, αναλύθηκαν σε έναν αέριο χρωματογράφο (GCMS-QP2010 Plus) με ανιχνευτή φασματομετρίας μαζών (MS) και με χρήση μεθόδου μικροεκχύλισης στερεής φάσης – SPME. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Τοξικών και Επικινδύνων Αποβλήτων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

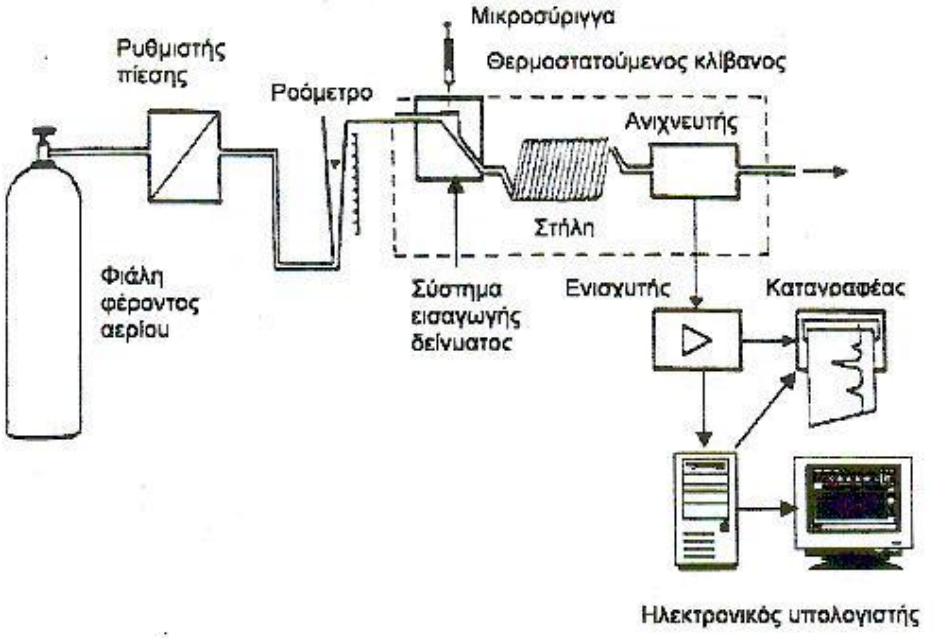


Εικόνα 26 : Αέριος χρωματογράφος (GCMS-QP2010 Plus).

4.3.1 Αρχή Αέριας Χρωματογραφίας

Η χρωματογραφία είναι μια τεχνική διαχωρισμού μειγμάτων. Ο διαχωρισμός στηρίζεται στις διαφορετικές κατανομές των συστατικών ενός μείγματος μεταξύ δυο φάσεων. Η μια φάση παραμένει σταθερή στο σύστημα και λέγεται ακίνητη φάση, ενώ η άλλη λέγεται κινητή φάση και διέρχεται μέσα ή επάνω από την επιφάνεια της σταθερής φάσης. Η κινητή φάση προκαλεί μετατόπιση των συστατικών ενός μείγματος σε διάφορες θέσεις μέσα στην χρωματογραφική στήλη, με αποτέλεσμα το διαχωρισμό τους. Στην αέρια χρωματογραφία η κινητή φάση αποτελείται από ένα χημικά αδρανές αέριο .

Ένας αέριος χρωματογράφος είναι ένα τελείως κλειστό σύστημα (εκτός από την έξοδο του αερίου στο τέλος), με τα βασικά χαρακτηριστικά του να είναι ο θάλαμος εισαγωγής του δείγματος, η χρωματογραφική στήλη και ο ανιχνευτής [26].



Εικόνα 27 :Διάταξη Αέριας Χρωματογραφίας.

Το φρέον αέριο περιέχεται σε χαλύβδινους κυλίνδρους με μεγάλη πίεση και παρέχεται στην συσκευή με έναν ή περισσότερους ρυθμιστές πίεσης, που ρυθμίζουν την ταχύτητα ροής. Το δείγμα εισάγεται σε έναν θερμαινόμενο θάλαμο με μια σύριγγα που τρυπάει μια ειδική βαλβίδα.

Τα φρέον αέριο μεταφέρει τα συστατικά του δείγματος μέσα στη στήλη όπου διαχωρίζονται το ένα μετά το άλλο και διέρχονται από τον ανιχνευτή, που στέλνει ένα σήμα στον καταγραφέα. Η στήλη, το σύστημα εισαγωγής του δείγματος και ο ανιχνευτής βρίσκονται μέσα σε ένα θερμοστατούμενο φούρνο, αν και τα δύο τελευταία μπορούν να θερμανθούν ξεχωριστά.

Σε κανονικές πιέσεις και θερμοκρασίες, τα συνηθισμένα φέροντα αέρια θεωρούνται χημικά αδρανή, για παράδειγμα, το ήλιο, το υδρογόνο και το αργό. Επειδή είναι αδρανή, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων του δείγματος και των μορίων του φέροντος αερίου μπορούν να αγνοηθούν. Η επιλογή του φέροντος αερίου εξαρτάται από την κατάσταση καθαρότητας στην οποία βρίσκεται ή από τις απαιτήσεις του ανιχνευτή, που πρέπει να ανιχνεύεται συστατικά που βρίσκονται στο φέρον αέριο σε πολύ μεγάλη αραίωση. Η καθαρότητα του φέροντος αερίου είναι πολύ σημαντική, αφού και ίχνη ακαθαρσιών μπορούν να προκαλέσουν θόρυβο στο σήμα του ανιχνευτή.

Οι στήλες διαχωρισμού, που αποτελούν την στατική φάση της χρωματογραφίας, μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, τις γεμισμένες και τις τριχοειδείς.

- Οι γεμισμένες στήλες κατασκευάζονται ευκολότερα, είναι φθηνότερες, έχουν μεγάλη χωρητικότητα, μεγάλο χρόνο ζωής και είναι κατάλληλες για τους πιο δύσκολους διαχωρισμούς. Έχουν συνήθως μήκος 1 έως 20 m και διάμετρο 3 έως 10mm. Είναι κατασκευασμένες από γυαλί, μέταλλο (ανοξείδωτο, χαλκό, αλουμίνιο) ή Teflon και γεμισμένες με πληρωτικό υλικό (ζεόλιθο, διατομική γη, silica gel, αλουμίνα, ενεργό ανθρακακτλ.) Τα όργανα που χρησιμοποιούν την κατηγορία αυτή των στηλών ονομάζονται χρωματογράφοι αέριας-στερεάς φάσης (GSC).
- Οι τριχοειδείς στήλες έχουν μήκος 10 έως 50 m και διάμετρο 0,2 έως 1,2mm. Οι στήλες αυτές έχουν καλυμμένη την εσωτερική τους επιφάνεια με στοιβάδα υγρού που έχει διαλυτικές ή πολικές ιδιότητες και ως εκ τούτου τα όργανα που χρησιμοποιούν την κατηγορία αυτή των στηλών ονομάζονται χρωματογράφοι αέριας-υγρής φάσης (GLC).

Όλοι οι διαχωρισμοί που γίνονται μέσα στη στήλη πρέπει οπωσδήποτε να ανιχνευθούν και να καταγραφούν. Όλα τα συστατικά του δείγματος έχουν μικρή συγκέντρωση στο φέρον αέριο. Ακόμα, οι ουσίες που δίνουν οξείες κορυφές έκλουσης διέρχονται από τον ανιχνευτή σε χρόνο λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο, ενώ άλλες κορυφές έκλουσης εμφανίζονται μετά από ώρες και είναι τόσο μικρές, ώστε μόλις διακρίνονται πάνω από τη γραμμή βάση. Οπωσδήποτε, ο ανιχνευτής πρέπει να αγνοεί το μεγάλο ποσό του φέροντος αερίου και να ανιχνεύει και τα μικρά ίχνη κάθε συστατικού που περιέχεται στο φέρον αέριο[26].

Η επιλογή του ανιχνευτή πρέπει να είναι πολύ προσεκτική και να βασίζεται σε κριτήρια όπως

- η ειδική εφαρμογή του στο συγκεκριμένο πρόβλημα
- η ευελιξία του
- η ακρίβεια του
- η εύκολη επισκευή του
- το κόστος του.

Οι σπουδαιότεροι από τους ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι οι διαφορικοί ανιχνευτές, που μετρούν στιγμιαίες συγκεντρώσεις ή στιγμιαίες ταχύτητες εμφάνισης των συστατικών και οι ολοκληρωμένοι ανιχνευτές, που αθροίζουν τα στιγμιαία σήματα και δίνουν το ολικό ποσό που έχει μετρηθεί μέχρι μια ορισμένη στιγμή. Τα σήματα των διαφορικών ανιχνευτών ολοκληρώνονται στην ποσοτική ανάλυση, ενώ τα σήματα των ολοκληρωμένων ανιχνευτών διαφορίζονται για να διευκολύνουν την ποιοτική ανάλυση (κάθε σήμα μπορεί να παραχθεί από το άλλο).

Από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους ανιχνευτές είναι:

- Ανιχνευτής Θερμικής Αγωγιμότητας (TCD)
- Ανιχνευτής Ιονισμού Φλόγας (FID)
- Ανιχνευτής Δέσμευσης Ηλεκτρονίων (ECD)
- Ανιχνευτής Φωτοϊονισμού (PID)
- Ανιχνευτής Φασματομετρίας Μαζών (MS) που είναι ο πλέον δημοφιλής όσον αφορά την ανίχνευση και τον προσδιορισμό οργανικών ουσιών.

Η φασματομετρία μαζών βασίζεται στην παραγωγή δέσμης ιοντικών θραυσμάτων με βομβαρδισμό των εξεταζόμενων μορίων συνήθως με ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας. Τα παραγόμενα θραύσματα στη συνέχεια διαχωρίζονται με εφαρμογή ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου ή με συνδυασμό και των δύο. Ο διαχωρισμός βασίζεται στον διαφορετικό λόγο μάζας-προς-φορτίο (m/z) κάθε ιοντικού θραύσματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα θραύσματα είναι μονοφορτισμένα (z=1) και για τον λόγο αυτό ο όρος "λόγος μάζα-προς-φορτίο"αντικαθίσταται από τον πλέον εύχρηστο όρο μάζα.

4.3.2 Μικροέκχυλιση Στερεής Φάσης (SPME)

Η SPME είναι μια μέθοδος που δημιουργήθηκε για την προετοιμασία του δείγματος στην ανάλυση πτητικών και ημι-πτητικών, πολικών και μη πολικών ενώσεων σε διάφορες μήτρες. Οι παραδοσιακές μέθοδοι προετοιμασίας δειγμάτων χρειάζονται χρόνο και εργατικό δυναμικό, αποτελούνται από διεργασίες πολλαπλών σταδίων και χρησιμοποιούν τοξικούς διαλύτες (Soxhlet extraction και Liquid-Liquid extraction, LLE)[26].

Η τεχνική SPME αποτελείται από δύο στάδια: στο πρώτο στάδιο γίνεται διαχωρισμός των προς ανάλυση συστατικών μεταξύ του επικαλυπτικού στρώματος και τη μήτρα του δείγματος. Μια ίνα, η οποία περιέχεται σε βελόνα μιας σύριγγας βυθίζεται είτε στη μήτρα του δείγματος είτε εκτίθεται στο κενό πάνω από το υδατικό δείγμα. Τα διαλυμένα συστατικά χωρίζονται ανάμεσα στο δείγμα και την ίνα. Αφού επέλθει ισορροπία η ίνα αποσύρεται μέσα στη βελόνα για αποθήκευση των συστατικών πριν την ανάλυση. Κατά το δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται η εκρόφηση του συγκεντρωμένου εκχυλίσματος στο ακολουθούμενο αναλυτικό όργανο GC. Στον αέριο χρωματογράφο (GC) η ίνα ενώ βρίσκεται μέσα στη βελόνα, εισάγεται απευθείας στον εισαγωγέα του χρωματογράφου και εξέρχεται από αυτήν όταν η βελόνα τρυπήσει το septum του εισαγωγέα.

Υπάρχουν τρείς τρόποι εφαρμογής της SPME:

- η απευθείας εκχύλιση, όπου η βελόνα βυθίζεται απευθείας στο δείγμα και τα συστατικά μεταφέρονται από τη μήτρα απευθείας στο επικαλυπτικό στρώμα της ίνας
- η εκχύλιση υπερκείμενου χώρου, όπου τα συστατικά μεταφέρονται στην ίνα μέσω του κενού χώρου που βρίσκεται πάνω από το δείγμα. Το κενό αυτό προστατεύει την ίνα από φθορά
- Ο τρίτος τρόπος εφαρμογής της SPME είναι η παρουσία της ίνας με μεμβράνη, η οποία χρησιμοποιείται για πολύ βρώμικα δείγματα προκειμένου να προστατευτεί η ίνα από φθορά.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία έχει ως εξής:

❖ Προετοιμασία δείγματος για ανάλυση BTEX
- Ζύγιση 3gr χλωριούχου νατρίου (NaCl).
- Μεταφορά αυτών σε δοχείο 22ml.
- Ξέπλυμα κωνικής φιάλης 10ml με υπερκάθαρο νερό.
- Πλήρωση κωνικής φιάλης 10ml με υπερκάθαρο νερό λίγο πιο κάτω από την χαραγή.
- Προσθήκη 10μL δείγματος – (αραίωση 1:1000).
- Προσθήκη 1μL εσωτερικού προτύπου (Toluene-d8 – 10ppm) – Ανάδευση .
- Συμπλήρωση κωνικής φιάλης με υπερκάθαρο νερό έως την χαραγή – Ανάδευση.
- Μεταφορά περιεχομένου κωνικής φιάλης στο δοχείο των 22ml.

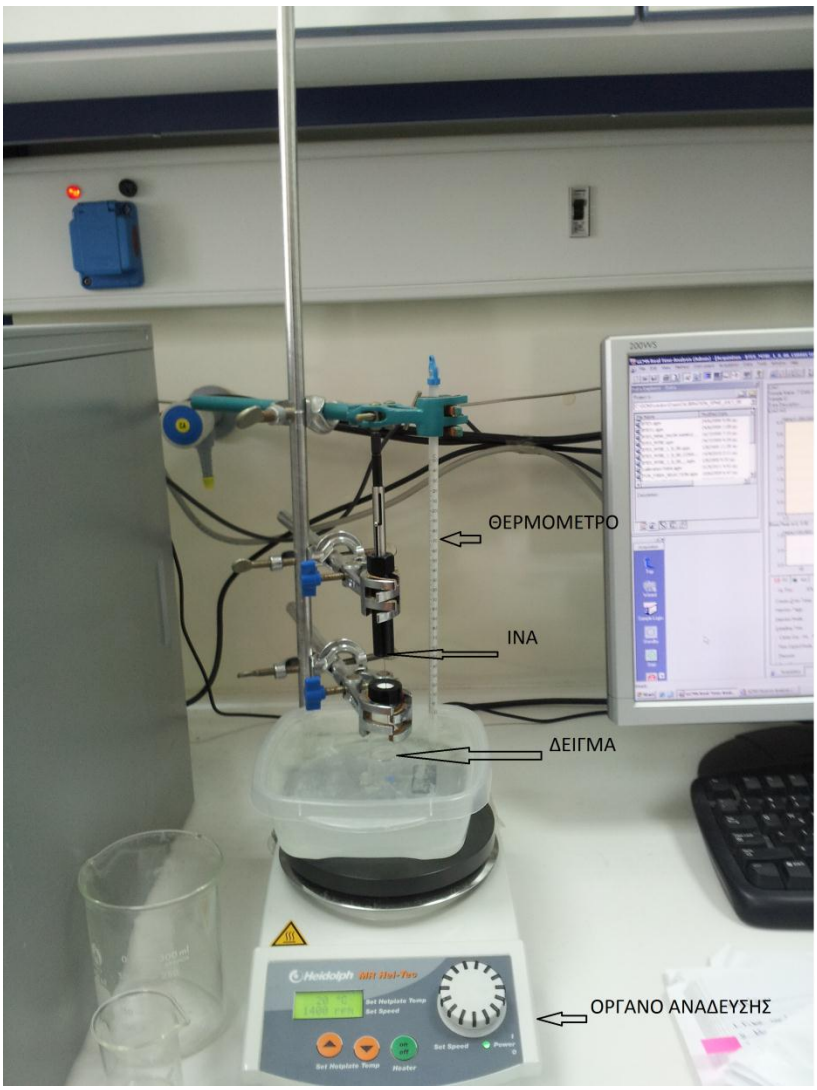
Στην παρακάτω Εικόνα 28 φαίνονται όλα τα απαραίτητα για τις χημικές αναλύσεις των δειγμάτων μας.



Εικόνα 28: Εξοπλισμός πειράματος

❖ Ανάλυση δείγματος νερού για BTEX

- Έλεγχος θερμοκρασίας νερού (~20oC)
- Επιλογή μέγιστων στροφών ανάδευσης (1400).
- Τοποθέτηση δοχείου δείγματος (22ml) στον μαγνητικό αναδευτήρα για 1min, προκειμένου να διαλυθεί το χλωριούχο νάτριο.
- Εισαγωγή ίνας στο δοχείο (22ml) για 19 min.
- Εισαγωγή ίνας στο GC. Παραμονή για 2 min.
- Η λήψη και η επεξεργασία των χρωματογραφημάτων έγιναν με την βοήθεια υπολογιστή που ήταν συνδεδεμένος με τον ανιχνευτή φασματομετρίας μαζών (MS)και με την χρήση του ειδικού λογισμικού.



Εικόνα 29 :Φωτογραφία του δείγματος και της ίνας μέσα σε αυτό.

Οι συνθήκες ανάλυσης του αέριου χρωματογράφο (GC-MS) ήταν οι εξής:

- Θερμοκρασία εισαγωγέα: 250^{o}C
- Θερμοκρασία πηγής ιόντων: 200^{o}C
- Θερμοκρασία interface: 280^{o}C
- Αρχική θερμοκρασία: 40^{o}C (1 min)
- Ρυθμός ανόδου: 5^{o}C/min έως 60^{o}C (0,5 min)
- Ρυθμός ανόδου: 30^{o}C/min έως 270^{o}C (2 min)
- Τελική θερμοκρασία: 270^{o}C
- Χρόνος παραμονής ίνα στον εισαγωγέα: 2 min
- Αρχικά splitless και split στα 5 min (1/50)



Εικόνα 30 : Φωτογραφία προγράμματος ανάλυσης και επεξεργασίας δείγματος - POSTRUM ANALYSIS.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

- Οι αρχικές συγκεντρώσεις στα πειράματα ήταν 10 ppm κάθε πετρελαϊκού συστατικού δηλαδή 60 ppm BTEX συνολικά.

- Τα m-, p -XYLENE μετρήθηκαν μαζί γι'αυτό και η αρχική τους συγκέντρωση σε κάθε πείραμα είναι περίπου στα 20 ppm.

- Όλες οι συγκεντρώσεις αναφέρονται σε ppm.Όπου ppm ισούται με mg/L.

- Όπου C οι εκάστοτε συγκεντρώσεις του ρύπου στην συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

- ''Πετυχημένη'' τυπική τιμή αναφοράς μηδενισμού του κάθε συστατικού <0,5 ppm (προς βοήθειας των μετέπειτα συγκρίσεων και εξοικονόμησης χρόνου πειράματος).

- Το πείραμα παροχής 14 λίτρα/λεπτό παρουσιάζεται μόνο στον συνεχόμενο αερισμό και όχι μετέπειτα σε συγκρίσεις γιατί δεν μελετήθηκε περαιτέρω λόγω ενδεχόμενου ατυχήματος στην στήλη.

- Μετά το πέρας των πειραμάτων με αρχική συγκέντρωση BTEX 60 ppm, παρουσιάζονται δυο πειράματα αρχικής συγκέντρωσης 30 ppm.

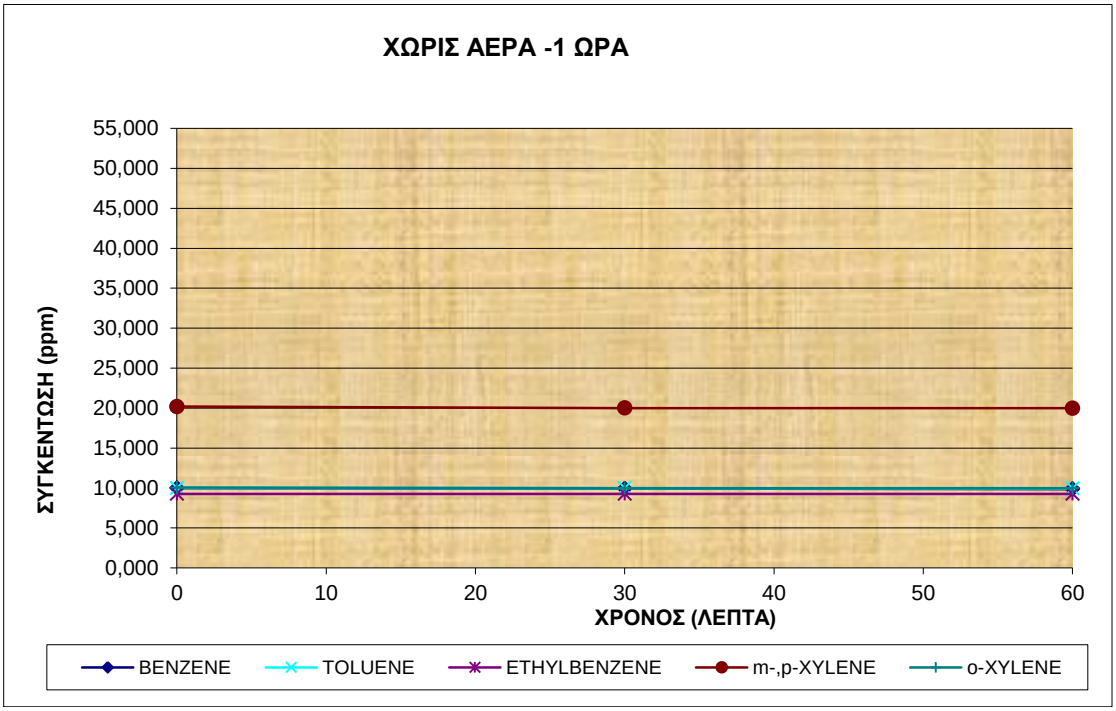
ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ 10 ppm ΚΑΘΕ ΣΥΣΤΑΤΙΚΟΥ ΤΩΝ BTEX.

1^{0} ΠΕΙΡΑΜΑ: ΠΕΙΡΑΜΑ ΕΥΡΕΣΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΛΟΓΩ ΚΑΚΟΤΕΧΝΙΑΣ ΣΤΗΛΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΜΙΑΣ ΩΡΑΣ (**60 ΛΕΠΤΩΝ**) **ΧΩΡΙΣ ΠΑΡΟΧΗ ΑΕΡΑ**.

Επειδή τα πειράματα στην πορεία διαρκούν γύρω στη μια ώρα, εξετάστηκε αν σε αυτό το χρονικό διάστημα υπάρχουν απώλειες λόγω εξάτμισης που οφείλονται στην στήλη και όχι στην λειτουργιά του αερισμού.

Λεπτά	0 min	30 min	60 min
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_o :αρχικη συγκεντρωση	C_{30} : συγκεντρωση στα 30'	C_{60}: συγκεντρωση στα 60'
BENZENE	9,986	9,926	9,872
TOLUENE	10,017	9,990	9,942
ETHYLBENZENE	9,276	9,275	9,267
m-,p-XYLENE	20,188	20,007	19,981
o-XYLENE	10,055	10,001	9,989

Πίνακας 10:Συγκέντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.



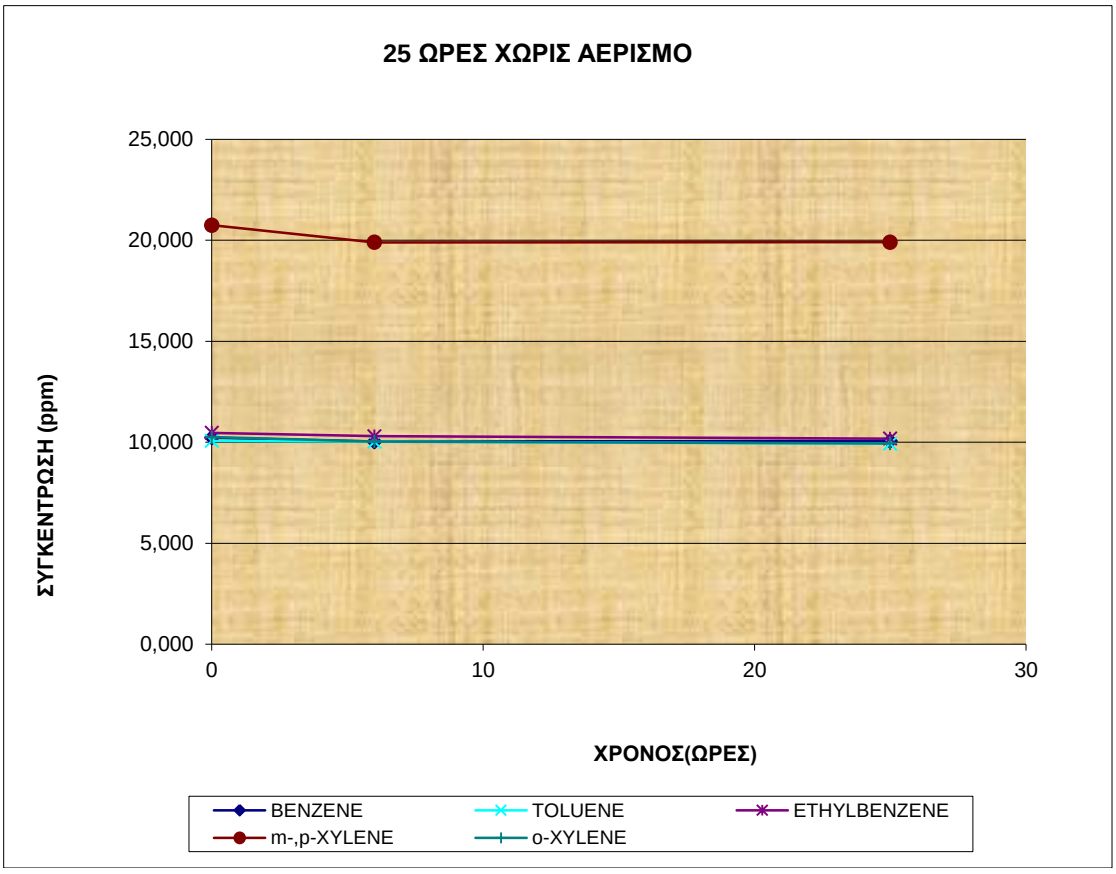
Σχήμα 4: Γραφική απεικόνιση συγκέντρωσης BTEX με το χρόνο.

2^0 ΠΕΙΡΑΜΑ: ΠΕΙΡΑΜΑ ΕΥΡΕΣΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΛΟΓΩ ΦΥΣΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΡΚΕΙΑ **25 ΩΡΩΝ ΧΩΡΙΣ ΠΑΡΟΧΗ ΑΕΡΑ**.

Το πρώτο έγινε για μια ώρα. Τώρα συνεχίστηκε η εξέταση-απορία-επαλήθευση αν υπάρχει εξάτμιση περεταίρω της μιας ώρας χωρίς παροχή αέρα (αν και 1-2 ώρες ήταν άξιο μελέτης αφού τόσο διαρκούσαν τα πειράματα).

Λεπτά	0 hours	6 hours	25 hours
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	Co	C_6	C_{25}
BENZENE	10,229	10,033	10,064
TOLUENE	10,072	10,028	9,925
ETHYLBENZENE	10,468	8,808	10,184
m-,p-XYLENE	20,746	19,895	19,901
o-XYLENE	10,248	10,038	9,945

Πίνακας 11:Συγκέντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.



Σχήμα 5: Γραφική απεικόνιση συγκέντρωσης BTEX με το χρόνο.

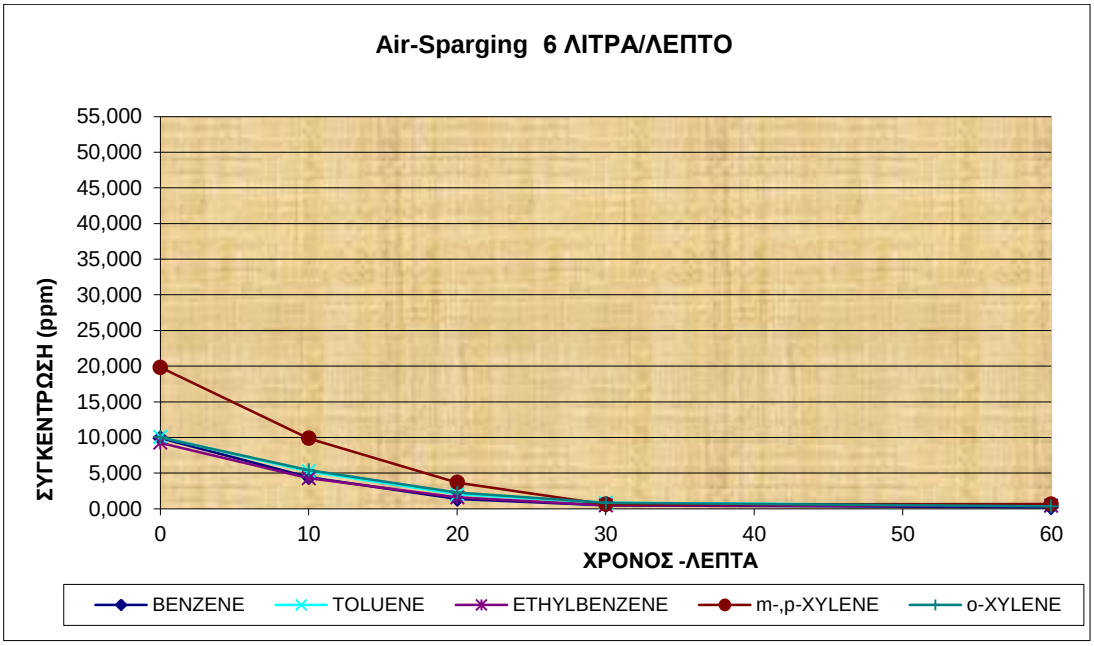
ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΙ ΑΕΡΙΣΜΟΙ

3^0 ΠΕΙΡΑΜΑ :ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ **10 PPM** , **ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΥ** ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ **6L/MIN** ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ **2 BAR**.

Η μέτρηση σταματούσε όταν ο εκάστοτε ρύπος έφτανε γύρω στα 0,5 ppm .Για την συγκεκριμένη παροχή έγινε λήψη από αρκετά δείγματα διαφόρων χρονικών στιγμών και διαπιστώθηκε στα 30 λεπτά ότι έπεφτε η συγκέντρωση κοντά στην αναφερόμενη τιμή. Έτσι, τα επόμενα πειράματα έγιναν με βάση αυτό το σκεπτικό δηλαδή έχοντας πάρει την μέση παροχή τώρα 6 λ/λεπτό και βλέποντας ότι η επιθυμητή σχεδόν μηδενική τιμή είναι ανάμεσα σε 30 λεπτά και 60 ,τότε αν γινόταν χρήση από μεγαλύτερη παροχή θα αναμενόταν ο χρόνος αυτός να μειωνόταν και αντίστοιχα για μικρότερη παροχή ο χρόνος να αυξανόταν συμφώνα πάντα με την θεωρία ότι αύξηση παροχής σε λογικά πλαίσια συνεπάγεται και αύξηση του ρυθμού εξάτμισης (και βιοαποικοδόμησης γιατί οι πάρα πολύ μεγάλες παροχές δεν έχουν τα αναμενόμενα καλά αποτελέσματα, στην εργασία αυτή ασχολία είναι ο όρος εξάτμιση και μόνο, δηλαδή δεν εξετάζεται η βιοαποικοδόμηση).

Λεπτά-χρόνος	0	10	20	30	60
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_0	C_{10}	C_{20}	C_{30}	C_{60}
BENZENE	9,884	4,422	1,369	0,491	0,191
TOLUENE	10,043	5,245	2,037	0,814	0,449
ETHYLBENZENE	9,234	4,269	1,590	0,473	0,387
m-,p-XYLENE	19,812	9,879	3,667	0,616	0,651
o-XYLENE	10,009	5,406	2,255	0,814	0,320

Πίνακας 12:Συγκεντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.



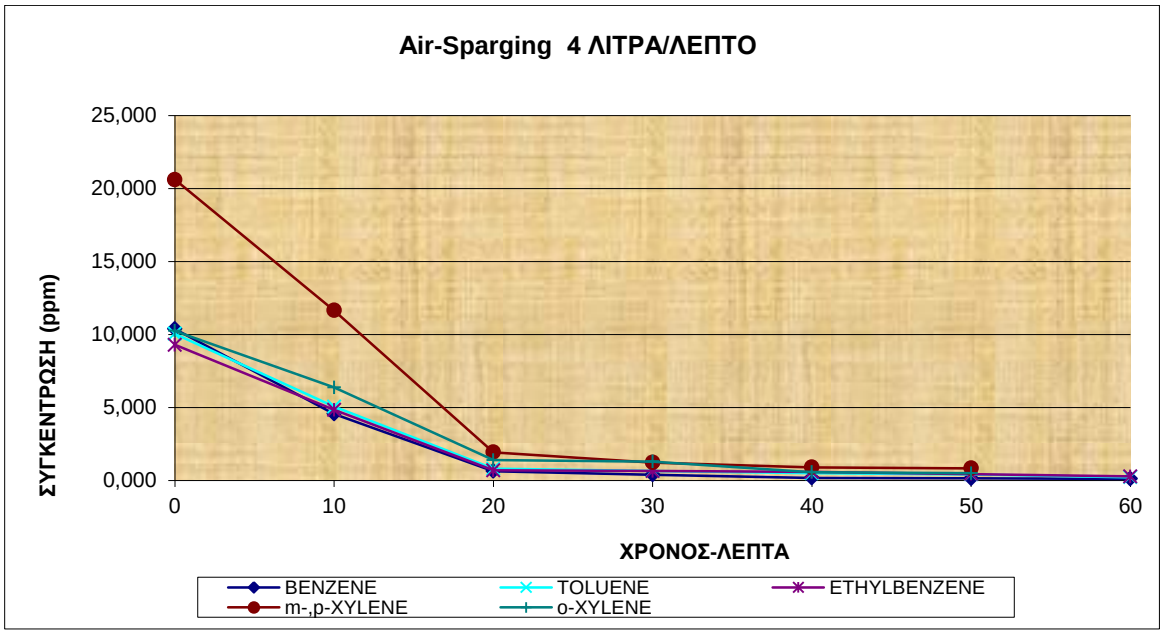
Σχήμα 6: Γραφική απεικόνιση συγκέντρωσης BTEX με το χρόνο.

4^{0}ΠΕΙΡΑΜΑ :ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ **10 PPM** , **ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΥ** ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ **4 L/MIN** ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ **2 BAR**.

Εδώ όπως αναφέρθηκε παραπάνω έγινε λήψη από δείγματα πάλι για 60 λεπτά και αναμενόταν ο μηδενισμός των ρύπων (<0,5 ppm για το κάθε συστατικό) πάνω από τα 40 λεπτά, έτσι έγινε και μέτρηση στα 40 και στα 50 λεπτά να ανιχνευτεί η χρονική στιγμή μηδενισμού (<0,5 ppm για το κάθε συστατικό).

ΧΡΟΝΟΣ-ΛΕΠΤΑ	0	10	20	30	40	50	60
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_0	C_{10}	C_{20}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}
BENZENE	10,377	4,572	0,651	0,409	0,193	0,153	0,127
TOLUENE	10,051	5,069	0,812	0,671	0,504	0,433	0,229
ETHYLBENZENE	9,294	4,851	0,704	0,658	0,599	0,450	0,292
m-,p-XYLENE	20,601	11,647	1,942	1,240	0,916	0,844	0,456
o-XYLENE	10,252	6,378	1,404	1,309	0,679	0,507	0,322

Πίνακας 13:Συγκεντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.



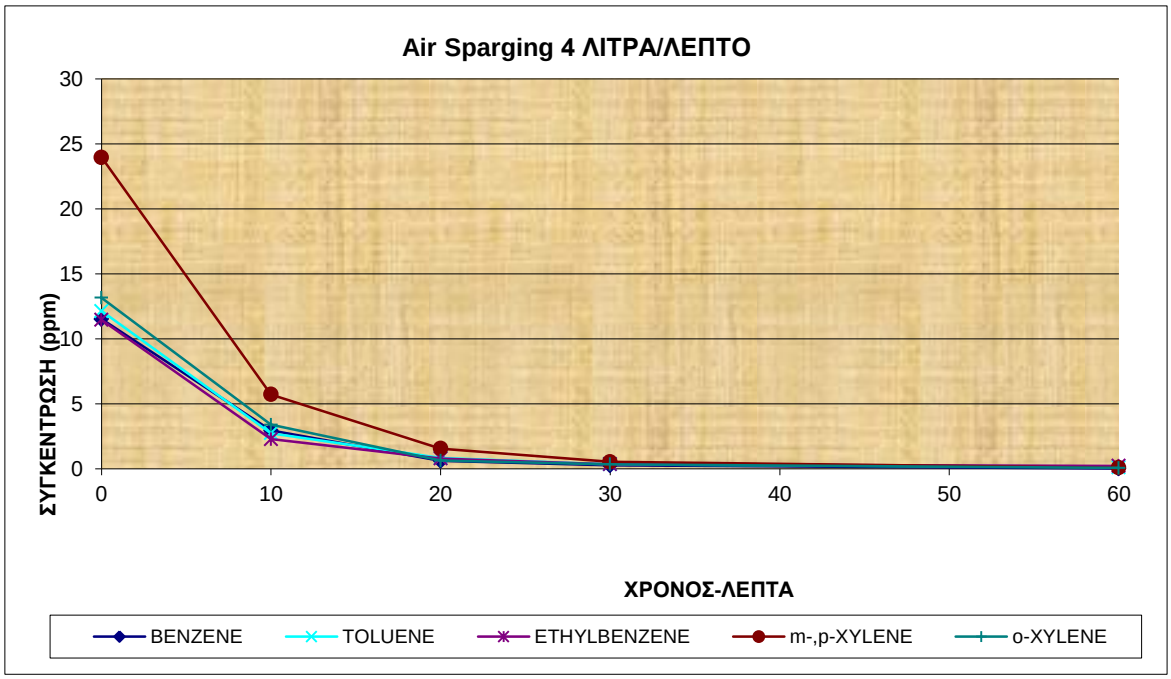
Σχήμα 7: Γραφική απεικόνιση συγκέντρωσης BTEX με το χρόνο.

5^{0}ΠΕΙΡΑΜΑ : ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ **10 PPM** , **ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΥ** ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ **10 L/MIN** ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ **2 BAR**.

Αναμενόμενος χρόνος μηδενισμού (<0,5 ppm για το κάθε συστατικό), μικρότερη των 30 λεπτών γι'αυτό και τα επιλεγμένα χρονικά εύρη.

ΧΡΟΝΟΣ-ΛΕΠΤΑ	0'	10'	20'	30'	60'
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ-	C_0	C_{10}	C_{20}	C_{30}	C_{60}
BENZENE	11,524	2,955	0,617	0,266	0,025
TOLUENE	12,147	2,739	0,831	0,353	0,120
ETHYLBENZENE	11,466	2,289	0,795	0,357	0,234
m-,p-XYLENE	23,961	5,727	1,561	0,544	0,084
o-XYLENE	13,161	3,392	0,643	0,351	0,078

Πίνακας 14:Συγκέντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.



Σχήμα 8: Γραφική απεικόνιση συγκέντρωσης BTEX με το χρόνο.

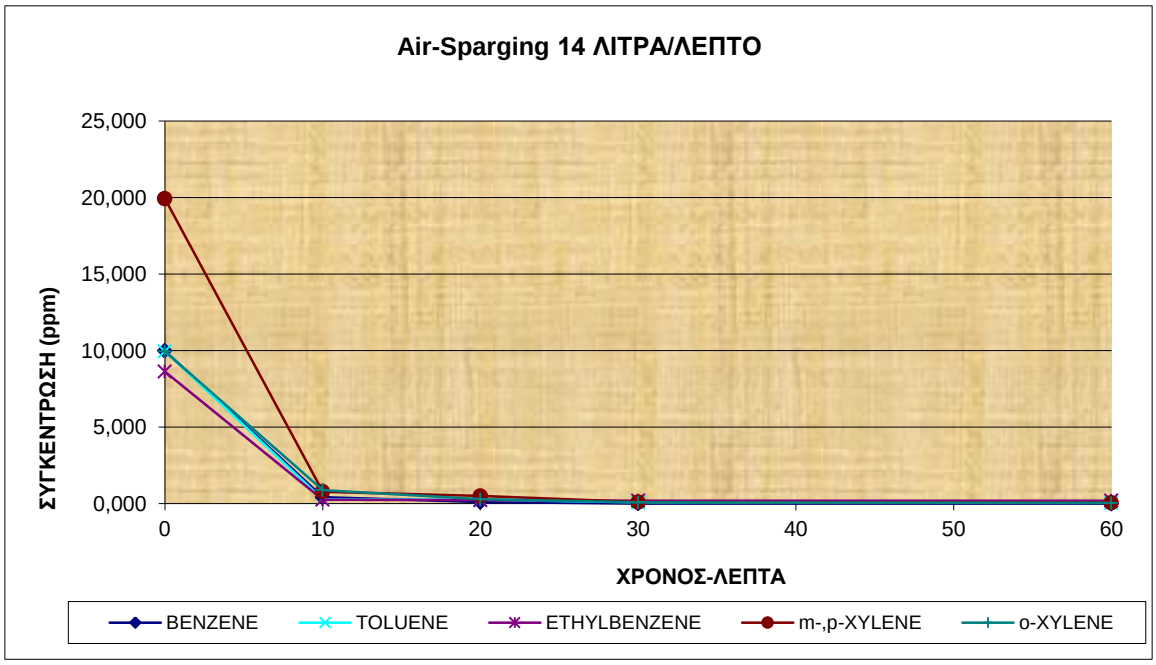
6^{0}ΠΕΙΡΑΜΑ : ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ **10 PPM** , **ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΥ** ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ **14 L/MIN** ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ **2 BAR**.

Το συγκεκριμένο πείραμα αποτέλεσε το πείραμα αντοχής της παροχής αέρα για την στήλη αφού ήταν η μέγιστη που μπορούσε να δεχτεί το σύστημα χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος. Εν συνεχεία όμως δεν διερευνήθηκε περαιτέρω η συγκεκριμένη παροχή και για διακοπτόμενο αερισμό και για μικρότερης συγκέντρωσης ρύπο γιατί υπήρχε πάντα ο κίνδυνος ατυχήματος. Ακόμα τρεις ήδη χαμηλές παροχές που διαθέτονταν ήταν αρκετές ερευνητικά να βγουν συμπεράσματα για την τάση απόδοσης και οικονομικής εξοικονόμησης .

Αναμενόμενος χρόνος μηδενισμού (<0,5 ppm για το κάθε συστατικό) μικρότερος των 20 λεπτών.

ΛΕΠΤΑ’	0’	10’	20’	30’	60’
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_0	C_{10}	C_{20}	C_{30}	C_{60}
BENZENE	9,988	0,425	0,106	0,020	0,001
TOLUENE	9,961	0,290	0,251	0,090	0,073
ETHYLBENZENE	8,633	0,263	0,231	0,203	0,201
m-,p-XYLENE	19,928	0,790	0,508	0,115	0,066
o-XYLENE	9,947	0,896	0,294	0,090	0,046

Πίνακας 15:Συγκέντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.



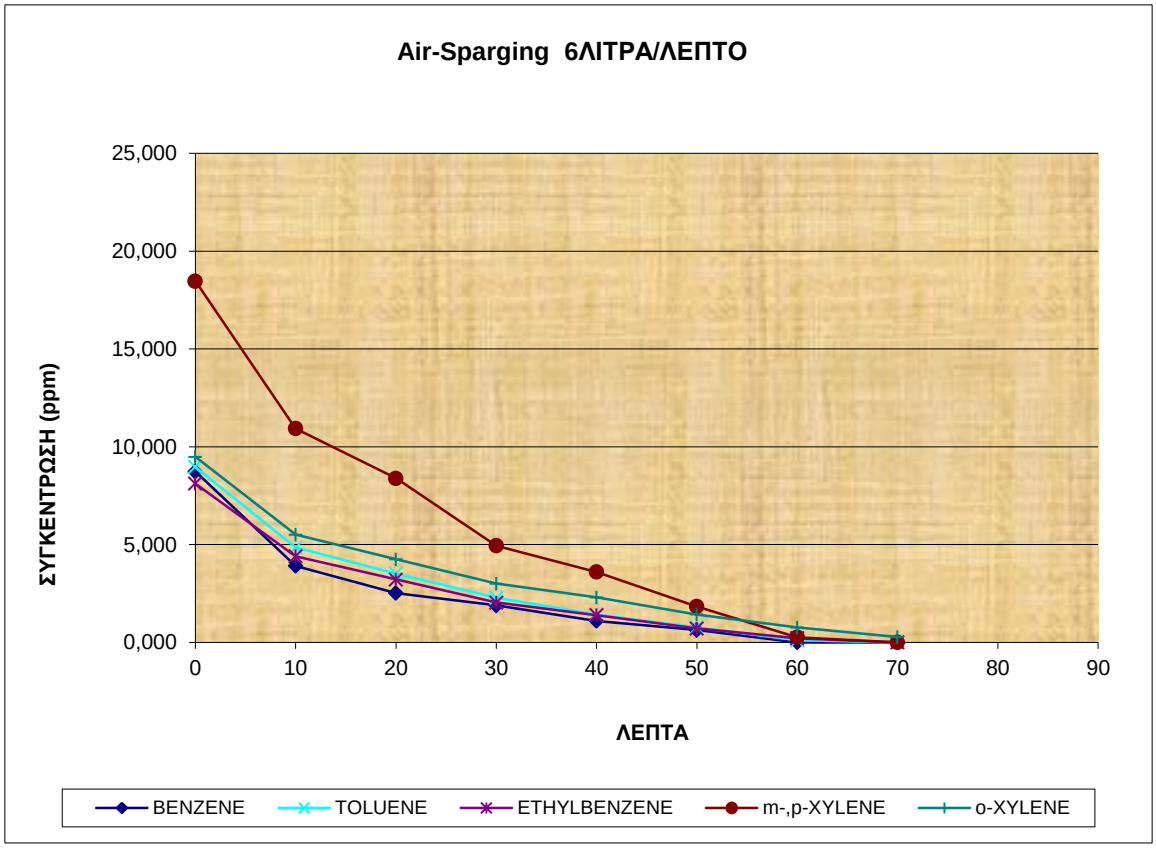
Σχήμα 9: Γραφική απεικόνιση συγκέντρωσης BTEX με το χρόνο.

Σειρά πειραμάτων- για τις αντίστοιχες παροχές που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω -με διακοπτόμενο αερισμό.

7^{0}ΠΕΙΡΑΜΑ : ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ **10 PPM** , **ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΥ** ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ **6 L/MIN** ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ **2 BAR**.

Ο διακοπτόμενος αερισμός έγινε ανά πεντάλεπτα παροχής αέρα και πέντε λεπτά χωρίς αερισμό.

Επειδή στόχος είναι η σύγκριση του διακοπτόμενου με τον συνεχή αερισμό επιλεχτήκαν χρονικά εύρη λειτουργίας για τον διακοπτόμενο ,καθοδηγούμενα από τον συνεχή. Δηλαδή στον συνεχή για την συγκεκριμένη παροχή αναμένεται μηδενισμος(<0,5 ppm για το κάθε συστατικό) στα 30'με 35' λεπτά έτσι αν ο διακοπτόμενος έχει ενδιαφέρον για το αν έχει καλύτερο αποτέλεσμα σε αυτό το χρονικό λειτουργικό διάστημα .



Σχήμα 10: Γραφική απεικόνιση συγκέντρωσης BTEX με το χρόνο.

ΛΕΠΤΑ (λειτουργικά λεπτά)	0’	10’(5’)	20’(10’)	30’(15’)
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_0	C_{10}	C_{20}	C_{30}
BENZENE	8,733	3,906	2,518	1,888
TOLUENE	8,967	4,851	3,517	2,282
ETHYLBENZENE	8,115	4,403	3,216	2,032
m-,p-XYLENE	18,474	10,933	8,390	4,938
o-XYLENE	9,486	5,502	4,245	3,003

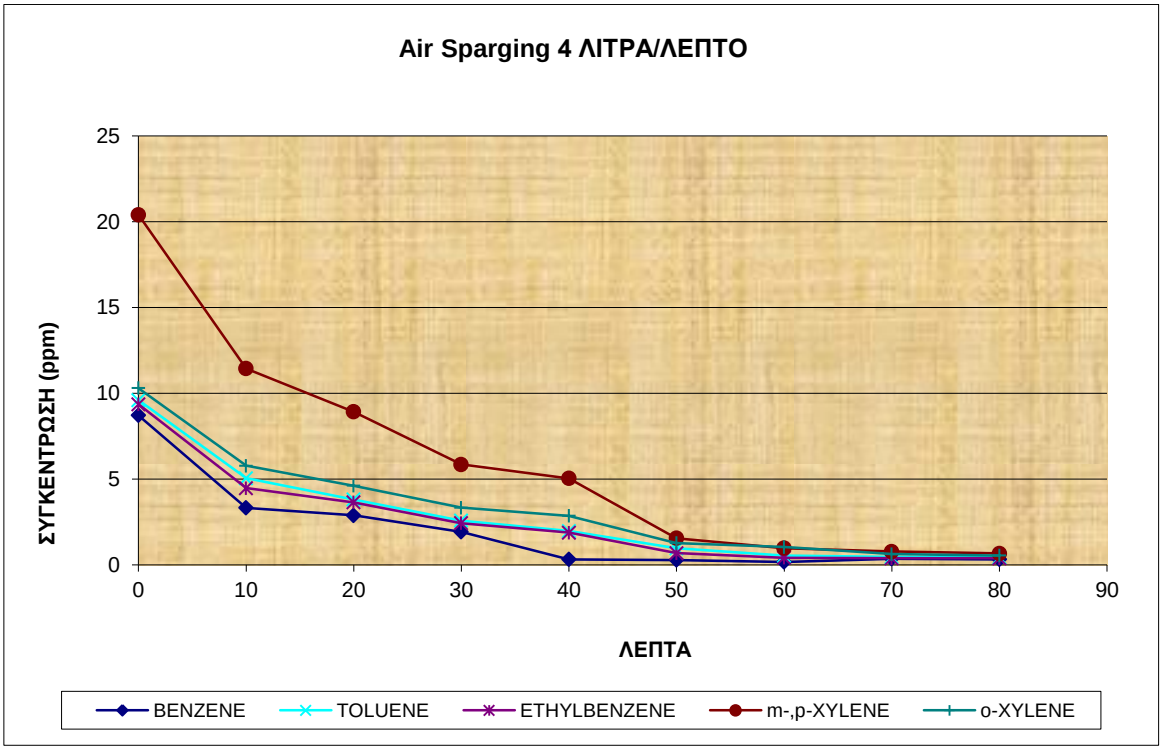
Πίνακας 16:Συγκεντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

ΛΕΠΤΑ (λειτουργικά λεπτά)	40’(20’)	50’(25’)	60’(30’)	70’(35’)
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_{40}	C_{50}	C_{60}	C_{70}
BENZENE	1,097	0,625	0,000	0,000
TOLUENE	1,411	0,765	0,113	0,000
ETHYLBENZENE	1,390	0,713	0,213	0,000
m-,p-XYLENE	3,602	1,833	0,262	0,000
o-XYLENE	2,301	1,425	0,755	0,269

Πίνακας 16 (συνέχεια): Συγκέντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

8^{0}ΠΕΙΡΑΜΑ : ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ **10 PPM** , **ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΥ** ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ **4 L/MIN** ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ **2 BAR**.

Στο συνεχόμενο αερισμό χρειάστηκε 40 λεπτά λειτουργιάς να μηδενιστει(<0,5 ppm για το κάθε συστατικό) το κάθε συστατικό έτσι και εδώ επιλέχτηκε χρονικό όριο λειτουργιάς τα 40 λεπτά προς σύγκριση.



Σχήμα 11: Γραφική απεικόνιση συγκέντρωσης BTEX με το χρόνο.

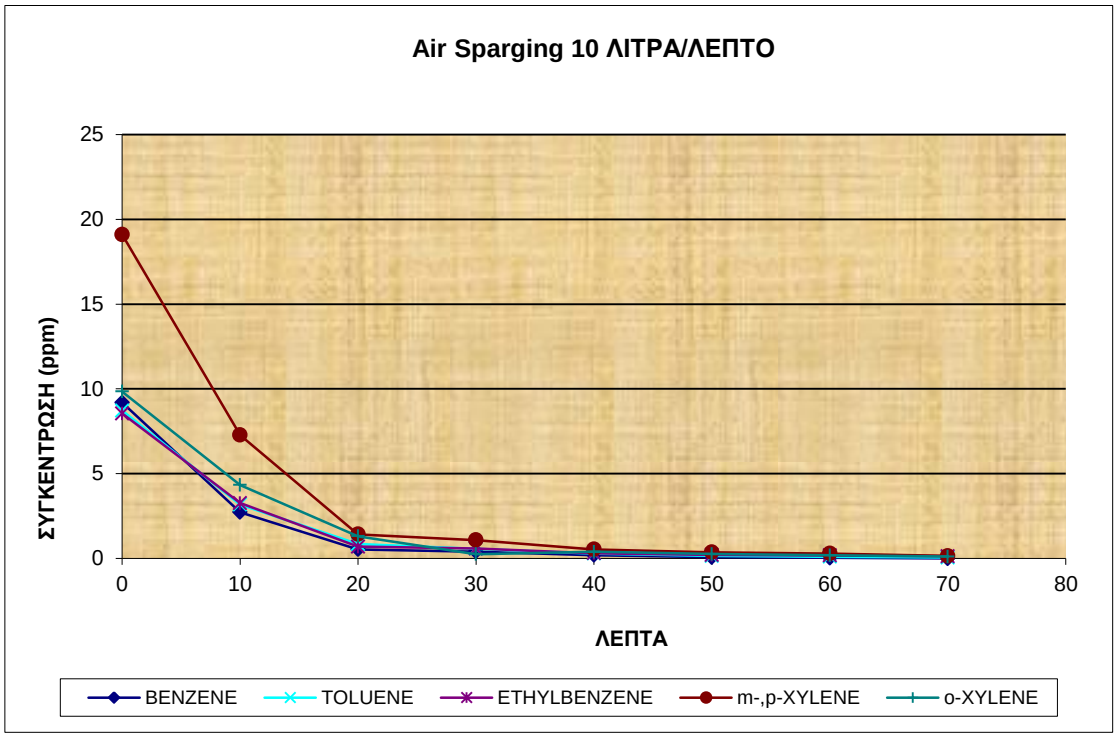
ΛΕΠΤΑ (λειτουργικά λεπτά)	0’	10’(5’)	20’(10’)	30’(15’)	40’(20’)
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_0	C_{10}	C_{20}	C_{30}	C_{40}
BENZENE	8,723	3,337	2,895	1,929	0,328
TOLUENE	9,605	5,058	3,819	2,583	1,978
ETHYLBENZENE	9,363	4,477	3,649	2,437	1,889
m-,p-XYLENE	20,407	11,447	8,931	5,857	5,050
o-XYLENE	10,312	5,786	4,620	3,340	2,867

Πίνακας 17: Συγκέντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

ΛΕΠΤΑ (λειτουργικά λεπτά)	50'(25')	60'(30')	70'(35')	80'(40')
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_{50}	C_{60}	C_{70}	C_{80}
BENZENE	0,293	0,181	0,127	0,116
TOLUENE	0,969	0,546	0,474	0,456
ETHYLBENZENE	0,696	0,428	0,393	0,391
m-,p-XYLENE	1,557	0,987	0,786	0,674
o-XYLENE	1,282	1,050	0,639	0,558

Πίνακας 17 (συνέχεια): Συγκέντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

9^{0}ΠΕΙΡΑΜΑ : ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ **10 PPM** , **ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΥ** ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ **10 L/MIN** ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ **2 BAR**.



Σχήμα 12: Γραφική απεικόνιση συγκέντρωσης BTEX με το χρόνο.

ΛΕΠΤΑ (λειτουργικά λεπτά)	0’	10’(5’)	20’(10’)	30’(15’)
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_0	C_{10}	C_{20}	C_{30}
BENZENE	9,196	2,728	0,540	0,406
TOLUENE	8,723	3,182	0,853	0,573
ETHYLBENZENE	8,550	3,264	0,694	0,586
m-,p-XYLENE	19,106	7,276	1,422	1,083
o-XYLENE	9,840	4,328	1,314	0,553

Πίνακας 18: Συγκέντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

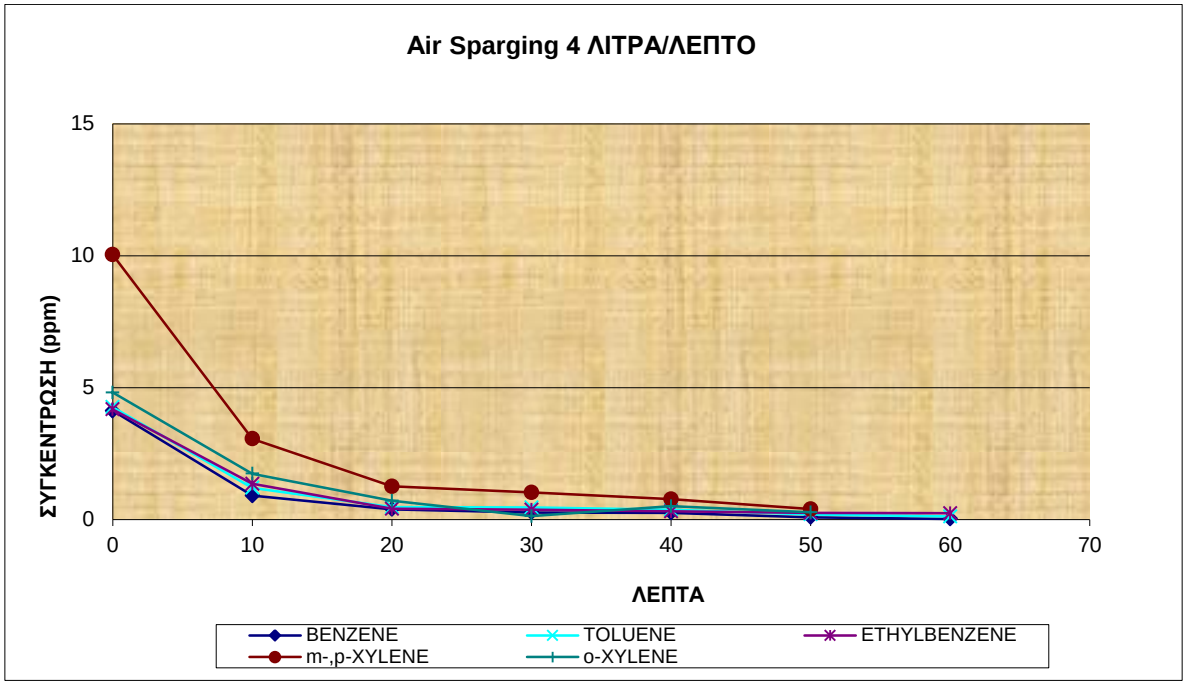
ΛΕΠΤΑ (λειτουργικά λεπτά)	40'(20')	50'(25')	60'(30')	70'(35')
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_{40}	C_{50}	C_{60}	C_{70}
BENZENE	0,201	0,079	0,039	0,002
TOLUENE	0,288	0,154	0,105	0,060
ETHYLBENZENE	0,308	0,210	0,182	0,128
m-,p-XYLENE	0,535	0,372	0,288	0,152
o-XYLENE	0,398	0,267	0,188	0,116

Πινάκας 18 (συνέχεια): Συγκέντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Τώρα γίνεται μια σειρά πειραμάτων συγκέντρωσης 5 ppm να ερευνηθεί η συμπεριφορά σε μικρότερη συγκέντρωση.

Για την διεκπεραίωση των πειραμάτων διαλέχτηκε μια παροχή την 4 λίτρα/λεπτό με κριτήριο ανάμεσα στις τρεις παροχές αυτή που είχε την μεγαλύτερη απομάκρυνση ppm/λίτρο αέρα που παρεχόταν στο σύστημα μέχρι το πέρας του εκάστοτε πειράματος και επίτευξης του στόχου (<3 ppm btex).Η συγκεκριμένη παροχή όμως είναι βέλτιστη με αυτό το κριτήριο για την συγκέντρωση 10 ppm και ίσως στην νέα μας συγκέντρωση να μην είναι η βέλτιστη ανάμεσα στις τρεις, αλλά έπρεπε να διαλεχτεί ένα κριτήριο ώστε να επιλεχτεί μια παροχή αέρα και να γίνει σύγκριση του διακοπτόμενου και συνεχή αερισμού σε αυτήν.

10^0ΠΕΙΡΑΜΑ : ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ **5 PPM** ,**ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΥ** ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ **4 L/MIN** ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ **2 BAR.**



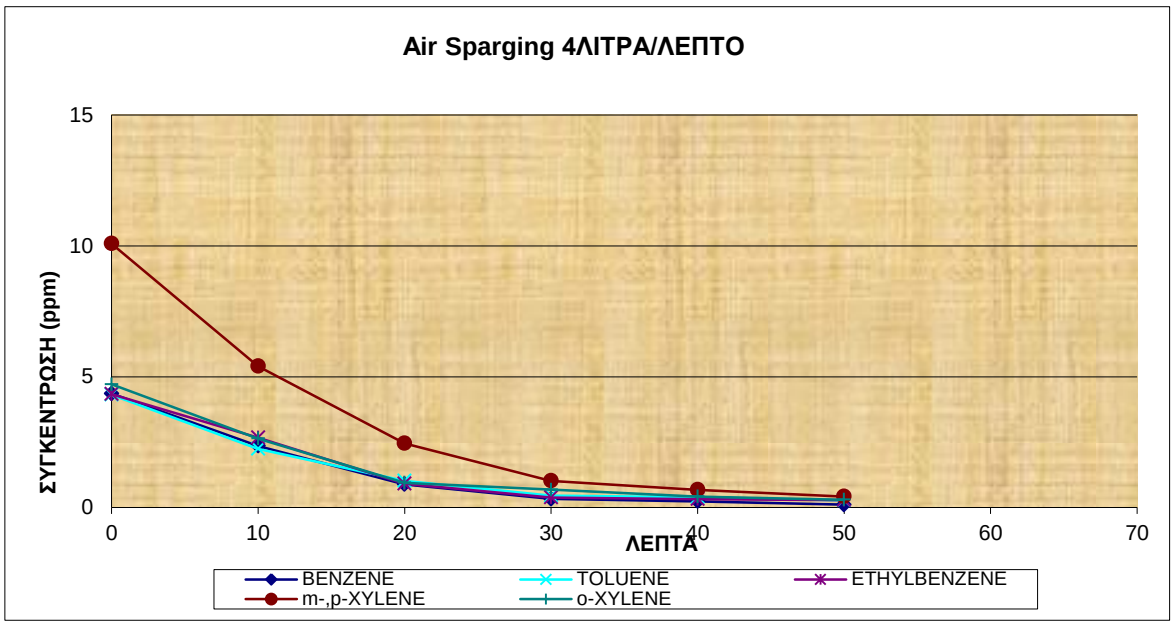
Σχήμα 13: Γραφική απεικόνιση συγκέντρωσης BTEX με το χρόνο.

ΛΕΠΤΑ	0’	10’	20’	30’	40’	50’	60’
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_0	C_{10}	C_{20}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}
BENZENE	4,121	0,906	0,394	0,272	0,257	0,090	0,031
TOLUENE	4,262	1,206	0,472	0,458	0,376	0,201	0,121
ETHYLBENZENE	4,176	1,358	0,410	0,377	0,315	0,256	0,240
m-,p-XYLENE	10,037	3,060	1,261	1,028	0,778	0,398	0,336
o-XYLENE	4,814	1,740	0,614	0,135	0,508	0,281	0,221

Πίνακας 19:Συγκεντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

11^{0}ΠΕΙΡΑΜΑ : ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ **5 PPM** , **ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΥ** ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ **4 L/MIN** ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ **2 BAR** .

Παρατηρήθηκε στον συνεχόμενο αερισμό στο προηγούμενο πείραμα ότι στα 20 λεπτά συνεχόμενης λειτουργιάς ‘’πιάνεται’’ το κατώτερο όριο που έχει τεθεί ,έτσι γίνεται σύγκριση τώρα του διακοπτόμενου σε αυτό το χρονικό διάστημα λειτουργιάς ανά πεντάλεπτα δηλαδή μέχρι τα 40 λεπτά κανονικού χρόνου ο οποίος περιλαμβάνει 20 λεπτά λειτουργιάς(στην πραγματικότητα έγινε μέτρηση μέχρι τα 50 λεπτά δηλαδή 25 λεπτά αερισμού).



Σχήμα 14: Γραφική απεικόνιση συγκέντρωσης BTEX με το χρόνο.

ΛΕΠΤΑ (λειτουργικά λεπτά)	0’	10’(5’)	20’(10’)	30’(15’)	40’(20’)	50’(25’)
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_0	C_{10}	C_{20}	C_{30}	C_{40}	C_{50}
BENZENE	4,356	2,354	0,887	0,334	0,237	0,112
TOLUENE	4,311	2,245	1,023	0,455	0,397	0,276
ETHYLBENZENE	4,336	2,675	0,911	0,386	0,323	0,287
m-,p-XYLENE	10,085	5,405	2,456	1,023	0,678	0,425
o-XYLENE	4,714	2,640	0,948	0,689	0,421	0,301

Πίνακας 20:Συγκεντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ-ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Θα γίνουν δυο ειδών συγκρίσεις. Η πρώτη θα είναι αποδοτική καθαρά και θα έχει δυο σκέλη: το πρώτο θα αφορά εύρεση καλύτερης παροχής ως προς το χρόνο και θα περιλαμβάνεται μέσα σε αυτό και η σύγκριση διακοπτόμενου και συνεχόμενου αερισμού και το δεύτερο σκέλος θα περιέχει σύγκριση ως προς τα απομακρυνόμενα ppm ρύπου που διαφεύγουν ανά λίτρο αέρα που παρέχεται στο σύστημα. Η δεύτερη θα είναι μια οικονομική σύγκριση η οποία θα αναφέρεται στο κόστος λειτουργιάς της εκάστοτε παροχής καθώς και στο κόστος ανά μάζα απομακρυσμένου ρύπου.

5.2.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3^0 ΠΕΙΡΑΜΑ :ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ 10 PPM , ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ 6L/MIN ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ 2 BAR

Λεπτά-χρόνος	0	10	20	30	60
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_0	C_{10}	C_{20}	C_{30}	C_{60}
BENZENE	9,884	4,422	1,369	0,491	0,190
TOLUENE	10,043	5,245	2,037	0,814	0,449
ETHYLBENZENE	9,234	4,269	1,590	0,473	0,387
m-,p-XYLENE	19,812	9,879	3,667	0,616	0,651
o-XYLENE	10,009	5,406	2,255	0,814	0,320
ΣΥΝΟΛΙΚΑ BTEX (PPM)	**58,982**	**29,221**	**10,918**	**3,208**	**1,997**

Πίνακας 21:Συγκέντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Χρόνος επιθυμητής μειωμένης συγκέντρωσης (<0,5 ppm για κάθε συστατικό δηλαδή συνολικά 3 ppm) : ~**35 λεπτά** (αναμενόμενος).

ΠΟΣΟΣΤΑ ΜΕΙΩΣΗΣ ΒΤΕΧ

ΧΡΟΝΟΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ (%)
0'-10'	50,46
10'-20'	62,64
20'-30'	70,62
30'-60'	37,74

Πίνακας 22: Ποσοστά μείωσης ΒΤΕΧ με το χρόνο.

ΧΡΟΝΟΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ (%)
0'-10'	50,46
0'-20'	81,49
0'-30'	94,56
0'-60'	96,61

Πίνακας 23: Ποσοστά μείωσης ΒΤΕΧ με το χρόνο.

Στα 35 λεπτά θα έχει πιαστεί το κατώφλι που χρειάζεται για τη σύγκριση, έτσι θα έχουν απομακρυνθεί 58,982 ppm - 3 ppm= 55,982 ppm και θα έχουν δοθεί στο σύστημα 210 λίτρα αέρα(=35 λεπτά *6λιτρα/λεπτο).

Όπου 3 ppm είναι τα 6 συστατικά των ΒΤΕΧ επί το 0,5 ppm το καθένα σαν κατώτατο όριο προς ευκολία σύγκρισης.

Ο λόγος είναι 55,982/210=0,267 απομακρυνόμενα ppm/λίτρο αέρα (κατά μέσο ορό).

Συνεπώς κατά μέσο ορό για κάθε λίτρο αέρα που παρέχεται, απομακρύνονται 0,267 ppm ΒΤΕΧ αν και στο παρακάτω πίνακα παρατηρείται διαφορά ανά χρονικό διάστημα λειτουργιάς.

Δουλεύοντας όμοια και για κάθε δεκάλεπτο ξεχωριστά όπου στον αριθμητή θα τοποθετούνται τα ppm που απομακρύνονται στο συγκεκριμένο δεκάλεπτο και στον παρονομαστή τα 60 λίτρα που παρέχονται σε αυτό το χρονικό διάστημα στη στήλη.

ΧΡΟΝΟΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΑΣ (ΛΙΤΡΑ)	PPM ΠΟΥ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΟΝΤΑΙ	ΛΟΓΟΣ (PPM/ΛΙΤΡΟ ΑΕΡΑ)
0'-10'	60	29,761	**0,496**
10'-20'	60	18,303	**0,305**
20'-30'	60	7,71	**0,129**
30'-60	180	1,211	**0,007**

Πίνακας 24: Λόγος απομάκρυνσης (ppm/λίτρο αέρα) ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Όσο περνάει ο χρόνος σε κάθε δεκάλεπτο κάθε λίτρο αέρα απομακρύνει όλο και λιγότερα ppm ΒΤΕΧ.

4^{0}ΠΕΙΡΑΜΑ :ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ 10 PPM , ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ 4 L/MIN ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ 2 BAR

ΧΡΟΝΟΣ-ΛΕΠΤΑ	0	10	20	30	40	50	60
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_0	C_{10}	C_{20}	C30	C_{40}	C_{50}	C_{60}
ΣΥΝΟΛΙΚΑ BTEX (PPM)	**60,575**	**32,517**	**5,513**	**4,287**	**2,891**	**2,387**	**1,426**

Πίνακας 25:Συγκέντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Χρόνος επιθυμητής μειωμένης συγκέντρωσης (<0,5 ppm για κάθε συστατικό δηλαδή συνολικά 3 ppm) : ~40 λεπτά.

ΠΟΣΟΣΤΑ ΜΕΙΩΣΗΣ BTEX

ΧΡΟΝΟΣ (ΛΕΠΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ (%)
0'-10'	46,32
10'-20'	83,05
20'-30'	22,24
30'-40'	32,56
40'-50'	17,43
50'-60'	40,26

Πίνακας 26: Ποσοστά μείωσης BTEX με το χρόνο.

ΧΡΟΝΟΣ (ΛΕΠΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ (%)
0'-10'	46,32
0'-20'	91,00
0'-30'	92,92
0'-40'	95,08
0'-50'	96,06
0'-60'	97,65

Πίνακας 27: Ποσοστά μείωσης BTEX με το χρόνο.

Στα 40 λεπτά θα έχει πιαστεί το κατώφλι που χρειάζεται για τη σύγκριση έτσι θα έχουν απομακρυνθεί 60,575 α – 2,891ppm= 57,684 ppm και θα έχουν δοθεί στο σύστημα 160 λίτρα αέρα(=40λεπτα *4 λίτρα/λεπτό).

Όπου 2,891 ppm είναι τα 6 συστατικά των BTEX σε χρόνο 40 λεπτών.

Ο λόγος είναι 57,684/160=0,360 απομακρυνόμενα ppm/λίτρο αέρα (κατά μέσο όρο).

Συνεπώς κατά μέσο όρο για κάθε λίτρο αέρα που παρέχεται, απομακρύνονται 0,360 ppm BTEX αν και στο παρακάτω πίνακα παρατηρείται διαφορά ανά χρονικό διάστημα λειτουργίας.

Δουλεύοντας όμοια και για κάθε δεκάλεπτο ξεχωριστά όπου στον αριθμητή θα τοποθετούνται τα ppm που απομακρύνονται στο συγκεκριμένο δεκάλεπτο και στον παρονομαστή τα 40 λίτρα που παρέχονται σε αυτό το χρονικό διάστημα στη στήλη.

ΧΡΟΝΟΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΑΣ (ΛΙΤΡΑ)	PPM ΠΟΥ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΟΝΤΑΙ	ΛΟΓΟΣ (PPM/ΛΙΤΡΟ ΑΕΡΑ)
0'-10'	40	28,058	**0,701**
10'-20'	40	27,004	**0,675**
20'-30'	40	1,226	**0,030**
30'-40'	40	1,396	**0,035**
40'-50'	40	0,504	**0,012**
50'-60'	40	0,961	**0,024**

Πίνακας 28: Λόγος απομάκρυνσης (ppm/λίτρο αέρα) ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

5^{0}ΠΕΙΡΑΜΑ :ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ 10 PPM , ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ 10 L/MIN ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ 2 BAR.

Λεπτά-χρόνος	0	10	20	30	60
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_0	C_{10}	C_{20}	C_{30}	C_{60}
ΣΥΝΟΛΙΚΑ BTEX (PPM)	**72,259**	**17,102**	**4,447**	**1,871**	**0,541**

Πίνακας 29:Συγκεντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Χρόνος επιθυμητής μειωμένης συγκέντρωσης (<0,5 ppm για κάθε συστατικό δηλαδή συνολικά 3 ppm) : ~25 λεπτά (αναμενόμενος)

ΠΟΣΟΣΤΑ ΜΕΙΩΣΗΣ BTEX

ΧΡΟΝΟΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ (%)
0'-10'	76,33
10'-20'	74,00
20'-30'	57,93
30'-60'	71,08

Πίνακας 30: Ποσοστά μείωσης BTEX με το χρόνο.

ΧΡΟΝΟΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ (%)
0'-10'	76,33
0'-20'	93,85
0'-30'	97,41
0'-60'	99,25

Πίνακας 31: Ποσοστά μείωσης BTEX με το χρόνο.

Στα 25 λεπτά θα έχει πιαστεί το κατώφλι που χρειάζεται για τη σύγκριση έτσι θα έχουν απομακρυνθεί 72,259 ppm – 3 ppm= 69,259 ppm και θα έχουν δοθεί στο σύστημα 250 λίτρα αέρα(=25λεπτα *10λιτρα/λεπτο).

Όπου 3 ppm είναι τα 6 συστατικά των BTEX επί το 0,5 ppm το καθένα σαν κατώτατο όριο προς ευκολία σύγκρισης.

Ο λόγος είναι 69,259 / 250=0,277 απομακρυνόμενα ppm/λίτρο αέρα (κατά μέσο όρο).

Συνεπώς, κατά μέσο όρο για κάθε λίτρο αέρα που παρέχεται, απομακρύνονται 0,277 ppm BTEX αν και στο παρακάτω πίνακα παρατηρείται διαφορά ανά χρονικό διάστημα λειτουργίας.

Δουλεύοντας όμοια και για κάθε δεκάλεπτο ξεχωριστά όπου στον αριθμητή θα τοποθετούνται τα ppm που απομακρύνονται στο συγκεκριμένο δεκάλεπτο και στον παρονομαστή τα 100 λίτρα που παρέχονται σε αυτό το χρονικό διάστημα στη στήλη.

ΧΡΟΝΟΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΑΣ (ΛΙΤΡΑ)	PPM ΠΟΥ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΟΝΤΑΙ	ΛΟΓΟΣ (PPM/ΛΙΤΡΟ ΑΕΡΑ)
0’-10’	100	55,157	**0,552**
10’-20’	100	12,655	**0,127**
20’-30’	100	2,576	**0,026**
30’-60	100	1,330	**0,013**

Πίνακας 32: Λόγος απομάκρυνσης (ppm/λιτρο αέρα) ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Όσο περνάει ο χρόνος σε κάθε δεκάλεπτο κάθε λίτρο αέρα απομακρύνει όλο και λιγότερα ppm BTEX.

7^{0}ΠΕΙΡΑΜΑ : ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ 10 PPM , ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ 6 L/MIN ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ 2 BAR.

ΛΕΠΤΑ (λειτουργικά λεπτά)	0’	10’**(5’)**	20’**(10’)**	30’**(15’)**	40’(20’)	50’**(25’)**	60’**(30’)**	70’**(35’)**
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_0	C_{10}	C_{20}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}	C_{70}
ΣΥΝΟΛΙΚΑ BTEX (PPM)	**53,775**	**29,595**	**21,886**	**14,143**	**9,801**	**5,361**	**1,343**	**0,269**

Πίνακας 33:Συγκεντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Χρόνος επιθυμητής μειωμένης συγκέντρωσης (<0,5 ppm για κάθε συστατικό δηλαδή συνολικά 3 ppm) : ~27 λεπτά λειτουργίας (αναμενόμενος).

ΠΟΣΟΣΤΑ ΜΕΙΩΣΗΣ ΒΤΕΧ

ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΛΕΠΤΑ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ (%)
0'-5'	44,97
5'-10'	26,05
10'-15'	35,38
15'-20'	30,70
20'-25'	45,30
25'-30'	74,95
30'-35'	79,98

Πίνακας 34: Ποσοστά μείωσης ΒΤΕΧ με το χρόνο.

ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΛΕΠΤΑ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ (%)
0'-5'	44,97
0'-10'	59,30
0'-15'	73,70
0'-20'	81,77
0'-25'	90,03
0'-30'	97,50
0'-35'	99,50

Πίνακας 35: Ποσοστά μείωσης ΒΤΕΧ με το χρόνο.

Στα 27 λεπτά θα έχει πιαστεί το κατώφλι που χρειάζεται για τη σύγκριση έτσι θα έχουν απομακρυνθεί 53,775 ppm – 3 ppm= 50,775 ppm και θα έχουν δοθεί στο σύστημα 162 λίτρα αέρα(=27λεπτα *6λιτρα/λεπτο).

Όπου 3 ppm είναι τα 6 συστατικά των ΒΤΕΧ επι το 0,5 ppm το καθένα σαν κατώτατο όριο προς ευκολία σύγκρισης.

Ο λόγος είναι 50,775 / 162=0,313 απομακρυνόμενα ppm/λίτρο αέρα (κατά μέσο όρο).

Συνεπώς, κατά μέσο όρο για κάθε λίτρο αέρα που παρέχεται απομακρύνονται 0,313 ppm ΒΤΕΧ αν και στο παρακάτω πίνακα φαίνεται διαφορά ανά χρονικό διάστημα λειτουργίας.

Δουλεύοντας όμοια και για κάθε δεκάλεπτο ξεχωριστά όπου στον αριθμητή μπαίνουν τα ppm που απομακρύνονται στο συγκεκριμένο δεκάλεπτο και στον παρονομαστή τα 60 λίτρα που παρέχονται σε αυτό το χρονικό διάστημα στη στήλη.

ΧΡΟΝΟΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΑΣ (ΛΙΤΡΑ)	PPM ΠΟΥ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΟΝΤΑΙ	ΛΟΓΟΣ (PPM/ΛΙΤΡΟ ΑΕΡΑ)
0'-5'	60	24,180	**0,403**
5'-10'	60	7,709	**0,128**
10'-15'	60	7,743	**0,130**
15'-20'	60	4,342	**0,072**
20'-25'	60	4,440	**0,074**
25'-30'	60	4,018	**0,067**
30'-35'	60	1,074	**0,018**

Πίνακας 36: Λόγος απομάκρυνσης (ppm/λιτρο αέρα) ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

8^{0}ΠΕΙΡΑΜΑ : ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ 10 PPM , ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ 4 L/MIN ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ 2 BAR.

ΛΕΠΤΑ (λειτουργικά λεπτά)	0'	10'(5')	20'(10')	30'(15')	40'(20')
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_0	C_{10}	C_{20}	C_{30}	C_{40}
ΣΥΝΟΛΙΚΑ BTEX (PPM)	**58,410**	**30,105**	**23,914**	**16,146**	**12,112**

Πίνακας 37: Συγκέντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

ΛΕΠΤΑ (λειτουργικά λεπτά)	50'(25')	60'(30')	70'(35')	80'(40')
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_{50}	C_{60}	C_{70}	C_{80}
ΣΥΝΟΛΙΚΑ BTEX (PPM)	**4,797**	**3,192**	**2,419**	**2,195**

Πίνακας 37 (συνέχεια): Συγκέντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Χρόνος επιθυμητής μειωμένης συγκέντρωσης (<0,5 ppm για κάθε συστατικό δηλαδή συνολικά 3 ppm) : ~32 λεπτά λειτουργίας (αναμενόμενος).

ΠΟΣΟΣΤΑ ΜΕΙΩΣΗΣ BTEX

ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΛΕΠΤΑ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ (%)
0'-5'	48,46
5'-10'	20,56
10'-15'	32,48
15'-20'	24,98
20'-25'	60,39
25'-30'	33,46
30'-35'	24,22
35'-40'	9,26

Πίνακας 38: Ποσοστά μείωσης BTEX με το χρόνο.

ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΛΕΠΤΑ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ (%)
0'-5'	48,46
0'-10'	59,06
0'-15'	72,36
0'-20'	79,27
0'-25'	91,79
0'-30'	94,54
0'-35'	95,86
0'-40'	96,24

Πίνακας 39: Ποσοστά μείωσης BTEX με το χρόνο.

Στα 32 λεπτά θα έχει πιαστεί το κατώφλι που χρειάζεται για τη σύγκριση έτσι θα έχουν απομακρυνθεί 58,410 ppm – 3 ppm= 55,410 ppm και θα έχουν δοθεί στο σύστημα 128 λίτρα αέρα(=32λεπτα *4λιτρα/λεπτο).

Όπου 3 ppm είναι τα 6 συστατικά των BTEX επί το 0,5 ppm το καθένα σαν κατώτατο όριο προς ευκολία σύγκρισης.

Ο λόγος είναι 55,410 / 128=0,432 απομακρυνόμενα ppm/λιτρο αερα (κατά μέσο όρο).

Συνεπώς κατά μέσο όρο για κάθε λίτρο αέρα που παρέχεται απομακρύνονται 0,432 ppm BTEX αν και στο παρακάτω πίνακα φαίνεται διαφορά ανά χρονικό διάστημα λειτουργίας.

Δουλεύοντας όμοια και για κάθε δεκάλεπτο ξεχωριστά όπου στον αριθμητή μπαίνουν τα ppm που απομακρύνονται στο συγκεκριμένο δεκάλεπτο και στον παρονομαστή τα 40 λίτρα που παρέχονται σε αυτό το χρονικό διάστημα στη στήλη.

ΧΡΟΝΟΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΑΣ (ΛΙΤΡΑ)	PPM ΠΟΥ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΟΝΤΑΙ	ΛΟΓΟΣ (PPM/ΛΙΤΡΟ ΑΕΡΑ)
0'-5'	40	28,305	**0,708**
5'-10'	40	6,191	**0,155**
10'-15'	40	7,768	**0,194**
15'-20'	40	4,034	**0,100**
20'-25'	40	7,315	**0,183**
25'-30'	40	1,605	**0,040**
30'-35'	40	0,733	**0,018**
35'-40'	40	0,224	**0,006**

Πίνακας 40: Λόγος απομάκρυνσης (ppm/λίτρο αέρα) ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

9^{0}ΠΕΙΡΑΜΑ : ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ 10 PPM , ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ 10 L/MIN ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ 2 BAR.

ΛΕΠΤΑ **(λειτουργικά λεπτά)**	0'	10'**(5')**	20'**(10')**	30'**(15')**
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_0	C_{10}	C_{20}	C_{30}
ΣΥΝΟΛΙΚΑ BTEX (PPM)	**55,415**	**20,778**	**4,823**	**3,201**

Πίνακας 41:Συγκεντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

ΛΕΠΤΑ **(λειτουργικά λεπτά)**	40'**(20')**	50'**(25')**	60'**(30')**	70'**(35')**
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_{40}	C_{50}	C_{60}	C_{70}
ΣΥΝΟΛΙΚΑ BTEX (PPM)	**1,730**	**1,082**	**0,802**	**0,458**

Πίνακας 41 (συνέχεια): Συγκέντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Χρόνος επιθυμητής μειωμένης συγκέντρωσης (<0,5 ppm για κάθε συστατικό δηλαδή συνολικά 3 ppm) : ~17 λεπτά λειτουργίας (αναμενόμενος).

ΠΟΣΟΣΤΑ ΜΕΙΩΣΗΣ BTEX

ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΛΕΠΤΑ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ (%)
0'-5'	62,50
5'-10'	76,79
10'-15'	33,63
15'-20'	45,95
20'-25'	37,46
25'-30'	25,88
30'-35'	42,89

Πίνακας 42: Ποσοστά μείωσης BTEX με το χρόνο.

ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΛΕΠΤΑ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ (%)
0'-5'	62,50
0'-10'	91,30
0'-15'	94,22
0'-20'	96,88
0'-25'	98,05
0'-30'	98,55
0'-35'	99,17

Πίνακας 43: Ποσοστά μείωσης BTEX με το χρόνο.

Στα 17 λεπτά θα έχει πιαστεί το κατώφλι που χρειάζεται για τη σύγκριση έτσι θα έχουν απομακρυνθεί 55,415 ppm – 3 ppm= 52,415 ppm και θα έχουν δοθεί στο σύστημα 170 λίτρα αέρα(=17λεπτα *10λιτρα/λεπτο).

Όπου 3 ppm είναι τα 6 συστατικά των BTEX επί το 0,5 ppm το καθένα σαν κατώτατο όριο προς ευκολία σύγκρισης.

Ο λόγος είναι 52,415 / 170=0,308 απομακρυνόμενα ppm/λιτρο αερα (κατά μεσο ορο).

Συνεπώς, κατά μέσο όρο για κάθε λίτρο αέρα που παρέχεται απομακρύνονται 0,308 ppm BTEX αν και στο παρακάτω πίνακα φαίνεται διαφορά ανά χρονικό διάστημα λειτουργίας.

Δουλεύοντας όμοια και για κάθε δεκάλεπτο ξεχωριστά όπου στον αριθμητή μπαίνουν τα α που απομακρύνονται στο συγκεκριμένο δεκάλεπτο και στον παρονομαστή τα 100 λίτρα που παρέχονται σε αυτό το χρονικό διάστημα στη στήλη.

ΧΡΟΝΟΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΑΣ (ΛΙΤΡΑ)	PPM ΠΟΥ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΟΝΤΑΙ	ΛΟΓΟΣ (PPM/ΛΙΤΡΟ ΑΕΡΑ)
0'-5'	100	34,637	**0,346**
5'-10'	100	15,955	**0,160**
10'-15'	100	1,622	**0,016**
15'-20'	100	1,471	**0,015**
20'-25'	100	0,628	**0,006**
25'-30'	100	0,280	**0,003**
30'-35'	100	0,344	**0,003**

Πίνακας 44: Λόγος απομάκρυνσης (ppm/λιτρο αέρα) ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Όσο περνάει ο χρόνος σε κάθε δεκάλεπτο κάθε λίτρο αέρα απομακρύνει όλο και λιγότερα ppm btex.

10^{0}ΠΕΙΡΑΜΑ : ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ 5 PPM, ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ 4 L/MIN ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ 2 BAR.

Έγινε η διαλογή της παροχής 4 λίτρα/λεπτό αφού σε αυτήν την παροχή έχουμε την μεγαλύτερη απομάκρυνση ppm ανά λίτρο αέρα που παρέχεται στο σύστημα τόσο σε συνεχή όσο και σε διακοπτόμενο αερισμό.

ΛΕΠΤΑ	0'	10'	20'	30'	40'	50'	60'
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_0	C_{10}	C_{20}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}
ΣΥΝΟΛΙΚΑ BTEX (PPM)	**27,411**	**8,270**	**3,151**	**2,270**	**2,234**	**1,220**	**0,949**

Πίνακας 45:Συγκέντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Χρόνος επιθυμητής μειωμένης συγκέντρωσης (<0,5 ppm για κάθε συστατικό δηλαδή συνολικά 3 ppm) : ~23 λεπτά.

ΠΟΣΟΣΤΑ ΜΕΙΩΣΗΣ BTEX

ΧΡΟΝΟΣ (ΛΕΠΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ (%)
0'-10'	69,83
10'-20'	61,90
20'-30'	27,96
30'-40'	1,59
40'-50'	45,39
50'-60'	22,21

Πίνακας 46: Ποσοστά μείωσης BTEX με το χρόνο.

ΧΡΟΝΟΣ (ΛΕΠΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ (%)
0'-10'	69,83
0'-20'	88,50
0'-30'	91,72
0'-40'	91,85
0'-50'	95,55
0'-60'	96,54

Πίνακας 47: Ποσοστά μείωσης BTEX με το χρόνο.

Στα 23 λεπτά θα έχει πιαστεί το κατώφλι που χρειάζεται για τη σύγκριση έτσι θα έχουν απομακρυνθεί 27,411 ppm – 3 ppm= 24,411 ppm και θα έχουν δοθεί στο σύστημα 92 λίτρα αέρα(=23λεπτα *4 λίτρα/λεπτό).

Όπου 3 ppm είναι τα 6 συστατικά των BTEX επί το 0,5 ppm το καθένα σαν κατώτατο όριο προς ευκολία σύγκρισης.

Ο λόγος είναι 24,411 / 92=0,265 απομακρυνόμενα ppm/λιτρο αέρα (κατά μέσο όρο).

Συνεπώς, κατά μέσο όρο για κάθε λίτρο αέρα που παρέχεται, απομακρύνονται 0,265 ppm BTEX αν και στο παρακάτω πίνακα φαίνεται η διαφορά ανά χρονικό διάστημα λειτουργίας.

Δουλεύοντας όμοια και για κάθε δεκάλεπτο ξεχωριστά όπου στον αριθμητή μπαίνουν τα ppm που απομακρύνονται στο συγκεκριμένο δεκάλεπτο και στον παρονομαστή τα 40 λίτρα που παρέχονται σε αυτό το χρονικό διάστημα στη στήλη.

ΧΡΟΝΟΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΑΣ (ΛΙΤΡΑ)	PPM ΠΟΥ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΟΝΤΑΙ	ΛΟΓΟΣ (PPM/ΛΙΤΡΟ ΑΕΡΑ)
0'-10'	40	19,141	**0,479**
10'-20'	40	5,119	**0,128**
20'-30'	40	0,881	**0,022**
30'-40'	40	0,036	**0,0009**
40'-50'	40	1,014	**0,025**
50'-60'	40	0,271	**0,007**

Πίνακας 48: Λόγος απομάκρυνσης (ppm/λίτρο αέρα) ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

<u>11^{0}ΠΕΙΡΑΜΑ</u> : ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ 5 PPM , ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ 4 L/MIN ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ 2 BAR .

ΛΕΠΤΑ-(λειτουργικά λεπτά)	0'	10'(5' λειτουργίας αέρα)	20'(10')	30'(15')	40'(20')	50'(25')
ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	C_0	C_{10}	C_{20}	C_{30}	C_{40}	C_{50}
ΣΥΝΟΛΙΚΑ BTEX (PPM)	**27,802**	**15,319**	**6,225**	**2,887**	**2,056**	**1,401**

Πίνακας 49:Συγκεντρωση BTEX ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Χρόνος επιθυμητής μειωμένης συγκέντρωσης (<0,5 ppm για κάθε συστατικό δηλαδή συνολικά~ 3 ppm) : ~15 λεπτά λειτουργίας .

ΠΟΣΟΣΤΑ ΜΕΙΩΣΗΣ BTEX

ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΛΕΠΤΑ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ (%)
0'-5'	44,90
5'-10'	59,36
10'-15'	53,74
15'-20'	28,78
20'-25'	31,86

Πίνακας 50: Ποσοστά μείωσης BTEX με το χρόνο.

ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΛΕΠΤΑ)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ (%)
0'-5'	44,90
0'-10'	77,61
0'-15'	89,62
0'-20'	92,60
0'-25'	94,96

Πίνακας 51: Ποσοστά μείωσης BTEX με το χρόνο.

Στα 15 λεπτά θα έχει πιαστεί το κατώφλι που χρειάζεται για τη σύγκριση έτσι θα έχουν απομακρυνθεί 27,802 ppm – 2,887 ppm= 24,915 ppm και θα έχουν δοθεί στο σύστημα 60 λίτρα αέρα(=15 λεπτά *4 λίτρα/λεπτό).

Όπου 2,887 ppm είναι τα 6 συστατικά των btex σε χρόνο 15 λεπτών.

Ο λόγος είναι 24,915 / 60=0,415 απομακρυνόμενα ppm/λιτρο αερα (κατά μέσο όρο).

Συνεπώς, κατά μέσο όρο για κάθε λίτρο αέρα που παρέχεται απομακρύνονται 0,415 ppm BTEX αν και στο παρακάτω πίνακα φαίνεται διαφορά ανά χρονικό διάστημα λειτουργίας.

Δουλεύοντας όμοια και για κάθε δεκάλεπτο ξεχωριστά όπου στον αριθμητή μπαίνουν τα ppm που απομακρύνονται στο συγκεκριμένο δεκάλεπτο και στον παρονομαστή τα 40 λίτρα που παρέχονται σε αυτό το χρονικό διάστημα στη στήλη.

ΧΡΟΝΟΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΑΣ (ΛΙΤΡΑ)	PPM ΠΟΥ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΟΝΤΑΙ	ΛΟΓΟΣ (PPM/ΛΙΤΡΟ ΑΕΡΑ)
0'-5'	40	12,483	**0,312**
5'-10'	40	9,909	**0,248**
10'-15'	40	3,345	**0,084**
15'-20'	40	0,831	**0,021**
20'-25'	40	0,655	**0,016**

Πίνακας 52: Λόγος απομάκρυνσης (ppm/λίτρο αέρα) ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Όσο περνάει ο χρόνος σε κάθε δεκάλεπτο, κάθε λίτρο αέρα απομακρύνει όλο και λιγότερα ppm BTEX.

5.2.2 Α' ΣΥΓΚΡΙΣΗ-ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ

5.2.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΡΟΧΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

❖ *5.2.2.1.1 ΕΥΡΕΣΗ ΚΑΛΥΤΕΡΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΜΕ ΑΥΤΟ ΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ*

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι χρόνοι μηδενισμού των BTEX (<3 ppm BTEX σαν συγκριτικό όριο) ανάλογα με την εκάστοτε παροχή τόσο σε συνεχόμενους όσο και σε διακοπτόμενους αερισμούς. Οι συγκρίσεις αφορούν τα πειράματα που έγιναν με αρχική συγκέντρωση 60 ppm BTEX (δηλαδή 10 ppm κάθε ρύπου).

ΠΑΡΟΧΗ (ΛΙΤΡΑ/ΛΕΠΤΟ)	ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ(ΧΡΟΝΟΣ –ΛΕΠΤΑ)	ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ (ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΛΕΠΤΑ)	ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ (ΛΕΠΤΑ)
4	40'	32'	62'
6	35'	27'	57'
10	**25'**	**17'**	**32'**

Πίνακας 53: Λεπτά λειτουργίας συνεχόμενου –διακοπτόμενου αερισμού ανάλογα την παροχή αέρα.

Όπως αναμενόταν και είναι γνωστό και από τη βιβλιογραφία, αύξηση της παροχής αέρα στο σύστημα συνεπάγεται και αύξηση στο ρυθμό εξάτμισης και επομένως μείωση στο χρόνο μηδενισμού του ρύπου. Αυτό φαίνεται και μέσα από τα πειράματα του διεξήχθησαν. Φαίνεται ότι ,αυξάνοντας την παροχή μειώνεται και ο χρόνος λειτουργίας του αερισμού. **Όσον αφορά το χρόνο δηλαδή ,αποδεικνύεται ότι η παροχή 10 λίτρα/λεπτό είναι η καλύτερη** αφού είναι και η μεγαλύτερη που χρησιμοποιήθηκε και έχει τον μικρότερο χρόνο λειτουργίας του αερισμού μέχρι τον μηδενισμό δηλαδή 25 λεπτά για συνεχόμενο αερισμό και 17 για τον διακοπτόμενο αερισμό αντίστοιχα (στο πείραμα με παροχή 14 λίτρα/λεπτό ο αντίστοιχος χρόνος ήταν 15 λεπτά ,αλλά δεν χρησιμοποιήθηκε περεταίρω στα πειράματα λόγω επικινδυνότητας). Έτσι λοιπόν η παροχή 10 λίτρα/λεπτό είναι καλύτερη ως προς το χρόνο σε σχέση με τις παροχές 4 και 6 λίτρα/λεπτό.

Από τα πειράματα φαίνεται ότι για αύξηση παροχής κατά 2 λίτρα/λεπτό παρατηρείται μείωση στο χρόνο λειτουργίας κατά 5 λεπτά τόσο σε συνεχόμενο όσο και σε διακοπτόμενο αερισμό. Στην πραγματικότητα όμως χρειάζονται πολλά πειράματα στο πεδίο σε διαφορετικές συνθήκες για να γενικευτεί αυτό το αποτέλεσμα για τα συγκεκριμένα εύρη παροχών .

❖ *5.2.2.1.2 ΣΥΚΡΙΣΗ ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΥ-ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΧΡΟΝΟ*

ΠΑΡΟΧΗ (ΛΙΤΡΑ/ΛΕΠΤΟ)	ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ(ΧΡΟΝΟΣ – ΛΕΠΤΑ)	ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ (ΛΕΠΤΑ)
4	40'	62'

Πίνακας 54: Λεπτά λειτουργίας συνεχόμενου –διακοπτόμενου αερισμού.

Για παροχή 4 λίτρα/λεπτό ο συνεχόμενος αερισμός κρίνεται καλύτερος ως προς τον χρόνο απομάκρυνσης σε σχέση με το διακοπτόμενο αερισμό.

ΠΑΡΟΧΗ (ΛΙΤΡΑ/ΛΕΠΤΟ)	ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ(ΧΡΟΝΟΣ – ΛΕΠΤΑ)	ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ (ΛΕΠΤΑ)
6	35’	57’

Πίνακας 55: Λεπτά λειτουργίας συνεχόμενου –διακοπτόμενου αερισμού.

Για παροχή 6 λίτρα/λεπτό ο συνεχόμενος αερισμός κρίνεται καλύτερος ως προς τον χρόνο απομάκρυνσης σε σχέση με το διακοπτόμενο αερισμό.

ΠΑΡΟΧΗ (ΛΙΤΡΑ/ΛΕΠΤΟ)	ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ(ΧΡΟΝΟΣ – ΛΕΠΤΑ)	ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ (ΛΕΠΤΑ)
10	25’	32’

Πίνακας 56: Λεπτά λειτουργίας συνεχόμενου –διακοπτόμενου αερισμού.

Για παροχή 10 λίτρα/λεπτό ο συνεχόμενος αερισμός κρίνεται καλύτερος ως προς τον χρόνο απομάκρυνσης σε σχέση με το διακοπτόμενο αερισμό.

Από τα αποτελέσματα φαίνεται καθαρά ότι οι συνεχόμενοι αερισμοί είναι πιο αποδοτικοί ως προς το χρόνο σε σχέση με τους διακοπτόμενους στις ίδιες παροχές. Τώρα, το ότι όλοι οι διακοπτόμενοι αερισμοί διαφέρουν από τους συνεχόμενους κατά 8 λειτουργικά λεπτά, χρειάζεται περεταίρω μελέτη στο πεδίο για μια αναλογική γενίκευση σε μεγαλύτερες παροχές πεδίου.

Συμπέρασμα: αν ενδιαφέρει κάποιον ο χρόνος και είναι επιθυμητή η εξάλειψη του ρύπου πιο γρήγορα τότε για αυτά τα εύρη παροχών (μικρές παροχές εργαστηρίου) επιλέγεται η πιο μεγάλη παροχή με συνεχόμενη λειτουργιά.

5.2.2..2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΑ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΟΜΕΝΑ PPM ΡΥΠΟΥ ΑΝΑ ΛΙΤΡΟ ΑΕΡΑ

❖ *5.2.2.2.1 ΕΥΡΕΣΗ ΚΑΛΥΤΕΡΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΜΕ ΑΥΤΟ ΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ*

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα ppm ρύπου που απομακρύνονται για κάθε λίτρο αέρα που παρέχεται στο σύστημα για συνεχή και διακοπτόμενο αερισμό.

ΠΑΡΟΧΗ (ΛΙΤΡΑ/ΛΕΠΤΟ)	ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ (PPM /ΛΙΤΡΟ ΑΕΡΑ)	ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ (PPM /ΛΙΤΡΟ ΑΕΡΑ)
4	**0,360**	**0,432**
6	0,267	0,313
10	0,277	0,308

Πίνακας 57: Απομακρυνόμενα ppm/λίτρο αέρα σε συνεχόμενο –διακοπτόμενο αερισμό ανάλογα την παροχή αέρα.

Όπως φαίνεται η μικρότερη παροχή που χρησιμοποιήθηκε δηλαδή τα **4 λίτρα/λεπτό είναι πιο αποδοτική** όσον αφορά τα ppm BTEX που απομακρύνει κάθε λίτρο αέρα που παρέχεται στην στήλη: 0,360 και 0,432 για συνεχόμενο και διακοπτόμενο αερισμό αντίστοιχα. (Όσο ανεβαίνει η παροχή από εκεί και πέρα φαίνεται μια σταθεροποίηση η οποία θέλει περεταίρω διερεύνηση με περισσότερα πειράματα στο πεδίο).

❖ *5.2.2.2.2 ΣΥΚΡΙΣΗ ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΥ-ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ*

ΠΑΡΟΧΗ (ΛΙΤΡΑ/ΛΕΠΤΟ)	ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ (PPM /ΛΙΤΡΟ ΑΕΡΑ)	ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ (PPM /ΛΙΤΡΟ ΑΕΡΑ)
4	0,360	0,432

Πίνακας 58: Απομακρυνόμενα ppm/λιτρο αέρα σε συνεχόμενο –διακοπτόμενο αερισμό.

Για παροχή 4 λίτρα/λεπτό ο διακοπτόμενος αερισμός κρίνεται καλύτερος ως προς την απομάκρυνση ppm ρύπου ανά λίτρο αέρα που παρέχεται ,σε σχέση με το συνεχόμενο αερισμό.

ΠΑΡΟΧΗ (ΛΙΤΡΑ/ΛΕΠΤΟ)	ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ (PPM /ΛΙΤΡΟ ΑΕΡΑ)	ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ (PPM /ΛΙΤΡΟ ΑΕΡΑ)
6	0,267	0,313

Πίνακας 59: Απομακρυνόμενα ppm/λίτρο αέρα σε συνεχόμενο –διακοπτόμενο αερισμό.

Για παροχή 6 λίτρα/λεπτό ο διακοπτόμενος αερισμός κρίνεται καλύτερος ως προς την απομάκρυνση ppm ρύπου ανά λίτρο αέρα που παρέχεται ,σε σχέση με το συνεχόμενο αερισμό

ΠΑΡΟΧΗ (ΛΙΤΡΑ/ΛΕΠΤΟ)	ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ (PPM /ΛΙΤΡΟ ΑΕΡΑ)	ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ (PPM /ΛΙΤΡΟ ΑΕΡΑ)
10	0,277	0,308

Πίνακας 60: Απομακρυνόμενα α/λίτρο αέρα σε συνεχόμενο –διακοπτόμενο αερισμό.

Για παροχή 10 λίτρα/λεπτό ο διακοπτόμενος αερισμός κρίνεται καλύτερος ως προς την απομάκρυνση ppm ρύπου ανά λίτρο αέρα που παρέχεται ,σε σχέση με το συνεχόμενο αερισμό

Από τα αποτελέσματα φαίνεται καθαρά ότι γι'αυτό το εύρος παροχών οι διακοπτόμενοι αερισμοί είναι πιο αποδοτικοί ως προς την απομάκρυνση ppm ρύπου ανά λίτρο αέρα που παρέχεται στο σύστημα σε σχέση με τους συνεχόμενους στις ίδιες παροχές.

Συμπέρασμα: αν ενδιαφέρει κάποιον η απομάκρυνση ppm ρύπου ανά λίτρο αέρα που παρέχεται τότε για αυτά τα εύρη παροχών (μικρές παροχές εργαστηρίου) διαλέγεται η πιο μικρή παροχή με διακοπτόμενη λειτουργιά.

Καταλήγοντας, ανάλογα τι επιθυμεί ο καθένας που εφαρμόζει την μέθοδο, διαλέγει μικρή ή μεγάλη παροχή. Μικρές παροχές αν τον ενδιαφέρει το κάθε λίτρο αέρα που δίνει να απομακρύνει περισσότερο ρύπο (αν και στην πραγματικότητα δεν υπάρχει κανένα όφελος σε αυτή την σκέψη, εξετάζεται παρακάτω μήπως υπάρχει οικονομικό για την μικρότερη παροχή) και μεγάλες παροχές αν θέλει να τελειώνει πιο γρήγορα. Όλες οι παροχές κρίνονται καλές για τον αρχικό τους στόχο δηλαδή την εξάλειψη του ρύπου. Όσον αφορά όμως συνεχή ή διακοπτόμενο αερισμό όλα τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπερέχει ο συνεχόμενος αερισμός γι'αυτές τια παροχές αφου είναι πιο γρήγορος.

5.2.3 Β' ΣΥΓΚΡΙΣΗ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ

Γίνεται συνέχεια με τις συγκρίσεις των παροχών περνώντας στο οικονομικό τμήμα. Ναι μεν πρωταρχικός στόχος είναι η μείωση του ρύπου αλλά πρέπει ταυτόχρονα να ερευνάται πως θα επιτευχτεί ξοδεύοντας τα λιγότερα χρήματα αφού δίνεται η δυνατότητα επιλογής στησίματος της μεθόδου του Air Sparging. Παρακάτω εμφανίζονται αποτελέσματα για την οικονομικότητα της κάθε παροχής, παρουσιάζεται η πιο οικονομική και φαίνεται τέλος το κόστος ανά ppm που απομακρύνεται από το σύστημα .

Αρχικά, υπήρξε η απορία γιατί πάντα να μην γίνεται ο αερισμός στις μέγιστες παροχές που αντέχει το σύστημα; και αμέσως εμφανίστηκε η έννοια κόστος. Ήταν γνωστό ότι αύξηση παροχής συνεπάγεται και αύξηση κόστους λόγω αύξησης ισχύος του κομπρεσέρ αέρα άρα και του ηλεκτρικού ρεύματος, αλλά τελειώνοντας την εξυγίανση γρηγορότερα μπορεί να υπήρχε οικονομικό όφελος με μια μεγαλύτερη παροχή. Δηλαδή ναι μεν πληρώνεται πιο ακριβά η εξυγίανση με μια μεγαλύτερη παροχή στη μονάδα του χρόνου, αλλά εξοικονομώντας χρόνο χρησιμοποιείται πιο λίγη ώρα ο αερισμός έτσι στο τελικό κόστος ίσως να ωφελείται κανείς.

5.2.3.1 ΕΥΡΕΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΕΡΑ

Έγινε η αρχή, αναζητώντας αν αυξάνοντας τη παροχή αέρα σε ένα κομπρεσέρ αυξάνει παράλληλα και το κόστος του ρεύματος αναλογικά. Διαπιστώθηκε όμως ότι, κάθε κομπρεσέρ αέρα βγάζει μόνο μια συγκεκριμένη παροχή και μόνο την πίεση μπορεί κανείς να μεταβάλει. Έτσι, θα χρειαζόταν να ανατρέξει κανείς σε τρία διαφορετικά κομπρεσέρ αέρα 4,6 και 10 L/α παροχών και να βρει και το λειτουργικό κόστος του καθενός αφού γνωρίζει ποσά watt παρέχει το καθένα και πόση ώρα θα λειτουργεί μέχρι να μηδενιστεί ο ρύπος. Έτσι εύκολα θα γινόταν η κοστολόγηση της κάθε περίπτωσης μέσω του τύπου:

ΚΟΣΤΟΣ = KWATT * ΚΟΣΤΟΣ ΚΩΡΑΣ * ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ(ΩΡΕΣ)

Να σημειωθεί ότι το κόστος της εκάστοτε συσκευής παροχής αέρα δεν λαμβάνεται υπόψη γιατί βρέθηκε γι'αυτές τις παροχές να είναι το ίδιο ακριβώς και γίνεται εστίαση στο κόστος λειτουργίας.

Ενδεικτικά έγινε επιλογή τριών κομπρεσέρ αέρα της εταιρίας Golden Saqi για τις επιθυμητές παροχές αέρα που χρειάζονταν. Παρακάτω παρουσιάζεται πίνακας παροχών και της εκάστοτε ισχύος για κάθε παροχή.

ΠΑΡΟΧΗ ΑΕΡΑ(ΛΙΤΡΑ/ΛΕΠΤΟ)	ΙΣΧΥΣ (WATT)
4	170
6	190
10	200

Πινάκας 61: Ισχύς κομπρεσέρ αέρα ανάλογα την παροχή αέρα που παράγουν.

Η μέση τιμή κιλοβατώρας στην Αθήνα είναι 0.10 ευρώ (σύμφωνα με το Υπουργείο Ανάπτυξης, περιλαμβάνοντας ΦΠΑ 9%

ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΙ ΑΕΡΙΣΜΟΙ

ΠΑΡΟΧΗ ΑΕΡΑ (ΛΙΤΡΑ/ΛΕΠΤΟ)	ΙΣΧΥΣ (KWATT)	ΚΟΣΤΟΣ Kwh(ΕΥΡΩ)	ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ(ΛΕΠΤΑ)	ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ(ΩΡΕΣ)	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)
4	0,17	0,10	40’	0,67	0,0114
6	0,19	0,10	35’	0,58	0,0110
10	0,20	0,10	25’	0,42	**0,0084**

Πίνακας 62: Συνολικό κόστος κάθε παροχής.

ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΙ ΑΕΡΙΣΜΟΙ

ΠΑΡΟΧΗ ΑΕΡΑ (ΛΙΤΡΑ/ΛΕΠΤΟ)	ΙΣΧΥΣ (KWATT)	ΚΟΣΤΟΣ Kwh (ΕΥΡΩ)	ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (ΩΡΕΣ)	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)
4	0,17	0,10	32’	0,53	0,0090
6	0,19	0,10	27’	0,45	0,0086
10	0,20	0,10	17’	0,28	**0,0056**

Πίνακας 63: Συνολικό κόστος κάθε παροχής.

Από τις συγκρίσεις παρατηρήθηκε ότι, η παροχή 10 λίτρα /λεπτό αποδεικνύεται ως πιο οικονομική σε σχέση με τις άλλες δυο παροχές. Αυτό οφείλεται στο χρονικό διάστημα που εξοικονομείται δουλεύοντας με μεγαλύτερη παροχή καθώς και στην μικρή διαφορά ανάμεσα στα watt που παρέχει το κομπρεσέρ αέρα παροχής 10 λίτρα/λεπτό σε σχέση με τα αλλά δυο κομπρεσέρ που διαθέτονταν και εξετάστηκαν. Όπως αναμενόταν από τα χρονικά διαστήματα οι διακοπτόμενοι αερισμοί είναι οικονομικότεροι σε σχέση με τους αντίστοιχους συνεχείς.

Συνεπώς, για μικρές παροχές αέρα συμφέρει τόσο από χρονική όσο και από οικονομική άποψη να χρησιμοποιείται η μεγαλύτερη παροχή που μπορεί να αντέξει το σύστημα σε διακοπτόμενο αερισμό.

Αυτό όμως δεν μπορεί να γενικευτεί και στο πεδίο όπου πραγματικά υπάρχει το ενδιαφέρον. Στο πεδίο συνήθως οι ελάχιστες παροχές κυμαίνονται στα 40 λίτρα/λεπτό και φτάνουν τα 1100 λίτρα/λεπτό, ανάλογα πάντα τις δυνατότητες αντοχής του πεδίου σε τέτοιες μεγάλες παροχές αέρα καθώς και στην γεωμορφολογία της εκάστοτε περιοχής. Εξετάζοντας αντίστοιχα κομπρεσέρ αέρα για τέτοια εύρη παροχών διαπιστώνεται ότι υπάρχει μια αναλογική τάση αύξησης ανάμεσα στις παροχές και στα watt .Δηλαδή ενώ για μικρές παροχές τα watt ανεβαίνουν ελάχιστα με την αύξηση της παροχής (στο πείραμα μας για παροχή 4λιτρα/λεπτο το κομπρεσέρ έχει ισχύ 170 watt και σε παροχή 10λιτρα/λεπτο παρέχει 200 watt), σε μεγαλύτερα εύρη διπλασιασμός παροχής συνεπάγεται και μεγάλη αύξηση στα watt ίσως και διπλασιασμό σε ορισμένα κομπρεσέρ μερικών εταιριών (Bormann,Einhell,Express,Michelin,Toros,Combi,Abac και άλλες). Έτσι σίγουρα η διαφορά στο κόστος ανάμεσα σε μεγάλες παροχές θα είναι αρκετά μεγάλη για την μεγαλύτερη πάντα προς σύγκριση παροχή εκτός και αν το χρονικό διάστημα που κερδίζεται είναι τόσο μεγάλο οπότε στον τελικό τύπο του κόστους θα υπάρχει εξισορρόπηση ή και πιθανή επικράτηση της μεγαλύτερης παροχής. Ακόμα ,υπάρχει αισθητή διαφορά και στην τιμή του εκάστοτε κομπρεσέρ η οποία δεν υπήρχε για μικρές παροχές.

5.2.3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΝΑ ΜΑΖΑ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΟΜΕΝΟΥ ΡΥΠΟΥ

Στους παρακάτω πίνακες υπολογίστηκε το κόστος που επιβαρύνει κάποιον για την απομάκρυνση ενός ppm BTEX σε κάθε πείραμα ξεχωριστά . Προς ευκολία θεωρήθηκε ότι συνολικά απομακρύνθηκαν 57 ppm σε κάθε πείραμα (60-3=57 ppm ,όπου 3 ήταν το όριο που είχε τεθεί σαν κατώφλι μηδενισμού προς εξοικονόμηση χρόνου πειραμάτων).

ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΙ ΑΕΡΙΣΜΟΙ

ΠΑΡΟΧΗ ΑΕΡΑ (ΛΙΤΡΑ/ΛΕΠΤΟ)	BTEX ΠΟΥ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΘΗΚΑΝ	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)	ΚΟΣΤΟΣ(ΕΥΡΩ) /PPM
4	57	0,01140	**0,00020**
6	57	0,01100	**0,00019**
10	57	0,00840	**0,00014**

Πίνακας 64: Κόστος ανά ppm BTEX που απομακρύνεται στην κάθε παροχή.

Φαίνεται ότι για την απομάκρυνση ενός ppm BTEX χρειάζονται 0,00014 ευρώ χρησιμοποιώντας συνεχή παροχή 10λιτρα/λεπτο.
(Χρησιμοποιήθηκαν περισσότερα δεκαδικά ψηφία για να φάνει η διαφορά ανάμεσα στα κόστη.)

ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΙ ΑΕΡΙΣΜΟΙ

ΠΑΡΟΧΗ ΑΕΡΑ (ΛΙΤΡΑ/ΛΕΠΤΟ)	BTEX ΠΟΥ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΘΗΚΑΝ	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)	ΚΟΣΤΟΣ(ΕΥΡΩ) /PPM
4	57	0,0090	**0,00016**
6	57	0,0086	**0,00015**
10	57	0,0056	**0,00009**

Πίνακας 65: Κόστος ανά ppm BTEX που απομακρύνεται στην κάθε παροχή.

Όπως αναμενόταν η μεγαλύτερη παροχή και εδώ είχε το μικρότερο κόστος απομάκρυνσης. Συγκεκριμένα, για την απομάκρυνση ενός ppm BTEX χρειάζονται 0,00009 ευρώ χρησιμοποιώντας διακοπτόμενη παροχή 10λιτρα/λεπτο.Ακομα είναι φανερή η οικονομική διαφορά ανάμεσα σε διακοπτόμενους και συνεχείς αερισμούς με τους διακοπτόμενους να έχουν μικρότερο κόστος για την απομάκρυνση ενός ppm ρύπου.

Όσον αφορά τώρα τα πειράματα που έγιναν με 30 ppm BTEX και σε αυτά φαίνεται η ιδία συμπεριφορά, δηλαδή στην 4 λίτρα/λεπτό παροχή ο διακοπτόμενος αερισμός είναι πιο γρήγορος χρονικά από τον συνεχή (και εδώ κατά 8 λεπτά) και συνεπώς πιο οικονομικός.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η μέθοδος εξυγίανσης υπόγειων και ρυπασμένων νερών καθώς και εδάφους in well Air Sparging τόσο από αποδοτική πλευρά όσο και από οικονομική, μεταβαλλόντας τις παροχές διοχετευόμενου αέρα στο σύστημα καθώς και την εναλλαγή από συνεχή σε διακοπτόμενο αερισμό για την εύρεση της βέλτιστης επιλογής. Μία πλήρης και καλή προσομοίωση με γεωμορφολογικές συνθήκες πεδίου δεν ήταν απαραίτητη αφού η επέμβαση της μεθόδου γίνεται αποκλειστικά στο νερό έχοντας το in well πηγάδι το οποίο ‘’ροφά’’ το νερό από το κορεσμένο έδαφος, έτσι τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν από τα πειράματα μπορούν να γενικευτούν για in well Air Sparging περιπτώσεις αφού αντικείμενο μελέτης καθαρισμού και επέμβασης είναι μόνο το νερό και δεν παίζει ρόλο η γεωμορφολογική διάταξη της κάθε περιοχής.

Έλαβαν χώρα έντεκα πειράματα, δυο εκ των οποίων έγιναν για την εύρεση τυχόν απωλειών λόγω κατασκευής της στήλης. Στη συνέχεια ακλούθησαν τέσσερα πειράματα συγκέντρωσης BTEX 60 ppm, συνεχούς αερισμού σε παροχές 4,6,10 και 14 λίτρα/λεπτό και τέλος 3 πειράματα διακοπτόμενου αερισμού με παροχές 4,6,και 10 λίτρα/λεπτό. Η παροχή 14λιτρα/λεπτο (παροχή αντοχής) δεν μελετήθηκε και σε διακοπτόμενο γιατί έφτανε τη στήλη στα όρια αντοχής της και υπήρχε κίνδυνος ατυχήματος και συνεπώς δεν πηρέ μέρος και στις μετέπειτα συγκρίσεις. Ακόμα, έγιναν και δυο πειράματα σε συγκέντρωση BTEX 30 ppm τόσο σε συνεχή όσο και σε διακοπτόμενο αερισμό παροχής 4 λίτρα/λεπτό, για να εξεταστεί και εδώ την συμπεριφορά του ρύπου κατά την διοχέτευση του αέρα.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, το επιλεχθέν σύστημα Air Sparging κρίθηκε αρκετά αποτελεσματικό αφού ο κύριος στόχος επετεύχθη μειώνοντας-μηδενίζοντας το ρύπο (BTEX) σε σύντομο χρονικό διάστημα. Όσον αφορά την κατασκευή της στήλης, διαπιστώθηκε ότι ήταν πολύ καλή στο θέμα απωλειών αφού εξασφάλισε μηδαμινές απώλειες λόγω φυσικής εξάτμισης των ρύπων όταν δεν υπήρχε αερισμός που σημαίνει ότι μετέπειτα στα πειράματα η απομάκρυνση οφειλόταν αποκλειστικά και μόνο στην επεξεργασία του Air Sparging.

Συμφώνα με τα αποτελέσματα της **αποδοτικής σύγκρισης** ως προς το χρόνο αρχικά, όπως αναμενόταν και είναι γνωστό και από τη βιβλιογραφία ,αύξηση της παροχής αέρα στο σύστημα συνεπάγεται και αύξηση στο ρυθμό εξάτμισης και επομένως μείωση στο χρόνο μηδενισμού του ρύπου. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα από τα πειράματα του διεξήχθησαν. Βλέπει κανείς ότι αυξάνοντας τη παροχή μειώνεται και ο χρόνος λειτουργίας του αερισμού. Όσον αφορά το χρόνο δηλαδή, φαίνεται ότι η παροχή 10 λίτρα/λεπτό είναι η καλύτερη αφού είναι και η μεγαλύτερη που χρησιμοποιήθηκε και έχει τον μικρότερο χρόνο λειτουργίας του αερισμού μέχρι τον μηδενισμό .Έτσι λοιπόν μπορεί κανείς να πει ότι η παροχή 10 λίτρα/λεπτό είναι καλύτερη ως προς το χρόνο σε σχέση με τις παροχές 4 και 6 λίτρα/λεπτό.

Από τα αποτελέσματα ακόμα φαίνεται καθαρά ότι, γιατί το εύρος παροχών οι συνεχόμενοι αερισμοί είναι πιο αποδοτικοί ως προς το χρόνο (γρηγορότεροι) σε σχέση με τους διακοπτόμενους στις ίδιες παροχές.

Συμπέρασμα: αν ενδιαφέρει κάποιον ο χρόνος και θέλει να εξαλείψει τον ρύπο πιο γρήγορα τότε για αυτά τα εύρη παροχών (μικρές παροχές <14 λίτρα/λεπτό) καλό είναι να διαλέγει την πιο μεγάλη παροχή που έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει από πλευράς κομπρεσέρ αέρα καθώς και αντοχής του πεδίου, με συνεχόμενη λειτουργιά.

Από τα αποτελέσματα της αποδοτικής σύγκρισης με αναφορά τα ppm BTEX που απομακρύνει κάθε λίτρο αέρα που παρέχεται στη στήλη φαίνεται η μικρότερη παροχή που

χρησιμοποιήθηκε δηλαδή τα 4 λίτρα/λεπτό είναι πιο αποδοτική. Επίσης, φαίνεται καθαρά ότι γι'αυτό το εύρος παροχών οι διακοπτόμενοι αερισμοί είναι πιο αποδοτικοί ως προς την απομάκρυνση ppm ρύπου ανά λίτρο αέρα που παρέχεται στο σύστημα σε σχέση με τους συνεχόμενους στις ίδιες παροχές.

Συμπέρασμα: αν ενδιαφέρει κάποιον η απομάκρυνση ppm ρύπου ανά λίτρο αέρα που παρέχεται , τότε για αυτά τα εύρη παροχών (μικρότερες των 14 λίτρων/λεπτό) πρέπει να διαλέγει την πιο μικρή παροχή με διακοπτόμενη λειτουργιά.

Καταλήγοντας, ανάλογα τι επιθυμεί ο καθένας που εφαρμόζει την μέθοδο, διαλέγει μικρή ή μεγάλη παροχή. Μικρές παροχές αν τον ενδιαφέρει το κάθε λίτρο αέρα που παρέχει να απομακρύνει περισσότερο ρύπο (αν και στην πραγματικότητα δεν υπάρχει κανένα όφελος με αυτή την σκέψη ούτε χρονικό ούτε οικονομικό) και μεγάλες παροχές αν θέλει να τελειώνει πιο γρήγορα με την εξυγίανση. Όλες οι παροχές κρίνονται καλές για τον αρχικό τους στόχο δηλαδή την εξάλειψη του ρύπου που σημαίνει ότι η όλη διάταξη κατασκευάστηκε και λειτούργησε σωστά και επιτυχώς. Όσον αφορά όμως συνεχή ή διακοπτόμενο αερισμό τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπερέχει ο συνεχόμενος αερισμός γι'αυτές τια παροχές και αυτός πρέπει να εφαρμόζεται.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της **οικονομικής σύγκρισης** η παροχή 10 λίτρα /λεπτό αποδεικνύεται ως πιο οικονομική σε σχέση με τις άλλες δυο παροχές. Αυτό οφείλεται στο χρονικό διάστημα που εξοικονομείται δουλεύοντας με μεγαλύτερη παροχή καθώς και στη μικρή διαφορά ανάμεσα στην ισχύ (watt) που παράγει το κομπρεσέρ αέρα παροχής 10 λίτρα/λεπτό σε σχέση με τα άλλα δυο κομπρεσέρ που διαθέτονταν και εξετάστηκαν. Όπως αναμενόταν από τα λειτουργικά χρονικά διαστήματα οι διακοπτόμενοι αερισμοί είναι οικονομικότεροι σε σχέση με τους αντίστοιχους συνεχείς.

Συνεπώς: για μικρές παροχές αέρα συμφέρει τόσο από χρονική όσο και από οικονομική άποψη να χρησιμοποιείται η μεγαλύτερη παροχή που μπορεί να αντέξει το σύστημα σε διακοπτόμενο αερισμό.

Από τα αποτελέσματα για την εύρεση του κόστους ανά μάζα απομακρυνόμενου ρύπου, όπως αναμενόταν η μεγαλύτερη παροχη (10λιτρα/λεπτο) και εδώ είχε το μικρότερο κόστος απομάκρυνσης. Ακόμα, είναι φανερή η οικονομική διαφορά ανάμεσα σε διακοπτόμενους και συνεχείς αερισμούς με τους διακοπτόμενους να έχουν μικρότερο κόστος για την απομάκρυνση ενός ppm ρύπου.

Από τα πειράματα που έγιναν με 30 ppm BTEX ως αρχική συγκέντρωση και σε αυτά φάνηκε η ίδια συμπεριφορά δηλαδή στην 4 λίτρα/λεπτό παροχή (η μονή παροχή που εξετάστηκε) ο συνεχόμενος αερισμός είναι πιο γρήγορος χρονικά από το διακοπτόμενο και αναμένεται και εδώ πιο οικονομικός ο διακοπτόμενος.

Συνοψίζοντας, σε μικρά εύρη παροχών καλό είναι να χρησιμοποιείται η μεγαλύτερη παροχή που μπορεί να εφαρμοστεί στο πεδίο έχοντας κάνει πρώτα ένα τεστ αντοχής για να αποφευχθεί οποισδήποτε κίνδυνος όπως ανύψωση χώματος αλλά και εμφάνιση στατικού ηλεκτρισμού από τους ατμούς που ανέρχονται. Σίγουρα κρίνεται αναγκαία η χρήση διακοπτόμενου αερισμού και όχι συνεχή για να έχει κανείς την μέγιστη οικονομική απόδοση.Χρονικά αντίθετα συμφέρει η χρήση συνεχή αερισμου. Όμως είναι δύσκολη μια γενίκευση και επιλογή μιας συγκεκριμένης παροχής (μεγίστης απόδοσης και χαμηλότερου κόστους) για ένα τυπικό σύστημα Air Sparging, γιατί κάθε περιοχή μελέτης και εξυγίανσης έχει τα δικά της χαρακτηριστικά (κυρίως γεωμορφολογικά) και σίγουρα η σωματοποιημένη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο είναι κάτι το ιδανικό και προς διευκόλυνση των πειραμάτων μόνο και δεν συναντάται στο πεδίο. Χρησιμότερα κρίνονται τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν για in well Air Sparging στο οποίο όπως και στην στήλη ασχολείται κανείς αποκλειστικά και μόνο με το ρυπασμένο νερό. Ακόμη, μια ασφαλής πρόβλεψη κόστους είναι αδύνατη εκ των προτέρων πριν από την έναρξη λειτουργίας του αερισμού, αφού πρέπει να είναι γνωστός ο ακριβής χρόνος μηδενισμού του ρύπου και η

πρόβλεψη του είναι αδύνατη αφού στο πεδίο μπορεί να υπάρχει είτε μια συνεχή πηγή ρύπανσης είτε να εμπλουτίζεται η περιοχή από διασκορπισμένο κοντινό ρύπο έτσι η αρχική συγκέντρωση θα είναι δύσκολο να μετρηθεί (αφού συνεχώς θα αυξομειώνεται) ώστε να γίνει πρόβλεψη πιθανού κόστους, σε αντίθεση πάντα με την στήλη που επιλέχτηκε από η αρχική επιθυμητή συγκέντρωση των BTEX.

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Μια καλή πρόταση θα ήταν να μπορούσε να συλλεχτεί και να μετρηθεί η ποσότητα των υδρογονανθράκων (ίσως με υγροποίηση) που βγαίνει από την στήλη είτε ως φυσική εξάτμιση είτε με την βοήθεια των πηγαδιών άντλησης ατμών. Έτσι θα είχε κανείς μια καλύτερη εικόνα του τι βγαίνει προς την επιφάνεια και μετρώντας την συγκέντρωση των υδρογονανθράκων θα μπορούσε να αποφανθεί αν χρειάζεται συλλογή τους και περεταίρω επεξεργασία ή να τους αφήσει φυσικά να διέλθουν από το χώμα και να βγουν στην ατμόσφαιρα. Ειδικά αν πάνω από την ρυπασμένη περιοχή βρίσκονται οικισμοί ,πόσιμα ύδατα και καλλιέργειες πρέπει να ξέρει κανείς την ακριβή συγκέντρωση που εξέρχεται της επιφάνειας του εδάφους για τι ο κίνδυνος ρύπανσης είναι προφανής (είτε να απορροφηθούν κατά την αναπνοή , είτε κατά την πόση νερού ακόμα με την βρώση φυτών των οποίων οι ρίζες έχουν απορροφήσει σημαντικές ποσότητες ρύπων). Μια καλή λύση θα ήταν η τοποθέτηση προσροφητικών υλικών όπως ενεργού άνθρακα λίγο πριν το ριζικό σύστημα στο έδαφος έτσι ώστε να προσροφούνται σε αυτό όλοι οι ατμοί που παράγονται και να απομακρύνεται εν συνεχεία .Ενδιαφέρον θα είχε ακόμα αν μετρούσε κάποιος το ποσοστό των υδρογονανθράκων σε ένα λίτρο για παράδειγμα αέρα που εξέρχεται από την επιφάνεια του εδάφους για κάθε εξεταζόμενη παροχή.

Θα μπορούσε ακόμα να επέμβει κάποιος στον τρόπο κατασκευής της στήλης και να εξετάσει και άλλους λειτουργικούς παράγοντες. Ένας κύριος παράγοντας που θα μπορούσε να εξεταστεί είναι η πίεση. Αρχικά θα μπορούσε να βρεθεί η ελάχιστη και η μέγιστη δυνατή πίεση που μπορεί να εφαρμοστεί στο πεδίο και στη στήλη αντίστοιχα καθώς και να μεταβληθεί ώστε να βρισκόταν η βέλτιστη τιμή για την οποία ίσως θα υπήρχε η μεγαλύτερη και γρηγορότερη απομάκρυνση των ρύπων.Ο διακοπτόμενος αερισμός ακόμα θα μπορούσε να εξεταστεί εκτός από 5άλεπτα και για άλλα χρονικά διαστήματα όπως ανά ένα ή δύο λεπτά αερισμού. Για τη στήλη θα μπορούσαν να αλλαχτούν οι διαστάσεις της ακόρεστης ζώνης καθώς και το ύψος του νερού καθώς και να γέμιζε η στήλη νερού με χώμα και χαλίκι ώστε να γινόταν μια καλή προσομοίωση του κανονικού συστήματος Air Sparging. Χρήσιμο θα ήταν να αντικαθιστούσε κανείς και το νερό με υφάλμυρο να παρατηρούσε και εδώ τη συμπεριφορά του συστήματος αν εξετάζουμε υφάλμυρους υδροφορείς.

Μια καλή ερευνά θα αφορούσε το χώμα πάνω από το νερό. Θα μπορούσαν να δοκιμαστούν διαφορά είδη χώματος διαφορετικής κοκκομετρίας καθώς και να μεταβαλλόταν η υγρασία του χώματος ώστε να παρατηρηθεί αν όντως στα υγρά και με μεγάλο πορώδες εδάφη η εξάτμιση είναι γρηγορότερη.

Τέλος, μια ωραία έρευνα και μελέτη θα αφορούσε σε παράγοντες που επηρεάζουν την εξάτμιση. Αρχικά ,θα μπορούσε να μεταβληθεί η θερμοκρασία στη στήλη αυξομειώνοντας την ώστε να ερευνηθεί αν όντως μια αύξηση θα επιφέρει γρηγορότερα αποτελέσματα στην εξάτμιση. Αυτό θα μπορούσε να γίνει είτε με χρήση κλιματιστικού στο εργαστήριο είτε με μια δεξαμενή νερού στην οποία θα βρίσκεται μέσα η στήλη και εύκολα θα μεταβαλλόταν η θερμοκρασία του νερού και συνεπώς και της στήλης. Θα ήταν καλό να δοκιμάζονταν και ουσίες οι οποίες ευνοούν την εξάτμιση όπως το αλάτι που μπαίνει στην μέθοδο spme αλλά όχι χημικές επικίνδυνες ουσίες γιατί έτσι θα μολυνόταν το νερό αντί να καθαριζόταν .Ενδιαφέρον θα είχε και η χρήση αντί για αέρα, οξυγόνου ή όζοντος για τυχόν καλυτέρα αποτελέσματα.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία:

16.Βουρδιας ,2000 :''Εξυγίανση εδαφών και υπόγειων υδάτων από τα επικίνδυνα απόβλητα '',Εκδόσεις Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης.

14.Ευάγγελος Γιδαράκος, Μαρία Αϊβαλιώτη : ''Τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών και υπόγειων υδάτων από επικινδύνους ρύπους'', Εκδόσεις Ζυγός Θεσσαλονίκη.

26. Pecsok/Shields/Cairns/McWilliam, Σύγχρονες μέθοδοι στη Χημική Ανάλυση Εκδόσεις Πνευματικός.

Ξένη βιβλιογραφία:

2. Miller, R. R. "Air sparging - Technology Overview Report", Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, October 1996.

3. Restoration of petroleum-contaminated aquifers / Stephen M. Testa, Duane L. Winegardner

7. Urban P.Lucas E., Pelclous D. et al, „" Neurological and Neurephysiologicl follow up on workers with severe chronic explosure to toluene"", 2003.

17. Petroleum mass removal from low permeability sediment using air sparging/soil vapor extraction: impact of continuous or pulsed operation, Brian C. Kirtlanda, C.Marjorie Aelion, Department of Environmental Health Sciences, University of South Carolina, Columbia, USA ,Marine Science Program, University of South Carolina, Columbia, 1998.

18.Suthersan S. Suthan(1996)''Remediation Engineering :Design Concepts " Lewis Publishers.

19.FRTR Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide,version 4.
20.Norris, Hinchee, Brown, McCarty, Semprini, Wilson, Kampbell, Reinhard, Bouwer,Borden, Vogel, Thomas, Ward, Kerr R., "Handbook of Bioremediation", Lewis Publishers, 1994.

21. Semer, R. and Reddy, R. K., "Mechanisms controlling toluene removal fromsaturated soils during in situ air sparging", Journal of Hazardous Materials, October, 1996.

23. Naval Facilities Engineering Service Center, "Final Air Sparging Guidance Document", August, 2001.

24. U.S. Army Corps of Engineers, "Engineering and Design – IN-SITU AIR SPARGING", Engineer Manual, 1997.

25. Leeson A., Johnson C. P., Johnson L. R., Vogel M. C., Hiinchee E. R., Marley M. Peargin T., Bruce L. C., Amerson L. I., Coonfare T. C., Gillespie D. R. and McWhorter B. D. «Air sparging design paradigm», Battelle, August, 2002.

Διαδικτυακές πηγές:

1. www.toxic.usgs.gov

15. www.environmental.com

4. http://en.wikipedia.org/wiki/Benzene

5. http://en.wikipedia.org/wiki/Toluene

6. http://www.epa.gov/ttn/atw/hlthef/toluene.html

8. http://en.wikipedia.org/wiki/Ethylbenzene

9. http://www.npi.gov.au/index.html

10. http://www.epa.gov/ttn/atw/hlthef/ethylben.html

11. http://en.wikipedia.org/wiki/Xylene

12. http://www.epa.gov/ttn/atw/hlthef/xylenes.html

13. http://www.temarry.com/chemicals/xylene.htm

22. www.nfesc.navy.mil