

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ
«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΞΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«Πιλοτική Εφαρμογή της Μεθόδου Air Sparging για την Εξυγίανση
Υδροφορέα σε Διυλιστήριο Πετρελαίου»

ΜΑΡΙΑ ΑΪΒΑΛΙΩΤΗ
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ
Ευάγγελος Γιδάρακος (Επιβλέπωντας Καθηγητής)
Νικόλαος Καλογεράκης
Γεώργιος Καρατζάς

ΧΑΝΙΑ
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2005

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω κάποια άτομα, τα οποία με τον δικό τους τρόπο με στήριξαν και βοήθησαν στην πραγματοποίηση και ολοκλήρωσή της διατριβής μου.

Πριν από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ευάγγελο Γιδάρako, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα, όπως είναι αυτό της εξυγίανσης υπόγειων υδροφορέων. Μαζί του είχα την ευκαιρία όχι μόνο να μελετήσω πιθανές τεχνολογίες αποκατάστασης υπογείων υδάτων, αλλά να σχεδιάσω και να εφαρμόσω στην πράξη μια από αυτές, αποκτώντας πρωτόγνωρη για εμένα εμπειρία. Καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου ήταν διαθέσιμος και πρόθυμος συμβουλευτής, αλλά κυρίως έμπειρος και ανεκτίμητος καθοδηγητής.

Ακόμη οφείλω να ευχαριστήσω την εταιρία ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ Α.Ε. και συγκεκριμένα τη διοίκηση του διυλιστηρίου Ασπροπύργου για την εμπιστοσύνη που έδειξαν στο εργαστήριο μας (Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικινδύνων Αποβλήτων), παραχωρώντας μας το χώρο για την εγκατάσταση και τη λειτουργία του πιλοτικού συστήματος air sparging, αποδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο την έντονη περιβαλλοντική τους ευαισθησία και συνείδηση.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Δαμιανό Σπύρο, Φίλη Ιωάννη και Πούλη Μανόλη, οι οποίοι ως προσωπικό του Πολυτεχνείου Κρήτης στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «Πρόληψη Διαρροών, Άντληση και Αποκατάσταση Υπεδάφους» με επιστημονικό υπεύθυνο τον κ. Ευάγγελο Γιδάρako, αποτέλεσαν «τα μάτια μας και τα αυτιά μας» στο διυλιστήριο του Ασπροπύργου, όπου ήταν εγκατεστημένο το σύστημα air sparging, καθιστώντας εφικτή την ομαλή και ασφαλή λειτουργία του.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω το προσωπικό του Εργαστηρίου Ανάλυσης Ρευστών και Πυρήνων Υπόγειων Ταμιευτήρων του Τμήματος Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και συγκεκριμένα τον Λέκτορα κ. Νικόλαο Πασαδάκη και τη Μηχανικό Ορυκτών Πόρων κ. Κανελλοπούλου Γεωργία, οι οποίοι υπήρξαν άριστοι συνεργάτες, παρέχοντας σημαντική βοήθεια και πραγματοποιώντας πολλές αναλύσεις δειγμάτων υπόγειου νερού.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ρύπανση υπογείων υδάτων και εδαφών με πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες αποτελεί ένα κοινό πρόβλημα, το οποίο καλείται να αντιμετωπίσει κάθε διυλιστήριο ή εγκατάσταση αποθήκευσης πετρελαίου. Μεταξύ των πολλών τεχνολογιών αποκατάστασης που έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, βρίσκεται και το air sparging. 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 ένα από τα πλέον υποσχόμενα «εργαλεία» εξυγίανσης.

Στην παρούσα διατριβή μελετάται και επιδεικνύεται η εφαρμογή της τεχνολογίας air sparging στο ρυπασμένο υπέδαφος ενός διυλιστηρίου πετρελαίου. Το εν λόγω πεδίο παρουσιάζει πολλά προβλήματα ρύπανσης που αφορούν το υπόγειο νερό, το έδαφος και τον εδαφικό αέρα. Τα πρώτα σημάδια ρύπανσης παρουσιάστηκαν πριν 20 χρόνια με την εμφάνιση ελεύθερης ελαιώδους φάσης, η οποία επέπλεε στον υδροφορέα του μεγαλύτερου μέρους του διυλιστηρίου. Η τεχνική χημικού αποτυπώματος (fingerprinting) εφαρμόστηκε για το χαρακτηρισμό της φάσης αυτής και τη σύνδεσή της με δεξαμενές που ίσως παρουσίαζαν διαρροές. Ταυτόχρονα, εφαρμόστηκε η τεχνική άντλησης ελαιωδών bioslurping σε μια προσπάθεια να ανακτηθεί το διαρρέον προϊόν και να αποκατασταθεί ο υδροφορέας. Τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά καθώς σήμερα το πλούσιο της ελαιώδους φάσης έχει περιοριστεί σημαντικά.

Σήμερα το σημαντικότερο πρόβλημα ρύπανσης δεν είναι η ελεύθερη ελαιώδης φάση αλλά ο εδαφικός αέρας και το υπόγειο νερό. Ο εδαφικός αέρας έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε πτητικούς υδρογονάνθρακες, παρουσιάζοντας σημαντικό κίνδυνο πραγματοποίησης ανάφλεξης ή έκρηξης. Παράλληλα, το υπόγειο νερό παρουσιάζει μεγάλες συγκεντρώσεις TPH (Total Petroleum Hydrocarbons), BTEX (Benzene – Toluene – Ethyl-benzene – Xylene) and MTBE (Methyl Tertiary-Butyl Ether), ειδικά σε ορισμένα μέρη του διυλιστηρίου.

Για την εφαρμογή του air sparging επιλέχτηκε ένα συγκεκριμένο τμήμα του διυλιστηρίου, όπου επικρατεί σημαντική ρύπανση του υπόγειου νερού αλλά δεν παρουσιάζεται καθόλου ελεύθερη φάση. Όλα τα απαιτούμενα στοιχεία (τόσο

υδρογεωλογικά, όσο και χημικά) συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια διεξαγωγής μελέτης εφαρμοσιμότητας της τεχνολογίας, η οποία τελικά απέδειξε ότι το air sparging είναι ικανό να εξυγιάνει το συγκεκριμένο πεδίο. Όπως προέκυψε, η πλειονότητα των ρυπαντών είναι πτητικοί ή ήμι-πτητικοί και μπορούν να μεταφερθούν στην αέρια φάση σχετικά εύκολα. Επιπλέον, το έδαφος στο συγκεκριμένο τμήμα του διυλιστηρίου αποτελείται κυρίως από άμμο, χαλίκι, πηλό και άργιλο (σε διάφορα ποσοστά), παρουσιάζοντας ικανοποιητική διαπερατότητα. Τελικά, ακολούθησε ο σχεδιασμός, η εγκατάσταση του συστήματος και η λειτουργία του.

Η λειτουργία ξεκίνησε σταδιακά σε ένα μόνο πηγάδι, υπό συνεχή παρακολούθηση, προκειμένου να εκτιμηθεί η καταλληλότητα των επιλεχθέντων σχεδιαστικών και λειτουργικών παραμέτρων του συστήματος. Επίσης, μελετήθηκε η «αντίδραση» του υπεδάφους στην λειτουργία της μονάδας (συγκέντρωση υδρογονανθράκων στον εδαφικό αέρα, αναπτυσσόμενες πιέσεις στο υπέδαφος, κα.), δεδομένου ότι η ανάγκη αποκλεισμού οποιουδήποτε πιθανού κινδύνου ατυχήματος ήταν άκρως αναγκαία. Η δοκιμαστική λειτουργία, η οποία κράτησε ένα μήνα, επιβεβαίωσε την καλή λειτουργία του συστήματος και ως εκ τούτου πραγματοποιήθηκε επέκταση αυτού σε 4 ακόμη πηγάδια.

Η διοχέτευση αέρα σε πέντε διαφορετικά πηγάδια της ρυπασμένης περιοχής συνεχίστηκε για 5 μήνες. Τα αποτελέσματα των πρόσφατων δειγματοληψιών και αναλύσεων υπόγειου νερού δείχνουν σημαντική μείωση των συγκεντρώσεων TPH και BTEX (μέχρι και κατά 98% σε ορισμένα πηγάδια), αποδεικνύοντας ότι η τεχνολογία air sparging κατάφερε να αντιμετωπίσει με επιτυχία αυτούς τους ρυπαντές σε αρκετά μικρό χρονικό διάστημα. Παρόλα αυτά, τα συστατικά MTBE παραμένουν παρόντα στο υπόγειο νερό, χωρίς εμφανή σημάδια μείωσης, καθιστώντας αναγκαία την περαιτέρω μελέτη της απομάκρυνσής τους με εφαρμογή είτε του air sparging, είτε άλλων εναλλακτικών τεχνολογιών εξυγίανσης.

ABSTRACT

Groundwater and soil contamination by petroleum hydrocarbons is a very common problem that almost every refinery or petroleum storage facility has to deal with. Many are the technologies that have been developed to eliminate such problems, among which there is air sparging. Air sparging presents many advantages that make it relatively easy to apply and very effective. Although this technique is still under investigation and many design and operational parameters are yet to be studied, air sparging is considered to be one of the most promising remediation “tools”.

In this thesis, the application of air sparging on a contaminated petroleum refinery site is demonstrated. The field presents many contamination problems, which concern groundwater, soil and soil gas. The first signs of contamination came along almost 20 years ago when a free oil phase that was floating on the aquifer appeared on the largest part of the refinery. Fingerprinting technique was applied to characterize that phase and to link the free phase stratum to potential linking tanks. In the same time bioslurping was applied in an effort to recover the spilled petroleum product and to remediate the groundwater. The results were very satisfying since today the plume has been greatly restricted.

Today's main contamination problem is not the free oil phase but soil gas and groundwater. Soil gas has high conciseness in volatile hydrocarbons that make it dangerous, as far as the explosion or flammability risk is concerned. On the other hand, groundwater presents high TPH (**T**otal **P**etroleum **H**ydrocarbons), BTEX (**B**enzene – **T**oluene – **E**thyl-benzene – **X**ylene) and MTBE (**M**ethyl **T**ertiary-**B**utyl **E**ther) concentrations, especially in specific parts of the refinery.

A certain part of the refinery, where high groundwater contamination but no free phase was present, was selected for the application of air sparging. All the appropriate data (hydrogeological, as well as chemical) was collected during the feasibility study, which finally showed that air sparging is capable of remediating the field. As it was proven, the majority of the contaminants are volatile or semi volatile compounds that could be transferred to the air phase relatively easily. Moreover, the soil of this certain part of the refinery mainly consists of sand, gravel and silty clay, in various contents, presenting satisfying air permeability. Finally, the design and the installation of the system followed and its operation began.

The operation started gradually in only one well, under continual monitoring, in order to evaluate the adequacy of the system's installation and operational parameters. Also, the sub surface's response to the unit's operation was studied (hydrocarbons' concentration in soil gas, developed pressure in the subsurface, etc), since the need to eliminate any risk or potential accidents was more than great. This experimental operation, which lasted almost 1 month, confirmed the systems' good functionality and therefore the expansion of the system to 4 more wells was actualized.

Air injection in 5 different wells of the contaminated area lasted 5 months. The results of recent groundwater sampling and analysis show a significant decrease in TPH and BTEX concentrations (up to a 98% percentage in some wells), indicating that air sparging has successfully coped with these contaminants in a very short period of time. However, MTBE compounds are still present in groundwater without any clear sign of decrease, promoting the need for further investigation on MTBE removal by air sparging or an alternative remediation technology.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ AIR SPARGING	5
2.1 Γενικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας.....	5
2.2 Δυνατότητες εφαρμογής της τεχνολογίας.....	8
2.3 Μηχανισμοί απομάκρυνσης των ρυπαντών	12
2.3.1 Μηχανισμοί μεταφοράς μάζας και κατανομής.....	13
2.3.2 Μηχανισμοί μετασχηματισμού των ρυπαντών	20
2.3.3 Μηχανισμοί διακίνησης.....	23
2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	25
2.5 Τυπικό σύστημα air sparging	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ AIR SPARGING	33
3.1 Σχεδιασμός συστημάτων Air Sparging	35
3.1.1 Κατανομή αέρα (ζώνη επιρροής)	35
3.1.2 Βάθος εισαγωγής αέρα.....	38
3.1.3 Ρυθμός παροχής αέρα και πίεση διοχέτευσης.....	39
3.1.4 Τρόπος λειτουργίας συστήματος.....	42
3.1.5 Κατασκευή πηγαδιών air sparging	43
3.1.6 Είδος και κατανομή ρυπαντή	46
3.2 Λειτουργία συστημάτων Air Sparging.....	46
3.2.1 Πιλοτικά συστήματα	47
3.2.2 Συστήματα ευρείας κλίμακας.....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	54
4.1 Γενικά στοιχεία	54
4.2 Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά.....	58
4.3 Υφιστάμενη κατάσταση ρύπανσης	60
4.3.1 Ελεύθερη φάση.....	60
4.3.2 Υπόγειο νερό	64
4.3.3 Εδαφικός αέρας	68
4.3.4 Έδαφος	71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ AIR SPARGING.....	73
5.1 Περιοχή εφαρμογής	73
5.2 Επιλεχθέν σύστημα Air Sparging	84
5.3 Χρονοδιάγραμμα και συνθήκες λειτουργίας του συστήματος	86
5.4 Παρακολούθηση λειτουργίας συστήματος (Monitoring).....	89
5.4.1 Υπόγειο νερό	89
5.4.2 Εδαφικός αέρας	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	100
6.1. Δοκιμαστική λειτουργία	100
6.1.1. Υπόγειο νερό	100
6.1.2. Εδαφικός αέρας	106
6.2. Κανονική λειτουργία.....	110
6.2.1. Υπόγειο νερό	110
6.2.2. Εδαφικός αέρας	122
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	126
7.1. Συμπεράσματα δοκιμαστικής λειτουργίας	126
7.2. Συμπεράσματα κανονικής λειτουργίας	130
7.3. Γενικά συμπεράσματα και προτάσεις.....	136
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	141

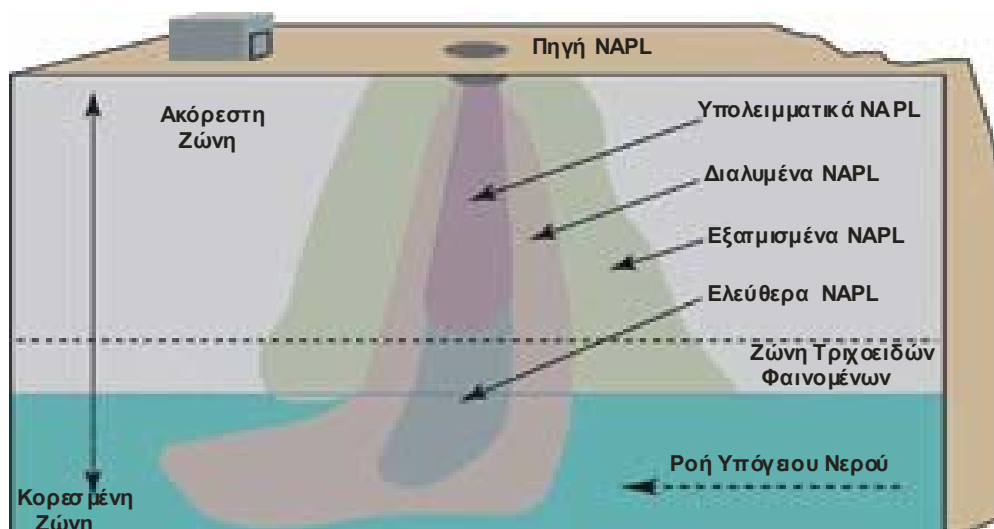
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ρύπανση υπογείων υδάτων με πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες είναι ένα ιδιαίτερα συχνό 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.

Όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται σε αποτελέσματα ερευνών της Αμερικανικής Εταιρίας Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA), σχεδόν μια στις τέσσερις δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαίου ή προϊόντων αυτού παρουσιάζει διαρροή. Ακόμη και μια μικρή διαρροή βενζίνης, της τάξης της μιας σταγόνας ανά δευτερόλεπτο, μπορεί να επιφέρει την απελευθέρωση 1500 λίτρων στο υπόγειο νερό, σε χρονικό διάστημα ενός έτους, προκαλώντας πολύ σοβαρό πρόβλημα υποβάθμισης της ποιότητας του ίδιου αλλά και γενικότερα του ευρύτερου γεινιάζοντος περιβάλλοντος.

Τα πετρελαϊκά προϊόντα παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά από πολλούς άλλους ρυπαντές 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. Τα συστατικά αυτά είναι δυνατόν να είναι ελαφρύτερα από το νερό, οπότε ανήκουν στα λεγόμενα **LNAPL (Light Non – Aqueous Phase Liquids)** και σχηματίζουν ένα στρώμα ελεύθερης φάσης που επιπλέει πάνω στον υδροφορέα, ή πυκνότερα από το νερό, οπότε ανήκουν στα λεγόμενα **DNAPL (Dense Non – Aqueous Phase Liquids)** και βρίσκονται μέσα στον υδροφορέα (www.toxic.usgs.gov).

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 (www.subsurface.inel.gov). Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η ρύπανση που μπορεί να προκληθεί στο υπέδαφος από μια ενδεχόμενη υπέργεια διαρροή NAPL.



Σχήμα 1: Πιθανή κατανομή NAPL στο υπέδαφος μετά από επιφανειακή διαρροή (www.subsurface.inel.gov).

Λόγω της πολύ συχνής εμφάνισης προβλημάτων ρύπανσης υπογείων υδάτων με πετρελαιοειδή, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές εξυγίανσης, οι οποίες είναι ικανές να απομακρύνουν τους ρυπαντές σε οποιαδήποτε φάση και αν βρίσκονται μέσα στο υπέδαφος. Συγκεκριμένα, για την απομάκρυνση εξατμισμένων 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, τα οποία βρίσκονται στην υδατική φάση, αποτελεί πιο σύνθετο πρόβλημα, το οποίο για πολύ καιρό αντιμετωπιζόταν με κλασσικές μεθόδους εξυγίανσης υπογείων υδάτων, όπως για παράδειγμα την τεχνική pump-and-treat. Τα τελευταία 15 χρόνια μια νέα τεχνολογία αποκατάστασης υπογείων υδάτων κέρδισε έδαφος, παρουσιάζοντας πολύ θετικά και ελπιδοφόρα αποτελέσματα στην απομάκρυνση των DNAPL, καθώς και της λεγόμενης υπολειμματικής ρύπανσης. Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται air sparging και αποτελεί μια in-situ τεχνολογία αποκατάστασης εδάφους και υπόγειων υδροφορέων, η οποία περιλαμβάνει την υπό πίεση διοχέτευση ενός αερίου (συνήθως αέρα ή οξυγόνου) στην κορεσμένη ζώνη ενός ρυπασμένου εδάφους, με στόχο την εξάτμιση των ρυπαντών και την ενίσχυση της

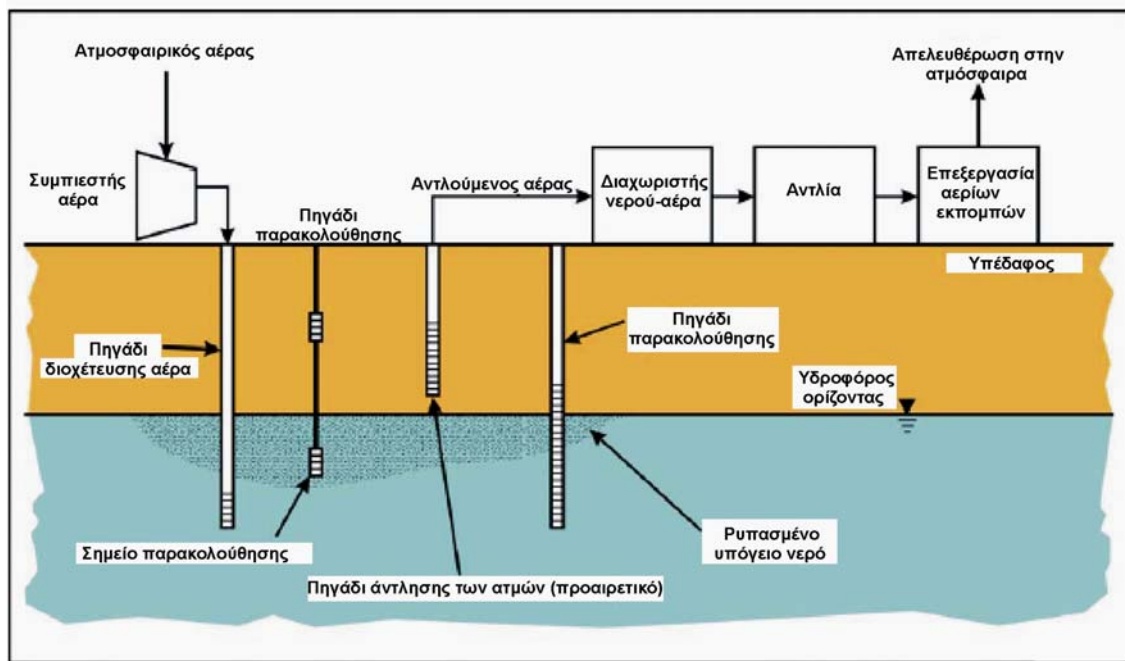
βιοαποικοδόμησης, τόσο στην κορεσμένη, όσο και στην ακόρεστη ζώνη, αυξάνοντας τη συγκέντρωση του οξυγόνου στο έδαφος.

Το οξυγόνο που διοχετεύεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα εξατμίζει τους ρυπαντές που είναι διαλυμένοι στο νερό και υπάρχουν εκεί ως ξεχωριστή υγρή φάση ή είναι προσροφημένοι πάνω σε κορεσμένα εδαφικά σωματίδια. Οι εξατμισμένοι ρυπαντές 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 ρυπαντών τόσο στην κορεσμένη όσο και στην ακόρεστη ζώνη, αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις του οξυγόνου στο υπέδαφος (Miller R., 1996).

Η τεχνολογία air sparging επεκτείνει την δυνατότητα εφαρμογής της άντλησης ατμών από κορεσμένα εδάφη και υπόγεια νερά, μέσω της φυσικής απομάκρυνσης των εξατμισμένων ρυπαντών και της ενισχυμένης βιοαποικοδόμησής τους στις κορεσμένες και τις ακόρεστες ζώνες. Η μέθοδος air sparging μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση υπολειμματικής ρύπανσης, ρυπαντών που είναι διαλυμένοι στο υπόγειο νερό ή ακόμη και για τον περιορισμό μιας ζώνης ρύπανσης. Η μέθοδος αυτή συχνά αποτελεί τμήμα ενός ολοκληρωμένου συστήματος επεξεργασίας για την εξυγίανση ρυπασμένων περιοχών. Συχνά χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη μέθοδο bioslurping, δημιουργώντας ένα σύστημα που μπορεί να επεξεργαστεί τόσο την εναπομένουσα ρύπανση, όσο και τους ρυπαντές που βρίσκονται υπό μορφή ελεύθερης φάσης στην επιφάνεια του υδροφορέα (www.nfesc.navy.mil).

Μέχρι στιγμής, η μέθοδος air sparging έχει χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση μιας ευρείας κλίμακας πτητικών και ημι-πτητικών ρυπαντών εδαφών και υπογείων υδάτων, συμπεριλαμβανομένων της βενζίνης και άλλων καυσίμων, καθώς και συστατικών που σχετίζονται με **BTEX** (**B**enzene – **T**oluene – **E**thylbenzene – **X**ylene) ή χλωριωμένους διαλύτες. Σύμφωνα με την υπάρχουσα εμπειρία πάνω στη μέθοδο air sparging, περιοχές με σχετικά διαπερατά, ομοιογενή εδάφη είναι τα πλέον κατάλληλα για την εφαρμογή της μεθόδου, λόγω της μεγαλύτερης και αποδοτικότερης επαφής του αέρα που διοχετεύεται και του προς επεξεργασία εδάφους, της σημαντικής εξάτμισης των πτητικών συστατικών και της απομάκρυνσης των αερίων που δημιουργούνται στην

ακόρεστη ζώνη. Άλλες κατάλληλες περιοχές που έχουν αναφερθεί είναι εκείνες που παρουσιάζουν σχετικά μεγάλο πάχος κορεσμένης ζώνης και βάθος υδροφορέα (Miller R., 1996).



Σχήμα 2: Συνδυασμός συστήματος air sparging και συστήματος άντλησης ατμών από το έδαφος (Naval Facilities Engineering Service Center, 2001).

Αρκετές φορές χρησιμοποιείται ο όρος biosparging αντί για air sparging, προκειμένου να τονιστεί η βιοεξυγίανση που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου ή να γίνει γνωστό ότι αρκετές φορές κυρίαρχο ρόλο στην εξυγίανση του εδάφους διαδραματίζει η βιοαποικοδόμηση, ενώ η εξάτμιση είναι δευτερευούσης σημασίας.

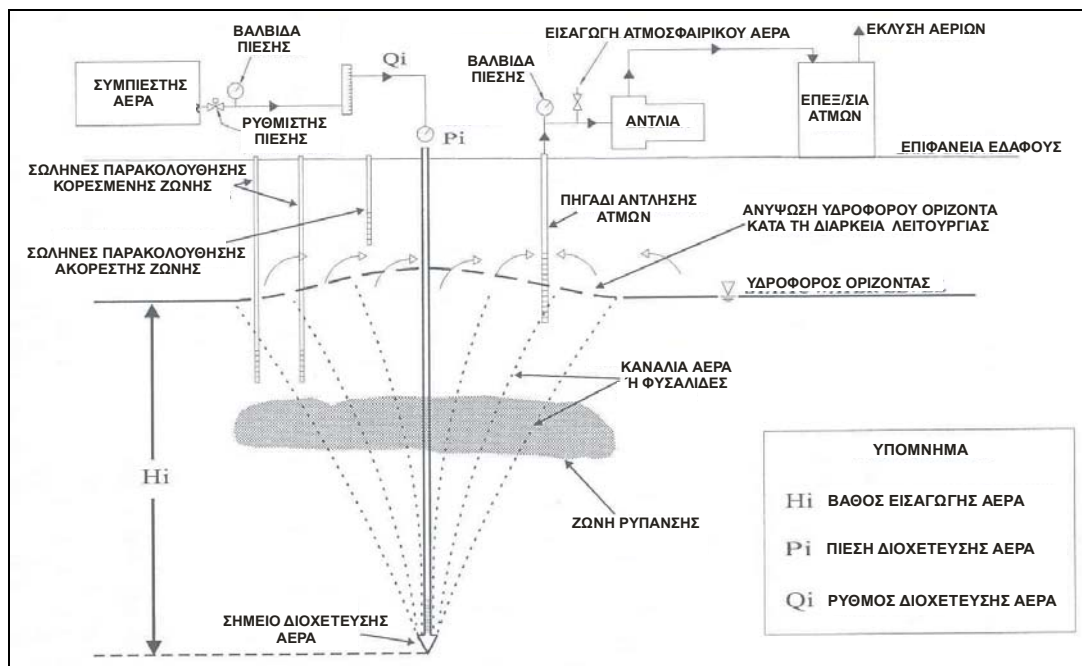
Στη συνέχεια της παρούσας εργασίας θα παρουσιαστούν τα βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου air sparging, οι σημαντικότεροι μηχανισμοί απομάκρυνσης ρυπαντών που χρησιμοποιεί, καθώς και τα βήματα και οι προϋποθέσεις μιας επιτυχημένης εφαρμογής αυτής. Επίσης, θα παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόστηκε η τεχνολογία air sparging σε ένα διυλιστήριο πετρελαίου, υπό συνθήκες πραγματικού πεδίου (γεγονός το οποίο εκφράζει την καινοτομία της παρούσας εργασίας, τουλάχιστον για τον Ελλαδικό χώρο) και τα κυριότερα στοιχεία και αποτελέσματα της λειτουργίας της εγκατασταθείσας πιλοτικής μονάδας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ AIR SPARGING

2.1 Γενικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μέθοδος air sparging εκπροσωπεί μια σχετικά νέα και πολύ αποτελεσματική τεχνολογία εξυγίανσης εδαφών και υπογείων υδάτων. Σε γενικές γραμμές, αφορά στην διοχέτευση αέρα μέσα στο υπέδαφος με στόχο την εξάτμιση των ρυπαντών και την ενίσχυση της βιοαποικοδόμησης. Στις πλείστες των περιπτώσεων ο ανεπιθύμητος ρυπαντής, ο οποίος επιχειρείται να απομακρυνθεί με τη μέθοδο air sparging, είναι οι οργανικές πτητικές ενώσεις (VOC).

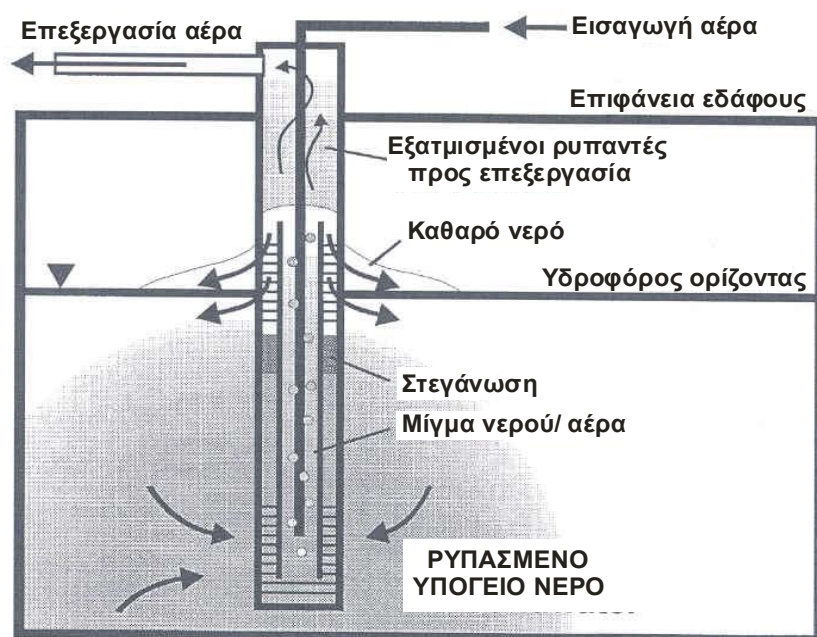
Προς το παρόν υπάρχουν δυο ευρείες προσεγγίσεις της μεθόδου air sparging, όσον αφορά στην απομάκρυνση πτητικών οργανικών ενώσεων από την κορεσμένη ζώνη. Η μία συμπεριλαμβάνει τη χρήση μεμονωμένων πηγαδιών διοχέτευσης αέρα, τοποθετημένων σε όλη τη ζώνη ρύπανσης, για την απομάκρυνση των πτητικών συστατικών 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 αέρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Απεικόνιση της τεχνολογίας air sparging για την εξυγίανση της κορεσμένης ζώνης και της in-situ άντλησης ατμών από την ακόρεστη ζώνη (Suthersan S., 1997).

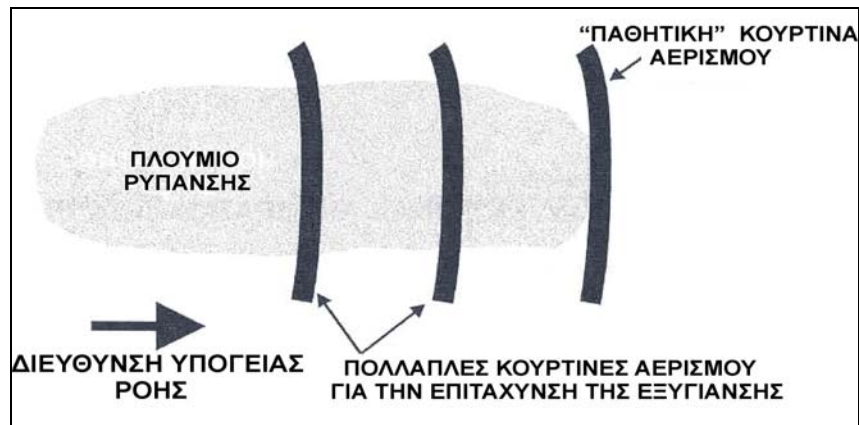
Ο συμπιεσμένος αέρας ωθείται μέσα από το πηγάδι και ρέει ακτινικά προς τα έξω και προς τα πάνω, μέσα στο έδαφος. Καθώς οι φυσαλίδες αέρα κινούνται μέσα στο έδαφος, τα πτητικά συστατικά που είναι διαλυμένα στο υπόγειο νερό ή προσροφημένα στην επιφάνεια των κόκκων του εδάφους, εξατμίζονται και παρασύρονται 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 βιο-οξειδωσης των βιοαποικοδομήσιμων 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 συσσωματώματά τους μπορούν να μειωθούν δραστικά (Γιδαράκος Ε., 2003).

Παραλλαγή αυτής της πρώτης 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 δεν βγαίνει από το πηγάδι προς το έδαφος, αλλά παραμένει μέσα σε αυτό (Σχήμα 4). 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 διαπερατότητα (Suthersan S., 1997).



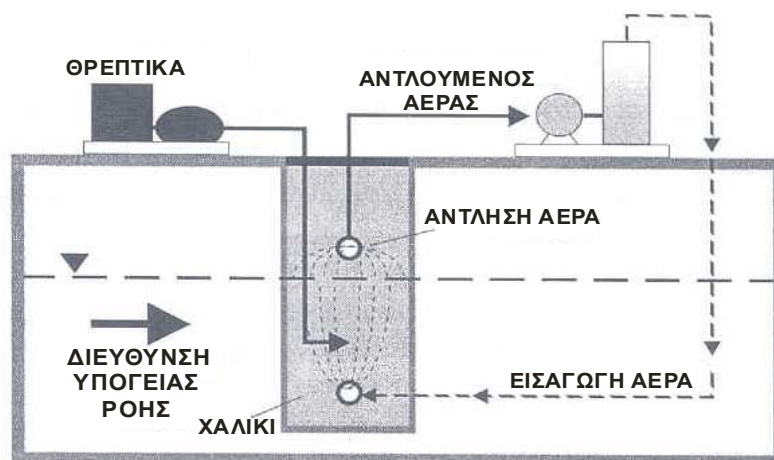
Σχήμα 4: Γραφική απεικόνιση της τεχνολογίας in-well air sparging (Suthersan S., 1997).

Η δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιεί μια ή περισσότερες «κουρτίνες» αερισμού (air curtains), προσανατολισμένες σε κατάλληλες γωνίες ως προς τη ροή του ρυπασμένου νερού, έτσι ώστε να απομακρύνονται τα πτητικά συστατικά από το υπόγειο νερό, καθώς αυτά περνούν μέσα από αυτές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5: Παράδειγμα χωροθέτησης κουρτινών αερισμού για in-situ εξυγίανση των υπογείων υδάτων (Suthersan S., 1997).

Οι κουρτίνες αερισμού μπορούν να δημιουργηθούν γεμίζοντας τάφρους με κατάλληλο πορώδες υλικό. Οι τάφροι διαθέτουν έναν οριζόντιο διάτρητο σωλήνα κοντά στον πυθμένα τους για την παροχή αέρα. Καθώς το υπόγειο νερό κινείται μέσα από την τάφρο, οι ανερχόμενες φυσαλίδες αέρα παρασύρουν τις πτητικές ουσίες προς την επιφάνεια (Σχήμα 6). Τυπικά, χρειάζεται και ο συνδυασμός ενός συστήματος ανάκτησης των αερίων. Όπως και στα πηγάδια αερισμού, μέσα στην κουρτίνα αερισμού μπορεί να λάβει χώρα βιοαποικοδόμηση καθώς και μείωση της ανάγκης επεξεργασίας των αερίων που εξέρχονται από το σύστημα (Γιδαράκος Ε., 2003).



Σχήμα 6: Όψη κουρτίνας αερισμού για in-situ εξυγίανση των υπογείων υδάτων (Suthersan S., 1997).

Μια άλλη τεχνολογία air sparging είναι η τεχνολογία οριζόντιων πηγαδιών, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί πολύ αποτελεσματικά, αυξάνοντας την δυνατότητα πρόσβασης στο υπέδαφος. Η μεγαλύτερη δυνατότητα πρόσβασης επιτρέπει αποτελεσματικότερη διοχέτευση αέρα στο υπέδαφος, μεγαλύτερη απομάκρυνση των απορροφημένων VOC και ανάκτηση των ατμών. Επίσης, μειώνεται η πιθανότητα εμφάνισης φραξίματος του υδροφορέα, εφόσον επεξεργάζεται μεγαλύτερη περιοχή. Ακόμη, έχει αναφερθεί ότι η μέθοδος air sparging μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τεχνολογία υδραυλικού ελέγχου (hydraulic containment technology), με τον διοχετευόμενο αέρα να σχηματίζει μια «κουρτίνα» air sparging, η οποία παρεμποδίζει τη μεταφορά των ρυπαντών σε μεγαλύτερη απόσταση. Η μέθοδος air sparging μπορεί να συνδυαστεί με τεχνικές άντλησης και επεξεργασίας, αυξάνοντας το ρυθμό εξυγίανσης σε σχέση με αυτόν που παρουσιάζεται όταν χρησιμοποιηθεί μόνη της (Miller R., 1996).

Άλλες διαφοροποιήσεις ενός τυπικού συστήματος air sparging, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της εξάτμισης και την ενεργοποίηση της βιοαποικοδόμησης είναι (Miller R., 1996):

- 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 και σχετίζονται με τη γεωμετρία των δικτύων πηγαδιών διοχέτευσης αέρα και άντλησης ατμών, το συνδυασμό οριζόντιων και κατακόρυφων πηγαδιών και την εγκατάσταση οριζοντίων πηγαδιών κάθετα στην υπόγεια ροή.

2.2 Δυνατότητες εφαρμογής της τεχνολογίας

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 ρυπαντές. 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 ρυπαντών, 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, τα οποία δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν μόνο με τη χρήση της τεχνικής άντλησης ατμών (Miller R., 1996).

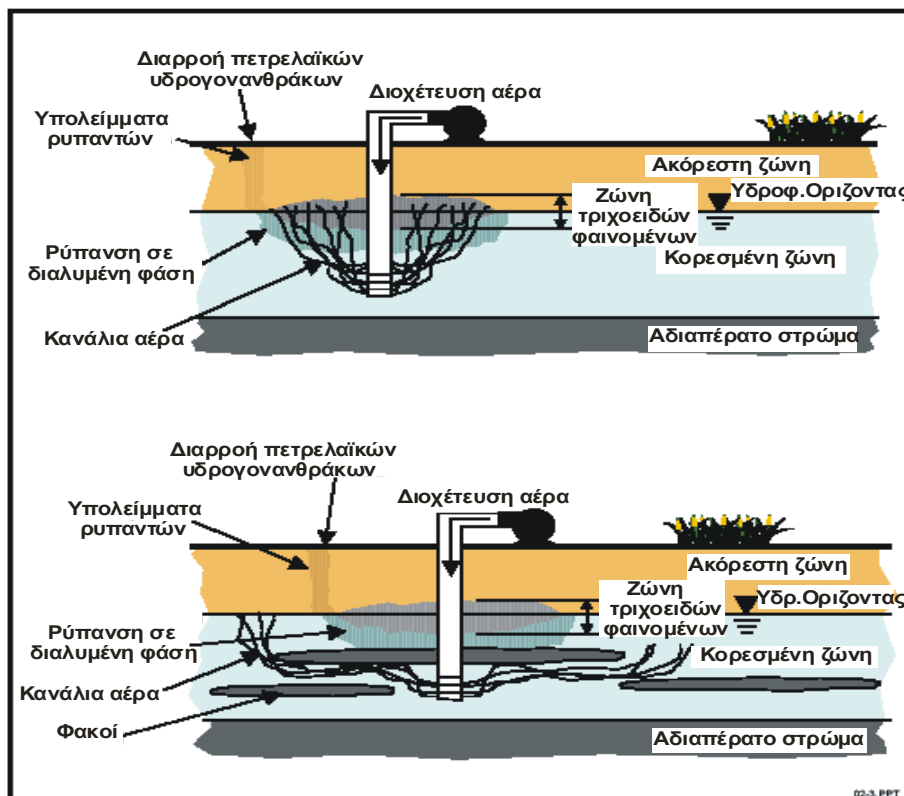
Οι κύριοι ρυπαντές που επηρεάζονται από τις διεργασίες εξάτμισης και βιοαποικοδόμησης, που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου air sparging είναι οι εξής (Miller R., 1996):

- 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 ρυπαντές, 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 (Miller R., 1996).

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 περιορίζαν την ικανότητα των πηγαδιών άντλησης ατμών να απομακρύνουν τους εξατμισμένους ρυπαντές που θα έπρεπε να κινούνται ανοδικά προς την ακόρεστη ζώνη (Σχήμα 7) (Miller R., 1996).



Σχήμα 7: Γραφική απεικόνιση της επίδρασης της ετερογένειας στην εφαρμογή της μεθόδου air sparging (www.nfesc.navy.mil).

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

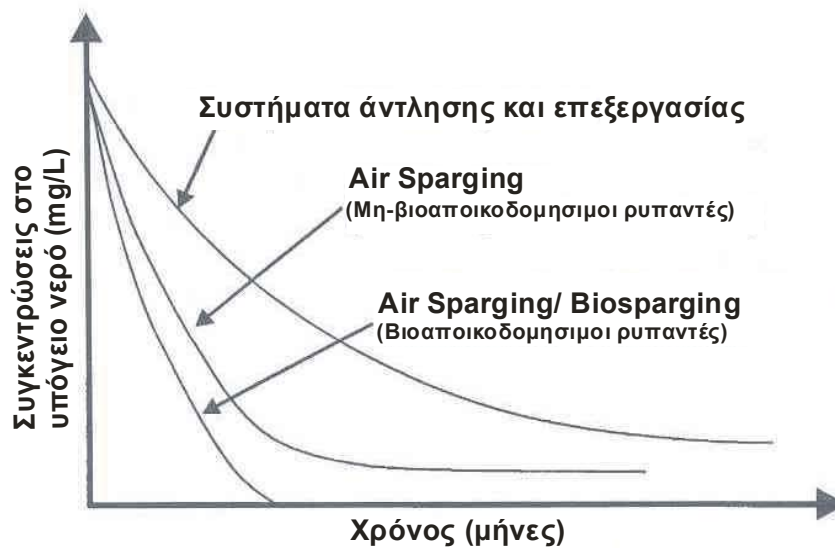
ανέφικτη ή μη συμφέρουσα όταν κάποια από τις παραπάνω αποστάσεις είναι μικρές και ως αποτέλεσμα ο αριθμός των σημείων διοχέτευσης αέρα που θα απαιτηθεί για να εξασφαλιστεί αποτελεσματική παροχή αέρα σε όλη την ρυπασμένη περιοχή είναι απαγορευτικός από οικονομική πλευρά (Miller R., 1996).

Στον Πίνακα 1 συνοψίζονται οι βασικότεροι παράγοντες που καθορίζουν τη δυνατότητα εφαρμογής της τεχνολογίας air sparging σε ένα οποιοδήποτε ρυπασμένο πεδίο, καθώς και οι επιθυμητές τιμές αυτών.

Πίνακας 1: Καθοριστικοί παράγοντες εφαρμοσιμότητας της τεχνολογίας air sparging (Norris et al., 1994)

Παράγοντας	Παράμετρος	Όρια/ Επιθυμητές τιμές
Ρυπαντής	Πτητικότητα	> 5mm Hg
	Διαλυτότητα	< 20.000 mg/L
	Βιοαποικοδομησιμότητα	BOD ₅ > 0,1mg/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

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 ρυπαντή. Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8) παρουσιάζεται ένα προσεγγιστικό διάγραμμα της μείωσης της συγκέντρωσης διαφόρων ειδών ρυπαντών (βιοαποικοδομήσιμων και μη), η οποία μπορεί να επιτευχθεί εφαρμόζοντας διάφορες τεχνολογίες εξυγίανσης (air sparging, pump-and-treat).



Σχήμα 8: Ρυθμοί εξυγίανσης διαφόρων ειδών ρυπαντών κατά τη διάρκεια εφαρμογής in-situ air sparging (Suthersan S., 1997).

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 (Miller R., 1996).

2.3 Μηχανισμοί απομάκρυνσης των ρυπαντών

Κατά την εφαρμογή της τεχνολογίας air sparging είναι δυνατόν να λάβουν χώρα τα ακόλουθα φαινόμενα (Norris et al., 1994):

- Αυξημένη οξυγόνωση: ο διοχετευόμενος αέρας εμπλουτίζει την κορεσμένη αλλά και την ακόρεστη ζώνη του εδάφους, ενισχύοντας τη βιοαποικοδόμηση των οργανικών ρυπαντών.
- Αυξημένη διάλυση: η διαταραχή που προκαλείται από την υπό πίεση διοχέτευση του αέρα στον υδροφορέα ευνοεί την εκρόφηση των προσροφημένων στα εδαφικά σωματίδια ρυπαντών και τη διάλυσή τους στο υπόγειο νερό. Με τον τρόπο αυτό γίνεται πιο εύκολη τόσο η εξάτμισή τους, όσο και η βιοαποικοδόμησή τους.

- Εξάτμιση: η παρουσία αέρα στο υπέδαφος ενισχύει την εξάτμιση των προσροφημένων οργανικών ρυπαντών, 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 ρυπαντών 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 υπαρχόντων ρυπαντών.

Οι κύριοι μηχανισμοί, που είναι υπεύθυνοι για την απομάκρυνση των οργανικών πτητικών ρυπαντών (VOC) κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου air sparging είναι οι ακόλουθοι (Semer R. et al, 1996):

1. η μεταφορά μάζας των VOC από μια φάση σε μια άλλη,
2. ο μετασχηματισμός των VOC σε μη επικίνδυνες ουσίες,
3. η διακίνηση των VOC.

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

2.3.1 Μηχανισμοί μεταφοράς μάζας και κατανομής

2.3.1.1 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 VOC 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 υπο-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 (Semer R. et al, 1996).

Η τάση εξάτμισης ενός συγκεκριμένου ρυπαντή καθορίζεται από την τάση ατμών του και τη σταθερά του νόμου του Henry. Ένας ρυπαντής 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 m³/ mol. Χαρακτηριστικοί ρυπαντές με τέτοιες ιδιότητες είναι τα BTEX.

Η εξάτμιση κυβερνάται από διαφορετικούς νόμους, ανάλογα με το αν ο ρυπαντής είναι διαλυμένος σε οργανικό διαλύτη ή σε νερό. Ο νόμος του Raoult ισχύει στην ακόρεστη ζώνη, όταν ο ρυπαντής 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 ρυπαντή, πάνω από ένα μη υδατικής φάσης υγρό (NAPL), ισούται με το γραμμομοριακό κλάσμα του ρυπαντή στο NAPL, πολλαπλασιασμένο με την τάση ατμών του καθαρού ρυπαντή:

$$P_i = P_{vp} X_i$$

όπου P_i είναι η μερική πίεση του ρυπαντή i (atm), P_{vp} είναι η τάση ατμού του καθαρού συστατικού (atm) και X_i είναι το γραμμομοριακό κλάσμα του ρυπαντή i στο μίγμα.

Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση ατμών του ρυπαντή, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα ο ρυπαντής να υπάρχει στην αέρια φάση. Η ποσότητα της μάζας του ρυπαντή 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 (Semer R. et al, 1996).

Η κατανομή των VOC 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), H_c είναι η σταθερά Henry (atm m³/ mol) και C_i είναι η συγκέντρωση του χημικού στην υγρή φάση (mol/ m³).

Όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά Henry, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα ο ρυπαντής 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 ρυπαντή στην αέρια φάση μεταβάλλονται. Η σταθερά Henry κάθε ρυπαντή βοηθάει στο να εκτιμηθεί το κατά πόσο ο αέρας που διοχετεύεται στο υπέδαφος θα κορεστεί από τον ρυπαντή, πριν φτάσει στα πηγάδια άντλησης των ατμών. Όσο μεγαλύτερη είναι σταθερά Henry για ένα VOC, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα από αυτόν μπορεί να δεσμευτεί από τις φυσαλίδες 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 ρυπαντή 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 (Semer R. et al, 1996).

2.3.1.2 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 ρυπαντή 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 ρυπαντή στην ζώνη επικράτησης των τριχοειδών φαινομένων.

Από διάφορες μελέτες έχει αποδειχθεί 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 ρυπαντή. Κάποιοι ερευνητές έφτασαν διστακτικά στο συμπέρασμα 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 (Semer R. et al, 1996).

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 ρυπαντή στην αέρια φάση, που προκαλείται από το μηχανισμό της συµμεταφοράς και της ανάμιξης που πραγματοποιείται στην υγρή φάση (Semer R. et al, 1996).

2.3.1.3 Προσρόφηση και εκρόφηση

Η προσρόφηση και η εκρόφηση ενός ρυπαντή είναι πολύ σημαντικοί μηχανισμοί, οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν πρόκειται να ποσοτικοποιηθούν οι ρυθμοί απομάκρυνσης της μάζας του ρυπαντή, λόγω της διοχέτευσης αέρα στο υπέδαφος με την μέθοδο air sparging. Οι οργανικοί ρυπαντές 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 (Semer R. et al, 1996).

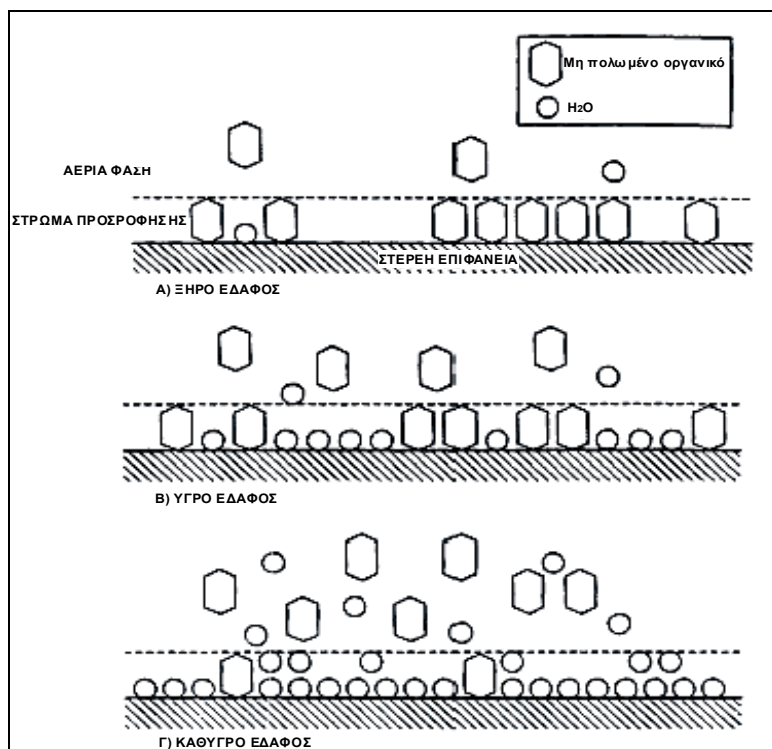
Η ποσότητα ενός οργανικού ρυπαντή που προσροφάται στο έδαφος εξαρτάται κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό από την ποσότητα της οργανικής ύλης, που υπάρχει σε αυτό. Ο μερικός συντελεστής προσρόφησης (partition adsorption coefficient) K_p είναι εκείνος που συχνά χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ποσότητας του ρυπαντή 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 ρυπαντή 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 ρυπαντή, τόσο πιο πιθανόν είναι να προσροφηθεί αυτός ο ρυπαντής. 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, K_{ow} , η οποία είναι ιδιότητα της προσροφούμενης ουσίας.

Όσο μεγαλύτερη είναι σταθερά K_{ow} , τόσο πιο υδροφοβικός είναι ο ρυπαντής (Semer R. et al, 1996).

Η ποσότητα του ρυπαντή που προσροφάται στο έδαφος εξαρτάται επίσης από την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, επειδή το νερό ανταγωνίζεται τον ρυπαντή στην κατάληψη των σημείων προσρόφησης. Όσο μεγαλύτερη είναι η υγρασία, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα προσροφημένου οργανικού ρυπαντή 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 (Σχήμα 9) (Semer R. et al, 1996).



Σχήμα 9: Επίδραση της υγρασίας στην προσρόφηση των εδαφών (Semer R. et al, 1996).

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 (Semer R. et al, 1996).

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 ρυπαντή και τη συγκέντρωση του ρυπαντή στο διάλυμα σε ισορροπία. Αυτή η ισόθερμη εκφράζεται μαθηματικά ως εξής:

$$C_s = KC_e^N$$

όπου C_s είναι η μάζα του ρυπαντή που προσροφάται ανά μάζα εδάφους (mg/Kg), K είναι η σταθερά απορρόφησης σε ισορροπία (mg/Kg)(mg/l)^{-1/N}, C_e είναι η συγκέντρωση του διαλύματος σε ισορροπία μετά την προσρόφηση (mg/l) και N είναι η σταθερά που περιγράφει την ένταση της προσρόφησης.

Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή των K και N , τόσο μεγαλύτερη είναι η δυναμικότητα προσρόφησης του εδάφους. Προκειμένου να καθοριστούν τα K και N , η παραπάνω εξίσωση γραμμικοποιείται και εκφράζεται σε μια λογαριθμική μορφή:

$$\log C_s = \log K + N \log C_e$$

όπου $\log K$ είναι το εμπόδιο στην προσρόφηση και N είναι η κλίση της ευθείας που δημιουργείται από τα δεδομένα $\log C_s$ και $\log C_e$.

Ο παράγοντας N είναι ένας δείκτης του κατά πόσο η προσρόφηση παραμένει σταθερή σε διαφορετικές συγκεντρώσεις ισορροπίας. Αν το N ισούται με 1, ισχύει γραμμική σχέση ανάμεσα στη συγκέντρωση ισορροπίας και την ποσότητα του ρυπαντή που προσροφάται. Αν το N είναι μικρότερο από 1, η προσρόφηση μειώνεται με την αύξηση των επιπέδων της συγκέντρωσης του ρυπαντή, ενώ αν είναι μεγαλύτερο από 1 η προσρόφηση αυξάνεται, καθώς αυξάνονται οι συγκεντρώσεις ισορροπίας (Semer R. et al, 1996).

Κινηματικά, η διαδικασία προσρόφησης πραγματοποιείται σε δυο στάδια: γρήγορη προσρόφηση πάνω σε εξωτερικές επιφάνειες και μετά αργή διάχυση μέσα στα διάκενα του εδάφους. Οι ρυθμοί προσρόφησης είναι μικρότεροι σε εδάφη με μεγάλα εδαφικά σωματίδια και για πιο υδροφοβικά συστατικά, με μεγαλύτερες σταθερές K_{ow} , λόγω της μικρότερης διάχυσης ανάμεσα στα σωματίδια. Οι διαδικασίες προσρόφησης ίσως να χρειαστούν μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρι να φτάσουν σε ισορροπία, ίσως αρκετές

εβδομάδες ή μήνες, λόγω του μεγάλου μήκους των μονοπατιών προσρόφησης και της μεγάλης επιβράδυνσης σε μικροκλίμακα (Semer R. et al, 1996).

Οι προσροφημένοι ρυπαντές 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 ρυπαντών κατά τη διάρκεια εφαρμογής του air sparging. Παρόλα αυτά, μικρές τάσεις προσρόφησης υδροφοβικών οργανικών ρυπαντών σε υδροφορείς, γενικά, ευνοούν την αποτελεσματική απομάκρυνσή τους με τη μέθοδο air sparging (Semer R. et al, 1996).

2.3.2 Μηχανισμοί μετασχηματισμού των ρυπαντών

2.3.2.1 Βιοαποικοδόμηση

Η βιοαποικοδόμηση είναι ο μηχανισμός μετασχηματισμού ενός ρυπαντή, που μπορεί να λάβει χώρα τόσο στην ακόρεστη, όσο και στην κορεσμένη ζώνη του υπεδάφους. Τα περισσότερα συστατικά των προϊόντων πετρελαίου είναι βιοαποικοδομήσιμα. Η σπουδαιότητα της βιοαποικοδόμησης κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου air sparging είναι για πολλούς υπό αμφισβήτηση και τα περισσότερα μοντέλα air sparging δεν την 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 3,5 γραμμάρια. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη βιοαποικοδόμηση είναι η θερμοκρασία και ο ρυθμός διοχέτευσης αέρα. Ο θερμός αέρας ίσως να αυξήσει την μικροβιακή ανάπτυξη και να βελτιώσει την βιοαποικοδόμηση των ρυπαντών. Ο διοχετευόμενος αέρας αυξάνει τα επίπεδα του διαλυμένου οξυγόνου. Παρόλα αυτά,

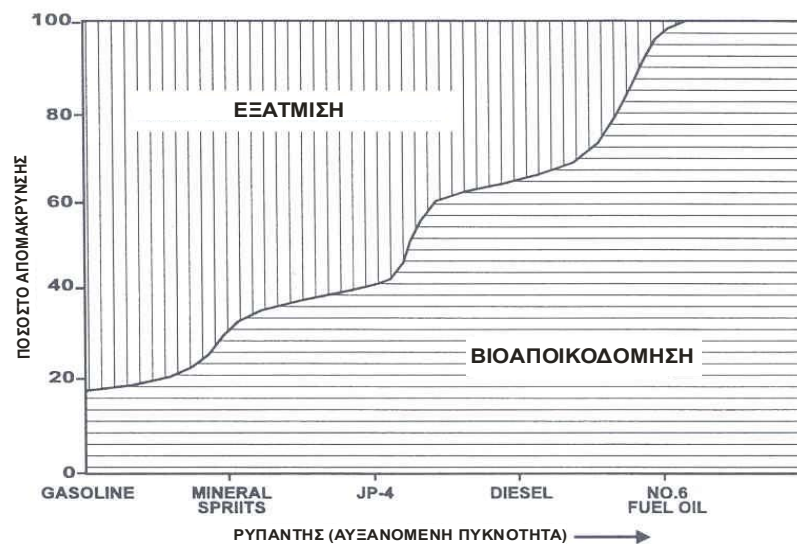
μεγάλες τιμές πίεσης του διοχετευόμενου αέρα ίσως περιορίσουν τον εμπλουτισμό σε οξυγόνο, παρεμποδίζοντας το σχηματισμό φυσαλίδων. Περιορίζοντας την πίεση άντλησης στα αντίστοιχα πηγάδια άντλησης των ατμών, έχει αποδειχθεί ότι ευνοείται η διάλυση του οξυγόνου (Semer R. et al, 1996).

Μελέτες έχουν δείξει μείωση της βενζίνης σε ρηχούς υδροφορείς από 9,83Kg σε 2,25Kg, μέσα σε χρονικό διάστημα 15 μηνών, χωρίς καμία επεξεργασία. Πειράματα που έγιναν έδειξαν ότι η βιοαποικοδόμηση 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 (**B**enzene – **T**oluene – **X**ylene - **B**TX), που υπήρχαν στο υπόγειο νερό. Στατιστικές αναλύσεις έδειξαν υψηλή αρνητική συσχέτιση ανάμεσα στα συνολικά BTX και τον φυσικό λογάριθμο του διαλυμένου οξυγόνου. Πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το 80-100% των BTX, 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 BTX 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 (Semer R. et al, 1996).

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 (Semer R. et al, 1996).

Αν και η ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου που απαιτείται για αποτελεσματική βιοαποικοδόμηση 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 βιοαποικοδόμηση των οργανικών συστατικών. Τα πλεονεκτήματα της βιοαποικοδόμησης κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου air sparging δεν έχουν ποσοτικοποιηθεί ικανοποιητικά και δεδομένου ότι κάτω από ορισμένες συνθήκες πεδίου η επίδραση της βιοαποικοδόμησης είναι πολύ σημαντική, η διεργασία αυτή θα έπρεπε λαμβάνεται υπόψη (Semer R. et al, 1996).

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η συμβολή των διεργασιών της εξάτμισης και της βιοαποικοδόμησης στην απομάκρυνση συγκεκριμένων ρυπαντών κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου air sparging, ενώ στο Σχήμα 11 απεικονίζονται οι βασικοί μηχανισμοί κατανομής και απομάκρυνσης των ρυπαντών, συναρτήσει της εξάτμισης.



Σχήμα 10: Ποιοτική απεικόνιση του δυναμικού απομάκρυνσης πετρελαϊκών ρυπαντών μέσω της μεθόδου air sparging (Suthersan S., 1997).



Σχήμα 11: Μηχανισμοί κατανομής και απομάκρυνσης ρυπαντών, συναρτήσει της εξάτμισης, κατά τη διάρκεια εφαρμογής της τεχνολογίας air sparging (Norris et al., 1994).

2.3.3 Μηχανισμοί διακίνησης

Οι μηχανισμοί διακίνησης των ρυπαντών, δηλαδή η συμμεταφορά, η μηχανική διασπορά και η μοριακή διάχυση εκφράζουν την ολική μετακίνηση των ρυπαντών 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 ρυπαντές 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 ρυπαντών ενισχύει τους μηχανισμούς μεταφοράς μάζας (Semer R. et al, 1996).

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

$$J = v_x \cdot \theta \cdot C$$

όπου $u = \frac{K}{n} \cdot \frac{dh}{dx}$ και εκφράζει τη μέση γραμμική ταχύτητα (L/T), C η συγκέντρωση του ρυπαντή και θ το πορώδες του εδάφους.

Η μηχανική διασπορά, η οποία είναι γνωστή ως διασπορά, αντιστοιχεί στην εξάπλωση ή τη διάλυση του ρυπαντή 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 ρυπαντή βελτιώνει τη διαδικασία διάλυσης, αλλά παράλληλα αυξάνει την προσρόφηση των ρυπαντών, 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 (Semer R. et al, 1996).

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

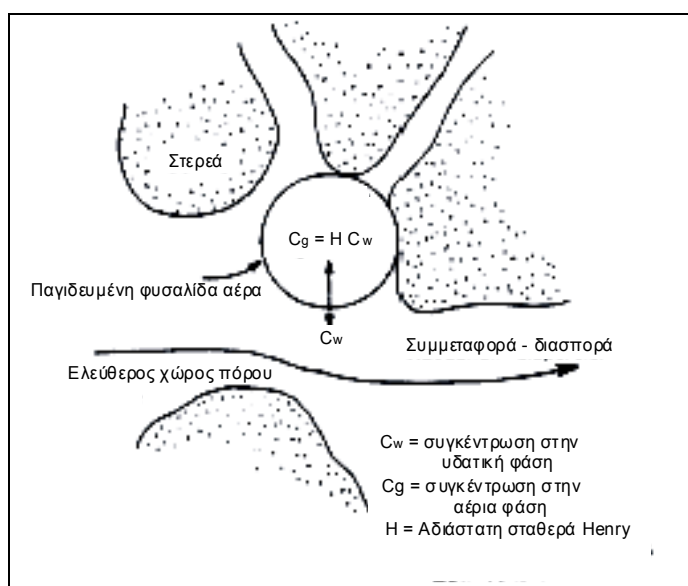
$$J_H = -D_H \frac{dC}{dz}$$

όπου D_H είναι ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς (L^2T^{-1}), C η συγκέντρωση του ρυπαντή (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 ρυπαντών, προωθώντας την ανάμιξη

των ρυπαντών. Αυτή η ανάμιξη βοηθάει στην απομάκρυνση των διαλυμένων ρυπαντών από τη διεπιφάνεια νερού – NAPL, καθώς επίσης και στη διαδικασία διάλυσης. Η συμμεταφορά και η διασπορά των ρυπαντών 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 ρυπαντή (Semer R. et al, 1996).

Ο αέρας που διοχετεύεται κατά τη διάρκεια του air sparging ίσως να παγιδευτεί μέσα στο έδαφος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12. 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 ρυπαντή θα αυξηθεί, λόγω της αυξημένης ποσότητας ρυπαντή που έχει δεσμευτεί στην παγιδευμένη αέρια φάση (Semer R. et al, 1996).



Σχήμα 12: Παγιδευμένος αέρας σε κορεσμένο έδαφος (Semer R. et al, 1996).

Οι ρυπαντές που βρίσκονται σε ασυνεχείς εδαφικούς πόρους ίσως να μην έρθουν σε άμεση επαφή με τα μονοπάτια ροής του αέρα. Κατ' επέκταση, αυτοί οι ρυπαντές θα πρέπει να κινηθούν με μοριακή διάχυση και στη συνέχεια να μεταφερθούν μέσω συμμεταφοράς και διασποράς. Η διαδικασία διάχυσης αφορά στην μεταφορά των ρυπαντών 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 ρυπαντή και z η κάθετη απόσταση (L).

Λόγω του ότι η διάχυση πραγματοποιείται αργά, ο απαιτούμενος χρόνος απομάκρυνσης των ρυπαντών αυξάνεται δραστικά. Στα πειράματα air sparging που έχουν πραγματοποιηθεί έχει παρατηρηθεί μια αποτελεσματική απομάκρυνση των ρυπαντών στα πρώτα στάδια της μεθόδου και στη συνέχεια μια αργή απομάκρυνση των ρυπαντών, η οποία αποδίδεται στη διεργασία διάχυσης (Semer R. et al, 1996).

2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

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 (Miller R., 1996 και www.nfesc.navy.mil) :

- Απομακρύνει πολύ αποτελεσματικά την υπολειμματική ρύπανση από την 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 ρυπαντές 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 ρυπαντών 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 υπόγειων υδάτων.

Αντίθετα, οι συνθήκες πεδίου, οι οποίες καθιστούν την εφαρμογή της μεθόδου air sparging αναποτελεσματική ή μη οικονομικά συμφέρουσα, περιλαμβάνουν (Miller R., 1996) :

- Ύπαρξη ρυπαντών που σχηματίζουν σύμπλοκα με τα εδαφικά συστατικά, μειώνοντας τους ρυθμούς εξάτμισης.
- Παρουσία λεπτόκοκκων, χαμηλής διαπερατότητας εδαφών πάνω από τον υδροφόρο, τα οποία παρεμποδίζουν τη μεταφορά των εξατμισμένων ρυπαντών 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.

- Ύπαρξη 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.

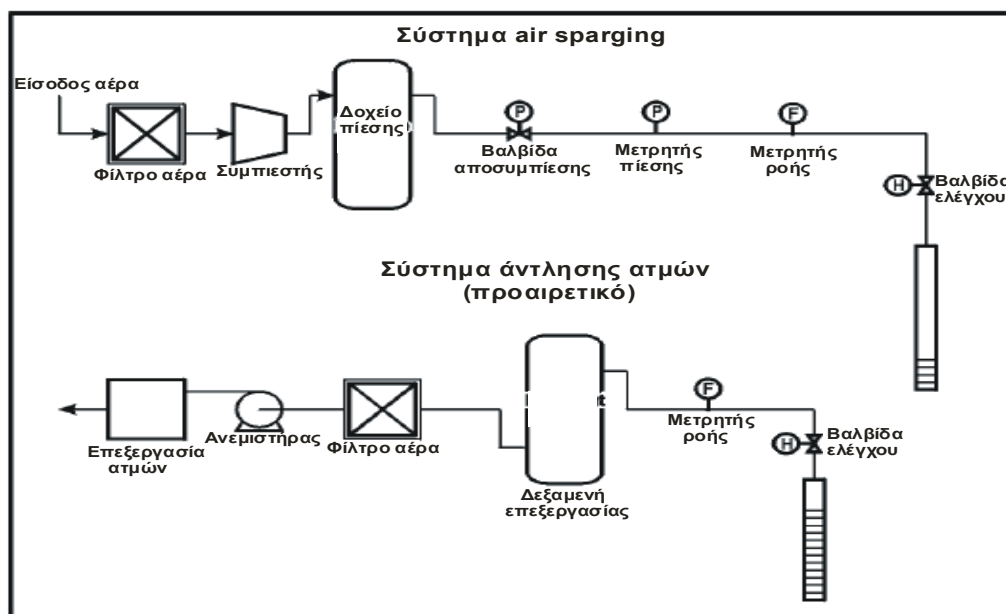
Ένας επιπρόσθετος περιορισμός των συστημάτων air sparging είναι ο σχεδιασμός και ο έλεγχος που απαιτείται, προκειμένου να επιτευχθεί ο εκάστοτε βέλτιστος ρυθμός παροχής αέρα (αριθμός των πηγαδιών και πιέσεις διοχέτευσης του αέρα) και να αποφευχθεί η εμφάνιση ανεπιθύμητων φαινομένων, όπως διαφυγή ατμών 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 (Miller R., 1996).

Μερικά από τα μειονεκτήματα της μεθόδου air sparging είναι τα ακόλουθα (www.nfesc.navy.mil) :

- 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 ρυπαντών σε περιοχές εκτός του πεδίου ρύπανσης.
- Είναι απαραίτητη η κατασκευή και η λειτουργία μιας πιλοτικής μονάδας πριν την πλήρη εφαρμογή της μεθόδου.

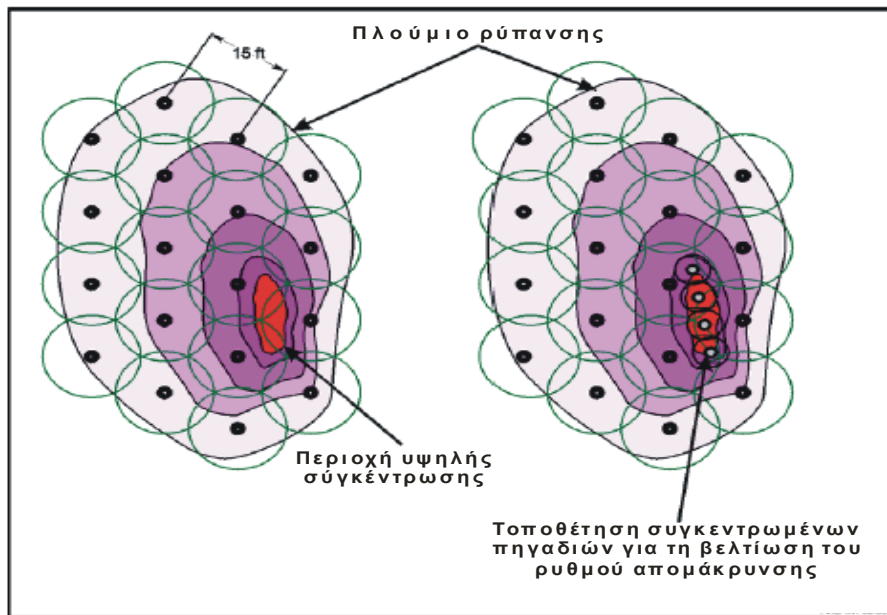
2.5 Τυπικό σύστημα air sparging

Τα κύρια τμήματα ενός συστήματος air sparging (Σχήμα 13) περιλαμβάνουν πηγάδια διοχέτευσης αέρα στο υπέδαφος, συμπιεστές αέρα για τη 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 επεξεργασίας τους, προτού απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα (www.nfesc.navy.mil).



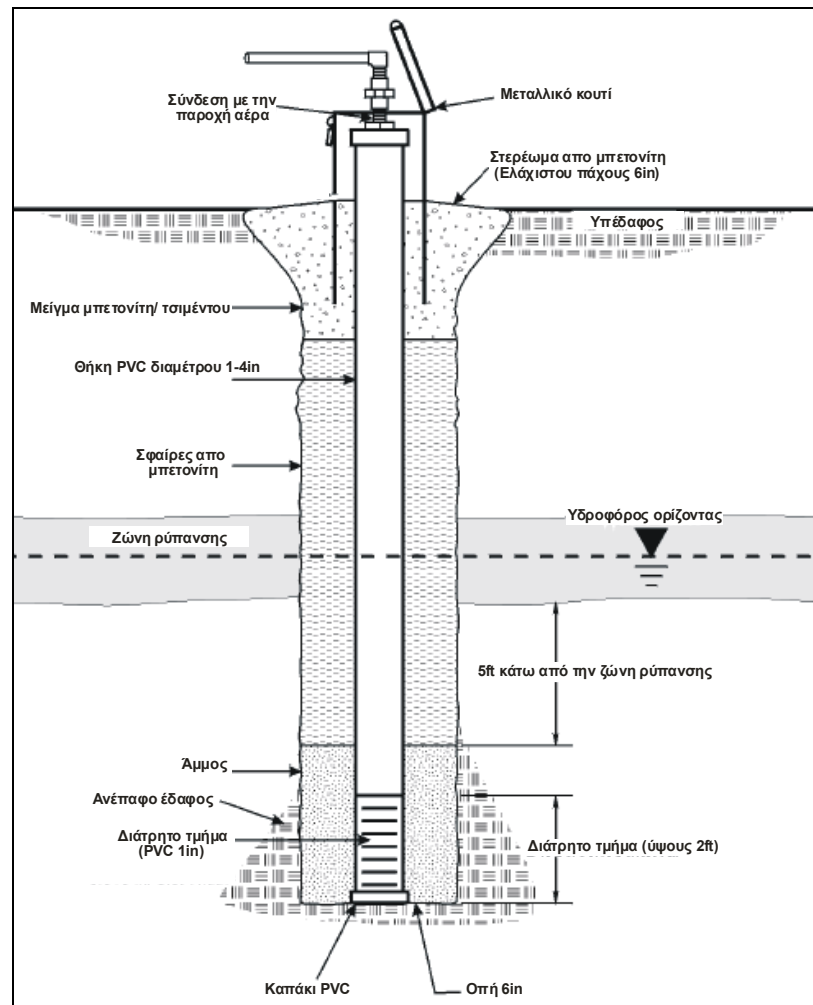
Σχήμα 13: Απεικόνιση των επιμέρους τμημάτων ενός συστήματος air sparging και άντλησης ατμών (Naval Facilities Engineering Service Center, 2001).

Ένα 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 (Σχήμα 14).



Σχήμα 14: Θέσεις τοποθέτησης πηγαδιών air sparging για την επεξεργασία ρυπασμένων εδαφών και υδροφορέων (Naval Facilities Engineering Service Center, 2001).

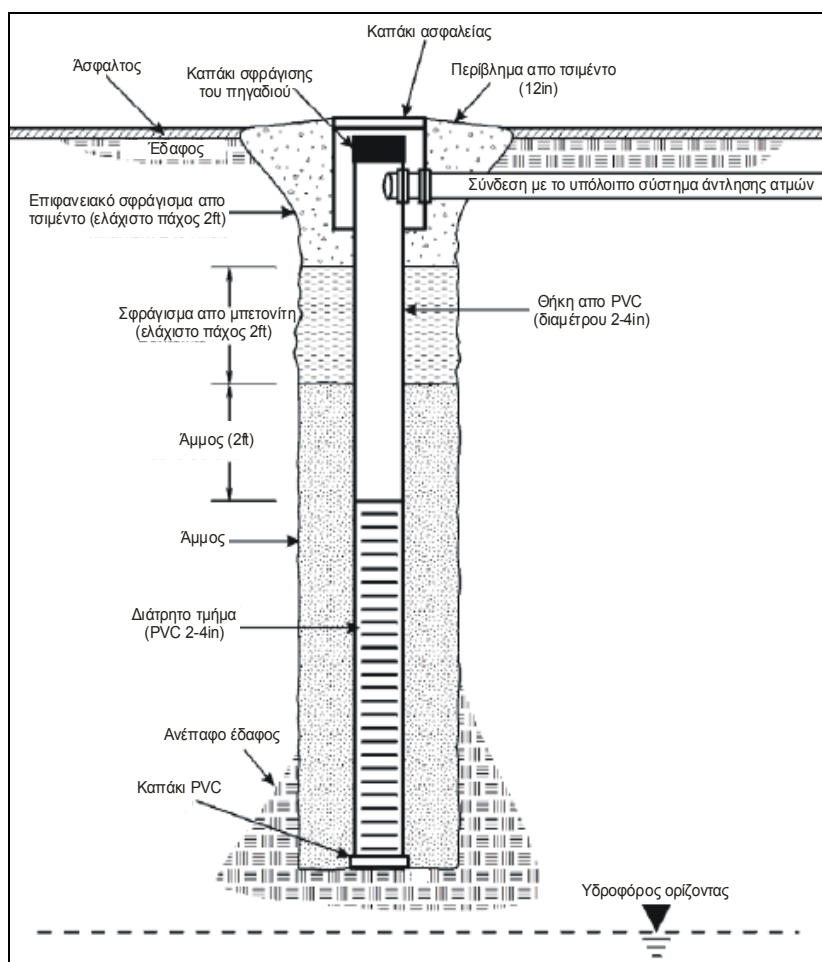
Για την παροχή οξυγόνου υπό πίεση χρησιμοποιούνται συμπιεστές αέρα, ενώ για την δημιουργία αρνητικών πιέσεων και την απομάκρυνση των ατμών από το έδαφος χρησιμοποιούνται αντλίες κενού. Ένα επιφανειακό σύστημα ελέγχου των διαδικασιών χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση και τη ρύθμιση της παροχής αέρα και τον εξοπλισμό απομάκρυνσης των ατμών. Ίσως να χρειαστεί επιπρόσθετος εξοπλισμός διαχωρισμού υγρών και αερίων, συνδεδεμένος με το δίκτυο των 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 εφαρμογής του συστήματος σε κανονική κλίμακα, ανάλογα με τα αποτελέσματα και την απόδοση που παρουσιάζει το σύστημα. Στο Σχήμα 15 παρουσιάζεται η τομή ενός τυπικού πηγαδιού air sparging.



Σχήμα 15: Διατομή ενός τυπικού πηγαδιού air sparging (Naval Facilities Engineering Service Center, 2001).

Με την άντληση των ατμών απομακρύνονται οι περισσότερο πτητικοί ρυπαντές και γενικά αφαιρείται το μεγαλύτερο μέρος των ρυπαντών (κυρίως κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων της εξυγίανσης). Όταν οι ρυπαντές που ήδη βρίσκονταν σε αέρια φάση και οι πολύ πτητικοί ρυπαντές έχουν αφαιρεθεί, ο ρυθμός απομάκρυνσης των ατμών μειώνεται και αυξάνεται ο ρυθμός της βιοαποικοδόμησης, ο οποίος γίνεται κυρίαρχος παράγοντας στα επόμενα στάδια της εξυγίανσης. Αυτό οφείλεται στο ότι η απομάκρυνση των ρυπαντών κατά τη διάρκεια των τελικών σταδίων της εξυγίανσης είναι αποτέλεσμα της βιοαποικοδόμησης των λιγότερο πτητικών, δυνατά προσροφημένων ρυπαντών. 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 ρυπαντών και το σχεδιασμό του συστήματος air sparging. Στο Σχήμα 16 παρουσιάζεται η τομή ενός τυπικού πηγαδιού άντλησης ατμών.

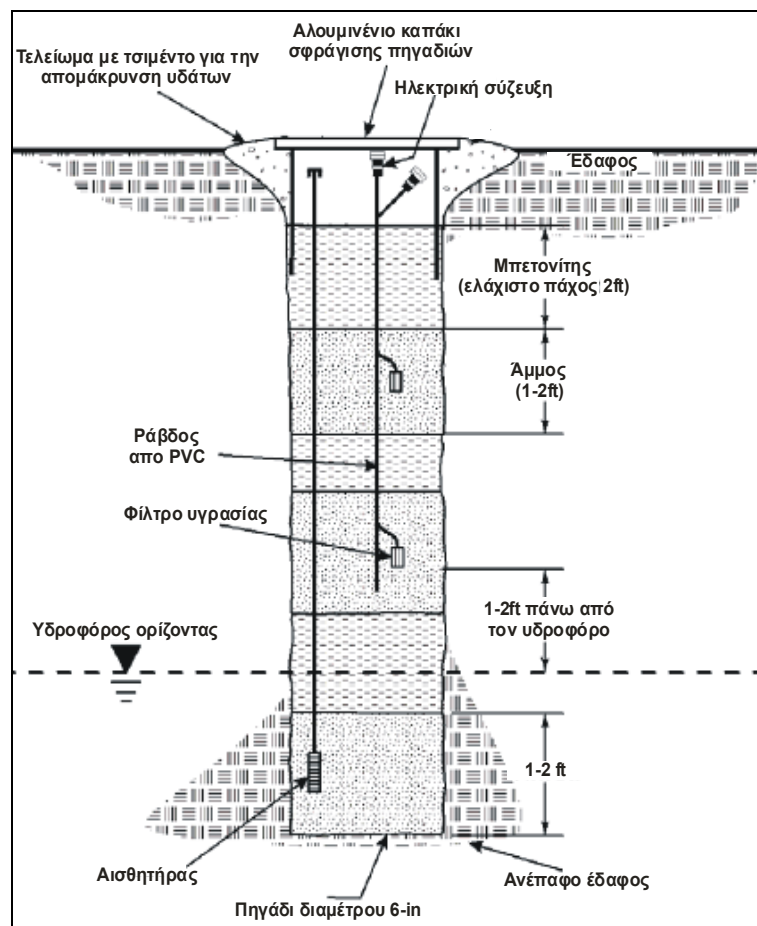


Σχήμα 16: Διατομή τυπικού πηγαδιού άντλησης ατμών (Naval Facilities Engineering Service Center, 2001).

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, έως ότου η βιοαποικοδόμηση καταστεί η κυρίαρχη διεργασία απομάκρυνσης του ρυπαντή. 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 λειτουργία, με περίοδο που καθορίζεται από τα επίπεδα του

διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό και των πτητικών συστατικών στην ακόρεστη ζώνη, μπορεί να επιτευχθεί μεγιστοποίηση της βιοαποικοδόμησης, καθώς και ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων ποσοτήτων αέρα.

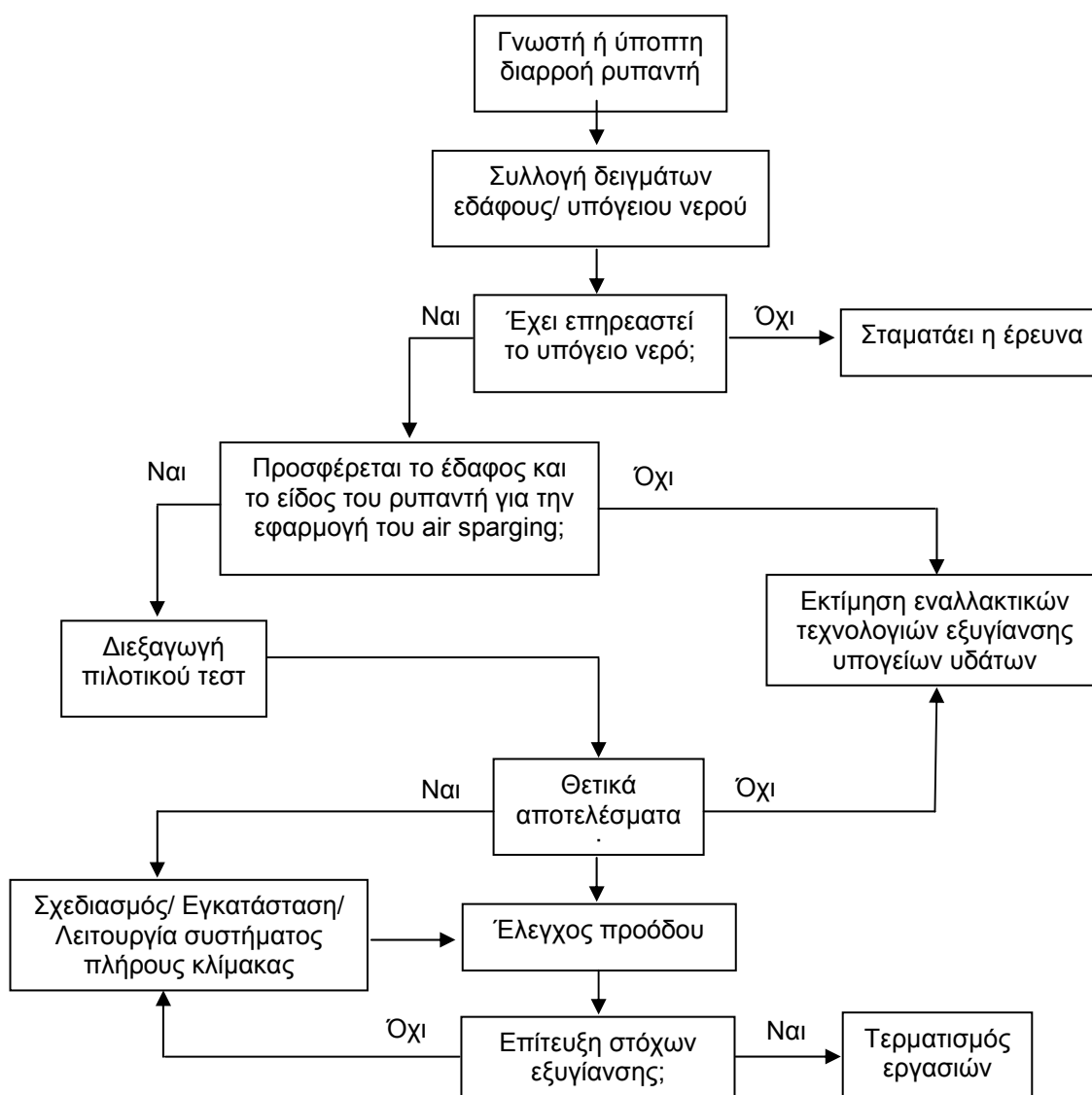
Τέλος, για μια ολοκληρωμένη εφαρμογή της τεχνολογίας air sparging κρίνεται αναγκαία η εγκατάσταση και η λειτουργία πηγαδιών παρακολούθησης (Σχήμα 17), μέσα στην υπό επεξεργασία περιοχή. Τα πηγάδια αυτά στόχο έχουν την μέτρηση κάποιων σημαντικών παραμέτρων, όπως για παράδειγμα της συγκέντρωσης των πτητικών 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.



Σχήμα 17: Διατομή τυπικού πηγαδιού παρακολούθησης (Naval Facilities Engineering Service Center, 2001).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: 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 18). Όπως φαίνεται, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και του υπάρχοντος ρυπαντή είναι τα βασικά κριτήρια, τα οποία καθορίζουν την καταλληλότητα ή μη της συγκεκριμένης μεθόδου για την εξυγίανση μιας ρυπανθής περιοχής.

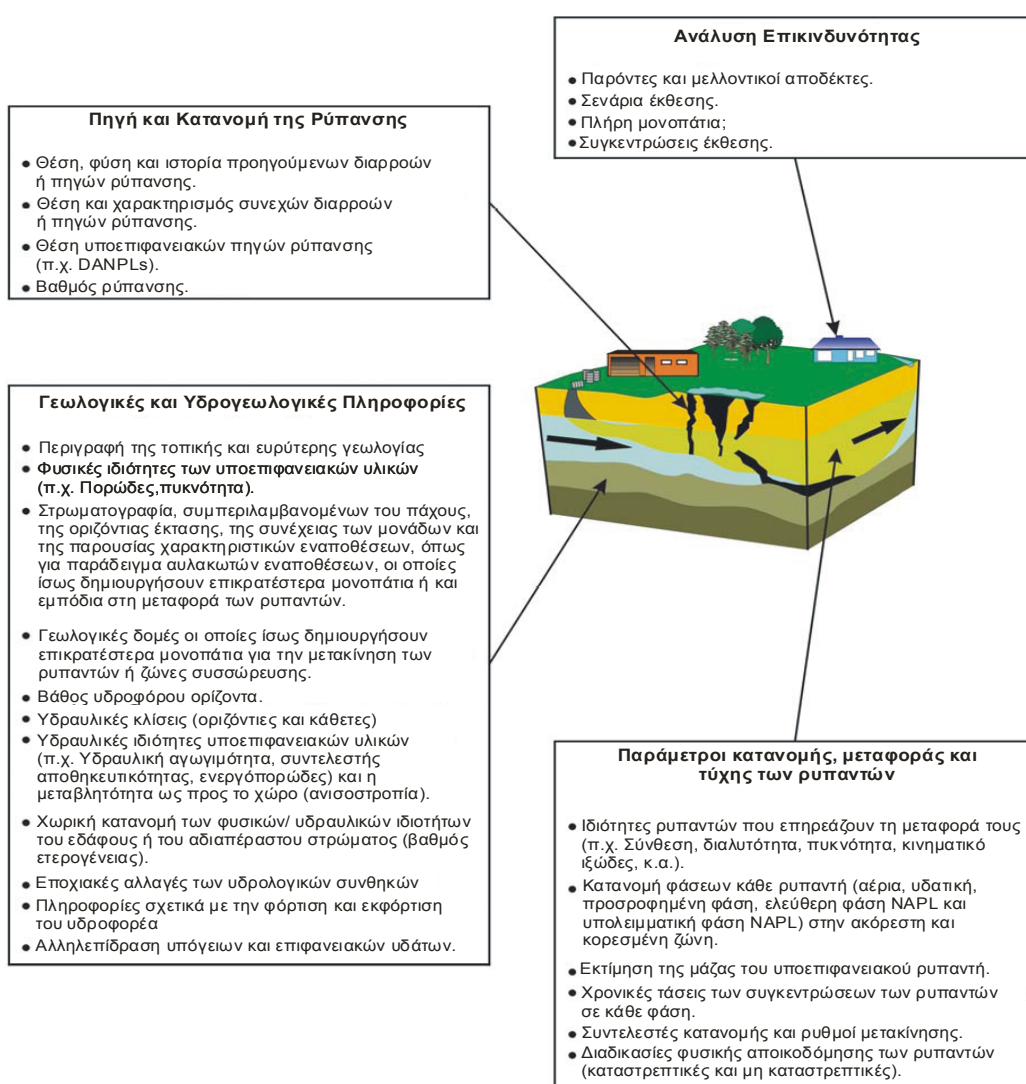


Σχήμα 18: Δέντρο αποφάσεων για την εφαρμογή της μεθόδου air sparging (U.S. Army Corps of Engineers, 1997).

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 (Σχήμα 19) για την λήψη της τελικής απόφασης.

Αναγκαίες Πληροφορίες

- Θέση πηγών νερού.
- Ταξινόμηση υπόγειων υδάτων.
- Κοντινές περιοχές - υδροφορείς υπό προστασία.
- Θέση πιθανών σημείων έκθεσης.



Σχήμα 19: Χαρακτηριστικά πεδίου που πρέπει να είναι γνωστά για τη λήψη απόφασης εφαρμογής της τεχνολογίας air sparging (Naval Facilities Engineering Service Center, 2001).

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.

3.1 Σχεδιασμός συστημάτων Air Sparging

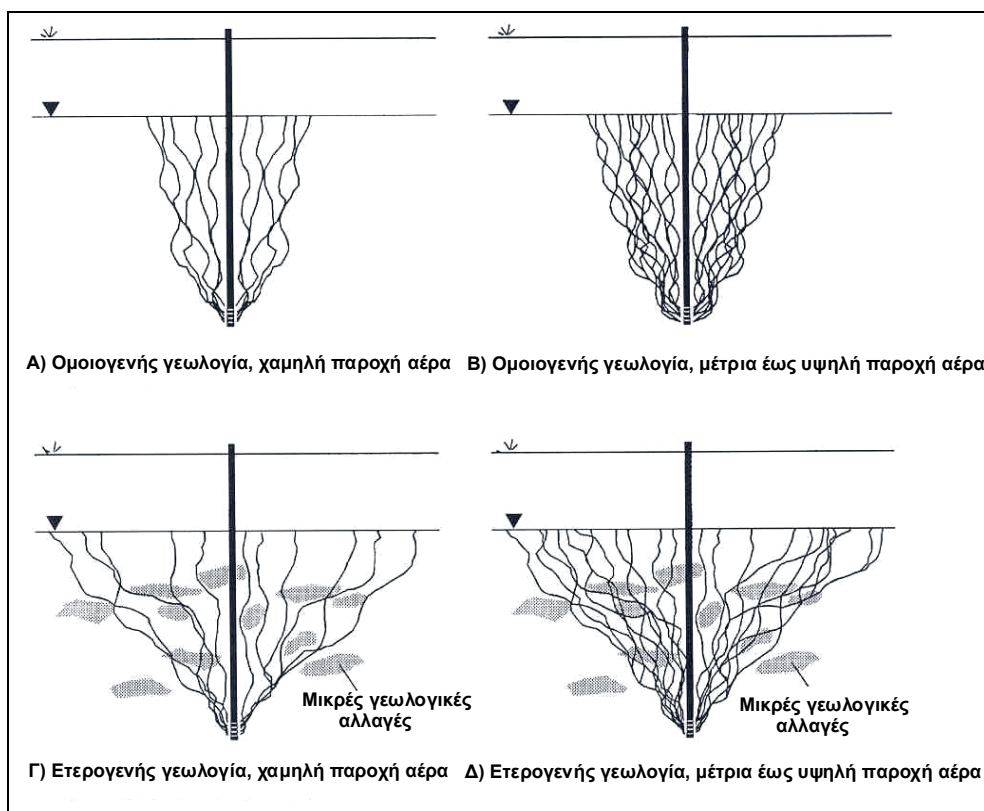
Η ασφαλής και επιτυχημένη εγκατάσταση και λειτουργία ενός συστήματος air sparging απαιτεί έναν προσεκτικό σχεδιασμό, ο οποίος θα βασιστεί σε λεπτομερείς μελέτες. Οι κύριες σχεδιαστικές παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν είναι οι εξής:

- Κατανομή αέρα (ζώνη επιρροής).
- Βάθος εισαγωγής αέρα.
- Ρυθμός παροχής αέρα και πίεση διοχέτευσης.
- Τρόπος λειτουργίας συστήματος.
- Κατασκευή πηγαδιών air sparging.
- Είδος και κατανομή ρυπαντή.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά οι παραπάνω σημαντικές παράμετροι σχεδιασμού ενός συστήματος air sparging.

3.1.1 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 (Suthersan S., 1997). 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), όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 20).



Σχήμα 20: Ζώνες επιρροής πηγαδιών air sparging κάτω από ποικίλες συνθήκες λειτουργίας (Suthersan S., 1997).

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 ρυπανθείσας 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.

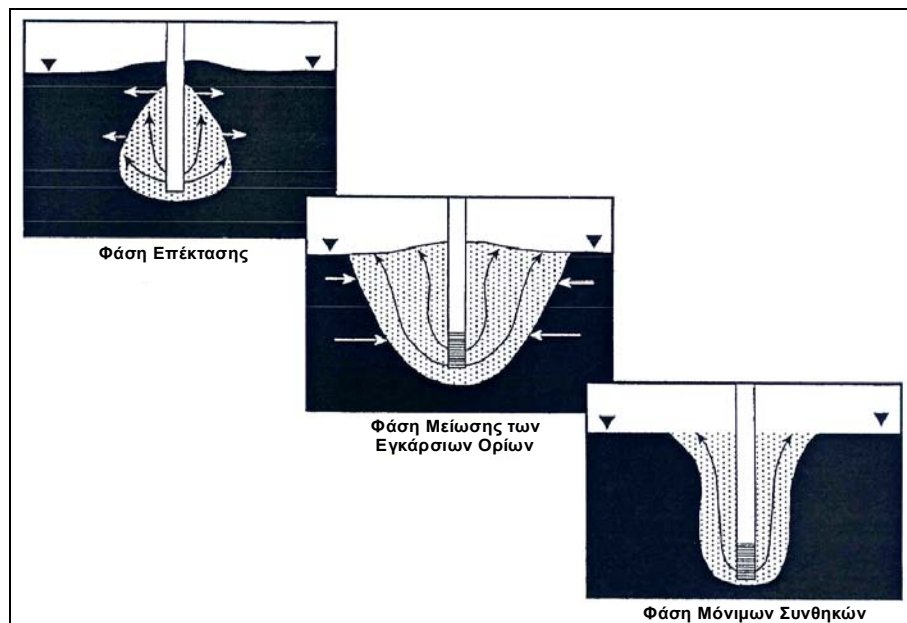
Για τον προσδιορισμό της ζώνης επιρροής έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής οι εξής κύριες μέθοδοι (Suthersan S., 1997 και McCray J. et al, 1996):

- Μέτρηση της πίεσης πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα.
- Μέτρηση της αύξησης της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου και του δυναμικού 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 ρυπαντή στο υπόγειο νερό.

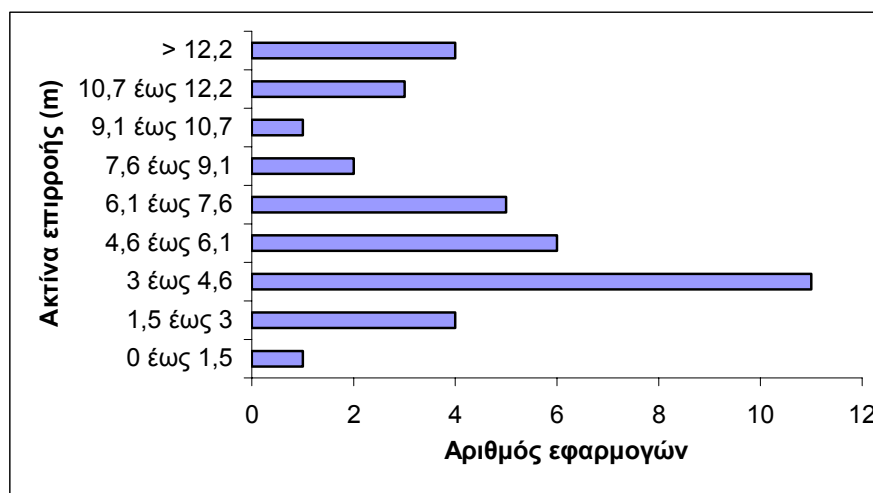
Σε γενικές γραμμές, όσον αφορά τη μορφή και την έκταση της ζώνης επιρροής πηγαδιών air sparging, μελέτες αριθμητικής προσομοίωσης της μεθόδου έχουν εντοπίσει τρεις διαφορετικές φάσεις ανάπτυξης (Σχήμα 21). Οι φάσεις αυτές είναι οι εξής (Suthersan S., 1997):

- 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.



Σχήμα 21: Σχηματική αναπαράσταση των τριών φάσεων ανάπτυξης της ζώνης επιρροής ενός πηγαδιού air sparging (U.S. Army Corps of Engineers, 1997).

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 22).



Σχήμα 22: Αναφερθείσες ζώνες (ακτίνες) επιρροής πηγαδιών air sparging σε σύνολο 37 εφαρμογών σε διαφορετικά πεδία (U.S. Army Corps of Engineers, 1997).

3.1.2 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 ρυπαντή. 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 (Suthersan S., 1997).

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 (Suthersan S., 1997).

3.1.3 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 (Leeson A. Et al, 2002).

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 (Leeson A. Et al, 2002):

- 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, P_{min} [psig - pounds-force per square inch gauge] (Leeson A. Et al, 2002):

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

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 (Leeson A. Et al, 2002). 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 (Leeson A. Et al, 2002):

$$P_{fracture} = 0.73D$$

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 (US Army Corps of Engineers, 1997).

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

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 (Leeson A. Et al, 2002). 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.

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 ρυπαντών 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 (Suthersan S., 1997).

Εκτός από τον κίνδυνο φραξίματος του υδροφορέα, άλλοι παράγοντες που περιορίζουν την παροχή του αέρα σ' ένα πηγάδι air sparging είναι (U.S. Army Corps of Engineers, 1997):

- 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 (U.S. Army Corps of Engineers, 1997), ενώ ως κατάλληλη παροχή έναρξης της λειτουργίας ενός συστήματος προτείνεται η τιμή των 565L/min (Leeson A. et al., 2002).

3.1.4 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 υδροφόρα 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 (U.S. Army Corps of Engineers, 1997).

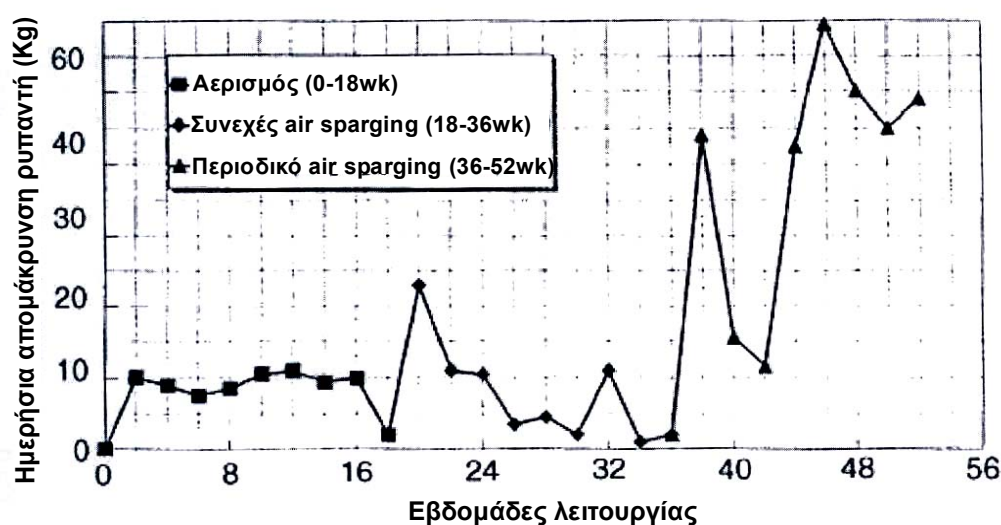
Σύμφωνα με πολλούς επιστήμονες, η περιοδική λειτουργία του συστήματος air sparging είναι ικανή να εξαλείψει μια σειρά αρνητικών φαινομένων, τα οποία εμφανίζονται κατά τη διάρκεια εφαρμογής της τεχνολογίας. Η υπάρχουσα βιβλιογραφία υποδεικνύει ότι, κατά τη διάρκεια εφαρμογής του air sparging, δυο βασικοί περιοριστικοί, ως προς την απόδοση του συστήματος, παράγοντες είναι δυνατόν να εμφανιστούν (U.S. Army Corps of Engineers, 1997):

- η αργή κινητική της διεργασίας μεταφοράς μάζας στη διεπιφάνεια νερού/ αέρα,
- ο μειωμένος ρυθμός μεταφοράς μάζας του ρυπαντή από την υδατική φάση στη διεπιφάνεια 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 ρυπαντή σε άλλες περιοχές (Suthersan S., 1997).

Τα παραπάνω ανεπιθύμητα φαινόμενα είναι δυνατόν να αποφευχθούν εφαρμόζοντας μια περιοδική λειτουργία του συστήματος air sparging (Suthersan S., 1997). 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 υδροφόρα αυξάνει την επαφή αέρα/ νερού και ενισχύει τη διάχυση του ρυπαντή από την υδατική στην αέρια φάση, αυξάνοντας την ολική απόδοση του συστήματος (Σχήμα 23) (U.S. Army Corps of Engineers, 1997).

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της περιοδικής διοχέτευσης αέρα στον υδροφόρο 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 (Suthersan S., 1997).

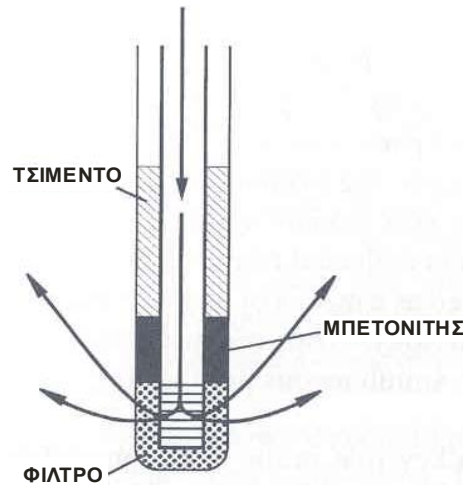


Σχήμα 23: Ποσότητες ρυπαντή που απομακρύνονται κατά τη διάρκεια εφαρμογής της τεχνολογίας air sparging, με διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας (περιοδικό ή συνεχή) (U.S. Army Corps of Engineers, 1997).

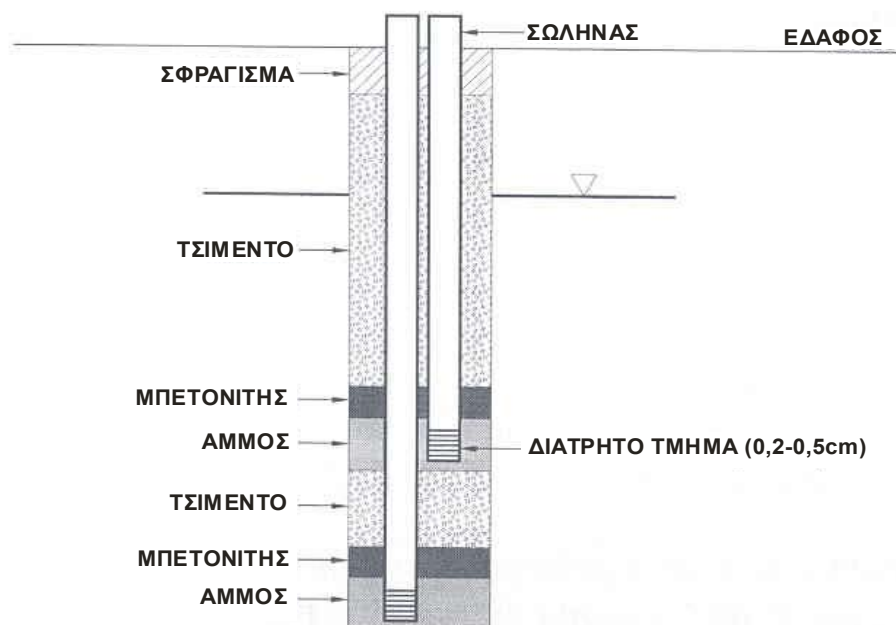
3.1.5 Κατασκευή πηγαδιών air sparging

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. Στα Σχήματα 24 και 25 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.



Σχήμα 24: Απεικόνιση του σημείου διοχέτευσης αέρα για ρηχές εφαρμογές (Suthersan S., 1997).

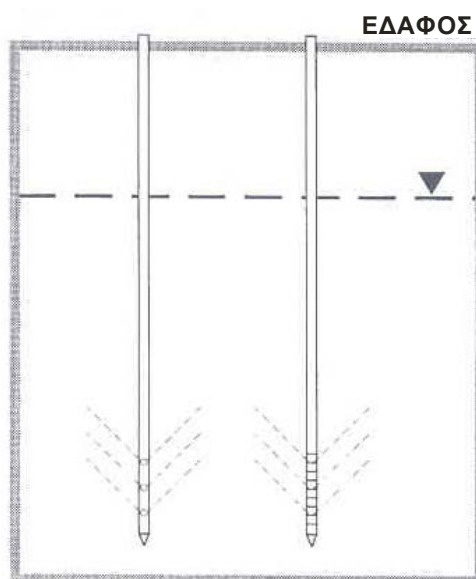


Σχήμα 25: Απεικόνιση του σημείου διοχέτευσης αέρα για βαθιές εφαρμογές (Suthersan S., 1997).

Οι διάμετροι των πηγαδιών διοχέτευσης αέρα ποικίλουν από 2,55 έως 10cm. Η απόδοση του συστήματος δεν αναμένεται να βελτιωθεί αν η διάμετρος των πηγαδιών

αυξηθεί περαιτέρω (Suthersan S., 1997). Τα πηγάδια διαμέτρου 2,55 έως 5cm 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 υδροφόρα με τη χρήση σιδερένιων σωλήνων μικρής διαμέτρου, οι οποίες καρφώνονται στο έδαφος, ίσως καταστήσουν την όλη μέθοδο πιο οικονομική κάτω από ορισμένες συνθήκες (Σχήμα 26). 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 (Suthersan S., 1997).



Σχήμα 26: Απεικόνιση πηγαδιών air sparging μικρής διαμέτρου (Suthersan S., 1997).

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 (Suthersan S., 1997).

3.1.6 Είδος και κατανομή ρυπαντή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τεχνολογία air sparging είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην περίπτωση που οι ρυπαντές του υπόγειου νερού είναι πτητικοί ή ημι-πτητικοί. Επίσης, έχει αποδειχτεί ότι μπορεί να επιφέρει καλά αποτελέσματα και στην απομάκρυνση μη πτητικών αλλά αερόβια βιοαποικοδομήσιμων ρυπαντών. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό να είναι γνωστά το είδος και τα χαρακτηριστικά του υπάρχοντος ρυπαντή, 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 ρυπαντή δεν υπάρχει κάποιο μέγιστο περιοριστικό όριο, το οποίο να καθορίζει την απόδοση της τεχνολογίας. Αντίθετα, η κατανομή του ρυπαντή 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 ρυπαντής 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.

3.2 Λειτουργία συστημάτων Air Sparging

Ένα σύστημα air sparging μπορεί να είναι είτε πιλοτικό, είτε ευρείας εφαρμογής. Και στις δυο περιπτώσεις, η λειτουργία του απαιτεί τη διεξαγωγή συγκεκριμένων εργασιών και συνεχή παρακολούθηση όλων των λειτουργικών του παραμέτρων. Επίσης, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, θα πρέπει να καταγράφονται οι πιθανές αλλαγές που επιφέρει η λειτουργία του στις συνθήκες που επικρατούν στο υπέδαφος, προκειμένου να εκτιμηθεί η απόδοσή του ή και να επαναπροσδιοριστούν οι παράμετροι λειτουργίας του.

Στη συνέχεια αναφέρονται ξεχωριστά οι στόχοι και τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας πιλοτικών και ευρείας κλίμακας συστημάτων air sparging.

3.2.1 Πιλοτικά συστήματα

Στόχος των πιλοτικών συστημάτων air sparging δεν είναι η επίλυση του υπάρχοντος προβλήματος ρύπανσης, αλλά (Naval Facilities Engineering Service Center, 2001):

1. η εκτίμηση της απόδοσης και της καταλληλότητας της τεχνολογίας air sparging για την εξυγίανση του υπό εξέταση πεδίου,
2. ο προσδιορισμός των βέλτιστων τιμών των βασικών σχεδιαστικών και λειτουργικών παραμέτρων ενός συστήματος ευρείας κλίμακας,
3. ο εντοπισμός πιθανών προβλημάτων, εμποδίων ή ακόμη και κινδύνων που ίσως εμφανιστούν κατά την εφαρμογή της τεχνολογίας.

Προκειμένου να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι, η λειτουργία πιλοτικών συστημάτων air sparging μπορεί να περιλαμβάνει (Naval Facilities Engineering Service Center, 2001):

- Δειγματοληψία και ανάλυση ποιοτικών χαρακτηριστικών εδάφους, υπόγειου νερού και εδαφικού αέρα, πριν τη διοχέτευση αέρα στον υδροφόρο.
- Προσδιορισμό της κατάλληλης πίεσης και παροχής του διοχετευόμενου αέρα.
- Μέτρηση των δημιουργούμενων, λόγω της εισαγωγής αέρα, πιέσεων στο υπόγειο νερό.
- Μετρήσεις διαλυμένου οξυγόνου.
- Διεξαγωγή τεστ με ιχνηθέτες (π.χ. ήλιο).
- Μετρήσεις της σύστασης εδαφικού αέρα και δημιουργούμενων ατμών (όπου υπάρχει σύστημα άντλησης ατμών).
- Παρατηρήσεις.

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 2) παρουσιάζονται οι κύριες δραστηριότητες μιας πιλοτικής εφαρμογής της τεχνολογίας air sparging.

Πίνακας 2: Βασικές δραστηριότητες πιλοτικών εφαρμογών air sparging (Naval Facilities Engineering Service Center, 2001)

Δραστηριότητα	Ερωτήσεις που πρέπει να απαντηθούν
Δειγματοληψίες υπόβαθρου <ul style="list-style-type: none"> - Πίεση - Διαλυμένο οξυγόνο - Συγκέντρωση ρυπαντή στο υπόγειο νερό - Εδαφικός αέρας - Γεωφυσικές παράμετροι 	Ποιες είναι οι συνθήκες στην ακόρεστη και κορεσμένη ζώνη πριν την εισαγωγή αέρα;
Δοκιμές ρύθμισης πίεσης και παροχής διοχέτευσης αέρα	Είναι δυνατόν να επιτευχθούν οι επιθυμητές παροχές αέρα υπό ασφαλείς και λογικές πιέσεις;
Μετρήσεις πίεσης υπογείων υδάτων	Ποια είναι τα γενικά χαρακτηριστικά της κατανομής του αέρα;
Τεστ με ιχνηθέτες (π.χ. ήλιο)	Ποια είναι η εγκάρσια έκταση της κατανομής του αέρα; Υπάρχει ένδειξη ύπαρξης προτιμώμενων μονοπατιών;
Δειγματοληψία εδαφικού αέρα ή παραγόμενων ατμών	Ποιος είναι ο ρυθμός εξάτμισης; Υπάρχουν εμφανείς κίνδυνοι;
Μετρήσεις συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου	Ποια είναι η εγκάρσια έκταση της κατανομής του διαλυμένου οξυγόνου; Υπάρχει ένδειξη ύπαρξης προτιμώμενων κατευθύνσεων;
Παρατηρήσεις	Υπάρχουν οσμές ή υψηλός θόρυβος που καθιστούν τη λειτουργία του συστήματος μη αποδεκτή;
Χρήση γεωφυσικών εργαλείων (τομογραφίες ηλεκτρικής αντίστασης)	Ποια είναι η κάθετη και η εγκάρσια έκταση της κατανομής του αέρα στην ζώνη ρύπανσης;

Στην περίπτωση που ο κύριος στόχος της πιλοτικής μονάδας είναι ο προσδιορισμός της ακτίνας επιρροής ενός συστήματος air sparging σε μια συγκεκριμένη περιοχή, διεξάγοντας μετρήσεις πίεσης κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, η λειτουργία της είναι αρκετό να διαρκέσει από 8 ώρες έως 2 ημέρες. Αν στόχος είναι ο προσδιορισμός της αύξησης της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στην κορεσμένη ζώνη, ο απαιτούμενος χρόνος λειτουργίας του συστήματος είναι 2 έως 4 ημέρες, ή 4 εβδομάδες, αν είναι επιθυμητός και ο προσδιορισμός της ζώνης επιρροής βάση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου. Τέλος, αν ο στόχος είναι η παρατήρηση της μείωσης της συγκέντρωσης του ρυπαντή, τότε ο απαιτούμενος χρόνος μπορεί να φτάσει σε αρκετούς μήνες, ανάλογα με τις συνθήκες του εκάστοτε πεδίου (U.S. Army Corps of Engineers, 1997).

Τα τμήματα από τα οποία αποτελείται ένα τυπικό πιλοτικό σύστημα air sparging είναι τα εξής (Naval Facilities Engineering Service Center, 2001):

- τουλάχιστον 1 πηγάδι διοχέτευσης αέρα με ροόμετρο, μανόμετρο και βαλβίδα ελέγχου,
- σύστημα παροχής αέρα που αποτελείται από φίλτρο αέρα, αεροσυμπιεστή και δοχείο πεπιεσμένου αέρα,
- τρία ή περισσότερα πιεζόμετρα στο υπόγειο νερό ή πηγάδια παρακολούθησης,
- τρία ή περισσότερα πηγάδια παρακολούθησης της κορεσμένης και της ακόρεστης ζώνης σε διαφορετικά βάθη,
- σύστημα άντλησης ατμών (για την εκτίμηση της εξάτμισης του ρυπαντή ή την αποφυγή απελευθέρωσης εύφλεκτων αερίων στο περιβάλλον).

Τα δεδομένα που συλλέγονται από τη λειτουργία της πιλοτικής μονάδας πρέπει να εκτιμηθούν προκειμένου να κριθεί η καταλληλότητα της τεχνολογίας air sparging για την εξυγίανση του υπό μελέτη πεδίου. Σε αρκετές περιπτώσεις, η εκτίμηση των συλλεχθέντων στοιχείων είναι δύσκολη, δεδομένου ότι σε κανένα πεδίο δεν μπορεί να παρατηρηθεί πλήρως ομοιογενής ροή του αέρα γύρω από ένα πηγάδι, όπως αυτή παρουσιάζεται στη θεωρία. Παρόλα αυτά, αποτελέσματα όπως αυτά που ακολουθούν στη συνέχεια υποδεικνύουν σχεδόν αναμφισβήτητα την ακαταλληλότητα της τεχνολογίας air sparging (Naval Facilities Engineering Service Center, 2001):

- Ο αέρας δεν είναι δυνατόν να διοχετευτεί στον υδροφόρα με παροχή 140-565 L/min υπό πίεση που δεν υπερβαίνει την πίεση φραξίματος αυτού.
- Οι ρυθμοί απομάκρυνσης του ρυπαντή είναι πολύ χαμηλοί ακόμη και σε περιοχές που παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις στο υπόγειο νερό.
- Όλη η διοχετευόμενη ποσότητα αέρα κινείται μέσω καναλιών υψηλής διαπερατότητας, χωρίς να εξαπλώνεται ομοιόμορφα μέσα στον υδροφόρα.
- Οι μετρούμενες πιέσεις στο υπόγειο νερό είναι υψηλές (γεγονός που σημαίνει ότι ο εισαγόμενος αέρας παραμένει εγκλωβισμένος μέσα στον υδροφόρα, χωρίς να μπορεί να κινηθεί ανοδικά προς την ακόρεστη ζώνη, πιθανόν λόγω της παρουσίας φακών αδιαπέραστων εδαφικών σχηματισμών).
- Υπάρχει παραγωγή οσμών από τους ρυπαντές ή θορύβου από τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό (γεγονός που μπορεί να αποτρέψει την εφαρμογή της τεχνολογίας σε ευρεία κλίμακα όχι από τεχνική άποψη, αλλά από κοινωνική).

Αντίθετα, αποτελέσματα όπως η ύπαρξη ικανοποιητικής ομοιόμορφης κατανομής του αέρα στον υδροφορέα υπό λογικές πιέσεις και παροχές αέρα, η παρατήρηση σημαντικής απομάκρυνσης του ρυπαντή και η απουσία προβλημάτων λόγω ανομοιογενειών του εδάφους, αποτελούν θετικά στοιχεία, τα οποία ουσιαστικά εγκρίνουν την πλήρη εφαρμογή της τεχνολογίας.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα μιας πιλοτικής μονάδας air sparging καθορίζονται άμεσα από την τοπική λιθολογία και επομένως σε μια μεγάλη και ανομοιογενή ρυπανθήσα περιοχή θα πρέπει να διεξαχθούν πιλοτικά τεστ σε διάφορα σημεία αυτής, πριν την πλήρη εφαρμογή της τεχνολογίας.

3.2.2 Συστήματα ευρείας κλίμακας

Στόχος των συστημάτων air sparging ευρείας κλίμακας είναι η εξυγίανση της ρυπανθήσας περιοχής, σύμφωνα με τα εκάστοτε κριτήρια καθαρισμού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για το σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων χρησιμοποιούνται τα δεδομένα που αποκτήθηκαν κατά τη λειτουργία της πιλοτικής μονάδας (π.χ. βέλτιστη πίεση και παροχή αέρα, έκταση ζωνών επιρροής, κτλ.) και τα στοιχεία που συλλέχθηκαν από τις προκαταρκτικές μελέτες του πεδίου.

Μετά το σχεδιασμό και την εγκατάσταση του συστήματος, ακολουθεί η λειτουργία του, η οποία πρέπει να ξεκινήσει πολύ προσεκτικά. Στις περισσότερες περιπτώσεις, πραγματοποιείται ένα «τεστ έναρξης», όπου το σύστημα λειτουργεί για μικρό χρονικό διάστημα (μερικών ωρών) με στόχο τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας των επιμέρους τμημάτων του συστήματος. Συγκεκριμένα, ελέγχονται η λειτουργία του αεροσυμπιεστή, των ροόμετρων, των πιεζόμετρων, του συστήματος άντλησης ατμών (όπου υπάρχει), κα., προκειμένου, όπου υπάρξει επιπλοκή, αυτή να εντοπιστεί και να διορθωθεί άμεσα, πριν προκληθούν περαιτέρω προβλήματα (Naval Facilities Engineering Service Center, 2001).

Αφού ολοκληρωθεί το «τεστ έναρξης» και επιβεβαιωθεί ο σωστός σχεδιασμός και εγκατάσταση του συστήματος, ξεκινάει η κανονική λειτουργία του. Κατά τη διάρκειά της οι λειτουργικές παράμετροι του συστήματος πρέπει να ελέγχονται τακτικά. Παράλληλα, πρέπει να υπάρχει ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης κάποιων ποιοτικών παραμέτρων του πεδίου, οι οποίες σχετίζονται άμεσα με τη λειτουργία του συστήματος και είναι ικανές να επιβεβαιώσουν τόσο την ορθότητά της, όσο και γενικότερα την απόδοση της όλης τεχνολογίας.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται κάποιες βασικές παράμετροι παρακολούθησης ενός συστήματος air sparging ευρείας κλίμακας (Πίνακας 3) και ορισμένα πιθανά προβλήματα που είναι δυνατόν να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του (Πίνακας 4).

Πίνακας 3: Παράμετροι παρακολούθησης ενός συστήματος air sparging ευρείας κλίμακας (Suthersan S., 1997).

Παράμετροι πεδίου	Μέτρηση
Βετλίωση της ποιότητας του υπόγειου νερού	Περιοδική δειγματοληψία από τα πηγάδια παρακολούθησης, αφού κλείσει η παροχή αέρα.
Επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου/θερμοκρασίας	Μέτρηση στο πεδίο, αφού κλείσει η παροχή αέρα.
Δυναμικό οξειδοαναγωγής/ pH	Μέτρηση στο πεδίο, αφού κλείσει η παροχή αέρα.
Παραπροϊόντα βιοαποικοδόμησης, όπως CO ₂	Δειγματοληψία υπόγειου νερού.
Συγκεντρώσεις εδαφικού αέρα	Δειγματοληψία και ανάλυση σε εργαστήριο.
Πίεση εδαφικού αέρα	Χρήση μανόμετρων.
Επίπεδα υδροφόρου ορίζοντα	Χρήση μετρητών στάθμης υδροφόρου ορίζοντα.
Λειτουργικές παράμετροι	Μετρήσεις
Πίεση εισαγωγής αέρα	Χρήση μανόμετρων.
Κενό πηγαδιών άντλησης παραγόμενων ατμών	Χρήση μανόμετρων.
Παροχή αέρα σε κάθε πηγάδι	Χρήση ροόμετρων.
Ρυθμός άντλησης παραγόμενων ατμών	Χρήση ροόμετρων.
Συγκεντρώσεις παραγόμενων ατμών και εδαφικού αέρα (O ₂ , CO ₂ , N ₂ , CH ₄)	Δειγματοληψία και ανάλυση στο εργαστήριο.
Περίοδος λειτουργίας	Χρήση χρονομέτρου.

Πίνακας 4: Προβλήματα που μπορεί να εμφανιστούν κατά τη λειτουργία ενός συστήματος air sparging ευρείας κλίμακας και πιθανές λύσεις αυτών (U.S. Army Corps of Engineers, 1997).

Πρόβλημα	Υποθέσεις	Πιθανές Λύσεις
Η ζώνη επιρροής είναι πολύ μικρή ή πιο μικρή από ότι αναμενόταν.	Το έδαφος μπορεί να είναι λιγότερο διαπερατό σε ορισμένες περιοχές ή υπάρχουν προτιμώμενα μονοπάτια.	Επιπλέον εξερεύνηση του υπεδάφους. Νέα ρύθμιση της παροχής. Προσθήκη επιπλέον πηγαδιών. Μεγαλύτερη πυκνότητα των πηγαδιών air sparging. Έλεγχος για φράξιμο. Έλεγχος για ύπαρξη προτιμώμενων μονοπατιών αέρα.
Το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα είναι περιοδικά ασυνεχές.	Ίσως υπάρχουν προτιμώμενα μονοπάτια ροής ή ετερογένεια.	Επιπλέον εξερεύνηση του υπεδάφους. Προσθήκη επιπλέον πηγαδιών. Σφράγισμα προτιμώμενων μονοπατιών αέρα.
Αυξανόμενες υψηλές πιέσεις εισαγωγής αέρα	Πιθανό φράξιμο του πηγαδιού.	Καθαρισμός πηγαδιών.
Οι συγκεντρώσεις των ρυπαντών έχουν μειωθεί μόνο σε ορισμένα πηγάδια.	Η εξυγίανση μπορεί να έχει επιτευχθεί σε ορισμένες περιοχές του πεδίου.	Μείωση της παροχής σε ορισμένα πηγάδια. Αποσύνδεση ορισμένων πηγαδιών από το σύστημα. Έλεγχος επανεμφάνισης της ρύπανσης.
Οι συγκεντρώσεις του ρυπαντή παραμένουν υψηλές, παρόλο που παρατηρούνται υψηλοί ρυθμοί απομάκρυνσής του.	Ύπαρξη άγνωστης ρύπανσης του υπόγειου νερού από προϊόντα ελεύθερης φάσης ή DNAPL.	Περισσότερη εξερεύνηση. Ανάκτηση προϊόντος.
Παρατηρούνται χαμηλές συγκεντρώσεις του ρυπαντή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος και υψηλές όταν το σύστημα δεν λειτουργεί.	Ύπαρξη περιορισμών διάχυσης, προτιμώμενων μονοπατιών ή πολύ υψηλών παροχών αέρα.	Εισαγωγή καυτών αερίων. Εκσκαφή των πολύ ρυπασμένων σημείων και επεξεργασία εδάφους ex-situ.
Παρατηρείται μικρή απόδοση του συστήματος άντλησης των ατμών μετά από βροχόπτωση.	Το σύστημα είναι ευαίσθητο στην επίδραση της υγρασίας στον αερισμό και τη διαπερατότητα του αέρα.	Κάλυψη του πεδίου. Κλείσιμο του συστήματος μετά από βροχόπτωση.
Παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις του ρυπαντή στους παραγόμενους ατμούς, κοντά στα επίπεδα έκρηξης.	Ύπαρξη ελεύθερης φάσης, συσσώρευση μεθανίου ή άλλων πτητικών υδρογονανθράκων.	Προμήθεια μη εκρηκτικού συστήματος. Έλεγχος για την ύπαρξη άγνωστων πηγών ρύπανσης. Διάλυση/ αραίωση των παραγόμενων ατμών.

Όταν οι μετρήσεις της συγκέντρωσης του ρυπαντή στο υπόγειο νερό δείξουν ότι έχει επιτευχθεί ο επιθυμητός βαθμός καθαρισμού, η λειτουργία του συστήματος πρέπει να τερματιστεί. Σε αυτήν την περίπτωση ο τερματισμός είναι προσωρινός, προκειμένου να πραγματοποιηθεί παρακολούθηση του πεδίου και να προσδιοριστεί το κατά πόσο η κατάσταση ρύπανσης του υδροφορέα παραμένει κάτω από τα υπάρχοντα όρια ακόμη και μετά από τη διακοπή της εφαρμογής του air sparging. Αν, τουλάχιστον 2 με 3 μήνες μετά τον προσωρινό τερματισμό της λειτουργίας του συστήματος, αποδειχθεί ότι δεν παρατηρείται αύξηση της συγκέντρωσης του ρυπαντή ή επέκταση της ζώνης ρύπανσης, τότε ο τερματισμός μπορεί να γίνει οριστικός (Naval Facilities Engineering Service Center, 2001).

Τερματισμός της λειτουργίας ενός συστήματος air sparging μπορεί ακόμη να πραγματοποιηθεί όταν ο ρυθμός απομάκρυνσης του ρυπαντή μειωθεί δραστικά, χωρίς αντίστοιχη μείωση της συγκέντρωσής του στον υδροφορέα. Σε αυτήν την περίπτωση, το σύστημα δεν είναι πλέον αποδοτικό και θα πρέπει να εξεταστούν εναλλακτικές τεχνολογίες εξυγίανσης (Naval Facilities Engineering Service Center, 2001).

Η απαιτούμενη διάρκεια λειτουργίας ενός συστήματος air sparging κυμαίνεται από 6 μήνες έως 3 χρόνια, δεδομένου ότι στις περισσότερες περιπτώσεις (ανάλογα και με τις εκάστοτε συνθήκες πεδίου) αυτό το χρονικό διάστημα είναι αρκετό για την εξυγίανση μιας ρυπανθήσας περιοχής. Γενικότερα, ο χρόνος εξυγίανσης ενός ρυπασμένου υδροφορέα εξαρτάται από τα εξής (Suthersan S., 1997):

- τον εκάστοτε στόχο εξυγίανσης,
 - την ύπαρξη μάζας ρυπαντή στην ακόρεστη ζώνη και στη ζώνη τριχοειδών φαινομένων,
 - την ποσότητα της διαλυμένης και της προσροφημένης ποσότητας του ρυπαντή,
 - την παρουσία ή απουσία DNAPL,
- την έκταση και τη φάση του ρυπαντή,
- την πτητικότητα και τη βιοαποικοδομησιμότητα των υπαρχόντων ρυπαντών,
- τη διαλυτότητα και τον καταμερισμό των ρυπαντών,
- τις γεωλογικές συνθήκες,
 - το ποσοστό κορεσμού σε αέρα,
 - την πυκνότητα των καναλιών του αέρα,
 - το μέγεθος των καναλιών του αέρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ο χώρος όπου εγκαταστάθηκε και λειτούργησε η πιλοτική μονάδα air sparging, που μελετάται στην παρούσα εργασία, ανήκει στην ευρύτερη περιοχή του διυλιστηρίου πετρελαίου των Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων Ασπροπύργου (ΒΕΑ) της εταιρίας ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ Α.Ε.. Στην περιοχή αυτή έχουν παρατηρηθεί σημαντικά προβλήματα ρύπανσης τόσο του εδάφους, όσο και των υπογείων υδάτων, λόγω διαρροών από δεξαμενές αποθήκευσης και αγωγούς μεταφοράς πετρελαϊκών προϊόντων.

4.1 Γενικά στοιχεία

Το υπό μελέτη διυλιστήριο είναι σύνθετο και ένα από τα πλέον σύγχρονα στην Ευρώπη. Στα τέλη της προηγούμενης δεκαετίας (1989) διαπιστώθηκε η παρουσία πετρελαιοειδών στον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής εγκατάστασης και λειτουργίας αυτού. Το φαινόμενο αυτό θεωρήθηκε ιδιαίτερα επικίνδυνο, δεδομένου ότι πλησίον των εγκαταστάσεων υπάρχει η λίμνη Κουμουνδούρου και η ακτογραμμή του κόλπου της Ελευσίνας. Μια ενδεχόμενη διαρροή πετρελαιοειδών προς αυτά θα μπορούσε να έχει καταστροφικές συνέπειες για το τοπικό οικοσύστημα και φυσικά θα εμπεριείχε σημαντική επικινδυνότητα για όλους τους πιθανούς αποδέκτες (ψάρια, πουλιά, ανθρώπους, κτλ.). Ως εκ τούτου κρίθηκε αναγκαία η εξυγίανση του υδροφορέα ή τουλάχιστον ο περιορισμός της υπάρχουσας ρύπανσης εντός των ορίων των εγκαταστάσεων.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος ανατέθηκε σχετική μελέτη στο Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) με σκοπό τον προσδιορισμό της φύσης και του μεγέθους του προβλήματος. Με βάση τα στοιχεία της μελέτης, η εταιρία προχώρησε σε διεθνή διαγωνισμό για την ανάθεση του έργου της άντλησης της πετρελαιοκηλίδας από το υπέδαφος και την απορρύπανση του υπόγειου υδροφορέα, η οποία ξεκίνησε συστηματικά το 1994.

Η υλοποίηση αυτού του έργου γρήγορα έδειξε ότι η αντιμετώπιση του προβλήματος μόνο με την άντληση των ελαιωδών δεν ήταν επαρκής για την οριστική επίλυση του, δεδομένου ότι η πετρελαιοκηλίδα πιθανόν ανατροφοδοτούνταν. Για το σκοπό αυτό η διοίκηση του διυλιστηρίου προέβη σε λεπτομερή εξέταση όλων των παραμέτρων του

προβλήματος, με τελικό ζητούμενο την εκπόνηση ενός ολοκληρωμένου σχεδίου δράσης για την αποτελεσματική αντιμετώπιση της ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα, το οποίο υποβλήθηκε το 1996 για χρηματοδότηση στην Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια του Προγράμματος LIFE.

Το πρόγραμμα χαρακτηρίζεται για τον καινοτομικό του χαρακτήρα καθώς επιχειρεί να αντιμετωπίσει σφαιρικά ένα σύνθετο πρόβλημα, στα πλαίσια της ολοκληρωμένης περιβαλλοντικής πολιτικής της εταιρίας, ακολουθώντας τα εξής βήματα:

- προσδιορισμός των πηγών ρύπανσης του υπεδάφους από πηγές εντός και εκτός των εγκαταστάσεων,
- εκτίμηση της ποσότητας των υδρογονανθράκων που βρίσκονται στο υπέδαφος,
- εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών ανάκτησης υδρογονανθράκων και αποκατάστασης του υπεδάφους,
- εκτίμηση του κόστους αποκατάστασης.

Οι τεχνικές που εφαρμόστηκαν για την υλοποίηση του προγράμματος ήταν οι εξής:

- Τεχνική "χημικού αποτυπώματος" (chemical fingerprinting), με στόχο τον εντοπισμό των υφιστάμενων ρυπασμένων περιοχών και την ταυτοποίηση του είδους, της ηλικίας και της πιθανής πηγής προέλευσης των πετρελαιοειδών, μέσω σύνθετων αναλυτικών μεθόδων.
- Τεχνική "ακουστικών εκπομπών" (acoustic emission), η οποία βασίζεται στην ανάλυση, μέσω ειδικού λογισμικού, των ηχητικών κυμάτων που παράγονται από οποιαδήποτε ανεπιθύμητη δραστηριότητα έχει σχέση με τη δεξαμενή (διαρροή ή/και ενεργός διάβρωση πυθμένα). Η εφαρμογή της τεχνικής στις δεξαμενές αποθήκευσης καθιστά δυνατή την εκπόνηση προγράμματος συντήρησης των δεξαμενών, δίνοντας προτεραιότητα στη συντήρηση των δεξαμενών με υψηλό κίνδυνο διαρροών.
- Τεχνική bioslurping-bioventing, η οποία χαρακτηρίζεται από το συνδυασμό του αερισμού του υπεδάφους και της ανάκτηση της υπερκείμενης κηλίδας του υδροφορέα. Με την εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής οι ποσότητες του αντλούμενου νερού από τον υδροφόρο ορίζοντα είναι μικρές.

Τα τελευταία 2 χρόνια η διαχείριση του προγράμματος πραγματοποιείται από το Πολυτεχνείο Κρήτης και συγκεκριμένα από το Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και

Επικινδύνων Αποβλήτων. Στην περιοχή μελέτης διεξάγονται μετρήσεις και μελέτες για τον χαρακτηρισμό της υπάρχουσας ρύπανσης. Συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται:

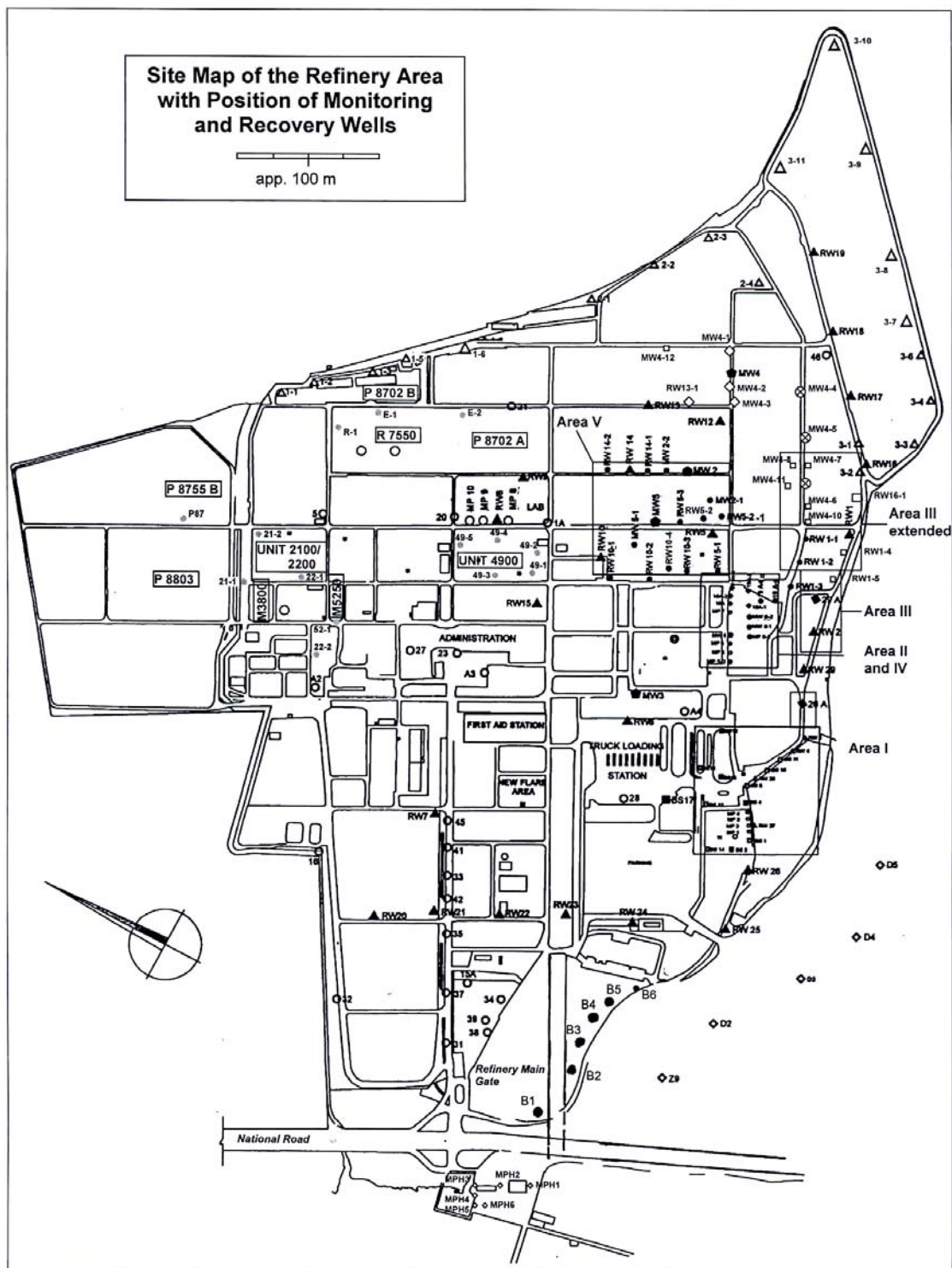
- άντληση και ανάκτηση ελεύθερης ελαιώδους φάσης από τον υδροφορέα της περιοχής με εφαρμογή της τεχνικής bioslurping-bioventing (Εικόνα 1),
- μετρήσεις του πάχους της ελαιώδους φάσης σε διάφορα σημεία της περιοχής του διυλιστηρίου,
- τεστ ανάκτησης (bail-down tests),
- τεστ παραγωγικότητας με πλυντρίδα,
- δειγματοληψίες αέρα, νερού και εδάφους από την περιοχή του διυλιστηρίου, με στόχο την ποσοτική και ποιοτική ταυτοποίηση των υπαρχόντων πετρελαϊκών συστατικών,
- εκπόνηση αναφορών και τεχνικών εκθέσεων, στις οποίες επεξεργάζονται και ερμηνεύονται οι παρατηρήσεις και μετρήσεις του πεδίου,
- διάνοιξη νέων πηγαδιών παρατήρησης με προοπτική εφαρμογής της μεθόδου air sparging.



Εικόνα 1: Όψη του υπάρχοντος συστήματος άντλησης ελαιωδών (bioslurping) στις εγκαταστάσεις του διυλιστηρίου Ασπροπύργου.

Στον Χάρτη 1, που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα, φαίνονται οι εγκαταστάσεις του διυλιστηρίου των ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΩΝ στον Ασπρόπυργο και τα υπάρχοντα πηγάδια, από τα οποία πραγματοποιούνται άντληση ελαιωδών, δειγματοληψίες

ελεύθερης φάσης, υπόγειου νερού, εδάφους και εδαφικού αέρα και μετρήσεις του πάχους της ελαιώδους φάσης.



Χάρτης 1: Η περιοχή των εγκαταστάσεων του υπό μελέτη διυλιστηρίου.

4.2 Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά

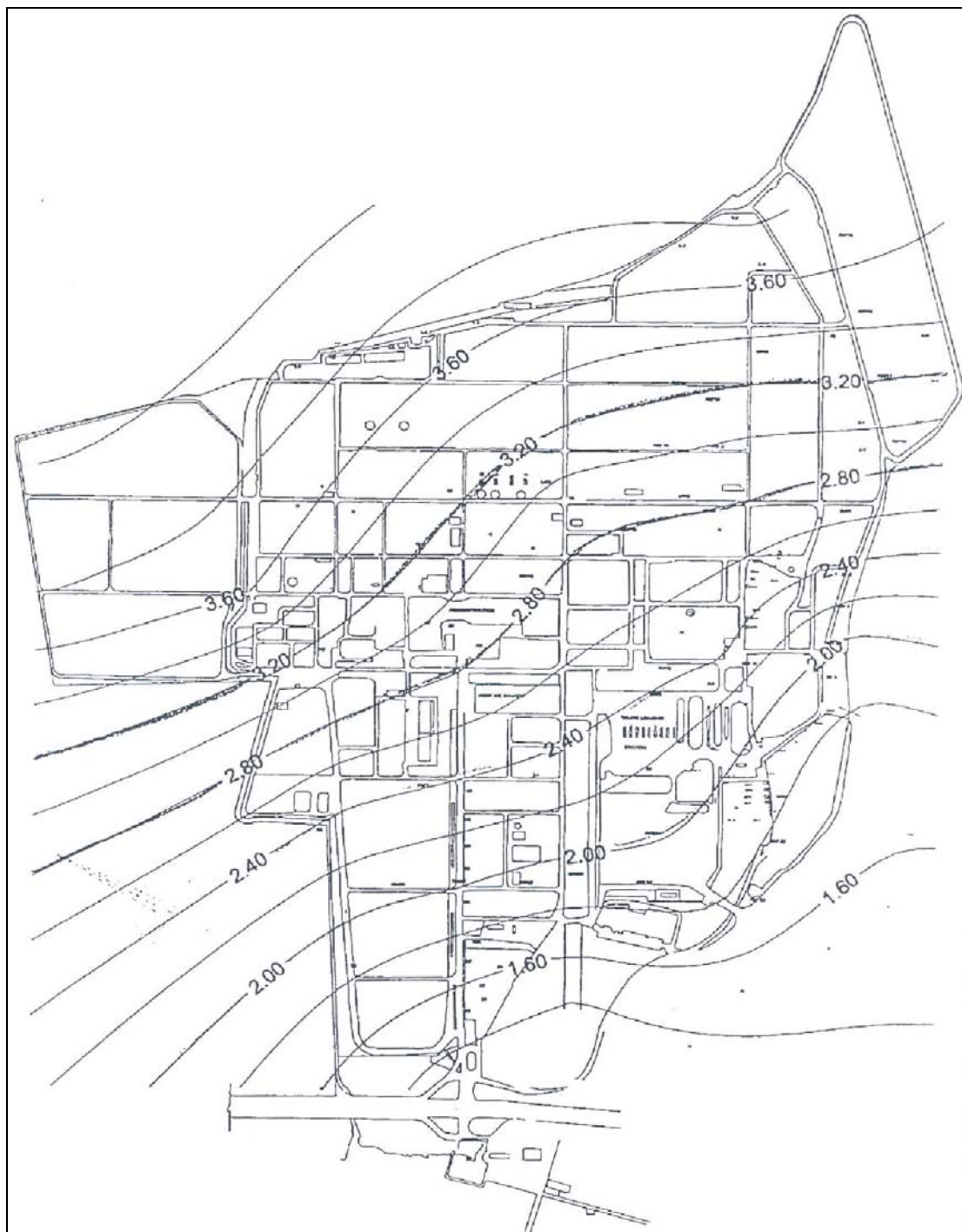
Σύμφωνα με τις διαγραφίες που έχουν πραγματοποιηθεί κατά τη διάνοιξη των πηγαδιών παρακολούθησης και άντλησης της ελεύθερης φάσης στα πλαίσια του προγράμματος αποκατάστασης, το έδαφος στην περιοχή του διυλιστηρίου αποτελείται από αμμώδη και ιλυώδη άργιλο (sand – silty clay) με τη συμμετοχή χαλικιών και χονδρότερων υλικών. Το πάχος των υλικών αυτών κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1,5 και 6m. Η χημική και ορυκτολογική σύσταση του εδαφικού υλικού σχετίζεται με αυτήν του υποστρώματος, το οποίο αποτελείται από ασβεστόλιθο και δολομίτη στους λόφους και αλουβιακές αποθέσεις στα χαμηλότερα επίπεδα. Το ενεργό πορώδες του ασβεστόλιθου είναι μεταξύ των τιμών 0,1-5%, το οποίο αποτελεί μια ενδιάμεση τιμή πορώδους σε σχέση με άλλα πετρώματα, η οποία βέβαια ευνοεί τη γρήγορη μετακίνηση των ρυπαντών. Το νερό της βροχής προκαλεί έντονη διάβρωση στο εδαφικό υπόστρωμα με αποτέλεσμα στην περιοχή να έχουν εντοπιστεί έγκοιλα σε διάφορα μεγέθη (Gidarakos E. et al., 1999).

Το νερό που μεταφέρεται υπογείως δημιουργεί ένα πολύπλοκο υπόγειο σύστημα καναλιών, το οποίο κατά τόπους γίνεται επιφανειακό και καταλήγει σε πηγές ή στη θάλασσα. Τα ρήγματα που υπάρχουν στην περιοχή διακόπτουν ή αλλάζουν την πορεία της υπόγειας ροής και είναι υπεύθυνα για τις αλλαγές στη λιθολογία αλλά και την ύπαρξη λόφων. Η ροή του υπόγειου νερού καθορίζεται από αυτές τις αλλαγές και το υδραυλικό ύψος κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1 και 9m. Επίσης η παρουσία εγκοίλων, τα οποία αποθηκεύουν ποσότητες νερού, οδηγούν σε μη προβλέψιμες κατευθύνσεις την υπόγεια απορροή (Gidarakos E. et al., 1999).

Ένα επιπλέον σημαντικό πρόβλημα κατά τον προσδιορισμό των εδαφικών ιδιοτήτων είναι η ποσότητα και ο τύπος των υπόγειων εγκαταστάσεων που υπάρχουν στην περιοχή του διυλιστηρίου. Έτσι το έδαφος σε πολλά σημεία διακόπτεται από υλικά όπως ξύλο, τσιμέντο, ασφάλι, σκουπίδια, κα, αλλά και από εγκαταστάσεις όπως σωληνώσεις, υπόγεια διαμερίσματα και κανάλια. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες έχουν ως αποτέλεσμα την επίδραση (Κανελλοπούλου Γ., 2004):

- στην υπόγεια απορροή,
- στην εξάπλωση του εδαφικού αέρα,
- στον εντοπισμό της θέσης και της έκτασης των πλουμίων της ελεύθερης φάσης στον υπόγειο υδροφόρα.

Στον Χάρτη 2 φαίνονται οι ισοϋψείς γραμμές του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα του διυλιστηρίου, όπως αυτές έχουν προκύψει από παλαιότερες μελέτες της υδρογεωλογίας της περιοχής.



Χάρτης 2: Ισοϋψείς γραμμές του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα του διυλιστηρίου.

4.3 Υφιστάμενη κατάσταση ρύπανσης

Σύμφωνα με τις δειγματοληψίες και τις αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι στιγμής τόσο στην ελαιώδη φάση, όσο και στο νερό, στο έδαφος και στον εδαφικό αέρα της περιοχής του διυλιστηρίου έχει διαμορφωθεί μια αξιόπιστη εικόνα της κατάστασης ρύπανσης που επικρατεί, η οποία παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους.

4.3.1 Ελεύθερη φάση

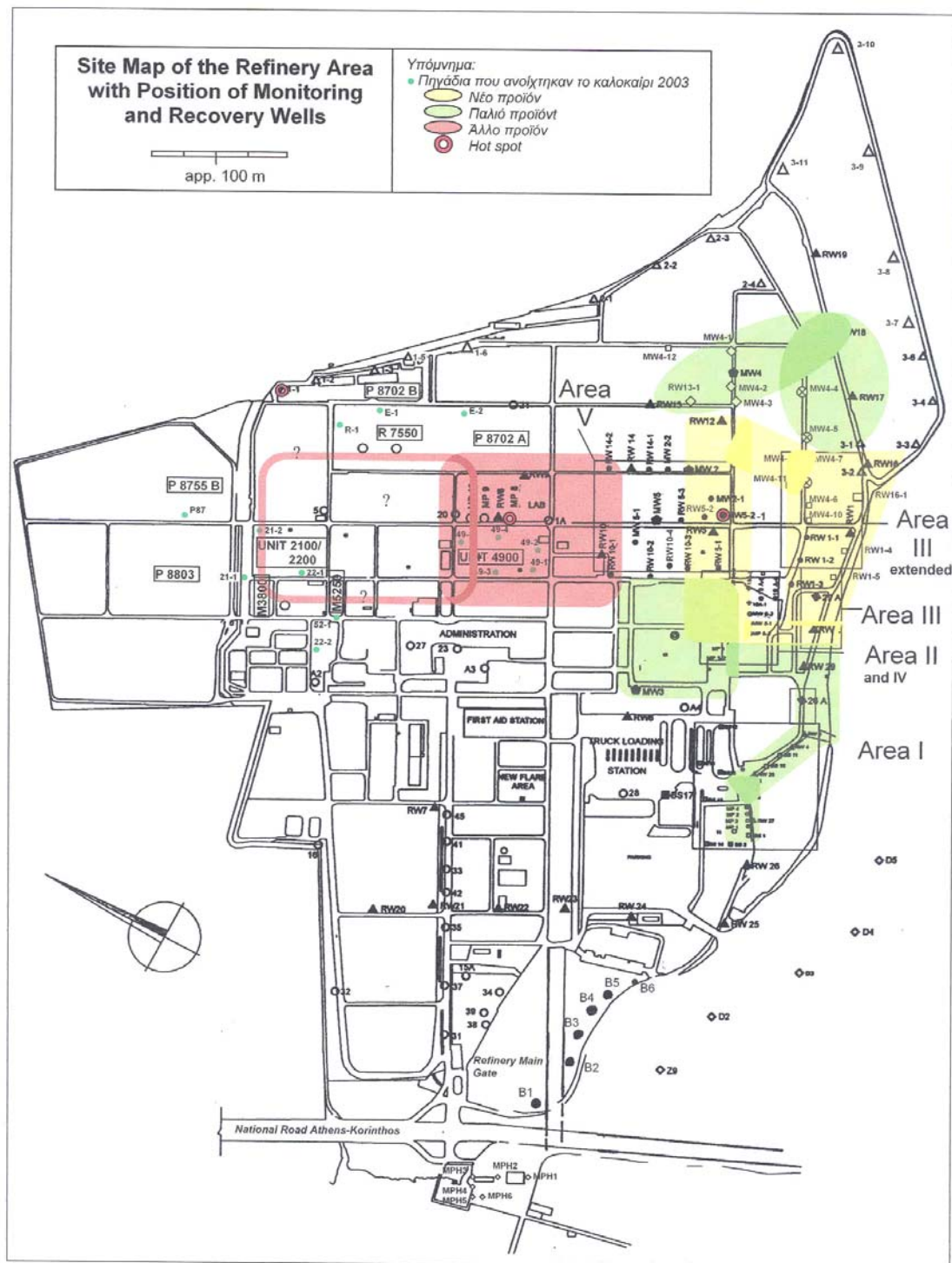
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, με τον όρο ελεύθερη φάση αναφερόμαστε σε πετρελαϊκά προϊόντα που ανήκουν στα λεγόμενα Μη – Υδατικής Φάσης Υγρά (**Non – Aqueous Phase Liquids – NAPL**), τα οποία διαλύονται ελάχιστα στο νερό και ως εκ τούτου υπάρχουν μέσα σε αυτό ως ξεχωριστή φάση. Ειδικότερα, όταν αυτά είναι ελαφρύτερα από το νερό ανήκουν στα λεγόμενα **LNAPL (Light Non – Aqueous Phase Liquids)** και σχηματίζουν ένα στρώμα ελεύθερης φάσης που επιπλέει πάνω στον υδροφόρα.

Η ανάλυση της ελεύθερης ελαιώδους φάσης πραγματοποιείται με στόχο την αποτύπωση (fingerprinting) των δειγμάτων, ώστε να προσδιοριστούν οι περιοχές του διυλιστηρίου που είναι επιβαρημένες με ρύπους κοινής σύστασης και συνακόλουθα να καταστεί δυνατός ο εντοπισμός των πηγών (διαρροών), από τις οποίες προέρχονται οι υδρογονάνθρακες στο υπέδαφος.

Δειγματοληψίες και αναλύσεις της ελεύθερης ελαιώδους φάσης έχουν δείξει ότι ένα μεγάλο τμήμα του υπεδάφους του διυλιστηρίου καλύπτεται από στρώμα ελαιώδους φάσης το οποίο αποτελεί κλάσμα ελαφρών υδρογονανθράκων και η σύστασή του παραπέμπει σε βενζίνη. Το κλάσμα αυτό επιμολύνεται τοπικά από βαρύτερα συστατικά (ντίζελ ή jet fuel). Σε συγκεκριμένες περιοχές του διυλιστηρίου ανιχνεύονται δείγματα που παραπέμπουν σε αργό πετρέλαιο διαφορετικού βαθμού αποδόμησης. Τα δείγματα με υψηλή πυκνότητα (βαριά συστατικά) εντοπίζονται στην ΒΔ περιοχή του διυλιστηρίου, ενώ τα ελαφρά δείγματα στην ανατολική περιοχή (Γιδαράκος κ.α., 2004).

Η έκταση και η θέση των διαφόρων πλουμίων ρύπανσης που έχουν παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών παρουσιάζονται στον Χάρτη 3. Επιπλέον, στο χάρτη έχουν σημειωθεί κάποια «hot spots», τα οποία εντοπίστηκαν μετά από μετρήσεις που έγιναν το καλοκαίρι του 2003 και εντοπίζουν σημεία ιδιαίτερα επιβαρημένα, όπου παρατηρούνται στρώματα καθαρού λαδιού (oil)/ γράσου (grease) (π.χ. στα βόρεια σύνορα της περιοχής του διυλιστηρίου), στρώματα κόκκινου φρέσκου προϊόντος με

πάχος 1m και σημαντικά μεγάλου πάχους στρώματα ελεύθερης φάσης (μεγαλύτερο από 1m) (Γιδαράκος κ.α., 2004).

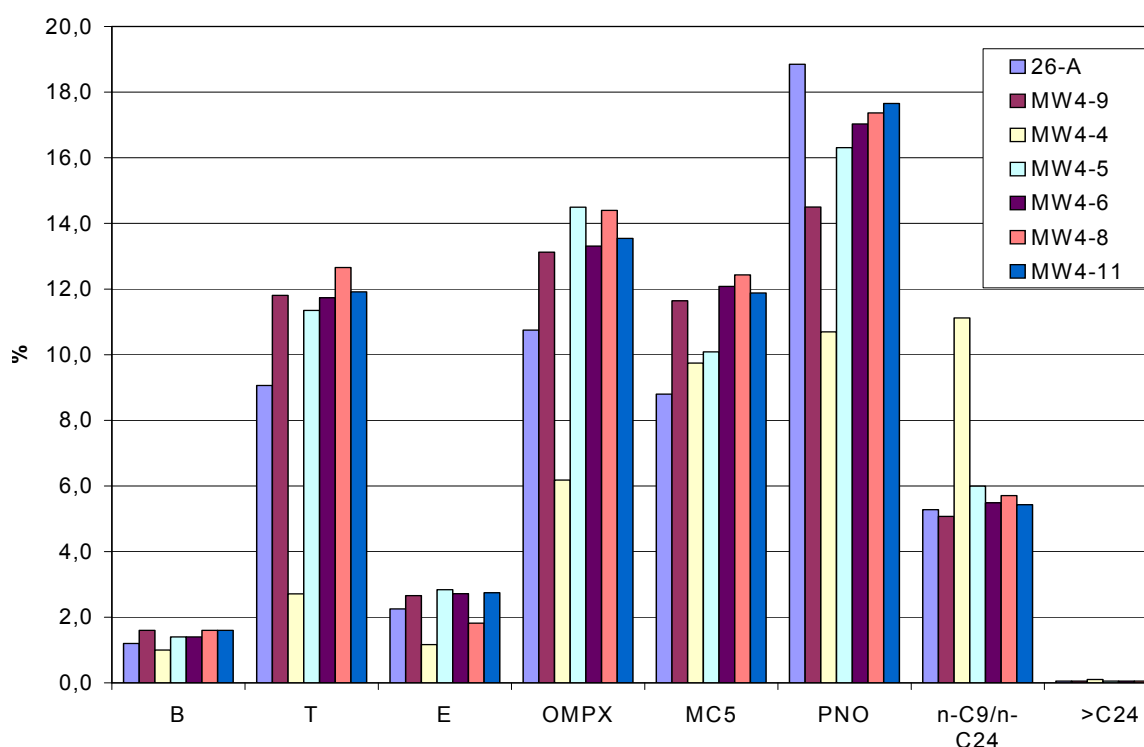


Χάρτης 3: Έκταση και θέση υπαρχόντων πλουμίων ρύπανσης.

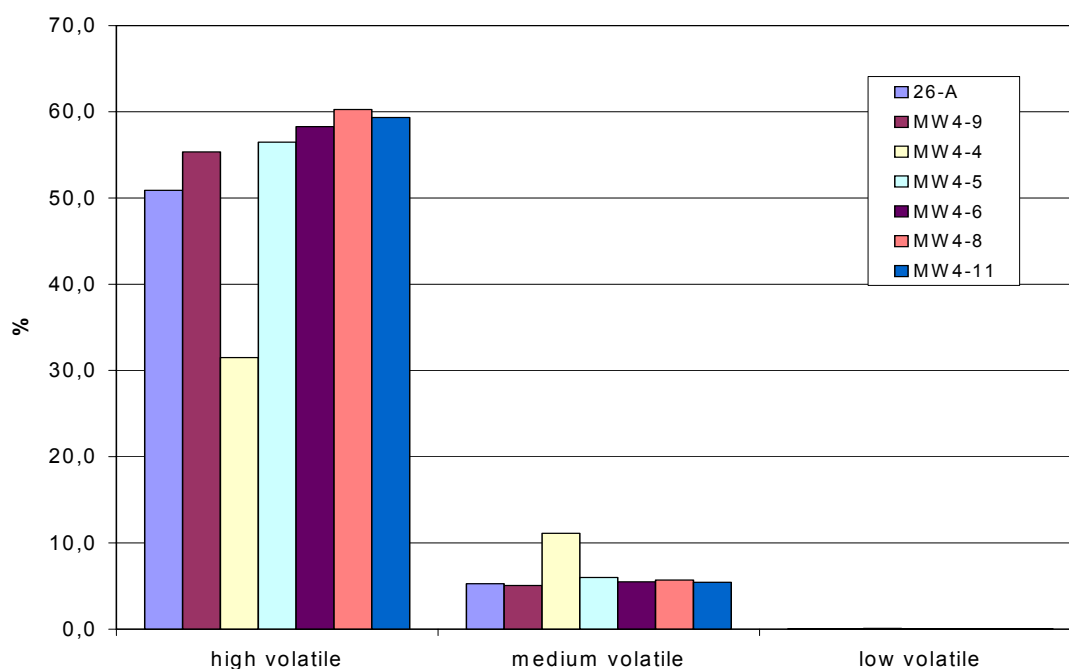
Τόσο η έκταση, όσο και η σύσταση του πλουμίου βασίζεται σε μετρήσεις πεδίου και αναλύσεις εργαστηρίου. Σύμφωνα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα μπορούν να εντοπιστούν τριών ειδών πλούμια προϊόντος (Gidarakos E., 2004):

- νέο προϊόν, καθαρό, κίτρινο (φρέσκο προϊόν) έως ελαφρύ καφέ, όχι παλαιότερο των 5 ετών,
- παλιό προϊόν, σκούρο καφέ, μεγαλύτερο από 10 ετών,
- άλλο προϊόν (diesel, πισσώδες λάδι) σκούρο καφέ έως μαύρο, μεγαλύτερο από 10 ετών.

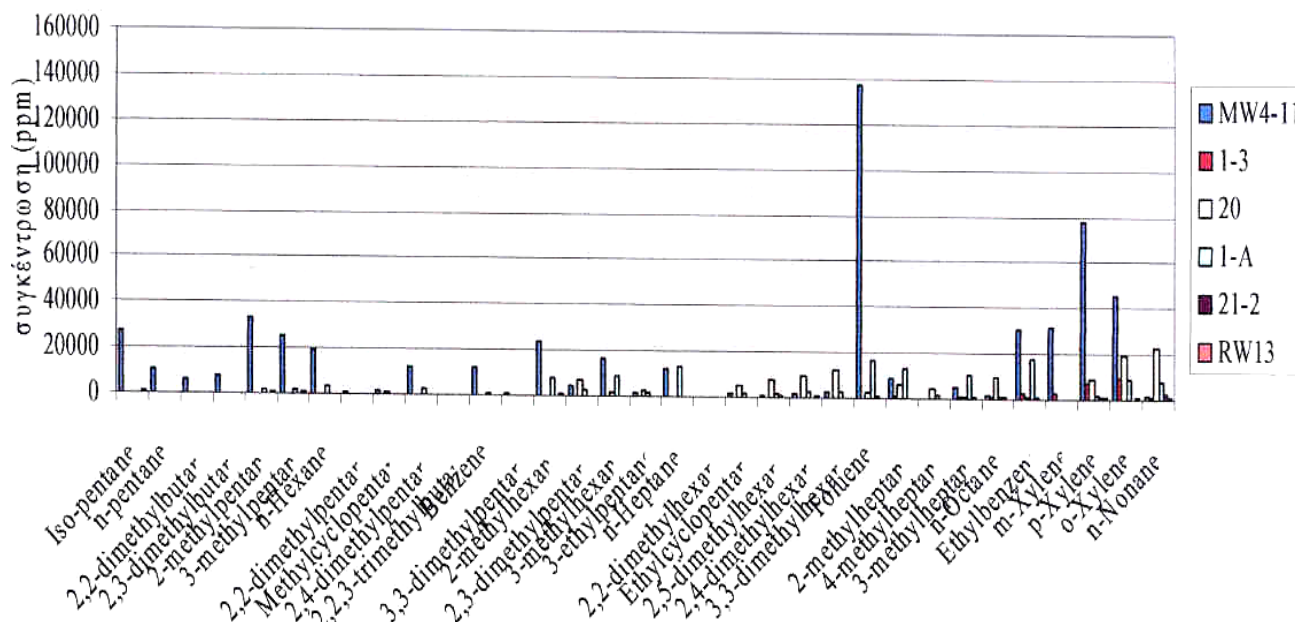
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων δειγμάτων ελεύθερης ελαιώδους φάσης από συγκεκριμένα πηγάδια του διυλιστηρίου, που αφορούν την κατανομή των συστατικών της και τη συγκέντρωσή της σε πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAH).



Διάγραμμα 1: Κατανομή συστατικών σε επιλεγμένα δείγματα ελεύθερης φάσης (Gidarakos E., 2004).



Διάγραμμα 2: Κατανομή VOC συστατικών σε επιλεγμένα δείγματα ελεύθερης φάσης με βάση την πτητικότητα (Gidarakos E., 2004).



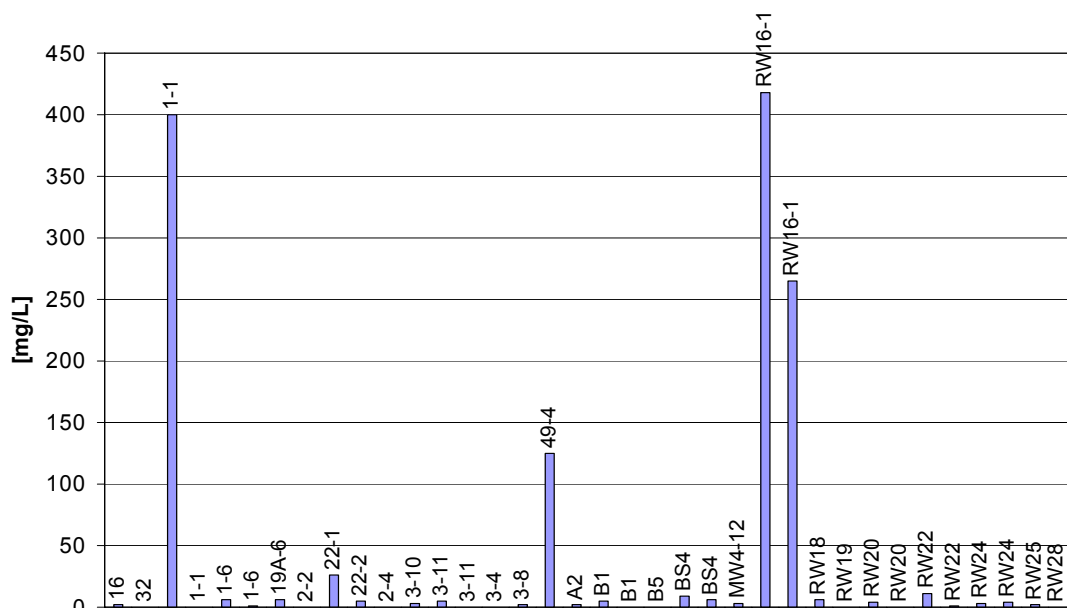
Διάγραμμα 3: Συγκέντρωση πολυαρωματικών υδρογονανθράκων σε επιλεγμένα δείγματα ελεύθερης φάσης (Κανελλοπούλου Γ., 2004).

4.3.2 Υπόγειο νερό

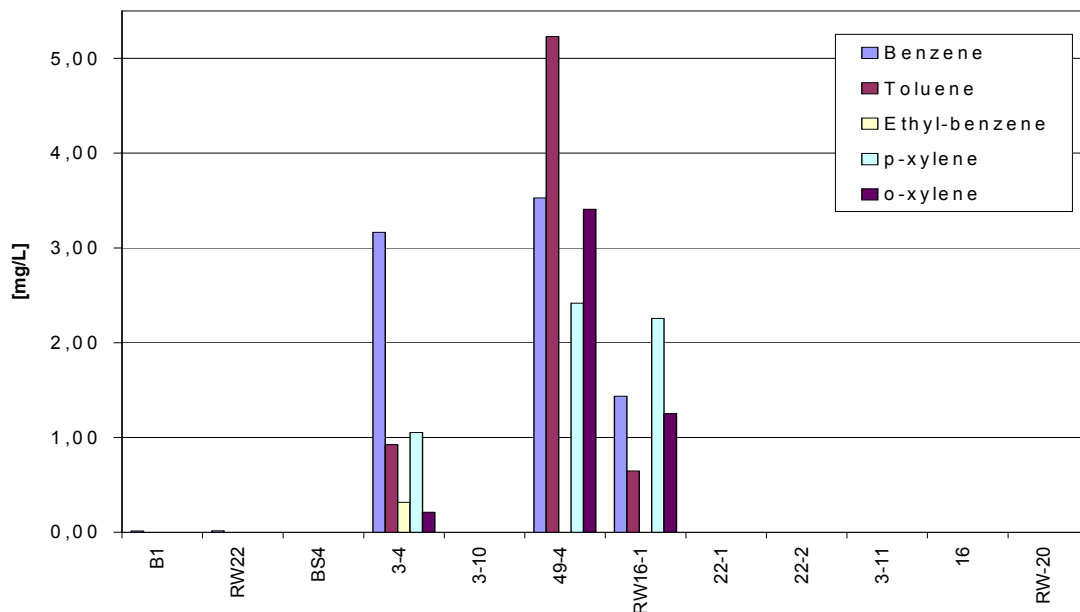
Οι αναλύσεις δειγμάτων υπόγειου νερού πραγματοποιούνται με στόχο την διερεύνηση της επιβάρυνσης του υπόγειου υδροφορέα από την δραστηριότητα του διυλιστηρίου και την συσχέτιση των υδρογονανθράκων – ρύπων στο νερό με την ελεύθερη ελαιώδη φάση που υπάρχει στο υπέδαφος. Στο παρελθόν έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις της συνολικής ποσότητας των περιεχομένων υδρογονανθράκων στο νερό (TPH), των πτητικών αρωματικών υδρογονανθράκων (BTEX) και των πολυαρωματικών υδρογονανθράκων (PAH).

Η ομάδα των αρωματικών συστατικών, βενζολίου, τολουολίου, αιθύλ-βενζολίου και των ξυολίων (BTEX) προσδιορίζεται ποσοτικά, λόγω του ότι αποτελεί χαρακτηριστικό στοιχείο επιβάρυνσης υπόγειων νερών με οργανικούς ρύπους. Πρόκειται για σχετικά υδατοδιαλυτά συστατικά με υψηλή τοξικότητα. Επιπλέον, ιδιαίτερα σημαντικός θεωρείται και ο προσδιορισμός των πολυαρωματικών υδρογονανθράκων (PAH) στον υπόγειο υδροφορέα, δεδομένου ότι παρουσιάζουν υψηλή τοξικότητα.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων δειγμάτων νερού από επιλεγμένα πηγάδια του διυλιστηρίου, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν τον Ιούλιο 2003 και αφορούν τη συγκέντρωση του υπόγειου νερού σε BTEX και TPH.

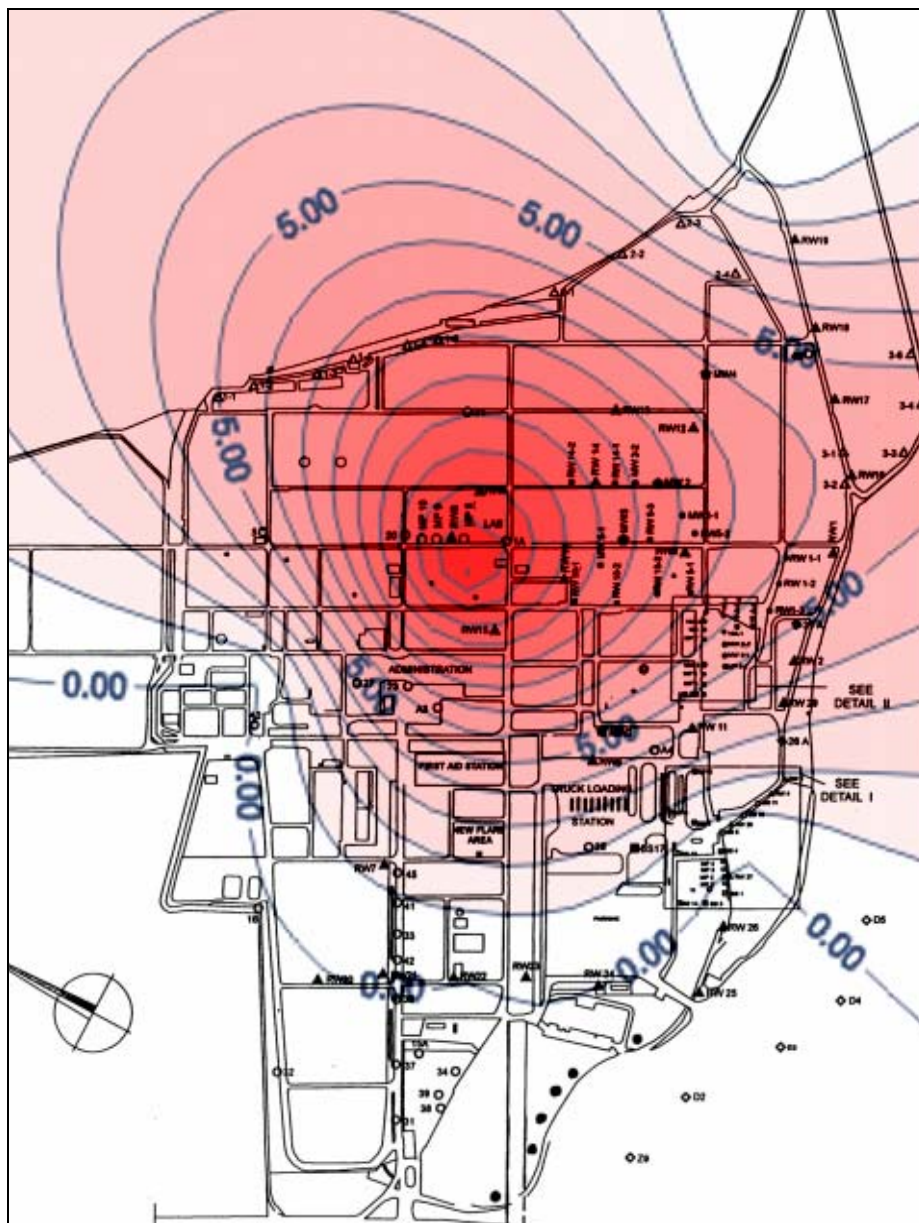


Διάγραμμα 4: Συγκέντρωση TPH σε επιλεγμένα δείγματα νερού (Gidarakos E., 2004).

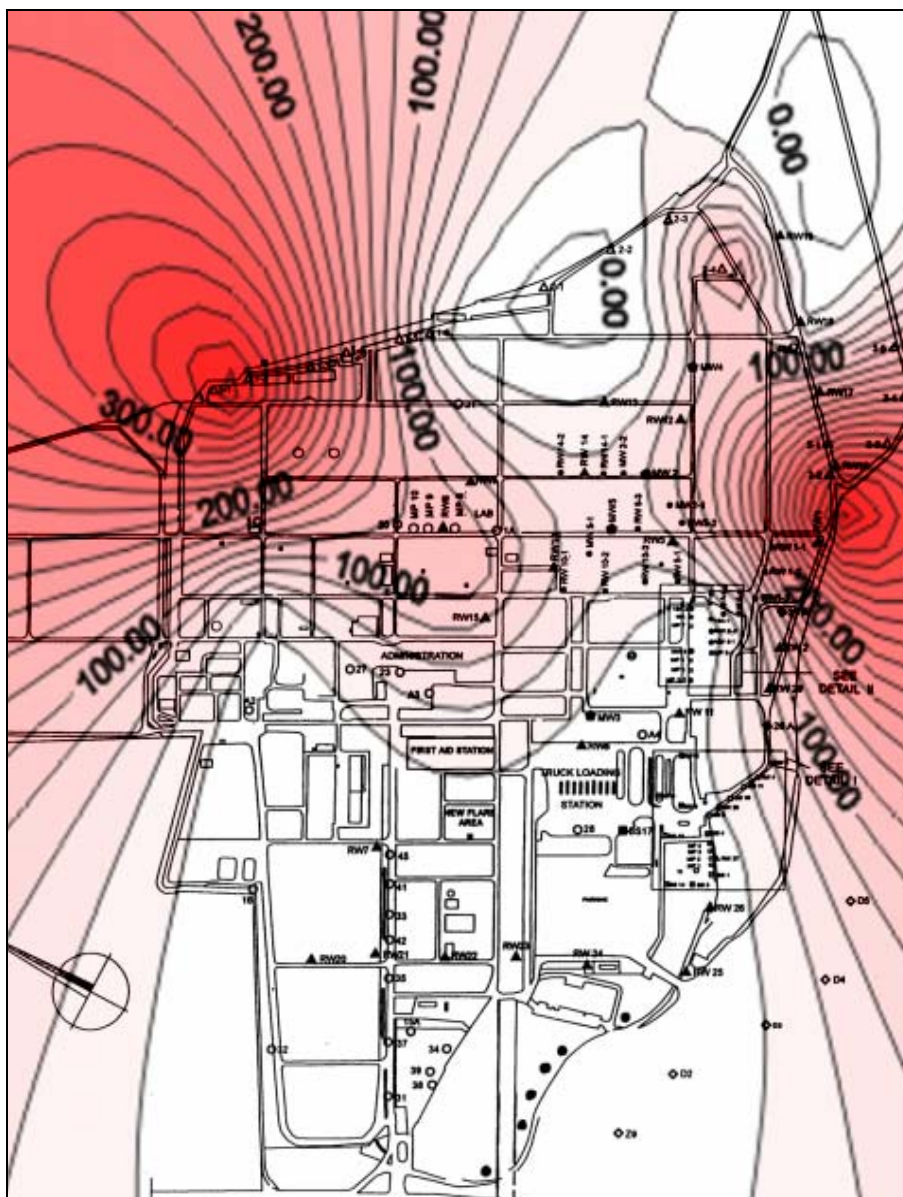


Διάγραμμα 5: Συγκέντρωση BTEX σε επιλεγμένα δείγματα νερού (Γιδαράκος Ε. κα, 2004).

Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις κατασκευάστηκαν χάρτες κατανομής των συστατικών TPH και BTEX (Χάρτης 4 και 5) στο χώρο του διυλιστηρίου. Η μέθοδος παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκε ήταν η μέθοδος Kriging. Πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι η μέθοδος αυτή δεν λαμβάνει υπόψη το ανάγλυφο του εδάφους, το υψόμετρο ή την ανομοιογένεια και γενικότερα τη γεωλογία του πεδίου, με αποτέλεσμα η κατανομή, που εμφανίζει ως δεδομένο, να αποτελεί μόνο μια χοντρική εικόνα της πραγματικής κατανομής της ρύπανσης. Επίσης, η κατανομή που παρουσιάζεται στους χάρτες που ακολουθούν είναι άμεση συνάρτηση του αριθμού και των θέσεων δειγματοληψίας, τα οποία αν ήταν διαφορετικά σίγουρα θα είχαμε και τελείως διαφορετική εικόνα της κατανομής των ρυπαντών.



Χάρτης 4: Εκτιμώμενη κατανομή BTEX στις εγκαταστάσεις του διυλιστηρίου (ισοϋψείς συγκέντρωσης σε mg/L).



Χάρτης 5: Εκτιμώμενη κατανομή TPH στις εγκαταστάσεις του διυλιστηρίου (ισοϋψείς συγκέντρωσης σε mg/L).

Τέλος, όσον αφορά τον ποσοτικό προσδιορισμό των πολυαρωματικών υδρογονανθράκων (PAH) στον υπόγειο υδροφόρο, τα αποτελέσματα των μετρήσεων απέδειξαν την απουσία των συστατικών αυτών από τα υπόγεια ύδατα του διυλιστηρίου.

4.3.3 Εδαφικός αέρας

Ο όρος “εδαφικός αέρας” (soil gas) αναφέρεται στον αέρα που καταλαμβάνει τους πόρους του εδάφους. Εάν στο έδαφος υπάρχουν πτητικά συστατικά (π.χ. πτητικοί υδρογονάνθρακες), είτε προσροφημένα στην επιφάνεια των κόκκων, είτε σε υγρή κατάσταση, τότε στον εδαφικό αέρα συνυπάρχουν και οι ατμοί αυτών σε ισορροπία με την υγρή φάση. Οι ατμοί αυτοί μπορεί να αποτελούν κίνδυνο εκρήξεων. Η επικινδυνότητα και η πιθανότητα δημιουργίας εκρήξεων εξαρτάται από τους εξής παράγοντες (Κανελλοπούλου Γ., 2004):

- τα συγκεκριμένα όρια έκρηξης κάθε ουσίας,
- το συγκεκριμένο όριο συγκέντρωσης οξυγόνου που πρέπει να υπάρχει,
- τη θερμοκρασία,
- την πίεση,
- την παρουσία άλλων αερίων ουσιών.

Τα όρια έκρηξης διαφόρων συστατικών είναι διαθέσιμα αλλά οι υπόλοιποι παράγοντες πρέπει να μετρηθούν στο πεδίο κάτω από σταθερές συνθήκες. Όσον αφορά τα όρια έκρηξης των ατμών που προέρχονται από τα πτητικά κλάσματα των ρυπαντών υπάρχει ο διαχωρισμός του κατώτερου ορίου έκρηξης και του ανώτερου ορίου έκρηξης. Μεταξύ αυτών των ορίων ένα μίγμα αερίων συστατικών εκρήγνυται όταν πυροδοτηθεί. Κάτω από το κατώτερο όριο έκρηξης η συγκέντρωση των αερίων είναι χαμηλή για να προκαλέσει έκρηξη παρουσία σπινθήρα και πάνω από το ανώτερο όριο έκρηξης η συγκέντρωση των αερίων είναι πολύ μεγάλη και η ποσότητα του αέρα δεν είναι επαρκής για ανάφλεξη. Τυπικά όρια έκρηξης για κλάσματα βενζίνης και ντίζελ είναι (Gidarakos E. et al, 1999):

- κατώτερο όριο έκρηξης: 0,6% κ.ο.
- ανώτερο όριο έκρηξης: 6% κ.ο.

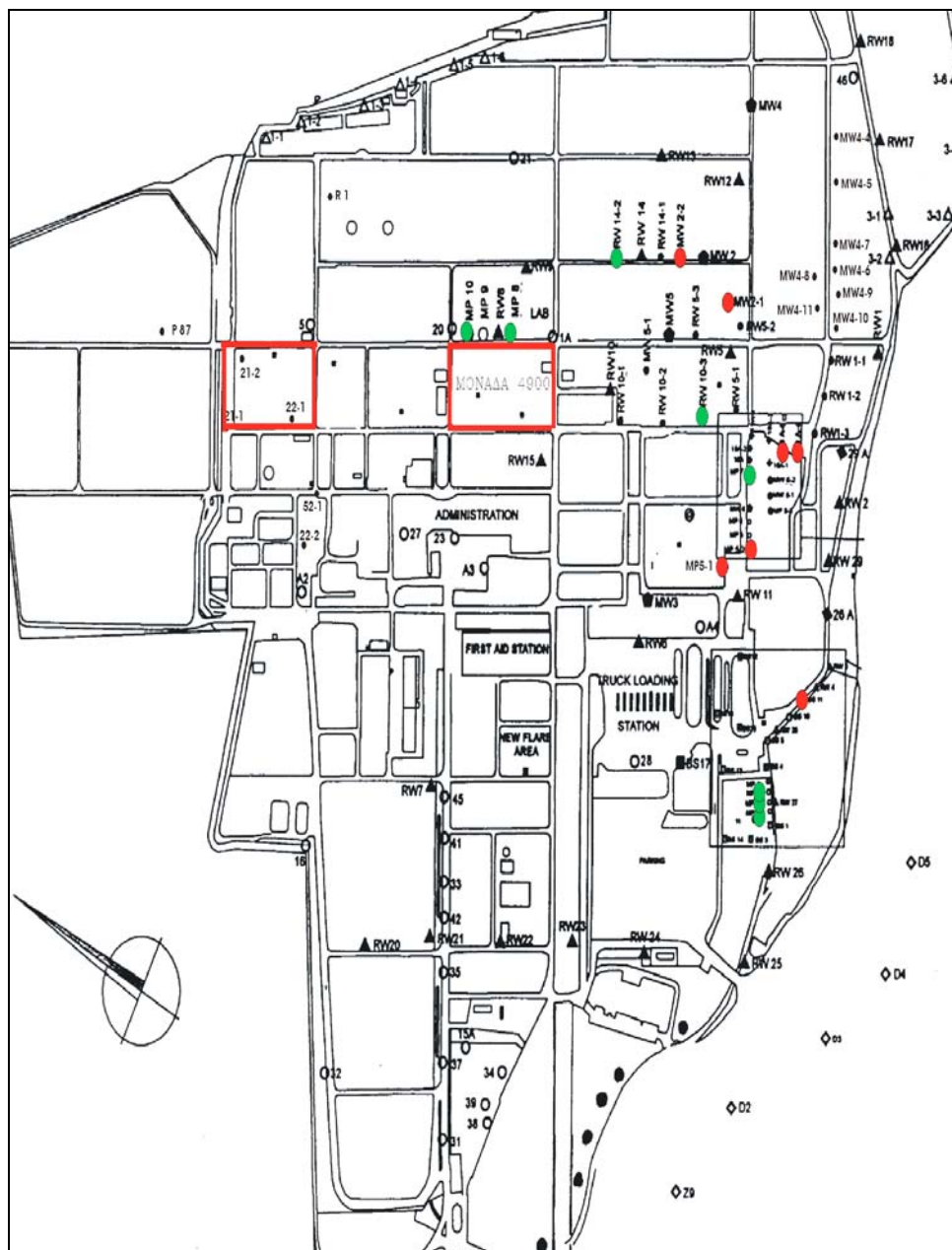
Μεταφέροντας τα όρια αυτά σε συγκεντρώσεις TPH στον εδαφικό αέρα σε g/m^3 είναι $34,2\text{g/m}^3$ για το κατώτερο όριο έκρηξης και $34234,2\text{g/m}^3$ για το ανώτερο όριο έκρηξης βασιζόμενοι σε ένα μίγμα οκτανίου με μοριακό βάρος 114g/mol .

Γενικά, κρίνεται αναγκαία η συχνή παρακολούθηση της σύστασης του εδαφικού αέρα. Συγκεκριμένα, ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του οξυγόνου, του διοξειδίου του άνθρακα και των εύφλεκτων υδρογονανθράκων στον εδαφικό αέρα είναι μια

σημαντική παράμετρος κατά την εκτίμηση της έκτασης ενός πλουμίου προϊόντος ελεύθερης φάσης ή της ρύπανσης από πετρελαϊκούς ρυπαντές γενικότερα. Η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται στον εντοπισμό των ορίων του πλουμίου και στην εκτίμηση του δυναμικού βιοαποικοδόμησης των υπολειμματικών καυσίμων στην ακόρεστη ζώνη. Όπως έχει αποδειχθεί ο εδαφικός αέρας που περιέχει υψηλές τιμές TPH είναι βαρύτερος από το συνηθισμένο εδαφικό αέρα και εντοπίζεται κυρίως στην ζώνη τριχοειδών φαινομένων και/ ή κοντά στην πηγή διαρροής (Κανελλοπούλου Γ, 2004).

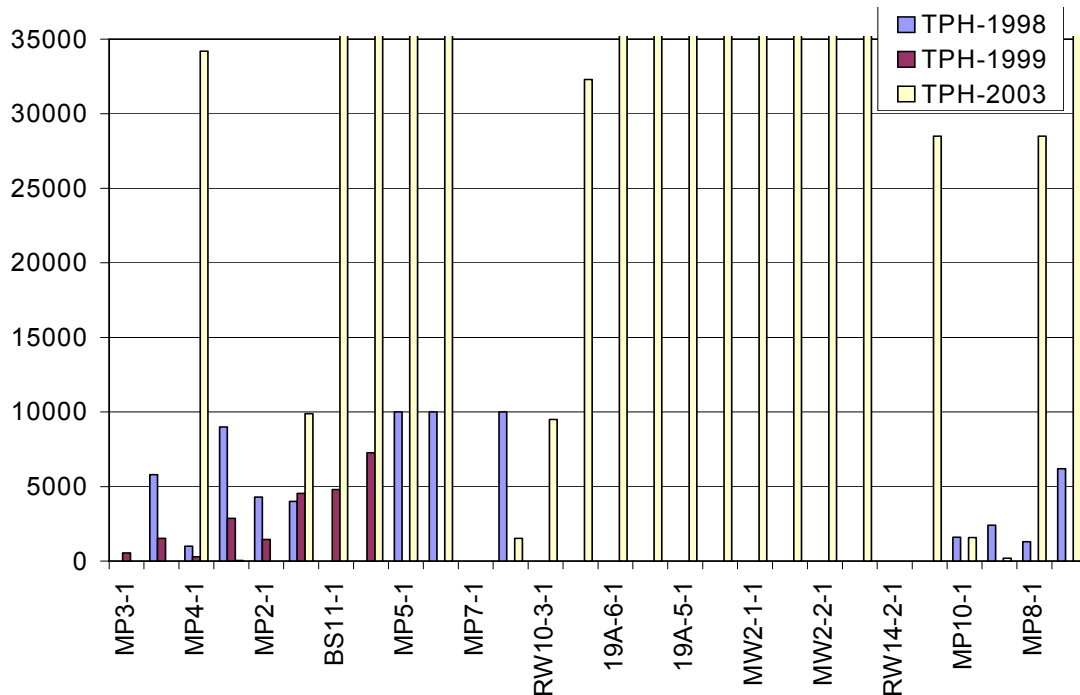
Όπως έχει προκύψει από δειγματοληψίες και αναλύσεις εδαφικού αέρα του υπεδάφους του εν λόγω διυλιστηρίου, σε όλες τις περιοχές δειγματοληψίας, με εξαίρεση την νοτιοανατολική περιοχή, μετρήθηκαν υψηλές συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων. Στον Χάρτη 6, που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα) σημειώνονται με κόκκινο χρώμα τα σημεία του διυλιστηρίου όπου έχουν εντοπιστεί υψηλές συγκεντρώσεις TPH ($>70.000 \text{ mg/m}^3$) στον εδαφικό αέρα.

Δεδομένου ότι τα συστατικά που έχουν ανιχνευθεί είναι ελαφροί υδρογονάνθρακες, με υπόθεση ενός μέσου μοριακού βάρους ίσου με 80, η συγκέντρωση των $>70.000 \text{ mg/m}^3$ μεταφράζεται σε % κ.ο. περιεκτικότητα της τάξης του 2%. Οι συγκεντρώσεις αυτές είναι πρακτικά εντός των ορίων έκρηξης των μιγμάτων αέρα και υδρογονανθράκων.



Χάρτης 6: Σημεία δειγματοληψίας εδαφικού αέρα (κόκκινο και πράσινο χρώμα) και υψηλών συγκεντρώσεων TPH ($>70.000 \text{ mg/m}^3$) (κόκκινο χρώμα).

Αναλυτικά, οι συγκεντρώσεις TPH που έχουν προσδιοριστεί για τα ληφθέντα δείγματα εδαφικού αέρα παρουσιάζονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 6: Συγκεντρώσεις TPH σε εδαφικό αέρα από επιλεγμένα πηγάδια.

4.3.4 Έδαφος

Όσον αφορά το έδαφος του διυλιστηρίου έχει ληφθεί ένας αρκετά περιορισμένος αριθμός δειγμάτων, ο οποίος δεν είναι ικανός να αποδώσει μια ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης ρύπανσης του εδάφους της εν λόγω περιοχής και δεν επιτρέπει την γενίκευση των αποτελεσμάτων των διεξαχθέντων αναλύσεων. Η συνολική συγκέντρωση υδρογονανθράκων για εδαφικά δείγματα που ελήφθησαν τον Ιούλιο 2003 παρουσιάζεται στον Πίνακα 5 και αναφέρεται σε mg/kg ξηρού δείγματος.

Πρέπει να σημειωθεί το γεγονός ότι τα εν λόγω δείγματα εδάφους ελήφθησαν κατά τη διάρκεια διάνοιξης των αντίστοιχων πηγαδιών, με αποτέλεσμα να είναι έντονα επιβαρυμένα με οργανικό υλικό από τον γεωτρητικό πολφό που χρησιμοποιείται σε τέτοιες περιπτώσεις. Το υλικό αυτό ταυτοποιήθηκε στον φασματογράφο μάζας ως λιπαρές αλκοόλες και επιβεβαιώθηκε η ύπαρξή του στον πολφό των γεωτρήσεων σε επικοινωνία με την εταιρεία που διενήργησε τις γεωτρήσεις. Αν και τα συστατικά αυτά αφαιρέθηκαν από τον υπολογισμό των TPH στα δείγματα, είναι άγνωστο πόσο επηρεάζουν την ακρίβεια του προσδιορισμού (Κανελλοπούλου Γ., 2004).

Πίνακας 5: Συνολική συγκέντρωση υδρογονανθράκων σε mg/kg (επί ξηρού).

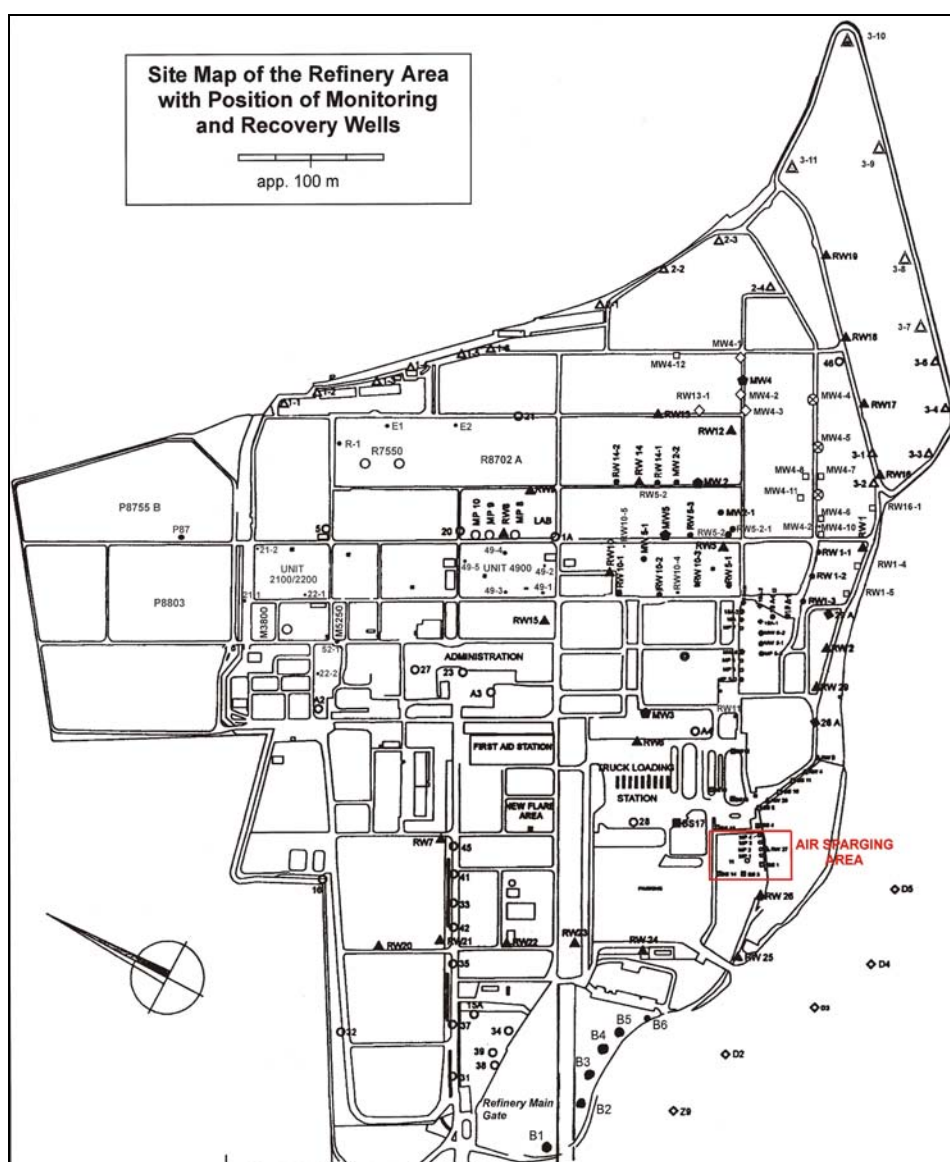
Δείγμα	Βάθος δειγματοληψίας (m)	Συνολική συγκέντρωση υδρογονανθράκων σε mg/Kg
22-2	1	74
22-2	2	227
22-2	4	275
22-2	6	369
22-1	2	649
22-1	4	427
22-1	6	515
P87	1	120
P87	2	33
P87	4	97
P87	6	1666

Σε γενικές γραμμές, οι πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες που συναντώνται στα δείγματα εδάφους είναι κυρίως κορεσμένοι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες, οι οποίοι ανήκουν στην κατηγορία των επικίνδυνων ρυπαντών για το υπόγειο νερό. Με βάση τη χαμηλότερη πυκνότητά τους από το νερό (0,7-1g/ml), οι υδρογονάνθρακες αυτοί θα συσσωρευτούν πάνω στον υδροφόρο ορίζοντα επηρεάζοντας την οσμή, το χρώμα και τη γεύση του πόσιμου νερού. Σύμφωνα με τη μοριακή τους δομή, τα συστατικά αυτά έχουν χαμηλή διαλυτότητα στο νερό αλλά είναι εξαιρετικά πτητικά. Και οι δυο παράγοντες μειώνονται με την αύξηση του μοριακού βάρους των κλασμάτων. Επειδή τα εδαφικά δείγματα ήταν σε γενικές γραμμές αμώδη, όσον αφορά την κοκκομετρία τους θεωρείται ότι ευνοούν τη διήθηση των πετρελαϊκών υδρογονανθράκων σε μεγαλύτερα βάθη. Η περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανικό άνθρακα δεν έχει μετρηθεί με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολη η προσέγγιση του βαθμού προσρόφησης των ρυπαντών σε αυτό. Οι συγκεντρώσεις TPH που έχουν προσδιοριστεί είναι σε χαμηλά έως μέτρια επίπεδα βάση το εύρος τιμών συγκεντρώσεων (300 – 5000mg/Kg), οι οποίες επιδιώκονται κατά τον καθαρισμό εδαφών από πετρελαϊκούς ρυπαντές. Οι διακυμάνσεις του υδροφόρου ορίζοντα κατά τις εποχιακές αλλαγές πιθανότατα έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ευρύτερης περιοχής ρύπανσης με υψηλές ποσότητες υδρογονανθράκων (Κανελλοπούλου Γ, 2004).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ AIR SPARGING

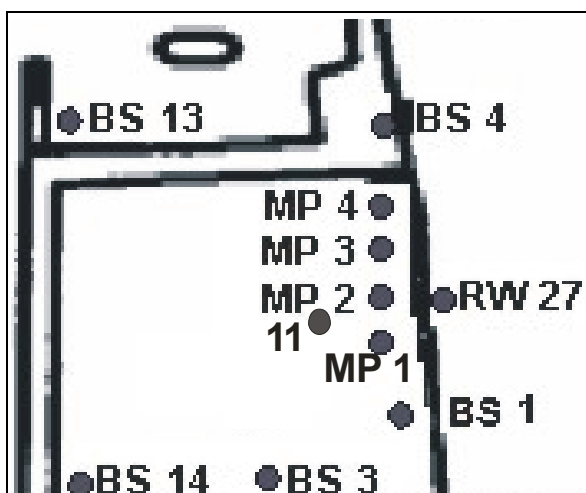
5.1 Περιοχή εφαρμογής

Η περιοχή η οποία επιλέχθηκε για την εγκατάσταση και τη λειτουργία του πιλοτικού συστήματος air sparging βρίσκεται στα νοτιοανατολικά όρια των εγκαταστάσεων του διυλιστηρίου, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στον χάρτη που ακολουθεί.



Χάρτης 7: Περιοχή των εγκαταστάσεων του διυλιστηρίου, όπου πραγματοποιήθηκε η εγκατάσταση και λειτουργία του πιλοτικού συστήματος air sparging.

Στην περιοχή αυτή υπάρχουν αρκετά πηγάδια παρακολούθησης (Σχήμα 27), από τα οποία πραγματοποιούνται δειγματοληψίες υπόγειου νερού, εδαφικού αέρα και γενικότερα παρακολούθηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και του πάχους της ελεύθερης ελαιώδους φάσης.



Σχήμα 27: Απεικόνιση των πηγαδιών παρακολούθησης στην περιοχή εγκατάστασης και λειτουργίας του πιλοτικού συστήματος air sparging.

Όπως προκύπτει από τις υπάρχουσες μηνιαίες μετρήσεις του πάχους του στρώματος της ελαιώδους φάσης (Πίνακας 6), σε αυτήν την περιοχή δεν εμφανίζεται ουσιαστικά καθόλου ελεύθερη φάση, γεγονός το οποίο την καθιστά κατάλληλη για την εφαρμογή της τεχνολογίας air sparging.

Πίνακας 6: Τιμές του πάχους του στρώματος της ελεύθερης ελαιώδους φάσης στα πηγάδια της περιοχής air sparging.

Πάχος ελαιώδους φάσης (m)																		
Πηγάδι	5/03	6/03	7/03	8/03	9/03	10/03	11/03	12/03	1/04	2/04	3/04	4/04	5/04	6/04	7/04	8/04	9/04	10/04
RW27	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MP2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BS1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MP3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MP4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0,03	0,02	0,02	0,01	0,005	0,02	0,01	0	0	0	0	0	0	0
MP1	0	0	0	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BS3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BS3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BS13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BS4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Αναλύσεις δειγμάτων υπόγειου νερού από επιλεγμένα πηγάδια της περιοχής έχουν δείξει επιβάρυνση αυτού, τόσο από TPH (Total Petroleum Hydrocarbons) γενικότερα, όσο και από τα συστατικά BTEX (Benzene – Toluene – Ethyl-benzene – Xylene) και MTBE (Methyl Tertiary-Butyl Ether). Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν τους 3 τελευταίους μήνες, πριν την εγκατάσταση και την έναρξη της λειτουργίας του πιλοτικού συστήματος air sparging.

Πίνακας 7: Αποτελέσματα αναλύσεων δειγμάτων υπογείου νερού από πηγάδια της περιοχής air sparging.

ΠΗΓΑΔΙ	BTEX (mg/L)	TPH (mg/L)	MTBE (mg/L)	ΣΧΟΛΙΑ
ΜΑΙΟΣ 2004				
MP1	0	105	√	έντονη οσμή, θολό, αιωρήματα
MP2	1,11	55	√	οσμή, αιωρήματα
RW27	0,42	14	√	έντονη οσμή, αιωρήματα
BS1	0,57	78	√	οσμή, αιωρήματα
11	4	139	√	έντονη οσμή, θολό, αιωρήματα
MP3	0,41	43	√	οσμή, αιωρήματα
MP4	0	3	√	οσμή, λίγο θολό, αιωρήματα
BS4	0	20	√	οσμή, θολό κίτρινο
ΙΟΥΝΙΟΣ 2004				
MP1	5,29	398	√	έντονη οσμή, θολό, αιωρήματα
MP2	1,67	380	√	έντονη οσμή, θολό, αιωρήματα
RW27	3,44	36	√	οσμή, θολό, αιωρήματα
BS1	4,78	76	√	έντονη οσμή, θολό, αιωρήματα
11	6,43	164	√	έντονη οσμή, θολό, αιωρήματα
ΙΟΥΛΙΟΣ 2004				
MP1	5,42	-	2,23	έντονη οσμή, σχετικά διαυγές
MP2	6,53	-	7,34	έντονη οσμή, σχετικά διαυγές
BS1	2,36	-	3,44	έντονη οσμή, σχετικά διαυγές

Σημείωση: Το σύμβολο √ δηλώνει την ύπαρξη των συστατικών MTBE στα δείγματα του υπόγειου νερού που αναλύθηκαν, χωρίς όμως να είναι γνωστή συγκέντρωσή τους.

Στην εν λόγω περιοχή, έχει εφαρμοστεί στο παρελθόν η τεχνολογία εξυγίανσης εδάφους bioventing, η οποία περιλαμβάνει τη διοχέτευση αέρα στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους, με στόχο την εξάτμιση των υπαρχόντων πτητικών ρυπαντών. Η βασική ιδέα λειτουργίας της μεθόδου αυτής είναι ίδια με αυτήν της τεχνολογίας air sparging, με τη διαφορά ότι η πρώτη εφαρμόζεται στην ακόρεστη ζώνη, ενώ η δεύτερη στην κορεσμένη ζώνη του εδάφους. Η τεχνική bioventing λειτούργησε με απόλυτη επιτυχία, επιφέροντας σημαντικά αποτελέσματα εξυγίανσης, γεγονός το οποίο υποδεικνύει την καταλληλότητα του εδάφους της περιοχής για ικανοποιητική διοχέτευση και διασπορά αέρα στο υπέδαφος (καλή διαπερατότητα εδάφους).

Δεδομένης της επιβάρυνσης του υπόγειου νερού στην υπό εξέταση περιοχή του διυλιστηρίου και της ενθαρρυντικής προϊστορίας, όσον αφορά την αποτελεσματικότητα τεχνικών αερισμού στο συγκεκριμένο πεδίο, αποφασίστηκε η εγκατάσταση και η λειτουργία μιας πιλοτικής μονάδας air sparging στην περιοχή. Πριν το σχεδιασμό, την εγκατάσταση και τη λειτουργία της μονάδας αυτής πραγματοποιήθηκε μια όσο το δυνατόν λεπτομερέστερη μελέτη της περιοχής, σε μια προσπάθεια να δημιουργηθεί μια αξιόπιστη και ρεαλιστική εικόνα των χαρακτηριστικών και των επικρατούντων συνθηκών του πεδίου.

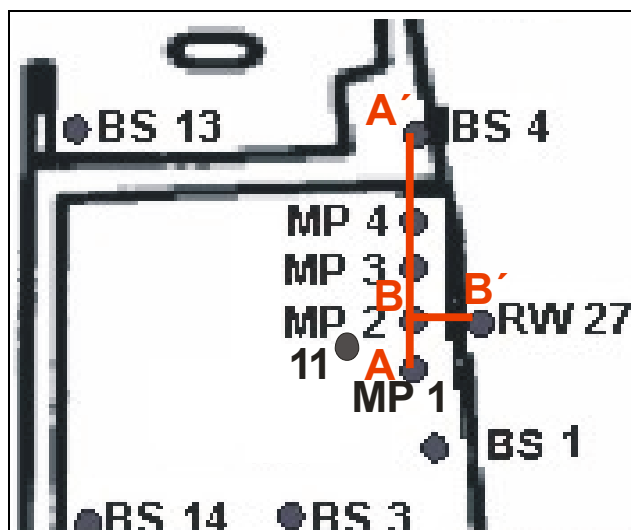
Αρχικά, κατεγράφησαν τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους στα πηγάδια της περιοχής air sparging (βάθος υδροφόρου ορίζοντα και βάθος αδιαπέρατου στρώματος) και υπολογίστηκε το εύρος του πάχους υδροφόρου στρώματος, όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 8).

Πίνακας 8: Βασικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους στα πηγάδια της περιοχής air sparging.

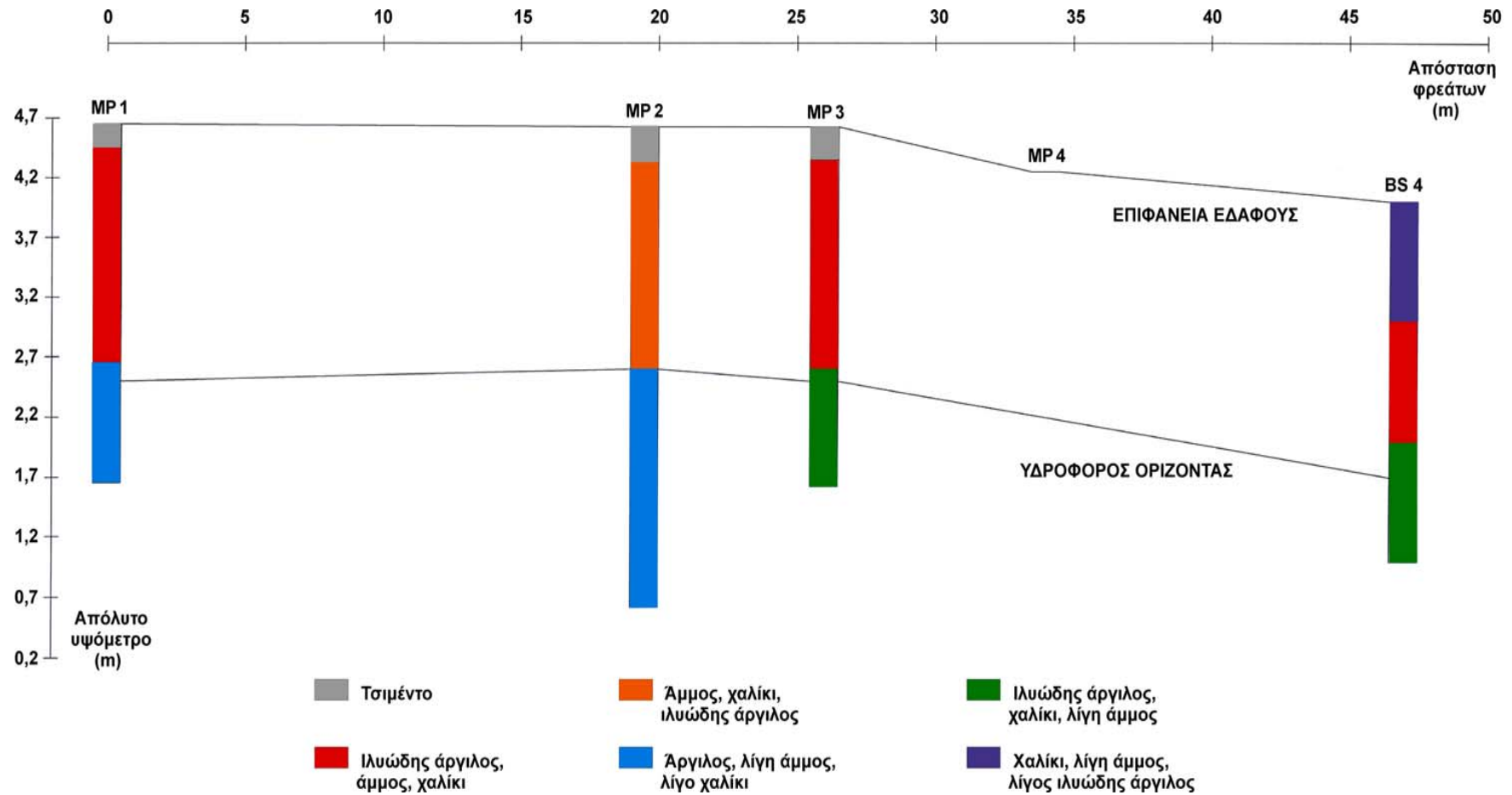
Πηγάδι	Βάθος αδιαπέρατου στρώματος (m)	Βάθος υδροφόρου ορίζοντα (m)		Πάχος υδροφορέα (m)	
		Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέγιστο	Ελάχιστο
MP1	6	1,98	2,36	4,02	3,64
MP2	5,8	1,81	2,24	3,99	3,56
RW27	20,25	2,22	2,66	18,03	17,59
BS1	5,6	1,99	2,43	3,61	3,17
11	11,6	1,89	2,43	9,71	9,17

Κατά τη διάρκεια διάνοιξης ορισμένων πηγαδιών της περιοχής αυτής είχαν δημιουργηθεί κάποιες διαγραφίες, οι οποίες παρέχουν στοιχεία για τους υπάρχοντες γεωλογικούς σχηματισμούς συναρτήσει του βάθους. Βάση αυτών και κάποιων υψομετρικών δεδομένων που ελήφθησαν από τοπογραφικούς χάρτες του διυλιστηρίου, κατασκευάστηκαν οι γεωλογικές τομές που παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 28, 29 & 30).

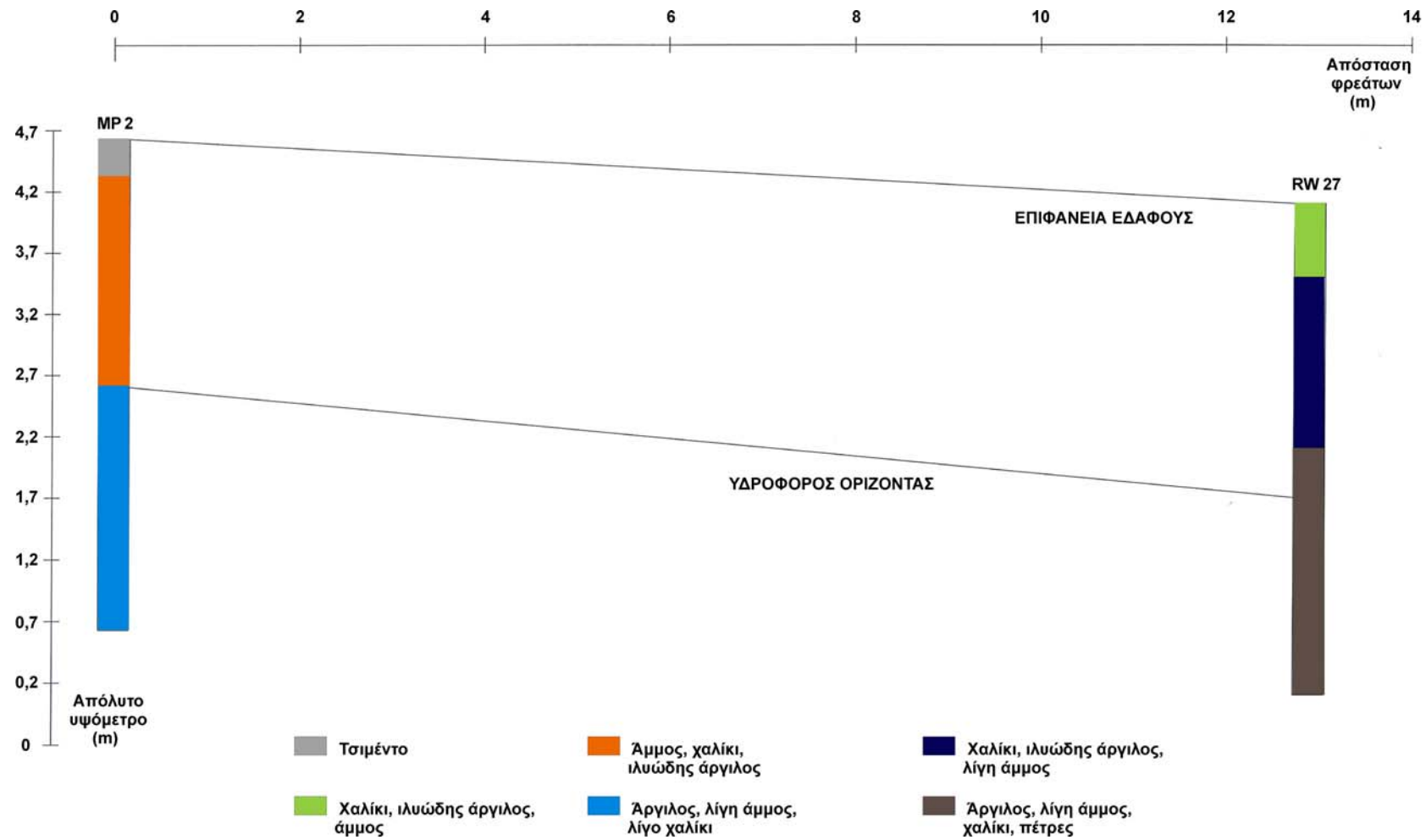
Όπως χαρακτηριστικά προκύπτει από τις τομές αυτές, το υπέδαφος της περιοχής air sparging αποτελείται κυρίως από άμμο, χαλίκι και άργιλο, με διαφορετική κάθε φορά αναλογία. Η διαφορετική αυτή αναλογία των τριών βασικών συστατικών έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του υπεδάφους (πορώδες, διαπερατότητα, υδραυλική αγωγιμότητα, κ.α.) χωρικά και την επικράτηση σχετικής ανομοιογένειας στο πεδίο.



Σχήμα 28: Απεικόνιση των δημιουργηθέντων γεωλογικών τομών Α – Α' (MP1 – MP2 – MP3 – MP4 – BS4) και Β – Β' (MP2 – RW27) στην περιοχή air sparging.

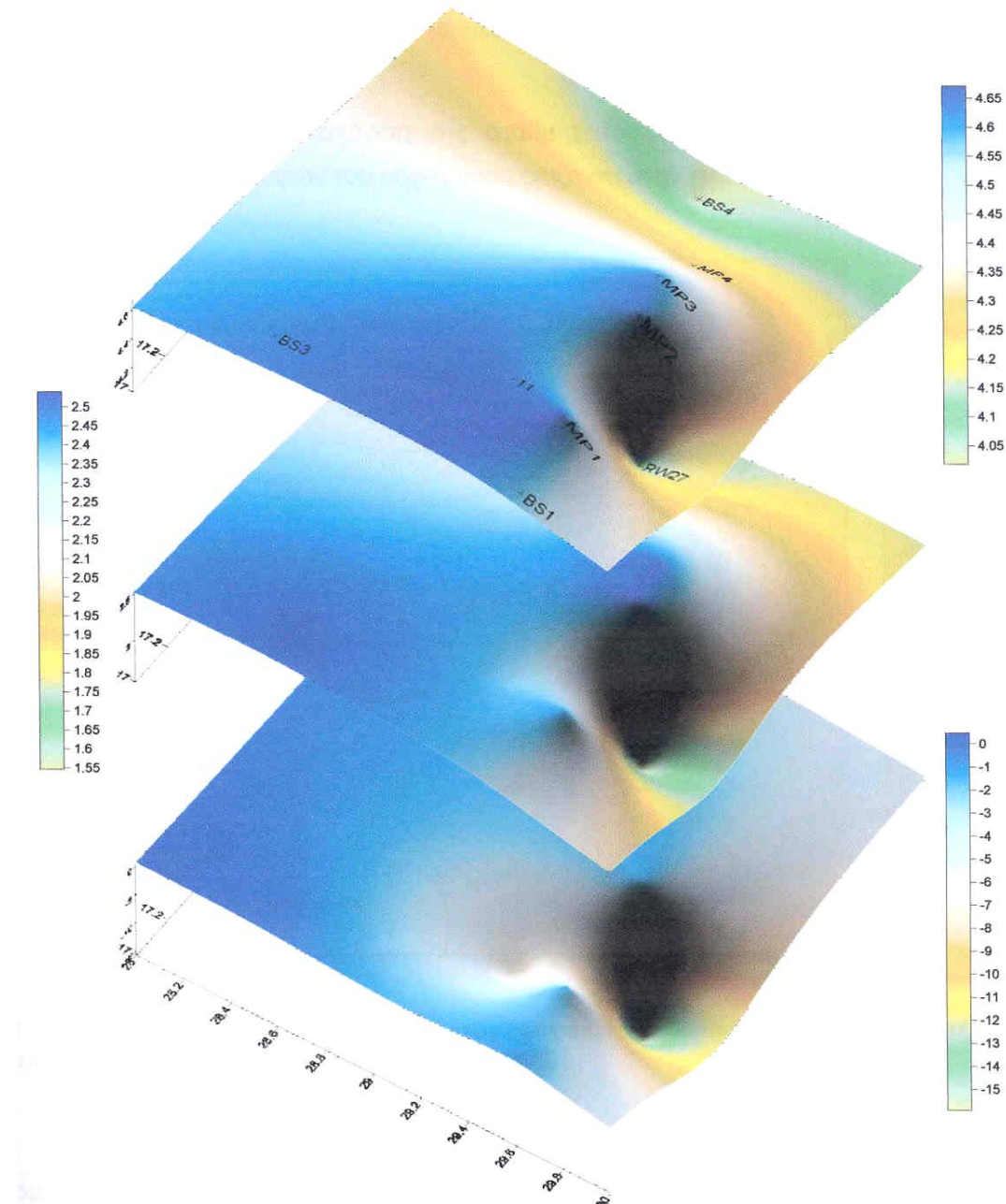


Σχήμα 29: Γεωλογική τομή MP1 – MP2 – MP3 – MP4 – BS4.



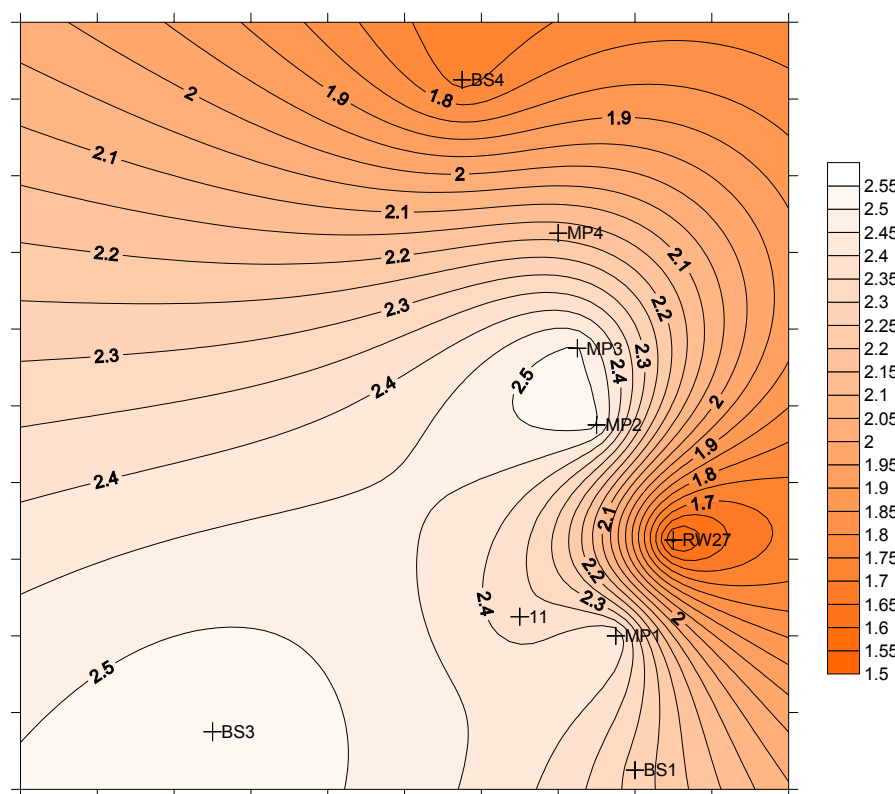
Σχήμα 30: Γεωλογική τομή MP2 – RW27.

Τέλος, στοιχεία από τις μετρήσεις της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και του αδιαπέρατου στρώματος στα πηγάδια της περιοχής air sparging συνδυάστηκαν με υψομετρικά δεδομένα από τους υπάρχοντες τοπογραφικούς χάρτες του διυλιστηρίου, προκειμένου να κατασκευαστεί ο ακόλουθος χάρτης του απόλυτου υψόμετρου της επιφάνειας του εδάφους, του υδροφορέα και του αδιαπέρατου υποστρώματος.



Όπως χαρακτηριστικά προκύπτει από το παραπάνω σχήμα οι επιφάνειες του εδάφους, του υδροφορέα και του αδιαπέρατου υποκείμενου στρώματος παρουσιάζουν μια σχετική ομοιομορφία μεταξύ τους, χωρίς ιδιαίτερα σημαντικές αποκλίσεις. Εμφανές είναι το γεγονός ότι στο σημείο όπου βρίσκεται το πηγάδι RW27 παρατηρείται αξιοσημείωτη αύξηση του βάθους, σχηματίζοντας ένα σημείο συγκέντρωσης του υπόγειου νερού (sink point). Αντίστοιχα, τα σημεία όπου βρίσκονται τα πηγάδια MP1 και MP3 φαίνεται να αποτελούν σημεία με μεγαλύτερο υψόμετρο από όπου απομακρύνεται το υπόγειο νερό (source points).

Για την καλύτερη απεικόνιση της στάθμης του υδροφορέα κατασκευάστηκε ο παρακάτω χάρτης ισοϋψών του υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή air sparging.



Σχήμα 32: Απεικόνιση των επιφανειών του εδάφους, του υδροφορέα και του αδιαπέρατου υπόβαθρου στην ευρύτερη περιοχή air sparging.

Όπως χαρακτηριστικά προκύπτει, η ροή του υπόγειου νερού δεν είναι ιδιαίτερα ομοιόμορφη, ως προς την κατεύθυνσή της. Στα βόρεια της περιοχής air sparging η ροή πραγματοποιείται από τα νότια προς τα βόρεια, ενώ στα πηγάδια του συστήματος (MP2,

MP1, RW27, 11 και BS1) η κατεύθυνση της ροής του υπόγειου νερού γίνεται από τα δυτικά προς τα ανατολικά.

Σε μια προσπάθεια να γίνει μια εκτίμηση της ταχύτητας της ροής του υπόγειου νερού στην περιοχή των πηγαδιών του συστήματος air sparging χρησιμοποιήθηκε ο νόμος του Darcy, έχοντας ως δεδομένα το πορώδες και την υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους από τη βιβλιογραφία (βάση του υπάρχοντος εδαφικού σχηματισμού) και τα στοιχεία του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα και των αποστάσεων των πηγαδιών. Θεωρώντας λοιπόν ότι το ενεργό πορώδες για εδάφη πηλώδη – αργιλώδη έχει μια μέση τιμή 0,2 και η υδραυλική αγωγιμότητα είναι κατά μέσο όρο $0,1 \text{ cm/h}$ (soilphysics.okstate.edu) υπολογίστηκε η ταχύτητα ροής μεταξύ των πηγαδιών MP1 και RW27, τα οποία απέχουν απόσταση 11m και παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη διαφορά ύψους υδροφόρου ορίζοντα, ίση με 0,922m.

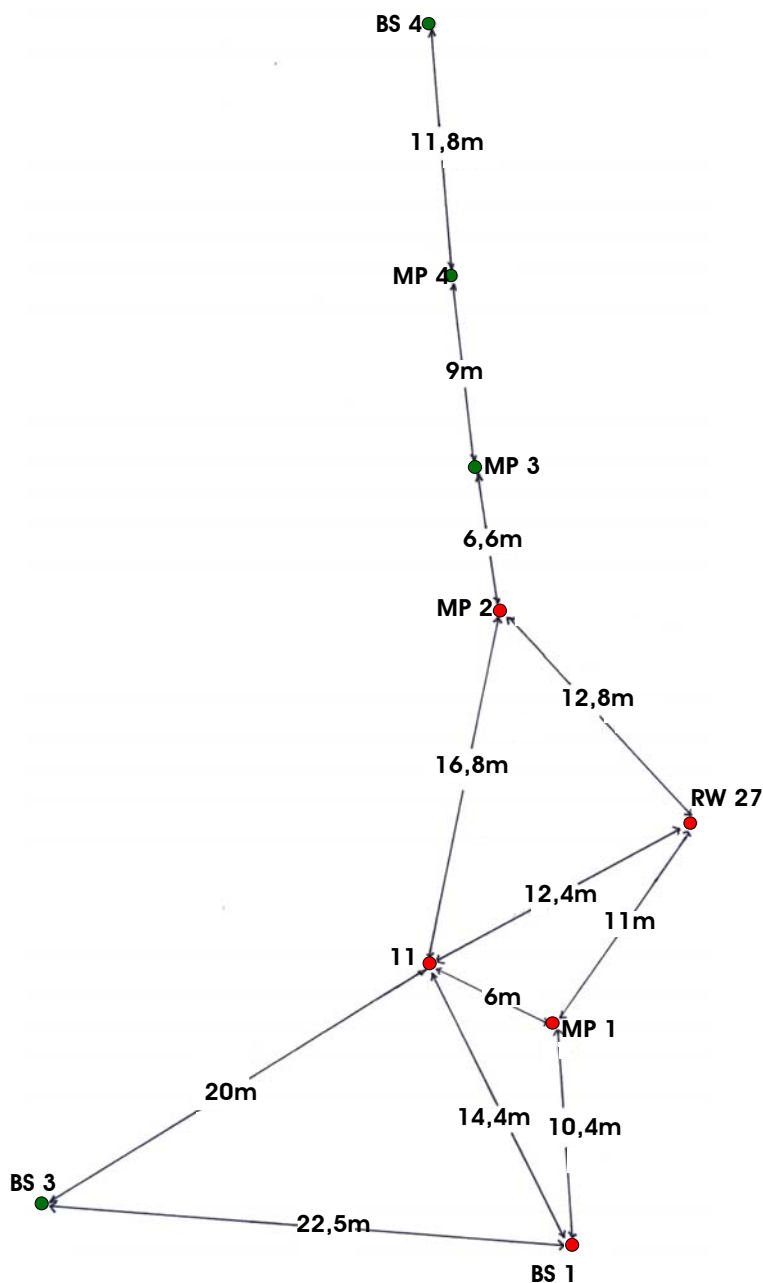
$$V_x = -\frac{K}{\varepsilon} \frac{dh}{dx} = -\frac{0,1 \frac{\text{cm}}{\text{h}}}{0,2} \frac{-0,922\text{m}}{11\text{m}} = 0,042 \frac{\text{cm}}{\text{h}} = 1 \frac{\text{cm}}{\text{d}} = 0,01 \frac{\text{m}}{\text{d}}$$

Όπως προέκυψε και όπως ήταν αναμενόμενο από παλαιότερα δεδομένα για την περιοχή, η ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού είναι ιδιαίτερα μικρή. Επομένως, η φυσική απομάκρυνση του ρυπαντή μέσω συµμεταφοράς αλλά και γενικότερα η εξάπλωσή του δεν ευνοείται από τις υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή.

Έπειτα από μελέτη των παραπάνω δεδομένων, έγινε η επιλογή των πηγαδιών από τα οποία θα πραγματοποιούνταν η διοχέτευση αέρα στον υδροφόρα της περιοχής. Αν και όλα τα υπάρχοντα πηγάδια παρακολούθησης μπορούν εύκολα να μετατραπούν σε πηγάδια air sparging (συγκεκριμένα in-well air sparging), αρχικά, αποφασίστηκε να εισαχθεί αέρας μόνο σε ένα πηγάδι, προκειμένου να «δοκιμαστεί» η σωστή συνδεσµολογία και λειτουργία του συστήματος και να γίνει μια πρώτη εκτίμηση της αντίδρασης του πεδίου. Το πηγάδι που επιλέχθηκε ήταν το MP1 για τους εξής λόγους:

- απαιτούσε μικρή πίεση εισαγωγής αέρα, δεδομένου ότι το πάχος και το βάθος του υδροφόρα στο σημείο εκείνο ήταν μικρό,
- περιβάλλονταν από άλλα πηγάδια, σε σχετικά μικρή απόσταση, επιτρέποντας την παρακολούθηση των συνθηκών που επικρατούν και των αλλαγών που πιθανότατα θα επέρχονταν στο υπέδαφος (ακόμη και τον προσδιορισμό της ακτίνας επιρροής του πηγαδιού, βάση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου σε άλλα πηγάδια γύρω από αυτό).

Μετά από ένα μήνα και αφού εξασφαλίστηκε η ορθή λειτουργία του συστήματος, επιβεβαιώθηκε η ικανότητα του πεδίου να αντεπεξέλθει χωρίς δυσάρεστες αντιδράσεις στην διοχέτευση αέρα και προσδιορίστηκαν με βεβαιότητα οι βασικές λειτουργικές παράμετροι του συστήματος (πίεση και παροχή αέρα), το σύστημα επεκτάθηκε, περιλαμβάνοντας επιπλέον τα πηγάδια MP2, 11, BS1 και RW 27, ως πηγάδια εισαγωγής αέρα (Σχήμα 33).



Σχήμα 33: Πηγάδια περιοχής air sparging: κόκκινο χρώμα → πηγάδια διοχέτευσης αέρα, πράσινο χρώμα → πηγάδια παρακολούθησης.

5.2 Επιλεχθέν σύστημα Air Sparging

Το σύστημα που επιλέχθηκε και εγκαταστάθηκε στην περιοχή air sparging αποτελείται από τις ακόλουθες μονάδες:

- Ηλεκτρικό πίνακα ελέγχου του συστήματος και παροχής ρεύματος για δυο μοτέρ με συνδεσμολογία αστέρα – τρίγωνο και χρονική καθυστέρηση με τάση χειρισμού 24V.
- Αεροσυμπιεστή δυο κεφαλών (αντικρηκτικού τύπου) 5,5 + 5,5 HP, 380V, με δυνατότητα παροχής 1000L/min και αεροφυλάκιο 500L. Διαθέτει επίσης ρυθμιστή πίεσης και διακόπτη ελέγχου ροής.
- Κολεκτέρ διανομής του αέρα και ροόμετρο.
- Ελαστικούς σωλήνες διανομής του αέρα (διαμέτρου Φ8) στα επιλεχθέντα πηγάδια.
- Μανόμετρα, τοποθετημένα στα πηγάδια του συστήματος για την παρακολούθηση της αναπτυσσόμενης πίεσης μέσα σε αυτά.
- Βιδωτά καπάκια και πλάκες PVC για τη στεγανοποίηση των πηγαδιών της μονάδας.

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα βασικότερα προαναφερθέντα στοιχεία του εγκατασταθέντος πιλοτικού συστήματος air sparging.



Εικόνα 2: Ο αεροσυμπιεστής δυο κεφαλών, αντικρηκτικού τύπου. Στα αριστερά φαίνεται η μαύρη σωλήνα που οδηγεί τον αέρα στο κολεκτέρ, όπου γίνεται και η κατανομή του στα πηγάδια.



Εικόνα 3: Ο ηλεκτρονικός πίνακας ελέγχου. Στο κάτω μέρος φαίνεται το κολεκτέρ, οι μπλε ελαστικοί σωλήνες που κατανέμουν τον αέρα στα πηγάδια καθώς και το ροόμετρο, με τη βοήθεια του οποίου ελέγχεται η παροχή αέρα σε κάθε ένα από τα πηγάδια της μονάδας.



Εικόνα 4: Όψη του κολεκτέρ, των μπλε ελαστικών σωλήνων που κατανέμουν τον αέρα στα πηγάδια και του ροόμετρου.



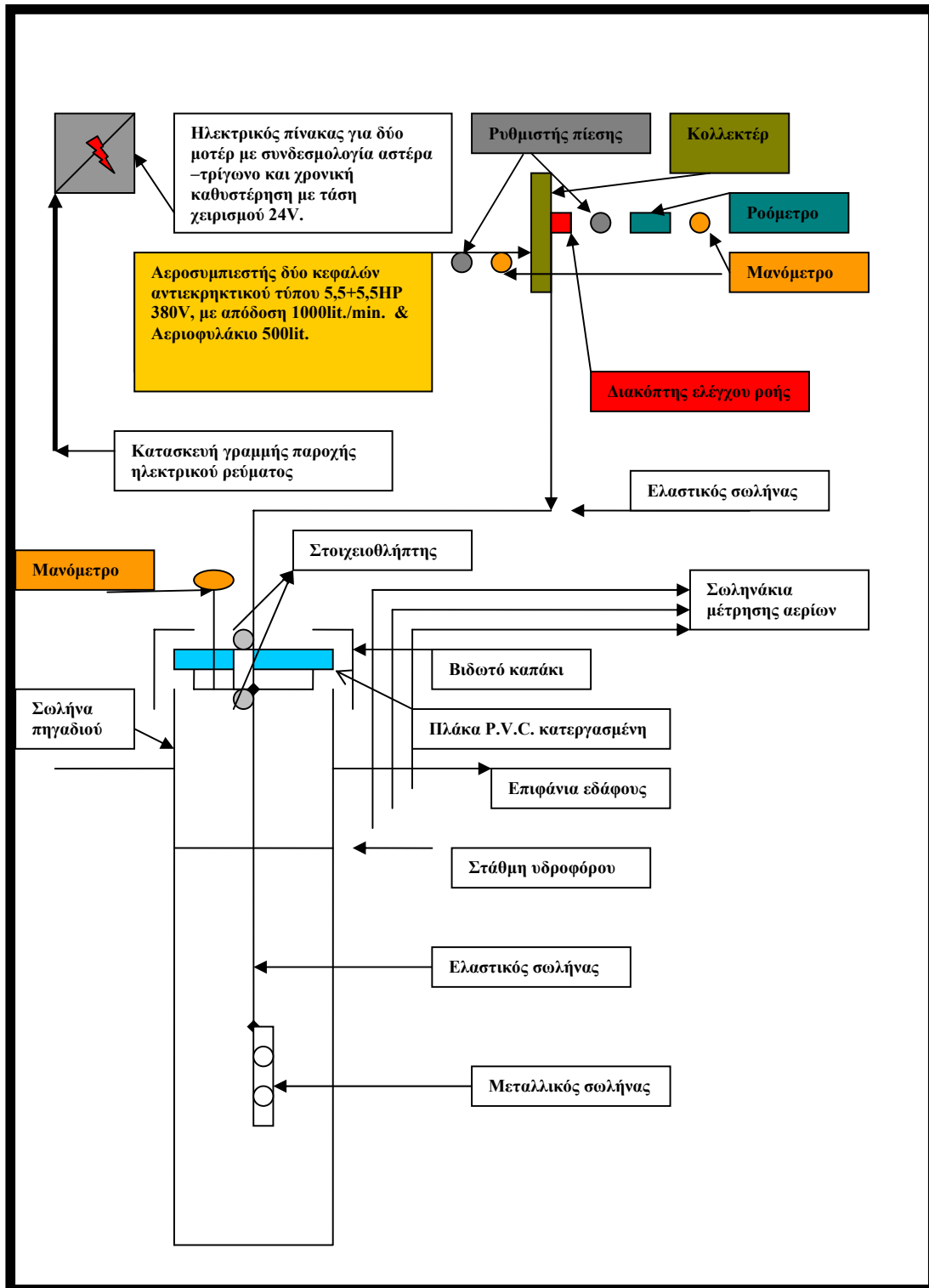
Εικόνα 5: Τυπικό πηγάδι του συστήματος, όπου φαίνεται το βιδωτό καπάκι, η πλάκα PVC, ο σωλήνας παροχής αέρα και το μανόμετρο που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της αναπτυσσόμενης πίεσης.

Στο Σχήμα 34 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία των επιμέρους τμημάτων του συστήματος air sparging.

5.3 Χρονοδιάγραμμα και συνθήκες λειτουργίας του συστήματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το σύστημα air sparging λειτούργησε αρχικά δοκιμαστικά σε ένα μόνο πηγάδι (MP1), προκειμένου να ελεγχθεί η ασφαλής λειτουργία του και να γίνει μια πρώτη εκτίμηση της «αντίδρασης» του πεδίου στην εισαγωγή αέρα στο υπέδαφος. Η δοκιμαστική αυτή λειτουργία κράτησε περίπου 1 μήνα (26/7 – 27/8/2004), κατά τη διάρκεια του οποίου πραγματοποιούνταν λεπτομερής παρακολούθηση τόσο του ίδιου του συστήματος (έλεγχος παροχής και πίεσης διοχετευόμενου αέρα), όσο και κάποιων βασικών ποιοτικών παραμέτρων του εδαφικού αέρα και του υπόγειου νερού γύρω από το πηγάδι air sparging, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά σε επόμενες παραγράφους (παράγραφοι 5.4.1 και 5.4.2).

Η επιλογή της κατάλληλης παροχής και πίεσης αέρα στον υδροφορέα μέσω του πηγαδιού MP1 έγινε βάση των δυνατοτήτων του υπεδάφους στο συγκεκριμένο σημείο του. Πιο αναλυτικά, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3), στόχος ήταν ο προσδιορισμός της ελάχιστης και της μέγιστης δυνατής πίεσης που μπορεί να εφαρμοστεί στην περιοχή, επιτυγχάνοντας ικανοποιητική εισαγωγή και διασπορά αέρα στο υπέδαφος. Οι πιέσεις αυτές σχετίζονται άμεσα με το βάθος και το



Σχήμα 34: Συνδεσμολογία συστήματος air sparging.

πάχος του υδροφορέα, ενώ η επιθυμητή παροχή αέρα για την εκκίνηση της λειτουργίας του συστήματος, βάση προηγούμενης εμπειρίας, κυμαίνονται μεταξύ 60 και 90L/min. Γνωρίζοντας λοιπόν τα απαιτούμενα υδρογεωλογικά δεδομένα του πεδίου στο σημείο του πηγαδιού MP1, υπολογίστηκαν όλες οι λειτουργικές παράμετροι του συστήματος. Τελικά, η δοκιμαστική λειτουργία της μονάδας air sparging είχε τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 9.

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά της δοκιμαστικής λειτουργίας του συστήματος air sparging.

Πηγάδι air sparging	Πίεση εισαγόμενου αέρα (bars)		Επιλεχθείσα πίεση εισαγωγής αέρα (bars)	Επιθυμητά όρια παροχής αέρα (L/min)		Επιλεχθείσα παροχή αέρα (L/min)	Χρόνος λειτουργίας
	Ελάχιστη	Μέγιστη		Ελάχιστη	Μέγιστη		
MP1	0,35	1,20	0,59	40	1100	70	25ημέρες · 10 ώρες/ ημέρα

Μετά την επιτυχημένη δοκιμαστική λειτουργία του συστήματος και τη διεξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τις δυνατότητες του ίδιου αλλά και του πεδίου, η λειτουργία του επεκτάθηκε και σε άλλα πηγάδια. Συγκεκριμένα, η κεντρική μονάδα air sparging συνδέθηκε επιπλέον με τα πηγάδια MP2, BS1, 11 και RW27. Έτσι, το σύστημα αποτελούνταν πλέον από 5 πηγάδια εισαγωγής αέρα, τα οποία κάλυπταν περιοχή ίση με 340m² περίπου.

Τα χαρακτηριστικά του διοχετευόμενου αέρα (παροχή και πίεση) προσδιορίστηκαν για κάθε πηγάδι χωριστά (Πίνακας 10), δεδομένου ότι κάποια από αυτά παρουσίαζαν σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς το βάθος και το πάχος του υδροφορέα. Ο χρόνος της κανονικής λειτουργίας του συστήματος ήταν σαφώς μεγαλύτερος (περίπου 5 μήνες – 27/8 – 27/1/2005), ενώ η παρακολούθηση του ίδιου και των επιδράσεων της λειτουργίας του στο πεδίο συνέχισε να είναι συστηματικότερη.

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά της δοκιμαστικής λειτουργίας του συστήματος air sparging.

Πηγάδι air sparging	Πίεση εισαγόμενου αέρα (bars)		Επιλεχθείσα πίεση εισαγωγής αέρα (bars)	Επιθυμητά όρια παροχής αέρα (L/min)		Επιλεχθείσα παροχή αέρα (L/min)	Χρόνος λειτουργίας
	Ελάχιστη	Μέγιστη		Ελάχιστη	Μέγιστη		
MP2	0,35	1,16	0,57	40	1100	70	125ημέρες · 10 ώρες/ημέρα
11	0,94	2,39	1,18				
BS1	0,31	1,12	0,55				
RW27	1,7	4,2	2,09				

5.4 Παρακολούθηση λειτουργίας συστήματος (Monitoring)

Η παρακολούθηση της λειτουργίας του συστήματος περιλαμβάνει την καθημερινή επίβλεψη και ρύθμιση, όταν είναι απαραίτητο, των λειτουργικών παραμέτρων της μονάδας (π.χ. παροχή και πίεση διοχετευόμενου αέρα), καθώς επίσης και τον έλεγχο της ασφάλειας της μονάδας, προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε επικίνδυνη κατάσταση ή ατύχημα (π.χ. ανάπτυξη μεγάλων πιέσεων στο υπέδαφος).

Μέσα στα πλαίσια της παρακολούθησης της λειτουργίας του συστήματος συμπεριλαμβάνεται επίσης η καταγραφή της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, καθώς οποιαδήποτε μεταβολή αυτής (π.χ. ανύψωσή της) είναι ανεπιθύμητη, δεδομένου ότι υποδεικνύει την αυξημένη διατάραξη ή/ και την ανάμειξη του υδροφορέα, που μπορεί να προκαλέσουν μεταφορά και εξάπλωση του ρυπαντή.

Παράλληλα, ανά πολύ τακτά χρονικά διαστήματα (σχεδόν καθημερινά), καταγράφονται οι τιμές και οι μεταβολές κάποιων ποιοτικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους και συγκεκριμένα του υπόγειου νερού και του εδαφικού αέρα. Τα χαρακτηριστικά αυτά, όπως αναλυτικά αναφέρονται και εξηγούνται στις επόμενες παραγράφους, συνδέονται άμεσα τόσο με τη λειτουργία και την απόδοση της τεχνολογίας air sparging, όσο και με τις συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο γενικότερα.

5.4.1 Υπόγειο νερό

Οι κύριες ποιοτικές παράμετροι του υπόγειου νερού που παρακολουθήθηκαν λεπτομερώς ήταν οι εξής:

Διαλυμένο οξυγόνο (Dissolved Oxygen - DO)

Με το όρο διαλυμένο οξυγόνο εννοείται το μοριακό οξυγόνο (αέριο) που είναι διαλυμένο στο νερό. Ο εμπλουτισμός των φυσικών νερών με οξυγόνο πραγματοποιείται κυρίως μέσω διάχυσης από τον ατμοσφαιρικό αέρα στη διεπιφάνεια νερού – αέρα και μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης που πραγματοποιούν οι υδατικοί φυτικοί οργανισμοί.

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου που βρίσκεται στο φυσικό νερό είναι η θερμοκρασία, η αλατότητα, το περιεχόμενο του

νερού σε μικροοργανισμούς και η ατμοσφαιρική πίεση. Συγκεκριμένα, ισχύει ότι (www.phschool.com):

- Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού, τόσο μειώνεται η ικανότητα του νερού να δεσμεύει το οξυγόνο.
- Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία (ή και η ύπαρξη θρεπτικών συστατικών) στο νερό, αυξάνεται η μικροβιακή δραστηριότητα και κατ' επέκταση η κατανάλωση οξυγόνου, με αποτέλεσμα να μειώνεται η συγκέντρωσή του.
- Όσο αυξάνεται η αλατότητα του νερού, τόσο μειώνεται η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου σε αυτό.

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο ποιότητας αυτού, η οποία σχετίζεται με την ανάπτυξη των περισσότερων μορφών ζωής. Πολύ χαμηλές τιμές διαλυμένου οξυγόνου υποδηλώνουν τη ρύπανση του νερού και την ανικανότητα διατήρησης ζωής σε αυτό. Επιπλέον, υπό συνθήκες ρύπανσης η παρουσία ή μη του οξυγόνου στο νερό καθορίζει τη δυνατότητα βιοαποικοδόμησης των ρυπαντών από αερόβιους ή αναερόβιους μικροοργανισμούς, αντίστοιχα.

Συνήθως το διαλυμένο οξυγόνο μετράται σε mg οξυγόνου ανά L νερού (mg/L). Τυπικές τιμές διαλυμένου οξυγόνου σε μη ρυπασμένα υπόγεια νερά είναι 0,3 έως 10mg/L, αλλά γενικά σε τιμές μικρότερες από 5mg/L ορισμένοι υδατικοί οργανισμοί ήδη βρίσκονται σε κατάσταση στρες και δεν μπορούν να αναπτυχθούν και να επιβιώσουν φυσιολογικά (www.jacksonbottom.org). Επίσης, σε συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου μικρότερη από 0,5mg/L η αερόβια αποικοδόμηση ρυπαντών είναι αδύνατη, ενώ η αναερόβια πολύ πιθανή (www.water.hut.fi). Το διαλυμένο οξυγόνο είναι ακόμη δυνατόν να μετρηθεί ως επί τοις εκατό ποσοστό κορεσμού.

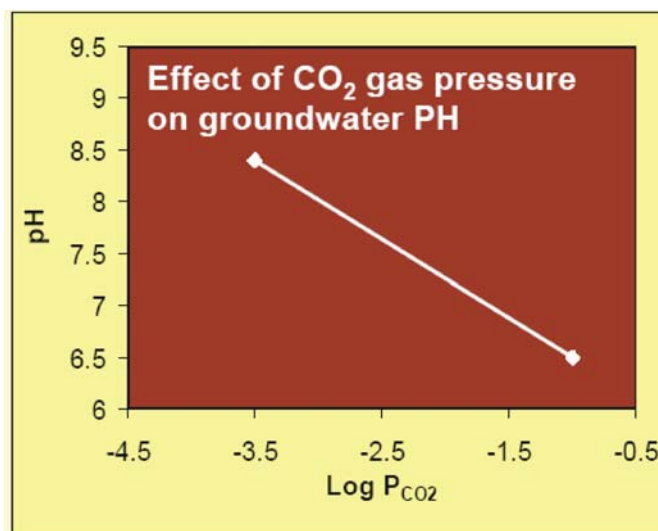
Η μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του πιλοτικού συστήματος air sparging παρέχει μια άμεση εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου, όσον αφορά την ικανοποιητική διοχέτευση και διασπορά αέρα (και κατ' επέκταση οξυγόνου) στο υπέδαφος. Άλλωστε, όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι μετρήσεις διαλυμένου οξυγόνου στον υδροφόρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και για τον προσδιορισμό της ακτίνας επιρροής ενός πηγαδιού air sparging.

Ενεργός οξύτητα (pH)

Το pH αποτελεί μέτρο του πόσο όξινο ή βασικό είναι το νερό και σχετίζεται άμεσα με την ισορροπία που επικρατεί σε αυτό μεταξύ των κατιόντων υδρογόνου (H^+) και των ανιόντων υδροξυλίου (OH^-). Καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη διαλυτότητα αερίων και ανόργανης ύλης στο νερό, τις ιδιότητες προσρόφησης του εδάφους και τη διεξαγωγή βιοχημικών αντιδράσεων. Πιο συγκεκριμένα, καθορίζει τη διαλυτότητα και τη βιοδιαθεσιμότητα (ποσότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους υδρόβιους μικροοργανισμούς) διαφόρων χημικών συστατικών, όπως για παράδειγμα θρεπτικών συστατικών (φώσφορο, άζωτο και άνθρακα) και βαρέων μετάλλων (μόλυβδο, χαλκό, κάδμιο, κτλ).

Η ενεργός οξύτητα του νερού εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την αλατότητα, τις συγκεντρώσεις του CO_2 και του οξυγόνου στο νερό, τη μεταβολική δραστηριότητα των υδρόβιων οργανισμών (φωτοσύνθεση, αναπνοή), τη χημική αποσύνθεση των οργανικών ουσιών και την επίδραση εξωγενών παραγόντων. Για παράδειγμα, η φωτοσύνθεση που λαμβάνει χώρα από υδατικά φυτά χρησιμοποιώντας CO_2 , μειώνει προσωρινά την υπάρχουσα συγκέντρωση ανθρακικού οξέος (H_2CO_3) στο νερό, αυξάνοντας την τιμή του pH (www.jacksonbottom.org).

Στο Σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 35) παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ της τιμής του pH στο νερό και της πίεσης του διοξειδίου του άνθρακα που είναι παρόν σε αυτό.



Σχήμα 35: Συσχέτιση pH και πίεσης διοξειδίου του άνθρακα στο νερό.

Όπως είναι γνωστό οι τιμές του pH κυμαίνονται από 0 έως 14 και συγκεκριμένα για τιμές μικρότερες του 7 το νερό θεωρείται όξινο, για τιμές μεγαλύτερες του 7 θεωρείται

βασικό, ενώ τέλος για τιμή ίση με 7 θεωρείται ουδέτερο. Τυπικές τιμές του pH για μη ρυπασμένα υπόγεια νερά κυμαίνονται μεταξύ 6 και 8,5, ενώ γενικά τιμές pH στην όξινη περιοχή ίσως να υποδηλώνουν την παρουσία μεγάλων ποσοτήτων διαλυμένων μετάλλων με υψηλή κινητικότητα. Οι περισσότεροι πάντως μικροοργανισμοί που έχουν την ικανότητα να βιοαποικοδομούν πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες παρουσιάζουν βέλτιστη ανάπτυξη και απόδοση σε τιμές pH 6 – 8.

Δυναμικό οξειδοαναγωγής (Redox Potential – Eh)

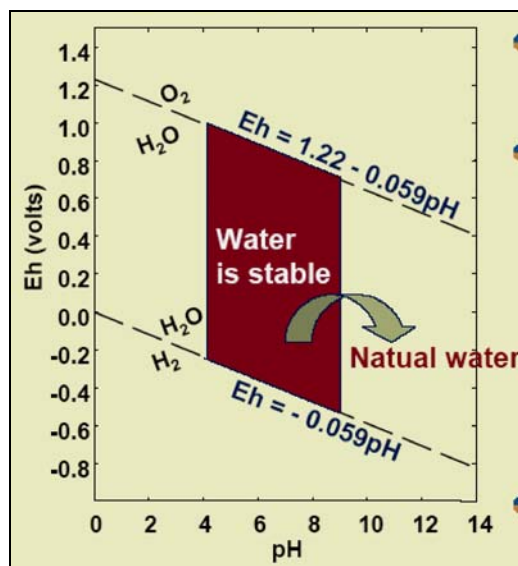
Το δυναμικό οξειδοαναγωγής είναι μια πολύ σημαντική χημική παράμετρος του νερού, η οποία παρέχει ένα μέτρο της οξειδωτικής ή αναγωγικής φύσης του νερού. Όπως το pH αποτελεί μέτρο της δραστηριότητας των υδρογονοκατιόντων και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της οξύτητας ή της αλκαλικότητας ενός συστήματος, έτσι και το δυναμικό οξειδοαναγωγής αποτελεί ανάλογο μέτρο της δραστηριότητας των ηλεκτρονίων και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ικανότητας οξείδωσης ή αναγωγής ενός υδατικού συστήματος. Η οξειδωτική ή αναγωγική φύση του νερού έχει επίδραση στην ικανότητά του να διατηρεί (ή να μη διατηρεί) τη ζωή μέσα σε αυτό. Υπάρχουν κάποιες οξειδώσεις (π.χ. βιολογική μετατροπή αμμωνίας σε νιτρικά και νιτρώδη) και αναγωγές (απονιτροποίηση) που επιβάλλεται να λαμβάνουν χώρα προκειμένου να διατηρηθεί η (μακρο-) ζωή. Επίσης, το δυναμικό οξειδοαναγωγής είναι ένας πολύ σημαντικός δείκτης της ικανότητας ενός συστήματος να ανακυκλώνει – «αφομοιώνει» απόβλητα (www.wetwebmedia.com).

Το δυναμικό οξειδοαναγωγής μετράται έμμεσα ως η ικανότητα ενός υδατικού συστήματος να άγει τον ηλεκτρισμό σε μονάδες miliVolt (mV). Η τυπική τιμή δυναμικού οξειδοαναγωγής για έναν μη ρυπασμένο υπόγειο υδροφόρο κυμαίνεται μεταξύ -100 και 600mV. Πολύ χαμηλές τιμές δυναμικού οξειδοαναγωγής υποδεικνύουν την υψηλή ρύπανση του υπόγειου νερού και πιθανή επικράτηση αναερόβιων (ανοξικών) συνθηκών.

Παρόλα αυτά, σημαντική είναι η μεταβολή του δυναμικού οξειδοαναγωγής και όχι τόσο η τιμή του αυτή καθ' αυτή. Για παράδειγμα, η μεταβολή του δυναμικού οξειδοαναγωγής ενός συστήματος αποτελεί σήμα κάποιας αντίστοιχης μεταβολής των συνθηκών που επικρατούν στο πεδίο, οι οποίες θα πρέπει να προσδιοριστούν και να εξεταστούν (www.fate.clu-in.org).

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 36) παρουσιάζεται η συσχέτιση του pH και του δυναμικού οξειδοαναγωγής, καθορίζοντας τα όρια σταθερότητας του νερού σε θερμοκρασία 25°C και πίεση 1bar. Πάνω από την ανώτερη διακεκομμένη γραμμή το

νερό τείνει να οξειδώνεται προς O_2 , ενώ αντίστοιχα κάτω από την κατώτερη διακεκομμένη γραμμή το νερό τείνει να ανάγεται σε H_2 .



Σχήμα 36: Συσχέτιση δυναμικού οξειδοαναγωγής και pH στο νερό.

Ηλεκτρική αγωγιμότητα (Electrical conductivity - EC)

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού αναφέρεται στην ικανότητά του να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα, δηλαδή να μεταφέρει ιόντα μέσα στη μάζα του. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται άμεσα από την παρουσία ιόντων, από τη συγκέντρωσή τους, την ευκινησία τους και το σθένος τους. Αποτελεί μέτρο της συγκέντρωσης των διαλυμένων ιόντων και αλάτων που υπάρχουν σε αυτό και γενικότερα των ολικά αιωρούμενων στερεών (Total Suspended Solids – TDS).

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα μετράται σε μονάδες microSiemens ανά εκατοστό ($\mu S/cm$) και μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία. Αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει θετικά την τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, δεδομένου ότι η αύξηση της θερμοκρασίας επιταχύνει τη διάσπαση των ηλεκτρολυτών (υδατικά διαλύματα οξέων - βάσεων - αλάτων). Για να είναι συγκρίσιμες τιμές μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι σωστό η τιμή της να ανάγεται σε θερμοκρασία $25^{\circ}C$, σύμφωνα με τη σχέση EC (σε θερμοκρασία $25^{\circ}C$) = $EC(T) / [1 + 0,019(T - 25)]$ (www.kpe-kastor.kas.sch.gr).

Απόβλητα και ρύποι που εισέρχονται σε φυσικά νερά τροποποιούν την αγωγιμότητα, ειδικότερα αν περιλαμβάνουν ιόντα όπως ανθρακικά, θειικά, χλωρίου, μαγνησίου, νατρίου, καλίου και φωσφόρου. Γενικότερα, όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα στα

γλυκά νερά τόσο μεγαλύτερη είναι η βιολογική παραγωγικότητα. Συνήθως στα φυσικά νερά η ηλεκτρική αγωγιμότητα κυμαίνεται από 50 - 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Αλατότητα (Salinity)

Η αλατότητα αποτελεί μέτρο των ολικά διαλυτών αλάτων ή άλλων οργανικών και ανόργανων ουσιών που είναι δυνατόν να υπάρχουν στο νερό. Συνήθως μετράται σε μονάδες mg ολικά διαλυμένων αλάτων (Total Dissolved Salts – TDS) ανά L νερού, ή υπολογίζεται μέσω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Οι επιτρεπτές τιμές της αλατότητας στο νερό προσδιορίζονται ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται.

Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία του νερού μεταβάλλεται με το βάθος, την εποχή και την τοποθεσία. Επηρεάζει άμεσα τη διαλυτότητα του οξυγόνου και άλλων συστατικών, το μεταβολισμό των υδρόβιων οργανισμών και την κινητική διαφόρων αντιδράσεων. Οι περισσότεροι υδρόβιοι οργανισμοί επιβιώνουν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ ο μεταβολισμός τους αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας και μειώνεται με μείωση αυτής. Συγκεκριμένα, η βιοαποικοδόμηση υδρογονανθράκων, η οποία πραγματοποιείται από κατάλληλους μικροοργανισμούς, σχεδόν διπλασιάζεται σε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10°C, όταν η θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 5 και 25°C. Αντίθετα, όταν η θερμοκρασία του υπόγειου νερού είναι μικρότερη από 5°C η βιοαποικοδόμηση παρεμποδίζεται (www.water.hut.fi).

Τυπικές τιμές θερμοκρασίας μη ρυπασμένων υπόγειων νερών είναι μεταξύ 3 και 20°C, ενώ παρουσία ρυπαντών είναι δυνατόν να παρατηρηθεί αύξηση της θερμοκρασίας.

Συγκέντρωση πετρελαϊκών ρυπαντών

▪ **Total Petroleum Hydrocarbons**

Ο όρος TPH (ολικοί πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες) χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια μεγάλη ομάδα εκατοντάδων χημικών ουσιών, οι οποίες προέρχονται από το μαζούτ (crude oil). Λόγω του μεγάλου αριθμού χημικών ενώσεων που περιέχονται στο μαζούτ και γενικότερα στα διάφορα πετρελαϊκά προϊόντα δεν είναι πρακτικό να προσδιορίζονται ξεχωριστά και επομένως έχει επικρατήσει ο προσδιορισμός της

συνολικής ποσότητας πετρελαϊκών υδρογονανθράκων που υπάρχει στα διάφορα περιβαλλοντικά μέσα (νερό, έδαφος, ιζήματα). Τα TPH αν και αποτελούν μίγμα χημικών ενώσεων (εξάνιο, βενζόλιο, PAHs, ναφθαλένιο, τολουόλιο, κα), όπως δηλώνει και η ονομασία τους, αποτελούνται κυρίως από υδρογονάνθρακες.

Η επίδραση των TPH στην υγεία εξαρτάται άμεσα από τα συστατικά από τα οποία αποτελούνται, το χρόνο έκθεσης, καθώς και την ποσότητα έκθεσης. Παρόλα αυτά είναι ευρέως γνωστό ότι ορισμένα συστατικά TPH, όπως για παράδειγμα το εξάνιο, έχουν τοξική επίδραση, επηρεάζοντας άμεσα στο νευρικό σύστημα και προκαλώντας μεγάλο αριθμό δυσλειτουργιών στον ανθρώπινο οργανισμό (ακόμη και παράλυση σε ορισμένες περιπτώσεις) (www.enviro.nfesc.navy.mil).

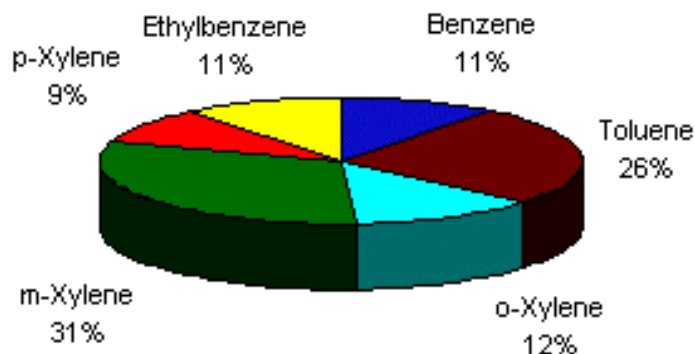
Η παρουσία TPH στο έδαφος αλλά και στα υπόγεια και επιφανειακά νερά οφείλεται κυρίως σε διαρροές δεξαμενών και αγωγών μεταφοράς πετρελαϊκών προϊόντων. Η τύχη τους μέσα στο υπέδαφος εξαρτάται άμεσα από τη σύστασή τους. Κάποιο μέρος των TPH θα εξατμιστεί (κυρίως τα πτητικά συστατικά), ένα άλλο μέρος θα παραμείνει στην επιφάνεια του υδροφορέα (LNAPL), σχηματίζοντας ελεύθερη φάση, ένα άλλο μέρος θα αποικοδομηθεί από υπάρχοντες μικροοργανισμούς (βιοαποικοδομήσιμα συστατικά), ενώ τέλος ένα άλλο ποσοστό είναι δυνατόν να παραμείνει αυτούσιο μέσα στον υδροφορέα για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα.

Συνοψίζοντας, τα TPH αποτελούν ένα γενικευμένο κριτήριο ποιότητας υδάτων, το οποίο υποδεικνύει την παρουσία πετρελαϊκών ρυπαντών σε αυτά, χωρίς όμως να προσδιορίζει τη φύση και τις ιδιότητες των υπαρχόντων ουσιών. Το ανώτατο επιτρεπτό όριο TPH στο υπόγειο νερό ποικίλει από χώρα σε χώρα, αλλά γενικά κυμαίνεται κάτω από **1mg/L**.

▪ **BTEX (Benzene – Toluene – Ethyl-Benzene – Xylenes)**

Τα συστατικά BTEX (βενζόλιο – τολουένιο – αιθυλοβενζόλιο – ξυλένια) αποτελούν την κύρια ομάδα διαλυτών οργανικών ρυπαντών που συναντώνται στο έδαφος και στο υπόγειο νερό και προέρχονται από διαρροές πετρελαϊκών προϊόντων, όπως βενζίνη (Σχήμα 37), diesel, πετρέλαιο θέρμανσης, κα. Λόγω της πολικότητάς και της μεγάλης διαλυτότητάς τους καταφέρνουν να εισχωρήσουν σχετικά εύκολα στο υπόγειο νερό και να προκαλέσουν πολλά προβλήματα λόγω της έντονης και μακροχρόνιας τοξικότητας

που παρουσιάζουν. Εκτός των άλλων, τουλάχιστον το βενζόλιο έχει αποδειχτεί ότι είναι καρκινογόνο.



Σχήμα 37: Τυπική περιεκτικότητα συστατικών BTEX (% κ.β.) στην βενζίνη.

Η παρουσία συστατικών BTEX στο νερό και στο έδαφος, καθώς και η εξυγίανση αυτών εξαρτάται άμεσα από τις διαδικασίες της εξάτμισης, της διάλυσης, της προσρόφησης και της βιοαποικοδόμησης από μικροοργανισμούς. Η εξάτμιση είναι ο πρώτος και ο βασικότερος μηχανισμός απομάκρυνσης των BTEX, ο οποίος λαμβάνει χώρα λόγω της υψηλής τους διαλυτότητας, του σχετικά μικρού μοριακού τους βάρους της μεγάλης τάσης ατμών που παρουσιάζουν. Μετά την εξάτμιση ενός μεγάλου ποσοστού των συστατικών αυτών θα ακολουθήσει είτε η διάλυσή τους στο νερό είτε η προσρόφησή τους στα εδαφικά σωματίδια και την υπάρχουσα οργανική ύλη, ανάλογα με τις ιδιότητές τους και τις συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο. Τέλος, είναι δυνατή και η βιοαποικοδόμηση των συστατικών αυτών από κατάλληλους μικροοργανισμούς που συνήθως είναι παρόντες στο έδαφος. Αυτή όμως η διεργασία συνήθως πραγματοποιείται σε σχετικά αργό ρυθμό και συχνά είναι αναγκαία η ενίσχυσή της (π.χ. με διοχέτευση οξυγόνου).

Η παρακολούθηση της συγκέντρωσης των BTEX στο υπόγειο νερό σχετίζεται άμεσα με την εκτίμηση της υφιστάμενης κατάστασης ρύπανσης και στη συγκεκριμένη περίπτωση (κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας air sparging) με την απόδοση της εφαρμοζόμενης μεθόδου εξυγίανσης υπογείων υδάτων. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 11) παρουσιάζονται οι μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις των συστατικών BTEX στο υπόγειο νερό.

Πίνακας 11: Μέγιστες επιτρεπτές τιμές συγκέντρωσης συστατικών BTEX στο υπόγειο νερό.

Παράμετρος	Μέγιστη τιμή (µg/L)
Benzene	< 5
Ethylbenzene	< 700
Toluene	< 1.000
Total Xylenes	< 10.000

▪ MTBE (Methyl Tertiary-Butyl Ether)

Με τον όρο MTBE εκφράζεται ένα χημικό συστατικό, το οποίο κατασκευάζεται κατά τη διάρκεια της αντίδρασης της μεθανόλης και του ισοβουτυλενίου και χρησιμοποιείται ως προσθετικό στην βενζίνη. Σε θερμοκρασία δωματίου είναι υγρό, πτητικό, εύφλεκτο, με έντονη οσμή και ιδιαίτερα ευδιάλυτο στο νερό.

Όταν το MTBE βρεθεί σε υπόγειο υδροφορέα, έπειτα από διαρροή κάποιας δεξαμενής αποθήκευσης ή αγωγών μεταφοράς βενζίνης, έχει την ιδιότητα να διαλύεται σε πολύ μεγάλο βαθμό και να εξαπλώνεται πολύ εύκολα και γρήγορα στο νερό. Επίσης, η μεγάλη πτητικότητα που παρουσιάζει ως καθαρή ουσία μειώνεται δραστικά, καθώς η σταθερά Henry που το χαρακτηρίζει είναι αρκετά χαμηλή, παρεμποδίζοντας την εξάτμισή του από το υπόγειο νερό. Ακόμη, στις περισσότερες περιπτώσεις η βιοαποικοδόμησή του από μικροοργανισμούς δεν είναι εύκολη ή ούτε καν δυνατή.

Το MTBE θεωρείται ύποπτο για την πρόκληση καρκίνου, είναι παρόν σε τεράστιες ποσότητες υπόγειου νερού ανά τον κόσμο και η απομάκρυνσή του αποτελεί ένα από τα πλέον σημαντικά θέματα που βρίσκονται υπό εξέταση από τους επιστήμονες. Το ανώτατο επιτρεπτό όριο MTBE στο υπόγειο νερό επίσης ποικίλει από χώρα σε χώρα, αλλά γενικά κυμαίνεται κάτω από **2mg/L**.

5.4.2 Εδαφικός αέρας

Οι κύριες ποιοτικές παράμετροι του εδαφικού αέρα που παρακολουθήθηκαν λεπτομερώς ήταν οι εξής:

Περιεκτικότητα σε οξυγόνο

Οι μετρήσεις της συγκέντρωσης του οξυγόνου στον εδαφικό αέρα αποτελούν έναν πολύ σημαντικό δείκτη των συνθηκών που επικρατούν στο υπέδαφος. Όταν δεν εφαρμόζεται καμία μέθοδος εξυγίανσης εδάφους ή υπογείων υδάτων, η συγκέντρωση του οξυγόνου στο έδαφος υποδεικνύει την επικράτηση αερόβιων ή αναερόβιων συνθηκών και ως εκ τούτου παρέχει μια πρώτη εκτίμηση των διεργασιών και αντιδράσεων που είναι δυνατόν να λαμβάνουν χώρα υπό τις εκάστοτε συνθήκες. Συνήθως, η συγκέντρωση του οξυγόνου στον εδαφικό αέρα κυμαίνεται στα ατμοσφαιρικά επίπεδα στα ανώτερα στρώματα του εδάφους και μπορεί να ελαττώνεται καθώς αυξάνεται το βάθος.

Στην περίπτωση που εφαρμόζεται κάποια μέθοδος εξυγίανσης και συγκεκριμένα διοχέτευση αέρα στο υπέδαφος, η παρατήρηση τυχόν αυξήσεων της περιεκτικότητας του εδαφικού αέρα σε οξυγόνο είναι δυνατόν να υποδείξει τις περιοχές επιρροής της μεθόδου. Για παράδειγμα, κατά την εφαρμογή της τεχνολογίας air sparging, η περιοχή γύρω από το πηγάδι air sparging όπου θα παρατηρηθεί αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου σημαίνει ότι βρίσκεται μέσα στη ζώνη επιρροής του. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να αποκτηθεί μια πολύ αντιπροσωπευτική εικόνα της κατανομής και της διασποράς του διοχετευόμενου αέρα.

Σε ένα δεύτερο επίπεδο, έπειτα από εκτεταμένη διοχέτευση αέρα στο υπέδαφος η συγκέντρωση του οξυγόνου στον εδαφικό αέρα μπορεί να αποτελέσει δείκτη των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα σε αυτόν. Για παράδειγμα, όταν στο υπέδαφος πραγματοποιείται αποικοδόμηση οργανικών ρυπαντών από μικροοργανισμούς η συγκέντρωση του οξυγόνου αναμένεται να μειωθεί, καθώς μέρος αυτού θα καταναλωθεί από τους μικροοργανισμούς. Φυσικά σε αυτό το σημείο θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή δεδομένου ότι πολλές διεργασίες είναι δυνατόν να προκαλέσουν μείωση της συγκέντρωσης του οξυγόνου (π.χ. νιτροποίηση) και επομένως πριν την απόδοση της μείωσης αυτής σε συγκεκριμένες διαδικασίες – φαινόμενα θα πρέπει να εξεταστούν κι άλλοι δείκτες (π.χ. συγκέντρωση CO₂).

Η συγκέντρωση του εδαφικού αέρα σε οξυγόνο μπορεί να μετρηθεί είτε σε mg/L είτε ως εκατοστιαίο ποσοστό (%O₂).

Διοξείδιο του άνθρακα

Το διοξείδιο του άνθρακα που περιέχεται στον εδαφικό αέρα προέρχεται κυρίως από την ατμόσφαιρα, από τη βιοαποικοδόμηση υδρογονανθράκων στο έδαφος και από την αποσύνθεση πετρωμάτων που περιέχουν ανθρακικά άλατα (www.denix.osd.mil). Σε συνδυασμό με τη συγκέντρωση του οξυγόνου, η περιεκτικότητα του εδαφικού αέρα σε διοξείδιο του άνθρακα υποδεικνύει τη διεξαγωγή αερόβιας αποικοδόμησης οργανικών συστατικών από μικροοργανισμούς. Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι σε περιοχές με αυξημένη μικροβιακή δραστηριότητα και αποικοδόμηση υδρογονανθράκων λαμβάνει χώρα μείωση της συγκέντρωσης του οξυγόνου και παράλληλη αύξηση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα. Γενικότερα, ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του οξυγόνου, του διοξειδίου του άνθρακα αλλά και των εύφλεκτων υδρογονανθράκων στον εδαφικό αέρα είναι μια σημαντική παράμετρος κατά την εκτίμηση της έκτασης ενός πλουμίου προϊόντος ελεύθερης φάσης ή της ρύπανσης από πετρελαϊκούς ρυπαντές γενικότερα.

Πτητικοί - εύφλεκτοι υδρογονάνθρακες

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η παρουσία πτητικών υδρογονανθράκων ή γενικότερα ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (TPH) στον εδαφικό αέρα υποδηλώνει τη ρύπανση του εδάφους και πιθανότατα και του υπόγειου υδροφορέα από πετρελαιοειδή. Επίσης, η συγκέντρωσή τους αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα, καθώς σχετίζεται άμεσα με τον υπάρχοντα κίνδυνο επικράτησης εύφλεκτων συνθηκών ή έκρηξης. Οι μετρούμενες συγκεντρώσεις TPH στον εδαφικό αέρα πρέπει να καταγράφονται συχνά και να συγκρίνονται με τα όρια αναφλεξιμότητας αυτών, προκειμένου να αποτραπεί οποιοδήποτε ενδεχόμενο έκρηξης ή ατυχήματος γενικότερα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

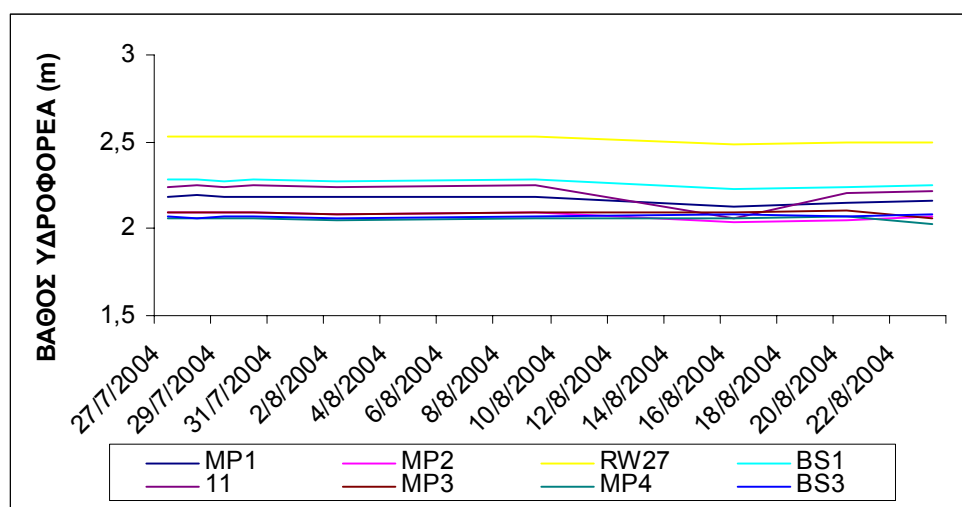
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια τόσο της δοκιμαστικής, όσο και της κανονικής λειτουργίας του συστήματος. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα δεδομένα αυτά σχετίζονται με κάποιες ποιοτικές παραμέτρους του υπόγειου νερού και του εδαφικού αέρα που βρίσκονταν υπό συνεχή παρακολούθηση καθ' όλη τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου air sparging και σχετίζονται άμεσα με την απόδοσή της.

6.1. Δοκιμαστική λειτουργία

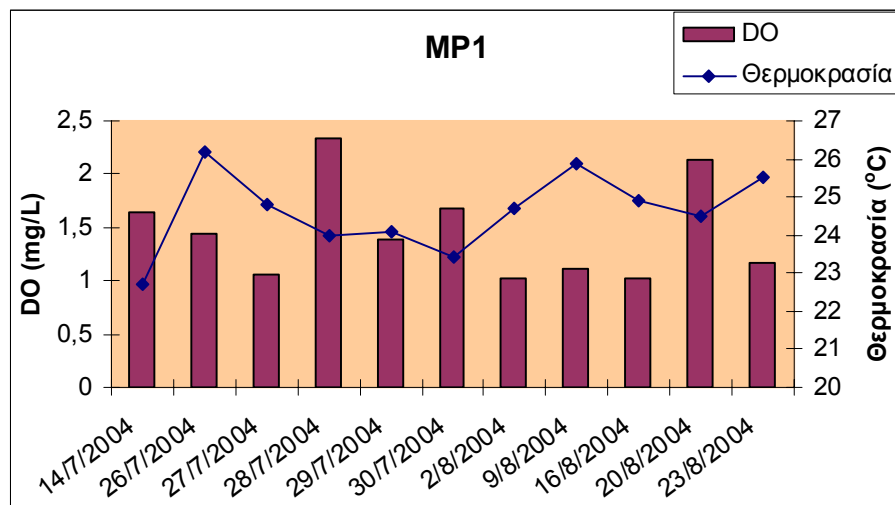
Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της δοκιμαστικής λειτουργίας του συστήματος air sparging υπενθυμίζεται ότι κατά τη διάρκεια αυτής διοχέτευση αέρα πραγματοποιούνταν μόνο σε ένα πηγάδι (MP1).

6.1.1. Υπόγειο νερό

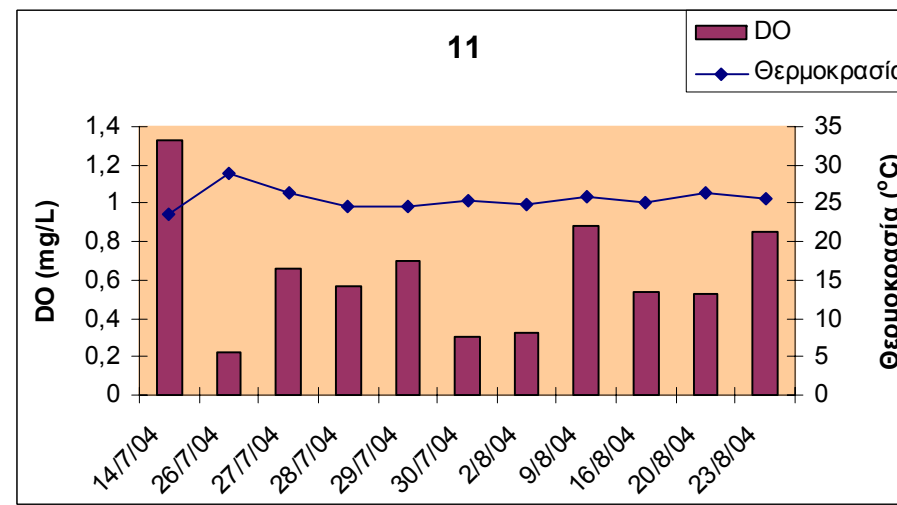
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό καθώς και του pH, του δυναμικού οξειδοαναγωγής, της αγωγιμότητας και της αλατότητας του υπόγειου νερού, που πραγματοποιούνταν σχεδόν καθημερινά σε πηγάδια της περιοχής air sparging.



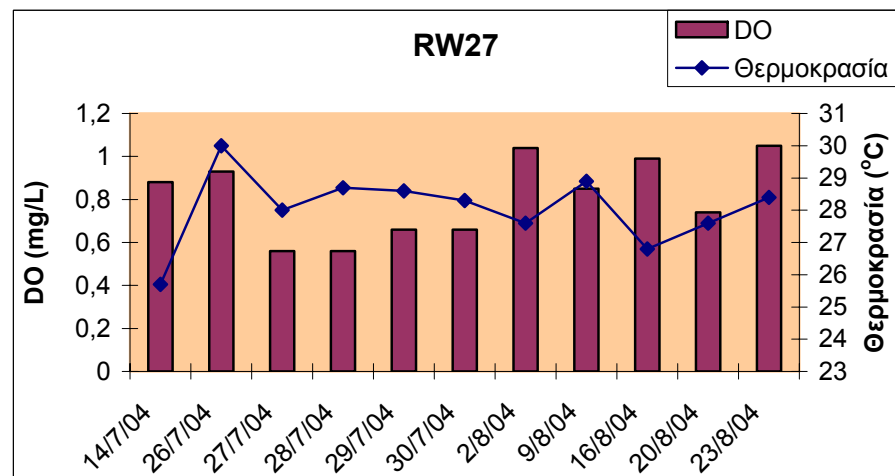
Διάγραμμα 7: Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα στα πηγάδια της περιοχής air sparging.



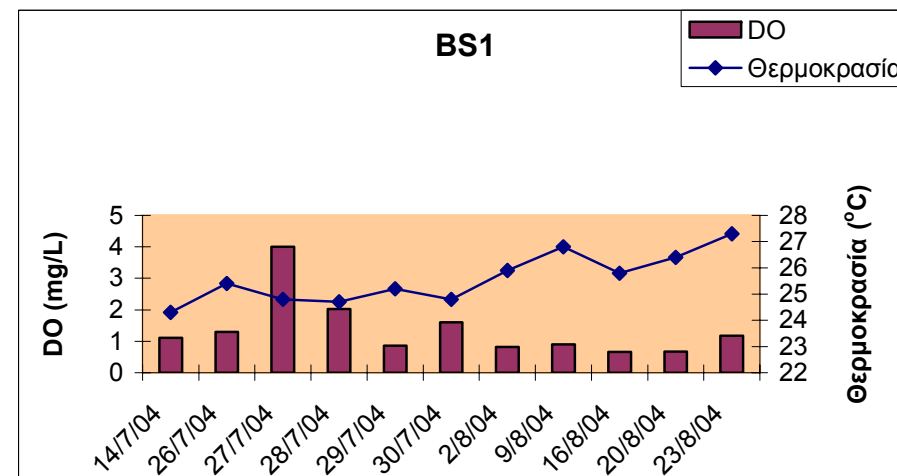
Διάγραμμα 8: Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό στο πηγάδι MP1.



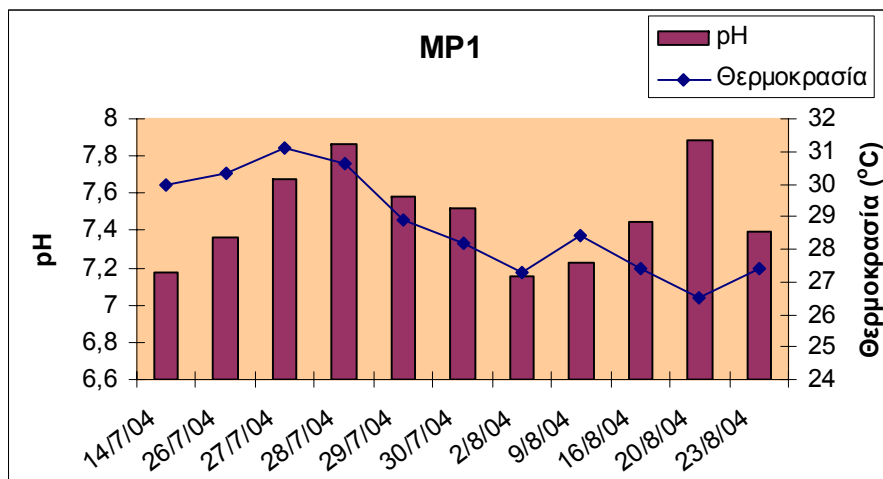
Διάγραμμα 9: Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό στο πηγάδι 11.



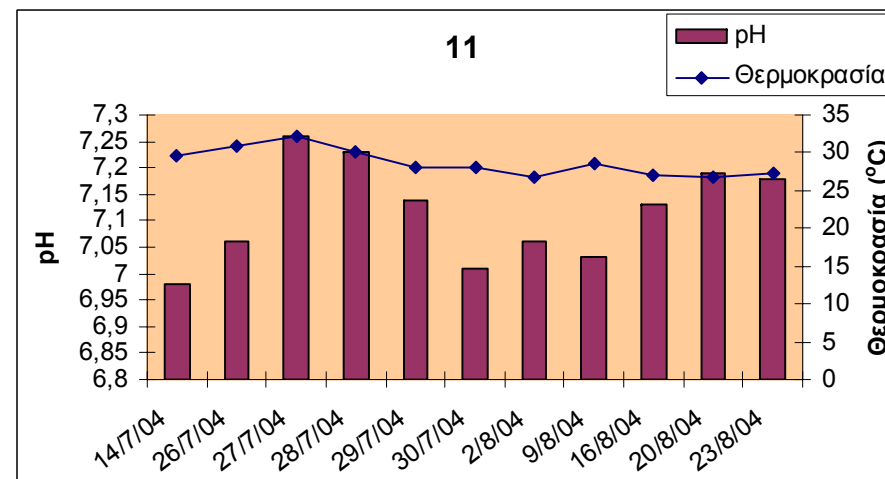
Διάγραμμα 10: Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό στο πηγάδι RW27.



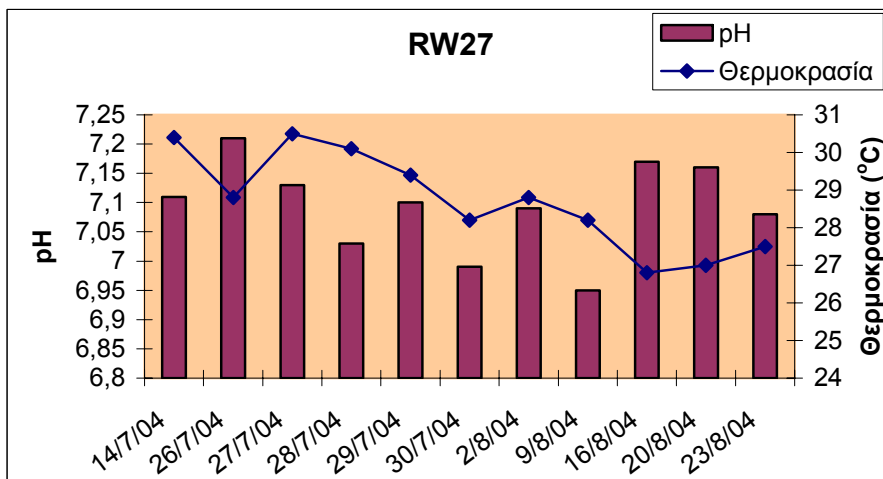
Διάγραμμα 11: Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό στο πηγάδι BS1.



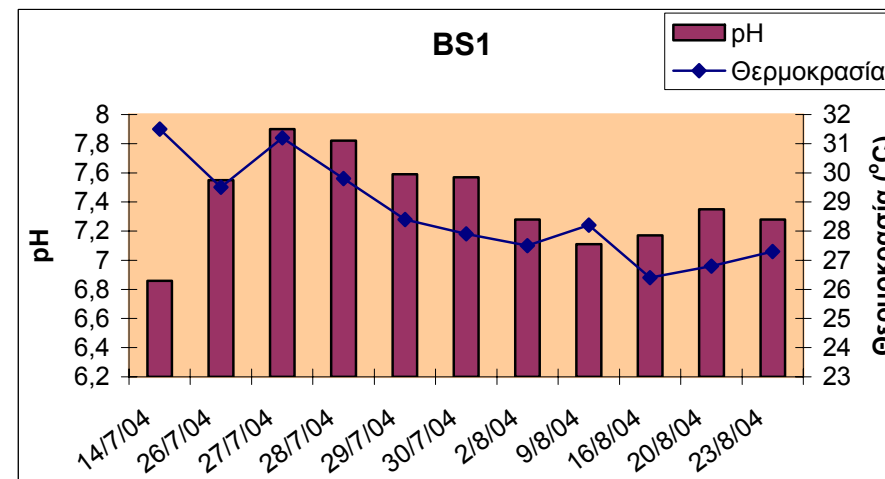
Διάγραμμα 12: Τιμές pH του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP1.



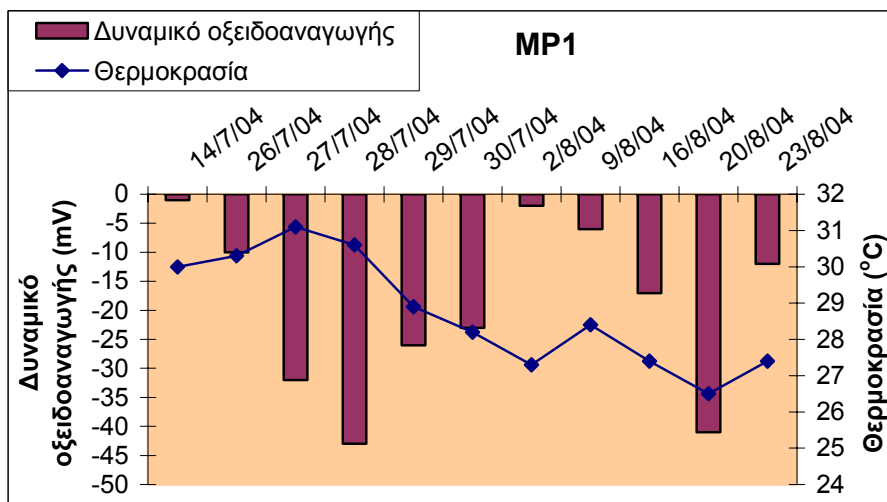
Διάγραμμα 13: Τιμές pH του υπόγειου νερού στο πηγάδι 11.



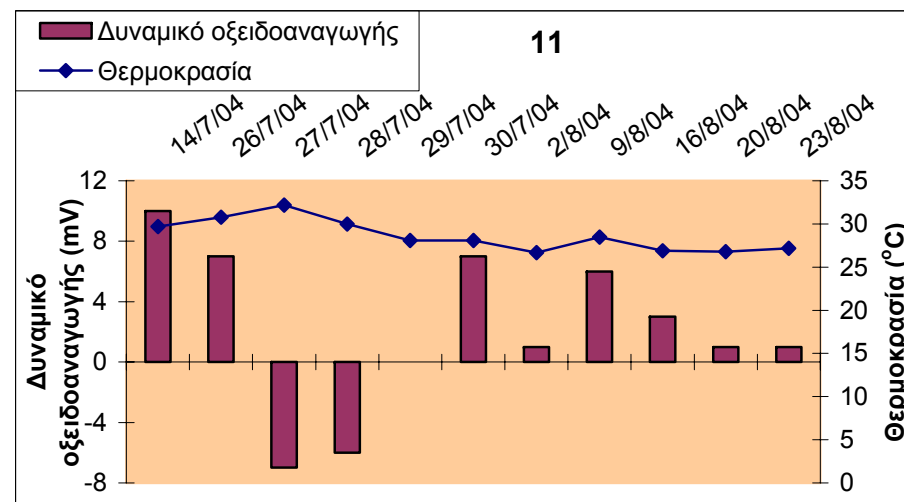
Διάγραμμα 14: Τιμές pH του υπόγειου νερού στο πηγάδι RW27.



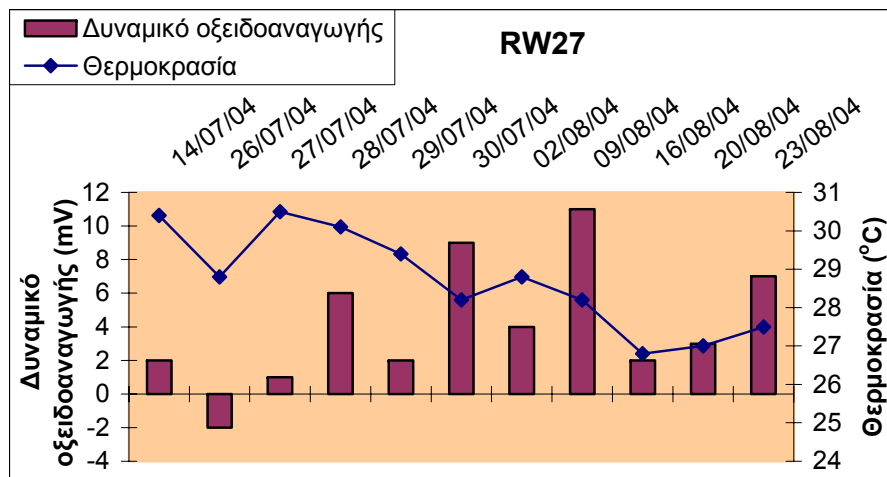
Διάγραμμα 15: Τιμές pH του υπόγειου νερού στο πηγάδι BS1.



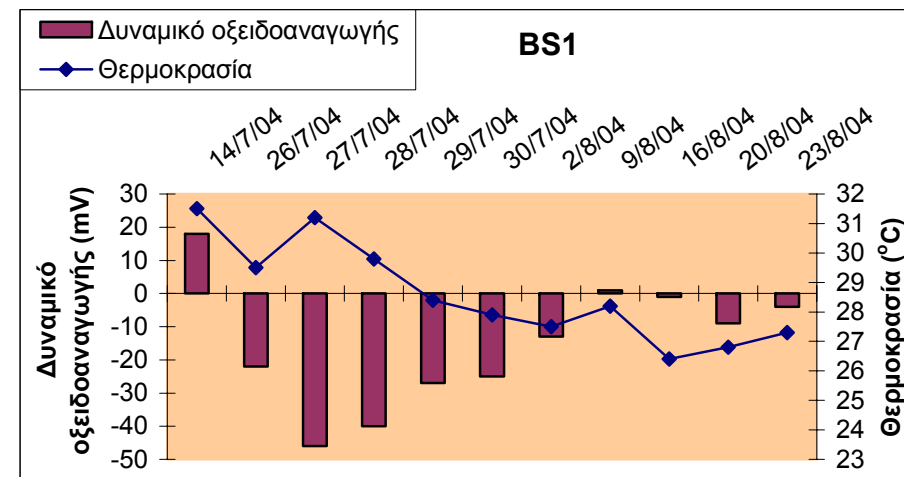
Διάγραμμα 16: Δυναμικό οξειδοαναγωγής του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP1.



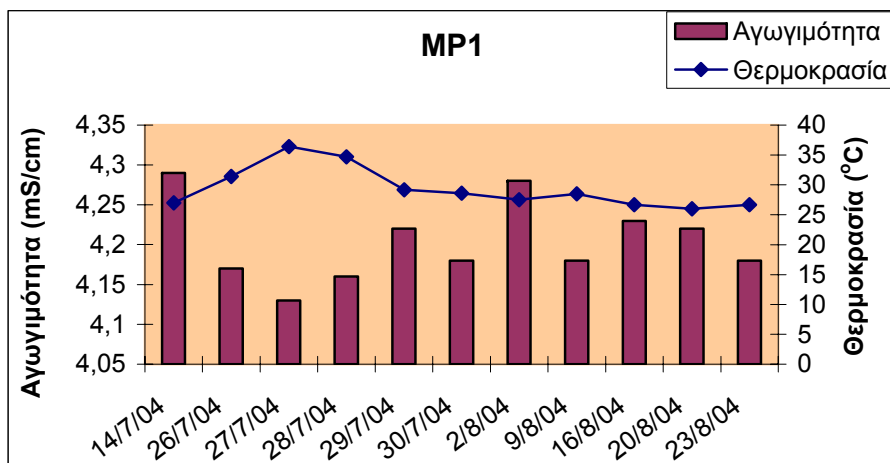
Διάγραμμα 17: Δυναμικό οξειδοαναγωγής του υπόγειου νερού στο πηγάδι 11.



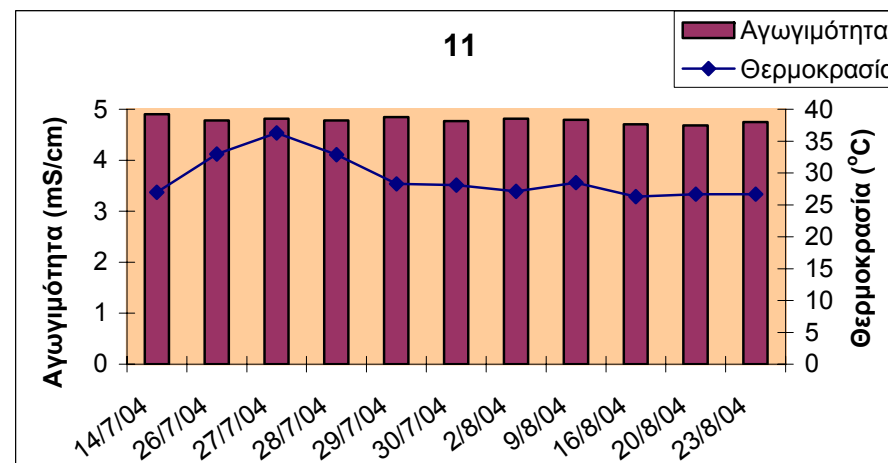
Διάγραμμα 18: Δυναμικό οξειδοαναγωγής του υπόγειου νερού στο πηγάδι RW27.



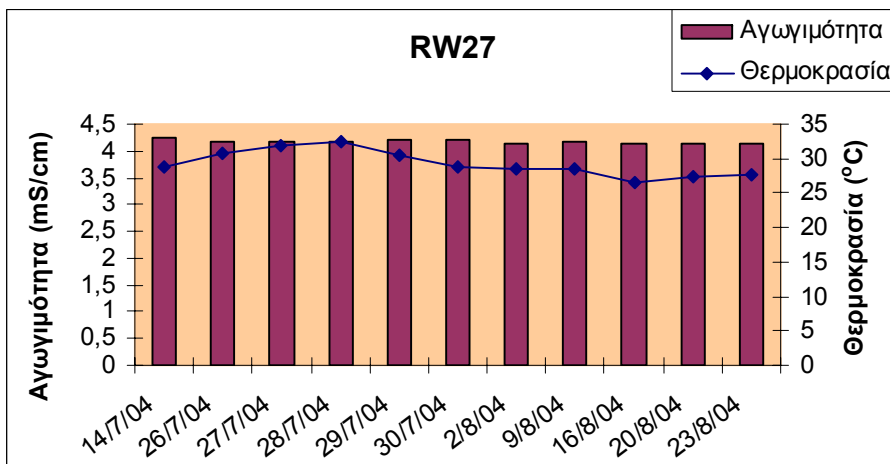
Διάγραμμα 19: Δυναμικό οξειδοαναγωγής του υπόγειου νερού στο πηγάδι BS1.



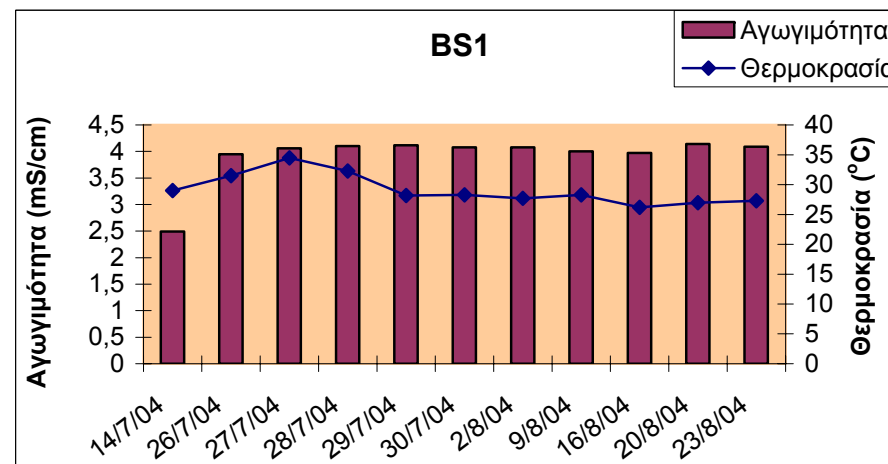
Διάγραμμα 20: Αγωγιμότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP1.



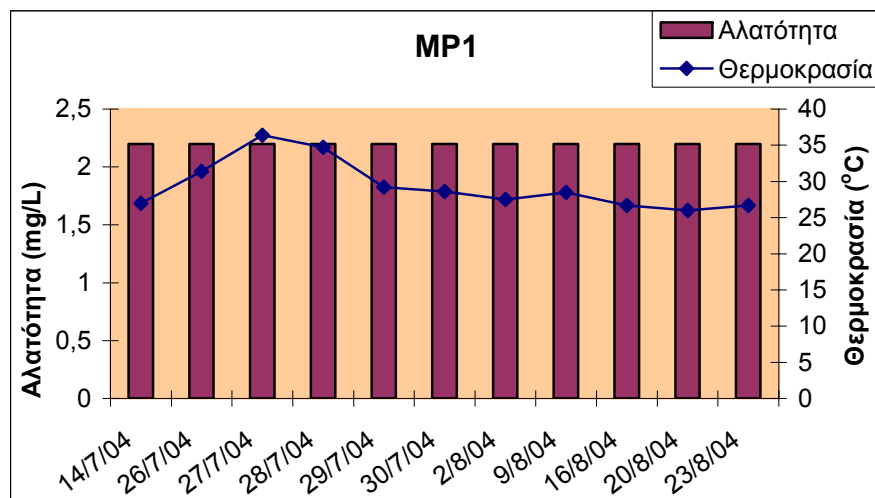
Διάγραμμα 21: Αγωγιμότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι 11.



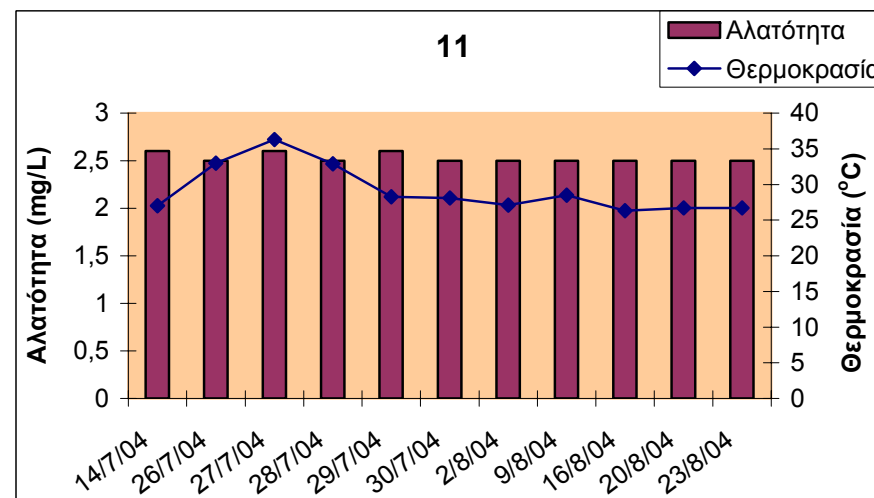
Διάγραμμα 22: Αγωγιμότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι RW27



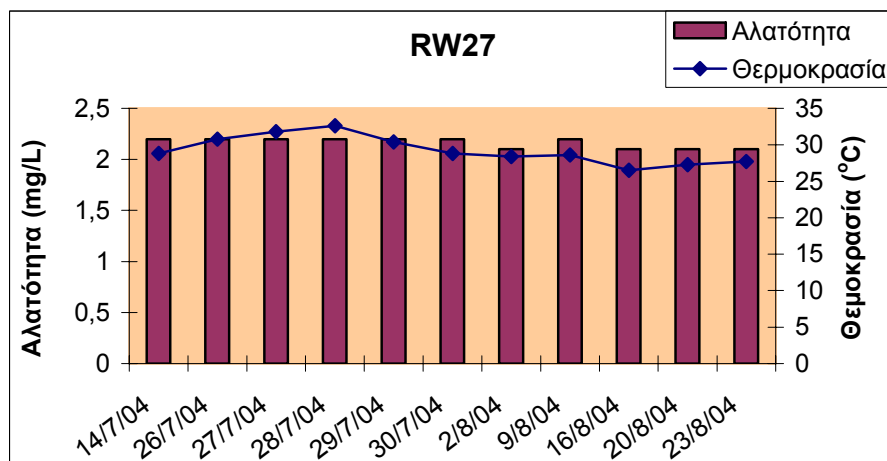
Διάγραμμα 23: Αγωγιμότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι BS1.



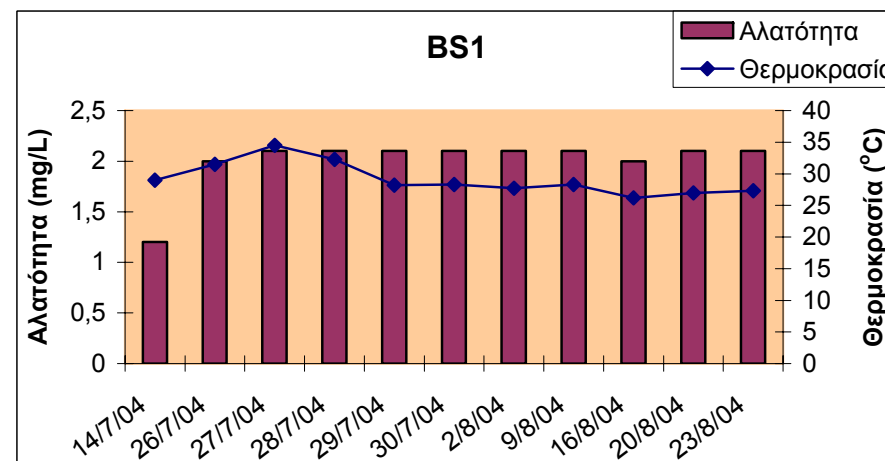
Διάγραμμα 24: Αλατότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP1.



Διάγραμμα 25: Αλατότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι 11.

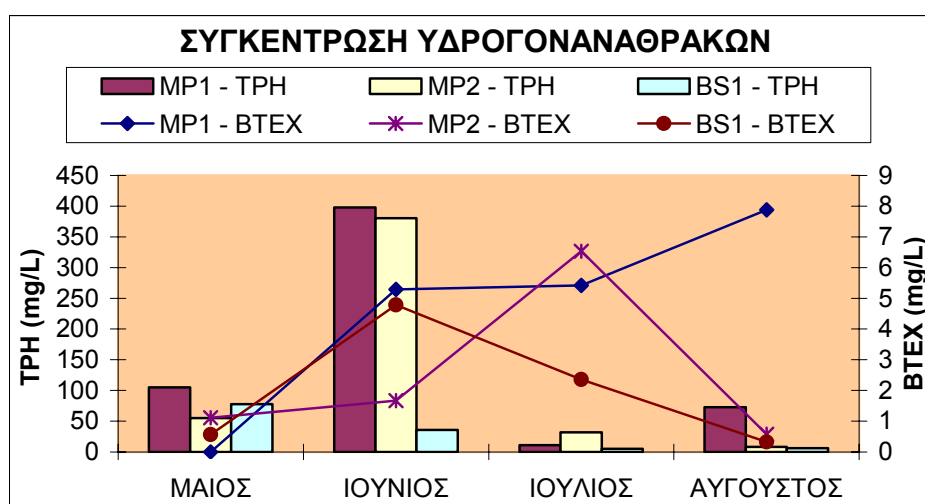


Διάγραμμα 26: Αλατότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι RW27.



Διάγραμμα 27: Αλατότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι BS1.

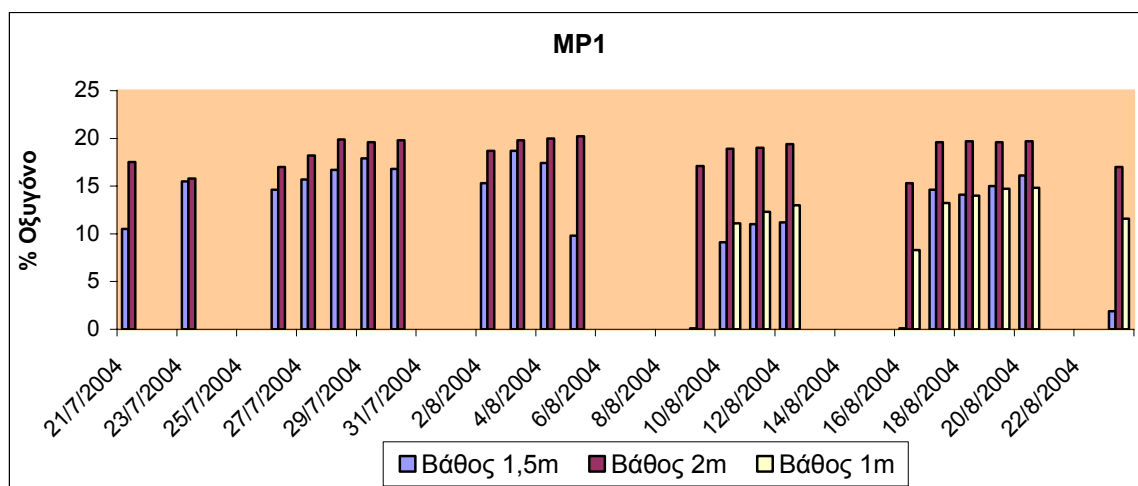
Στο τέλος της δοκιμαστικής λειτουργίας του συστήματος air sparging και παρόλο που ήταν αρκετά νωρίς για τη λήψη θετικών αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε ανάλυση δειγμάτων υπόγειου νερού ως προς τη συγκέντρωσή τους σε BTEX, TPH και MTBE. Όσον αφορά τα MTBE πραγματοποιήθηκε μόνο ποιοτικός προσδιορισμός, ο οποίος επιβεβαίωσε την ύπαρξή τους σε όλα τα δείγματα που ελήφθησαν από επιλεγμένα πηγάδια της περιοχής air sparging. Όσον αφορά τα BTEX και TPH τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στο διάγραμμα που ακολουθεί (Διάγραμμα 28) μαζί με αποτελέσματα παλαιότερων αναλύσεων.



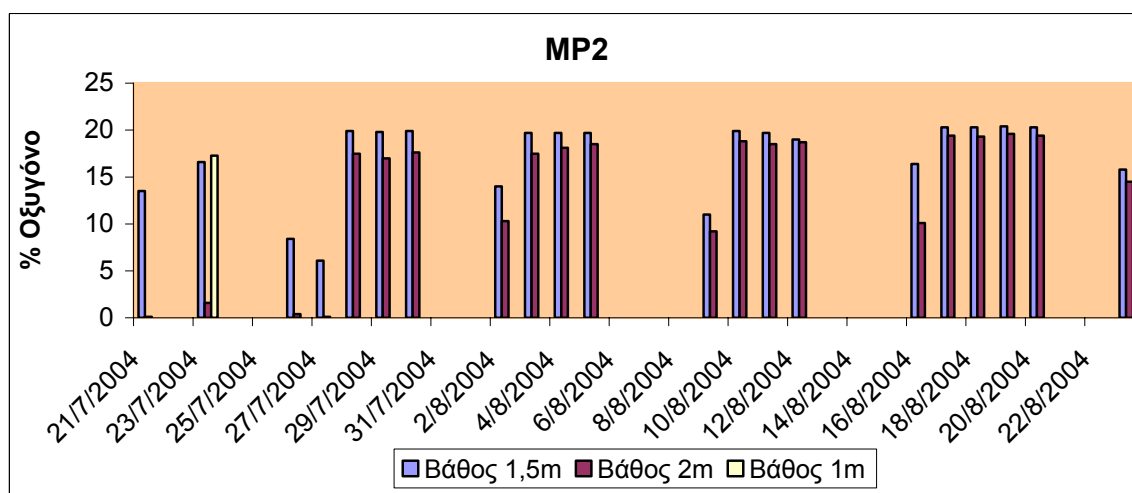
Διάγραμμα 28: Συγκεντρώσεις BTEX και TPH σε επιλεγμένα πηγάδια της περιοχής air sparging μετά το τέλος της δοκιμαστικής λειτουργίας του συστήματος (Aivalioti M. et al., 2004).

6.1.2. Εδαφικός αέρας

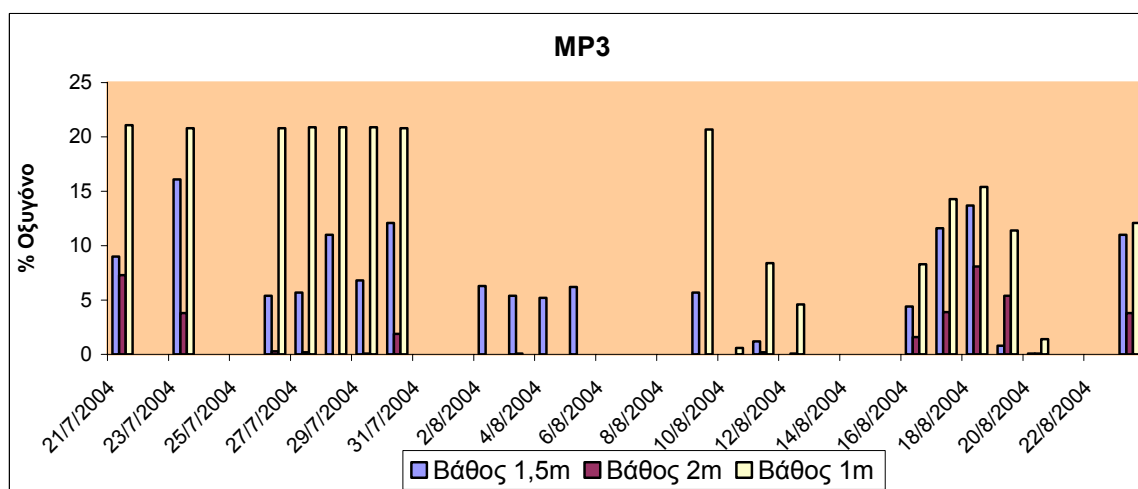
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις της περιεκτικότητας του εδαφικού αέρα σε οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογονάνθρακες που πραγματοποιήθηκαν σε πηγάδια δειγματοληψίας εδαφικού αέρα της περιοχής air sparging.

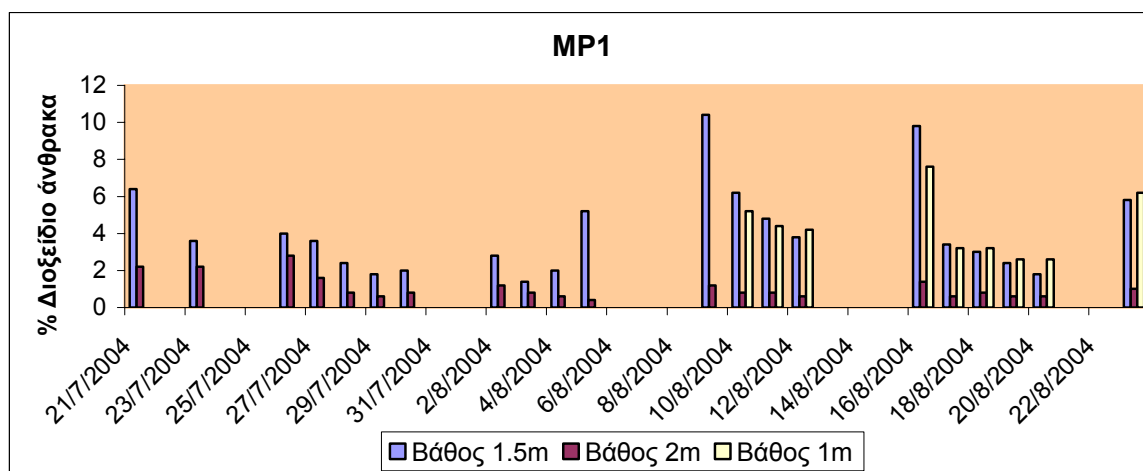


Διάγραμμα 29: Περιεκτικότητα εδαφικού αέρα σε οξυγόνο στο πηγάδι MP1.

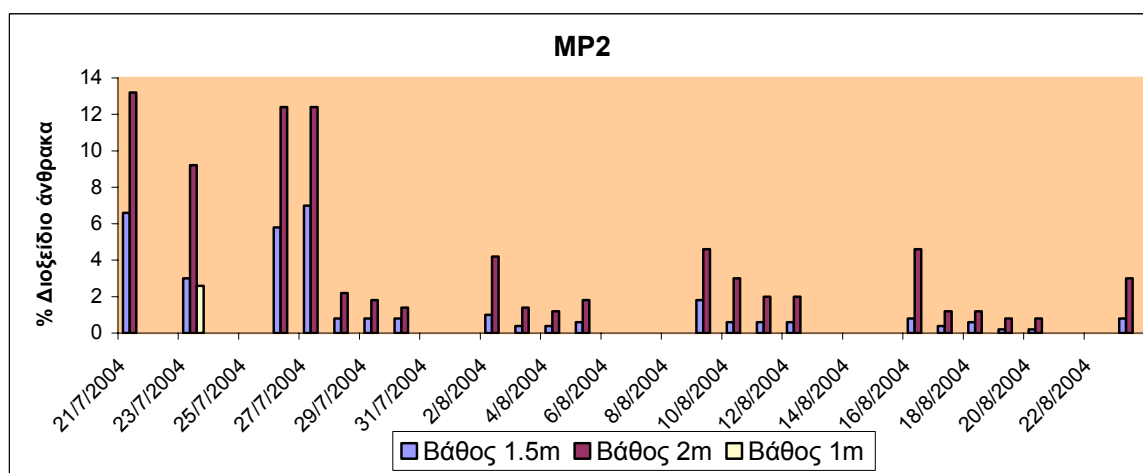


Διάγραμμα 30: Περιεκτικότητα εδαφικού αέρα σε οξυγόνο στο πηγάδι MP2.

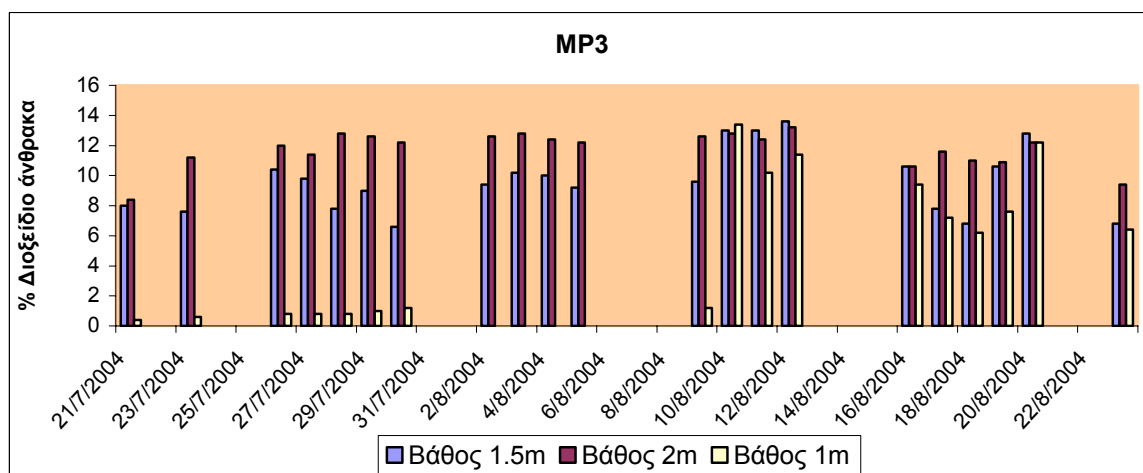




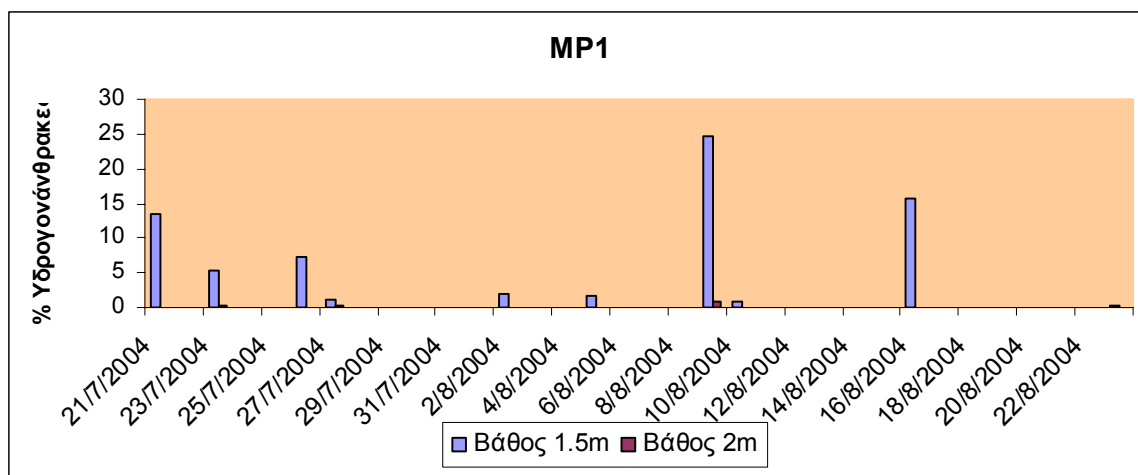
Διάγραμμα 32: Περιεκτικότητα εδαφικού αέρα σε διοξείδιο του άνθρακα στο πηγάδι MP1.



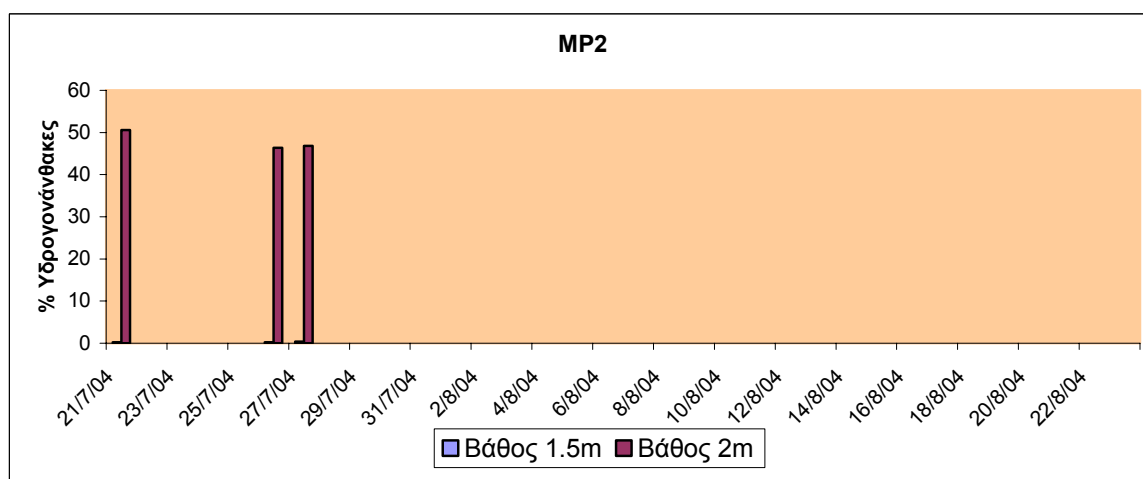
Διάγραμμα 33: Περιεκτικότητα εδαφικού αέρα σε διοξείδιο του άνθρακα στο πηγάδι MP2.



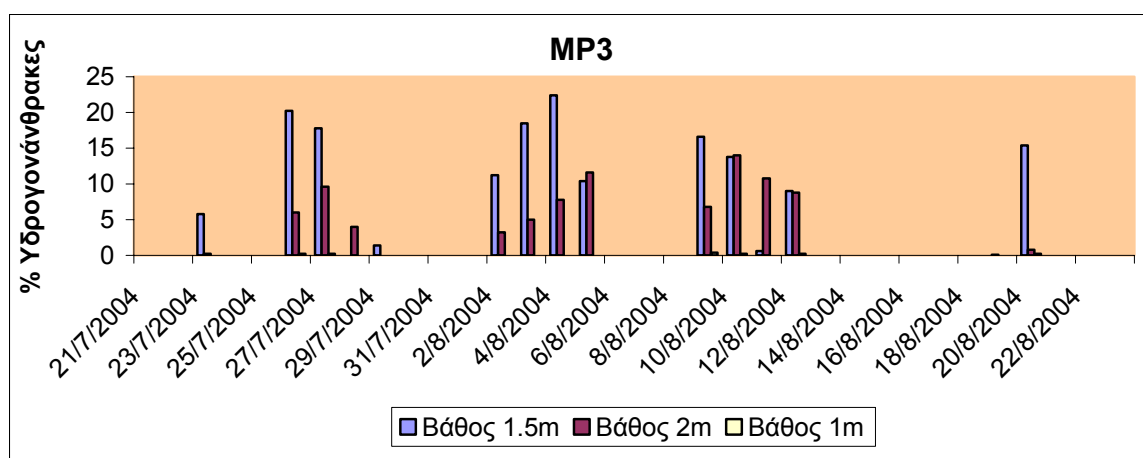
Διάγραμμα 34: Περιεκτικότητα εδαφικού αέρα σε διοξείδιο του άνθρακα στο πηγάδι MP3.



Διάγραμμα 35: Περιεκτικότητα εδαφικού αέρα σε υδρογονάνθρακες στο πηγάδι MP1.



Διάγραμμα 36: Περιεκτικότητα εδαφικού αέρα σε υδρογονάνθρακες στο πηγάδι MP2.



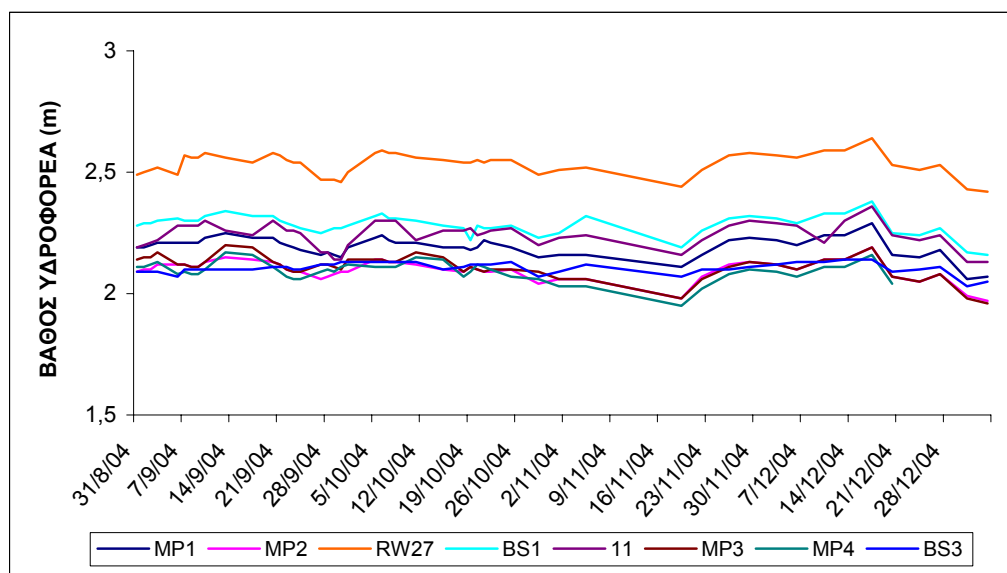
Διάγραμμα 37: Περιεκτικότητα εδαφικού αέρα σε υδρογονάνθρακες στο πηγάδι MP3.

6.2. Κανονική λειτουργία

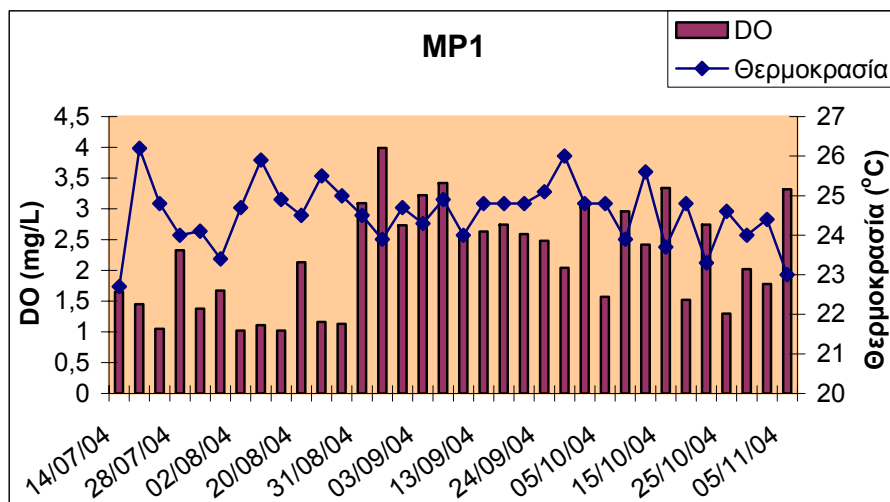
Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της κανονικής λειτουργίας του συστήματος air sparging υπενθυμίζεται ότι κατά τη διάρκεια αυτής διοχέτευση αέρα πραγματοποιούνταν σε πέντε πηγάδια (MP1, MP2, RW27, BS1, 11).

6.2.1. Υπόγειο νερό

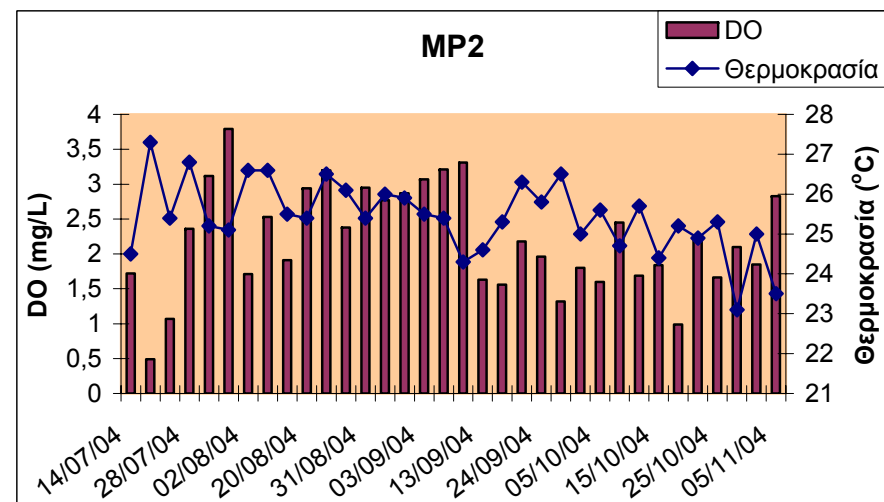
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό καθώς και του pH, του δυναμικού οξειδοαναγωγής, της αγωγιμότητας και της αλατότητας του υπόγειου νερού, που πραγματοποιούνταν σχεδόν καθημερινά σε πηγάδια της περιοχής air sparging.



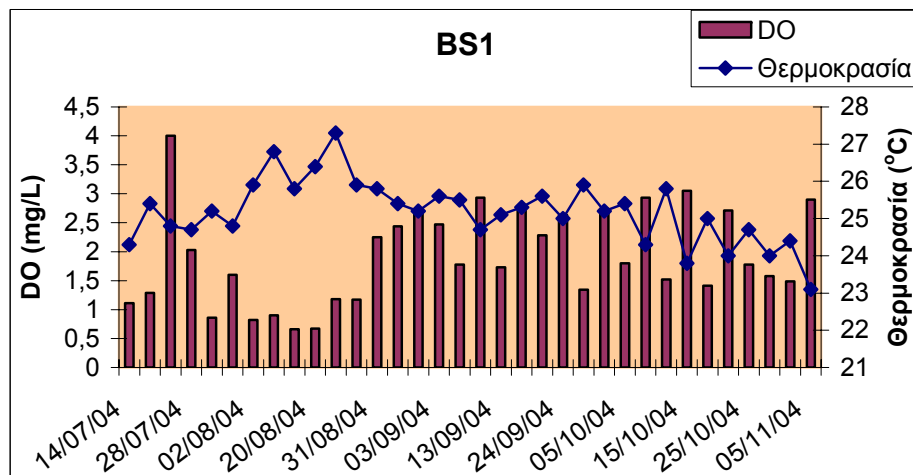
Διάγραμμα 38: Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα στα πηγάδια της περιοχής air sparging.



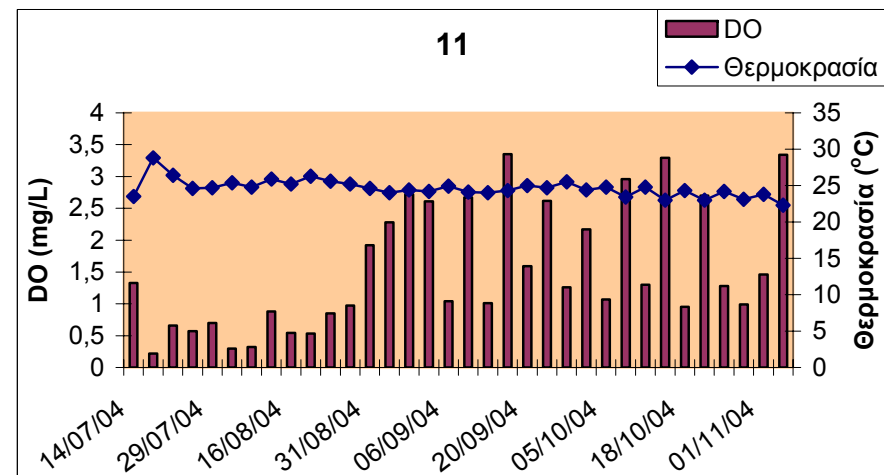
Διάγραμμα 39: Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό στο πηγάδι MP1.



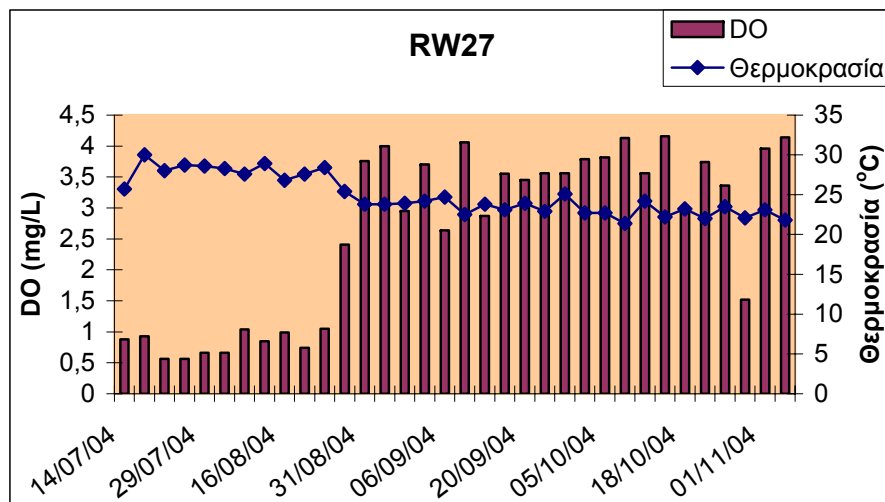
Διάγραμμα 40: Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό στο πηγάδι MP2.



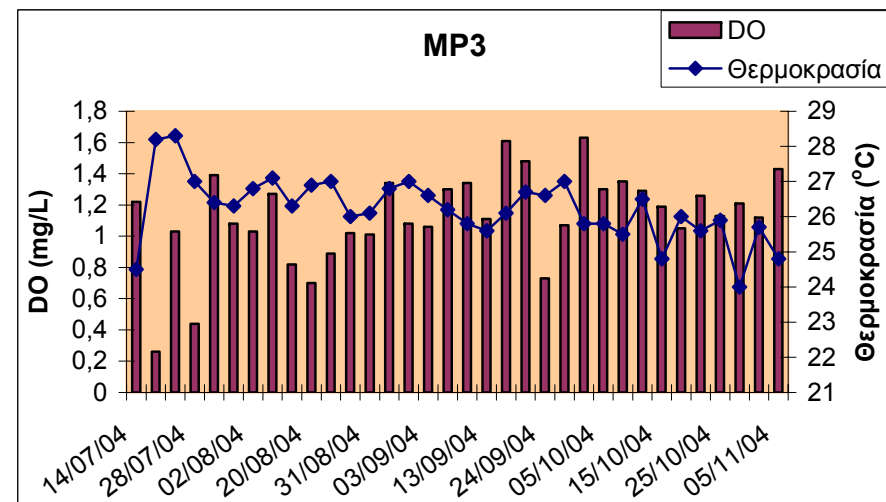
Διάγραμμα 41: Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό στο πηγάδι BS1.



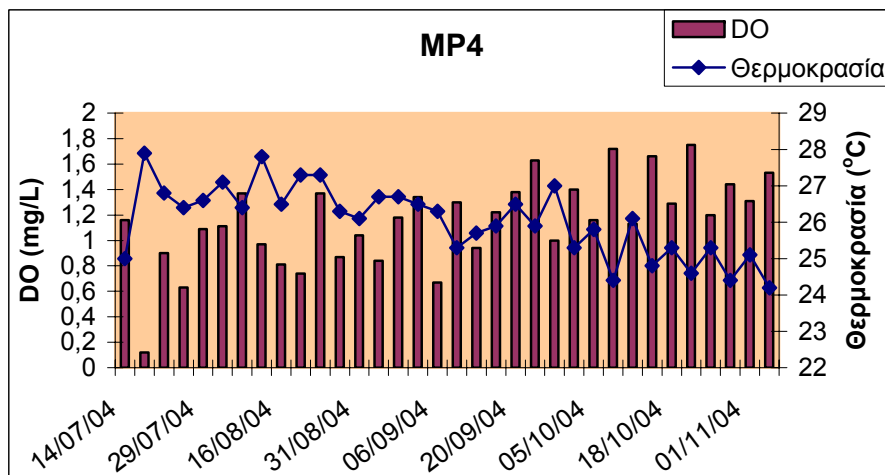
Διάγραμμα 42: Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό στο πηγάδι 11.



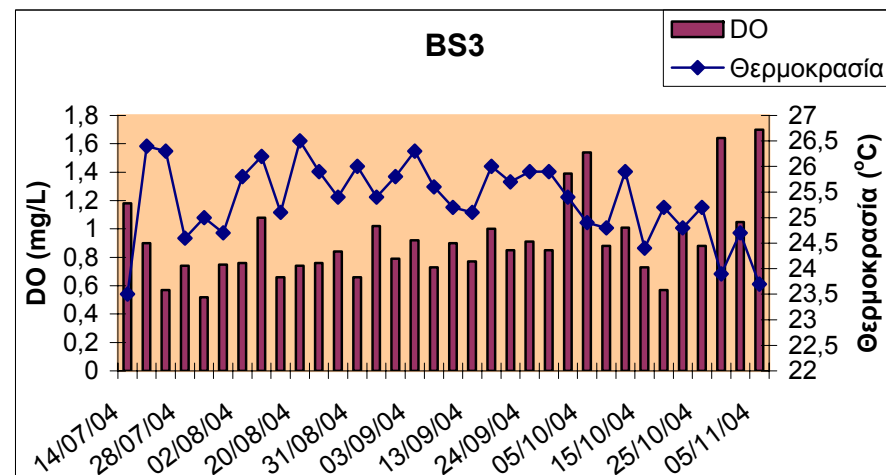
Διάγραμμα 43: Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό στο πηγάδι RW27.



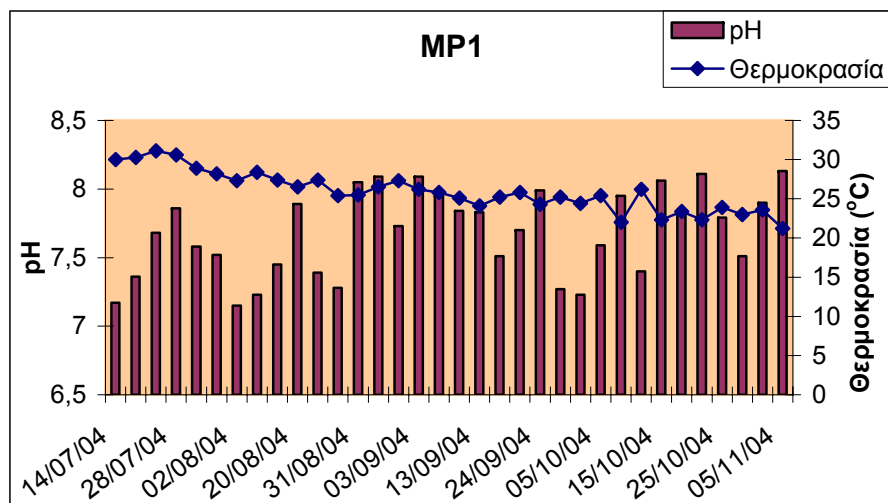
Διάγραμμα 44: Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό στο πηγάδι MP3.



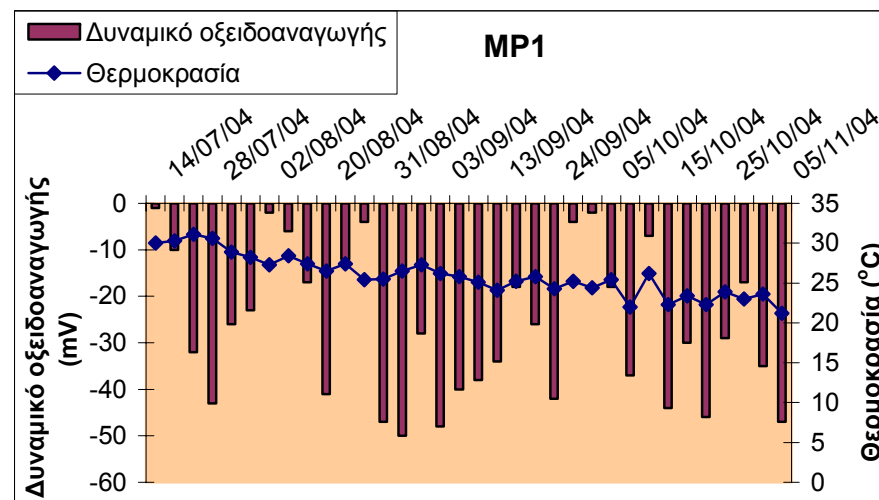
Διάγραμμα 45: Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό στο πηγάδι MP4.



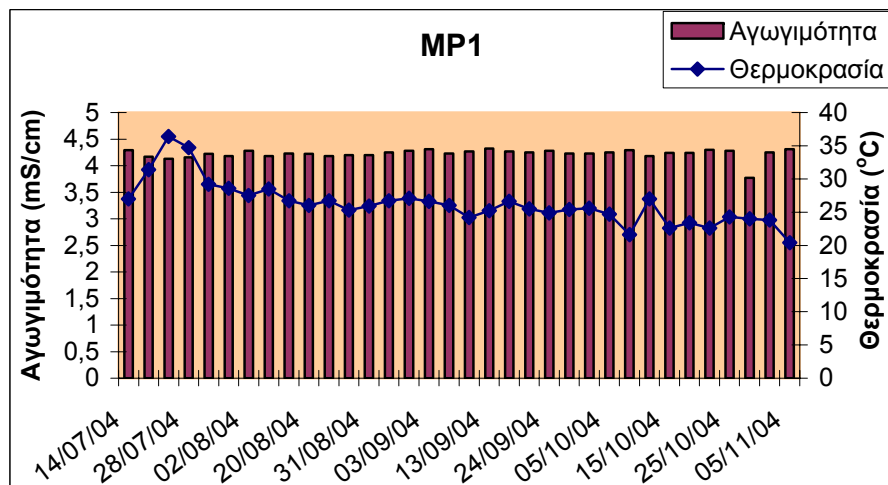
Διάγραμμα 46: Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό στο πηγάδι BS3.



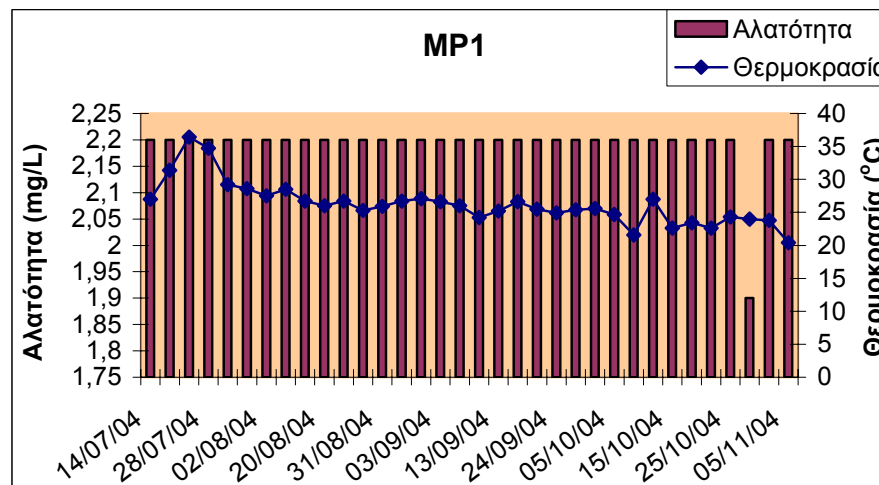
Διάγραμμα 47: Τιμές pH του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP2.



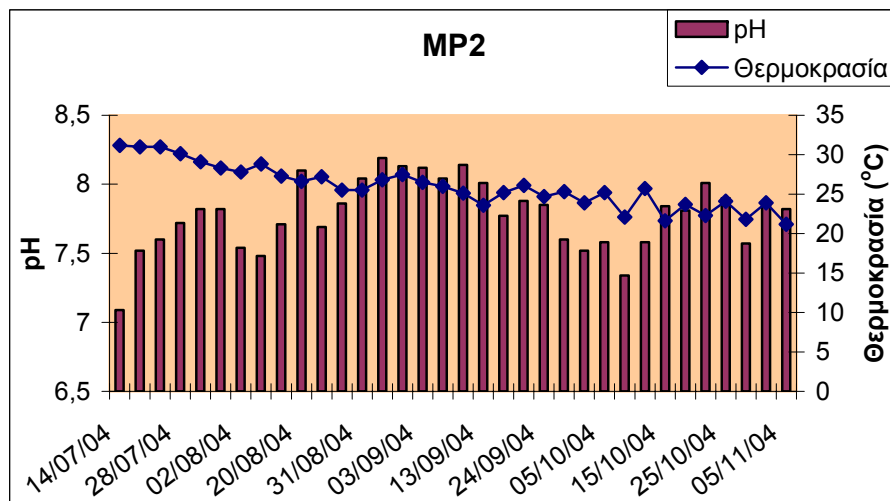
Διάγραμμα 48: Δυναμικό οξειδοαναγωγής του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP1.



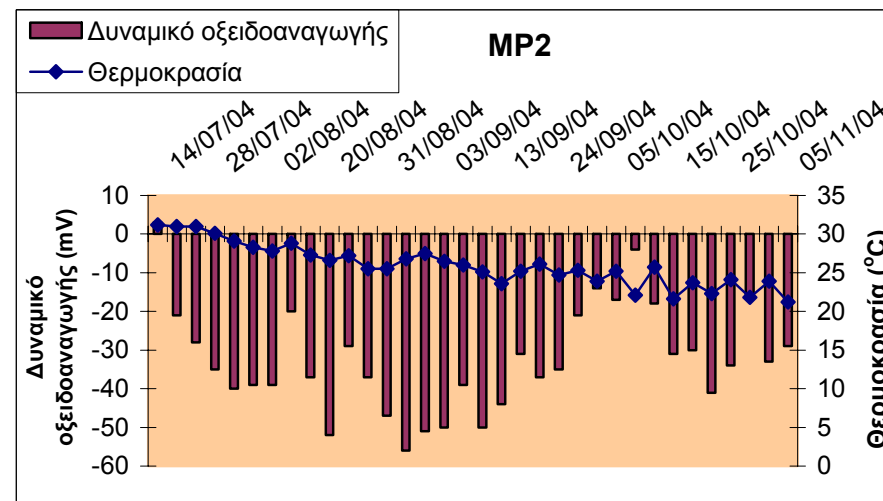
Διάγραμμα 49: Αγωγιμότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP1.



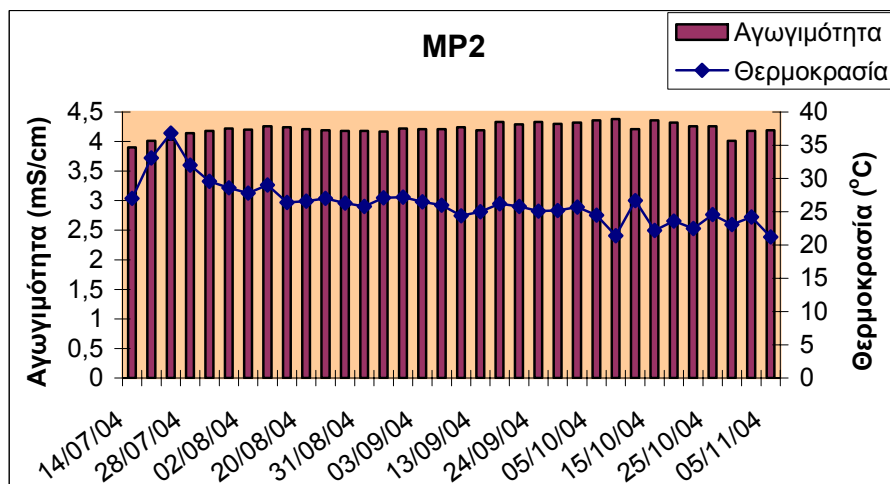
Διάγραμμα 50: Αλατότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP1.



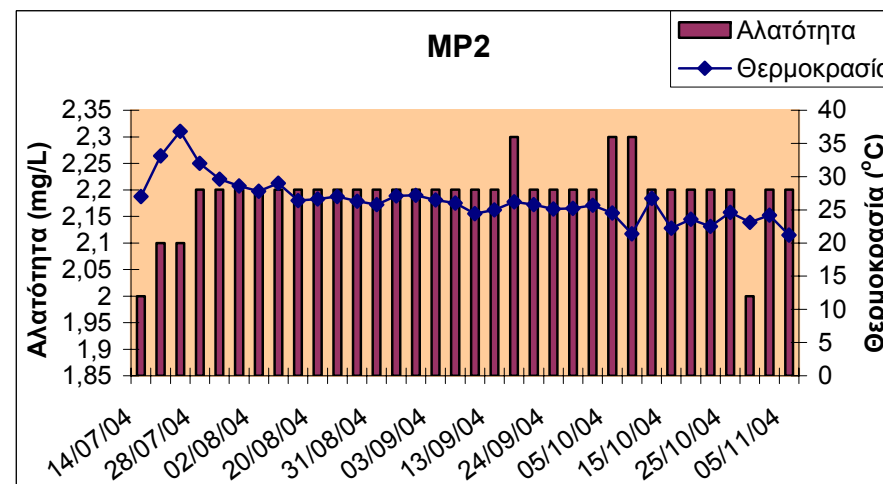
Διάγραμμα 51: Τιμές pH του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP2.



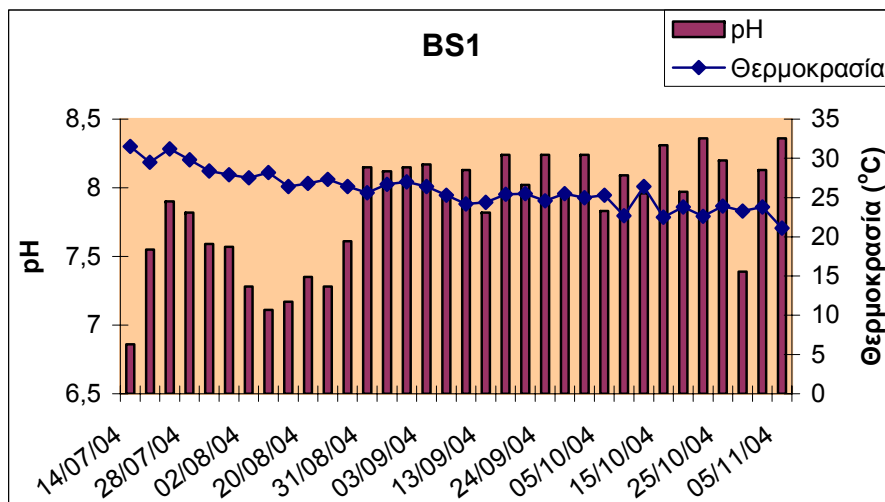
Διάγραμμα 52: Δυναμικό οξειδοαναγωγής του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP2.



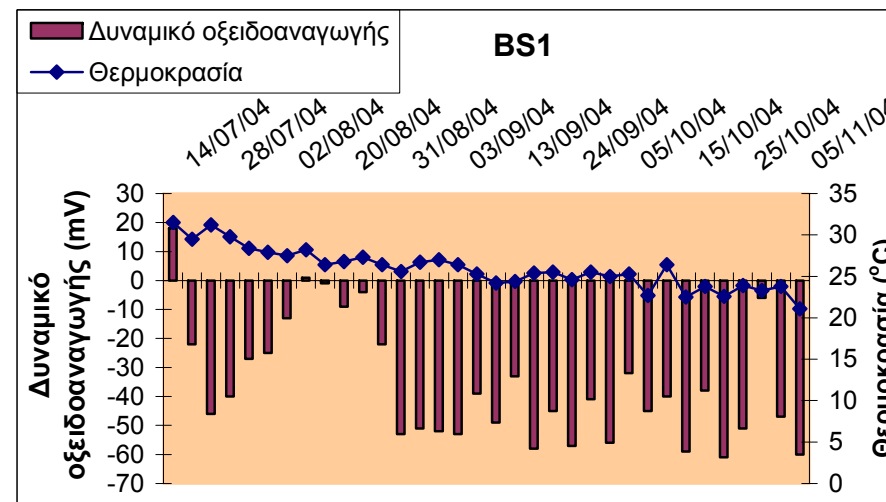
Διάγραμμα 53: Αγωγιμότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP2.



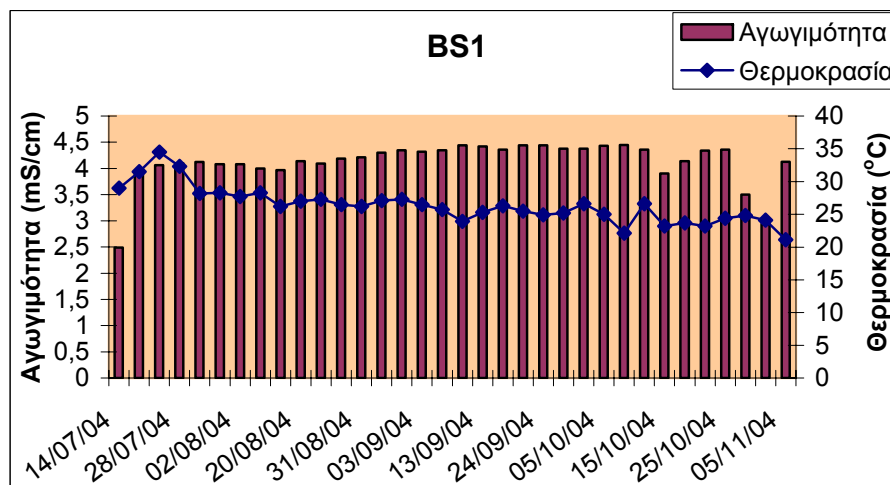
Διάγραμμα 54: Αλατότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP2.



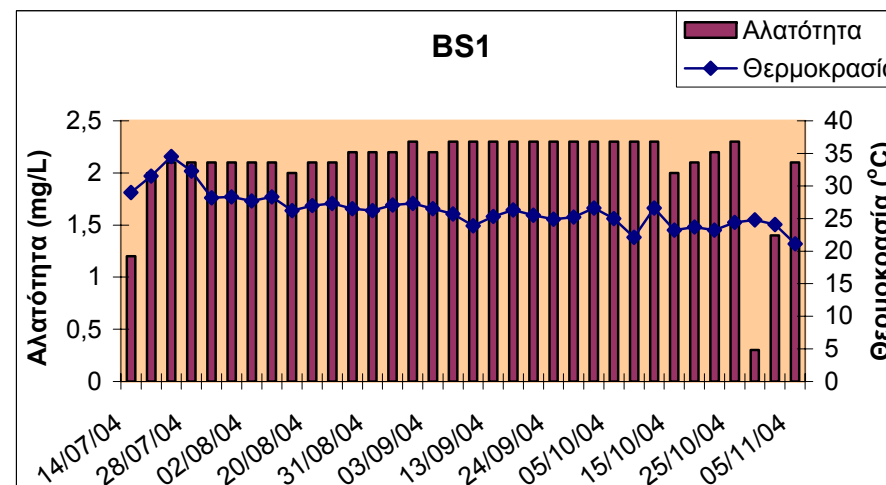
Διάγραμμα 55: Τιμές pH του υπόγειου νερού στο πηγάδι BS1.



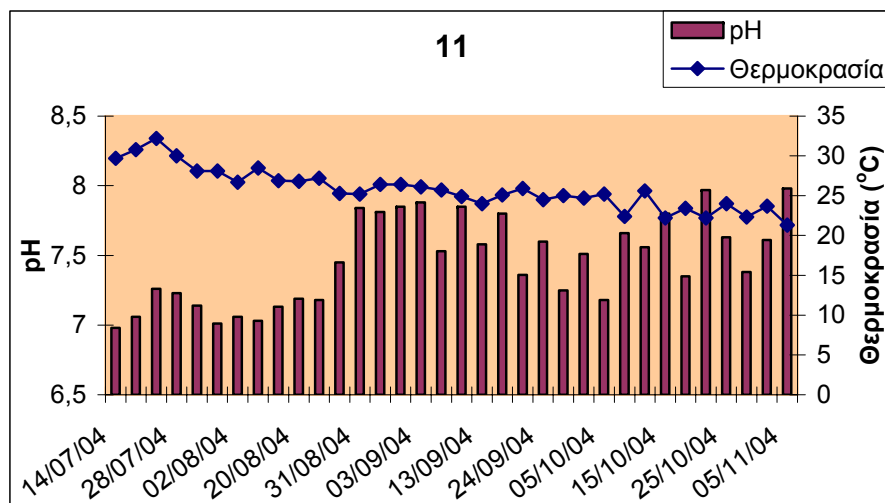
Διάγραμμα 56: Δυναμικό οξειδοαναγωγής του υπόγειου νερού στο πηγάδι BS1.



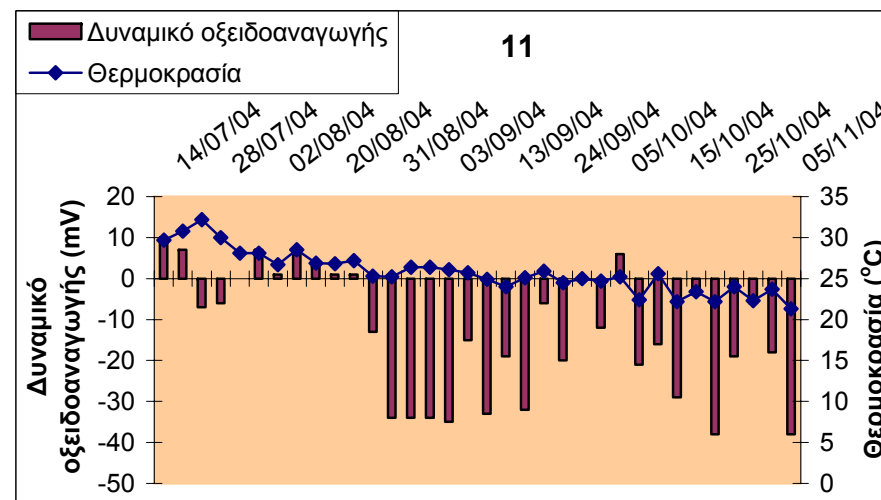
Διάγραμμα 57: Αγωγιμότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι BS1.



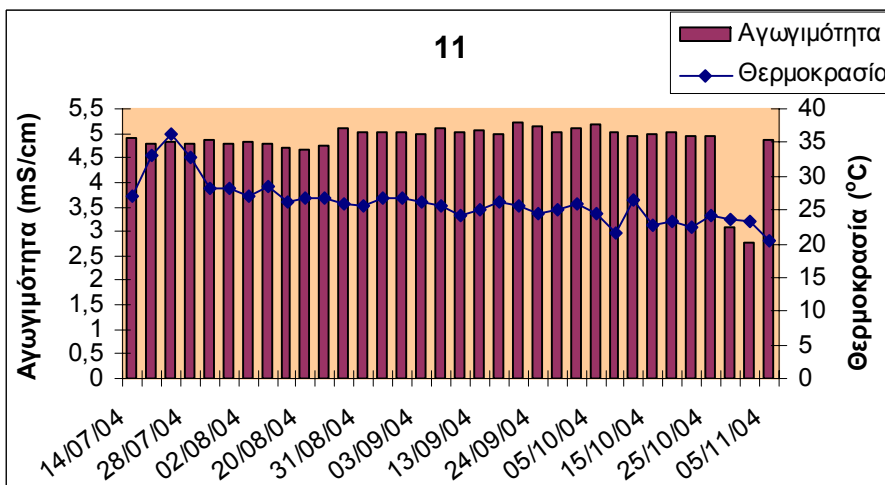
Διάγραμμα 58: Αλατότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι BS1.



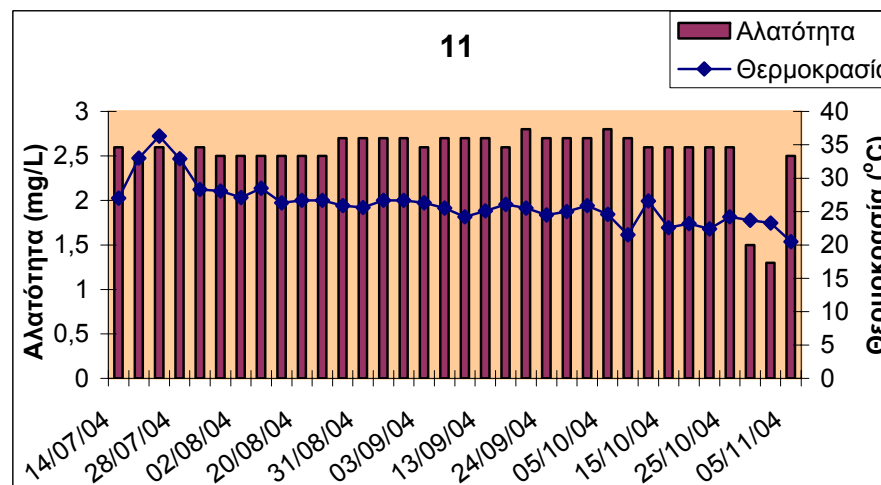
Διάγραμμα 59: Τιμές pH του υπόγειου νερού στο πηγάδι 11.



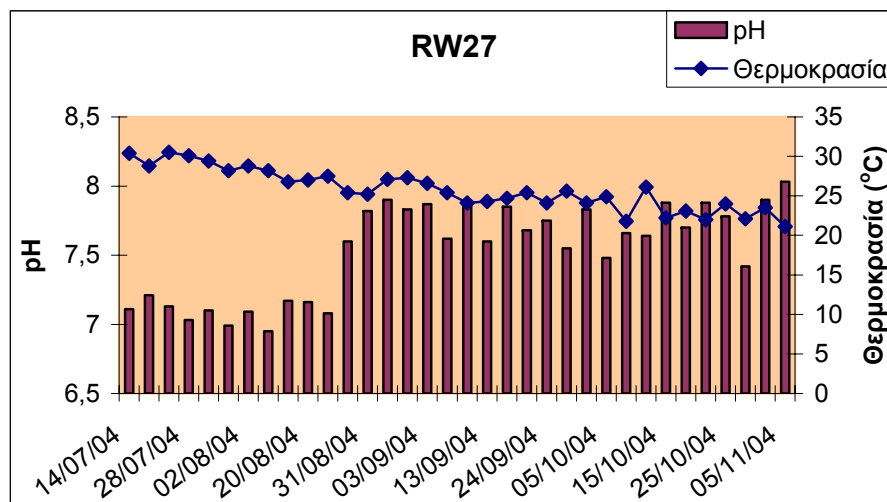
Διάγραμμα 60: Δυναμικό οξειδοαναγωγής του υπόγειου νερού στο πηγάδι 11.



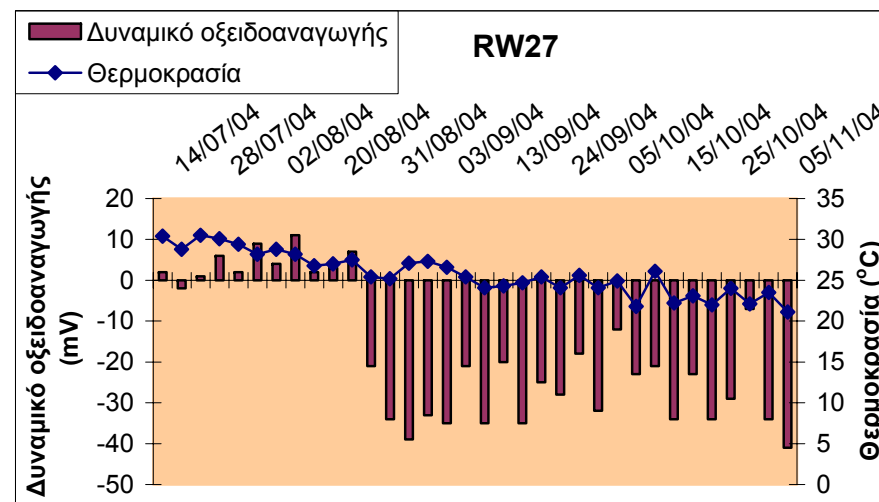
Διάγραμμα 61: Αγωγιμότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι 11.



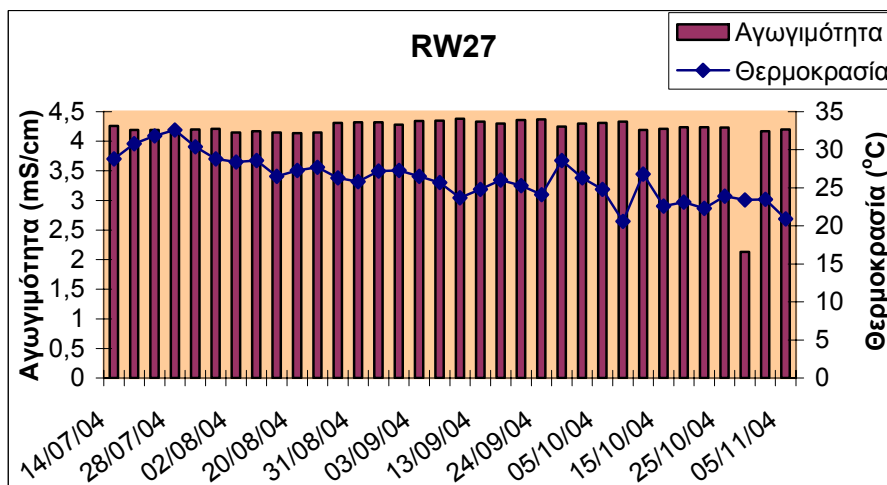
Διάγραμμα 62: Αλατότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι 11.



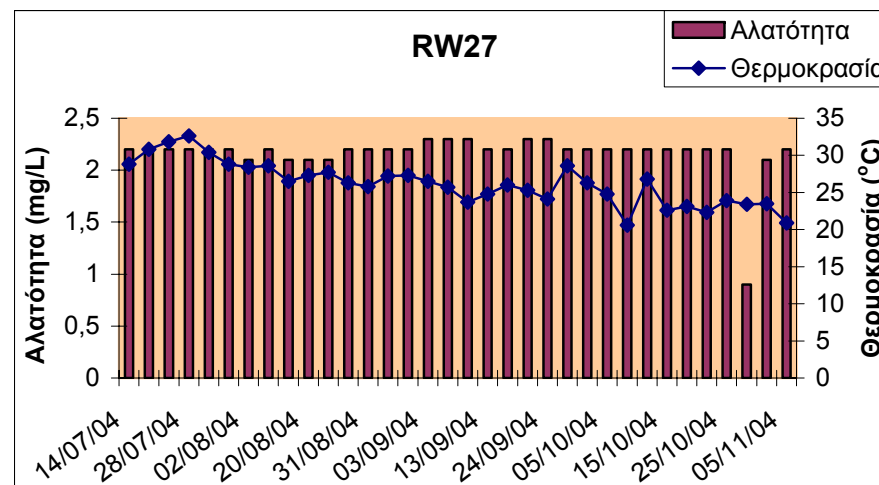
Διάγραμμα 63: Τιμές pH του υπόγειου νερού στο πηγάδι RW27.



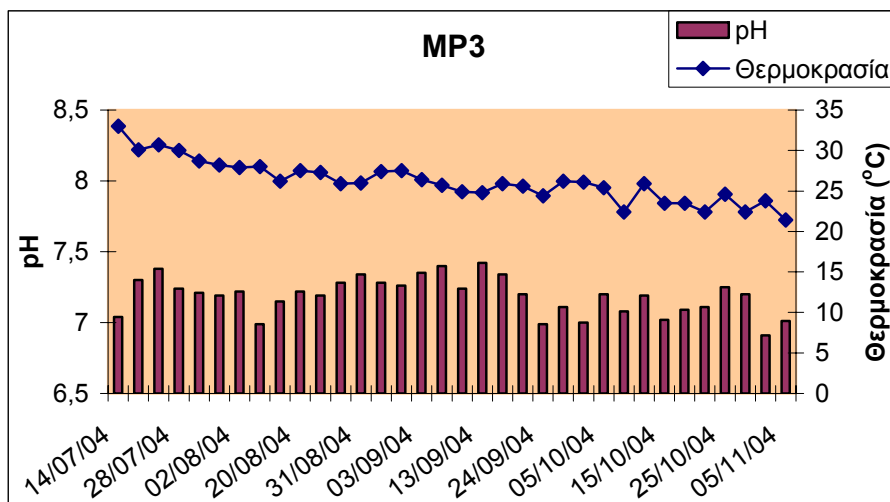
Διάγραμμα 64: Δυναμικό οξειδοαναγωγής του υπόγειου νερού στο πηγάδι RW27.



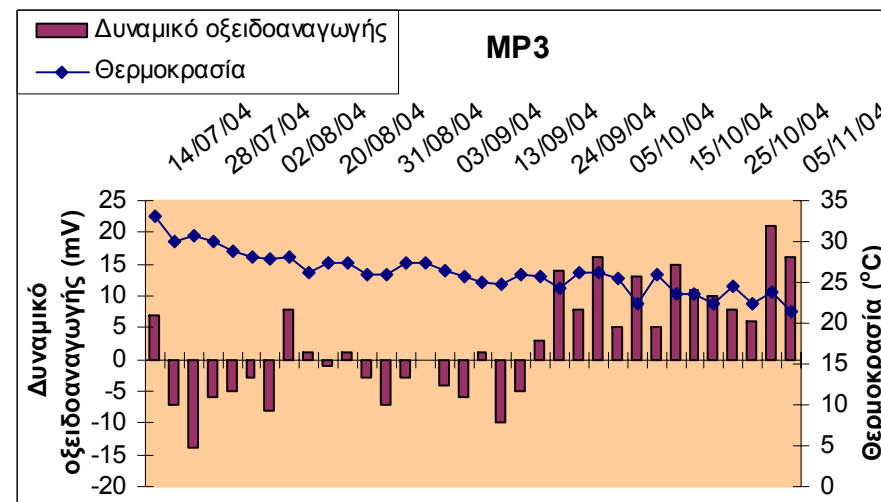
Διάγραμμα 65: Αγωγιμότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι RW27.



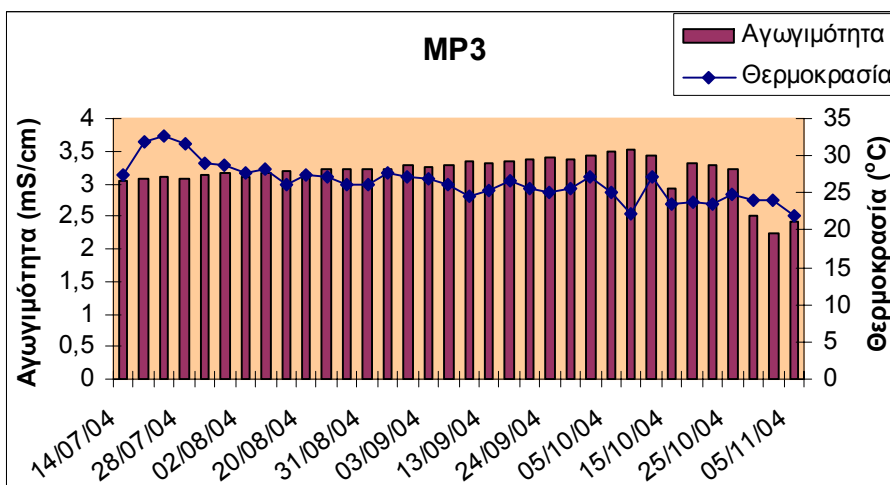
Διάγραμμα 66: Αλατότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι RW27.



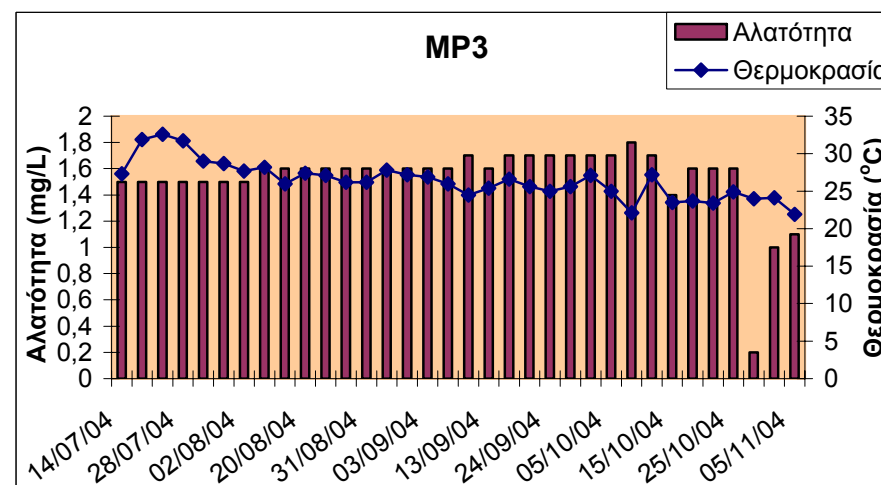
Διάγραμμα 67: Τιμές pH του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP3.



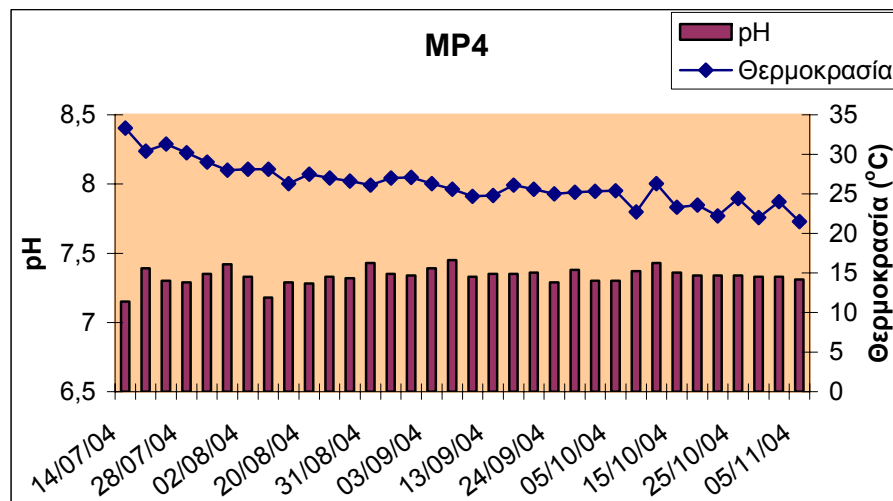
Διάγραμμα 68: Δυναμικό οξειδοαναγωγής του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP3.



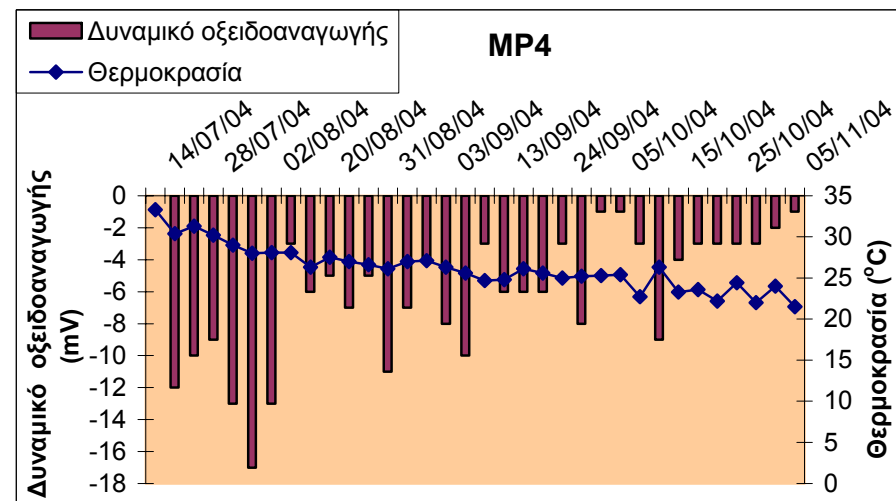
Διάγραμμα 69: Αγωγιμότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP3.



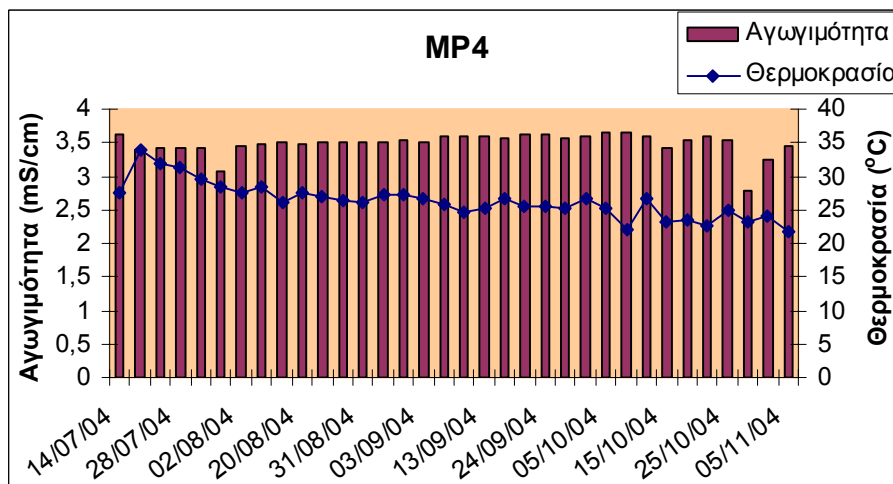
Διάγραμμα 70: Αλατότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP3.



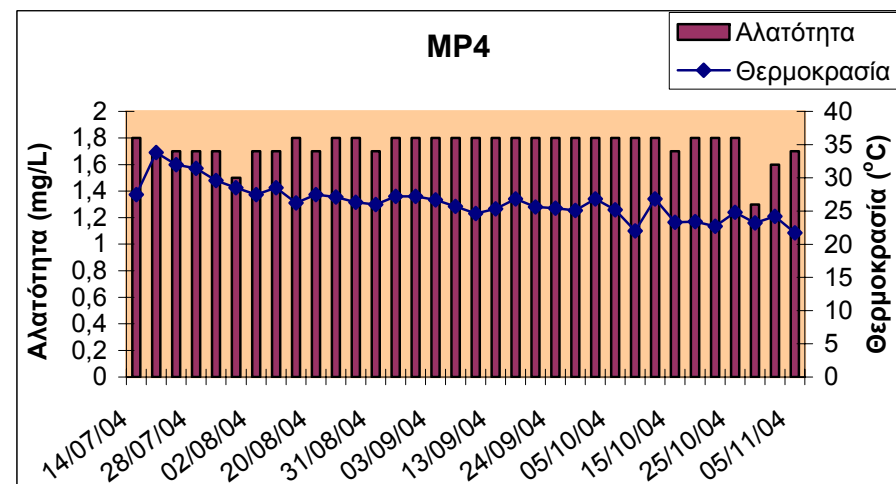
Διάγραμμα 71: Τιμές pH του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP4.



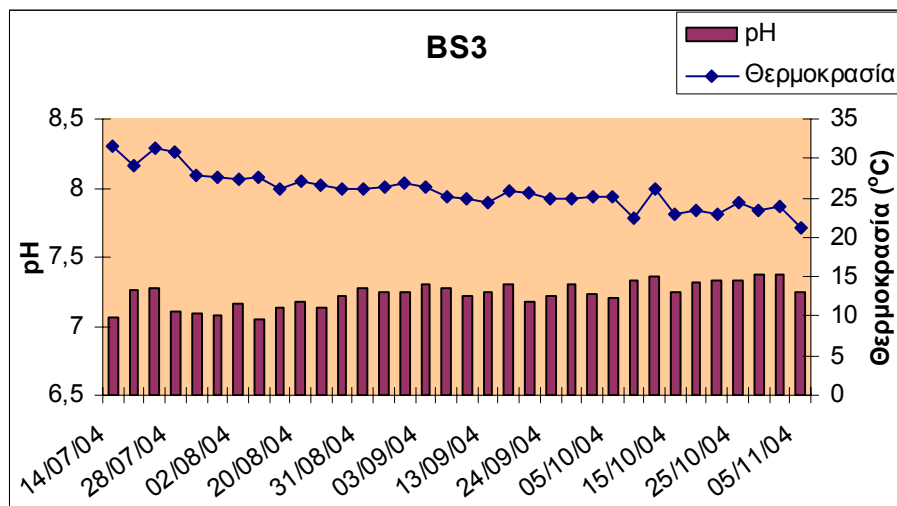
Διάγραμμα 72: Δυναμικό οξειδοαναγωγής του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP4.



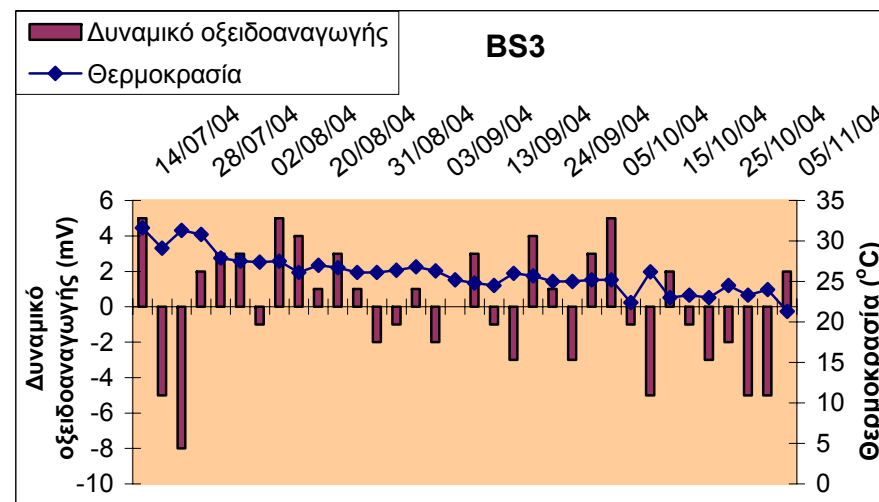
Διάγραμμα 73: Αγωγιμότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP4.



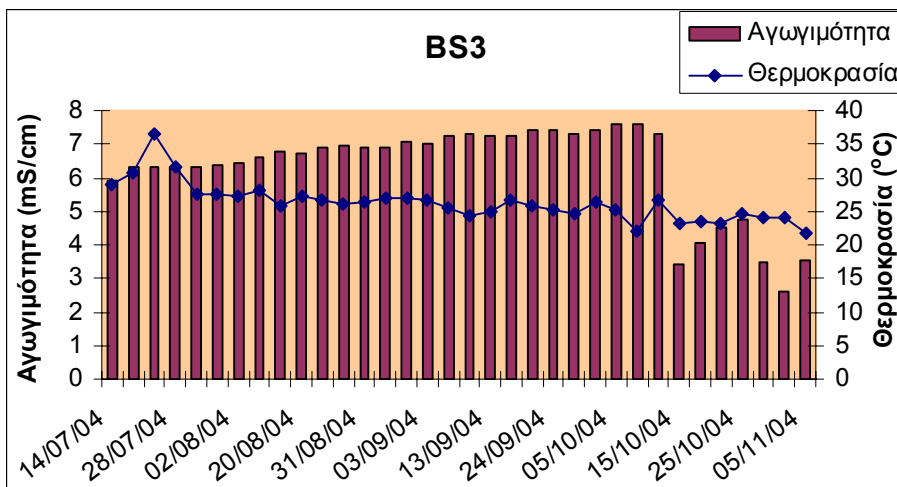
Διάγραμμα 74: Αλατότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι MP4.



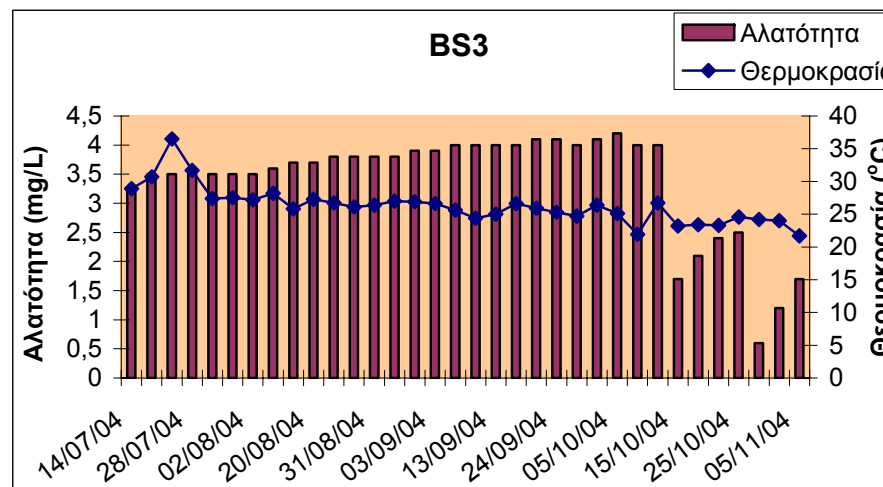
Διάγραμμα 75: Τιμές pH του υπόγειου νερού στο πηγάδι BS3.



Διάγραμμα 76: Δυναμικό οξειδοαναγωγής του υπόγειου νερού στο πηγάδι BS3.

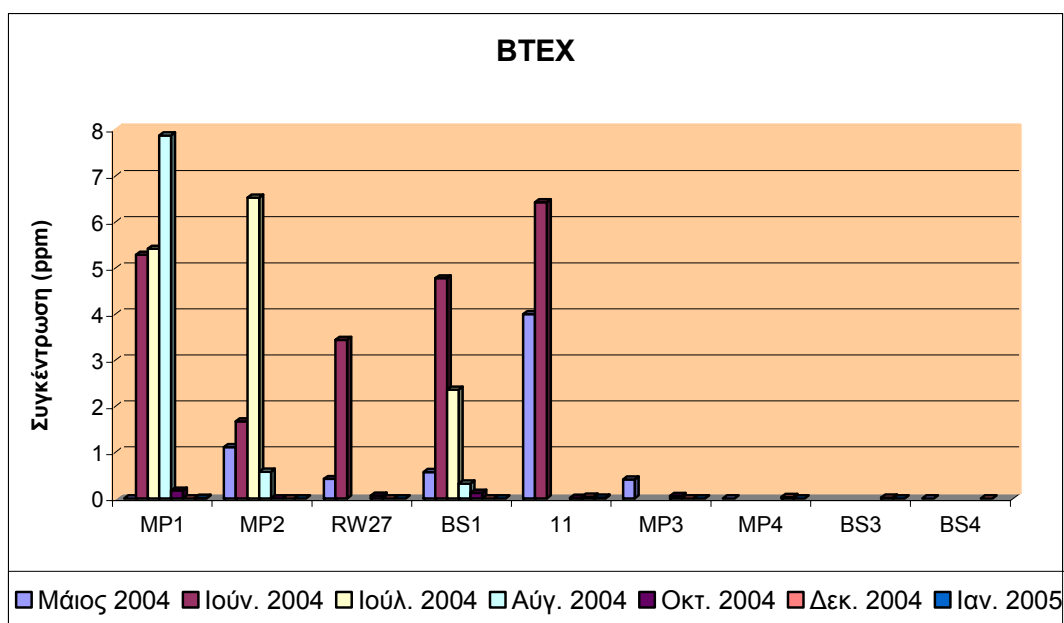


Διάγραμμα 77: Αγωγιμότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι BS3.

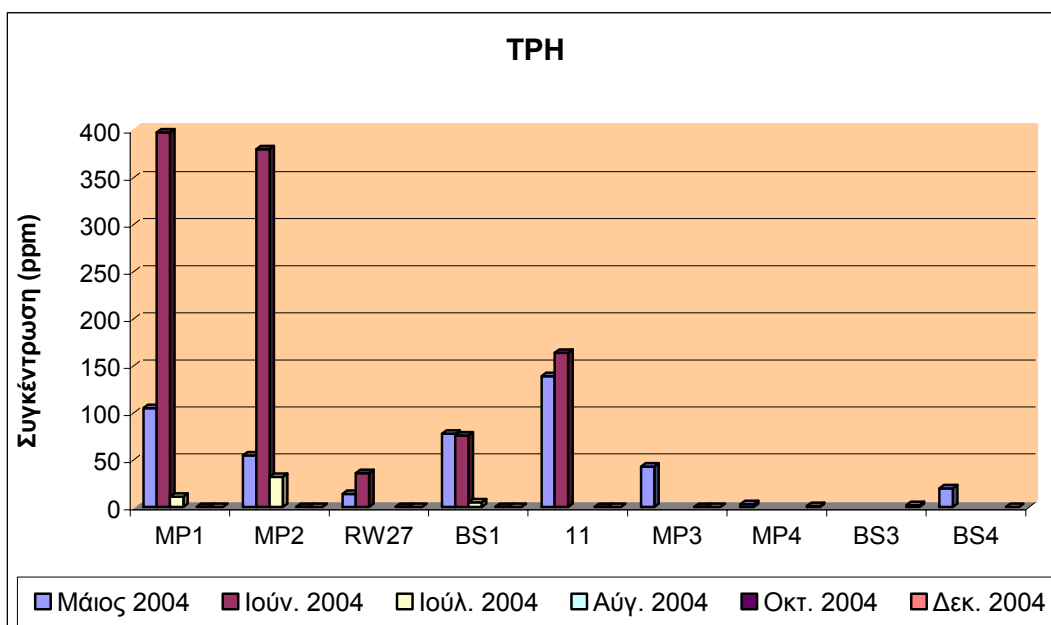


Διάγραμμα 78: Αλατότητα του υπόγειου νερού στο πηγάδι BS3.

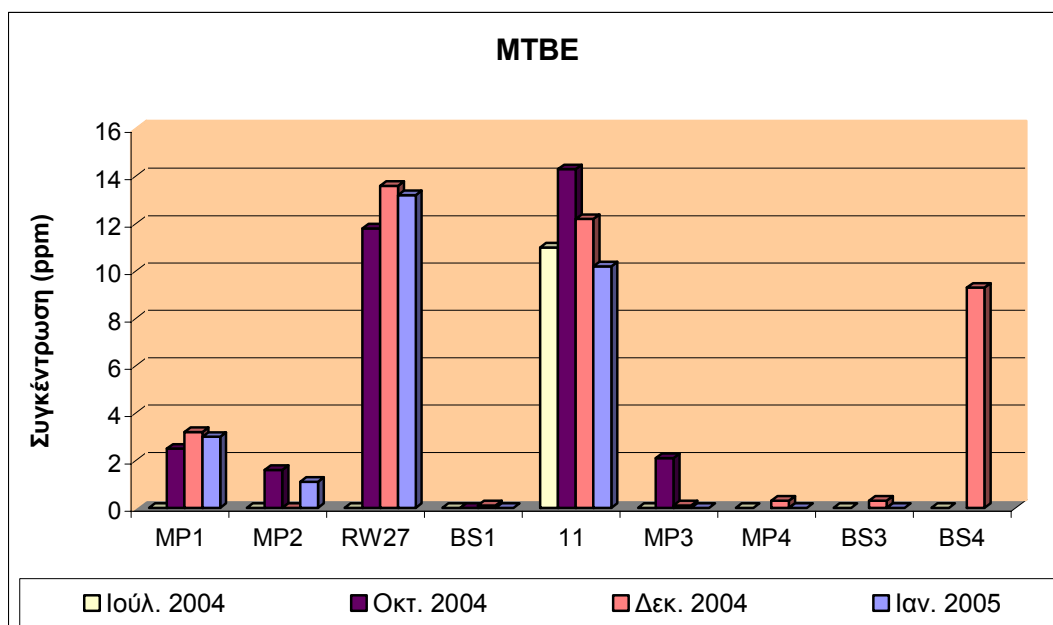
Στο τέλος κάθε μήνα λειτουργίας του συστήματος air sparging πραγματοποιούνταν ανάλυση δειγμάτων υπόγειου νερού ως προς τη συγκέντρωσή τους σε BTEX, TPH και MTBE. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν μαζί με αποτελέσματα παλαιότερων αναλύσεων.



Διάγραμμα 79: Συγκεντρώσεις BTEX σε επιλεγμένα πηγάδια της περιοχής air sparging.



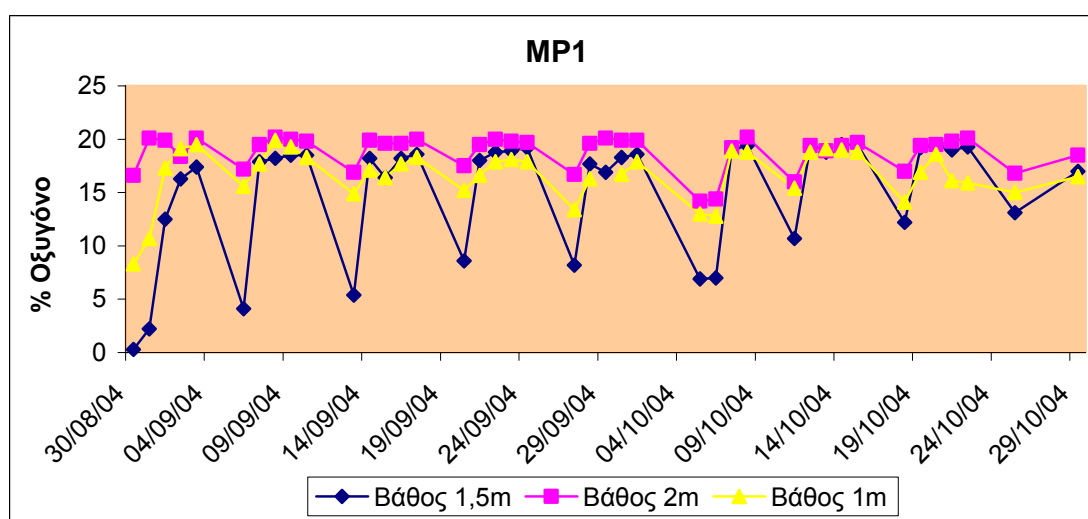
Διάγραμμα 80: Συγκεντρώσεις TPH σε επιλεγμένα πηγάδια της περιοχής air sparging.



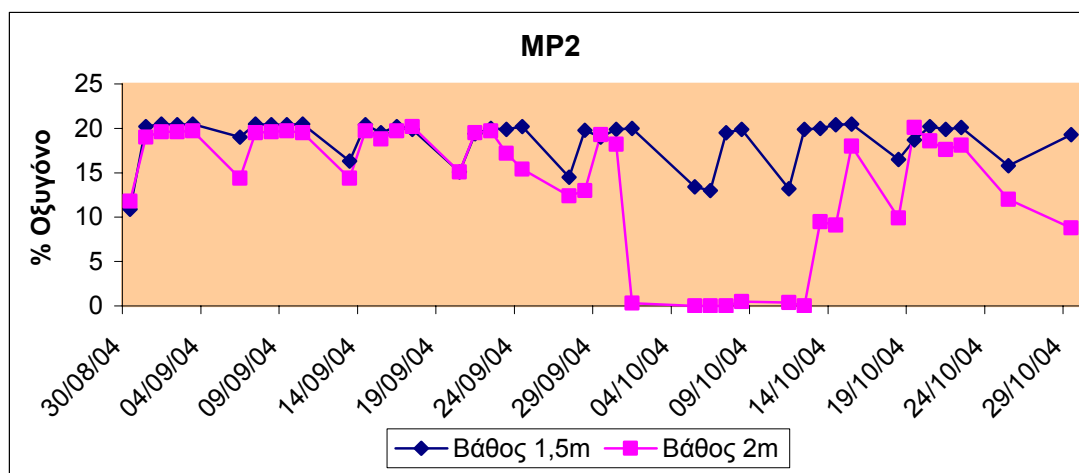
Διάγραμμα 81: Συγκεντρώσεις MTBE σε επιλεγμένα πηγάδια της περιοχής air sparging.

6.2.2. Εδαφικός αέρας

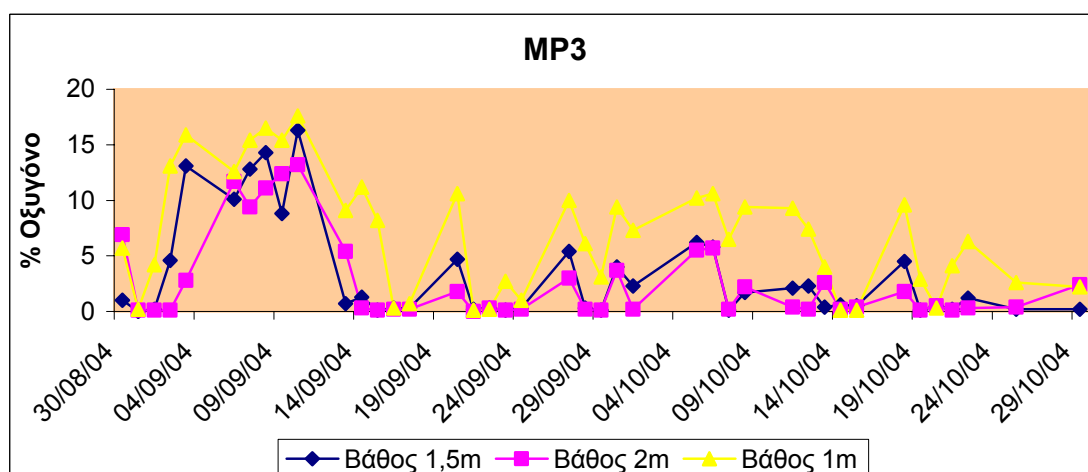
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις της περιεκτικότητας του εδαφικού αέρα σε οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογονάνθρακες που πραγματοποιήθηκαν σε πηγάδια δειγματοληψίας εδαφικού αέρα της περιοχής air sparging.



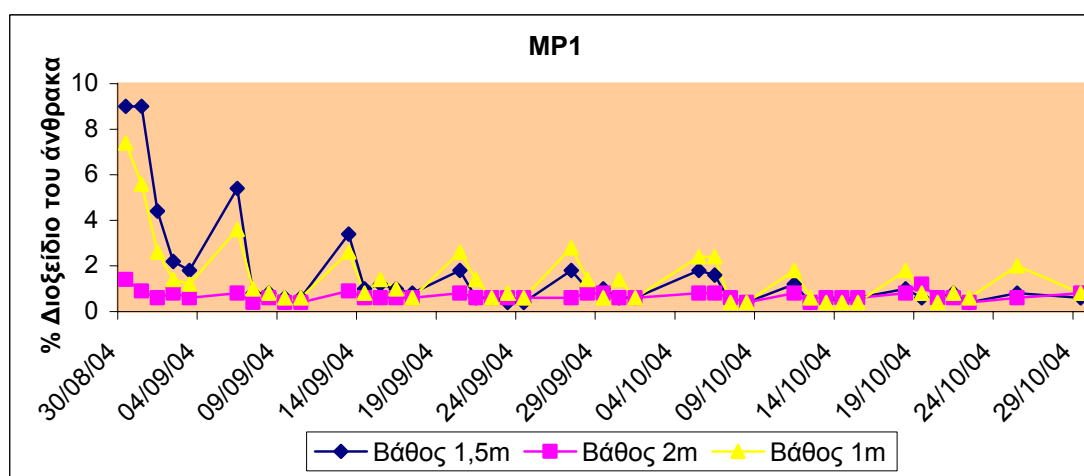
Διάγραμμα 82: Περιεκτικότητα εδαφικού αέρα σε οξυγόνο στο πηγάδι MP1.



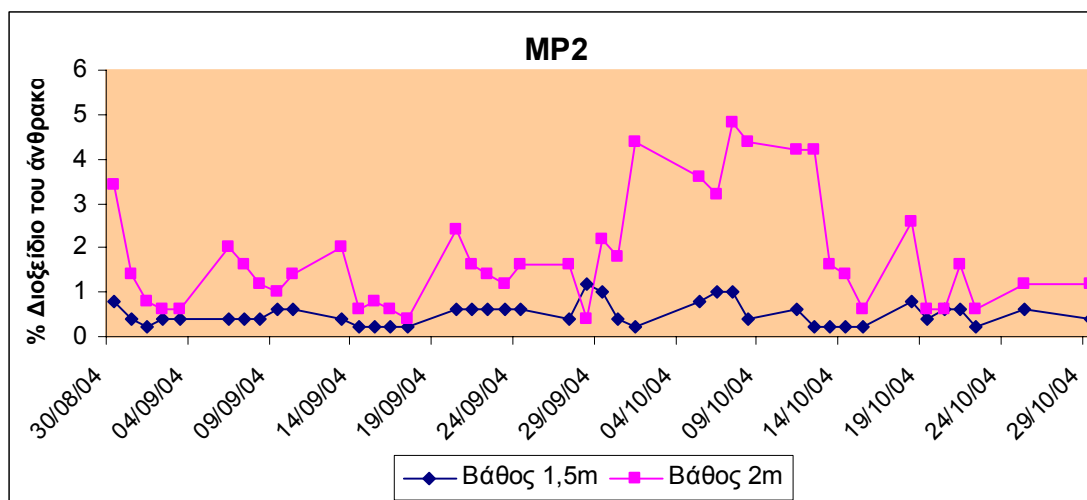
Διάγραμμα 83: Περιεκτικότητα εδαφικού αέρα σε οξυγόνο στο πηγάδι MP2.



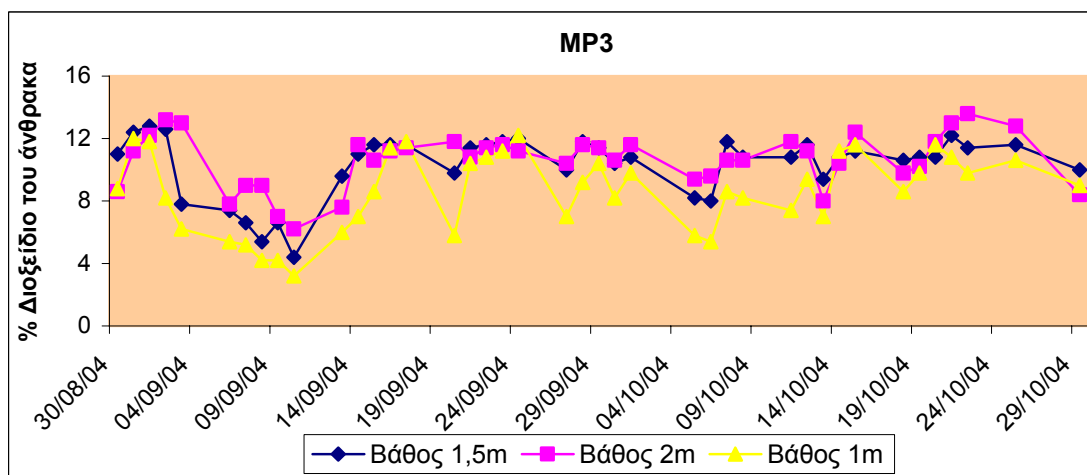
Διάγραμμα 84: Περιεκτικότητα εδαφικού αέρα σε οξυγόνο στο πηγάδι MP3.



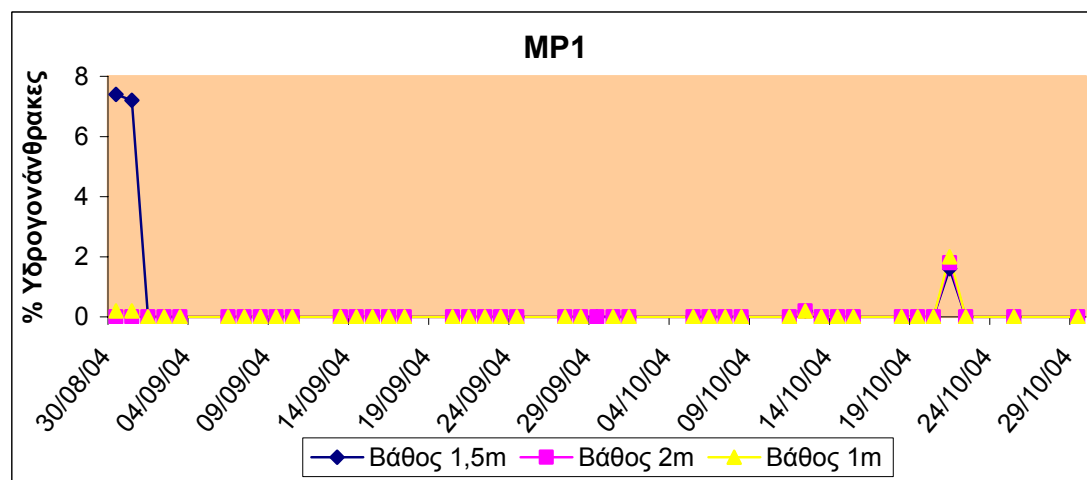
Διάγραμμα 85: Περιεκτικότητα εδαφικού αέρα σε διοξείδιο του άνθρακα στο πηγάδι MP1.



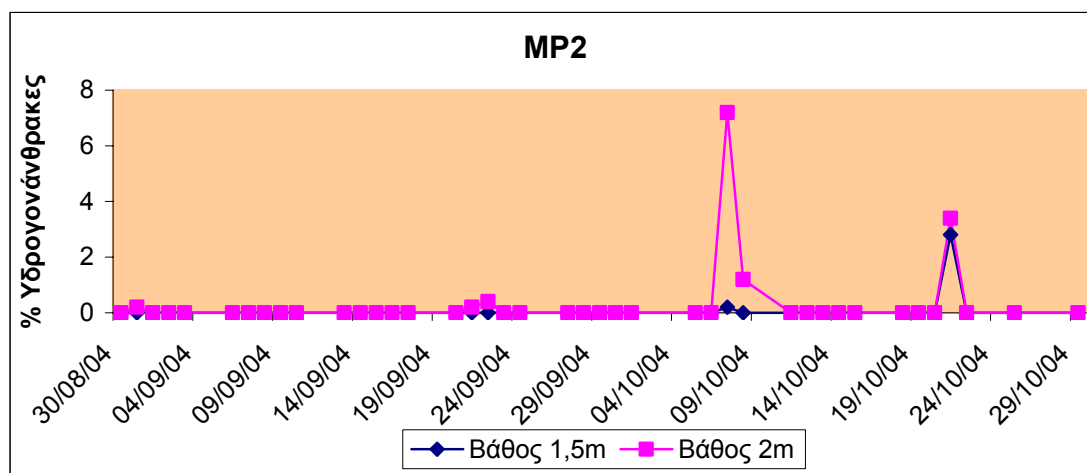
Διάγραμμα 86: Περιεκτικότητα εδαφικού αέρα σε διοξείδιο του άνθρακα στο πηγάδι MP2.



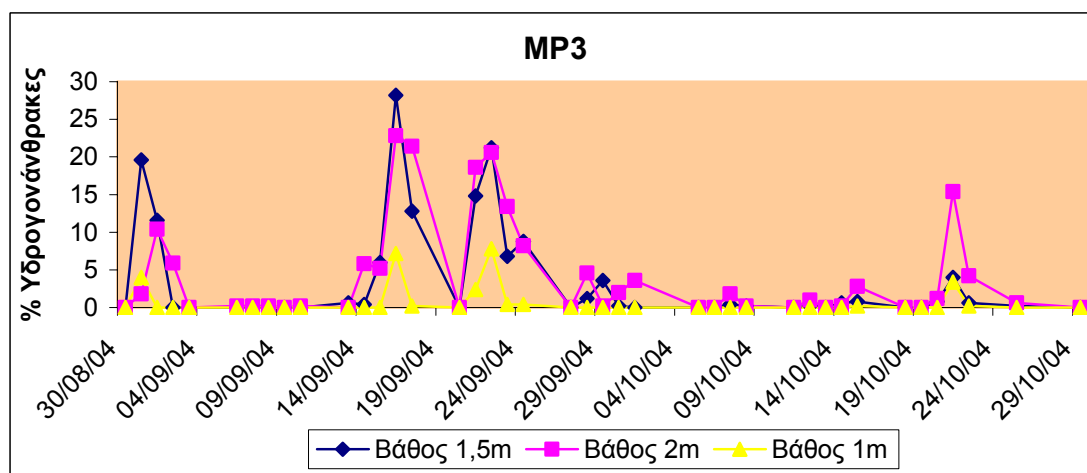
Διάγραμμα 87: Περιεκτικότητα εδαφικού αέρα σε διοξείδιο του άνθρακα στο πηγάδι MP3.



Διάγραμμα 88: Περιεκτικότητα εδαφικού αέρα σε υδρογονάνθρακες στο πηγάδι MP1.



Διάγραμμα 89: Περιεκτικότητα εδαφικού αέρα σε υδρογονάνθρακες στο πηγάδι MP2.



Διάγραμμα 90: Περιεκτικότητα εδαφικού αέρα σε υδρογονάνθρακες στο πηγάδι MP3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1. Συμπεράσματα δοκιμαστικής λειτουργίας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, βασικός στόχος της δοκιμαστικής λειτουργίας του συστήματος air sparging ήταν ο έλεγχος και η επιβεβαίωση του σωστού σχεδιασμού του. Όλος ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός έπρεπε να ελεγχθεί, προκειμένου να γίνει εφικτή μια επιτυχημένη ευρεία εφαρμογή της τεχνολογίας air sparging. Όντως, κατά τη διάρκεια της δοκιμαστικής αυτής λειτουργίας το σύστημα λειτούργησε άψογα. Δεν χρειάστηκε καμία επέμβαση στη συνδεσμολογία των επιμέρους τμημάτων, ενώ ταυτόχρονα οι επιλεγθείσες λειτουργικές παράμετροι (πίεση και παροχή διοχέτευσης αέρα) αποδείχθηκαν κατάλληλες. Οι τιμές που είχαν υπολογιστεί βάση βιβλιογραφίας (0,59 bars πίεση και 70L/min παροχή αέρα), αν και ήταν αρκετά συντηρητικές, αποδείχτηκαν σωστές, δεδομένου ότι επέτρεψαν την ομαλή λειτουργία του συστήματος, χωρίς εμφανή αρνητικά φαινόμενα (π.χ. αυξημένη πίεση στο πηγάδι air sparging, έντονη αναταραχή του υδροφορέα, κα.).

Δευτερεύοντας αλλά εξίσου σημαντικός στόχος της δοκιμαστικής λειτουργίας του συστήματος ήταν ο προσδιορισμός της επίδρασης της διοχέτευσης αέρα στον υδροφορέα πάνω στις επικρατούσες συνθήκες του πεδίου. Για το λόγο αυτό υπήρξε σχεδόν καθημερινή παρακολούθηση ορισμένων σημαντικών παραμέτρων, όπως είναι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, κάποια βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά του υπόγειου νερού (διαλυμένο οξυγόνο, pH, δυναμικό οξειδοαναγωγής, αγωγιμότητα και αλατότητα), καθώς και η σύσταση του εδαφικού αέρα πλησίον του πηγαδιού air sparging.

Όσον αφορά την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή γύρω από το πηγάδι air sparging, όπως προέκυψε δεν υπήρξαν αξιοσημείωτες αλλαγές (Διάγραμμα 7). Όλα τα περιβάλλοντα πηγάδια παρουσίασαν σταθερό βάθος υδροφορέα, το οποίο πάντα κυμαίνονταν μέσα στα παρατηρηθέντα, από παλαιότερες μακροχρόνιες μετρήσεις, όρια. Το γεγονός αυτό ερμηνεύτηκε ως θετικό σημάδι, που αποδείκνυε την ομαλή διοχέτευση αέρα, χωρίς σημαντική αναταραχή των υπογείων υδάτων και κατ' επέκταση χωρίς κίνδυνο μεταφοράς ή εξάπλωσης των ρυπαντών σε μη ρυπανθέντα τμήματα του διυλιστηρίου.

Ένας πολύ σημαντικός δείκτης της αποτελεσματικότητας του συστήματος air sparging αποτέλεσε και η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό, η οποία καταγράφονταν σχεδόν καθημερινά κατά τη διάρκεια της δοκιμαστικής του λειτουργίας. Πρέπει να σημειωθεί το γεγονός ότι η μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου γινόταν αφού το σύστημα είχε παραμείνει κλειστό για τουλάχιστον 10 ώρες. Η αύξηση της συγκέντρωσής του κατά τη διοχέτευση αέρα στον υδροφορέα ήταν δεδομένη και όπως αποδείχτηκε έφτανε σε τιμές έως και 8mg/L. Παρόλα αυτά, στόχος των μετρήσεων ήταν η εκτίμηση της ευρύτερης αύξησης της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου και όχι η στιγμιαία, λόγω της λειτουργίας του συστήματος. Βάση αυτών, δειγματοληψίες γίνονταν κάθε Δευτέρα πρωί (οπότε το σύστημα είχε παραμείνει κλειστό για τουλάχιστον 56 ώρες κατά τη διάρκεια του Σαββατοκύριακου) και Παρασκευή πρωί (οπότε το σύστημα είχε παραμείνει κλειστό για 10 ώρες).

Όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο πηγάδι MP1, όπου γινόταν και η διοχέτευση του αέρα, δεν παρατηρήθηκε σταθερή θετική μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου (Διάγραμμα 8). Μετά το Σαββατοκύριακο, η παρατηρούμενη τιμή ήταν περίπου ίδια με τη συγκέντρωση που παρατηρούνταν πριν την έναρξη της λειτουργίας του συστήματος ($\approx 1,3\text{mg/L}$). Αντίθετα, στο τέλος της εβδομάδας η μετρούμενη τιμή ήταν σαφώς αυξημένη ($\approx 2,3\text{mg/L}$), υποδεικνύοντας την ευρύτερη τάση εμπλουτισμού του υδροφορέα σε οξυγόνο μέσω της εφαρμογής της τεχνολογίας air sparging.

Μετρήσεις της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό πραγματοποιήθηκαν και σε κοντινά πηγάδια γύρω από το πηγάδι MP1. Τα πηγάδια αυτά ήταν τα RW27, 11 και BS1 που απείχαν από το MP1 αποστάσεις 11m, 6m και 10.4m, αντίστοιχα (Διαγράμματα 9 έως 11). Δυστυχώς σε αυτά δεν παρατηρήθηκε αύξηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου και επομένως δεν προέκυψε καμία ένδειξη επηρεασμού των συνθηκών που επικρατούν σε αυτά από τη λειτουργία του συστήματος air sparging. Ως εκ τούτου, κατά τη διάρκεια της δοκιμαστικής λειτουργίας του συστήματος air sparging δεν ήταν δυνατός ο προσδιορισμός της ακτίνας επιρροής του πηγαδιού διοχέτευσης αέρα (MP1). Αφενός δεν υπήρχε η δυνατότητα διάνοιξης νέων πηγαδιών παρακολούθησης ή εγκατάστασης ειδικού εξοπλισμού παρακολούθησης (π.χ. πιεζόμετρων), τόσο λόγω κόστους όσο και λόγω ανάγκης ειδικής αδειοδότησης από το διυλιστήριο και αφετέρου τα υπάρχοντα χρησιμοποιηθέντα πηγάδια παρακολούθησης, όπως αποδείχθηκε, απείχαν πολύ μεγάλη απόσταση ($\geq 6\text{m}$).

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι το δημιουργηθέν πιλοτικό σύστημα έχει έναν ιδιάζοντα σχεδιασμό όσον αφορά τα πηγάδια διοχέτευσης αέρα. Στην ουσία χρησιμοποιούνται πηγάδια όπου εφαρμόζεται η τεχνολογία air sparging υπό τη μορφή in well aeration. Τα πηγάδια δεν είναι πακτωμένα έως το σημείο διοχέτευσης αέρα, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται άνοδος του αέρα μέσα σε αυτά, δημιουργώντας φυσαλίδες και ένα κύκλωμα ανανέωσης και κυκλοφορίας του υπόγειου νερού μέσα στα πηγάδια (Σχήμα 4). Ως αποτέλεσμα, η έννοια «ακτίνα επιρροής» του πηγαδιού αποκτά διαφορετική έννοια από την προκαθορισμένη, καθώς αντιστοιχεί στην περιοχή γύρω από το πηγάδι που επηρεάζεται από την ανακυκλοφορία του νερού και όχι που παρουσιάζει κορεσμό σε αέρα ή οξυγόνο.

Από την άλλη πλευρά, τα χρησιμοποιούμενα πηγάδια είναι στεγανά στην κορυφή τους, αποτρέποντας τη διαφυγή ατμών ή αέρα από αυτά. Μανόμετρα που έχουν τοποθετηθεί στην κορυφή τους κατέγραψαν αμελητέες πιέσεις, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι ο διοχετευόμενος αέρας δε συσσωρεύεται μέσα στα πηγάδια (αναπτύσσοντας αυξημένες πιέσεις) αλλά βρίσκει διέξοδο προς το περιβάλλον έδαφος.

Βάση των παραπάνω, είναι εμφανές ότι η ζώνη επιρροής ενός πηγαδιού διοχέτευσης αέρα του υπάρχοντος συστήματος είναι δύσκολος ή ίσως και ανυπόστατος κάτω από τις υπάρχουσες συνθήκες και δυνατότητες. Θεωρώντας ως δεδομένο ότι η ακτίνα επιρροής των πηγαδιών θα κυμαίνεται μεταξύ 1,5 και 5 μέτρων, τα πηγάδια που επιλέχθηκαν για την επέκταση του αρχικού συστήματος air sparging ήταν όσο το δυνατόν πλησιέστερα μεταξύ τους. Άλλωστε θεωρήθηκε ότι λόγω του φαινομένου in well aeration η αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας air sparging δε θα περιοριζόταν στα στενά όρια των πιθανών δημιουργούμενων ζωνών επιρροής, αλλά θα επεκτείνονταν και με τη βοήθεια της έστω αργής ροής του υπόγειου νερού.

Ταυτόχρονα με τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου μετρήθηκε το pH, το δυναμικό οξειδοαναγωγής, η αγωγιμότητα και η αλατότητα του υπόγειου νερού (Διάγραμμα 12 έως 27). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών δεν έδειξαν καμία αυξητική ή μειωτική τάση, η οποία να αποδεικνύει την επίδραση της λειτουργίας του συστήματος στις παραμέτρους αυτές. Οι μετρούμενες τιμές ήταν εντός των τυπικών ορίων για υπόγεια ύδατα. Εν τούτοις, παρατηρήθηκαν κάποιες μικρομεταβολές, οι οποίες όμως αποδίδονται κυρίως σε αντίστοιχες μεταβολές της θερμοκρασίας και σε αναμενόμενες αποκλίσεις μετρήσεων τέτοιου είδους ευαίσθητων παραμέτρων που πραγματοποιούνται με φορητά όργανα στο πεδίο.

Όσον αφορά τη συγκέντρωση των BTEX και TPH, μετά το τέλος της δοκιμαστικής λειτουργίας του συστήματος air sparging, δηλαδή μετά από 1 μήνα περιοδικής διοχέτευσης αέρα στο πηγάδι MP1, οι πραγματοποιηθέντες αναλύσεις δεν έδειξαν εμφανή θετικά αποτελέσματα (Διάγραμμα 28). Όπως ήταν αναμενόμενο, το χρονικό διάστημα ενός μηνός αποδείχτηκε πολύ μικρό για την παρατήρηση αξιοσημείωτων μειώσεων της συγκέντρωσης των πετρελαϊκών ρυπαντών. Συγκεκριμένα, στο πηγάδι MP1 όχι μόνο δεν πραγματοποιήθηκε μείωση της μετρούμενης συγκέντρωσης BTEX και TPH, αλλά αντίθετα σημειώθηκε αύξηση. Αισθητή μείωση των συγκεντρώσεων των ρυπαντών παρατηρήθηκε στο πηγάδι MP2, η οποία όμως δεν μπορεί να συνδεθεί άμεσα με τη λειτουργία του συστήματος air sparging, δεδομένου ότι τόσο η απόσταση του MP2 από το πηγάδι MP1, όσο και η ροή του υπόγειου νερού δεν υποστηρίζει μια τέτοια υπόθεση.

Τέλος, όσον αφορά τη σύσταση του εδαφικού αέρα, ο προσδιορισμός της ήταν εφικτός σε ορισμένα μόνο πηγάδια που διέθεταν σωλήνες δειγματοληψίας σε διάφορα βάθη της ακόρεστης ζώνης. Τα πηγάδια αυτά ήταν τα MP1, MP2, MP3 και MP4. Όπως είναι εμφανές, κατά τη διάρκεια της δοκιμαστικής λειτουργίας του συστήματος air sparging μόνο το πηγάδι MP1 μπορούσε να αξιοποιηθεί, καθώς τα υπόλοιπα βρίσκονταν σε πολύ μεγάλη απόσταση από το σημείο διοχέτευσης του αέρα ($\geq 18\text{m}$). Παρόλα αυτά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε όλα τα πηγάδια για λόγους πληρέστερης παρακολούθησης του εδαφικού αέρα του διυλιστηρίου.

Στο πηγάδι MP1 παρατηρήθηκαν σχετικά υψηλές περιεκτικότητες του εδαφικού αέρα σε οξυγόνο, της τάξης του 10-20%, σε όλα τα εξεταζόμενα βάθη της ακόρεστης ζώνης (1, 1,5 και 2m). Αντίστοιχα, τα επίπεδα του διοξειδίου του άνθρακα ήταν αρκετά αυξημένα, ιδιαίτερα στα ανώτερα στρώματα του εδάφους (1,5m), όπου παρατηρήθηκαν ποσοστά ακόμη και 10%. Στα μεγαλύτερα βάθη της ακόρεστης ζώνης (2m) το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα ήταν σαφώς μικρότερο ($<2\%$), γεγονός το οποίο σίγουρα συσχετίζεται με την έντονη παρουσία οξυγόνου και κατ' επέκταση με τη λειτουργία του συστήματος air sparging.

Το ποσοστό περιεκτικότητας του εδαφικού αέρα σε υδρογονάνθρακες στο πηγάδι MP1 ήταν ιδιαίτερα μικρό σε όλη την ακόρεστη ζώνη, μ' εξαίρεση το τέλος του μήνα της δοκιμαστικής λειτουργίας του συστήματος, όπου σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν έπειτα από τα Σαββατοκύριακα (οπότε δεν λειτουργούσε το σύστημα) προέκυψαν τιμές της τάξης του 25% και 15%. Το γεγονός αυτό ίσως να οφείλεται στη συσσώρευση

πτητικών υδρογονανθράκων στον εδαφικό αέρα κατά τη διάρκεια διακοπής της διοχέτευσης αέρα στο υπέδαφος.

Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί ότι η δοκιμαστική λειτουργία του συστήματος air sparging αν και δεν κατάφερε να δώσει αξιόπιστα θετικά δεδομένα για την αποτελεσματικότητα και την απόδοση της τεχνολογίας στην εξυγίανση του υδροφορέα (π.χ. δεν μπόρεσε να αποδείξει μια διευρυμένη εξάπλωση του εισαγόμενου αέρα, να προσδιορίσει την πιθανή ακτίνα επιρροής του πηγαδιού air sparging ή να επιτύχει μείωση της συγκέντρωσης των υπαρχόντων πετρελαϊκών ρυπαντών), αποτέλεσε πολύ σημαντικό βήμα στην μετέπειτα επέκταση της εφαρμογής της μεθόδου. Συγκεκριμένα, επιβεβαίωσε το σωστό σχεδιασμό και την ορθή εγκατάσταση του συστήματος, απέδειξε την καταλληλότητα των επιλεχθέντων λειτουργικών παραμέτρων για μια ασφαλή λειτουργία του συστήματος και τελικά εξασφάλισε την αποτελεσματική διοχέτευση αέρα στον υδροφορέα, χωρίς την εμφάνιση δυσάρεστων φαινομένων (π.χ. αδυναμία εισαγωγής αέρα υπό λογικές πιέσεις) ή πιθανών κινδύνων (π.χ. εμφάνιση υπερβολικών πιέσεων ή συγκεντρώσεων πτητικών υδρογονανθράκων στον εδαφικό αέρα), που θα μπορούσαν να καταστήσουν ανέφικτη την εφαρμογή της τεχνολογίας air sparging στο συγκεκριμένο πεδίο.

7.2. Συμπεράσματα κανονικής λειτουργίας

Στόχος της κανονικής λειτουργίας του συστήματος air sparging ήταν προφανώς η απομάκρυνση των ρυπαντών του υπόγειου νερού. Ως εκ τούτου, η διάρκειά της ήταν πολύ μεγαλύτερη από αυτήν της δοκιμαστικής λειτουργίας (σχεδόν πενταπλάσια), ενώ παράλληλα τα πηγάδια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 5 (MP1, RW27, 11, BS1, MP2) και όχι ένα (MP1). Οι παράμετροι που παρακολουθήθηκαν κατά τη διάρκειά της ήταν οι ίδιες με αυτές που μελετήθηκαν κατά τη δοκιμαστική λειτουργία του συστήματος, αν και μεγαλύτερη έμφαση δόθηκε στις μηνιαίες αναλύσεις του υπόγειου νερού ως προς τη συγκέντρωσή του σε BTEX, TPH και MTBE, η οποία θα αποτελούσε το βασικότερο κριτήριο της αποτελεσματικότητας της τεχνολογίας air sparging στο συγκεκριμένο πεδίο.

Ξεκινώντας από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα δεν παρατηρήθηκε καμία σημαντική διαφοροποίηση σε κανένα από τα πηγάδια λειτουργίας ή παρακολούθησης του συστήματος (Διάγραμμα 38). Για ακόμη μια φορά τα μετρούμενα βάθη του υδροφορέα κυμαίνονταν μέσα στα αναμενόμενα όρια, γεγονός το οποίο υποδεικνύει την ομαλή διοχέτευση του αέρα στον υδροφορέα. Όπως αποδείχτηκε, ο πενταπλάσιασμός

της παροχής του αέρα (5 πηγάδια που διοχετεύουν αέρα με παροχή 70L/min) δεν επηρεάζει αρνητικά τον υδροφορέα, δεδομένου ότι οι πιέσεις εισαγωγής του είναι κατάλληλες σε κάθε πηγάδι (ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του) και έτσι δεν προκαλούνται υπερβολικές, ανεπιθύμητες διαταραχές.

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο υπόγειο νερό αποτέλεσε και σε αυτό το στάδιο της λειτουργίας του συστήματος μια πολύ σημαντική παράμετρο, η οποία παρακολουθούνταν 2 φορές την εβδομάδα (Δευτέρα και Παρασκευή πρωί) σε όλα τα πηγάδια air sparging και όχι μόνο (Διάγραμμα 39 έως 46). Στα πηγάδια διοχέτευσης αέρα (MP1, RW27, 11, BS1, MP2) διαπιστώθηκε σαφής αύξηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου σε σχέση με τις τιμές που επικρατούσαν πριν την έναρξη της λειτουργίας του συστήματος. Παράλληλα προέκυψε ότι η συγκέντρωση αυτή ήταν σχετικά μικρή στην αρχή της εβδομάδας (οπότε και το σύστημα είχε παραμείνει κλειστό για τουλάχιστον 56 ώρες) και αυξημένη στο τέλος της εβδομάδας (αφού το σύστημα είχε παραμείνει κλειστό για περίπου 10 ώρες). Η χαρακτηριστική αυτή αυξομείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου (μεταξύ των τιμών 2–4mg/L) παρατηρείται σε όλα σχεδόν τα πηγάδια air sparging και είναι απόλυτα αναμενόμενη βάση της περιοδικής λειτουργίας του συστήματος.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στο πηγάδι RW27 η διακύμανση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου ήταν μικρότερη σε σχέση με τα άλλα πηγάδια, καθώς η τιμή του διατηρούνταν συνεχώς σε σχετικά υψηλά επίπεδα (3-4mg/L). Σημαντικό ρόλο σε αυτό πιθανόν να έπαιξε το μεγάλο βάθος εισαγωγής του αέρα στο πηγάδι αυτό, το οποίο είναι περίπου 20m.

Επιπλέον πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι στο πηγάδι MP1, όπου ήδη πραγματοποιούνταν εισαγωγή αέρα για έναν μήνα (κατά τη διάρκεια της δοκιμαστικής λειτουργίας του συστήματος) και δεν είχε διαπιστωθεί καμία σημαντική και μόνιμη αύξηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου, παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη αύξηση μετά την έναρξη της λειτουργίας του διευρυμένου συστήματος των 5 πηγαδιών. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει την αλληλεπίδραση των πηγαδιών μεταξύ τους, η οποία ναί μεν δεν μπορεί να προσδιοριστεί υπό την στενή έννοια της ακτίνας επιρροής, αλλά σίγουρα είναι παρούσα και παίζει σημαντικό ρόλο στην όλη διεργασία της εξυγίανσης του υδροφορέα.

Στα πηγάδια παρακολούθησης του συστήματος air sparging (MP3, MP4 και BS3) δεν παρατηρήθηκε κάποια αυξητική τάση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου.

Αν και υπήρξαν κάποιες αυξομειώσεις δεν μπορούν να συνδεθούν άμεσα με τη λειτουργία του συστήματος, αλλά μάλλον αποδίδονται σε μεταβολές της θερμοκρασίας ή στις αναπόφευκτες αποκλίσεις που παρουσιάζονται σε μετρήσεις μιας τόσο ευαίσθητης παραμέτρου στο πεδίο. Ως εκ τούτου, δεν ήταν δυνατή η διεξαγωγή αξιόπιστου συμπεράσματος σχετικά με την ακτίνα επιρροής των πηγαδιών air sparging βάση των μετρήσεων στα πηγάδια παρακολούθησης, τα οποία απέιχαν αποστάσεις 6,6m, 15,6m και 20m, αντίστοιχα, από το πλησιέστερο πηγάδι διοχέτευσης αέρα, οι οποίες θεωρούνται και αποδείχτηκαν πολύ μεγάλες για τη διεξαγωγή οποιουδήποτε συμπεράσματος.

Όσον αφορά τις υπόλοιπες ποιοτικές παραμέτρους του υπόγειου νερού (pH, δυναμικό οξειδοαναγωγής, αγωγιμότητα, και αλατότητα) που εξετάστηκαν λεπτομερώς κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του συστήματος, τα αποτελέσματα που προέκυψαν ποικίλουν από πηγάδι σε πηγάδι. Συγκεκριμένα, στα πηγάδια MP1 και MP2 το pH του υπόγειου νερού δεν παρουσίασε καμία τάση αύξησης ή μείωσης, παρά μόνο κάποιες μεταβολές οι οποίες δεν μπορούν να συνδεθούν με τη λειτουργία του συστήματος air sparging και κυμαίνονταν πάντα εντός των αναμενόμενων ορίων για υπόγεια ύδατα. Αντίθετα, στα υπόλοιπα πηγάδια air sparging (BS1, 11 και RW27) αρχικά παρατηρήθηκε μικρή αύξηση της τιμής του pH, η οποία δεν ήταν συνεχής και στη συνέχεια επικράτησαν μικρές αυξομειώσεις, πάντα μέσα στα αναμενόμενα όρια.

Η τιμή του δυναμικού οξειδοαναγωγής στα περισσότερα πηγάδια (MP1, MP2 και BS1) μεταβάλλονταν ελάχιστα (κατά μέσο όρο 20mV περίπου) και με τρόπο που δεν μπορεί να συνδεθεί άμεσα με τη λειτουργία του συστήματος air sparging, καθώς δεν παρουσιάζει καμία σταθερή αυξητική ή μειωτική τάση, ούτε κάποια χαρακτηριστική μεταβολή. Εξάιρεση ίσως αποτελούν τα πηγάδια 11 και RW27, στα οποία παρατηρήθηκε σχεδόν σταθερή μείωση του δυναμικού οξειδοαναγωγής, η οποία όμως για ακόμη μια φορά κυμαίνεται σε αρκετά μικρά επίπεδα της τάξης των 30mV το μέγιστο. Τέλος, οι τιμές της αγωγιμότητας και της αλατότητας του υπόγειου νερού σε όλα τα πηγάδια διοχέτευσης αέρα ήταν σταθερές, παρουσιάζοντας σχεδόν μηδενικές αποκλίσεις.

Στα πηγάδια παρακολούθησης του συστήματος air sparging (MP3, MP4 και BS3) οι τιμές των βασικών ποιοτικών παραμέτρων του υπόγειου νερού παρέμειναν αρκετά σταθερές (π.χ. το pH, η αγωγιμότητα και η αλατότητα) ή παρουσίασαν μικρές μεταβολές, οι οποίες δεν παρουσιάζουν σταθερό χαρακτήρα, ούτε μπορούν να συνδεθούν με τη

λειτουργία του συστήματος air sparging. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει το συμπέρασμα, που προέκυψε από τη μελέτη της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου, ότι τα πηγάδια παρακολούθησης τελικά απέειχαν πολύ μεγάλη απόσταση από τα πλησιέστερα πηγάδια air sparging, με αποτέλεσμα να μην παρατηρηθεί κανενός είδους επιρροή σε αυτά από τη διοχέτευση αέρα στον υδροφόρο.

Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις των BTEX, TPH και MTBE στο υπόγειο νερό της περιοχής air sparging τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν αρκετά ικανοποιητικά (Διάγραμμα 79 έως 81). Συγκεκριμένα, οι μηνιαίες μετρήσεις των συστατικών BTEX και TPH έδειξαν πολύ μεγάλη μείωση της συγκέντρωσής τους σε όλα τα πηγάδια από τον δεύτερο κιάλα μήνα της κανονικής λειτουργίας του συστήματος (Οκτώβριος 2004). Στις επόμενες δυο αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν (Δεκέμβριος 2004 και Ιανουάριος 2005) τα παραπάνω θετικά αποτελέσματα όχι μόνο επιβεβαιώθηκαν αλλά ενισχύθηκαν, καθώς όπως προέκυψε οι συγκεντρώσεις των BTEX και TPH είχαν πέσει κάτω από τα όρια ανίχνευσής τους (Πίνακας 12). Αντίθετα, η συγκέντρωση των MTBE δεν παρουσίασε ξεκάθαρη μείωση, τουλάχιστον όχι στην πλειονότητα των πηγαδιών. Συγκεκριμένα, στα πηγάδια BS1 και MP2 παρουσιάστηκε μείωση της συγκέντρωσής τους (από 3,44 και 7,44mg/L σε <0,01 και 1,1mg/L, αντίστοιχα), αλλά στα υπόλοιπα πηγάδια δυστυχώς δεν παρατηρήθηκε σημαντική μεταβολή.

Το γεγονός αυτό ήταν εν μέρει αναμενόμενο δεδομένου ότι γενικά η απομάκρυνση του MTBE από το υπόγειο νερό θεωρείται ένα πολύ δύσκολο έργο, λόγω της μεγάλης του διαλυτότητας σε αυτό, της μικρής τάσης προσρόφησής του στο έδαφος και του ιδιαίτερα χαμηλού ρυθμού βιοαποικοδόμησής του, τα οποία του προσδίδουν διαφορετικές ιδιότητες και συμπεριφορά από άλλους πετρελαϊκούς ρυπαντές. Αν και το MTBE είναι πολύ πτητικό σε καθαρή μορφή και συγκεκριμένα αναφέρεται ότι είναι 3 φορές πιο πτητικό από το βενζόλιο, η διαλυτότητά του στο νερό είναι 30 φορές μεγαλύτερη από αυτή του βενζολίου και η εξάτμισή του, όταν βρίσκεται σε διαλυμένη μορφή (π.χ. μέσα στο υπόγειο νερό) είναι δέκα φορές μικρότερη από εκείνη του βενζολίου (EPA, 1998). Ως εκ τούτου, η προσπάθεια απομάκρυνσής του από το υπόγειο νερό με την εφαρμογή της τεχνολογίας air sparging είναι μεν αποτελεσματική, αλλά απαιτεί μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα εξυγίανσης και ίσως μεγαλύτερες ποσότητες διοχετευόμενου αέρα, σε σχέση με άλλους πτητικούς πετρελαϊκούς ρυπαντές.

Πίνακας 12: Αποτελέσματα αναλύσεων δειγμάτων υπογείου νερού από πηγάδια της περιοχής air sparging.

ΠΗΓΑΔΙ	BTEX (mg/L)	TPH (mg/L)	MTBE (mg/L)	ΣΧΟΛΙΑ
ΜΑΙΟΣ 2004				
MP1	0	105	✓	έντονη οσμή, θολό, αιωρήματα
MP2	1,11	55	✓	οσμή, αιωρήματα
RW27	0,42	14	✓	έντονη οσμή, αιωρήματα
BS1	0,57	78	✓	οσμή, αιωρήματα
11	4	139	✓	έντονη οσμή, θολό, αιωρήματα
MP3	0,41	43	✓	οσμή, αιωρήματα
MP4	0	3	✓	οσμή, λίγο θολό, αιωρήματα
BS4	0	20	✓	οσμή, θολό κίτρινο
ΙΟΥΝΙΟΣ 2004				
MP1	5,29	398	✓	έντονη οσμή, θολό, αιωρήματα
MP2	1,67	380	✓	έντονη οσμή, θολό, αιωρήματα
RW27	3,44	36	✓	οσμή, θολό, αιωρήματα
BS1	4,78	76	✓	έντονη οσμή, θολό, αιωρήματα
11	6,43	164	✓	έντονη οσμή, θολό, αιωρήματα
ΙΟΥΛΙΟΣ 2004				
MP1	5,42	11	2,23	έντονη οσμή, σχετικά διαυγές
MP2	6,53	32	7,34	έντονη οσμή, σχετικά διαυγές
BS1	2,36	5	3,44	έντονη οσμή, σχετικά διαυγές
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2004				
MP1	7,88	-	-	έντονη οσμή, σχετικά διαυγές
MP2	0,58	-	-	έντονη οσμή, σχετικά διαυγές
BS1	0,32	-	-	οσμή, θολό
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2004				
MP1	0,17	< Q.L.	2,5	ελαφριά οσμή, διαυγές ροζ εκχύλισμα
MP2	< Q.L.	< Q.L.	1,6	ελαφριά οσμή, σχεδόν διαυγές
RW27	0,06	< Q.L.	11,8	ελαφριά οσμή, διαυγές
BS1	0,12	< Q.L.	< Q.L.	έντονη οσμή, διαυγές
11	0,01	< Q.L.	14,3	έντονη οσμή, λίγο θολό
MP3	0,05	< Q.L.	2,1	οσμή, λίγο θολό

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2004				
MP1	< Q.L	< Q.L	3,2	ελαφριά οσμή, διαυγές ροζ εκχύλισμα
MP2	< Q.L	< Q.L	< Q.L	ελαφριά οσμή, διαυγές
RW27	< Q.L	< Q.L	13,6	ελαφριά οσμή, διαυγές
BS1	< Q.L	< Q.L	0,1	ελαφριά οσμή, διαυγές
11	0,04	< Q.L	12,2	έντονη οσμή, διαυγές
MP3	< Q.L	< Q.L	0,1	έντονη οσμή, διαυγές
MP4	0,03	1	0,3	έντονη οσμή, διαυγές
BS3	0,02	2	0,3	ελαφριά οσμή, λίγο θολό
BS4	< Q.L	< Q.L	9,3	ελαφριά οσμή, διαυγές
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2004				
MP1	0,01	-	3,0	-
MP2	< Q.L	-	1,1	-
RW27	< Q.L	-	13,2	-
BS1	< Q.L	-	< Q.L	-
11	0,02	-	10,2	-
MP3	< Q.L	-	< Q.L	-
MP4	< Q.L	-	< Q.L	-
BS3	< Q.L	-	< Q.L	-

Σημείωση:

- Το σύμβολο √ δηλώνει την ύπαρξη των συστατικών MTBE στα δείγματα του υπόγειου νερού που αναλύθηκαν, χωρίς όμως να είναι γνωστή συγκέντρωσή τους.
- Το σύμβολο Q.L. εκπροσωπεί τις λέξεις Quantitation Limit (Όριο Ποσοτικοποίησης), το οποίο είναι για MTBE και BTEX = 0,010mg/L στο νερό και για TPH = 0,5mg/L στο νερό.

Τέλος, όσον αφορά τη σύσταση του εδαφικού αέρα, κατά τη διάρκεια της δοκιμαστικής λειτουργίας του συστήματος air sparging τα πηγάδια που μπορούσαν να αξιοποιηθούν για τον προσδιορισμό της ήταν τα MP1, MP2 και MP3, από τα οποία τα δυο πρώτα αποτελούσαν πηγάδια air sparging (διοχέτευσης αέρα) και το τρίτο αποτελούσε πηγάδι παρακολούθησης του συστήματος.

Η περιεκτικότητα του εδαφικού αέρα σε οξυγόνο ήταν αρκετά υψηλή (της τάξης του 15-20%) στα πηγάδια διοχέτευσης αέρα (MP1 και MP2) σε όλα τα εξεταζόμενα βάθη της ακόρεστης ζώνης (1, 1,5 και 2m), γεγονός το οποίο ήταν αναμενόμενο. Αν και υπήρχαν ορισμένες αυξομειώσεις, οι οποίες πιθανότατα οφείλονταν στην περιοδική λειτουργία του συστήματος, τα επίπεδα του οξυγόνου ήταν ομολογουμένως υψηλά αποδεικνύοντας την

μεταφορά του εισαγόμενου αέρα από την κορεσμένη στην ακόρεστη ζώνη. Αντίστοιχα, η περιεκτικότητα του εδαφικού αέρα σε διοξείδιο του άνθρακα και πτητικούς υδρογονάνθρακες κυμαινόταν σε πολύ μικρές έως μηδενικές τιμές, υποδεικνύοντας την επικράτηση αερόβιων συνθηκών, τον επαρκή αερισμό της ακόρεστης ζώνης και την έλλειψη συσσώρευσης πτητικών υδρογονανθράκων στο έδαφος.

Στο πηγάδι παρακολούθησης MP3 τα επίπεδα του οξυγόνου ήταν σαφώς μικρότερα (της τάξης του 10%), η περιεκτικότητα του διοξειδίου του άνθρακα αυξημένη (περίπου 12%) και η συγκέντρωση των πτητικών υδρογονανθράκων έντονα μεταβαλλόμενη (από τιμές της τάξης του 25% έως και 0%). Τα δεδομένα αποκλείουν την έντονη τουλάχιστον επιρροή των πηγαδιών διοχέτευσης αέρα στο πηγάδι MP3 και δεν μπορούν να ερμηνευτούν συναρτήσει της λειτουργίας του συστήματος air sparging.

7.3. Γενικά συμπεράσματα και προτάσεις

Ανατρέχοντας στα αποτελέσματα της λειτουργίας του πιλοτικού συστήματος air sparging στο συγκεκριμένο πεδίο του διυλιστηρίου Ασπροπύργου, είναι εμφανής η αποτελεσματικότητα της εφαρμοζόμενης τεχνολογίας στην εξυγίανση του υπάρχοντος ρυπασμένου υδροφορέα. Όπως αποδείχτηκε η τεχνολογία air sparging κατάφερε να απομακρύνει σημαντικούς πετρελαϊκούς ρυπαντές, οι οποίοι βρίσκονται στον υπό μελέτη υδροφορέα σε αρκετά σημαντικές συγκεντρώσεις, αποδεικνύοντας την δυνατότητα επιτυχούς εφαρμογής της στις συγκεκριμένες συνθήκες.

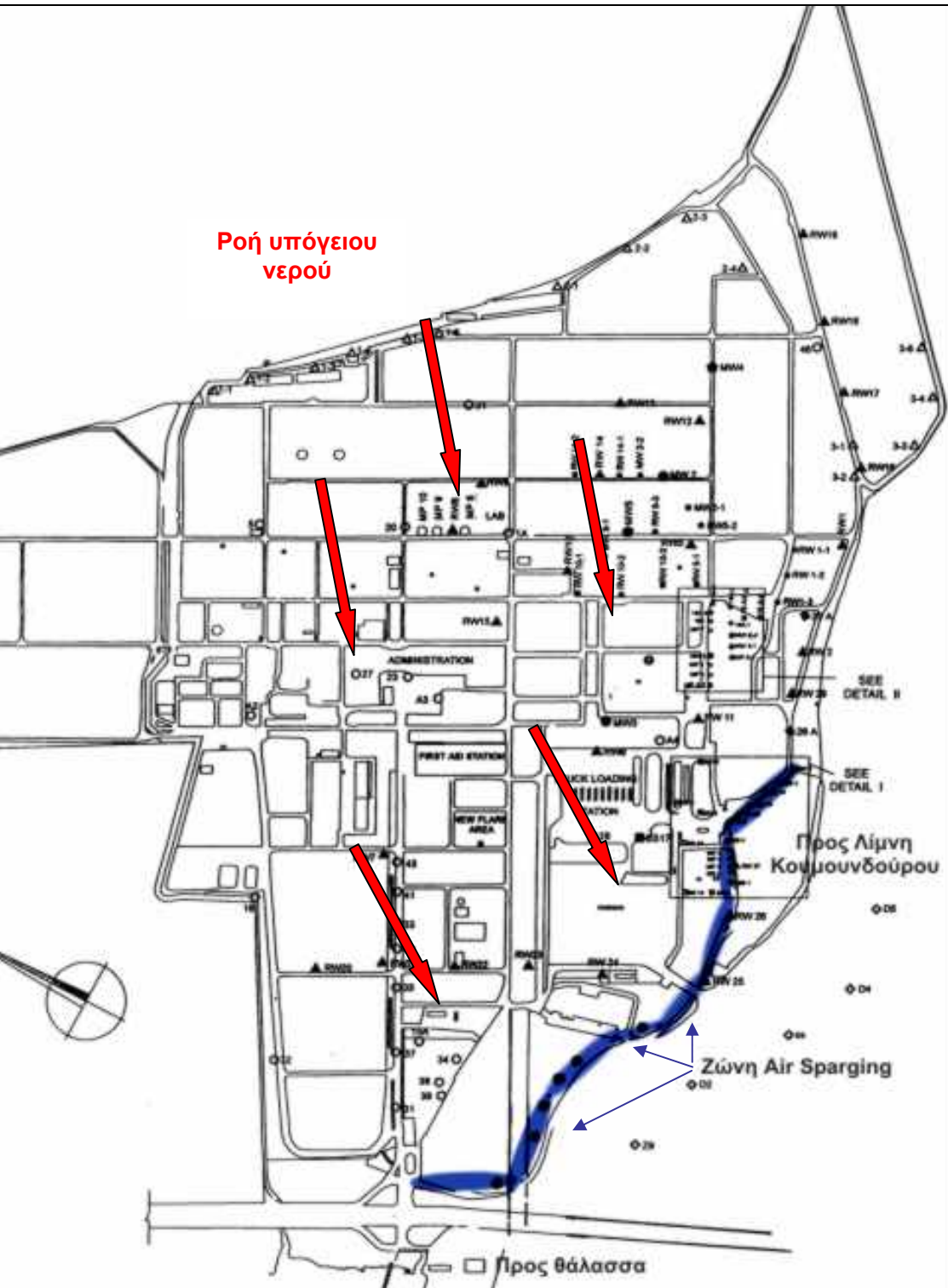
Η επιτυχία της μεθόδου, αν και ήταν απόλυτη όσον αφορά τα συστατικά BTEX και TPH, δεν ήταν ικανοποιητική για το MTBE, δεδομένου ότι δεν κατάφερε να απομακρύνει τις υπάρχουσες ποσότητες από τα υπόγεια ύδατα της περιοχής air sparging, τουλάχιστον μέσα στο εξεταζόμενο χρονικό διάστημα των 5 μηνών. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η περαιτέρω λειτουργία του συστήματος και ίσως η πραγματοποίηση ορισμένων μετατροπών (π.χ. αύξηση της παροχής του διοχετευόμενου αέρα), προκειμένου να εξεταστούν πλήρως όλες οι δυνατότητες επεξεργασίας του υφιστάμενου υδροφορέα με τη συγκεκριμένη τεχνολογία εξυγίανσης. Επίσης, θεωρείται σημαντική η προμήθεια και η εγκατάσταση επιπλέον εξοπλισμού παρακολούθησης του υπεδάφους ή ακόμη καλύτερα η διάνοιξη περισσότερων πηγαδιών παρακολούθησης στη συγκεκριμένη περιοχή, έτσι ώστε να γίνει εφικτή η λεπτομερέστερη παρακολούθηση της λειτουργίας του συστήματος και κατ' επέκταση και της απόδοσής του.

Όσον αφορά το MTBE θεωρείται αναγκαίο να εξεταστούν προσεκτικά και λεπτομερέστερα, προσδιορίζοντας τη συγκέντρωσή τους σε όλη την έκταση του διυλιστηρίου, καθώς αποτελούν έναν αρκετά επικίνδυνο και εύκολα εξαπλώσιμο ρυπαντή. Δεδομένου ότι η υπάρχουσα εμπειρία υποστηρίζει ότι η απομάκρυνσή τους από υπόγειους υδροφορείς είναι δυνατή με την εφαρμογή της τεχνολογίας air sparging, θα πρέπει με τη βοήθεια της υπάρχουσας πιλοτικής μονάδας να εξεταστούν όλες οι υπάρχουσες δυνατότητες. Αν προκύψουν αρνητικά ή μη ικανοποιητικά αποτελέσματα, η προσπάθεια απομάκρυνσής τους θα πρέπει να συνεχιστεί με την εξέταση και αξιολόγηση άλλων τεχνολογιών εξυγίανσης υπογείων υδάτων.

Η περιοχή του διυλιστηρίου στην οποία εφαρμόστηκε η τεχνολογία air sparging αποτελεί, όπως άλλωστε αποδείχτηκε, ιδανικό πεδίο, δεδομένου ότι δεν παρουσιάζει ελεύθερη ελαιώδη φάση και διαθέτει ικανοποιητικά διαπερατό έδαφος. Επίσης, αποτελεί πολύ σημαντικό σημείο των εγκαταστάσεων, καθώς όπως προέκυψε στην περιοχή αυτή η ροή του υπόγειου νερού κατευθύνεται εκτός των ορίων του διυλιστηρίου και συγκεκριμένα προς έναν πολύ ευαίσθητο αποδέκτη, όπως είναι η λίμνη Κουμουνδούρου. Ως εκ τούτου, η επικράτηση ρύπανσης σε αυτήν την περιοχή δύναται να προκαλέσει περαιτέρω περιβαλλοντικά προβλήματα, λόγω των επικρατούντων υδρογεωλογικών συνθηκών.

Παρόμοια χαρακτηριστικά φαίνεται να παρουσιάζει όλη η νοτιοανατολική περιοχή του διυλιστηρίου, όπου ναι μεν δεν παρουσιάζεται ελεύθερη ελαιώδης φάση, αλλά σίγουρα διαπιστώνονται αυξημένες συγκεντρώσεις πετρελαϊκών ρυπαντών μέσα στο υπόγειο νερό, οι οποίες θέτουν σε κίνδυνο την οικολογική ισορροπία των γειτνιαζόντων αποδεκτών (λίμνη Κουμουνδούρου και θάλασσα). Σύμφωνα με την επικρατούσα υπόγεια ροή, η νοτιοανατολική πλευρά των εγκαταστάσεων του διυλιστηρίου αποτελεί διέξοδο του υπόγειου νερού προς τη θάλασσα και την λίμνη Κουμουνδούρου, αυξάνοντας ακόμη περισσότερο τον κίνδυνο ρύπανσης αυτών.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και με δεδομένο ότι η τεχνολογία air sparging είναι ικανή να απαλλάξει τον υπόγειο υδροφόρα της περιοχής από τους βασικότερους υπάρχοντες πετρελαϊκούς ρυπαντές, αξίζει να εξεταστεί η επέκταση του υπάρχοντος συστήματος σε ολόκληρη την νοτιοανατολική πλευρά των εγκαταστάσεων. Μια τέτοιου είδους επέκταση της εφαρμογής της τεχνολογίας air sparging, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί με σχετικά χαμηλό κόστος, μπορεί να αποτελέσει πολύ σημαντικό προστατευτικό



Χάρτης 8: Προτεινόμενη ζώνη air sparging.

Φυσικά, απώτερο στόχο αποτελεί η συνολική εξυγίανση του υπόγειου υδροφορέα της περιοχής, γεγονός το οποίο ταυτίζεται με την εφαρμογή μιας κατάλληλης μεθόδου εξυγίανσης σε όλη την έκτασή του. Η τεχνολογία *air sparging* ναι μεν αποδείχτηκε αποτελεσματική και χρήσιμη, αλλά η πλήρη αποδοχή της ως κατάλληλη μέθοδος εξυγίανσης των υπογείων υδάτων της περιοχής είναι ένα συμπέρασμα το οποίο είναι δύσκολο να προκύψει. Όπως έχει αναφερθεί η έκταση που καλύπτουν οι εγκαταστάσεις του διυλιστηρίου παρουσιάζει έντονη ανομοιογένεια τόσο ως προς τη γεωλογία και την υδρογεωλογία του πεδίου, όσο και ως προς την κατάσταση ρύπανσης που επικρατεί. Βάση αυτού, η εφαρμογή της μεθόδου είναι αδύνατη σε περιοχές όπου παρουσιάζεται ελεύθερη ελαιώδης φάση ή ιδιαίτερα αδιαπέρατος εδαφικός σχηματισμός και έτσι απαιτείται η εξέταση άλλων καταλληλότερων τεχνολογιών εξυγίανσης υπογείων υδάτων. Πέραν τούτου, πρέπει να ληφθεί υπόψη και το γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος του διυλιστηρίου καλύπτεται από μονάδες επεξεργασίας και αποθήκευσης πετρελαίου, καθιστώντας δύσκολη έως αδύνατη την εγκατάσταση και λειτουργία μονάδων επεξεργασίας υπογείων υδάτων ανάμεσα σε αυτές.

Βάση των προαναφερθέντων, παρατίθενται οι ακόλουθες προτάσεις, οι οποίες αφορούν τις εργασίες που πρέπει να πραγματοποιηθούν προκειμένου να γίνει δυνατή η συστηματική, ακριβής και αποτελεσματική εξυγίανση των υπογείων υδάτων της ευρύτερης περιοχής εγκατάστασης και λειτουργίας του διυλιστηρίου Ασπροπύργου:

- Λεπτομερής μελέτη και αποτύπωση της γεωλογίας της περιοχής με την κατασκευή γεωλογικών χαρτών, οι οποίοι θα παρέχουν στοιχεία για τα επιφανειακά αλλά και τα βαθύτερα εδαφικά στρώματα της περιοχής και θα αποτελούν σημαντικό εργαλείο προσδιορισμού πιθανών «δρόμων» διαφυγής ρυπαντών.
- Αναλυτική περιγραφή των επικρατούντων υδρογεωλογικών συνθηκών με την κατασκευή χαρτών αποτύπωσης του υπόγειου υδροφορέα, οι οποίοι θα παρέχουν στοιχεία σχετικά με την ταχύτητα και την κατεύθυνση της υπόγειας ροής και θα αποτελούν εργαλείο πρόβλεψης της κίνησης των υπαρχόντων ρυπαντών.
- Συνέχιση της μελέτης της υφιστάμενης κατάστασης ρύπανσης στο υπέδαφος του διυλιστηρίου με συχνές δειγματοληψίες και αναλύσεις, προκειμένου να γίνουν αντιληπτές πιθανές μεταβολές, οι οποίες είναι αναμενόμενες σε τέτοιου είδους δυναμικά συστήματα.

- Εντοπισμός και ομαδοποίηση των τμημάτων του διυλιστηρίου που παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά (π.χ. ίδια διαπερατότητα, ίδιους ρυπαντές, κτλ) και μπορούν να αντιμετωπιστούν με τον ίδιο τρόπο.
- Περαιτέρω λειτουργία του συστήματος air sparging, αλλά με λεπτομερέστερη παρακολούθηση των επιδράσεων του στις συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο (π.χ. συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου), προκειμένου να γίνει εφικτή η πλήρης μελέτη της τεχνολογίας και της απόδοσής της και ο προσδιορισμός χαρακτηριστικών σημαντικών παραμέτρων του συστήματος (όπως π.χ. ακτίνας επιρροής των πηγαδιών διοχέτευσης αέρα).
- Αξιολόγηση όλων των παραπάνω δεδομένων και μελέτη των δυνατοτήτων εξυγίανσης τόσο των υπογείων υδάτων της περιοχής, όσο και γενικότερα του υπεδάφους (εδαφικού αέρα και εδάφους).

Ακολουθώντας την παραπάνω μεθοδολογία θα γίνει εφικτή η ακριβής καταγραφή των συνθηκών που επικρατούν στο διυλιστήριο Ασπροπύργου και κατ' επέκταση θα αυξηθούν σημαντικά οι δυνατότητες επιτυχούς αντιμετώπισης των υφιστάμενων προβλημάτων ρύπανσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Γιδαράκος, Ε. Σημειώσεις μαθήματος «**Τεχνολογίες εξυγίανσης εδαφών και υπογείων νερών**» Πανεπιστημιακές παραδόσεις, Χανιά, 2003

Γιδαράκος Ε., Πασαδάκης Ν., Κανελοπούλου Γ., Αϊβαλιώτη Μ. «**Αξιολόγηση της υπάρχουσας κατάστασης ρύπανσης σε διυλιστήριο του Ελλαδικού χώρου**», Έκθεση στα πλαίσια του Ερευνητικού προγράμματος «ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΔΙΑΡΡΟΩΝ, ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ», Πολυτεχνείο Κρήτης, 2004.

Κανελλοπούλου Γ., Μεταπτυχιακή διατριβή με θέμα «**Προσδιορισμός και αξιολόγηση ρύπανσης υπεδάφους σε διυλιστήριο πετρελαίου με χρήση τεχνικών fingerprinting και πολυπαραμετρικής ανάλυσης**», Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Νοέμβριος, 2004.

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aivalioti M., Gidakos E., “**Air sparging demonstration in a contaminated petroleum refinery site**”, Proceedings of the “International Conference on Bioremediation of Soil and Groundwater”, Crakow, Poland, 5-8 September, 2004

Gidakos E., “**Monitoring of the hydrocarbons changes in the aquifer of a petroleum refinery**”, Proceedings of the 5th Canadian International Petroleum Conference (55th Annual Technical Meeting), Calgary, Alberta, Canada, June 8 – 10, 2004

Gidakos E., Thomas J., “**Detailed Chemical Characterization of Subsurface Contaminants in Support of Remediation Activities**”, Battelle Report, 1999

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

McCray E. J., Falta W. R. **“Defining the air sparging radius of influence for groundwater remediation”**, Journal of Contaminant Hydrogeology, vol 24, pp 25-52, 1996

Miller, R. R. **“Air sparging - Technology Overview Report”**, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, October 1996

Naval Facilities Engineering Service Center, **“Final Air Sparging Guidance Document”**, August, 2001

Norris, Hinchee, Brown, McCarty, Semprini, Wilson, Kampbell, Reinhard, Bouwer, Borden, Vogel, Thomas, Ward, Kerr R., **“Handbook of Bioremediation”**, Lewis Publishers, 1994

Semer, R. and Reddy, R. K., **“Mechanisms controlling toluene removal from saturated soils during in situ air sparging”**, Journal of Hazardous Materials, October, 1996

Suthersan, S. S. **“Remediation Engineering – Design Concepts”**, Lewis Publishers, 1997

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

United States Environmental Protection Agency, **“MTBE Fact Sheet #2 : Remediation of MTBE Contaminated Soil and Groundwater”**, Office of solid waste and emergency response, 1998

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

enviro.nfesc.navy.mil - Environmental Department of the U.S. Naval Facilities Engineering Service Center

fate.clu-in.org - Field Analytic Technologies Encyclopedia of U.S. Environmental Protection Agency

kpe-kastor.kas.sch.gr – Κέντρο Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης Καστοριάς

soilphysics.okstate.edu – Oklahoma State University, Department of Plant and Soil Sciences

subsurface.inel.gov - Idaho National Engineering and Environmental Laboratory's Subsurface Science Initiative

www.denix.osd.mil – Defense Environmental Network & Information Exchange

www.epa.gov – U.S. Environmental Protection Agency

www.jacksonbottom.org - Jackson Bottom Wetlands Preserve

www.nfesc.navy.mil – Naval Facilities Engineering Service Center, “**Air Sparging Application Guidance Tools**”, 1999

www.phschool.com – Pearson Prentice Hall

www.toxic.usgs.gov – USGS Toxic Substances Hydrology Program

www.water.hut.fi - Department of Civil and Environmental Engineering - Helsinki University of Technology

www.wetwebmedia.com – Wet Web Media