

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ
ΜΑΖΑΣ ΑΠΟ ΥΓΡΑ ΜΗ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ
ΣΕ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΠΟΡΩΔΗ ΔΟΚΙΜΙΑ**

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Από

ΜΠΑΛΙΟΥΚΟ ΣΤΑΥΡΟ
ΠΟΛΙΤΙΚΟ ΜΗΧΑΝΙΚΟ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ :
ΧΡΥΣΙΚΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2012

ΠΑΤΡΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στη παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή διερευνάται το φαινόμενο μεταφοράς μάζας από υγρά μη υδατικής φάσης σε δισδιάστατα πορώδη μέσα με συνθήκες ροής νερού. Εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών “Υδάτινοι Πόροι και Περιβάλλον” του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

Επιβλέπων, διετέλεσε ο Καθηγητής κ. Χρυσικόπουλος Κωνσταντίνος, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω για το ενδιαφέρον, την ουσιαστική καθοδήγηση και τις υποδείξεις του, τόσο κατά την διάρκεια της προετοιμασίας και της εκτέλεσης των πειραματικών δοκιμών, όσο και κατά την συγγραφή του κειμένου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής και συγκεκριμένα τον κ. Στυλιανό Τσώνη, Αναπληρωτή Καθηγητή και τον κ. Μαναριώτη Ιωάννη, Λέκτορα του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών που δέχτηκαν να συμμετάσχουν στην επιτροπή.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την διδάκτορα Συγγούνα Βασιλική και τους μεταπτυχιακούς φοιτητές για την άψογη συνεργασία.

Μπαλιούκος Σταύρος

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της μεταπυχλιακής διατριβής αποτέλεσε η πειραματική μελέτη φαινομένων μεταφοράς μάζας από υγρά μη υδατικής φάσης (NAPLs) σε δισδιάστατα πορώδη δοκίμια. Τα υγρά μη υδατικής φάσης αποτελούνται από υδρογονάνθρακες οι οποίοι διαλύονται μερικώς στο νερό. Αποτελούν τη συχνότερα εμφανιζόμενη πηγή μόλυνσης των υπόγειων υδροφορέων και είναι ιδιαίτερα επιβλαβή για τον άνθρωπο. Ο κύριος διαχωρισμός των NAPLs σε κατηγορίες γίνεται με βάση την πυκνότητά τους σε σύγκριση με αυτή του νερού. Ετσι, υπάρχουν τα Light NAPLs (LNAPLs), τα οποία είναι ελαφρύτερα από το νερό με αποτέλεσμα να επιπλέουν στην επιφάνειά του και τα Dense NAPLs (DNAPLs), τα οποία είναι βαρύτερα από το νερό και διαπερνούν τη μάζα του μέχρι να συναντήσουν κάποιο αδιαπέραστο στρώμα.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από γυάλινα δισδιάστατα πορώδη δοκίμια που είχαν κατασκευαστεί με τη λιθογραφική μέθοδο. Με τη βοήθεια αντλίας τα δοκίμια τροφοδοτούνταν με σταθερή παροχή και σε κατάλληλη χρονική στιγμή γινόταν η εισαγωγή του ρύπου στο δοκίμιο. Στη συνέχεια με τη βοήθεια φωτογραφικής μηχανής λαμβάνονταν στιγμιότυπα σε καθορισμένες χρονικές στιγμές και με γραφικές μεθόδους υπολογιζόταν η μεταφορά μάζας.

Στο πρώτο κεφάλαιο, περιέχονται εισαγωγικά στοιχεία για τη δομή και τη φύση των υγρών μη υδατικής φάσης καθώς και οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον. Επίσης, γίνεται μια σύντομη αναφορά στο φαινόμενο της διαχύσεως και στο πρώτο πείραμα που παρατηρήθηκε η διάχυση από τον Dalton και περιγράφεται με συντομία το πείραμα που διεξήχθη.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται εκτενής περιγραφή όλων των στοιχείων των υγρών μη υδατικής φάσης και αναλύεται η κίνηση των υγρών αυτών σε όλα τα είδη εδάφους. Επίσης, εξηγείται η διαφορετική συμπεριφορά που αυτά εμφανίζουν στα διάφορα μέσα με βάση τις φυσικές τους ιδιότητες και επίσης παρουσιάζονται οι πρώτες μαθηματικές σχέσεις που δικαιολογούν την κίνησή τους αυτή. Στο τέλος του κεφαλαίου αναφέρονται και χημικές διεργασίες που συμβαίνουν στο υπέδαφος και επηρεάζουν την κίνηση των NAPLs.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται το φαινόμενο μεταφοράς μάζας στο νερό αλλά και σε πορώδη μέσα. Αναφέρονται και περιγράφονται οι σημαντικότεροι και απαραίτητοι τύποι που περιγράφουν τη μεταφορά μάζας και αναλύονται όλοι οι όροι

που παίρνουν μέρος στη σύνταξη των τύπων αυτών. Τέλος, αναφέρονται κάποια πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν οι τόποι που περιέχονται στη θεωρία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφεται η προετοιμασία της πειραματικής διαδικασίας και αναφέρεται ο τεχνικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή της. Περιγράφονται όλα τα στάδια του πειράματος με λεπτομέρειες στις διάφορες μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή και τον υπολογισμό των ιδιότητων των δοκιμών. Επίσης, γίνεται περιγραφή της λειτουργίας του προγράμματος Comsol που χρησιμοποιήθηκε κατά το σχεδιασμό των δοκιμών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων. Τα αποτελέσματα αναλύονται και περιγράφονται με λεπτομέρεια προβλήματα που προέκυψαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Τέλος εξάγονται συμπεράσματα και γίνονται υποδείξεις για την περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 : Περιγραφή της κίνησης ενός DNAPL (Waterloo center for Ground Water Ressearch,1989).....	4
Σχήμα 1.2 : Περιγραφή της κίνησης ενός LNAPL (Waterloo center for Ground Water Ressearch,1989).....	4
Σχήμα 1.3 : Σχήμα που περιγράφει τη διάλυση των σταγόνων (Waterloo center for Ground Water Ressearch,1989).....	5
Σχήμα 2.1 : Αναπαράσταση ενός LNAPL στο υπέδαφος (Ιστοσελίδα toxics.usgs.gov).....	10
Σχήμα 2.2 : Αναπαράσταση ενός DNAPL στο υπέδαφος (Ιστοσελίδα www.cmdlet.com-Jacob Bear).....	12
Σχήμα 2.3 : Σχηματική αναπαράσταση ενός NAPL στην ακόρεστη ζώνη (Waterloo Center for Groundwater Research,1991).....	14
Σχήμα 2.4 : Σχηματική αναπαράσταση ενός DNAPL στο υπέδαφος (U.S. EPA,1993).....	15
Σχήμα 2.5 : Συνθήκες διαβρέξιμων υγρών (Waterloo Center for Groundwater Research,1991).....	16
Σχήμα 2.6 : Αναπαράσταση της διάταξης του πειράματος (Kamon M. et al., 2004).....	17
Σχήμα 2.7 : Αποτελέσματα πειράματος και προσομοίωσης σε H/Y (Kamon M. et al., 2004).....	19
Σχήμα 2.8 : Αποτελέσματα πειράματος και προσομοίωσης σε H/Y (Kamon M. et al., 2004).....	20
Σχήμα 2.9 : Σχηματική αναπαράσταση ενός DNAPL σε ρηγματωμένο-αδιαπέραστο μέσο (Pankow, 1988).....	21
Σχήμα 2.10 : Τυπική καμπύλη σχετικής διαπερατότητα (Waterloo Center for Groundwater Research,1991).....	26
Σχήμα 3.1 : Παράγοντες που επηρεάζουν τη ταχύτητα ροής νερού δια μέσου πορώδους μέσου (Πηγή: Ιστοσελίδα www.cee.vt.edu)...	35
Σχήμα 3.2 : Επίδραση διάχυσης και μηχανικής διασποράς στο λόγο C/C ₀ ..	37
Σχήμα 3.3 : Εξάπλωση της ουσίας με κανονική κατανομή.....	37

Σχήμα 3.4 : Αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος πορώδους μέσου.....	38
Σχήμα 4.1 : Πειραματική Διάταξη.....	53
Σχήμα 4.2 : Μοντέλο με ακτίνα κόκκων 0,08 cm.....	56
Σχήμα 4.3 : Μοντέλο με ακτίνα κόκκων 0,05 cm.....	57
Σχήμα 4.4 : Μοντέλο με σύνθετο πορώδες.....	57
Σχήμα 4.1: Αρχική οθόνη Comsol.....	58
Σχήμα 4.2: Έτοιμο δοκίμιο στο Comsol.....	59
Σχήμα 4.3: Καθορισμός συνοριακών συνθηκών.....	60
Σχήμα 4.4: Μοντέλο χωρισμένο σε πεπερασμένα.....	60
Σχήμα 4.5: Αποτελέσματα Δοκιμίου.....	61
Σχήμα 4.6: Αποτελέσματα σύνθετου δοκιμίου.....	62
Σχήμα 4.7: Χονδρόκοκκο πορώδες.....	71
Σχήμα 4.8: Λεπτόκοκκο πορώδες.....	71
Σχήμα 4.9: Πείραμα Darcy από iстoсeлiдa interpore.org.....	72
Σχήμα 5.1 : Διάγραμμα μάζας 'πηγής' TCE – χρόνου.....	85
Σχήμα 5.10: Διάγραμμα μάζας 'πηγής' TCE – χρόνου.....	92

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 : Φωτογραφία στην οποία φαίνεται η ελαιώδης φάση των NAPLs (Ιστοσελίδα KidCyber,2007).....	1
Εικόνα 1.2 : Διαβρωμένη υπόγεια δεξαμενή (Ιστοσελίδα U.S Environmental Protection Agency,2007).....	3
Εικόνα 4.1: Σκοτεινό κουτί με υπεριώδες φως.....	64
Εικόνα 4.2: Τελικό στάδιο φωτολιθογραφικής μεθόδου.....	65
Εικόνα 4.3: Οθόνη λειτουργίας φούρνου.....	67
Εικόνα 4.4: Φούρνος.....	68
Εικόνα 4.5: Τελειοποιημένο δοκίμιο.....	69
Εικόνα 4.6: Πειραματική Διάταξη.....	75
Εικόνα 4.7: Κοντινή λήψη πειράματικης διάταξης.....	76
Εικόνα 4.8: Διεξαγωγή πειράματος.....	77
Εικόνα 5.9: Φωτογραφία σε χρόνο t = 0 min.....	80
Εικόνα 5.10: Φωτογραφία σε χρόνο t = 35 min.....	81
Εικόνα 5.11: Φωτογραφία σε χρόνο t = 60 min.....	81
Εικόνα 5.12: Φωτογραφία σε χρόνο t = 85 min.....	82
Εικόνα 5.13: Φωτογραφία σε χρόνο t = 110 min.....	82
Εικόνα 5.14: Φωτογραφία σε χρόνο t = 135 min.....	83
Εικόνα 5.15: Φωτογραφία σε χρόνο t = 185 min.....	83
Εικόνα 5.16: Φωτογραφία σε χρόνο t = 235 min.....	84

Εικόνα 5.17: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 300$ min.....	84
Εικόνα 5.18: Πείραμα μετά την εισαγωγή αέρα.....	86
Εικόνα 5.19: Αρχική Φωτογραφία τελευταίου πειράματος.....	87
Εικόνα 5.20: Φωτογραφία σε σύντομο χρονικό διάστημα.....	87
Εικόνα 5.21: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 0$	88
Εικόνα 5.22: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 25$ min.....	88
Εικόνα 5.23: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 55$ min.....	89
Εικόνα 5.24: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 210$ min.....	89
Εικόνα 5.25: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 355$ min.....	90
Εικόνα 5.26: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 400$ min.....	90
Εικόνα 5.27: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 610$ min.....	91

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 : Τα πιο συχνά εμφανιζόμενα NAPLs και οι πηγές τους	2
Πίνακας 2.1 : Πιο συχνά εμφανιζόμενα LNAPLs.....	10
Πίνακας 2.2 : Πιο συχνά εμφανιζόμενα DNAPLs.....	12
Πίνακας 2.3 : Σημαντικότερες σχέσεις περιγραφής της κίνησης των NAPLs στο υπέδαφος.....	24
Πίνακας 3.1 : Συντελεστές μοριακής διαχύσεως στο νερό στους 25 °C....	33
Πίνακας 4.1: Πρόγραμμα πυροσυσσωμάτωσης.....	67
Πίνακας 5.1 : Αριθμητικά αποτελέσματα πειράματος	84
Πίνακας 5.2 : Αριθμητικά αποτελέσματα πειράματος.....	91

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	iv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	viii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	ix
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	1
1.2 ΔΙΑΡΡΟΗ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ.....	3
1.3 ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΕΩΣ.....	6
1.4 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΥΓΡΑ ΜΗ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ	
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ – ΥΓΡΑ ΜΗ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ	8
2.2 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ NAPLs.....	9
2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ NAPLs.....	13
2.3.1 Κίνηση σε πορώδη μέσα.....	13
2.3.2 Περιγραφή της κατακόρυφης κίνησης NAPLs σε συνθήκες με ή χωρίς ροή.....	17
2.3.3 Κίνηση σε ρηγματωμένα-αδιαπεραστα μέσα.....	21
2.4 ΜΕΓΕΘΗ ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ	23
2.4.1 Πίεση Λόγω Τριχοειδών Φαινομένων.....	23
2.4.2 Νόμος του DARCY.....	25
2.4.3 Σχετική διαπερατότητα.....	26
2.4.4 Σχέσεις για το ‘παραμένων’ NAPL.....	27
2.5 ΧΗΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ	28
2.5.1 Εξάτμιση.....	28
2.5.2 Υδρόλυση.....	29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΔΙΑΧΥΣΗ– ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	30
3.2 ΔΙΑΧΥΣΗ (DIFFUSION).....	31
3.3 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ ΛΟΓΩ ΡΟΗΣ (ADVECTION).....	34
3.4 ΔΙΑΣΠΟΡΑ (DISPERSION).....	35
3.4.1 Μηχανική διασπορά (mechanical dispersion).....	35
3.4.2 Υδροδυναμική διασπορά (hydrodynamic dispersion).....	36
3.5 ΕΞΙΣΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ (ADVECTION – DISPERSION EQUATION).....	38
3.6 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ	41
3.6.1 Μετατροπή εξίσωσης μεταφοράς μάζας λόγω προσρόφησης της ουσίας στους εδαφικούς κόκκους.....	41
3.6.2 Μετατροπή εξίσωσης μεταφοράς μάζας λόγω αποσύνθεσης.....	42
3.7 ΑΡΙΘΜΟΣ PECLET.....	43
3.8 ΑΡΧΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	45
3.8.1 Συνοριακές συνθήκες τύπου I.....	45
3.8.2 Συνοριακές συνθήκες τύπου II.....	46
3.8.3 Συνοριακές συνθήκες τύπου III.....	47
3.8.4 Λύσεις μονοδιάστατης και δισδιάστατης εξίσωσης μεταφοράς μάζας για συχνά εμφανιζόμενες περιπτώσεις.....	48
3.8.4.1 Στιγμιαία εισαγωγή μικρής ποσότητας σε μονοδιάστατο πεδίο ροής.....	48
3.8.4.2 Συνεχής εισαγωγή ουσίας σε δισδιάστατο πεδίο ροής...	48
3.8.4.3 Στιγμιαία εισαγωγή μικρής ποσότητας σε δισδιάστατο πεδίο ροής.....	49
3.9 ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ ΑΠΟ NAPLs.....	51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	52
4.2 ΥΛΙΚΑ -ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	53

4.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	56
4.3.1 Σχεδιασμός γυάλινων δοκιμών.....	56
4.3.2 Κατασκευή γυάλινων δοκιμών.....	
4.3.3 Υπολογισμοί χαρακτηριστικών γυάλινων δοκιμών.....	70
4.4 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	79
5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	80
5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ....	93
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	96

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Υγρά μη υδατικής φάσης (Non Aqueous Phase Liquids) ονομάζονται υδρογονάνθρακες οι οποίοι διαλύονται μερικώς στο νερό. Τα υγρά αυτά παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τους υπόλοιπους υγρούς ρυπαντές. Ενώ οι περισσότεροι ρυπαντές κατά τη διάλυσή τους είναι αόρατοι στο γυμνό μάτι και ταξιδεύουν με τη ροή του νερού, τα NAPLs σχηματίζουν μια ορατή, ζεχωριστή και ελαιώδη φάση ενώ η κίνησή τους ορίζεται από τους νόμους της βαρύτητας, της άνωσης και δυνάμεων από τριχοειδή φαινόμενα.



Εικόνα 1.1 : Φωτογραφία στην οποία φαίνεται η ελαιώδης φάση των NAPLs
(Ιστοσελίδα KidCyber, 2007)

Τα υγρά αυτά είναι οι κυριότεροι ρυπαντές των υπόγειων υδροφορέων, όχι μόνο εξαιτίας των ποσοτήτων που δέχονται συνεχώς αλλά και λόγω του ότι μπορούν να αποτελούν μια μακροχρόνια πηγή μόλυνσης. Επίσης ο καθαρισμός μιας περιοχής που έχει μολυνθεί είναι αρκετά δύσκολος εφόσον απαιτείται λεπτομερής γνώση της μολυσμένης περιοχής αλλά και τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν είναι αρκετά κοστοβόρα.

Ο διαχωρισμός των NAPLs σε κατηγορίες γίνεται με βάση την πυκνότητά τους σε σύγκριση με αυτή του νερού. Έτσι, υπάρχουν τα Light NAPLs (LNAPLs), τα οποία είναι ελαφρύτερα από το νερό με αποτέλεσμα να επιπλέουν στην επιφάνειά του

και τα Dense NAPLs (DNAPLs), τα οποία είναι βαρύτερα από το νερό και διαπερνούν τη μάζα του μέχρι να συναντήσουν κάποιο αδιαπέραστο στρώμα.

Τα κυριότερα LNAPLs είναι αυτά που σχετίζονται με προϊόντα της βιομηχανίας πετρελαίου όπως είναι η βενζίνη, τα καύσιμα DIESEL, το ξυλένιο (BTEX), το τολουόλιο και άλλοι αρωματικοί υδρογονάνθρακες. Τα κυριότερα DNAPLs είναι αυτά που προέρχονται από τη βιομηχανία μετάλλου, χημικών, εντομοκτόνων, επεξεργασίας ξύλου και από οποιαδήποτε δραστηριότητα σχετίζεται με χλωριούχους διαλύτες. Γνωστά DNAPLs είναι το τριχλωροαιθυλένιο (TCE), το τετραχλωρίδιο του άνθρακα, το χλωρίδιο του μεθυλενίου, το περχλωροαιθυλένιο (PCE ή Perc) κ.α.

Πίνακας 1.1 : Τα πιο συχνά εμφανιζόμενα NAPLs και οι πηγές τους

Rank	Compound	Common sources
1*	Trichloroethylene	Dry cleaning; metal degreasing
2*	Lead	Gasoline (prior to 1975); mining; construction material (pipes); manufacturing
3*	Tetrachloroethylene	Dry cleaning; metal degreasing
4*	Benzene	Gasoline; manufacturing
5*	Toluene	Gasoline; manufacturing
6	Chromium	Metal plating
7*	Methylene chloride	Degreasing; solvents; paint removal
8	Zinc	Manufacturing; mining
9*	1,1,1-Trichloroethane	Metal and plastic cleaning
10	Arsenic	Mining; manufacturing
11*	Chloroform	Solvents
12*	1,1-Dichloroethene	Degreasing; solvents
13*	1,2-Dichloroethene, trans -	Transformation product of 1,1,1-trichloroethane
14	Cadmium	Mining; plating
15	Manganese	Manufacturing; mining; occurs in nature as oxide
16	Copper	Manufacturing; mining
17*	1,1-Dichloroethene	Manufacturing
18*	Vinyl chloride	Plastic and record manufacturing
19	Barium	Manufacturing; energy production
20*	1,2-Dichloroethane	Metal degreasing; paint removal
21*	Ethylbenzene	Styrene and asphalt manufacturing; gasoline
22	Nickel	Manufacturing; mining
23*	Di(2-ethylhexyl)phthalate	Plastics manufacturing
24*	Xylenes	Solvents; gasoline
25*	Phenol	Wood treating; medicines

Πηγή : Ιστοσελίδα Environmental Health Perspective

1.2 ΔΙΑΡΡΟΗ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ

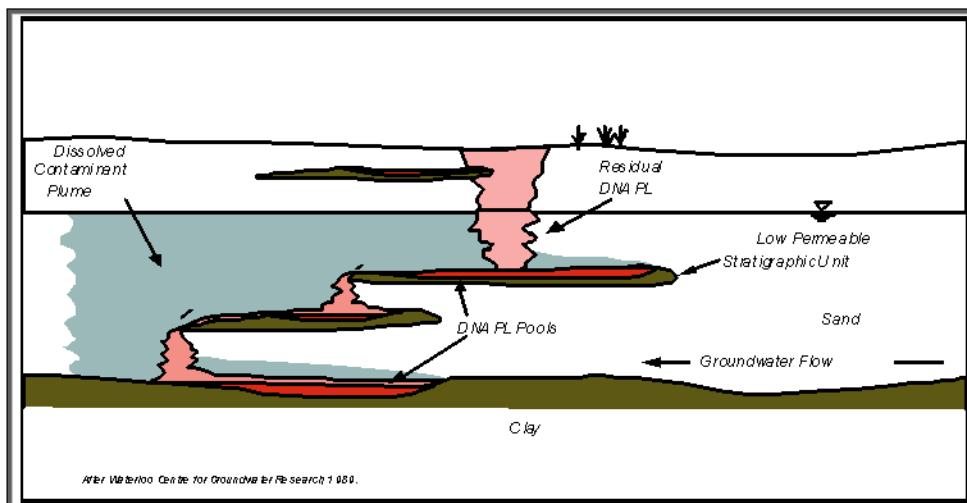
Τα NAPLs αποτελούν μια μακρόχρονη πηγή μόλυνσης, λόγω του ότι διαλύονται με αρκετά αργούς ρυθμούς, που δημιουργείται κυρίως λόγω διαφροών από αποθηκευτικούς χώρους (υπόγειους ή υπέργειους), από αγωγούς, από εργοστάσια (κυρίως εργοστάσια πετροχημικών) και από τυχαία συμβάντα (ατυχήματα). Οι περισσότερες από αυτές τις διαφροές οφείλονται σε λάθος συντήρηση των εγκαταστάσεων αποθήκευσης ή μεταφοράς και στην αμέλεια των υπευθύνων.



Εικόνα 1.2 : Διαφρωμένη υπόγεια δεξαμενή
(Ιστοσελίδα U.S Environmental Protection Agency, 2007)

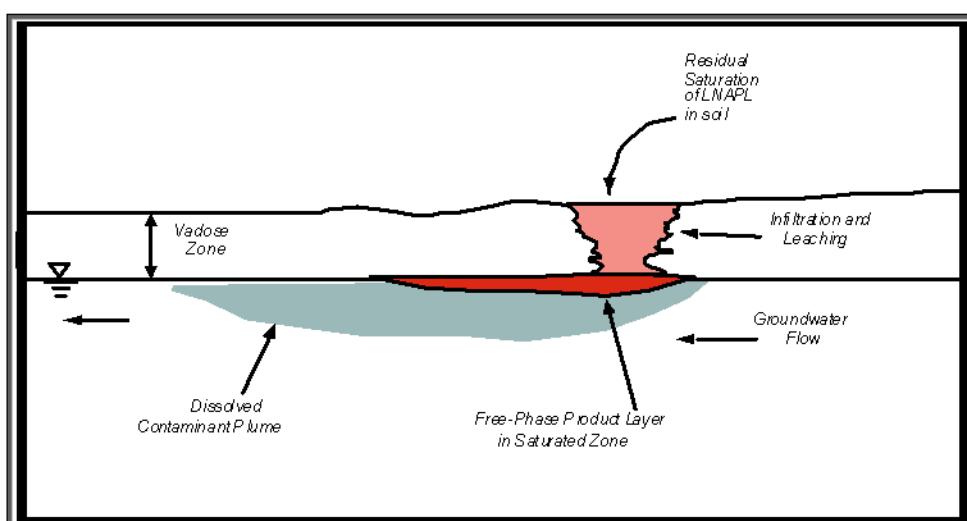
Μετά τη διαφροή τα NAPLs εισέρχονται στο έδαφος όπου παρατηρείται διαφορετική συμπεριφορά των DNAPLs και των LNAPLs. Τα DNAPLs στο έδαφος κινούνται κατακόρυφα με τη βοήθεια των πόρων και της βαρύτητας στην ακόρεστη ζώνη. Εκεί με την παρουσία αέρα ένα μέρος του υγρού μετατρέπεται σε αέριο και έτσι δημιουργείται ένα ‘νέφος’ γύρω από τη περιοχή του υγρού. Με την είσοδό τους στην κορεσμένη ζώνη, που επιτυγχάνεται λόγω της εξάσκησης της απαραίτητης πίεσης στην επιφάνεια του νερού (είναι πιο βαριά από το νερό), συνεχίζουν την κατακόρυφη κίνησή τους μέχρι να συναντήσουν κάποιο αδιαπέρατο στρώμα. Στο σημείο αυτό παρατηρείται μια οριζόντια εξάπλωση των DNAPLs καθώς και δημιουργία πηγών μόλυνσης λόγω της συσσώρευσης ποσότητας DNAPL, το μέγεθος των οποίων είναι ανάλογο της διαφροής που αρχικά συνέβη. Στη συνέχεια με τη

βοήθεια της ροής του νερού αρχίζει η διάλυση των πηγών αυτών και η μεταφορά μάζας, ένα φαινόμενο που θα είναι το κύριο αντικείμενο της εργασίας αυτής, τόσο βιβλιογραφικά όσο και πειραματικά.



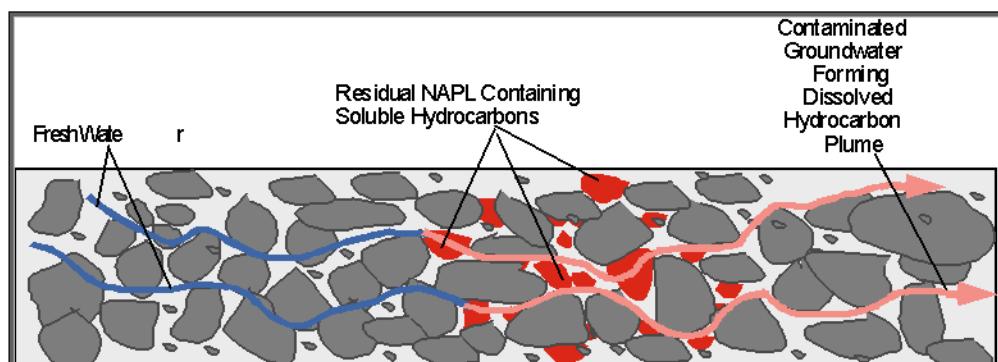
Σχήμα 1.1 : Περιγραφή της κίνησης ενός DNAPL
(Waterloo center for Ground Water Ressearch, 1989)

Η κίνηση των LNAPLs στη ακόρεστη ζώνη δεν παρουσιάζει διαφορές με την κίνηση των DNAPLs. Η διαφορά μεταξύ των δύο τύπων NAPLs είναι στο ότι τα LNAPLs δεν εξασκούν την απαραίτητη πίεση στο νερό της κορεσμένης ζώνης και έτσι η διείσδυσή τους σταματά στο ύψος του υδροφόρου ορίζοντα όπου και παρατηρείται η δημιουργία πηγών μόλυνσης. Ακόμη λόγω του ότι η διείσδυση των LNAPLs είναι μικρότερη αυτής των DNAPLs η διάλυση και η μεταφορά μάζας είναι σχετικά περιορισμένης κλίμακας (μικρότερη επιφάνεια έρχεται σε επαφή με το νερό).



Σχήμα 1.2 : Περιγραφή της κίνησης ενός LNAPL
(Waterloo center for Ground Water Resresearch, 1989)

Παρά τη σημαντική διαφορά μεταξύ των LNAPLs και DNAPLs, η κίνηση και των δύο εξαρτάται από τους ίδιους παράγοντες, όπως είναι το ιξώδες του υγρού, η αλληλεπίδραση με τους εδαφικούς κόκκους και οι συνθήκες πίεσης που επικρατούν. Κοινό στοιχείο ακόμη αποτελεί ότι κατά τη κατακόρυφη κίνησή τους λόγω της αλληλεπίδρασης με τους κόκκους του εδάφους μένουν πάνω σε αυτούς υπολείμματα (σταγόνες), τα οποία λόγω του μεγέθους τους αλλά και της αναλογικά μεγαλύτερης επιφάνειας επαφής με το νερό από ότι έχουν οι πηγές αποτελούν βραχυχρόνιες πηγές μόλυνσης και διαλύνονται αρκετά γρήγορα.



Σχήμα 1.3 : Σχήμα που περιγράφει τη διάλυση των σταγόνων
(Waterloo center for Ground Water Research, 1989)

1.3 ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΕΩΣ

Διάχυση ορίζεται το φαινόμενο της αυθόρμητης ανάμιξης δύο ή περισσοτέρων χημικών ουσιών, που βρίσκονται σε επαφή και σχηματίζουν με τη πάροδο του χρόνου μίγμα ή διάλυμα.

Ένας από τους πρώτους που μελέτησαν το φαινόμενο της διάχυσης ήταν ο Τζον Ντάλτον (Αγγλος χημικός 1766-1844), ο οποίος πειραματίστηκε με αέρια. Για το σκοπό αυτό γέμισε δύο φιάλες με αέρια, τη μια με υδρογόνο (H) και την άλλη με διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και τις ένωσε με ένα μακρύ κάθετο σωλήνα έτσι ώστε το πιο ελαφρύ H να βρίσκεται προς τα πάνω και το CO_2 να βρίσκεται προς τα κάτω. Με τη πάροδο αρκετών ωρών τα δύο αέρια αναμίχθηκαν πλήρως γεγονός που αντίκειται στους νόμους της βαρύτητας.

Ένα από τα πιο σημαντικά θέματα στο πρόβλημα της μόλυνσης των υδροφορέων από NAPLs είναι η ανάλυση της διάχυσης του υγρού με τη βοήθεια του νερού στο μέσο που βρίσκεται. Για το λόγο αυτό η ανάλυση του θέματος της διάχυσης γίνεται με αρκετά εκτενή αναφορά τόσο στη γενική θεωρία του φαινομένου, όπου παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις νόμοι που περιγράφουν το φαινόμενο και όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την πλήρη κατανόησή του, αλλά και εξειδικεύεται πάνω σε σημεία που θα μελετηθούν και πειραματικά. Η εκτενής αυτή ανάλυση του φαινομένου της διάχυσης είναι σημαντική γιατί με τον τρόπο αυτό είναι κανείς σε θέση οποιαδήποτε στιγμή να γνωρίζει το μέγεθος της μόλυνσης από NAPLs και με τον τρόπο αυτό να είναι δυνατή η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου καθαρισμού της εκτεθειμένης σε μόλυνση περιοχής.

1.4 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Στόχος του πειράματος είναι η μελέτη της διάλυσης μιας ‘πηγής’ NAPL σε ένα πορώδες μέσο σε συνθήκες ροής νερού και στη συνέχεια σε συνθήκες ροής διαλύματος κολλοειδών. Η διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί αποτελείται ουσιαστικά από γυάλινα δισδιάστατα δοκίμια που θα προσομοιώνουν τους πόρους του εδάφους, εντός των οποίων θα δημιουργηθεί η ‘πηγή’. Οι μετρήσεις που θα παρθούν θα μετρηθούν και στη συνέχεια θα γίνει προσπάθεια ερμηνείας των αποτελεσμάτων και σύγκρισης των δύο διαφορετικών μέσων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διάλυση της ‘πηγής’.

Τα NAPL τα οποία θα χρησιμοποιηθούν και είναι διαθέσιμα για το πείραμα είναι το τριχλωροαιθυλένιο (TCE) το οποίο είναι DNAPL, με μοριακό τύπο C_2HCl_3 . Η πυκνότητα του TCE είναι 1,463 g/ml και το μοριακό του βάρος 131,4 g/mol.

Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί χονδρικά, είναι ότι αρχικά θα γίνει εισαγωγή νερού μέχρις ότου κορεστεί το δοκύμιο και αφού αποκατασταθεί μια ομοιόμορφη ροή θα γίνει εισαγωγή του TCE. Στη συνέχεια, με φωτογραφική μηχανή θα λαμβάνονται φωτογραφίες σε τακτά χρονικά διαστήματα για την παρακολούθηση του φαινομένου και για την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Αντίστοιχα, θα επαναληφθεί το πείραμα για την περίπτωση της διάλυσης της ‘πηγής’ με το διάλυμα κολλοειδών και τα αποτελέσματα θα συγκριθούν.

Τα αποτελέσματα θα βασιστούν στην οπτική παρακολούθηση του φαινομένου. Με τη χρήση κατάλληλου προγράμματος θα υπολογίζεται σε κάθε χρονική στιγμή το εμβαδό της ‘πηγής’ και θα μετατρέπεται σε μάζα. Με τον τρόπο αυτό θα υπολογίζεται σε κάθε στιγμή η μάζα της ουσίας που διέφυγε.

Όλες οι απαραίτητες διαδικασίες και διεργασίες που επιβάλλονται για τη σωστή διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας αναλύονται με λεπτομέρεια στα επόμενα κεφάλαια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΓΡΑ ΜΗ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ – ΥΓΡΑ ΜΗ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ

Όπως αναγέρθηκε και στην εισαγωγή, Υγρά Μη Υδατικής Φάσης (Non Aqueous Phase Liquids → NAPLs) ονομάζονται υγρά τα οποία αποτελούνται από υδρογονάνθρακες και το κυριότερο χαρακτηριστικό τους είναι ότι δεν διαλύονται εύκολα στο νερό ή άλλα δημιουργούν μια ξεχωριστή ελαιώδη φάση. Αυτό το χαρακτηριστικό τους είναι εκείνο το οποίο τα διακρίνει από τους υπόλοιπους υγρούς ρυπαντές, οι οποίοι κατά τη διάλυση τους στο νερό μετακινούνται μ' αυτό και είναι αόρατα στο γυμνό μάτι. Αντίθετα τα NAPLs λόγω της ελαιώδης φάσης που δημιουργούν είναι ορατά στο γυμνό μάτι και η κίνησή τους εξαρτάται από τους νόμους της βαρύτητας, της άνωσης και δυνάμεων από τριχοειδή φαινόμενα. Η κίνησή τους αυτή είναι αρκετά περίπλοκη και μια σύντομη περιγραφή της είναι ότι αρχικά αμέσως μετά τη διαφροή τους τα NAPLs κινούνται κατακόρυφα μέσω των κενών του εδάφους. Η κατακόρυφη κίνηση εξαρτάται από το είδος του NAPL που διαφέρει και το είδος του εδάφους στο οποίο το NAPL κινείται. Όταν η κατακόρυφη κίνηση σταματήσει τότε παρατηρείται η δημιουργία ‘πηγών’ (pools). Αμέσως μετά και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, που θα αναπτυχθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου, παρατηρούνται φαινόμενα διάχυσης και μεταφοράς μάζας μέσω του υπόγειου νερού.

Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί μεγάλο βάρος στην έρευνα πάνω στα NAPLs και στην ανάπτυξη μεθόδων καθαρισμού των προσβεβλημένων από αυτά περιοχών. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται προσπάθεια συγκέντρωσης όλων των απαραιτήτων στοιχείων που έχουν προέλθει από τις έρευνες αυτές και αφορούν στην ανάλυση της κίνησης των NAPLs (κατακόρυφη και οριζόντια) κάτω από διαφορετικές συνθήκες σε κάθε περίπτωση, έτσι ώστε να επιτευχθεί η όσο το δυνατόν καλύτερη κατανόηση του φαινομένου που θα αποτελέσει τη βάση για την εφαρμογή της πειραματικής διαδικασίας.

Η θεωρία που περιλαμβάνεται στο κεφαλαίο αυτό, πέρα από τη χρησιμότητά της στη συγκεκριμένη εργασία, αποτελεί το πιο σημαντικό βήμα για την αντιμετώπιση της μόλυνσης των υπόγειων νερών από NAPLs. Ο λόγος είναι ότι με την ανάλυση της κίνησης των NAPLs μπορεί να επιτευχθεί μια εκτίμηση του μεγέθους της μόλυνσης και της εξάπλωσής της οποιαδήποτε χρονική στιγμή

επιθυμείται, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου για την αντιμετώπιση της μόλυνσης.

2.2 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ NAPLs

Αν και τα NAPLs σχετίζονται με πολλούς τομείς της βιομηχανίας και έχουν ένα μεγάλο φάσμα φυσικών ιδιοτήτων, ο κυριότερος διαχωρισμός τους προκύπτει με βάση το κριτήριο της βαρύτητάς τους σε σχέση με το νερό. Με τον τρόπο αυτό χωρίζονται σε ‘Πυκνά’ NAPLs (Dense NAPLs → DNAPLs) και σε ‘Έλαφρά’ NAPLs (Light NAPLs → LNAPLs). Τα LNAPLs έχουν μικρότερη πυκνότητα από αυτή του νερού με αποτέλεσμα όταν συναντούν τον υδροφόρο ορίζοντα να σταματούν τη διείσδυσή τους εκεί και να επιπλέουν πάνω από αυτόν. Από την άλλη πλευρά, τα DNAPLs έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη αυτής του νερού και έτσι μπορούν να βυθιστούν αρκετά βαθιά μέσα στην κορεσμένη ζώνη. Το συγκεκριμένο σύστημα κατάταξης αν και θεωρείται αρκετά απλό, αφού στηρίζεται μόνο στην πυκνότητα των υγρών αυτών, είναι αρκετά χρήσιμο εφόσον μπορεί να εξηγήσει και να δικαιολογήσει τον τρόπο με τον οποίο κινούνται στο υπέδαφος τα NAPLs.

Τα LNAPLs σχετίζονται κυρίως με την παραγωγή, διάλιση και διανομή του πετρελαίου και των παραγόμενων από αυτό προϊόντων. Τυχαία συμβάντα και διαρροές από βενζίνη, κηροζίνη, καύσιμα ντίζελ (diesel) είναι συνδεδεμένα με τις πιο γνωστές πηγές από LNAPLs τα οποία μολύνουν τα υπόγεια νερά.

Όταν ένα LNAPL διαφρεύσει στην επιφάνεια του εδάφους ξεκινά την κατακόρυφη κίνηση διαμέσου των πόρων του εδάφους μέσα στην ακόρεστη ζώνη, με μόνη κινητήρια δύναμη τη βαρύτητα. Στο σημείο που συναντά τον υδροφόρο ορίζοντα η κατακόρυφη κίνηση σταματά και εκεί δημιουργείται μια πηγή από το LNAPL. Το νερό που ρέει κάτω από την πηγή αυτή με την πάροδο των χρόνου διαλύει τη πηγή αυτή, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό στο σημείο κάτω απ' την πηγή μια περιοχή με μολυσμένο νερό που εξαπλώνεται με τη βοήθεια της ροής. Τα πιο συχνά εμφανιζόμενα LNAPLs αναφέρονται στον Πίνακα 2.1.

Τα LNAPLs θεωρούνται σαν μια ευκολότερα αντιμετωπίσιμη πηγή μόλυνσης από ότι τα DNAPLs. Ο λόγος είναι ότι τα LNAPLs δεν διεισδύουν πολύ βαθιά στο υπέδαφος και είναι σχετικά βιοδιασπώμενα κάτω από κανονικές συνθήκες, με

αποτέλεσμα λόγω του τελευταίου μικρής κλίμακας διαρροές να καθαρίζονται μέσω των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν μέρος στο υπέδαφος.

Πίνακας 2.1 Πιο συχνά εμφανιζόμενα LNAPLs

ΒΕΝΖΟΛΗ

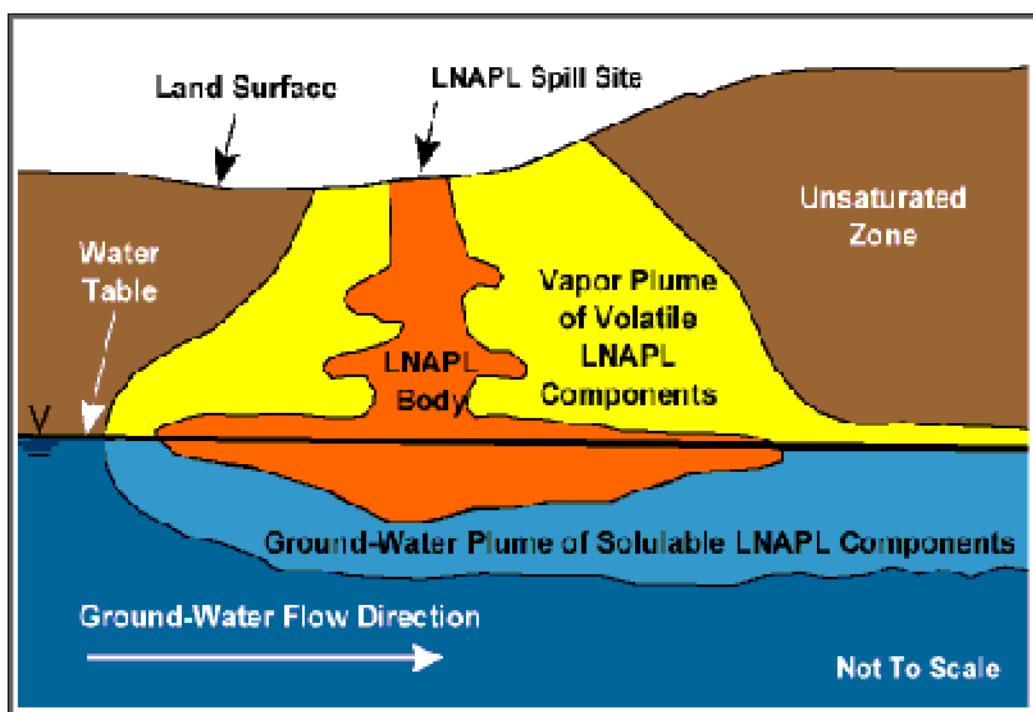
ΑΙΘΥΛΙΚΗ ΒΕΝΖΟΛΗ

ΤΟΛΟΥΟΛΙΟ

ΕΥΛΕΝΙΟ

ΝΑΦΘΑΛΙΝΗ

ΓΕΝΙΚΑ ΑΡΩΜΑΤΙΚΟΙ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ

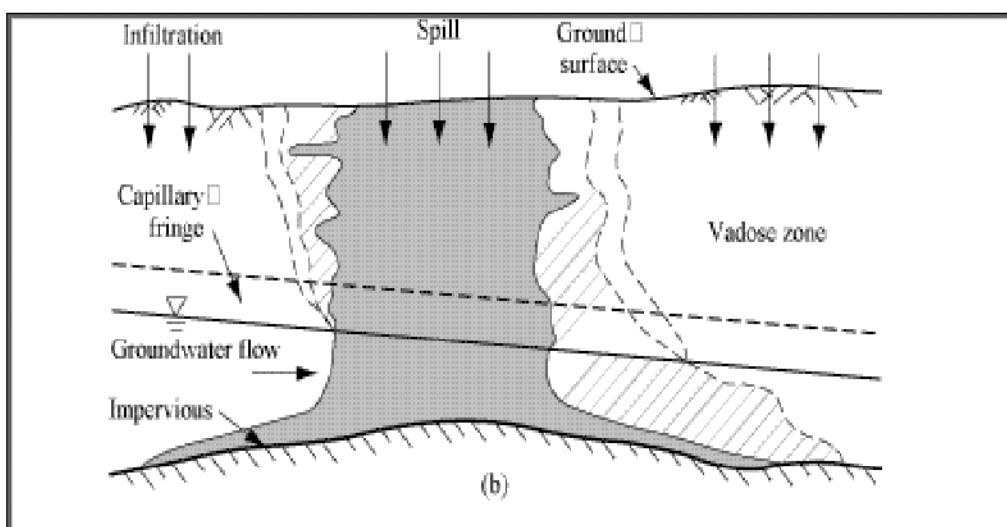


Σχήμα 2.1 : Αναπαράσταση ενός LNAPL στο υπέδαφος (Ιστοσελίδα toxics.usgs.gov)

Τα DNAPLs σχετίζονται με μεγάλη ποικιλία βιομηχανικών δραστηριοτήτων, οι κυριότερες των οποίων είναι η βιομηχανία επεξεργασίας μετάλλων, παρασκευής χημικών και γενικά οποιασδήποτε δραστηριότητας η οποία περιλαμβάνει τη χρήση χλωριούχων ουσιών, εργοστάσια εντομοκτόνων και επεξεργασίας ξύλου. Τα κυριότερα DNAPLs παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2.

Μετά τη διαφροή τους στο υπέδαφος τα DNAPLs ξεκινούν τη κατακόρυφη κίνησή τους διαμέσου και της ακόρεστης ζώνης. Η κίνηση αυτή συνεχίζει και στη κορεσμένη ζώνη μέχρι ή να εξαντληθεί η ποσότητα που διέφυγε αρχικά μέσα στους πόρους του εδάφους όπου και παγιδεύεται, ή αν η ποσότητα του DNAPL είναι αρκετά μεγάλη μέχρι να συναντήσει κάποιο αδιαπέρατο στρώμα.

Στην περίπτωση ενός DNAPL ο καθαρισμός της μολυσμένης περιοχής είναι αρκετά πιο δύσκολος απ' ότι για ένα LNAPL για τρεις κυρίως λόγους. Αυτοί είναι ότι τα χλωριούχα συστατικά που περιέχουν βιοδιασπώνται με πάρα πολύ αργό ρυθμό με αποτέλεσμα να παραμένουν στο υπέδαφος για μεγάλα χρονικά διαστήματα, η μεγαλύτερη πυκνότητα που έχουν ως αποτέλεσμα την βύθισή τους σε μεγάλο βάθος καθιστώντας πολύ δύσκολη την προσέγγισή τους και τα χλωριούχα συστατικά που περιέχονται σ' αυτά τους δίνουν τις φυσικές ιδιότητες που κάνουν τη διείσδυση σε πολύ μικρά κενά ευκολότερη κάνοντας με τον τρόπο αυτό πιο εύκολη τη βύθισή τους και σε μεγαλύτερα βάθη. Ενδεικτικό είναι ότι με τις σημερινές τεχνολογίες μια περιοχή μολυσμένη από DNAPL δεν είναι δυνατό να επανέλθει στη κατάσταση που βρισκόταν πριν.



Σχήμα 2.2 : Αναπαράσταση ενός DNAPL στο υπέδαφος
(Ιστοσελίδα www.cmdlet.com-Jacob Bear)

Πίνακας 2.2 Πιο συχνά εμφανιζόμενα DNAPLs

ΧΛΩΡΟΒΕΝΖΟΛΙΟ
1,2-ΔΙΧΛΩΡΟΠΡΟΠΑΝΙΟ
1,1-ΔΙΧΛΩΡΟΑΙΘΑΝΙΟ
1,1-ΔΙΧΛΩΡΟΑΙΘΥΛΕΝΙΟ
1,2-ΔΙΧΛΩΡΟΑΙΘΑΝΙΟ
1,1,1-ΤΡΙΧΛΩΡΟΑΙΘΑΝΙΟ
1,1,2-ΤΡΙΧΛΩΡΟΑΙΘΥΛΕΝΙΟ
ΤΡΙΧΛΩΡΟΑΙΘΥΛΕΝΙΟ
ΧΛΩΡΟΦΟΡΜΙΟ
1,1,2,2-ΤΕΤΡΑΧΛΩΡΟΑΙΘΕΝΙΟ
ΤΕΤΡΑΧΛΩΡΟΑΙΘΥΛΕΝΙΟ
Ο-ΚΡΕΣΟΛΗ
Ρ-ΚΡΕΣΟΛΗ
2,4-ΔΙΜΕΘΥΛΟΦΑΙΝΟΛΗ
ΦΑΙΝΟΛΗ
ΝΑΦΘΑΛΙΝΗ
ΑΝΩΡΑΚΕΝΙΟ
ΧΡΥΣΕΝΙΟ
1,4-ΔΙΧΛΩΡΟΒΕΝΖΟΛΙΟ
1,2-ΔΙΧΛΩΡΟΒΕΝΖΟΛΙΟ
ΚΡΕΟΖΩΤΟ
ΠΙΣΣΑ

2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ NAPLs

Στη παρόντα αντί περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η κατακόρυφη κίνηση των NAPLs μέχρι το σημείο στο οποίο αυτή σταματά και παρατηρείται η δημιουργία των πηγών μόλυνσης. Αρχικά λοιπόν παρουσιάζεται η κίνηση αυτή σε διαφορετικά μέσα και αναλύονται οι λόγοι που οδηγούν σε αυτή τη συμπεριφορά στο κάθε μέσο.

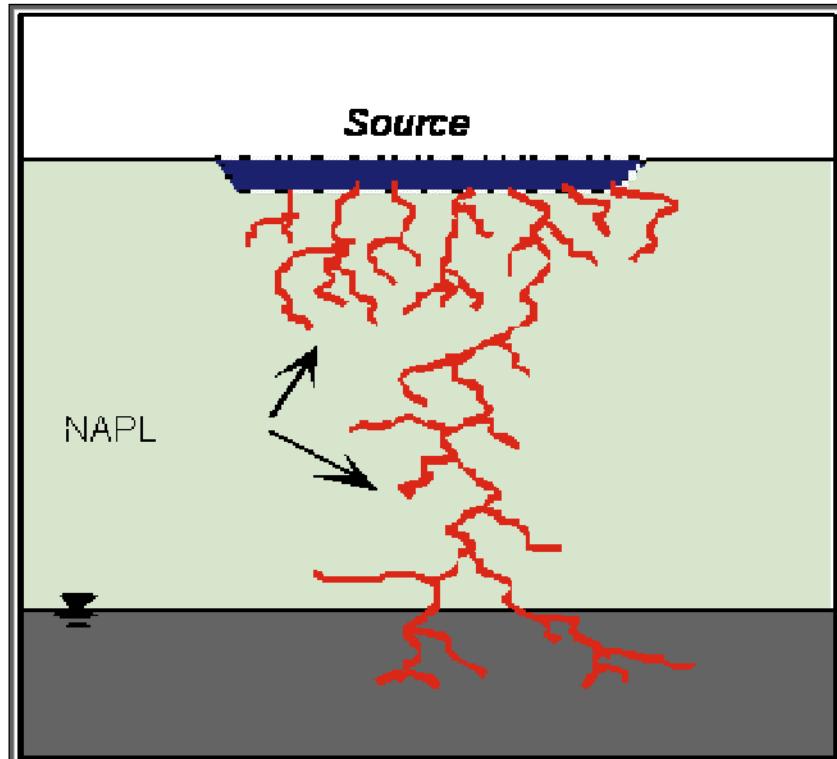
Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την κίνηση αυτή στο υπέδαφος είναι οι:

- πυκνότητα υγρού
- ιξώδες
- αλληλεπίδραση με τους κόκκους του εδάφους
- κορεσμός εδάφους σε νερό
- πιεζομετρικό φορτίο

2.3.1 ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΠΟΡΩΔΗ ΜΕΣΑ

Στην ακόρεστη ζώνη η κατακόρυφη μετακίνηση των LNAPLs και DNAPLs είναι ακριβώς η ίδια οπότε στο τμήμα αυτό τα δύο είδη υγρών εξετάζονται μαζί. Το NAPL διεισδύει στην ακόρεστη ζώνη όπου και δημιουργείται ένα σύστημα από αέρα, νερό, στερεά και διαφορετικές φάσεις του NAPL. Οι διαφορετικές φάσεις του NAPL είναι η υγρή μορφή του (αρχική), όμως λόγω και της παρουσίας μεγάλης ποσότητας αέρα παρατηρείται εξάτμιση μέρους του υγρού δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό ένα νέφος γύρω από την περιοχή που έχει προσβάλλει το NAPL. Το NAPL κατά την κατακόρυφη κίνησή του διεισδύει με αρκετή ευκολία στους πόρους του μέσου, που είναι γεμάτοι με αέρα εφόσον δεν υπάρχει κάποια δύναμη τέτοιου μεγέθους που να εμποδίζει την κίνηση αυτή. Καθώς μετακινείτε προς τα κάτω σχηματίζονται ‘σταγόνες’ (blobs) που προσκολλώνται στους εδαφικούς κόκκους αντικαθιστώντας τον αέρα που υπήρχε εκεί πριν. Οι σταγόνες αυτές αποτελούν το λεγόμενο ‘παραμένων’ NAPL (residual NAPL). Η δημιουργία των σταγόνων αυτών εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του NAPL που έχει διαρρεύσει. Για παράδειγμα, NAPL που έχει κυρίως χλωριούχα συστατικά δεν δημιουργεί μεγάλες ‘σταγόνες’ στην ακόρεστη ζώνη και έτσι είναι πιο εύκολη η αντιμετώπιση της μόλυνσης που θα

προκύψει. Το σημείο στο οποίο αυτή η συμπεριφορά αρχίζει να διαφέρει είναι όταν το NAPL προσεγγίζει τον υδάτινο ορίζοντα.

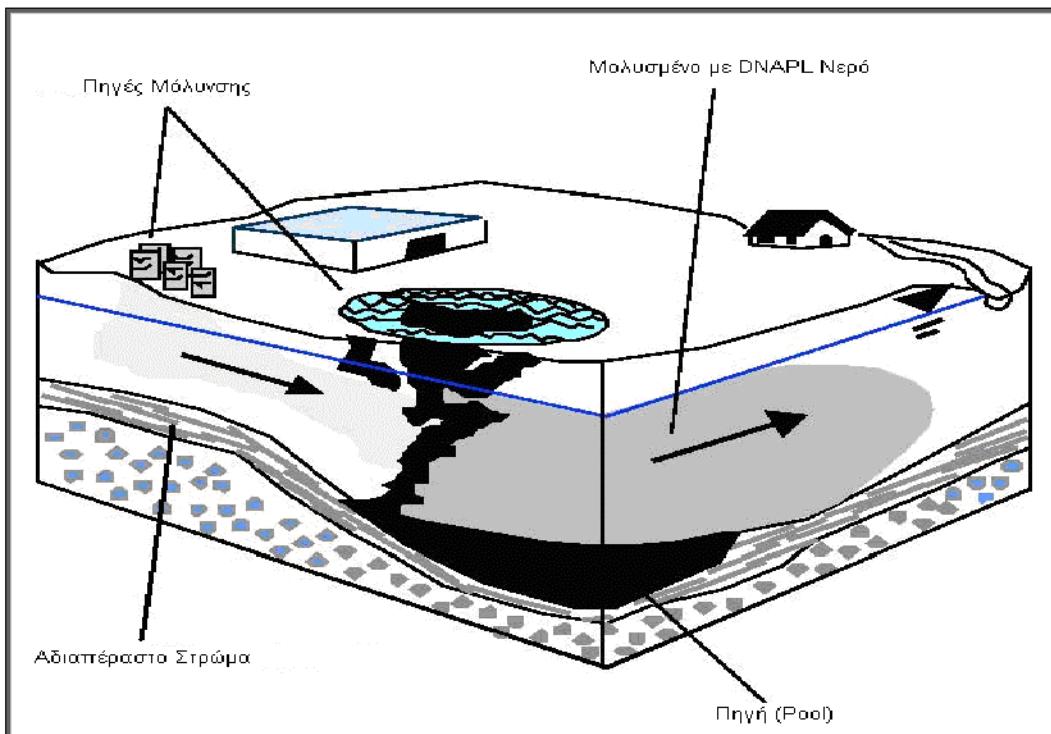


Σχήμα 2.3 : Σχηματική αναπαράσταση ενός NAPL στην ακόρεστη ζώνη
(Waterloo Center for Groundwater Research, 1991)

Στην περίπτωση ενός LNAPL το οποίο προσεγγίζει τον υδάτινο ορίζοντα η αλληλεπίδραση μεταξύ του νερού, του αέρα και του LNAPL γίνεται πιο σύνθετη. Το ακριβές σημείο στο οποίο αυτή η αλληλεπίδραση ξεκινά είναι η άνω γραμμή στην οποία παρατηρούνται τα τριχοειδή φαινόμενα. Επειδή τα LNAPL δεν έχουν την πυκνότητα που χρειάζεται (μικρότερη από αυτή του νερού) έτσι ώστε να εξασκήσουν πίεση, ικανή να εξουδετερώσει τις δυνάμεις που δημιουργούνται λόγω των τριχοειδών φαινομένων, δεν καταφέρνουν να εισέλθουν στην κορεσμένη ζώνη του εδάφους. Αποτέλεσμα αυτού είναι να δημιουργηθεί μια ‘πηγή’ ορισμένου πάχους η οποία επιπλέει πάνω απ’ το σημείο που παρατηρούνται τα τριχοειδή φαινόμενα και εξαπλώνεται πλέον οριζοντίως. Εάν η παροχή του LNAPL είναι συνεχής, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση αρκετά μεγάλης ποσότητας τότε η πηγή ξεπερνά τη γραμμή που παρατηρούνται τα τριχοειδή φαινόμενα και φτάνει σε βάθος μέχρι των

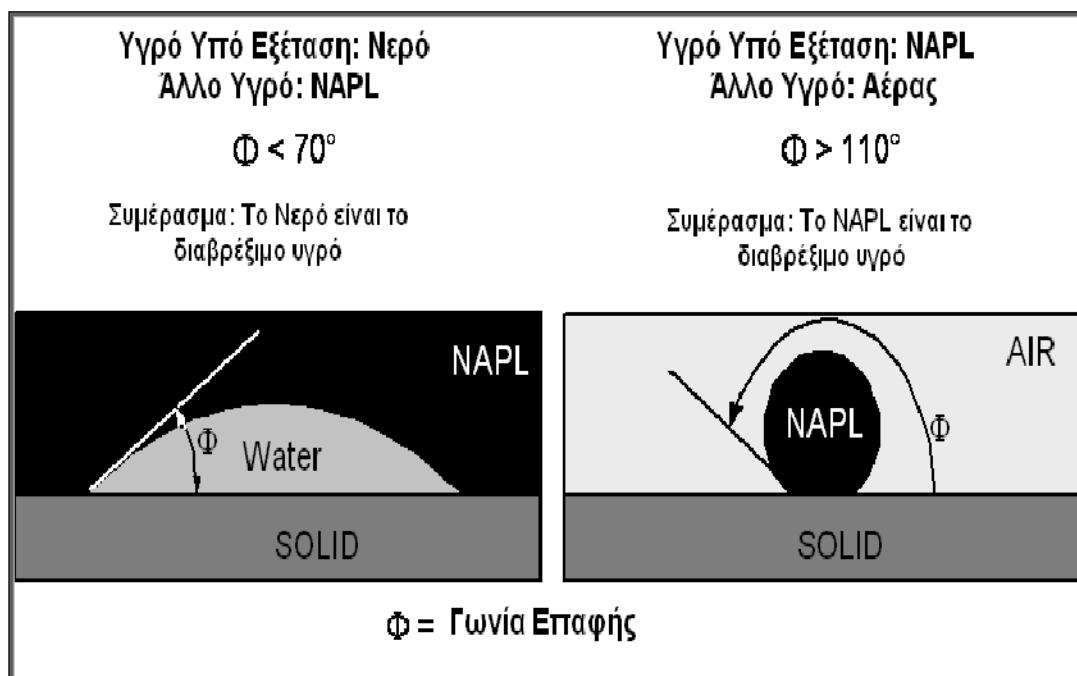
υδροφόρο ορίζοντα. Στη συνέχεια όταν η παροχή σταματήσει, η πηγή του LNAPL συνήθως ‘σπάει’ σε κομμάτια δημιουργώντας ‘παραμένων’ LNAPL.

Στην περίπτωση τώρα ενός DNAPL πάλι αναγκαία είναι η πίεση που θα δώσει στο DNAPL τη δυνατότητα να εισέλθει στη κορεσμένη ζώνη και να συνεχίσει τη κατακόρυφη κίνησή του. Η πίεση αυτή καλείται πίεση εισόδου και για να εισέλθει το DNAPL στη κορεσμένη ζώνη πρέπει αυτή να είναι μεγαλύτερη της πίεσης που ασκείται από το νερό στο DNAPL λόγω των τριχοειδών φαινομένων. Η πίεση εισόδου εξαρτάται από το είδος του DNAPL, την πυκνότητά του και την ποσότητα που εξασκεί την πίεση αυτή. Το DNAPL εισέρχεται σε βάθος μέχρι το οποίο η δύο πιέσεις να ισορροπήσουν. Όταν συμβεί αυτό το DNAPL διασπάται σε αμέτρητες ‘σταγόνες’ (blobs), οι οποίες συγκεντρώνονται κυρίως στους μεγαλύτερους πόρους. Εάν η ποσότητα του DNAPL είναι τέτοια που δεν είναι δυνατό να ισορροπήσουν οι δύο πιέσεις τότε η κατακόρυφη μετακίνηση συνεχίζεται μέχρι να συναντήσει κάποιο αδιαπέρατο στρώμα όπου δημιουργούνται ‘κηλίδες’ (pools) και παρατηρείται οριζόντια εξάπλωση του DNAPL. Ενδεικτικό πάντως είναι το γεγονός ότι τα DNAPLs γενικά διεισδύουν σε αρκετά μεγάλα βάθη (εκατοντάδες πόδια) κάνοντας αρκετά δύσκολη και κοστοβόρα την αντιμετώπιση της μόλυνσης στην προσβαλλόμενη περιοχή. .



Σχήμα 2.4 : Σχηματική αναπαράσταση ενός DNAPL στο υπέδαφος (U.S. EPA, 1993)

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να οριστεί η διαβρεξιμότητα, μια έννοια η οποία ορίζεται με σκοπό την καλύτερη κατανόηση του πως ενεργούν οι δυνάμεις λόγω των τριχοειδών φαινομένων. Διαβρεξιμότητα είναι η τάση ενός υγρού να εξαπλώνεται σε μια επιφάνεια στερεού, σε βάρος ενός δεύτερου υγρού που ήδη υπάρχει στην επιφάνεια αυτή. Σαν διαβρέξιμο υγρό θεωρείται αυτό που τελικά μένει ανάμεσα στους πόρους, ενώ σαν μη διαβρέξιμο αυτό που τελικά απωθείται από τη δράση των δυνάμεων λόγω των τριχοειδών φαινομένων. Το αν κάποιο υγρό είναι ή όχι διαβρέξιμο μπορεί να διαπιστωθεί σε επίπεδο κόκκου με παρατήρηση της γωνίας επαφής του υγρού με το στερεό. Μια γωνία επαφής του υπό εξέταση υγρού και του κόκκου μικρότερης των 70° σημαίνει ότι το υγρό είναι διαβρέξιμο και το άλλο μη διαβρέξιμο, μια γωνία μεγαλύτερης των 110° σημαίνει ότι είναι μη διαβρέξιμο ενώ μεταξύ 70° - 110° το σύστημα θεωρείται ουδέτερο. Γενικά στις περισσότερες εφαρμογές όπου υπάρχει νερό – NAPL – αέρας το νερό αποτελεί το διαβρέξιμο υγρό. Σε συστήματα με NAPL – αέρα μόνο το NAPL θα αποτελεί το διαβρέξιμο υγρό.



Σχήμα 2.5 : Συνθήκες διαβρέξιμων υγρών

(Waterloo Center for Groundwater Research, 1991)

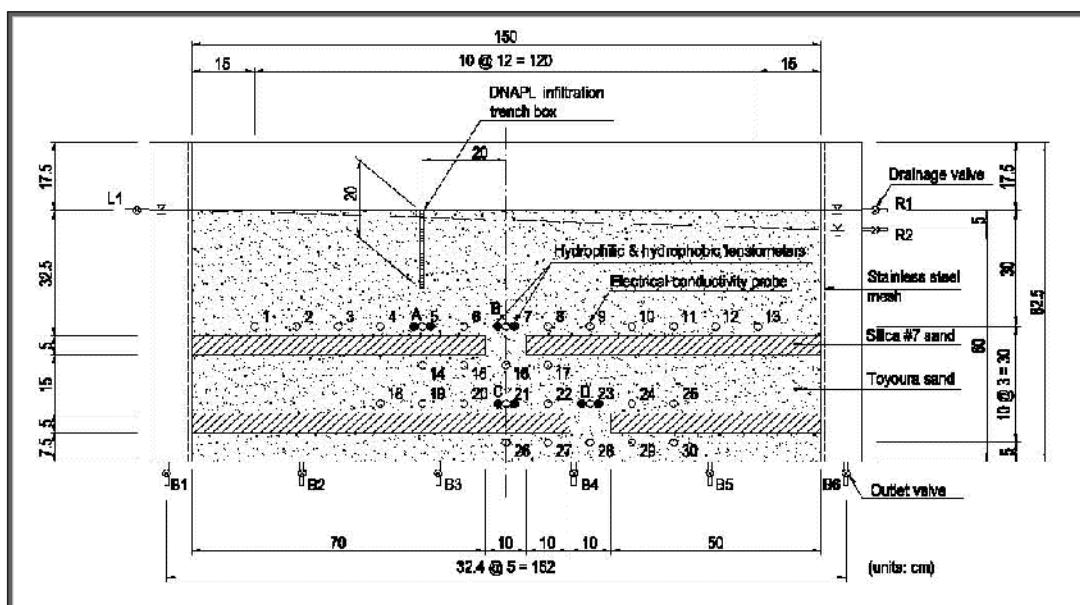
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποτελεί η παρατήρηση ότι στα πορώδη μέσα το παραμένον ‘residual’ NAPL στην ακόρεστη ζώνη είναι μικρότερο από το αντίστοιχο στη κορεσμένη ζώνη και μάλιστα 2 με 5 φορές περίπου.

Οι λόγοι οι οποίοι οδηγούν σ' αυτό είναι:

- Η αναλογία της πυκνότητας του συστήματος NAPL-αέρας είναι μεγαλύτερη από την αναλογία του συστήματος NAPL-νερό, γεγονός το οποίο διευκολύνει τη στράγγιση των NAPLs από την ακόρεστη ζώνη
- Τα NAPLs είναι το μη διαβρέξιμο υγρό στην κορεσμένη ζώνη, με αποτέλεσμα να παγιδεύεται το NAPL στους μεγαλύτερους πόρους
- Τα NAPLs εξαπλώνονται περισσότερο στην κορεσμένη ζώνη λόγω των ευνοϊκών για την εξάπλωσή τους συνθηκών

2.3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ NAPLs ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕ ΤΗ ΧΩΡΙΣ ΡΟΗ

Για την επίδραση των συνθηκών ροής στην κίνηση των NAPLs σε πορώδη μέσα χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του πειράματος που διεξήχθησαν από τους Kamon M. et al. (2004). Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε μια δεξαμενή μήκους 150 cm, ύψους 82,5 cm και πλάτους 15 cm. Η πλήρωση της δεξαμενής έγινε με άμμο είδους Toyoura (υδραυλική αγωγμότητα $k=1.5\times10^{-2}$, δείκτης κενών $e=0.62$) και άμμο είδους Silika #7 ($k=2.3\times10^{-3}$, δείκτης κενών $e=0.72$). Το έδαφος που δημιουργήθηκε ήταν κορεσμένο με νερό και σαν DNAPL επιλέχθηκε ο υδροφθοροαιθέρας (Hydrofluoroether).



Σχήμα 2.6 : Αναπαράσταση της διάταξης του πειράματος (Kamon M. et al., 2004)

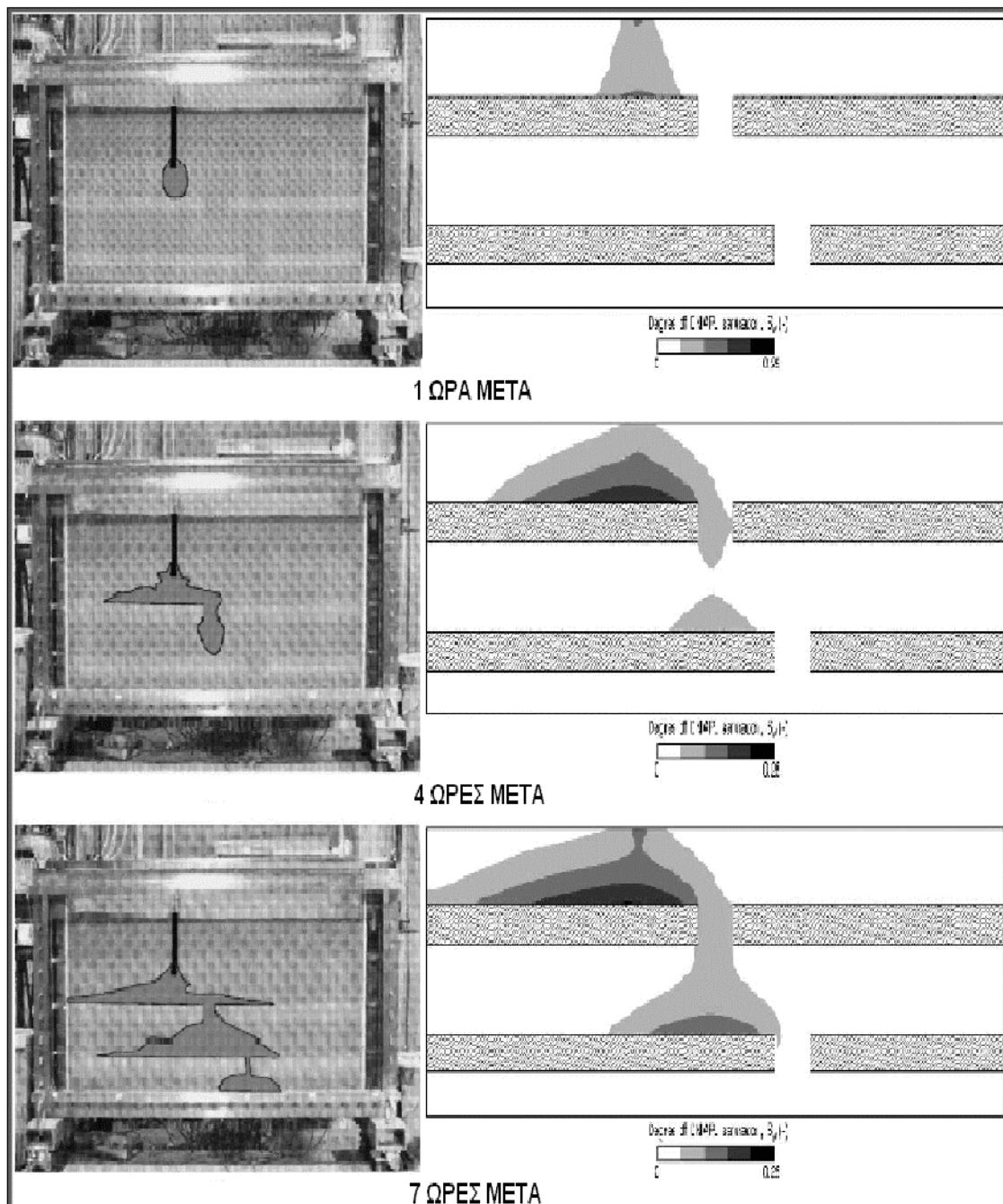
Το πορώδες μέσο ήταν η άμμος Toyoura ενώ τα αδιαπέρατα στρώματα δημιουργήθηκαν από την άμμο Silika #7. Τα υλικά τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούν τη διάταξη του παραπάνω σχήματος.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειράματος, όταν υπάρχει ροή η κατακόρυφη εξάπλωση του υγρού ήταν εμφανώς πιο γρήγορη από όταν δεν υπήρχε ροή νερού. Επίσης σημαντικό είναι και το ότι στην οριζόντια ροή που υπήρχε δεν παρατηρήθηκε οριζόντια εξάπλωση του υγρού παρά μόνο γρηγορότερη κατακόρυφη εξάπλωση.

Για επαλήθευση των πειραματικών αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε και προσομοίωση του πειράματος σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, τα αποτελέσματα του οποίου επαλήθευσαν αυτά του πειράματος.

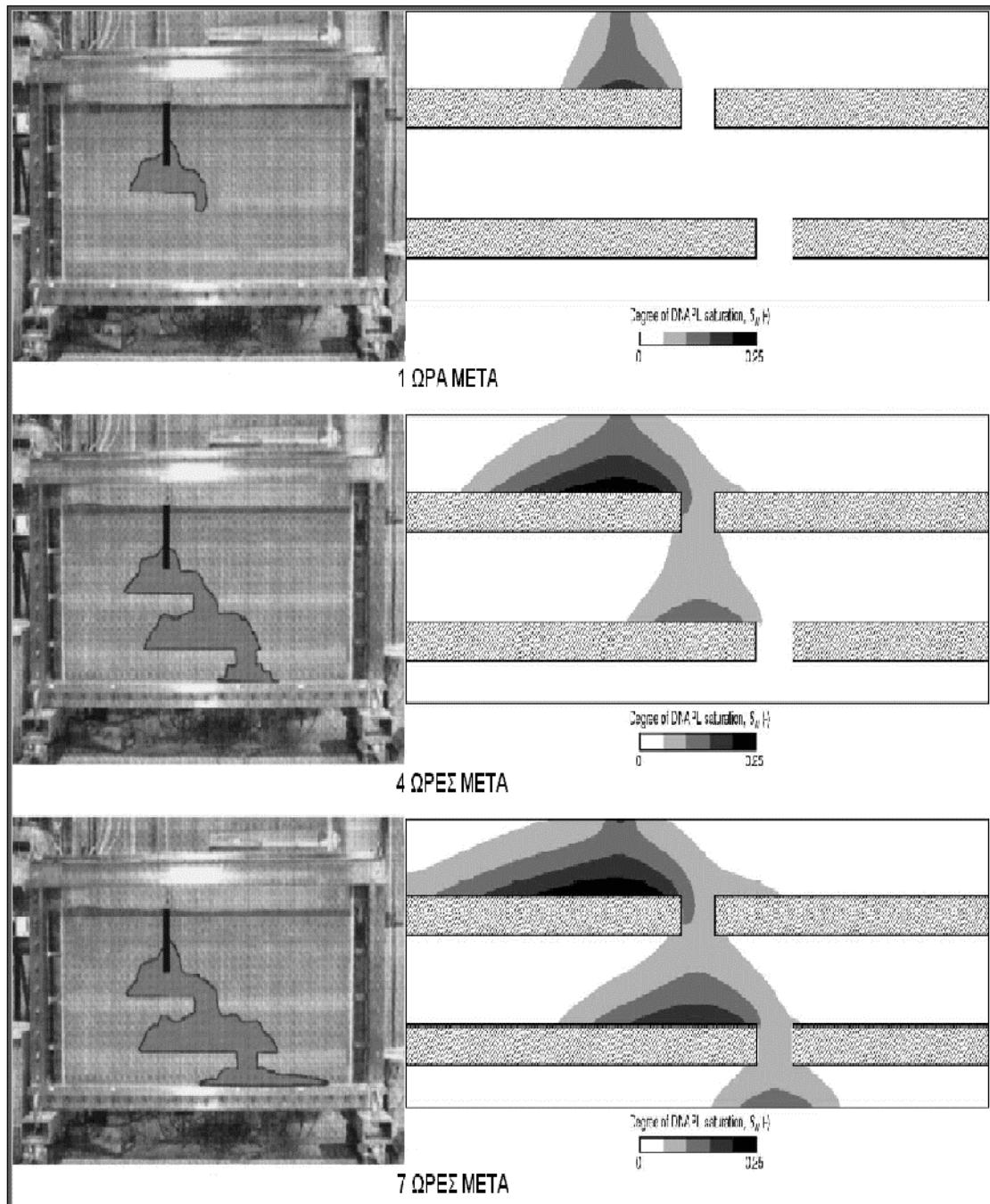
Τα αποτελέσματα τόσο του πειράματος όσο και της προσομοίωσης στον υπολογιστή παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα. Αν και τα αποτελέσματα μεταξύ πειράματος και Η/Υ έχουν μια μικρή απόκλιση, το συμπέρασμα που εξάγεται και από την προσομοίωση στον Η/Υ επαληθεύει την επίδραση της ροής στην κατακόρυφη κίνηση.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΩΡΙΣ ΡΟΗ



Σχήμα 2.7 : Αποτελέσματα πειράματος και προσομοίωσης σε H/Y
(Kamon M. et al., 2004)

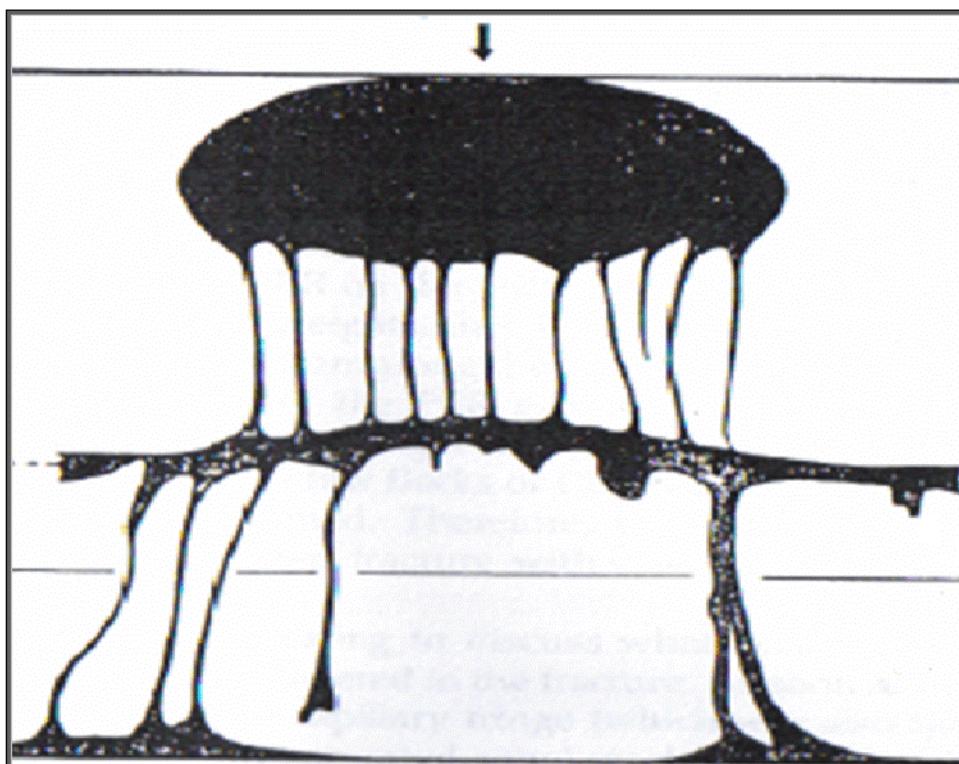
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΡΟΗ



Σχήμα 2.8 : Αποτελέσματα πειράματος και προσομοίωσης σε H/Y
(Kamon M. et al., 2004)

2.3.3 ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΑ-ΑΔΙΑΠΕΡΑΣΤΑ ΜΕΣΑ

Κατά τη διαρροή DNAPL σε ρηγματωμένα και αδιαπέραστα στρώματα, στην ακόρεστη ζώνη το υγρό εκμεταλλεύεται το δίκτυο των ρωγμών και μέσω αυτών φθάνει μέχρι την επιφάνεια που εμφανίζονται τα τριχοειδή φανόμενα (capillary fringe). Στο σημείο αυτό παρατηρείται οριζόντια εξάπλωση του υγρού και ανάπτυξη ‘δάκτυλων’ όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.6. Στην συνέχεια τα ‘δάκτυλα’ αυτά εξαπλώνονται προς τα κάτω και έτσι εισχωρεί το DNAPL στην κορεσμένη ζώνη. Η κατακόρυφη κίνηση συνεχίζεται μέχρι να συναντήσει κάποιο αδιαπέραστο στρώμα.



Σχήμα 2.9 : Σχηματική αναπαράσταση ενός DNAPL σε ρηγματωμένο-αδιαπέραστο μέσο (Pankow, 1988)

Όσον αφορά ένα LNAPL σε ρηγματωμένα και αδιαπέραστα στρώματα, η κίνηση είναι και εδώ ίδια για την ακόρεστη ζώνη με τα DNAPL, στην οποία κινούνται εκμεταλλεύμενα το δίκτυο των ρωγμών και κάθε άλλου είδους άνοιγμα μέχρι να προσεγγίσουν τον φρεάτιο ορίζοντα όπου και σταματά η κίνηση. Το σημείο στο οποίο αυτή τη φορά διαφοροποιείται η κίνηση ενός LNAPL σε σχέση με την κίνηση σε ένα πορώδες μέσο είναι ότι με τις κατάλληλες προϋποθέσεις (κατάλληλες συνθήκες πίεσης που αναπτύσσονται στα μέσα αυτά) τα LNAPL μπορούν να εισέλθουν στην κορεσμένη ζώνη (αποκτούν την απαιτούμενη πίεση εισόδου). Επίσης, αυτό μπορεί να συμβεί και με τις αυξομειώσεις που υφίσταται ο υδροφόρος ορίζοντας

(π.χ. όταν έχει παγιδευτεί σε κάποια ρωγμή LNAPL και ανέβει η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ψηλότερα από το επίπεδο της ρωγμής). Όλα αυτά φανερώνουν το πόσο πολύπλοκη είναι η κίνηση των LNAPL στο μέσο αυτό και πόσο δύσκολο να περιγραφεί με ικανοποιητικό τρόπο.

Διαφορετικά στοιχεία στην κίνηση ανάμεσα σε πορώδη και ρηγματωμένα και αδιαπέραστα μέσα είναι επίσης το ότι στα ρηγματωμένα και αδιαπέραστα στρώματα η κατακόρυφη κίνηση μπορεί να συνεχιστεί για πολύ μεγαλύτερα βάθη λόγω του ότι δεν υπάρχει η αλληλεπίδραση ανάμεσα στο NAPL και στους εδαφικούς κόκκους. Για τον ίδιο λόγο επίσης στα ρηγματωμένα και αδιαπέραστα στρώματα τα υπολείμματα της κατακόρυφης αυτής κίνησης (residual NAPL) είναι πολύ λιγότερα από ότι στα πορώδη μέσα..

2.4 ΜΕΓΕΘΗ ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

2.4.1 ΠΙΕΣΗ ΛΟΓΩ ΤΡΙΧΟΕΙΔΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

Μια από τις απλούστερες και ευρέως χρησιμοποιούμενες σχέσεις (Mercer and Cohen, 1990) για τον προσδιορισμό της πίεσης αυτής, είναι η:

$$P_c = P_{nw} - P_w \quad (2.1)$$

όπου P_c = πίεση λόγω τριχοειδών φαινομένων

P_{nw} = πίεση που εξασκεί το μη διαβρέξιμο υγρό (NAPL)

P_w = πίεση που εξασκεί το διαβρέξιμο υγρό (νερό)

Ακριβέστερος θεωρείται ο παρακάτω τύπος (Bear, 1979), ο οποίος περιγράφει την περίπτωση μια σφαιρικής μάζας NAPL σε ένα κορεσμένο με νερό πορώδες μέσο:

$$P_c = \frac{2\sigma \cos \phi}{r} \quad (2.2)$$

όπου P_c = πίεση λόγω τριχοειδών φαινομένων

σ = επιφανειακή τάση ανάμεσα στο NAPL και στο νερό

ϕ = γωνία επαφής

r = ακτίνα του γεμάτου με νερό πόρου στον οποίο το NAPL πρέπει να

εισέλθει ή να εξέλθει

Από τη τελευταία σχέση γίνεται αντίληπτό ότι όσο μικρότερη ακτίνα έχουν οι πόροι του εδάφους τόσο μεγαλύτερη είναι η πίεση λόγω των τριχοειδών φαινομένων, με αποτέλεσμα την δυσκολότερη κίνηση του NAPL διαμέσου των πόρων.

Ακόμη από την σχέση 2.2 προκύπτουν αρκετές σχέσεις που περιγράφουν τις απαιτούμενες συνθήκες για την κατακόρυφη κίνηση ενός NAPL. Οι σημαντικότερες περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 2.3 Σημαντικότερες σχέσεις περιγραφής της κίνησης των NAPLs στο υπέδαφος

- $Z_n(\text{est}) = \frac{2\sigma \cos \phi}{r_t g \rho_n}$ (α)

όπου $Z_n(\text{est})$ το κρίσιμο ύψος πηγής NAPL για διείσδυση στην ακόρεστη ζώνη

- $Z_n(\text{est}) = \frac{2\sigma \cos \phi}{rg(\rho_n - \rho_w)}$ (β)

όπου $Z_n(\text{est})$ το κρίσιμο ύψος πηγής NAPL για διείσδυση στην κορεσμένη ζώνη

- $Z_n(\text{est}) = \frac{2\sigma \cos \phi \left(\frac{1}{r_t} - \frac{1}{r} \right)}{gabs(\rho_n - \rho_w)} = \frac{P_{c(\text{fine})} - P_{c(\text{coarse})}}{gabs(\rho_n - \rho_w)}$ (γ)

όπου $Z_n(\text{est})$ το κρίσιμο ύψος NAPL που απαιτείται για διείσδυση από ένα έδαφος με τραχύς κόκκους σε ένα λεπτόκοκκο έδαφος

- $\frac{\Delta h}{\Delta Z_n} = \frac{(\rho_n - \rho_w)}{\rho_w}$ (δ)

όπου $\Delta h / \Delta Z_n$ η ελάχιστη υδραυλική κλίση ικανή να αποτρέψει την κατακόρυφη κίνηση ενός NAPL

ση επιφανειακή τάση μεταξύ NAPL-νερού

φη γωνία επαφής

τη οποία το γεμάτον με νερό πόρον στον οποίο το NAPL πρέπει να εισέλθει ή να

εξέλθει

τη οποία το γεμάτον με νερό πόρον στον οποίο το NAPL πρέπει να εισέλθει ή να εξέλθει

ρ_n η πυκνότητα του NAPL (g/cm^3)

ρ_w η πυκνότητα του νερού ($1 g/cm^3$)

g η δύναμη βαρύτητας ($980 cm/sec^2$)

μ το δυναμικό ιξώδες (centipoise)

2.4.2 ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ DARCY

Για την κίνηση ενός NAPL διαμέσου των πόρων του εδάφους είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ο νόμος του Darcy με τρόπο ανάλογο αυτού του νερού, με την προϋπόθεση ότι όλα τα κενά των πόρων είναι κορεσμένα με μια συνεχή μάζα από το NAPL αυτό. Μοναδική διαφορά είναι το ότι η υδραυλική αγωγμότητα πρέπει να αντικατασταθεί από την εσωτερική διαπερατότητα, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη τα διαφορετικά χαρακτηριστικά που έχει σαν υγρό το NAPL.

$$u = - \frac{k \rho g}{\mu} \frac{dh}{dl} \quad (2.3)$$

όπου u είναι ταχύτητα Darcy (cm/sec)

k είναι η εσωτερική διαπερατότητα (darcies: $1 \text{ darcy} = 10^{-8} \text{ cm}^2$),

ρ η πυκνότητα του NAPL (g/cm^3),

g η δύναμη βαρύτητας (980 cm/sec^2),

μ το δυναμικό ιξώδες (centipoise),

dh/dl είναι η υδραυλική κλίση

Ακόμη:

$$h = z + \frac{P}{\rho g} \quad (2.4)$$

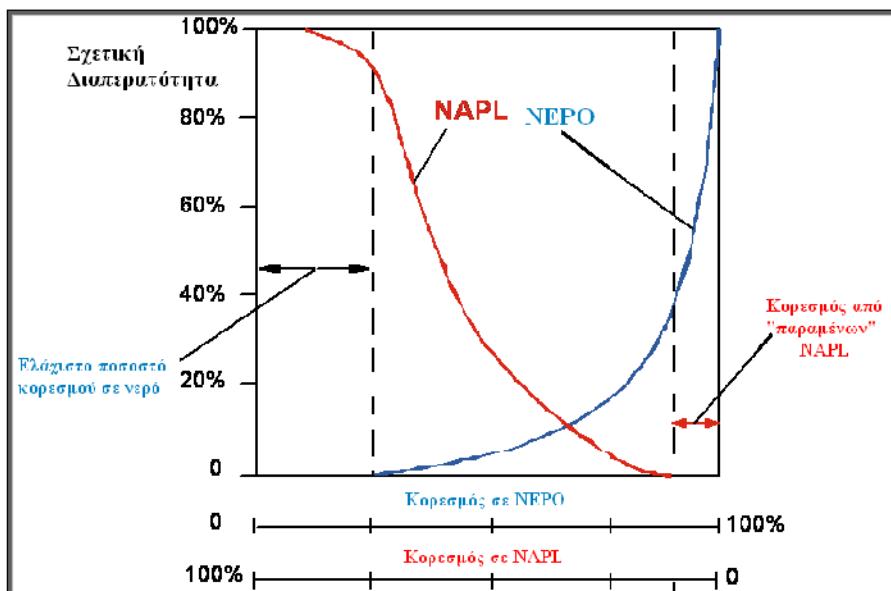
όπου z είναι το ύψος αναφοράς,

P είναι η πίεση (ατμόσφαιρες).

Για πιο εξειδικευμένες εφαρμογές μπορούν να χρησιμοποιηθούν συμβατικά μοντέλα περιγραφής της κίνησης του υπόγειου νερού απλά μετατρέποντας την υδραυλική αγωγμότητα του νερού με τρόπο τέτοιο που να εκφράζει τη διαφορετική πυκνότητα και το ιξώδες ενός NAPL.

2.4.3 ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Στο υπέδαφος η παρουσία του NAPL επηρεάζει την κίνηση του νερού και αντίστροφα. Συγκεκριμένα, όταν δύο υγρά ρέουν διαμέσου ενός πορώδου μέσου, ανταγωνίζονται για τον ελεύθερο χώρο που υπάρχει με αποτέλεσμα τον περιορισμό της κινητικότητας και των δύο υγρών. Ο περιορισμός αυτός εκφράζεται μέσω της σχετικής διαπερατότητας, της αναλογίας δηλαδή της ενεργού διαπερατότητας του υγρού σε ένα ορισμένο βαθμό κορεσμού, με την εσωτερική διαπερατότητα του μέσου. Τιμές της σχετικής διαπερατότητας κυμαίνονται από 0 έως 1.0. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται μια τυπική καμπύλη σχετικής διαπερατότητας για ένα σύστημα δύο υγρών (NAPL – νερό).



Σχήμα 2.10 : Τυπική καμπύλη σχετικής διαπερατότητας

(Waterloo Center for Groundwater Research, 1991)

Χαρακτηριστικό της καμπύλης αποτελεί το γεγονός ότι σε πολλά σημεία το συνολικό άθροισμα των δύο υγρών δεν ισούται με την μονάδα αλλά λιγότερο. Ο λόγος είναι ότι αυτή η αλληλεπίδραση των δύο υγρών μειώνει την κινητικότητα και των δύο υγρών στο μέσο. Επίσης, είναι προφανές ότι ένα NAPL που διεισδύει σε ένα πόρο έχει μεγαλύτερη σχετική διαπερατότητα από ένα NAPL που εξέρχεται από ένα πόρο του μέσου στο οποίο κινείται. Στα σημεία όπου ο κορεσμός από NAPL είναι μεγάλος παρατηρείται μια συνεχή μάζα NAPL μεγάλης σχετικής διαπερατότητας ενώ το νερό είναι περιορισμένο σε μικρούς πόρους με σχεδόν μηδενική σχετική

διαπερατότητα. Στα σημεία όπου υπάρχει κορεσμός νερού επικρατούν συνθήκες ροής υπόγειου νερού, ενώ το NAPL βρίσκεται υπό μορφή ‘παραμένοντος’ NAPL, μηδενικής διαπερατότητας δηλαδή μηδενικής ροής. Τέλος, στα σημεία όπου σχηματίζεται μια κλειστή επιφάνεια από τις δύο καμπύλες των υγρών παρατηρείται συνεχή φάση και των δύο, αλλά δεν καταλαμβάνουν τους ίδιους πόρους του εδάφους. Η σχετική διαπερατότητα των υγρών στα σημεία αυτά είναι αρκετά μικρή λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των υγρών.

2.4.4 ΣΧΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ‘ΠΑΡΑΜΕΝΩΝ’ NAPL

Οι δυνάμεις λόγω των τριχοειδών φαινομένων είναι αυτές που προκαλούν τη δημιουργία του ‘παραμένοντος’ NAPL (residual NAPL). Για τη περιγραφή του μεγέθους των δυνάμεων αυτών αλλά και για την επίλογή του τρόπου καθαρισμού μιας μολυσμένης περιοχής από το ‘παραμένων’ NAPL, δημιουργήθηκαν δύο αριθμοί. Ο αριθμός ‘δεσμού’ (bond number) και ο αριθμός των τριχοειδών φαινομένων (capillary number). Ο αριθμός ‘δεσμού’ (N_b) είναι η αναλογία των δυνάμεων λόγω των τριχοειδών φαινομένων προς τις βαρυτικές δυνάμεις. Ο αριθμός των τριχοειδών φαινομένων (N_c) είναι η αναλογία των δυνάμεων λόγω των τριχοειδών φαινομένων προς τις δυνάμεις λόγω του ιξώδους. Οι σχέσεις (Bedient, 1996) των αριθμών αυτών είναι:

$$N_b = \frac{k \Delta \rho g}{\sigma} \quad (2.5)$$

$$\text{και} \quad N_c = \frac{-k \rho g \Delta h}{\sigma \Delta l} = \frac{-K \Delta h \mu}{\sigma \Delta l} \quad (2.6)$$

όπου k είναι η εσωτερική διαπερατότητα (cm^2)

ρ η πυκνότητα νερού (g/cm^3)

σ η επιφανειακή τάση (dyne/cm)

g η επιτάχυνση της βαρύτητας (g/cm^2)

$\Delta \rho$ η διαφορά πυκνότητας μεταξύ των υγρών (g/cm^3)

$\Delta h / \Delta l$ η υδραυλική κλίση

μ είναι το δυναμικό ιξώδες του νερού (g/cm-sec)

K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (cm/sec)

Όσο αυξάνουν οι δύο αυτοί αριθμοί τόσο μειώνεται το ‘παραμένων’ NAPL.

2.5 ΧΗΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ

2.5.1 ΕΞΑΤΜΙΣΗ

Εξάτμιση σε ένα NAPL συμβαίνει, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, όταν το NAPL έρθει σε επαφή με αέρα είτε στη κορεσμένη είτε στην ακόρεστη ζώνη. Η γνώση του βαθμού εξάτμισης της κάθε ουσίας είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό του μεγέθους της ουσίας που μολύνει την ατμόσφαιρα, αλλά και για τον προσδιορισμό της αλλαγής της συγκέντρωσης της ουσίας στο υπέδαφος.

Οι κυριότεροι λόγοι που καθιστούν την εξάτμιση τόσο σημαντική χημική διεργασία είναι οι:

- προσδιορισμός με ακρίβεια της διαλυόμενης ουσίας στο υπέδαφος (ότι εξατμίζεται θεωρείται απόλεια)
- δημιουργία προβλημάτων κατά τη δειγματοληψία και ανάλυση. Εφόσον τα δείγματα έρθουν σε επαφή με τον αέρα δεν είναι πλέον αντιπροσωπευτικά της μόλυνσης που υφίσταται σε μια περιοχή και τα αποτελέσματα είναι αλλοιωμένα.
- δημιουργία ‘νέφους’ από NAPL στην ακόρεστη ζώνη. Το νέφος αυτό μπορεί να διαφύγει στην ατμόσφαιρα και να υπάρξει περαιτέρω μόλυνση.
- παραγωγή επικίνδυνων αερίων. Τα αέρια αυτά αν συνεχίσουν να συγκεντρώνονται είναι δυνατόν να προκαλέσουν προβλήματα υγείας στους κατοίκους των μολυσμένων περιοχών ή και ατυχήματα (φωτιές).

Οι παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν την εξάτμιση ενός NAPL είναι η διαλυτότητα του NAPL, το μοριακό του βάρος, η τάση ατμών του και το είδος του εδάφους στο οποίο κινείται (κορεσμένο ή ακόρεστο). Σε κατάσταση ισορροπίας ο νόμος του Raoult περιγράφει τη τάση των ατμών μιας πτητικής ουσίας η οποία βρίσκεται πάνω από έναν ιδανικό διαλύτη:

$$P_{org} = x_{org} P_{org}^o \quad (2.7)$$

όπου P_{org} είναι η τάση ατμών στην αέρια φάση της ουσίας

x_{org} ($= C_{org} / C$) είναι το μοριακό κλάσμα, δηλαδή η μοριακή συγκέντρωση της ουσίας (org) προς την συνολική μοριακή συγκέντρωση του διαλύματος

P_{org}^o είναι η καθαρή τάση ατμών της ουσίας org.

Ο παραπάνω τύπος είναι αντιπροσωπευτικός μόνο για τα διαλύματα που αναφέρθηκε. Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις είτε χρησιμοποιείται μετασχηματισμένος ο παραπάνω τύπος είτε χρησιμοποιείται ο νόμος του Henry.

Ο νόμος του Henry συγκεκριμένα έχει ισχύ για ουσίες οι οποίες διαλύονται στο νερό. Η τάση ατμών της ουσίας δίνεται από τον τύπο:

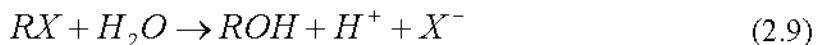
$$P_{org} = Hx_{org} \quad (2.8)$$

όπου H είναι η σταθερά του Henry.

Με τους νόμους αυτούς υπολογίζεται η τάση ατμών και κατά συνέπεια προσδιορίζεται η εξάτμιση μιας διαλυμένης ουσίας.

2.5.2 ΥΔΡΟΛΥΣΗ

Υδρόλυση είναι η χημική διεργασία με την οποία μια οργανική ουσία RX αντιδρά με το νερό, με αποτέλεσμα τη δημιουργία υδροξυλίων σύμφωνα με την αντίδραση:



Η υδρόλυση είναι ένα πολύ σημαντική για κάθε ουσία η οποία διαλύεται στο νερό. Τυπική σχέση που περιγράφει την μείωση της συγκέντρωσης ουσιών είναι η:

$$-\frac{d[RX]}{dt} = k_r [RX] \quad (2.10)$$

όπου k_r η σταθερά της υδρόλυσης.

Η παραπάνω σχέση αποτελεί μια απλούστευση των σχέσεων που περιγράφουν την μείωση συναρτήσει του χρόνου της συγκέντρωσης μιας ουσίας, όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του χρόνου ημιζωής της ουσίας. Για λεπτομερή υπολογισμό του ρυθμού αποδόμησης μιας ουσίας δεν ισχύει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΑΧΥΣΗ – ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στο κεφαλαίο αυτό αναφέρονται οι βασικοί νόμοι, η γενική θεωρία της διάχυσης, αλλά και του συνδυασμού της μεταγωγής – διαχύσεως ενός ρύπου (στην περίπτωσή μας NAPL) σε νερό και σε πορώδες μέσο.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο πρώτος ο οποίος διαπίστωσε τη διάχυση ήταν ο Άγγλος επιστήμονας Τζον Ντάλτον που πειραματίστηκε με υδρογόνο (H) και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Τις τελευταίες δύο δεκαετίες η μελέτη του φαινομένου της διαχύσεως πάνω στον τομέα της περιβαλλοντικής υδρογεωλογίας ήταν σημαντική, με τη διατύπωση νόμων και προσομοιωμάτων αλλά και με τη διεξαγωγή ενός μεγάλου αριθμού πειραμάτων.

Ο λόγος ο οποίος οδήγησε σε μια τόσο μεγάλη μελέτη του φαινομένου πάνω στο συγκεκριμένο κλάδο είναι ότι με την ραγδαία ανάπτυξη των κοινωνιών τις τελευταίες δεκαετίες αυξήθηκαν τα υγρά αλλά και αέρια απόβλητα τόσο λόγο της βιομηχανίας όσο και των νοικοκυριών, με αποτέλεσμα τη μόλυνση του περιβάλλοντος. Μελετώντας λοιπόν τις θεωρίες της διαχύσεως γίνεται δυνατός ο προσδιορισμός των μεγέθους της μόλυνσης μιας περιοχής και με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου καθαρισμού της εκτεθειμένης σε μόλυνση περιοχής.

Στη συγκεκριμένη εργασία αντικείμενο αποτελεί η μόλυνση των υπόγειων υδροφορέων από υγρά μη υδατικής φάσης (NAPLs) και η θεωρία καθώς και οι νόμοι που παρουσιάζονται ισχύουν για αυτή τη περίπτωση της μόλυνσης. Βεβαίως για τη σωστή κατανόηση των συγκεκριμένου προβλήματος παρουσιάζονται και οι βασικές αρχές της διαχύσεως που έχουν ισχύ σε όλα τα μέσα.

3.2 ΔΙΑΧΥΣΗ (DIFFUSION)

Διάχυση είναι η διεργασία με την οποία μεταφέρεται μάζα από ένα σημείο σε ένα άλλο, εξαιτίας της τυχαίας κίνησης των μορίων. Η μεταφορά αυτή συμβαίνει από ένα σημείο το οποίο περιέχει μεγάλη συγκέντρωση από το διαχεόμενο υγρό σε σημεία με μικρότερες συγκεντρώσεις. Επομένως η διάχυση δεν εξαρτάται από τη κίνηση του νερού αλλά από τη διαφορά συγκέντρωσης σε δύο σημεία και για το λόγο αυτό συμβαίνει και απουσία ταχύτητας ροής. Επίσης η διάχυση εξαρτάται από το μοριακό βάρος και τη δομή των μορίων και γίνεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Οι βασικότερες σχέσεις οι οποίες άνοιξαν το δρόμο για τη μετέπειτα εξέλιξη της θεωρίας της διάχυσης διατυπώθηκαν από τον Adolf Fick και είναι γνωστές σαν ο πρώτος νόμος του Fick και ο δεύτερος νόμος του Fick.

Ο πρώτος νόμος του Fick δηλώνει ότι η διαλυμένη ουσία στο νερό διαχέεται από τη περιοχή της μεγαλύτερης συγκέντρωσης στη περιοχή της μικρότερης (στον τύπο δηλώνεται με το -) και είναι:

$$F = -D_d \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3.1)$$

όπου F η ροή μάζας ανά μονάδα επιφάνειας (M/TL^2)

D_d ο συντελεστής μοριακής διαχύσεως (L^2/T)

C η συγκέντρωση διαλυόμενης στο νερό ουσίας (M/L^3)

$\partial C/\partial x$ η κλίση συγκέντρωσης ($M/L^3/L$)

Αδυναμία του παραπάνω τύπου θεωρείται ότι δεν λαμβάνονται υπόψη διαφορές στη θερμοκρασία και την πίεση, παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη μεταφορά μάζας.

Στο δεύτερο νόμο του ο Fick περιγράφει τη μεταφορά μάζας σε συστήματα όπου η συγκέντρωση της διαλυόμενης στο νερό ουσίας αλλάζει με τη πάροδο του χρόνου:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_d \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3.2)$$

όπου $\partial C/\partial t$ είναι η αλλαγή της συγκέντρωσης με τη πάροδο του χρόνου ($M/L^3/T$)

Στα πορώδη μέσα λόγω του ότι τα ιόντα πρέπει να μετακινηθούν μέσω των κενών των πόρων η διάχυση δεν πραγματοποιείται με τον ταχύ ρυθμό που γίνεται στο νερό. Για το λόγο αυτό στους παραπάνω τύπους ο συντελεστής μοριακής διαχύσεων D_d αντικαθίσταται από έναν ενεργό συντελεστή μοριακής διαχύσεως D^* , ο οποίος σύμφωνα με τον Bear (1972) ισούται με:

$$D^* = \omega D_d \quad (3.3)$$

όπου ω συντελεστής ο οποίος σχετίζεται με το δαιδαλόδες των πόρων, όπου $\omega < 1$.

Το δαιδαλόδες των πόρων (tortuosity) είναι ένα μέτρο της επίδρασης του σχήματος που έχει το πορώδες στην διέλευση μιας ουσίας από αυτό. Σύμφωνα με τον Bear (1972), αν το μήκος σε ευθεία γραμμή μιας απόστασης δύο σημείων είναι L και η απόσταση μεταξύ των δύο ίδιων σημείων μετρούμενη όμως μέσω των κενών του πορώδους είναι L_e , τότε το δαιδαλόδες των πόρων τισούται με:

$$\tau = \frac{L}{L_e} \quad (3.4)$$

Το δαιδαλόδες των πόρων έχει πάντα τιμή μικρότερη του 1 λόγω του ότι για να περάσει μια ουσία ένα πορώδες μέσο πρέπει να κινηθεί στο κενό που υπάρχει μεταξύ των κόκκων του πορώδους. Η τιμή του συντελεστή ω επίσης είναι μικρότερη του 1 και μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά. Ενδεικτικές τιμές για τον συντελεστή ω σε ομοιόμορφα κατανεμημένη άμμο σε στήλη είναι 0,7 (Perkins and Johnson, 1963) και από 0,01 έως 0,5 για εργαστηριακές μετρήσεις χρησιμοποιώντας γεωλογικά υλικά (Freeze and Cherry, 1979).

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, διάχυση μπορεί να συμβεί και απουσία ταχύτητας ροής. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι η διάχυση της συγκέντρωσης της ουσίας γύρω από την θέση της πηγής ακολουθεί τη κανονική κατανομή. Με τον τρόπο αυτό η κατανομή της διαχεόμενης ουσίας μπορεί να περιγραφεί από δύο σταθερές τη μέση τιμή \bar{C} και την τυπική απόκλιση σ_c^2 . Όταν συμβεί αυτό ο ενεργός συντελεστής μοριακής διαχύσεως D^* (De Josselin De Jong, 1958) ισούται με:

$$D^* = \frac{\sigma_c^2}{2t} \quad (3.5)$$

όπου t ο χρόνος (sec).

Πίνακας 3.1: Συντελεστές μοριακής διαχύσεως στο νερό στους 25°C

<i>Κατιόντα</i>	D_d
H^+	$9.31 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$
Na^+	$1.33 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$
K^+	$1.96 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$
Rb^+	$2.06 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$
Cs^+	$2.07 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$
Mg^{2+}	$7.05 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$
Ca^{2+}	$7.93 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$
Sr^{2+}	$7.94 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$
Ba^{2+}	$8.48 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$
Ra^{2+}	$8.89 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$
Mn^{2+}	$6.88 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$
Fe^{2+}	$7.19 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$
Cr^{3+}	$5.94 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$
Fe^{3+}	$6.07 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$
<i>Ανιόντα</i>	
OH^-	$5.27 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$
F^-	$1.46 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$
Cl^-	$2.03 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$
Br^-	$2.01 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$
HS^-	$1.73 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$
HCO_3^-	$1.18 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$
SO_4^{2-}	$1.07 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$
CO_3^{2-}	$9.55 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$

Πηγή: Li and Gregory (1974)

3.3 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ ΛΟΓΩ ΡΟΗΣ (ADVECTION)

Στη μεταφορά λόγω ροής (μεταγωγή ρύπου) η διαλυόμενη ουσία μεταφέρεται με το νερό που ρέει. Η ποσότητα της διαλυμένης ουσίας είναι συνάρτηση της συγκέντρωσής της στο νερό και της ποσότητας του νερού που ρέει. Για μονοδιάστατη ροή σε μια μονάδα επιφάνειας πορώδους μέσου η ποσότητα του νερού που περνά ισούται με τη μέση γραμμική ταχύτητα επί το ενεργό πορώδες (Fetter, 1999). Η μέση γραμμική ταχύτητα v_x , είναι ο ρυθμός με τον οποίο συμβαίνει η ροή του νερού μέσου του πορώδους μέσου, και όχι ο μέσος όρος των χρόνων των μορίων του νερού να κινηθούν δια μέσου των κενών των πόρων, ο οποίος είναι μεγαλύτερος από τη μέση γραμμική ταχύτητα εξαιτίας του δαιδαλώδους των πόρων. Το ενεργό πορώδες n_e είναι τα κενά των πόρων μέσω των οποίων συμβαίνει η ροή και όχι το συνολικό πορώδες. Έτσι σύμφωνα με τον Fetter ισχύει:

$$v_x = \frac{K}{n_e} \frac{dh}{dl} \quad (3.6)$$

όπου v_x η μέση γραμμική ταχύτητα (L/T)

K η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

n_e το ενεργό πορώδες

dh/dl η υδραυλική κλίση (L/L)

Η μονοδιάστατη ροή μάζας ανά μονάδα επιφάνειας F_x λόγω μεταγωγής ισούται με τη ροή του νερού επί τη συγκέντρωση της διαλυόμενης ουσίας με (Fetter, 1999):

$$F_x = v_x n_e C \quad (3.7)$$

Η μονοδιάστατη εξίσωση της μεταφοράς λόγω ροής τελικά γίνεται (Fetter, 1999):

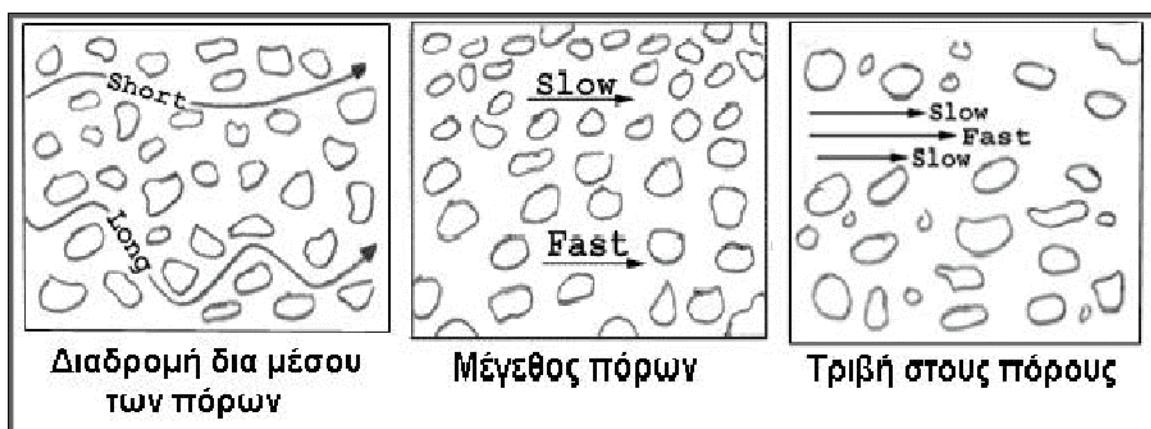
$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3.8)$$

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η μεταφορά μάζας λόγω ροής σε διαφορετικά γεωλογικά στρώματα διαφέρει λόγω της ετερογένειας των στρωμάτων. Οπότε για πειραματικές διαδικασίες είναι προτιμότερο να υπάρχει ένα μοναδικό στρώμα εδάφους αλλιώς τα αποτελέσματα δεν θα μπορούν να επαληθευτούν με τους παραπάνω τύπους.

3.4 ΔΙΑΣΠΟΡΑ (DISPERSION)

3.4.1 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑ (MECHANICAL DISPERSION)

Καθώς το νερό κινείται μέσα σε ένα πορώδες μέσο η ταχύτητά του μπορεί να είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από τη μέση γραμμική ταχύτητα. Οι λόγοι που συμβαίνει αυτό είναι: α) ότι καθώς το νερό κινείται παρατηρείται μεγαλύτερη ταχύτητα στο μέσο των κενών από ότι στα σημεία που το νερό ακουμπά στους κόκκους του μέσου λόγω τριβής, β) κάποιες από τις διαδρομές που ακολουθεί το νερό μπορεί να είναι μεγαλύτερες από άλλες καθυστερώντας τη διέλευση του νερού και γ) κάποια κενά είναι μεγαλύτερα με αποτέλεσμα το νερό να κινείται ταχύτερα δια μέσου τους.



Σχήμα 3.1 : Παράγοντες που επηρεάζουν τη ταχύτητα ροής νερού δια μέσου πορώδους μέσου (Πηγή: Ιστοσελίδα www.cee.vt.edu)

Εάν το νερό που περιέχει ένα ρύπο ταξίδευε με την ίδια ταχύτητα σε όλα τα σημεία του τότε θα παραμέριζε το καθαρό νερό που θα συναντούσε στη διαδρομή του χωρίς να υπάρχει μίξη των δύο νερών. Εξαιτίας λοιπόν του διαφορετικού προφύλ ταχύτητας, που εξηγήθηκε παραπάνω, το νερό που μεταφέρει το ρύπο στη συνάντηση με καθαρό νερό αναμιγνύεται μεταδίδοντας τη μόλυνση. Η μίξη που συμβαίνει ονομάζεται μηχανική διασπορά. Εάν η μίξη αυτή συμβαίνει στην ίδια κατεύθυνση με τη ροή του νερού ονομάζεται διαμήκης διασπορά (longitudinal dispersion). Ακόμη, επειδή τα κενά των πόρων είναι ακανόνιστα είναι δυνατό να συμβεί και διασπορά προς άλλες διευθύνσεις. Στην περίπτωση που η διασπορά συμβαίνει κάθετα στη ροή του νερού τότε ονομάζεται εγκάρσια διασπορά (transverse dispersion).

Σύμφωνα με τον Fetter (1999) είναι δυνατόν η μηχανική διασπορά να περιγραφεί από τους νόμους του Fick που ισχύουν για τη διάχυση. Συγκεκριμένα, για την περιγραφή της μηχανικής διασποράς εισάγεται ένας συντελεστής (συντελεστής μηχανικής διασποράς), ο οποίος ισούται με μια ιδιότητα του μέσου που ονομάζεται δυναμική διασπορά (dynamic dispersivity) α, επί τη μέση γραμμική ταχύτητα. Επίσης θεωρώντας ότι ο είναι το μοναδιαίο διάνυσμα που αντιστοιχεί στην κατεύθυνση της ροής ισχύει:

$$\text{Συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς} = \alpha_i v_i \quad (3.9)$$

όπου v_i η μέση γραμμική ταχύτητα στη διεύθυνση i (L/T)

α_i η δυναμική διασπορά στη διεύθυνση i (L)

$$\text{Συντελεστής εγκάρσιας μηχανικής διασποράς} = \alpha_j v_i \quad (3.10)$$

όπου v_i η μέση γραμμική ταχύτητα στη διεύθυνση i (L/T)

α_j η δυναμική διασπορά στη διεύθυνση j (L)

3.4.2 ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑ (HYDRODYNAMIC DISPERSION)

Η υδροδυναμική διασπορά ορίζεται ως ο συνδυασμός της μοριακής διαχύσεως και της μηχανικής διασποράς. Τα δύο αυτά μεγέθη ορίζουν ένα παράγοντα ο οποίος καλείται συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς D. Οπότε ισχύει:

$$D_L = \alpha_L v_i + D^* \quad (3.11)$$

και

$$D_T = \alpha_T v_i + D^* \quad (3.12)$$

όπου D_L = συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς παράλληλος στη διεύθυνση της ροής (longitudinal hydrodynamic dispersion coefficient)

D_T = συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς κάθετος στη διεύθυνση της ροής (transverse hydrodynamic dispersion coefficient)

α_L = δυναμική διασπορά στη διεύθυνση i

α_T = δυναμική διασπορά στη διεύθυνση j



Σχήμα 3.2 : Επίδραση διάχυσης και μηχανικής διασποράς στο λόγο C/C_0

Στο παραπάνω σχήμα γίνεται φανερή η επίδραση αλλά και η σύγκριση του αποτελέσματος που έχουν στη συγκέντρωση ενός ρύπου η διάχυση και ο συνδυασμός διάχυσης – μηχανικής διασποράς.

Σύμφωνα με τον Fetter (1999), αν εισαχθεί στιγμαία σε ένα υδροφορέα ουσία στο χρόνο t_0 και στο διάστημα $x_0=0+\alpha$, θα δημιουργηθεί αρχική συγκέντρωση C_0 από την ουσία. Στη συνέχεια λόγω των φαινομένων διάχυσης σε συνδυασμό με τη μηχανική διασπορά η μέγιστη συγκέντρωση τη στιγμή t_1 θα φτάσει την τιμή $C_1 (< C_0)$ και τη στιγμή t_2 την τιμή $C_2 (< C_1)$. Η κατανομή της συγκέντρωσης της ουσίας στους χρόνους t_1 και t_2 θα ακολουθεί τη κανονική κατανομή όπως δείχνει το σχήμα 3.3. Οπότε οι δύο αυτές καμπύλες θα είναι δυνατό να περιγραφούν μέσω των δύο παραμέτρων, τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση. Για το λόγο αυτό για τους συντελεστές υδροδυναμικής διασποράς προτείνονται οι σχέσεις:

$$D_L = \frac{\sigma_L^2}{2t} \quad (3.13)$$

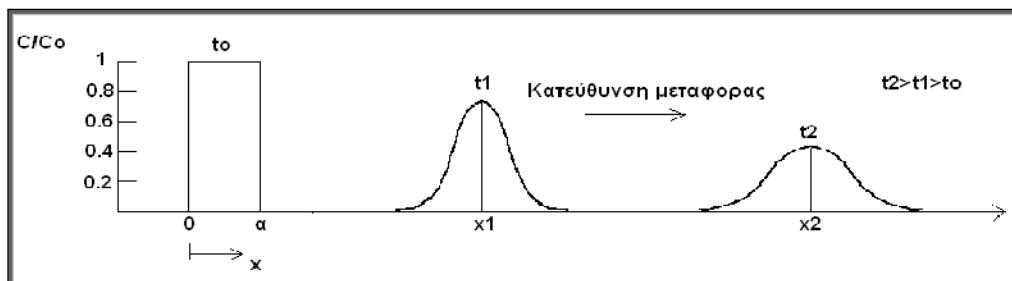
και

$$D_T = \frac{\sigma_T^2}{2t} \quad (3.14)$$

όπου t ο χρόνος

σ_L^2 είναι η τυπική απόκλιση της διαμήκους εξάπλωσης της ουσίας και

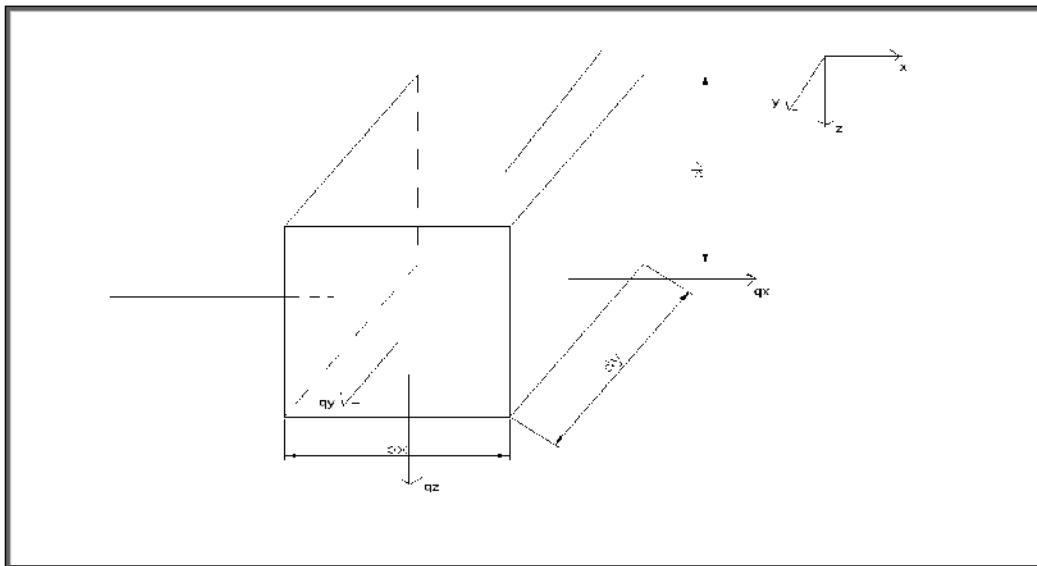
σ_T^2 η τυπική απόκλιση της εγκάρσιας εξάπλωσης της ουσίας



Σχήμα 3.3 : Εξάπλωση της ουσίας με κανονική κατανομή

3.5 ΕΞΙΣΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ (ADVECTION – DISPERSION EQUATION)

Για την εξαγωγή της εξίσωσης μεταφοράς μάζας θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση του ισοζυγίου μάζας σε ένα στοιχειώδες, αλλά αντιπροσωπευτικό τμήμα ενός πορώδες μέσου. Το πορώδες μέσο θεωρείται ομογενές, ισότροπο, κορεσμένο και επικρατούν συνθήκες που επιτρέπουν την εφαρμογή του νόμου του Darcy.



Σχήμα 3.4 : Αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος πορώδους μέσου

Η μέση γραμμική ταχύτητα v , έχει συνιστώσες v_x , v_y και v_z . Το πορώδες είναι σταθερή ποσότητα εφόσον το υλικό είναι ομογενές. Η συγκέντρωση της ουσίας C , αντιστοιχεί σε μάζα ανά μονάδα όγκου.

Η ουσία θα μεταφερθεί λόγω ροής (advection) και υδροδυναμικής διασποράς (hydrodynamic dispersion). Στην κατεύθυνση i (κατεύθυνση της ροής) η μεταφορά της ουσίας είναι:

$$\text{Μεταφορά λόγω ροής} = v_i n_e C dA \quad (3.15)$$

$$\text{Μεταφορά λόγω υδροδυναμικής διασποράς} = n_e D_i \frac{\partial C}{\partial i} dA \quad (3.16)$$

όπου dA είναι η επιφάνεια η κάθετη στη ροή και i το διάνυσμα το κάθετο στην επιφάνεια αυτή, συνεπώς παράλληλο στη ροή.

Η συνολική μάζα της ουσίας F_i ανά μονάδα επιφάνειας που μεταφέρεται στη διεύθυνση i , ανά μονάδα χρόνου, είναι το άθροισμα των δύο παραπάνω όρων και συγκεκριμένα:

$$F_i = v_i n_e C - n_e D_i \frac{\partial C}{\partial i} \quad (3.17)$$

Το αρνητικό πρόσημο στην παραπάνω σχέση συμβολίζει ότι η ροή μάζας λόγω υδροδυναμικής διασποράς γίνεται από τα σημεία υψηλότερης συγκέντρωσης προς αυτά με χαμηλότερη συγκέντρωση της ουσίας.

Γράφοντας την παραπάνω εξίσωση για όλες τις διευθύνσεις, η συνολική μάζα που εισέρχεται στο στοιχείο είναι:

$$F_x dz dy + F_y dx dz + F_z dx dy \quad (3.18)$$

Η συνολική ποσότητα ουσίας που εξέρχεται από το στοιχείο είναι:

$$\left(F_x + \frac{\partial F_x}{\partial x} dx \right) dy dz + \left(F_y + \frac{\partial F_y}{\partial y} dy \right) dx dz + \left(F_z + \frac{\partial F_z}{\partial z} dz \right) dx dy \quad (3.19)$$

Η διαφορά ανάμεσα στη μάζα της ουσίας που εισέρχεται στο στοιχειώδη όγκο και αυτής που εξέρχεται είναι:

$$-\left(\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (3.20)$$

Ο ρυθμός μεταβολής της μάζας της ουσίας στο στοιχειώδη όγκο είναι:

$$n_e \frac{\partial C}{\partial t} dx dy dz \quad (3.21)$$

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας στο υπόψη στοιχείο, ο ρυθμός μεταβολής της μάζας πρέπει να ισούται με τη διαφορά της μάζα της ουσίας που εισέρχεται με αυτή που εξέρχεται του συγκεκριμένου στοιχείου. Οπότε:

$$\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = -n_e \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.22)$$

Από την εξίσωση (3.17), παίρνουμε τις τιμές των F_x , F_y και F_z τις οποίες αντικαθιστούμε στην εξίσωση (3.22). Επίσης με απαλοιφή του n_e και από τα δύο μέλη, η (3.22) καταλήγει στην τελική της μορφή:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] \\ & - \left[\frac{\partial}{\partial x} (v_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (v_y C) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z C) \right] = \frac{\partial C}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί μια τρισδιάστατη εξίσωση μεταφοράς μάζας για μια ουσία η οποία δεν αλληλεπιδρά με τους κόκκους του πορώδους μέσου, ούτε υφίσταται κάποιου είδους εξασθένηση.

Παρότι σε ένα ομοιογενές και ισότροπο μέσο θα περίμενε κανείς οι συντελεστές D_x , D_y και D_z να μην διαφέρουν, λόγω του ότι η υδροδυναμική διασπορά είναι μια συνάρτηση της κατεύθυνσης της ροής, οι παραπάνω συντελεστές είναι διαφορετικοί.

Η εξίσωση (3.23) γραμμένη για μονοδιάστατη ροή σε ομοιογενές και ισότροπο πορώδες μέσο, όπου η ταχύτητα παραμένει σταθερή σε όλο το μήκος του στοιχείου γίνεται:

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.24)$$

Σε ομοιογενές πορώδες μέσο με σταθερή ταχύτητα ροής, η εξίσωση 3.23 για δυσδιάστατη ροή, όπου η ροή είναι παράλληλη στον άξονα x ισχύει:

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.25)$$

όπου D_L = συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς παράλληλος στη διεύθυνση της ροής

D_T = συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς κάθετος στη διεύθυνση της ροής

3.6 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ

3.6.1 ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ ΛΟΓΩ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ ΤΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΣΤΟΥΣ ΕΔΑΦΙΚΟΥΣ ΚΟΚΚΟΥΣ

Υπάρχουν πολλοί μηχανισμοί που μπορούν να επηρεάσουν τη συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στο νερό, ο σημαντικότερος όμως από αυτούς είναι η προσρόφηση της διαλυμένης ουσίας πάνω στους εδαφικούς κόκκους. Ο τρόπος με τον οποίο είναι δυνατός ο προσδιορισμός της επίδρασης του φαινομένου αυτού, είναι ο συσχετισμός της ποσότητας που προσκολλάται στα στερεά S με την συνολική συγκέντρωση C. Ένας από τους συχνότερα χρησιμοποιούμενους τύπους είναι ο (Freundlich – ισόθερμη προσρόφηση):

$$S = K_d C^b \quad (3.26)$$

όπου S είναι η μάζα που προσροφάται ανά μονάδα στερεών όγκου του πορώδους μέσου

K_d ο συντελεστής κατανομής μάζας (distribution coefficient) και
b συντελεστής που προσδιορίζεται πειραματικά

Θεωρώντας γραμμική σχέση ανάμεσα στη διαλυμένη ουσία στο νερό και της συγκέντρωσης της ουσίας πάνω στους εδαφικούς κόκκους (δηλαδή για b=1), ισχύει:

$$S = K_d C \quad (3.27)$$

Οπότε με μερική παραγώγιση και επίλυση ως προς K_d ισχύει:

$$K_d = \frac{\partial S}{\partial C} \quad (3.28)$$

Ακόμη αν ρ_b είναι η πυκνότητα των στερεών ανά μονάδα όγκου και n το πορώδες του μέσου ισχύει:

$$-\frac{\rho_b}{n} \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\rho_b}{n} \frac{\partial S}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.29)$$

Άρα, με συνδυασμό των σχέσεων (3.28), (3.29) και την μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς μάζας (3.24) έχουμε τελικά:

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \left(1 + \frac{\rho_b}{n} K_d \right) \quad (3.30)$$

Τέλος ορίζοντας τον συντελεστή επιβράδυνσης R (retardation factor) ως:

$$R = 1 + \frac{\rho_b K_d}{n} \quad (3.31)$$

προκύπτει η τελική μορφή της εξίσωσης μεταφοράς μάζας σε πορώδες μέσο:

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = R \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.32)$$

3.6.2 ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ ΛΟΓΩ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ

Η αποσύνθεση είναι δυνατό να προκληθεί από πολλούς παράγοντες. Ορισμένοι από αυτούς είναι η αποσύνθεση λόγω ραδιενέργειας, λόγω βιοδιάσπασης και τέλος λόγω υδρόλυσης. Λαμβάνεται υπόψη θέτοντας τον όρο $-\lambda C$ στην εξίσωση, όπου ο συντελεστής λ αποτελεί το ρυθμό αποσύνθεσης με μονάδες t^{-1} (π.χ. sec^{-1}). Με τον τρόπο αυτό η μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς μάζας γίνεται:

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.33)$$

Γενικά, η επίδραση της αποσύνθεσης είναι τέτοια που μειώνει τη συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στο νερό συναρτήσει του χρόνου, δηλαδή ουσιαστικά όσο περνά ο χρόνος τόσο αποδομείται η ουσία.

3.7 ΑΡΙΘΜΟΣ PECLET

Στα περισσότερα πρακτικά προβλήματα η συνεισφορά της διάχυσης στη μεταφορά μάζας είναι συνήθως αμελητέα και παραλείπεται. Με τον αριθμό Peclet γίνεται δυνατός ο προσδιορισμός της διάχυσης και της μηχανικής διασποράς ξεχωριστά.

Ο αριθμός Peclet είναι μια αδιάστατη παράμετρος η οποία ορίζεται από το λόγο συμμεταφοράς μάζας σε πορώδες μέσο εξαιτίας της διαδικασίας συμμεταφοράς προς τη διάχυση ή τη διασπορά (Χρυσικόπουλος, 2007). Ο αριθμός Peclet συναντάται στις δύο παρακάτω μορφές:

$$Pe = \frac{v_x L}{D_L} \quad (3.34)$$

και

$$Pe = \frac{v_x d}{D_d} \quad (3.35)$$

όπου d η διάμετρος των κόκκων του πορώδου μέσου

Η εξίσωση (3.34) είναι ένα μέτρο του λόγου μεταφοράς μάζας σε ένα πορώδες μέσο εξαιτίας της διαδικασίας συμμεταφοράς ως προς τη διασπορά, ενώ η εξίσωση (3.35) είναι ένα μέτρο του λόγου μεταφοράς μάζας σε ένα πορώδες μέσο εξαιτίας της διαδικασίας συμμεταφοράς ως προς τη διάχυση.

Έχουν εξαχθεί διάφορες εμπειρικές σχέσεις οι οποίες συσχετίζουν τη διαμήκη και εγκάρσια υδροδυναμική διασπορά με τον αδιάστατο αριθμό Peclet και εφαρμόζονται σε πειραματικές στήλες με ομοιόμορφα κατανεμημένη άμμο. Ορισμένες από αυτές είναι (Χρυσικόπουλος, 2007):

$$\frac{D_L}{D^*} = 0,67 \quad (Pe < 1)$$

$$\frac{D_L}{D^*} = 0,67 + 0,5(Pe)^{1,2} \quad (1 < Pe < 260) \quad (3.36)$$

$$\frac{D_L}{D^*} = 0,67 + 1,8Pe \quad (260 < Pe < 10^5)$$

$$\frac{D_T}{D^*} = 0,7 \quad (\text{Pe} < 1)$$

$$\frac{D_T}{D^*} = 0,7 + 0,025(Pe)^{1,1} \quad (1 < \text{Pe} < 260) \quad (3.37)$$

$$\frac{D_L}{D^*} = 0,7 + 0,025Pe \quad (260 < \text{Pe} < 10^5)$$

Παρόλα αυτά, οι παραπάνω εμπειρικές σχέσεις πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή, γιατί σύμφωνα με πειραματικά αποτελέσματα των Pozzi and Blackwell (1963) και των Hassinger and von Rosenberg (1968), για σταθερό αριθμό Peclet οι συντελεστές D_L και D_T αυξάνονται όσο αυξάνεται το μέγεθος των γυάλινων σφαιριδίων που χρησιμοποιούνται στις πειραματικές στήλες ως πληρωτικό υλικό.

3.8 ΑΡΧΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Η εξίσωση μεταφοράς μάζας είναι μια διαφορική εξίσωση, οπότε για την επίλυσή της είναι απαραίτητο να υπάρχουν οι αρχικές ή συνοριακές συνθήκες που ισχύουν για τη κάθε περίπτωση.

Υπάρχουν τριών τύπων συνοριακές συνθήκες για τη μεταφορά μάζας. Η συνθήκη πρώτου τύπου (I) αναφέρεται σε σταθερή συγκέντρωση. Η συνοριακή συνθήκη δεύτερου τύπου (II) αναφέρεται σε σταθερή κλίση. Τέλος, η συνοριακή συνθήκη τρίτου τύπου (III) αναφέρεται σε σταθερή ροή μάζας.

3.8.1 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΥΠΟΥ Ι

Η περίπτωση αυτή αναφέρεται όταν αρχικά η συγκέντρωση της ουσίας στο υπό εξέταση τμήμα είναι μηδενική και σε κάποια χρονική στιγμή t , εισέρχεται στο υπό εξέταση στοιχείο ουσία συγκέντρωσης C_0 . Για τη περίπτωση αυτή οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες γράφονται:

$$\begin{aligned} C(x,0) &= 0 \quad ,(\chi \geq 0) && \text{αρχική συνθήκη} \\ C(0,t) &= C_0 \quad ,(t \geq 0) && \text{συνοριακή συνθήκη} \\ C(\infty,t) &= 0 \quad ,(t \geq 0) && \text{συνοριακή συνθήκη} \end{aligned}$$

Με βάση τις συνθήκες αυτές και θεωρώντας ότι το υπό εξέταση στοιχείο είναι μια πειραματική στήλη με ομοιόμορφη άμμο, η μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς μάζας έχει λύση:

$$C = \frac{C_0}{2} \left[erfc\left(\frac{L-v_x t}{2\sqrt{D_L t}}\right) + \exp\left(\frac{v_x L}{D_L}\right) erfc\left(\frac{L+v_x t}{2\sqrt{D_L t}}\right) \right] \quad (3.38)$$

Η παραπάνω εξίσωση γραμμένη σε αδιάστατη μορφή γίνεται:

$$C_R(t_R, Pe) = 0,5 \left\{ erfc\left[\left(\frac{Pe}{4t_R}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (1-t_R)\right] + \exp(Pe) erfc\left[\left(\frac{Pe}{4t_R}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (1+t_R)\right] \right\} \quad (3.39)$$

όπου $t_R = v_x t / L$

$$C_R = C/C_0$$

Pe = αριθμός Peclet

erfc = συνάρτηση σφάλματος

3.8.2 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΥΠΟΥ II

Μια τέτοια περίπτωση θα μπορούσε να είναι μια διαφροή από κανάλι στο οποίο ρέει μολυσμένο νερό και καταλήγει σε ένα υπόγειο υδροφορέα. Ο ρυθμός με τον οποίο διοχετεύεται το μολυσμένο νερό θεωρείται σταθερός και η μάζα της ουσίας που εισάγεται στον υδροφορέα ανάλογη της διάρκειας της διαφροής. Η αρχική συγκέντρωση της ουσίας που εισέρχεται είναι C_0 και οι συνθήκες για αυτή την περίπτωση είναι:

$$C(x,0) = 0 \quad , \quad (-\infty < x < \infty) \quad \text{αρχική συνθήκη}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} n_e C(x,t) dx = C_0 n_e t \quad , \quad (t > 0) \quad \text{συνοριακή συνθήκη}$$

$$C(\infty,t) = 0 \quad , \quad (t \geq 0) \quad \text{συνοριακή συνθήκη}$$

Η λύση της μονοδιάστατης εξίσωσης μεταφοράς μάζας για τις συνθήκες αυτές γίνεται:

$$C = \frac{C_0}{2} \left[erfc\left(\frac{L - v_x t}{2\sqrt{D_L t}}\right) - \exp\left(\frac{v_x L}{D_L}\right) erfc\left(\frac{L + v_x t}{2\sqrt{D_L t}}\right) \right] \quad (3.40)$$

Η παραπάνω εξίσωση γραμμένη σε αδιάστατη μορφή γίνεται:

$$C_R(t_R, Pe) = 0,5 \left\{ erfc\left[\left(\frac{Pe}{4t_R}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 - t_R)\right] - \exp(Pe) erfc\left[\left(\frac{Pe}{4t_R}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + t_R)\right] \right\} \quad (3.41)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις είναι ακριβώς ίδιες με αυτές που ισχύουν για τις συνθήκες τύπου I με μόνη διαφορά το πρόσημο στον δεύτερο όρο της αγκύλης.

Ο Sauty προτείνει για μεγάλους αριθμούς Peclet, να παραλείπεται ο δεύτερος όρος της αγκύλης. Ο λόγος είναι ότι στην περίπτωση αυτή ο δεύτερος όρος είναι πολύ

μικρός σε σχέση με τον πρώτο όρο της αγκύλης και μπορεί να αμεληθεί χωρίς να υπάρχει σημαντική διαφορά στο αποτέλεσμα.

3.8.3 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΥΠΟΥ III

Για την περίπτωση αυτή, όπου υπάρχει συνεχής τροφοδότηση του υπό εξέταση στοιχείου με ουσία, οι συνθήκες είναι:

$$\begin{aligned} C(x,0) &= 0 && \text{αρχική συνθήκη} \\ \left(-D \frac{\partial C}{\partial x} + v_x C \right)_{x=0} &= v_x C_0 && \text{συνοριακή συνθήκη} \\ \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow \infty} &= (\text{finite}) && \text{συνοριακή συνθήκη} \end{aligned}$$

Η λύση της μονοδιάστατης εξίσωσης μεταφοράς μάζας για τις συνθήκες αυτές γίνεται:

$$C = \frac{C_0}{2} \left[erfc \left(\frac{L - v_x t}{2\sqrt{D_L t}} \right) + \left(\frac{v_x^2 t}{\pi D_L} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{(L - v_x t)^2}{4D_L t} \right] \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_x L}{D_L} + \frac{v_x^2 t}{D_L} \right) \exp \left(\frac{v_x L}{D_L} \right) erfc \left(\frac{L - v_x t}{2\sqrt{D_L t}} \right) \right] \quad (3.42)$$

3.8.4 ΛΥΣΕΙΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΚΑΙ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΣΥΧΝΑ ΕΜΦΑΝΙΖΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ

3.8.4.1 ΣΤΙΓΜΙΑΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΜΙΚΡΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟ ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ

Στη περίπτωση αυτή γίνεται εισαγωγή μικρής ποσότητας ουσίας στιγμιαία, σε ομοιόμορφο, μονοδιάστατο πεδίο ροής. Η μέγιστη συγκέντρωση C_{max} θα εντοπιστεί ύστερα από t_{max} μετά την εισαγωγή της ουσίας στο πεδίο ροής. Η αδιάστατη λύση της μονοδιάστατης εξίσωσης μεταφοράς μάζας για τη περίπτωση αυτή γίνεται:

$$C_R(t_R, Pe) = \frac{E}{(t_R)^{\frac{1}{2}}} \exp\left(-\frac{Pe}{4t_R}(1-t_R)^2\right) \quad (3.43)$$

όπου

$$E = (t_R)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{Pe}{4t_{Rmax}}(1-t_{Rmax})^2\right)$$

$$t_{Rmax} = \left(1 + Pe^{-2}\right)^{\frac{1}{2}} - Pe^{-1} \quad (\text{αδιάστατος χρόνος στον οποίο συμβαίνει η μέγιστη συγκέντρωση})$$

$$C_R = C / C_{max}$$

3.8.4.2 ΣΥΝΕΧΗΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΟΥΣΙΑΣ ΣΕ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ

Στην περίπτωση αυτή θεωρούμε ότι υπάρχει σημειακή πηγή η οποία τροφοδοτεί συνεχώς τον υδροφορέα με ουσιά συγκέντρωσης C_0 , με ρυθμό Q και ο υδροφορέας έχει πλάτος b . Για τον υδροφορέα αυτό, ισχύει η δισδιάστατη εξίσωση μεταφοράς μάζας, η ταχύτητα είναι ομοιόμορφη και σταθερή (v_x) και παράλληλη στον άξονα x . Η αδιάστατη λύση της δισδιάστατης εξίσωσης μεταφοράς μάζας για τη περίπτωση αυτή γίνεται:

$$C(x, y, t) = \frac{1}{4\pi(D_L D_T)^{0.5}} \exp\left[-\frac{(x-v_x t)^2}{4D_L t} - \frac{y^2}{4D_T t}\right] \quad (3.44)$$

Εάν ο ρυθμός εισαγωγής της ουσίας μπορεί να ορισθεί ως $C_0(Q/b)$ τότε ισχύει:

$$C(x, y, t) = \frac{C_0(Q/b)dt}{4\pi(D_L D_T)^{0.5}} \exp\left[-\frac{(x - v_x t)^2}{4D_L t} - \frac{y^2}{4D_T t}\right] \quad (3.45)$$

Εάν ο ρυθμός εισαγωγής της ουσίας είναι Q/b και συνεχής τότε η λύση σε χρόνο t γίνεται:

$$C(x, y, t) = \frac{C_0(Q/b)}{4\pi(D_L D_T)^{0.5}} \int_{\theta=0}^{\theta=t} \exp\left[-\frac{(x - v_x \theta)^2}{4D_L \theta} - \frac{y^2}{4D_T \theta}\right] \frac{d\theta}{\theta} \quad (3.46)$$

Συνθήκες σταθερής ροής παρατηρούνται σε χρόνο $t = \infty$, οπότε η λύση της παραπάνω από 0 έως ∞ είναι:

$$C(x, y) = \frac{C_0(Q/b)}{2\pi(D_L D_T)^{0.5}} \exp\left(\frac{v_x x}{2D_L}\right) K_0\left[\left(\frac{v_x^2}{4D_L} \left(\frac{x^2}{D_L} + \frac{y^2}{D_T}\right)\right)^{\frac{1}{2}}\right] \quad (3.47)$$

όπου K_0 = η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel (δεύτερου είδους και μηδενικής κλάσης)

Q = ο ρυθμός εισαγωγής της ουσίας

b = το πλάτος του υδροφορέα

3.8.4.3 ΣΤΙΓΜΙΑΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΜΙΚΡΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ

Εάν μια μικρή ποσότητα ουσίας εισαχθεί σε όλο το πλάτος ενός υδροφορέα, σε συνθήκες ομοιόμορφης και σταθερής ροής, τότε η ουσία θα εξαπλωθεί στη διεύθυνση της ροής συναρτήσει του χρόνου.

Οπότε στη περίπτωση αυτή, έστω ότι εισάγεται στο σημείο (x_0, y_0) ενός υδροφορέα με επιφάνεια A και σταθερό δισδιάστατο πεδίο ροής, ουσία συγκέντρωσης C_0 . Η συγκέντρωση C στο σημείο (x, y) ύστερα από χρόνο t μετά την εισαγωγή θα είναι:

$$C(x, y, t) = \frac{C_0 A}{4\pi(D_L D_T)^{\frac{1}{2}}} \exp \left[-\frac{(x - x_0 - v_x t)^2}{4D_L t} - \frac{(y - y_0)^2}{4D_T t} \right] \quad (3.48)$$

Η μέγιστη συγκέντρωση μιας μικρής ποσότητας ουσίας που έχει εισαχθεί σε ένα υδροφορέα, βρίσκεται πάντα στο κέντρο της μάζας της διαλυόμενης – μεταφερόμενης ουσίας. Εάν λοιπόν, η ροή γίνεται προς τη διεύθυνση του x άξονα, η εισαγωγή της ουσίας έγινε στο σημείο $x_0 = 0$ και $y_0 = 0$, το κέντρο της μάζας βρίσκεται σε κάθε χρονική στιγμή t στο σημείο $x = v_x t$ και $y = 0$ η παραπάνω εξίσωση για τη μέγιστη C_{\max} δίνει:

$$C_{\max} = \frac{C_0 A}{4t\pi\sqrt{D_L D_T}} \quad (3.49)$$

3.9 ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ ΑΠΟ NAPLs

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΟΥΣΙΑΣ ΑΠΟ ΔΙΑΧΥΣΗ ΠΙΣΣΑΣ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

Το πείραμα αυτό διεξάχθηκε από τους Lee et al. (2005). Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε ήταν μια ορθογωνική δεξαμενή 16 μέτρων μήκους, 1 μέτρο πλάτους και 3 μέτρων ύψους. Για το πείραμα όμως χρησιμοποίησαν μόνο το μισό μήκος της δεξαμενής, το οποίο γέμισαν με άμμο μικρής υδραυλικής διαπερατότητας μέχρι ύψους 24 cm και το υπόλοιπο με άμμο αρκετά μεγάλης διαπερατότητας. Στην αρχή του μήκους της διάταξης, στον πυθμένα δημιουργησαν ‘πηγή’ με πίσσα διαστάσεων 250 cm μήκος, 100 cm πλάτος και 3 cm ύψος. Τα πειράματα έγιναν με σταθερή και ομοιόμορφη ροή.

Η εξίσωση μεταφορά μάζας που χρησιμοποιήθηκε ήταν για ομοιογενές, κορεσμένο πορώδες μέσο (Chrysikopoulos and Lee, 1998):

$$R_p \frac{\partial C_p(t, x, z)}{\partial t} = D_{xp} \frac{\partial^2 C_p(t, x, z)}{\partial x^2} + D_{zp} \frac{\partial^2 C_p(t, x, z)}{\partial z^2} - v_x \frac{\partial C_p(t, x, z)}{\partial x} - \lambda_p R_p C_p(t, x, z)$$

Σαν αρχική συνθήκη χρησιμοποιήθηκε η: $C_p(0, x, z) = 0$

ΔΙΑΧΥΣΗ ΜΙΑΣ ΟΡΙΣΜΕΝΗΣ ‘ΠΗΓΗΣ’ ΤΡΙΧΛΩΡΟΑΙΘΥΛΕΝΙΟΥ ΣΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟ ΠΟΡΩΔΕΣ ΜΕΣΟ

Το πείραμα αυτό διεξάχθηκε από τους Lee and Chrysikopoulos (2002). Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε ήταν μια γυάλινη δεξαμενή με ειδικά τροποποιημένο πυθμένα από αλουμίνιο όπου είχε ενσωματωθεί η ‘πηγή’ (διάμετρος 7,6 cm και 0,5 cm βάθος) από το τριχλωροαιθυλένια. Η δεξαμενή διαστάσεων 80 cm μήκος και 17 cm πλάτος ήταν γεμάτη με άμμο. Γυάλινα σφαιρίδια στη πηγή στήριζαν μεταλλικό έλασμα, με σκοπό να μην διεισδύσει άμμος στη πηγή. Η ροή ήταν σταθερή.

Η εξίσωση μεταφορά μάζας που χρησιμοποιήθηκε ήταν για κορεσμένο πορώδες μέσο όπου το βάθος της ‘πηγής’ θεωρείται ασήμαντο σε σχέση με το βάθος του υδροφορέα:

$$-D_e \frac{\partial C(t, x, y, 0)}{\partial z} = k(t, x, y)[C_s - C(t, x, y, \infty)]$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο σχεδιασμός, η προετοιμασία καθώς και όλα τα απαραίτητα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

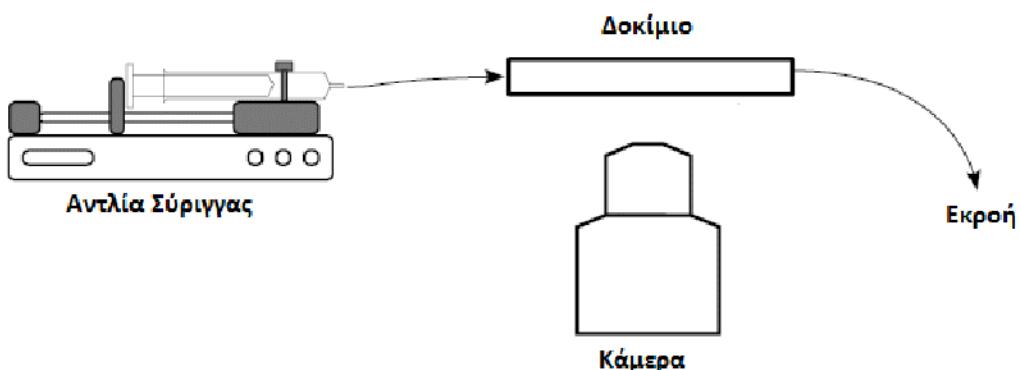
Στόχος της εργασίας αυτής δεν αποτελεί η διεξαγωγή ενός και μόνο πειράματος, αλλά μιας σειράς πειραμάτων. Αναλυτικότερα, θεωρήθηκε σκόπιμο να μελετηθεί πειραματικά το φαινόμενο της διάλυσης μιας ‘πηγής’ NAPL σε ένα κορεσμένο, δισδιάστατο πορώδες δοκίμιο σε συνθήκες μόνιμης ροής νερού, στη συνέχεια σε συνθήκες ροής διαλύματος νερού – κολλοειδών και θα συγκρίνονταν τα αποτελέσματα. Με τον τρόπο αυτό θα εξεταζόταν η επίδραση που έχουν τα κολλοειδή διαλύματα στη διάλυση μια ‘πηγής’ NAPL.

Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζεται με λεπτομέρεια ο πλήρης τεχνικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, ο τρόπος χρήσης του και ο σκοπός του σε κάθε στάδιο των πειράματος. Επίσης, περιγράφονται με λεπτομέρεια η προετοιμασία των πειραμάτων καθώς και ο τρόπος που διεξήχθησαν, έτσι ώστε ο αναγνώστης να έχει σαφή εικόνα της πειραματικής διαδικασίας σε όλα της τα στάδια.

4.2 ΥΑΙΚΑ - ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Στο συγκεκριμένο τμήμα της εργασίας αναφέρεται ο τεχνικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας. Ο συγκεκριμένος εξοπλισμός ελέγχθηκε μέσα από πολυάριθμες δοκιμές και επιλέχθηκε ως ο πλέον κατάλληλότερος για τη διεξαγωγή των πειραμάτων που ακολούθησαν.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα αποτελούνταν από την αντλία σύριγγας (Cole-Parmer® 74900-Series, Multichannel, Syringe Pumps), λάστιχα κατάλληλης διαμέτρου και βαλβίδες για τη σύνδεση της εισόδου του δοκιμίου με την αντλία, το δισδιάστατο πορώδες δοκύμιο, φωτογραφική μηχανή (Nikon D5000) και γυάλινο δοχείο συλλογής της εκροής.



Σχήμα 4.1: Πειραματική Διάταξη

ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΥΡΙΓΓΕΣ

Χρησιμοποιήθηκαν δύο πλαστικές σύριγγες στην αντλία σύριγγας όγκου 60 ml η καθεμία, οι οποίες συνδέθηκαν παράλληλα ώστε το πορώδες μέσο να είναι κορεσμένο με νερό. Ο λόγος που επιλέχθηκαν δύο σύριγγες τόσο μεγάλου όγκου ήταν έτσι ώστε το πείραμα να διαρκεί αρκετό χρόνο, με αποτέλεσμα να γίνεται ορατή μέσω των φωτογραφιών η μείωση του εμβαδού της ‘πηγής’ του NAPL. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν σύριγγες όγκου 1ml για την εισαγωγή του NAPL στο δοκύμιο.

ΛΑΣΤΙΧΑ

Για τη σύνδεση της εισόδου με την αντλία σύριγγας, την έξοδο του πειράματος, καθώς και την εισαγωγή του NAPL χρησιμοποιήθηκαν λάστιχα κατάλληλης διαμέτρου.

ΣΥΣΤΗΜΑ ΦΩΤΙΣΜΟΥ

Για την αποφυγή διαφόρων προβλημάτων, όπως η αντανάκλαση του φωτός του δωματίου στο γυάλινο δοκίμιο και ακολούθως στις φωτογραφίες που πάρθηκαν, κατασκευάστηκε ξύλινο κουτί με κατάλληλη διάταξη φωτισμού. Λεπτομερής περιγραφή του συστήματος γίνεται σε επόμενες παραγράφους του κεφαλαίου.

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ ΚΑΙ ΤΡΙΠΟΔΟ

Χρησιμοποιήθηκε φωτογραφική μηχανή Nikon D5000 και τρίποδο, ώστε να μην κινείται αυτή, για τη λήψη στιγμότυπων κατά την διάρκεια του πειράματος.

ΑΝΤΛΙΑ ΣΥΡΙΓΓΑΣ

Η παροχή νερού στο πορώδες μέσο έγινε με την βοήθεια αντλίας σύριγγας (Cole-Parmer® 74900-Series, Multichannel, Syringe Pumps). Λεπτομερής περιγραφή των ρυθμίσεων του οργάνου γίνεται σε επόμενη παράγραφο του κεφαλαίου.

ΤΡΙΧΛΩΡΟΑΙΘΥΛΕΝΙΟ (TCE)

Το NAPL που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν το τριχλωροαιθυλένιο, γνωστό ως TCE. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε το συγκεκριμένο NAPL είναι ότι το TCE αποτελεί την πιο συχνά εμφανιζόμενη μορφή μόλυνσης από NAPL λόγω της ευρείας χρήσης του στο βιομηχανικό και οικιακό τομέα. Επίσης, το TCE χρησιμοποιήθηκε στο μεγαλύτερο τμήμα των δοκιμών, οπότε όλες οι διαδικασίες που εφαρμόστηκαν για τη μέτρηση και ταυτοποίησης της ουσίας είχαν γίνει με βάση το συγκεκριμένο NAPL.

Ο μοριακός τύπος του τριχλωροαιθυλενίου είναι C_2HCl_3 και το μοριακό του βάρος σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο είναι 131,4 g/mol. Το TCE είναι ένα ‘βαρύ’ NAPL (DNAPL) με πυκνότητα στους 25 °C ίση με 1,463 g/ml οπότε στην ανάμιξή του με το νερό βρίσκεται στο κατώτερο στρώμα. Το σημείο βρασμού του βρίσκεται στους 86,7 °C. Ο συντελεστής διάχυσης του TCE στον αέρα υπολογίζεται από:

$$D_{air} = 3.2 \times 10^{-5} T^{1.75} \quad (4.1)$$

όπου T η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin ($273 + ^\circ C$) και το αποτέλεσμα προκύπτει σε μονάδες m^2/d . Ο συντελεστής διάχυσης στο καθαρό νερό δίνεται από τον τύπο:

$$D_{water} = 3.0 \times 10^{-7} T \quad (4.2)$$

όπου T η θερμοκρασία σε Kelvin και ο συντελεστής διάχυσης προκύπτει σε m^2/d . Τέλος, απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του TCE αποτελούν η τάση ατμών και η σταθερά του Henry για δεδομένη θερμοκρασία. Ο υπολογισμός της τάσης ατμών γίνεται σύμφωνα με τον νόμο του Henry (2.8), ενώ για τον υπολογισμό της σταθεράς του Henry χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$\ln H = 195.52 - \frac{12540}{T} - 27.11 \ln T \quad (4.3)$$

όπου T η θερμοκρασία σε Kelvin και H η σταθερά του Henry, που προκύπτει σε αδιάστατη μορφή

ΥΔΡΟΦΟΒΗ ΒΑΦΗ ΓΙΑ ΤΟ TCE

Για το χρωματισμό του τριγλωροαιθυλενίου, έτσι ώστε να είναι δυνατή η οπτική παρακολούθηση του πειράματος, χρησιμοποιήθηκε η υδρόφοβη βαφή Oil Red-O της εταιρίας Sigma-Aldrich. Η ποσότητα της ουσίας που χρησιμοποιήθηκε για το χρωματισμό του TCE ήταν 0,5 gr/L προέκυψε απ τη βιβλιογραφία. Σύμφωνα με τον David M. Tuck (2003) η ποσότητα αυτή δεν επηρεάζει τις ιδιότητες του TCE σε ένα πορώδες μέσο.

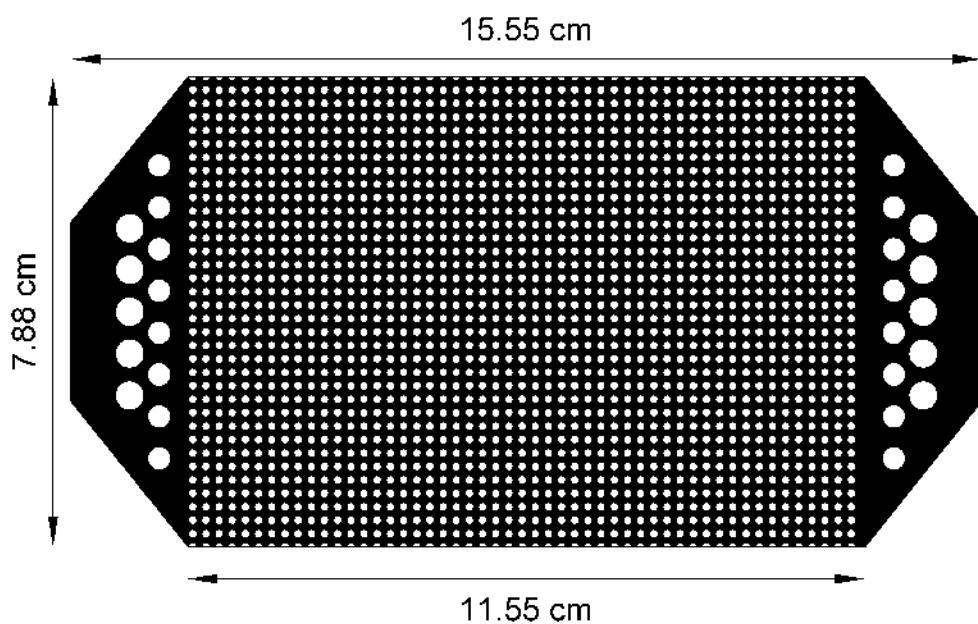
ΓΥΑΛΙΝΑ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

Κατασκευάστηκαν δύο διαφορετικά δισδιάστατα πορώδη δοκίμια με ομοιόμορφους κόκκους και ένα με σύνθετο πορώδες σύμφωνα με την φωτολιθογραφική μέθοδο των M. McKellar και N.C. Wardlaw (1982). Ακριβής περιγραφή των δοκιμίων αυτών, της κατασκευής τους αλλά και των χαρακτηριστικών τους γίνεται στην επόμενη παράγραφο.

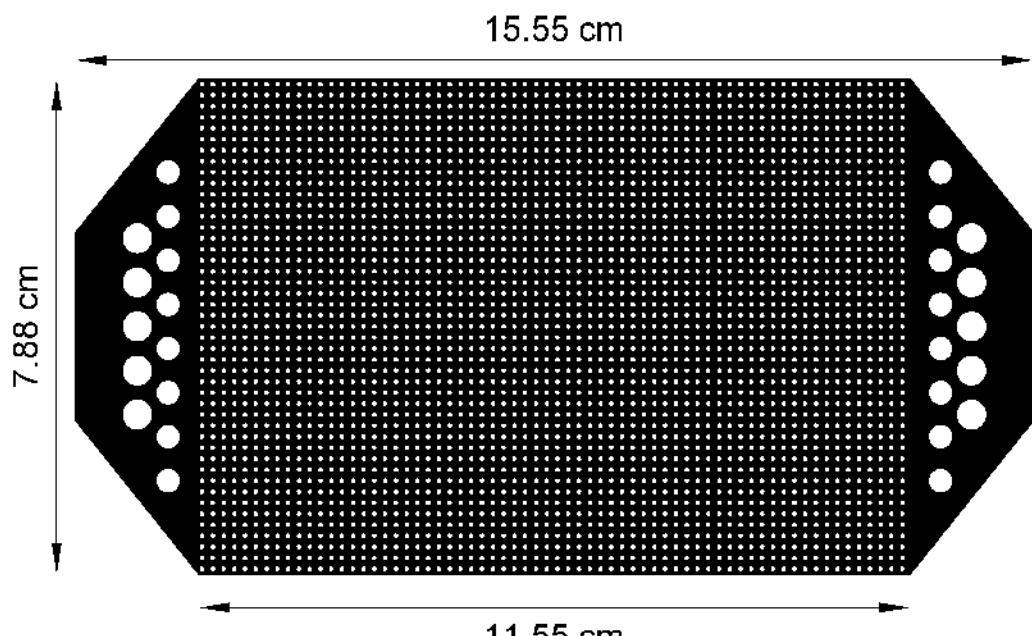
4.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

4.3.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΥΑΛΙΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

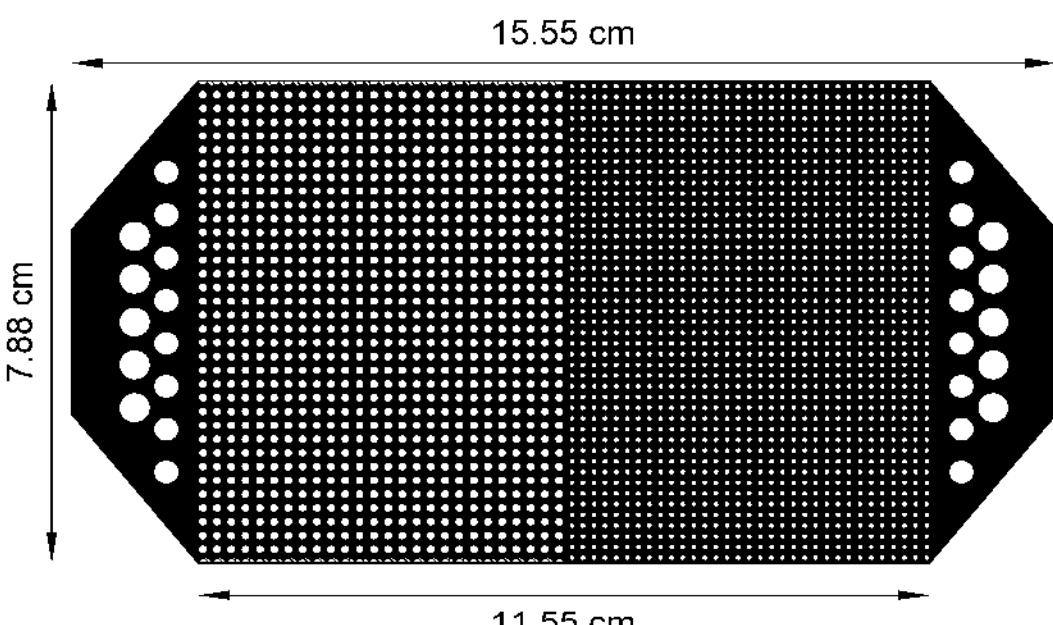
Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων σχεδιάστηκαν τρία διαφορετικά δίκτυα πόρων με τη βοήθεια του προγράμματος Autocad. Η μορφή των δικτύων προέκυψε ύστερα από έρευνα στη βιβλιογραφία και σε παλαιότερα πειράματα που είχαν γίνει στο εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών. Έτσι σχεδιάστηκαν τρία δίκτυα πόρων, το πρώτο με ακτίνα κόκκων 0,08 cm, το δεύτερο με ακτίνα 0,05 cm και το τρίτο ήταν ένας συνδυασμός των δύο προηγουμένων. Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι τα δίκτυα σχεδιάστηκαν στο Autocad σε πραγματικές διαστάσεις για τη διευκόλυνση των επόμενων σταδίων της προετοιμασίας του πειράματος. Τα δίκτυα που σχεδιάστηκαν καθώς και οι διαστάσεις τους φαίνονται στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα 4.2: Μοντέλο με ακτίνα κόκκων 0,08 cm



Σχήμα 4.3: Μοντέλο με ακτίνα κόκκων 0,05 cm



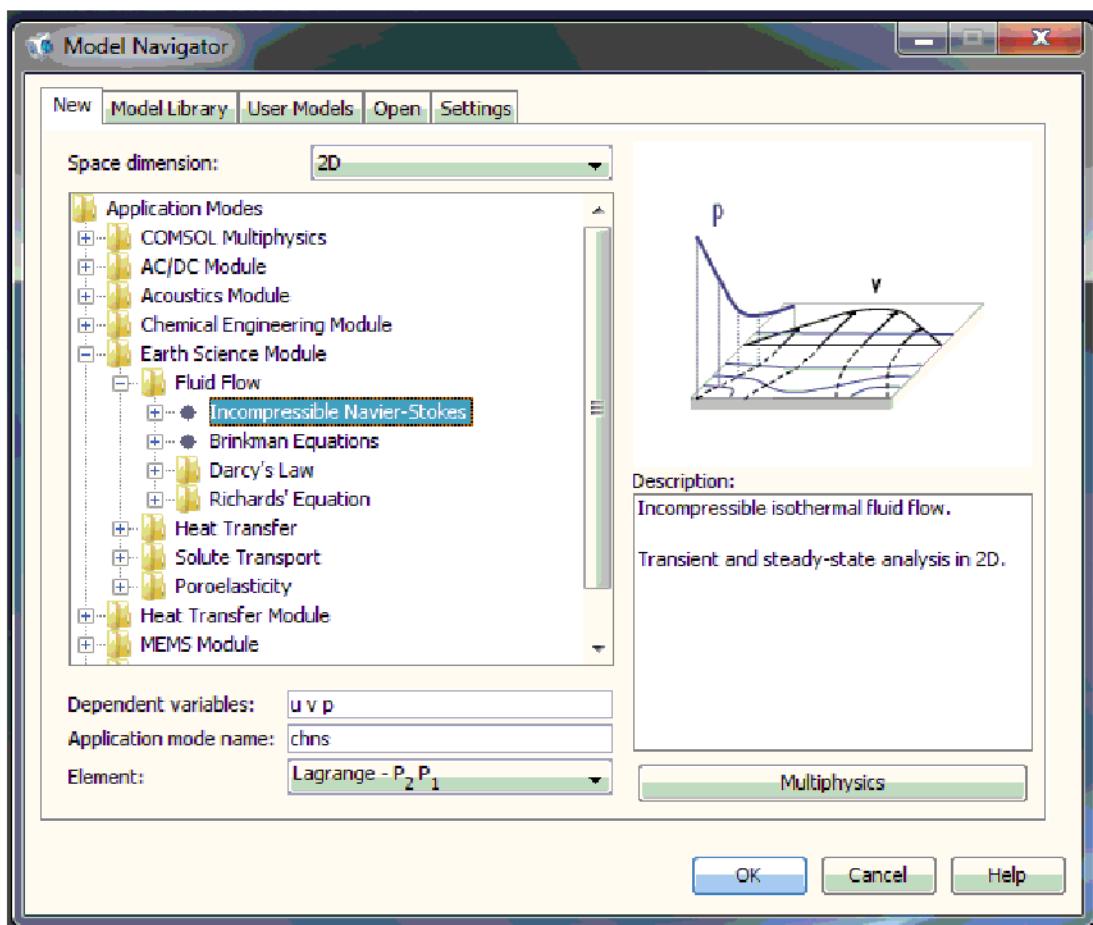
Σχήμα 4.4: Μοντέλο με σύνθετο πορώδες

Οι κόκκοι μεγαλύτερων διαστάσεων που βρίσκονται στην αρχή και στο τέλος του κάθε δοκιμίου υπάρχουν για να δημιουργούν ίδιες συνθήκες ροής σε όλο το δίκτυο των πόρων κατά πλάτος. Αν δεν υπήρχαν οι κόκκοι αυτοί θα έπρεπε να γίνεται η εισροή από οπή που θα κάλυπτε όλο το πλάτος του δοκιμίου, έτσι ώστε να υπήρχαν οι ίδιες συνθήκες ροής σε κάθε σημείο του δικτύου των πόρων. Οι διαστάσεις των

κόκκων αυτών είναι 0,25 cm (ακτίνα) για την πρώτη σειρά κόκκων από αριστερά και 0,2 cm (ακτίνα) για τη δεύτερη και ισχύουν για όλα τα δοκίμια.

Επόμενο βήμα για τον σχεδιασμό ήταν να επαληθευτεί ότι στα συγκεκριμένα δίκτυα πόρων επιτυγχάνεται ομοιόμορφη ροή. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Comsol 3.5 και εφαρμόστηκαν οι εξισώσεις Navier – Stokes σε δύο διαστάσεις. Η πορεία εισαγωγής των δεδομένων και η επίλυση του δικτύου περιγράφεται στα επόμενα βήματα:

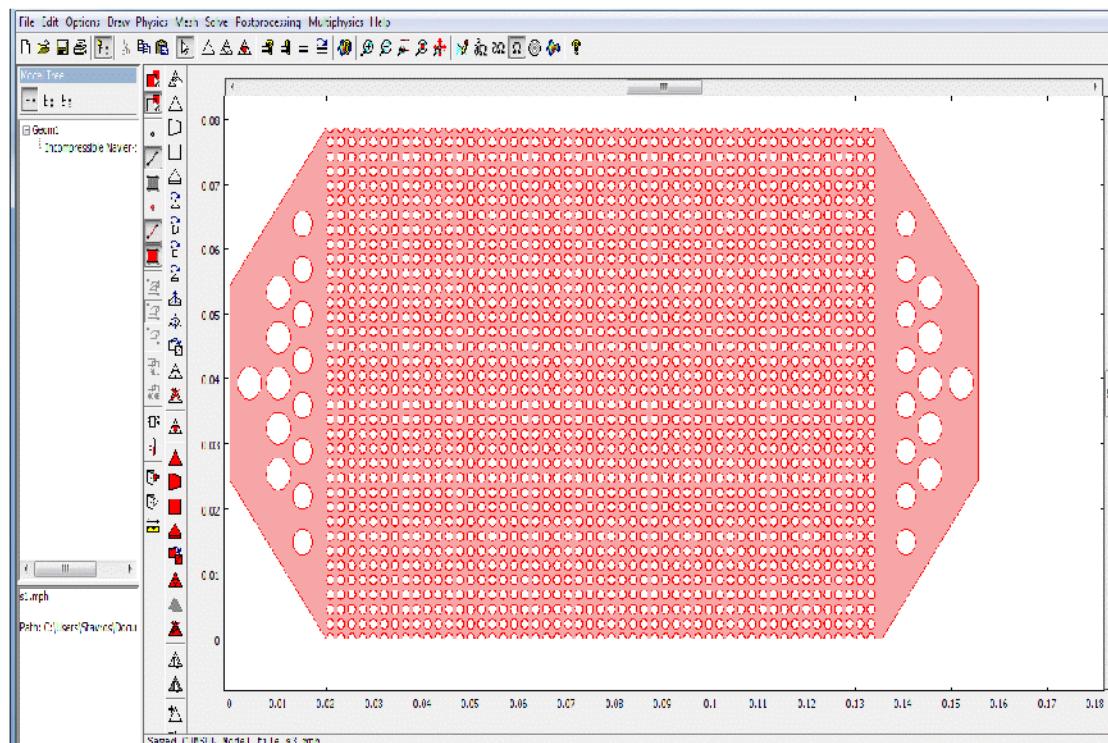
1. Από την αρχική οθόνη του προγράμματος (Model Navigator) στην επιλογή Space Dimension διαλέγουμε 2D εφόσον το πρόβλημα είναι δισδιάστατο. Στη συνέχεια επιλέγουμε από τα μοντέλα επίλυσης που υπάρχουν το Earth Science Module → Incompressible Navier-Stokes και τέλος OK.



Σχήμα 4.5: Αρχική οθόνη Comsol

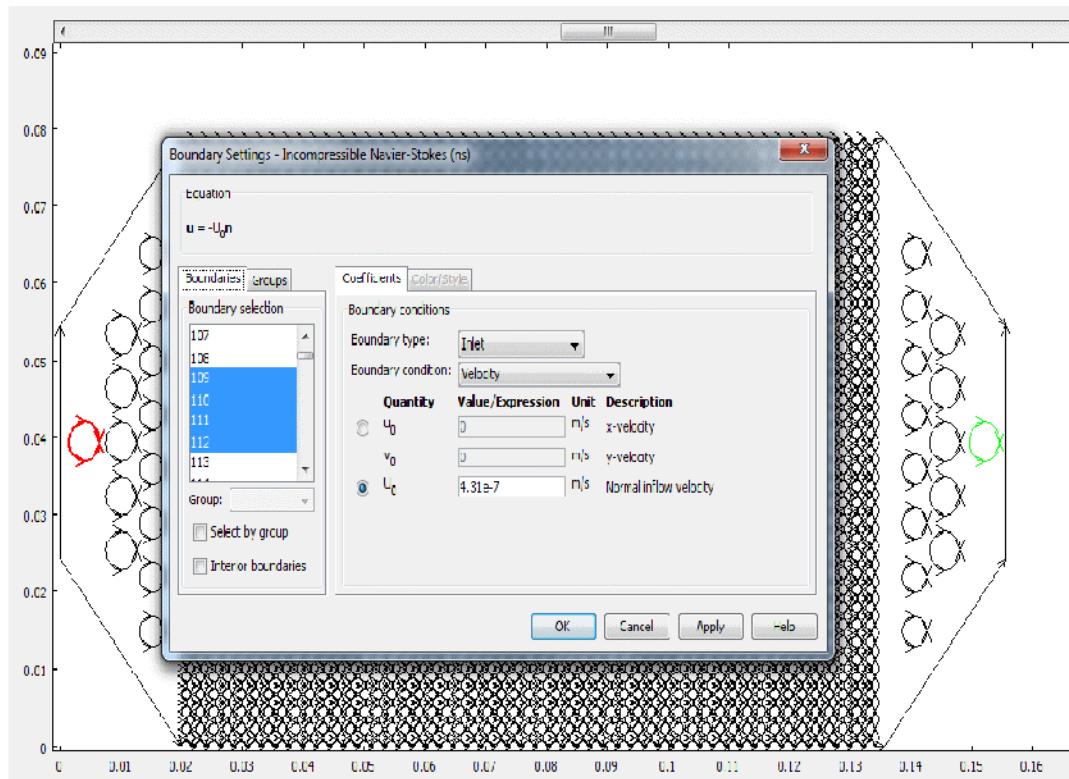
2. Στη σελίδα σχεδίασης που εμφανίζεται από την καρτέλα File → Import → Cad Data From File επιλέγουμε το αρχείο που σχεδιάστηκε στο Autocad (με κατάληξη .dxf) και έτσι το δίκτυο εισάγεται στο Comsol.

3. Για να οριστεί το δίκτυο πόρων επιλέχθηκε όλο το μοντέλο και από την καρτέλα Draw με την εντολή Coerce to Solid ενώθηκε όλο το δοκίμιο σαν ένα στερεό.
4. Στη συνέχεια, από την ίδια καρτέλα Draw με την εντολή Split Object χωρίστηκε το δίκτυο πόρων από τους συμπαγείς κόκκους του δοκιμίου και το μοντέλο ήταν έτοιμο για επίλυση.



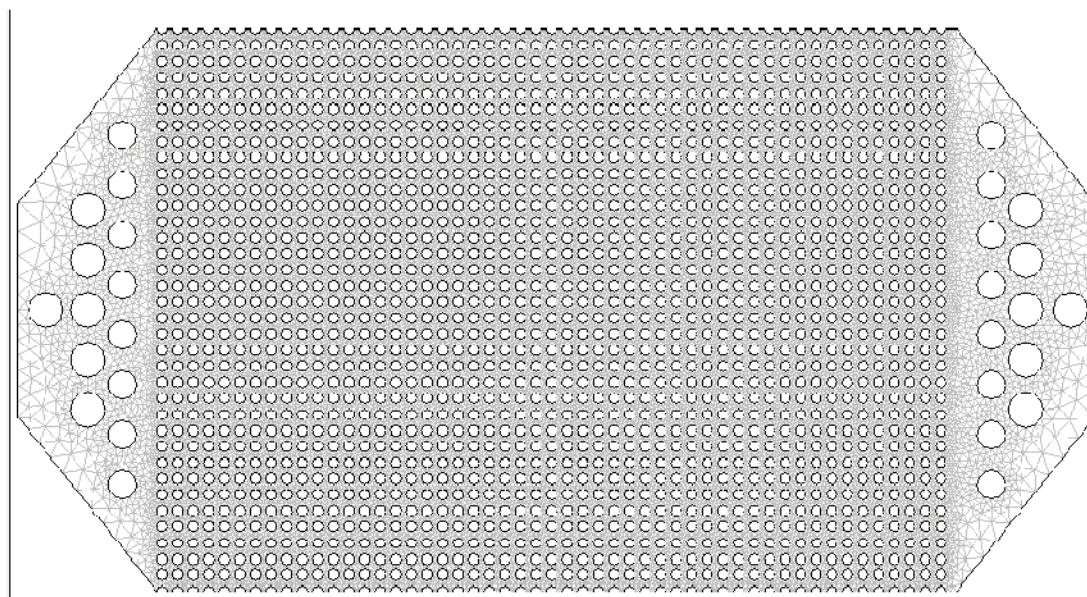
Σχήμα 4.6: Έτοιμο δοκίμιο στο Comsol

5. Στο σημείο αυτό καθορίζονται οι σταθερές που θα χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του μοντέλου. Από το μενού Physics → Model Settings και απενεργοποιούμε την επιλογή Simplify Expressions.
6. Στο μενού Options επιλέγεται η εντολή Constants και εισάγονται οι σταθερές που θα χρησιμοποιηθούν. Στο συγκεκριμένο δοκίμιο ήταν πυκνότητα νερού: rho0 = 1000 kg/m³, δυναμικό ιξώδες: eta0 = 0.001 kg/(m*s) και παροχή στην εισροή: q0 = 1.5 ~ 3 ml/hr.
7. Από το μενού Physics → Boundary Settings επιλέγονται τα όρια της εισροής (κόκκινα βέλη) και στο μενού που εμφανίζεται ορίζεται ότι εκεί εισέρχεται η αρχική παροχή. Αντίστοιχα ορίζονται τα όρια της εκροής (πράσινα βέλη) όπου εκεί ορίζεται ότι υπάρχει εκροή στην ατμόσφαιρα p = 0.



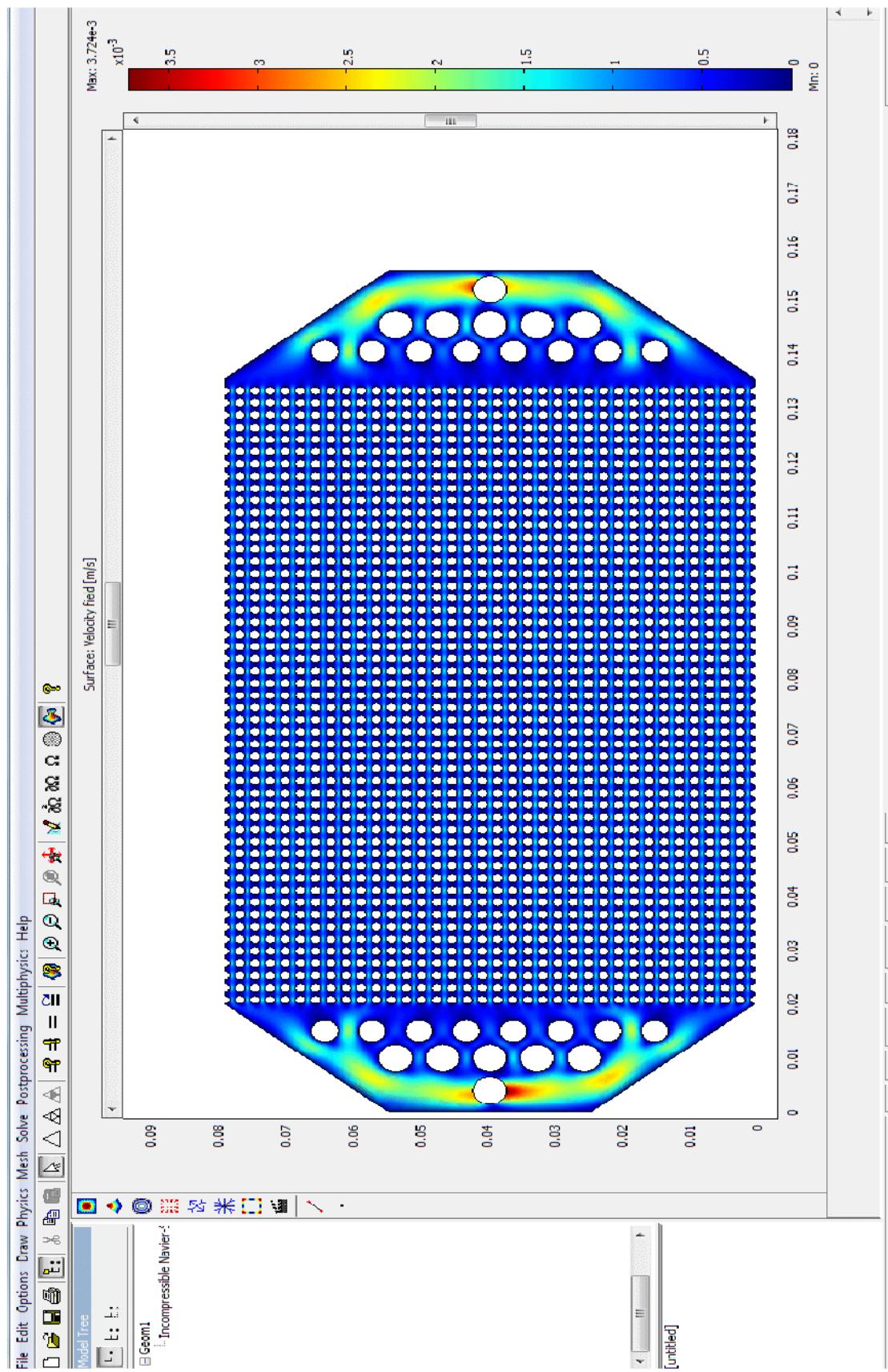
Σχήμα 4.7: Καθορισμός συνοριακών συνθηκών

8. Επόμενο βήμα είναι ο χωρισμός του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία. Από το μανού Mesh → Free Mesh Parameters επιλέγεται η εντολή Predefined mesh size, με την οποία το πρόγραμμα χωρίζει το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία ανάλογα με τη ακρίβεια που επιθυμεί ο χρήστης. Τέλος, επιλέγεται η επιλογή Remesh και χωρίζεται το μοντέλο σε στοιχεία. Το συγκεκριμένο χωρίστηκε σε 260274 πεπερασμένα στοιχεία.



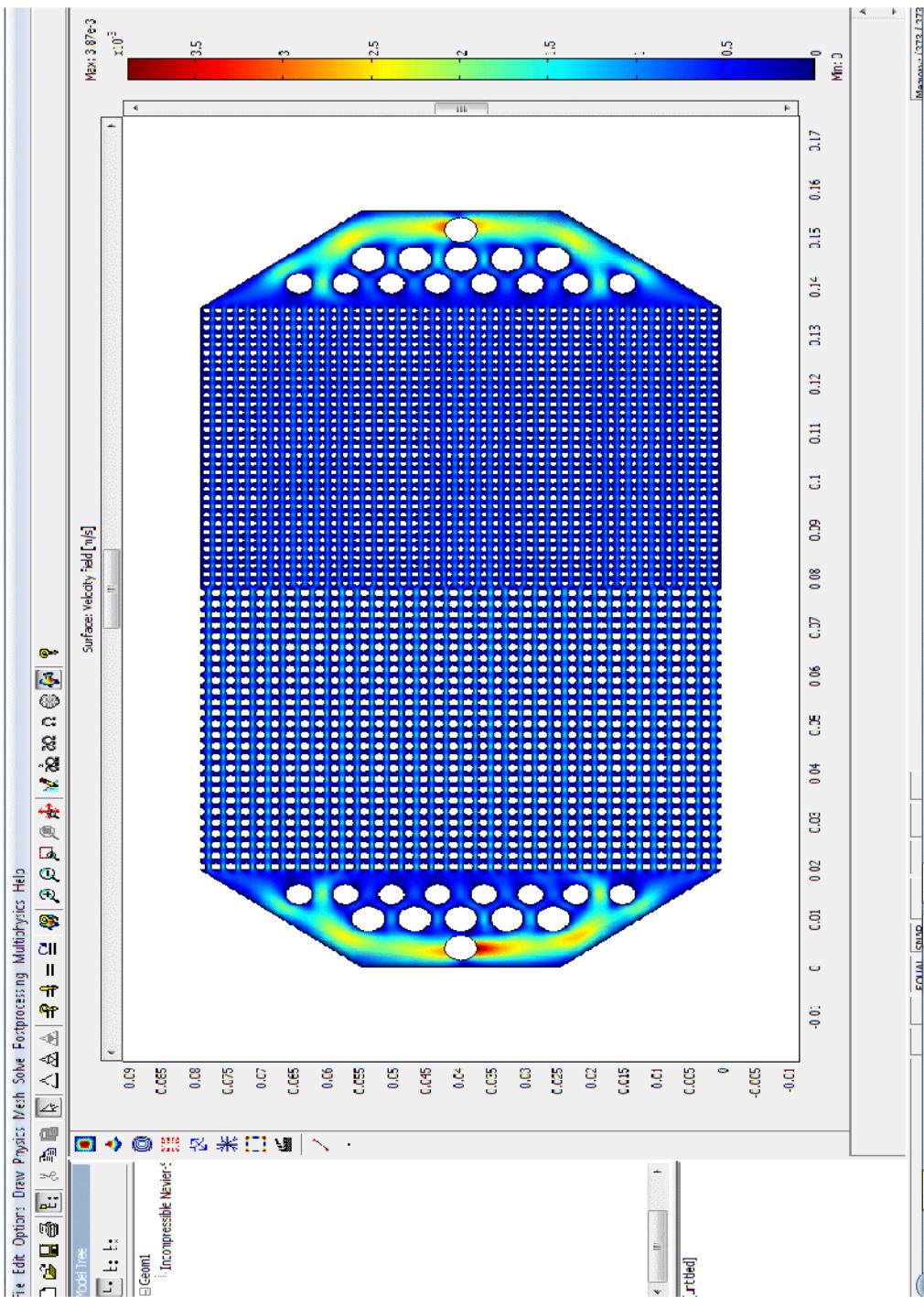
Σχήμα 4.8: Μοντέλο χωρισμένο σε πεπερασμένα

9. Τέλος, με την εντολή Solve η λύση του μοντέλου έδωσε:



Σχήμα 4.9: Αποτελέσματα Δοκυίου

Για το δοκίμιο με το σύνθετο πορώδες η λύση έδωσε:



Σχήμα 4.10: Αποτελέσματα σύνθετου δοκιμίου

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά φαίνεται ότι σ όλο το μήκος του δοκιμίου διατηρούνται οι ίδιες συνθήκες ροής, όπως ήταν επιθυμητό.

4.3.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΥΑΛΙΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Το σχεδιασμό των μοντέλων ακολουθησε η φωτολιθογραφική μέθοδος που αναπτύχθηκε από τους McKellar και Wardlaw (1982) με τροποποιήσεις. Το αρνητικό των παραπάνω σχεδίων εκτυπώθηκε σε διαφάνεια και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ως «μάσκα» για την αποτύπωση του μοντέλου στο γυάλινο δοκίμιο, όπως αναφέρεται στη φωτολιθογραφική μέθοδο.

Στο σημείο αυτό αξίζει να τονισθεί η δυσκολία του σταδίου αυτού, τόσο για την εύρεση της πρώτης ύλης όσο και για το χρόνο που απαιτούνταν για την δημιουργία ενός δοκιμίου. Ο λόγος είναι ότι η μέθοδος αυτή είναι πλέον αρκετά ξεπερασμένη και το τελικό αποτέλεσμα δεν είναι πάντα το επιθυμητό. Η μέθοδος δεν είναι σταθερή και μόνο ελάχιστες απόπειρες είναι επιτυχημένες. Για το λόγο αυτό δαπανήθηκε διάστημα πάνω από ένα έτος για την κατασκευή των δοκιμίων που επιθυμούνταν.

Το υλικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως πρώτη ύλη ήταν κομμάτια καθρέπτη (γυαλί με επίστρωση χαλκού και προστατευτική κόλλα) μήκους 22 cm και πλάτους 15 cm. Η διαδικασία κατασκευής γυάλινων δοκιμίων ήταν η εξής:

1. Διαλύθηκαν 200 gτ υδροξειδίου του νατρίου, NaOH, σε 600 cm³ απεσταγμένου νερού και ύστερα από ανάδευση με ράβδο, η θερμοκρασία του διαλύματος βρέθηκε ίση με 75 °C. Σε γυάλινο δοχείο (Pyrex ταψί 234, με διαστάσεις 44,5x27x5 cm) τοποθετήθηκαν τα κομμάτια του καθρέπτη και προστέθηκε το παραπάνω διάλυμα αμέσως μετά την ανάδευσή του. Σε 24 h αφαιρέθηκαν τα στρώματα πλαστικής κόλλας (πράσινο) που κάλυπταν τις επιφάνειες του χαλκού, πλένοντας τα κομμάτια με άφθονο νερό βρύσης.
2. Εφόσον είχαν πλυθεί καλά τα δοκίμια με νερό βρύσης και έπειτα με αποσταγμένο νερό και αφού στέγνωσε η επιφάνεια του χαλκού, τοποθετήθηκαν σε καθαρό κλειστό κουτί, ώστε να μην οξειδωθεί περισσότερο ο χαλκός.
3. Στη συνέχεια, ρυθμίστηκε ο φούρνος στους 70 °C.
4. Οι ακόλουθες διαδικασίες πραγματοποιήθηκαν σε σκοτεινό θάλαμο με κόκκινο φωτισμό. Απλώθηκε στον επαγωγό καθαρό χαρτί και τοποθετήθηκαν τα κομμάτια. Έπειτα, ψεκάστηκε η επιφάνεια του χαλκού με σπρέι Positive Resist σε συνεχή ροή κιλίσεως 30-45° και σε απόσταση 20 cm περίπου απ το δοκίμιο, αρχικά κατά μήκος και έπειτα κατά πλάτος για να καλυφθούν τυχόν ατέλειες.
5. Προσέχοντας τα κομμάτια να παραμένουν οριζόντια, μεταφέρθηκαν στο φούρνο πιάνοντάς τα από τις άκρες, ώστε να παραμείνει ανέπαφη η καλυμμένη με

Positive Resist επιφάνεια. Τα κομμάτια θερμάνθηκαν για 45 min σε θερμοκρασία 70 °C, ώστε να σταθεροποιηθεί η επίστρωση.

6. Ψύχθηκαν και φυλάχθηκαν τα κομμάτια σε καθαρό κουτί, προστατευμένα από σκόνες και φως.

7. Προσαρμόστηκε η «μάσκα» με το δίκτυο πάνω στην καλυμμένη από το Positive Resist επιφάνεια του κομματιού. Επειτα, τοποθετήθηκε σε κλειστό κουτί με υπεριώδες φως και εκτέθηκε για 90 min.



Εικόνα 4.1: Σκοτεινό κουτί με υπεριώδες φως

8. Στη συνέχεια διαλύθηκαν 7 gr υδροξειδίου του νατρίου, NaOH, σε 1 L αποσταγμένου νερού και το διάλυμα αποθηκεύτηκε μέχρι να αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος.

9. Το διάλυμα του βήματος 8 τοποθετήθηκε σε ruteς και προστέθηκε ένα δοκίμιο κάθε φορά το οποίο και παρέμεινε μέχρι να διαλυθεί το μη πολυμερισμένο Positive Resist και να εμφανιστεί το δίκτυο. Ο χρόνος παραμονής του δοκιμίου κυμάνθηκε από 1-15 min περίπου. Η οπτική παρακολούθηση με κόκκινο φως (Philips darkroom lamp 230V) σε αυτό το βήμα του δικτύου κρίνεται απαραίτητη.

10. Ξεπλύθηκαν τα δοκίμια με άφθονο νερό βρύσης (όχι πάνω στο αποτύπωμα).

11. Έπειτα η διαδικασία συνεχίστηκε σε κανονικό φως, όπου και ξεπλύθηκαν με αποσταγμένο νερό τα δοκίμια και τοποθετήθηκαν όρθια μέχρι να στεγνώσουν.
12. Διαλύθηκαν 200 cm^3 διαλύματος νιτρικού οξέος, HNO_3 , 65% σε 230 cm^3 νερού σε γυάλινοδοχείο και βυθίστηκαν τα δοκίμια στο διάλυμα αυστηρά για 10-15 sec, ώστε να διαλυθεί το τμήμα του χαλκού που δεν προστατεύεται από το Positive Resist. Τα δοκίμια στη συνέχεια ξεπλύθηκαν με άφθονο νερό.
13. Με τη βοήθεια θερμαντικής εστίας θερμάνθηκε κερί μέχρι να λιώσει και με πινέλο απλώθηκε προσεκτικά στο δοκύμιο, ώστε να καλυφθεί η επιφάνεια του δοκυμίου που δεν θα χαρασσόταν. Απλώθηκε περισσότερο κερί στα άκρα του δοκυμίου, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα τοίχωμα που θα συγκρατούσε το διάλυμα.
14. Διαλύθηκαν 75 cm^3 υδροφθορίου, HF, 90% σε 25 cm^3 νερού μέσα σε πλαστικό ογκομετρικό σωλήνα των 100 mL. Τοποθετήθηκαν τα δοκίμια σε πλαστικό δίσκο, εφόσον το διάλυμα υδροφθορίου καταστρέφει το γυαλί και καλύφθηκε η επιφάνεια των δικτύων με διάλυμα 20 cm^3 (το διάλυμα παραμένει εντός του τοιχώματος). Το διάλυμα παρέμεινε για 5 min. Μετά από πλήρωση του πλαστικού δίσκου με νερό αφαιρέθηκαν και ξεπλύθηκαν τα δοκίμια με άφθονο νερό.
15. Απομακρύνθηκε το κερί από την επιφάνεια των δοκυμάτων με μηχανικό τρόπο.
16. Τέλος, στο διάλυμα του βήματος 12 βυθίστηκαν τα δοκίμια μέχρι να απομακρυνθεί ο χαλκός από αυτά και να γίνουν διάφανα



Εικόνα 4.2: Τελικό στάδιο φωτολιθογραφικής μεθόδου

Επόμενο βήμα μετά τη λιθογραφική μέθοδος ήταν η διάνοιξη οπών στο δοκίμιο. Απαιτούνταν 3 οπές, μία για την εισροή με διάμετρο 4 mm, μία για την εκροή επίσης 4 mm και μια για την εισαγωγή του NAPL διαμέτρου 2 mm. Οι διάμετροι των οπών επιλέχθηκαν με βάση τον εξοπλισμού του εργαστηρίου και έρευνα στην αγορά. Για την κατασκευή του πορώδους μέσου απαιτήθηκαν δύο όμοια δοκίμια. Στο ένα από τα δύο μόνο δημιουργούνταν μια είσοδος, μια έξοδος και η οπή για την εισαγωγή του NAPL (εγκάρσιες τομές) μετά από χρήση τρυπανιού. Στη συνέχεια τα δύο δοκίμια ενώνονταν με τη μέθοδο της πυροσυσσωμάτωσης που περιγράφεται στη συνέχεια. Τα εργαλεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των οπών περιγράφονται παρακάτω:

1. Τρυπάνι για γυαλί (Vette) διαμέτρου 4 mm και 2 mm, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος σπασίματος της τριγύρω περιοχής από τη τομή.
2. Ένα κομμάτι ξύλο πάνω στο οποίο τοποθετήθηκε το γυαλί για να απορροφάται όσο γίνεται μεγαλύτερο ποσοστό των κραδασμών από τη λειτουργία του τρυπανιού.
3. Επιτραπέζιο τρυπάνι στη βάση του οποίου τοποθετήθηκε το ξύλο και από πάνω το δοκίμιο.
4. Ένας υδροβιολέας με αποσταγμένο νερό χρησιμοποιήθηκε σε όλη τη διάρκεια της κατασκευής των οπών, προκειμένου να αποφευχθεί αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία θα οδηγούσε σε θραύση του δοκιμίου.

Μετά την διάνοιξη των οπών ακολούθησε η ένωση των δύο δοκιμίων με τη μέθοδο της πυροσυσσωμάτωσης, που έγινε σε ειδικό φούρνο (Nabertherm, model LH 60/12) στον οποίο είχε φορτωθεί κατάλληλο πρόγραμμα λειτουργίας. Τα δύο δοκίμια προσαρμόστηκαν το ένα πάνω στο άλλο με τη βοήθεια μικροσκοπίου για τον έλεγχο της ακριβούς ταύτισής τους. Αφού πρώτα αλείφθηκε η πυρίμαχη πλάκα του φούρνου με κιμωλία για να μην κολλήσουν πάνω σε αυτή τα δοκίμια, τοποθετήθηκαν τα δοκίμια στο φούρνο. Η διάρκεια του προγράμματος της πυροσυσσωμάτωσης ήταν 11 h και 12 min. Στο τέλος του προγράμματος ο φούρνος δεν ανοίχτηκε αμέσως, γιατί η απότομη πτώση της θερμοκρασίας θα κατέστρεφε τα δοκίμια. Όταν η θερμοκρασία έπεσε στους 100 °C ανοίχτηκε η πόρτα του φούρνου και τα γυάλινα δοκίμια αφαιρέθηκαν από το φούρνο μετά το πέρας μιας ακόμη μέρας, ώστε να αποφευχθεί ράγισμα του δοκιμίου λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον.

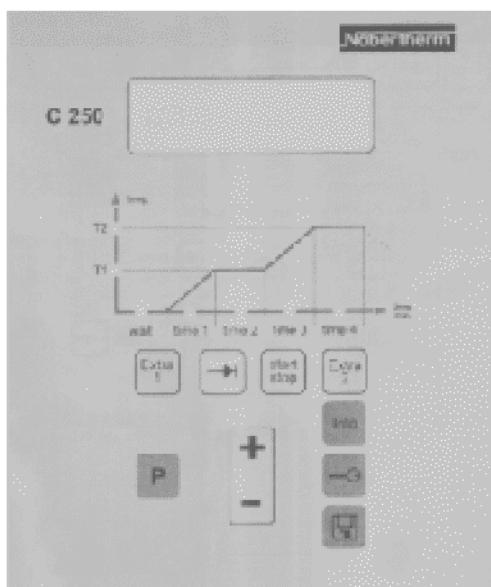
Η λειτουργία καθώς και το πρόγραμμα που φορτώθηκε στο φούρνο είναι η εξής:

Χρόνος Παραμονής (h:min)	Χρονικό Βήμα (h:min)	Θερμοκρασία (°C)
	time 1 = 0:02	T1 = 40
time 2 = 0:02	time 3 = 6:00	T2= 400
time 4 = 0:02	time 1 = 2:00	T1 = 500
time 2 = 0:02	time 3 = 2:00	T2= 600
time 4 = 0:02	time 1 = 0:30	T1 = 690
time 2 = 0:02	time 3 = 0:30	T2= 600

Πίνακας 4.1: Πρόγραμμα πυροσυσσωμάτωσης

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, αρχικά ρυθμίστηκε ο φούρνος μέσα σε 2 λεπτά, όπως φαίνεται στο χρονικό βήμα time 1, να φτάσει την θερμοκρασία των 40 °C, όπου και παρέμεινε για 2 λεπτά (time 2). Στη συνέχεια, σε διάστημα 6 ωρών έφτασε στη θερμοκρασία των 400 °C και έμεινε εκεί για 2 λεπτά. Ουσιαστικά το πρόγραμμα λειτουργίας του φούρνου αποτελείται από επαναλαμβανόμενους κύκλους θέρμανσης, που ο καθένας ολοκληρώνεται σε τρία στάδια: α) το χρονικό βήμα για να αποκτήσει την επιθυμητή θερμοκρασία, β) τη θερμοκρασία που επιθυμείται και γ) το χρόνο παραμονής στην επιθυμητή θερμοκρασία. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το προγραμματισμό του φούρνου είναι:

1. Με το κουμπί ‘ON’ τέθηκε σε λειτουργία ο φούρνος και εμφανίστηκε η ένδειξη C 250 στην οθόνη ελέγχου.

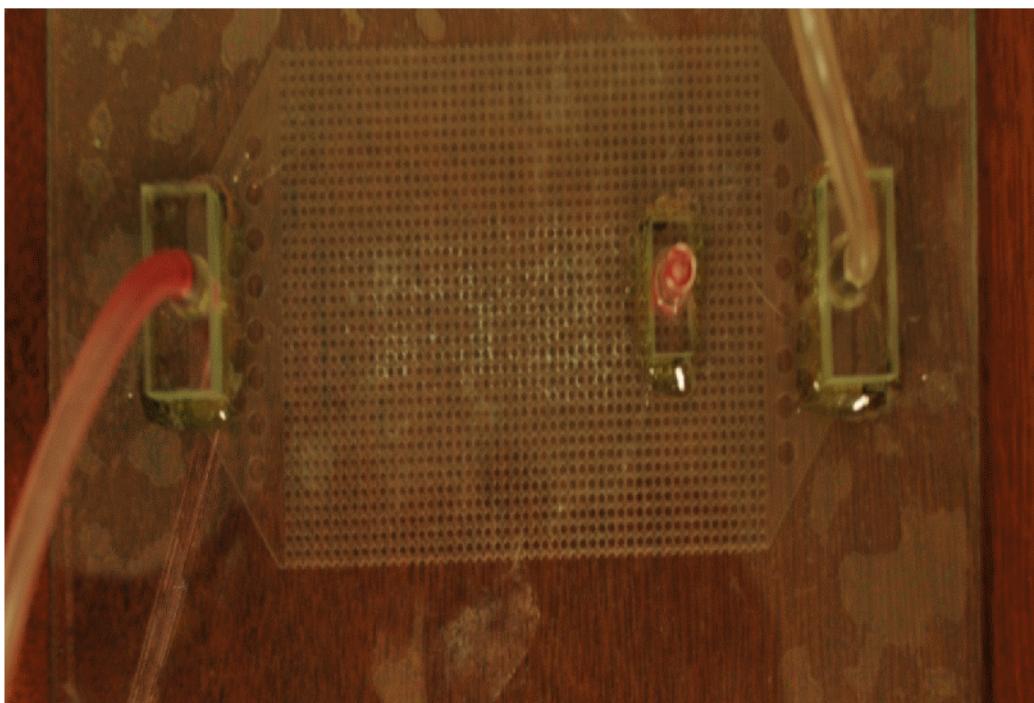
**Εικόνα 4.3:** Οθόνη λειτουργίας φούρνου

2. Επιλέχθηκε η περιοχή αποθήκευσης του προγράμματος πατώντας το κουμπί P , έπειτα με τα βελάκια το νούμερο του προγράμματος ($P = 1$ για τη συγκεκριμένη εργασία) και τέλος το κουμπί Scroll. →
3. Μετά το Scroll άναψε της ένδειξης ‘time 1’, όπου και συμπληρώθηκε με 0:02 σε h:min. Αυτό στην ουσία αποτελούσε το βήμα του χρόνου ώστε ο φούρνος να αποκτήσει την θερμοκρασία που αρχικά προβλέπει το πρόγραμμα.
4. Πατώντας το Scroll ξανά άναψε η λυχνία της ένδειξης ‘temperature, T1’ όπου και συμπληρώθηκε με τη τιμή 40°C .
5. Έπειτα, πατώντας και πάλι το Scroll πληκτρολογήθηκε το επόμενο βήμα του χρόνου, ‘time 2’, με 0:02 σε h:min.
6. Οπότε, σε αυτό το σημείο (με το πάτημα του Scroll) άναψε η λυχνία της ένδειξης ‘time 3’ και συμπληρώθηκε με 6:00. Αυτό σήμανε πως σε 6 h θα έφτανε την θερμοκρασία που δίνεται στο επόμενο βήμα.
7. Σε αυτό το βήμα άναψε η λυχνία της ένδειξης ‘T2’ και πληκτρολογήθηκε 400°C . Οπότε μέχρι και εδώ προγραμματίστηκε ο φούρνος σε 2 min να αποκτήσει θερμοκρασία 40°C και στις επόμενες 6 h να έχει φτάσει σε θερμοκρασία 400°C και να παραμείνει για 2 min.
8. Επαναλήφθηκε η διαδικασία που προηγείται μέχρι τον χρόνο ‘time 3’ = 0:30 και την θερμοκρασία ‘T2’ = 600°C .
9. Έπειτα με το κουμπί, ‘save’ (μορφή δισκέτας), αποθηκεύτηκε το πρόγραμμα που ρυθμίστηκε.
10. Τέλος, με το κουμπί ‘start’ ξεκίνησε το πρόγραμμα.



Εικόνα 4.4: Φούρνος

Τέλος, για την τελειοποίηση των δοκιμών, προσαρμόστηκαν στις οπές εισροής, εκροής και εισαγωγής του NAPL κατάλληλες διατάξεις από πλέξιγκλας με τη χρήση εποξικής κόλλας. Οι διατάξεις αυτές δεν ήταν οι επιθυμητές τουλάχιστον για την οπή εισαγωγής του NAPL, εφόσον το TCE διαβρώνει με πολύ γρήγορο ρυθμό το πλέξιγκλας και γενικότερα τα πλαστικά. Παρά τη προσπάθεια να βρεθεί άλλος τρόπος εισαγωγής του TCE, που να μην περιλαμβάνει πλαστικά μέρη, τελικά χρησιμοποιήθηκαν τα πλέξιγκκας καθώς όλες οι άλλες λύσεις που εξετάστηκαν καμία δεν μπορούσε να εφαρμοστεί με τον εξοπλισμό του εργαστηρίου ή ήταν αδύνατο να κατασκευαστεί από τους επαγγελματίες της Πάτρας και του πανεπιστημίου (μηχανουργοί – υλοποιοί).



Εικόνα 4.5: Τελειοποιημένο δοκίμιο

4.3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΓΥΑΛΙΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στη παρόγραφο αυτή παρουσιάζονται οι υπολογισμοί που έγιναν για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των δοκιμών και συγκεκριμένα για τον υπολογισμό του ύψους Z των δοκιμών, του πορώδους n και του συντελεστή k εσωτερικής διαπερατότητας. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα και σ αυτά υπολογίστηκαν τα χαρακτηριστικά τους είναι το χονδρόκοκκο δοκίμιο με ακτίνα κόκκων 0,08 cm, και το λεπτόκοκκο με ακτίνα 0,05 cm.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΥΨΟΥΣ Ζ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για τον υπολογισμό του ύψους Z με τη βοήθεια μιας σύριγγας μετρήθηκε ο όγκος κενών του κάθε δοκιμίου. Αφού γεμίσαμε με τη σύριγγα το δοκίμιο μετρήθηκε ο όγκος του νερού που χρειάστηκε για να κορεστεί το δοκίμιο. Για το χονδρόκοκκο πορώδες ο όγκος ήταν 1,2 ml και για το λεπτόκοκκο 1,4 ml. Από τη γεωμετρία του κάθε δοκιμίου προέκυψαν τα στοιχεία:

- Χονδρόκοκκο πορώδες:

$$\text{Συνολικό } Eμβαδόν = 112,774 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$Eμβαδόν \text{ κόκκων} = 39,8636692 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$Eμβαδόν \text{ κενών} = 72,9103308 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Οπότε το ύψος θα είναι:

$$Z = \frac{\text{Όγκος } Kενών}{Eμβαδόν \text{ κενών}} = \frac{1,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{72,9103308 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 1.645857 \times 10^{-4} \text{ m}$$
$$Z = 0.165 \text{ mm}$$

- Λεπτόκοκκο πορώδες:

$$\text{Συνολικό } Eμβαδόν = 112,774 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$Eμβαδόν \text{ κόκκων} = 27,30044016 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$Eμβαδόν \text{ κενών} = 85,47355984 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

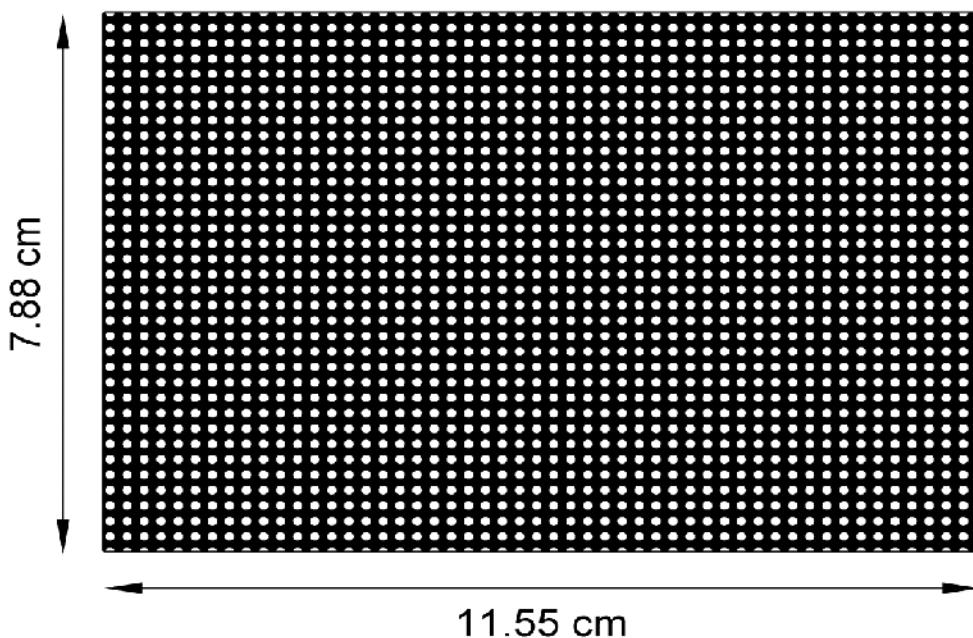
Οπότε το ύψος θα είναι:

$$Z = \frac{\text{Όγκος } Kενών}{Eμβαδόν \text{ κενών}} = \frac{1,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{85,47355984 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 1.637933 \times 10^{-4} \text{ m}$$
$$Z = 0.164 \text{ mm}$$

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ή ΔΟΚΙΜΙΩΝ

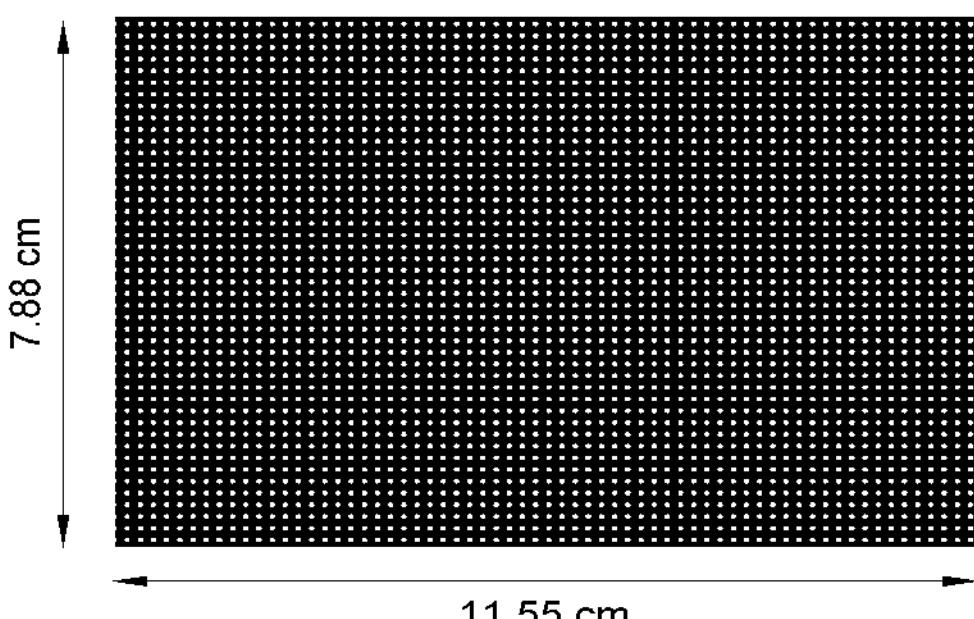
Για τον υπολογισμό του πορώδους των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε το ορθογωνικό τμήμα των δοκιμών που περιείχε τους κόκκους και όχι και τα τραπεζοειδή τμήματα, που υπήρχαν για να δημιουργούν την ομοιόμορφη ροή σ όλο το μήκος του πορώδους. Δηλαδή, εξετάστηκαν οι περιοχές:

- Χονδρόκοκκο πορώδες:



Σχήμα 4.11: Χονδρόκοκκο πορώδες

- Λεπτόκοκκο πορώδες:



Σχήμα 4.12: Λεπτόκοκκο πορώδες

Έτσι, με βάση τη γεωμετρία των τμημάτων αυτών και τη διάσταση Z που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα προκύπτει:

- Χονδρόκοκκο πορώδες:

$$\text{Συνολικός Όγκος Πορώδους} = 1,49523 \times 10^{-6} m^3$$

$$\text{Όγκος κενών πορώδους} = 8,374794582 \times 10^{-7} m^3$$

Οπότε το πορώδες n θα είναι:

$$n = \frac{\text{Όγκος Κενών}}{\text{Συνολικό όγκο}} = \frac{8,374794582 \times 10^{-7} m^3}{1,49523 \times 10^{-6} m^3} = 0,56$$

- Λεπτόκοκκο πορώδες:

$$\text{Συνολικός Όγκος Πορώδους} = 1,486168 \times 10^{-6} m^3$$

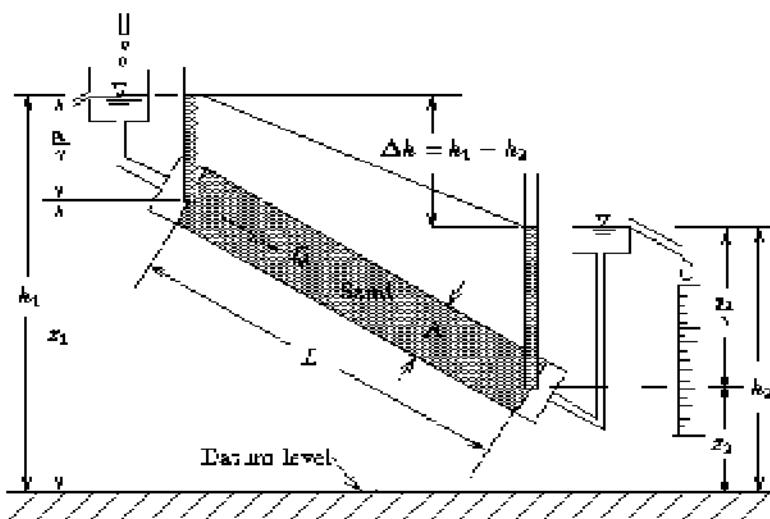
$$\text{Όγκος κενών πορώδους} = 1,038440781376 \times 10^{-6} m^3$$

Οπότε το πορώδες n θα είναι:

$$n = \frac{\text{Όγκος Κενών}}{\text{Συνολικό όγκο}} = \frac{1,038440781376 \times 10^{-6}}{1,486168 \times 10^{-6} m^3} = 0,699$$

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ k

Για τον υπολογισμό της εσωτερικής διαπερατότητας k των δοκιμών, λόγω έλλειψης οργάνων στο εργαστήριο, επαναλήφθηκε το πείραμα του Darcy και για τα δύο δοκίμια. Η διάταξη που κατασκευάστηκε φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 4.13: Πείραμα Darcy από ιστοσελίδα interpore.org

Η εισροή ξεκινούσε από μια δεξαμενή με ελευθερη επιφάνεια, η οποία τροφοδοτούταν συνεχώς με παροχή έτσι ώστε να παραμένει σταθερή η στάθμη του νερού στην επιφάνειά της, ενωνόταν με πλαστικό σωλήνα με το δοκίμιο και στην έξοδο είχε τοποθετηθεί δεύτερη δεξαμενή με υπερχειλιστή, έτσι ώστε και εκεί να είναι σταθερή η στάθμη του νερού καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Τα δεδομένα και η επίλυση για το κάθε δοκίμιο παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Χονδρόκοκκο πορώδες:

Η παροχή Q διαμέσου του δοκιμίου μετρήθηκε ίση με 12.2 mL/min . Το ύψος h_1 μετρήθηκε από τη στάθμη του εδάφους και βρέθηκε $98,8 \times 10^{-2} \text{ m}$, το ύψος h_2 μετρήθηκε από τη στάθμη του εδάφους και βρέθηκε $33,3 \times 10^{-2} \text{ m}$, ενώ τα μεγέθη εμβαδό διατομής A και μήκος Δl από τη γεωμετρία του δοκιμίου προέκυψαν $1,3002 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ και $14,8 \times 10^{-2} \text{ m}$ αντίστοιχα. Με εφαρμογή στο νόμο του Darcy και λύνοντας ως προς τη σχετική διαπερατότητα προκύπτει:

$$Q = KA \frac{h_1 - h_2}{\Delta l} \rightarrow K = \frac{Q \Delta l}{A(h_1 - h_2)} \quad (4.4)$$

Με αντικατάσταση προκύπτει:

$$K = \frac{12,2 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times 0,148 \text{ m}}{1,3002 \times 10^{-5} \text{ m}^2 (0,988 - 0,333) \text{ m}} = 0,212017 \frac{\text{m}}{\text{min}} = 305,304 \text{ m/d}$$

Με συσχέτιση της σχετικής διαπερατότητας K και της εσωτερικής διαπερατότητας k και σαν δεδομένα ότι στους 20°C ισχύει $\nu = 1,003 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ και $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$ προκύπτει:

$$K = k \frac{\rho \times g}{\mu} = k \frac{g}{\nu} \rightarrow k = \frac{K \times \nu}{g} = \frac{3,53362 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{sec}} \times 1,003 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}}$$

$$k = 3,6128653 \times 10^{-10} \text{ m}^2 = 3,61 \times 10^{-10} \text{ Da στους } 20^\circ\text{C}.$$

- Λεπτόκοκκο πορώδες:

Η παροχή Q διαμέσου του δοκιμίου μετρήθηκε ίση με 12.4 mL/min . Το ύψος h_1 μετρήθηκε από τη στάθμη του εδάφους και βρέθηκε $98,8 \times 10^{-2} \text{ m}$, το ύψος h_2 μετρήθηκε από τη στάθμη του εδάφους και βρέθηκε $33,3 \times 10^{-2} \text{ m}$, ενώ τα μεγέθη εμβαδό διατομής A και μήκος Δl από τη γεωμετρία του δοκιμίου προέκυψαν $1,29232 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ και $14,8 \times 10^{-2} \text{ m}$ αντίστοιχα. Με εφαρμογή στο νόμο του Darcy και λύνοντας ως προς τη σχετική διαπερατότητα προκύπτει:

$$Q = KA \frac{h_1 - h_2}{\Delta l} \rightarrow K = \frac{Q \Delta l}{A(h_1 - h_2)}$$

Με αντικατάσταση προκύπτει:

$$K = \frac{12,4 \times 10^{-6} \frac{m^3}{min} \times 0.148 m}{1,29232 \times 10^{-5} m^2 (0.988 - 0.333) m} = 0.216806 \frac{m}{min} = 312,201 m/d$$

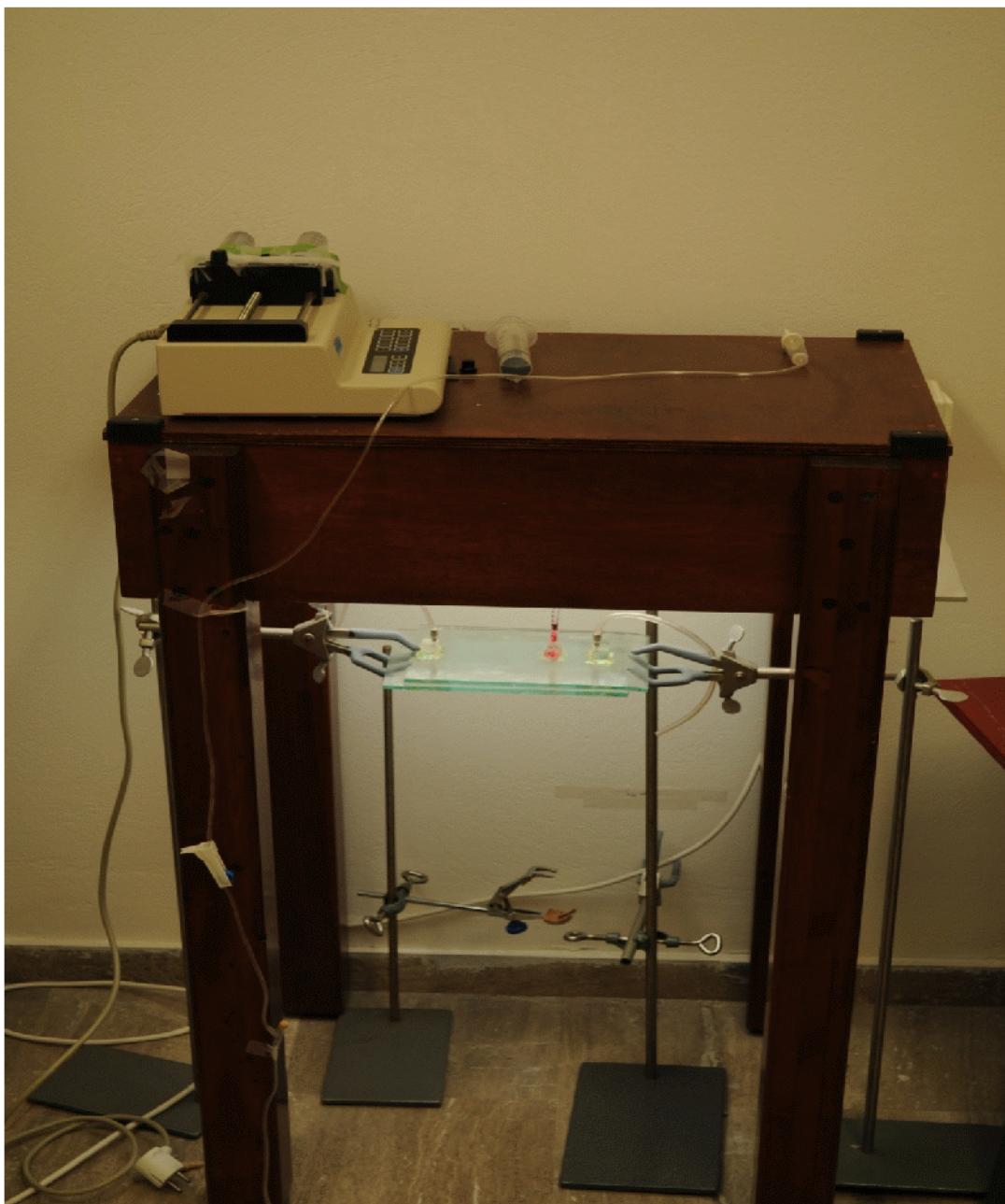
Με συσχέτιση της σχετικής διαπερατότητας K και της εσωτερικής διαπερατότητας k και σαν δεδομένα ότι στους $20^{\circ}C$ ισχύει $\nu = 1,003 \times 10^{-6} m^2/sec$ και $g = 9,81 m/sec^2$ προκύπτει:

$$K = k \frac{\rho \times g}{\mu} = k \frac{g}{\nu} \rightarrow k = \frac{K \times \nu}{g} = \frac{3,61343 \times 10^{-3} \frac{m}{sec} \times 1.003 \times 10^{-6} \frac{m^2}{sec}}{9.81 \frac{m}{sec^2}}$$

$$k = 3.694465 \times 10^{-10} m^2 = 3.69 \times 10^{-10} Da \text{ στους } 20^{\circ}C.$$

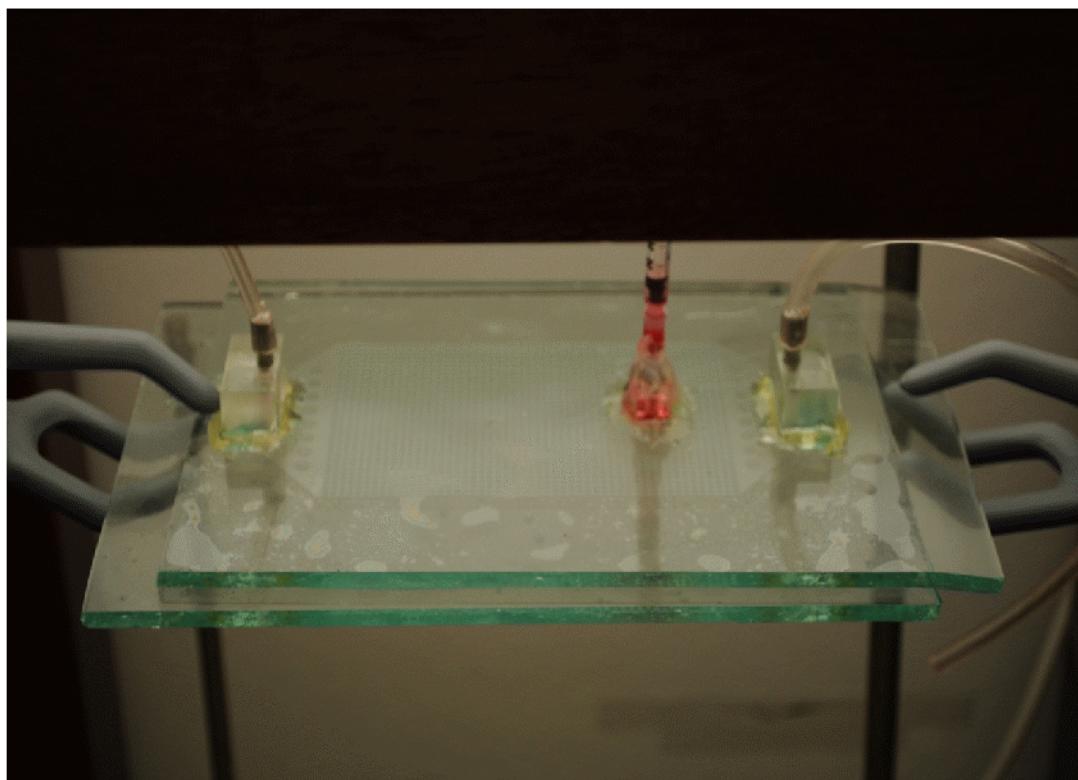
4.4 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Στόχος του πειράματος ήταν ο καθορισμός της διάλυση μιας ‘πηγής’ NAPL από τη ροή νερού σε ένα κορεσμένο πορώδες δοκύμιο και η μάζα που διαφεύγει σε συνάρτηση με το χρόνο. Η δεύτερη φάση του πειράματος ήταν η διεξαγωγή του πειράματος με ροή κολλοειδούς διαλύματος και η σύγκρισή των αποτελεσμάτων των δύο διαφορετικών ροών. Με τον τρόπο αυτό θα εξεταζόταν εάν τα κολλοειδή επηρεάζουν τη διάλυση του NAPL και σε ποιο βαθμό. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε η διάταξη του παρακάτω σχήματος:



Εικόνα 4.6: Πειραματική Διάταξη

Η διάταξη αποτελείται από την αντλία σύριγγας Cole-Parmer® 74900-Series, Multichannel, Syringe Pumps, δύο πλαστικές σύριγγες των 60 ml που τροφοδοτούσαν τα δοκίμια με νερό ή το κολλοειδές διάλυμα, σωληνάκια που ενώνονταν με την εισροή, το δοκίμιο σύστημα φωτισμού που αποτελείτο από ένα ξύλινο κουτί, επενδυμένο εσωτερικά με φελιζόλ τυλιγμένο με αλουμινόχαρτο, με λάμπες Philips TLD graphica Pro 18W/95. Η κάτω επιφάνειά του ήταν πλεξιγκλάς με αυτοκόλλητη επίστρωση γαλακτερού χρώματος για επίτευξη ομοιόμορφης διάχυσης του φωτός. Το δοκίμιο τοποθετούνταν όπως στη παραπάνω εικόνα και η εισαγωγή του NAPL στο δοκίμιο γινόταν από το πάνω μέρος και σε απόσταση 1/5 από την αρχή του ομοιόμορφου πορώδους προς την πλευρά της εισροής. Για την εισαγωγή χρησιμοποιούνταν σύριγγες μιας χρήσεως όγκου 1 ml, καθώς το TCE διέβρωνε το πλαστικό και δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθούν ξανά. Μετά την εισαγωγή του TCE η οπή της εισαγωγής της ουσίας σφραγίζοταν με αυτοσχέδιο πώμα σιλικόνης, προσέχοντας να μην εισχωρήσει αέρας στο δοκίμιο.



Εικόνα 4.7: Κοντινή λήψη πειράματικης διάταξης

Η κάμερα σταθεροποιήθηκε κάτω από το δοκίμιο και ρυθμίστηκε να γίνεται η λήψη των φωτογραφιών σε τακτά χρονικά διαστήματα. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτή η διάταξη, δηλαδή η εισαγωγή του ρύπου από την πάνω πλευρά και η κάμερα να

λαμβάνει φωτογραφίες από κάτω προς τα πάνω, ήταν γιατί το TCE είναι ένα βαρύ NAPL και πάντα η πηγή σχηματίζεται στο κάτω μέρος του δοκιμίου. Αν η εισαγωγή γινόταν από κάτω τότε το NAPL θα ερχόταν σε επαφή συνεχώς με την διάταξη εισαγωγής που είναι κατασκευασμένη από πλέξιγκας και θα την διέβρωνε καταστρέφοντας με τον τρόπο αυτό το πείραμα.

➤ Πείραμα με ροή νερού:

Αρχικά ρυθμίστηκε η παροχή που έδινε η αντλία. Το πείραμα απαιτούσε μια παροχή που δε θα ήταν μεγάλη έτσι ώστε η ‘πηγή’ από το NAPL να παραμείνει στη θέση της σταθερή χωρίς να παρασυρθεί. Επίσης, η παροχή έπρεπε να είναι τέτοια που μέχρι να αδειάσουν οι σύριγγες στην αντλία να έχει προχωρήσει το φαινόμενο της διάλυνσης τόσο που να κάνει την οπτική παρακολούθηση μέσω των φωτογραφιών εύκολη για την ασφαλή και τεκμηριωμένη εξαγωγή συμπερασμάτων. Με πολυάριθμες δοκιμές επιλέχθηκε η παροχή των 3 ml/hr ως η πλέον αποτελεσματικότερη για το στόχο που είχαν τα πειράματα αυτά.

Η φωτογραφική μηχανή τοποθετήθηκε σε κατάλληλο ύψος και ρυθμίστηκε για τη λήψη των φωτογραφιών. Αφού τέθηκε σε λειτουργία η αντλία και το δοκίμιο έγινε κορεσμένο, η φωτογραφική μηχανή μπήκε σε λειτουργία και ρυθμίστηκαν τα χρονικά διαστήματα λήψεως φωτογραφιών. Στα περισσότερα πειράματα το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο λήψεων ήταν 5 min., όμως έγιναν και πειράματα με μικρότερα και μεγαλύτερα διαστήματα από 2 min έως 10 min. Τέλος, έγινε η εισαγωγή του TCE και ξεκίνησε το πείραμα.



Εικόνα 4.8: Διεξαγωγή πειράματος

➤ Πείραμα με ροή διαλύματος κολλοειδών:

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν ακριβώς η ίδια όπως και με τα πειράματα με ροή νερού. Η μοναδική διαφορά ήταν η προετοιμασία των κολλοειδών διαλυμάτων που θα αντικαθιστούσαν το νερό. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν δύο μεγέθη κολλοειδών διαλυμάτων μεγέθους 0,3 μμ και 0,075 μμ. Οι συγκεντρώσεις των κολλοειδών διαλυμάτων επιλέχθηκαν να είναι αρκετά μεγάλες. Έτσι, αποφασίστηκε να δημιουργηθούν διαλύματα με αραίωση 1/250 και 1/ 500 για το λόγο ότι στο σύντομο χρόνο του πειράματος έπρεπε να είναι εμφανής η επίδραση που έχουν τα κολλοειδή στη διάλυση της ‘πηγής’ σε σχέση με το απλό νερό. Στη συνέχεια και απλά για λόγους πληρότητας αφού δεν μελετάμε τα κολλοειδή, υπολογίστηκε ο αριθμός των σωματιδίων που περιέχονται σε κάθε διάλυμα. Έτσι, ο αριθμός των σωματιδίων υπολογίζεται απ τον τύπο:

$$\# / mL = \frac{6\rho_f}{\pi D_p^3 (\rho_f + \rho_f/C - \rho_b)} \quad (4.5)$$

Όπου ρ_f = πυκνότητα νερού σε g/cm³, ρ_b = πυκνότητα σωματιδίων σε g/cm³, C = συγκέντρωση μάζας στο αρχικό διάλυμα των κολλοειδών (στη περίπτωση αυτή % στερεών = 1% / 100) και D_p = διάμετρος σφαιρών σε cm. Με εφαρμογή του τύπου προέκυψε για το διαλύματα των 0,3 μμ 6.74×10^{11} σωματίδια και για το διάλυμα των 0,075 μμ 4.31×10^{13} σωματίδια.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων εμφανίστηκαν αρκετές επιπλοκές που δεν επέτρεψαν τη διεξαγωγή τους σύμφωνα με το σχέδιο που υπήρχε. Τα αποτελέσματα καθώς και οι επιπλοκές που παρουσιάστηκαν αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

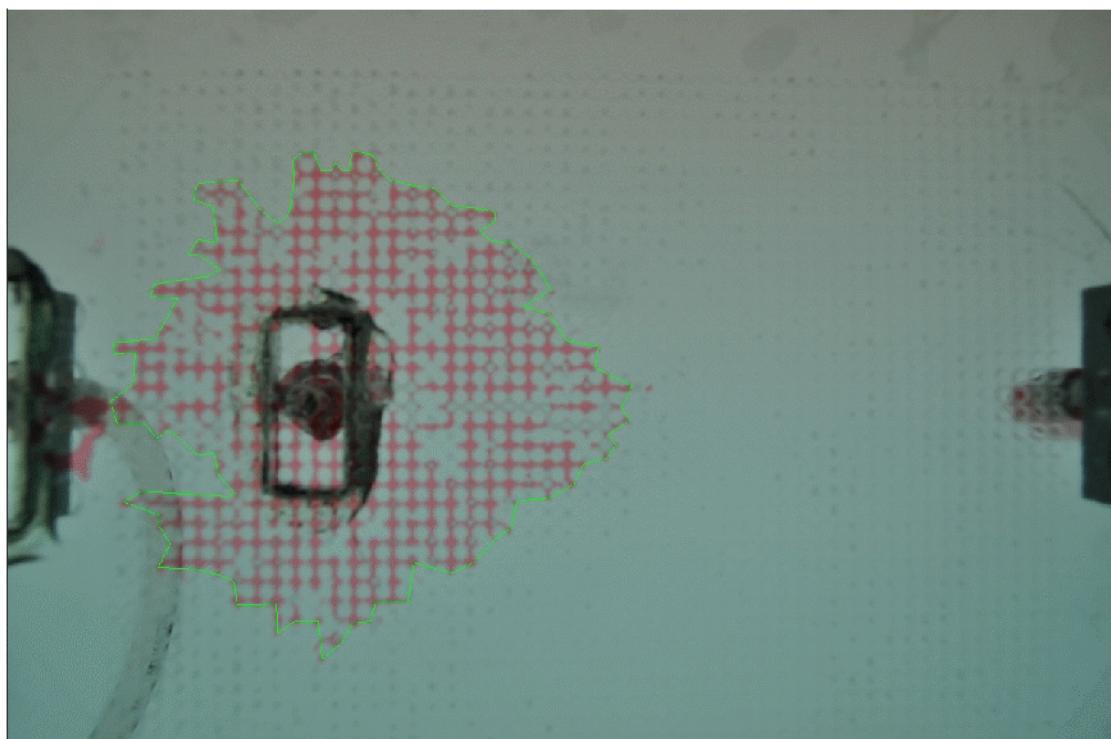
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων είναι μόνο οπτική και γίνεται με τις φωτογραφίες που πάρθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του προγράμματος Autocad γίνεται γραφική επεξεργασία των φωτογραφιών και προκύπτει η διάλυση της πηγής σε συνάρτηση με το χρόνο. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν στη περίπτωση της διάλυσης ‘πηγής’ σε δισδιάστατο πορώδες μέσο από τη ροή νερού. Σημειώνεται ότι τα πειράματα αυτά διήρκησαν πάνω από 6 μήνες.

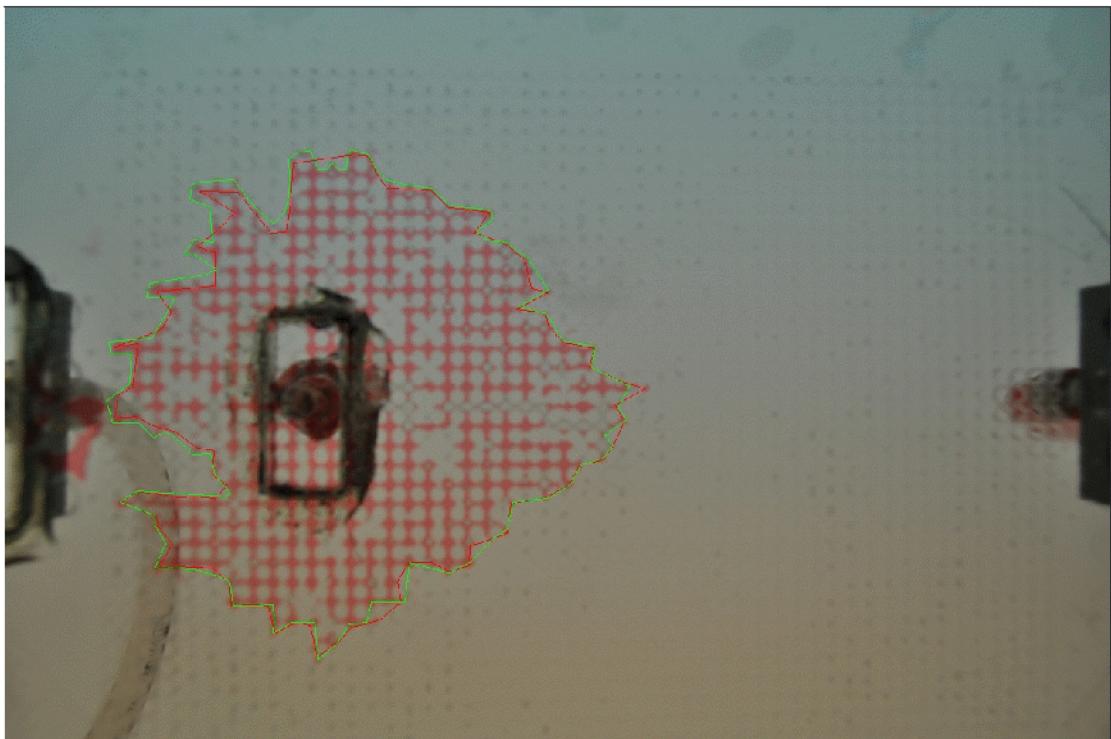
Το σκέλος των πειραμάτων που αφορά στη διάλυση από διάλυμα κολλοειδών δεν ήταν δυνατό να ολοκληρωθεί στα πλαίσια αυτού του μεταπυγιακού προγράμματος σπουδών, γιατί οι δυσκολίες και τα προβλήματα που προέκυψαν ήταν αξεπέραστα στο χρόνο που απέμενε. Τα προβλήματα αυτά καθώς και προτάσεις για τη μελλοντική εξέταση του φαινομένου παρουσιάζονται αναλυτικά στη παράγραφο των συμπερασμάτων.

5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

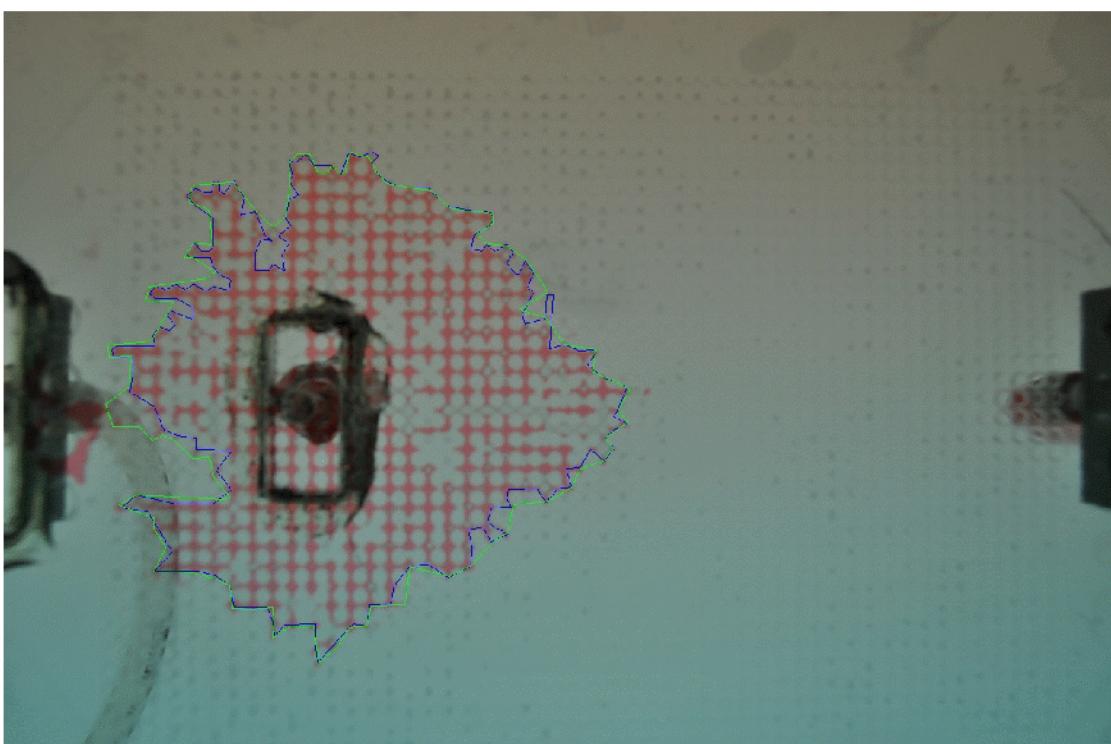
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η παροχή σε όλα τα πειράματα ήταν σταθερή και ίση με 3,1 ml/hr. Η ποσότητα του TCE ήταν πάντα 0,1 ml μάζας 0,1463 gr και η φωτογραφική μηχανή ρυθμίστηκε να λαμβάνει στιγμιότυπα ανά 5 λεπτά. Το εμβαδό των ‘πηγών’ που δημιουργούνταν στο δοκίμιο δεν ήταν σταθερό αλλά τυχαίο κάθε φορά που ξεκινούσε ένα νέο πείραμα. Με αυτά τα δεδομένα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις επόμενες φωτογραφίες, στις οποίες έχουν σχεδιαστεί τα περιγράμματα των πηγών για ευκολία στη παρατήρηση και τον υπολογισμό του εμβαδού. Επίσης, υπάρχει η σύγκριση με το αρχικό περίγραμμα της ‘πηγής’ σε κάθε φωτογραφία. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται έχουν προέλθει από το χονδρόκοκκο δοκίμιο.



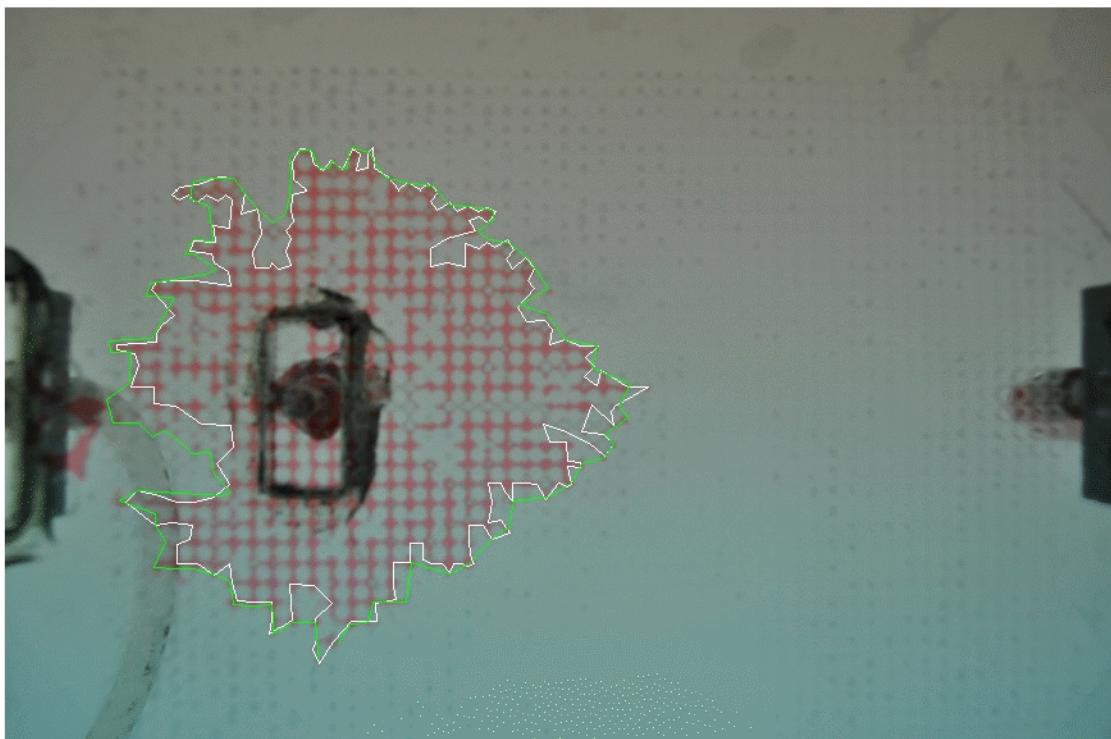
Εικόνα 5.1: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 0 \text{ min}$



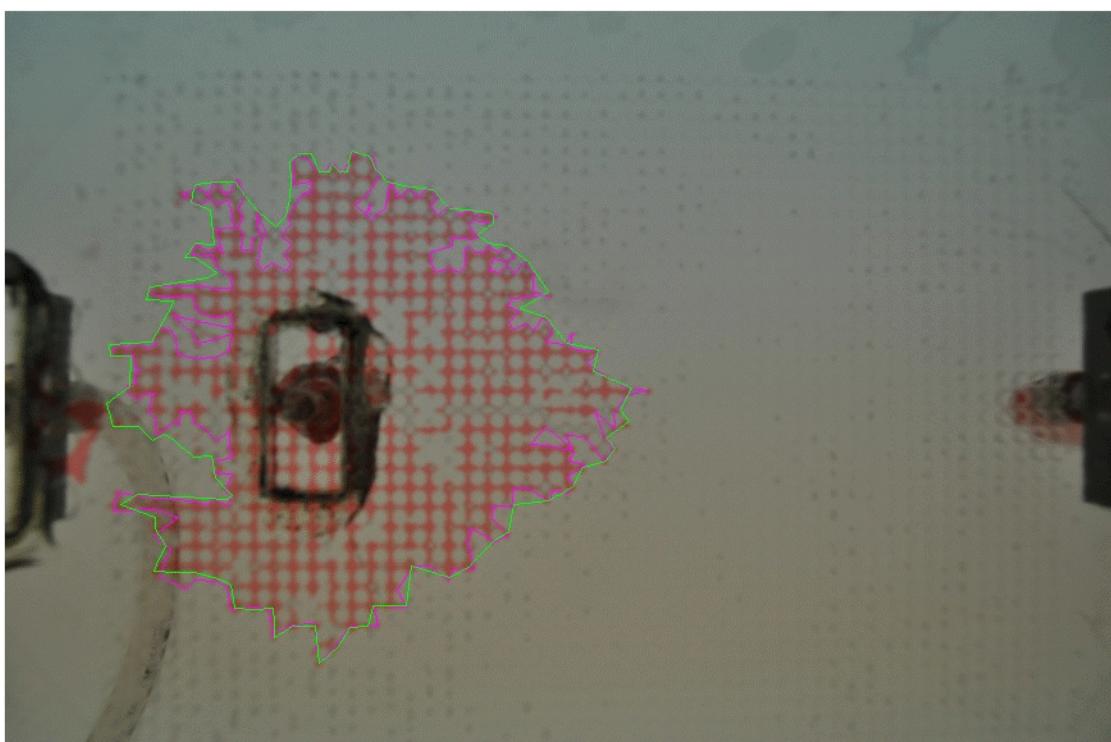
Εικόνα 5.2: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 35 \text{ min}$



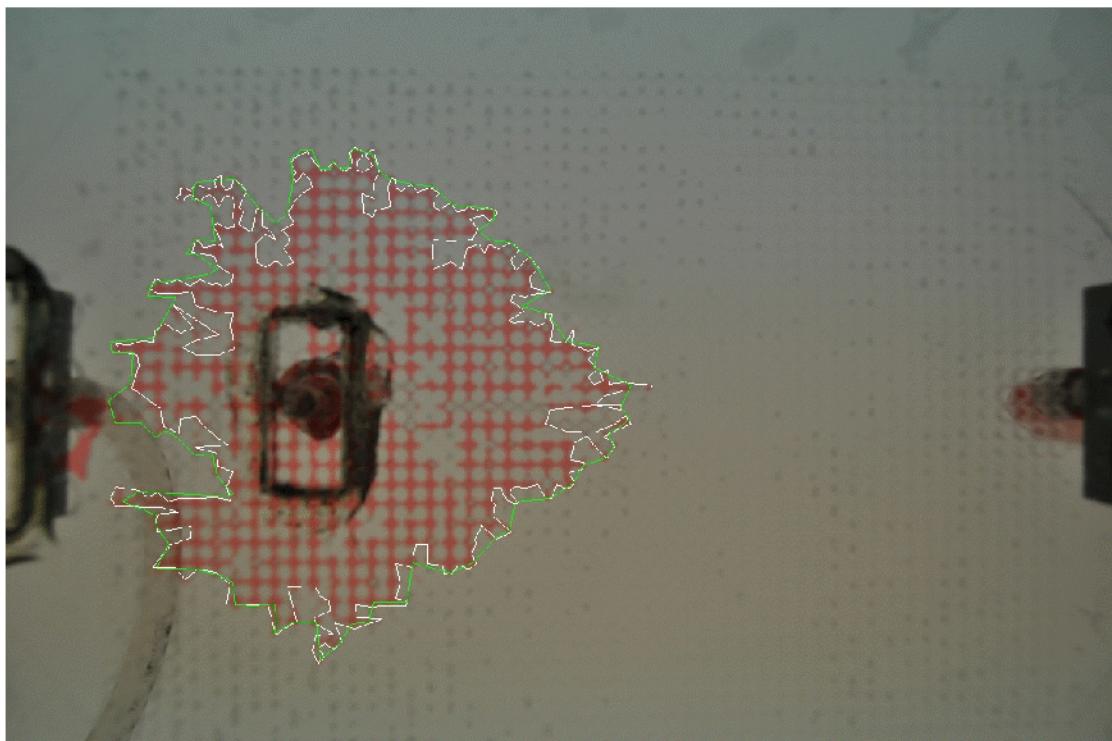
Εικόνα 5.3: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 60 \text{ min}$



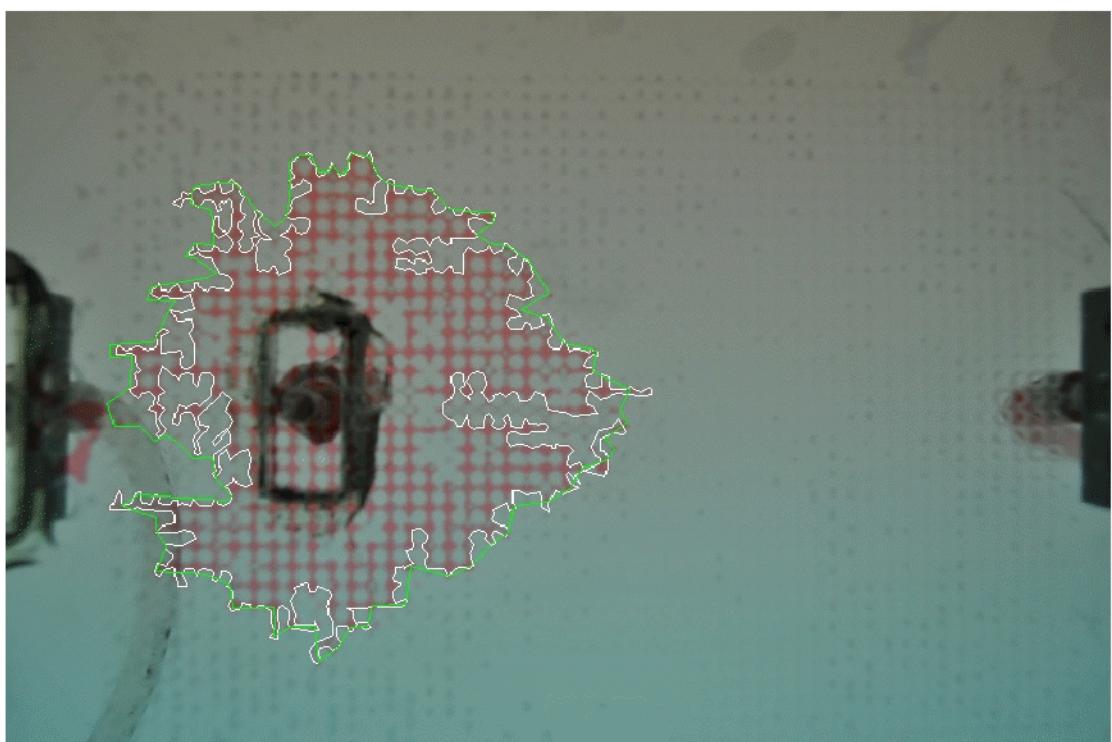
Εικόνα 5.4: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 85 \text{ min}$



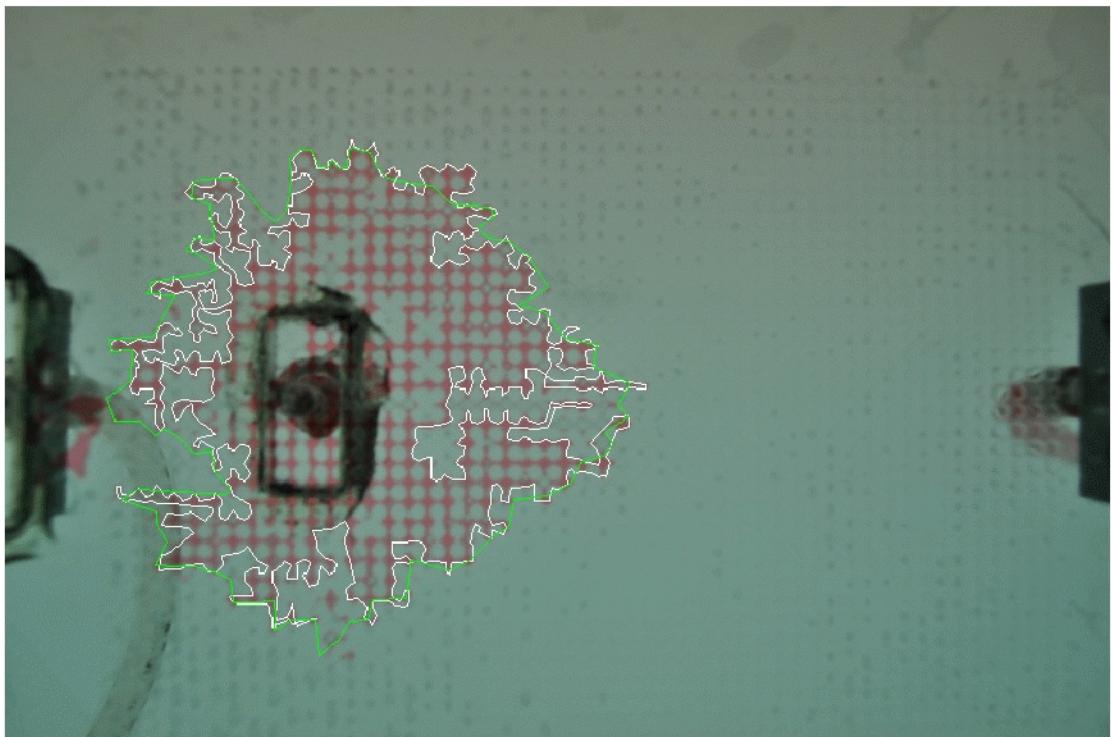
Εικόνα 5.5: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 110 \text{ min}$



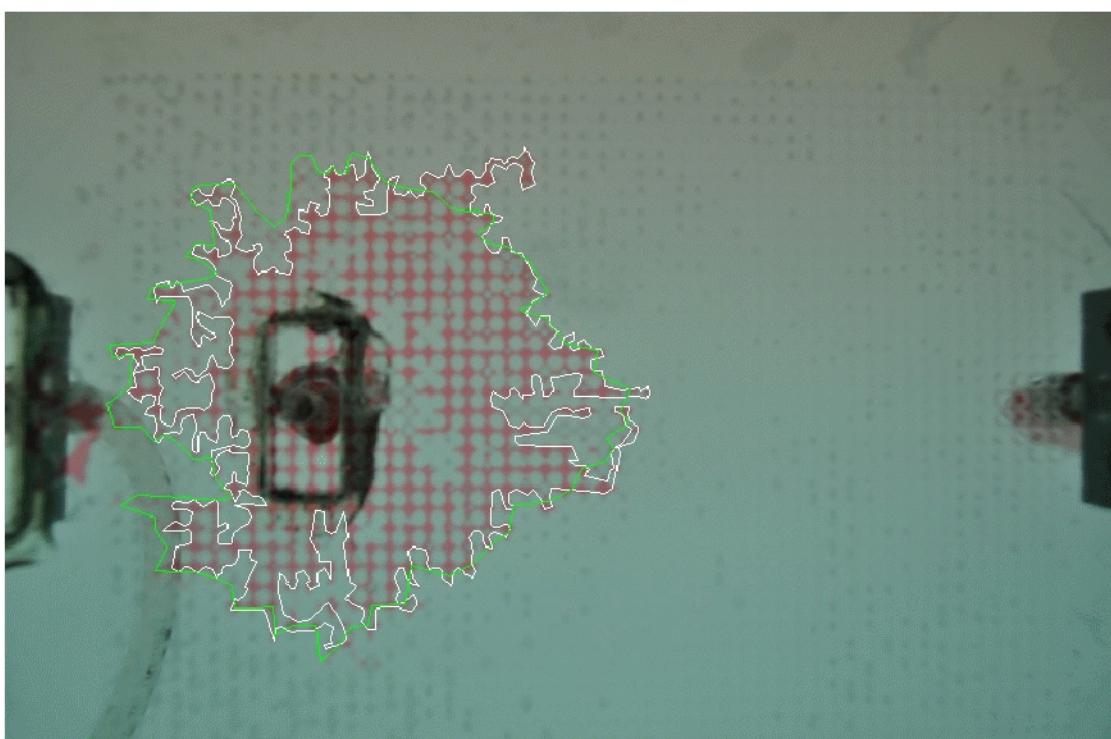
Εικόνα 5.6: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 135 \text{ min}$



Εικόνα 5.7: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 185 \text{ min}$



Εικόνα 5.8: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 235 \text{ min}$



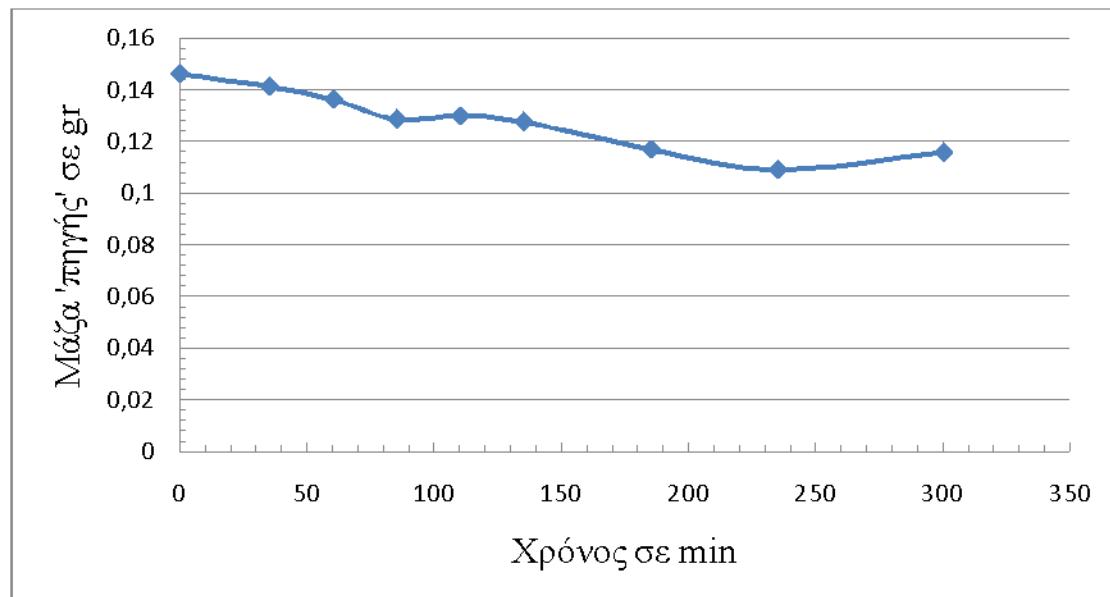
Εικόνα 5.9: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 300 \text{ min}$

Από τις προηγούμενες φωτογραφίες προκύπτει ότι υπάρχει σαφής διάλυση της ‘πηγής’ με το πέρασμα του χρόνου. Παρατηρείται μια μικρή εξάπλωση της ουσίας προς τη κατεύθυνση της ροής και σαφής μείωση της μάζας της ουσίας στο αριστερό άκρο που έρχεται σε επαφή αρχικά με τη ροή του νερού. Ποσοτικά η μείωση της επιφάνειας που καταλαμβάνει η ουσία και η μάζα που διέφυγε παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα.

Χρόνος σε min	Εμβαδό ‘πηγής’	Ποσοστό μείωσης εμβαδού %	Μάζα που διέφυγε σε gr
0	0,127	0	0
35	0,1228	3,31	0,0048
60	0,1186	6,61	0,0097
85	0,1119	11,89	0,0174
110	0,1113	11,02	0,0161
135	0,1111	12,6	0,0184
185	0,1017	19,92	0,0291
235	0,095	25,2	0,0369
300	0,1006	20,79	0,0304

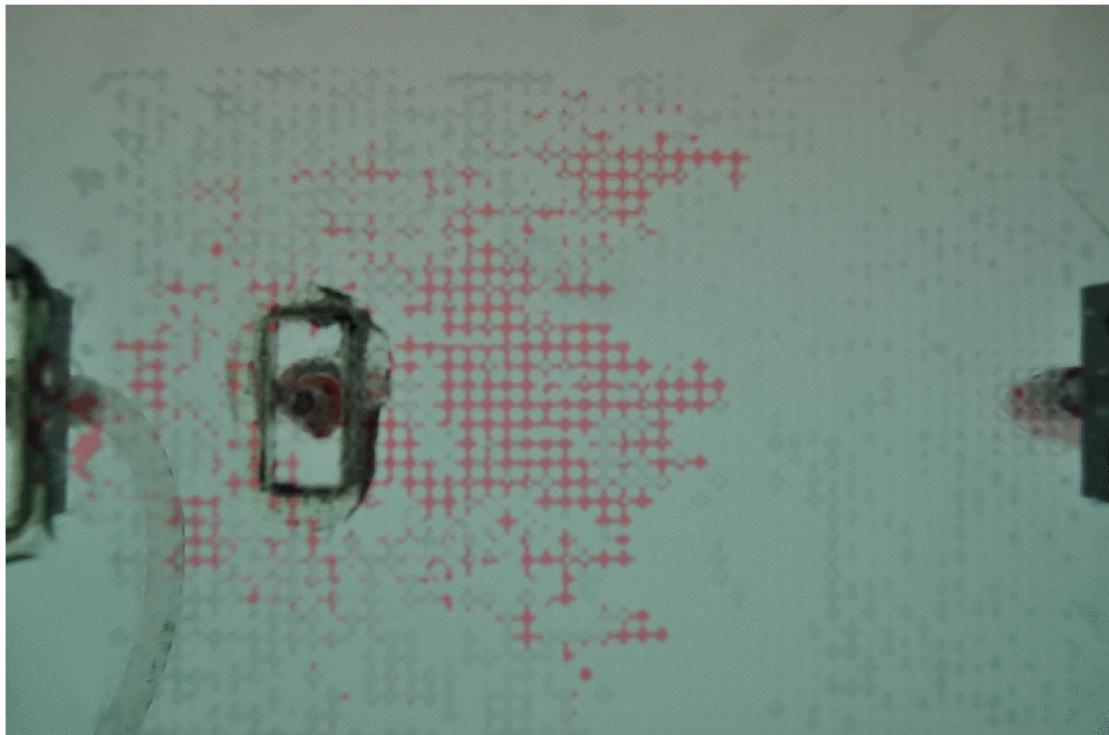
Πίνακας 5.1: Αριθμητικά αποτελέσματα πειράματος

Στο επόμενο σχεδιάγραμμα παρουσιάζεται η μάζα της ‘πηγής’ συναρτήσει του χρόνου:



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα μάζας 'πηγής' TCE – χρόνον

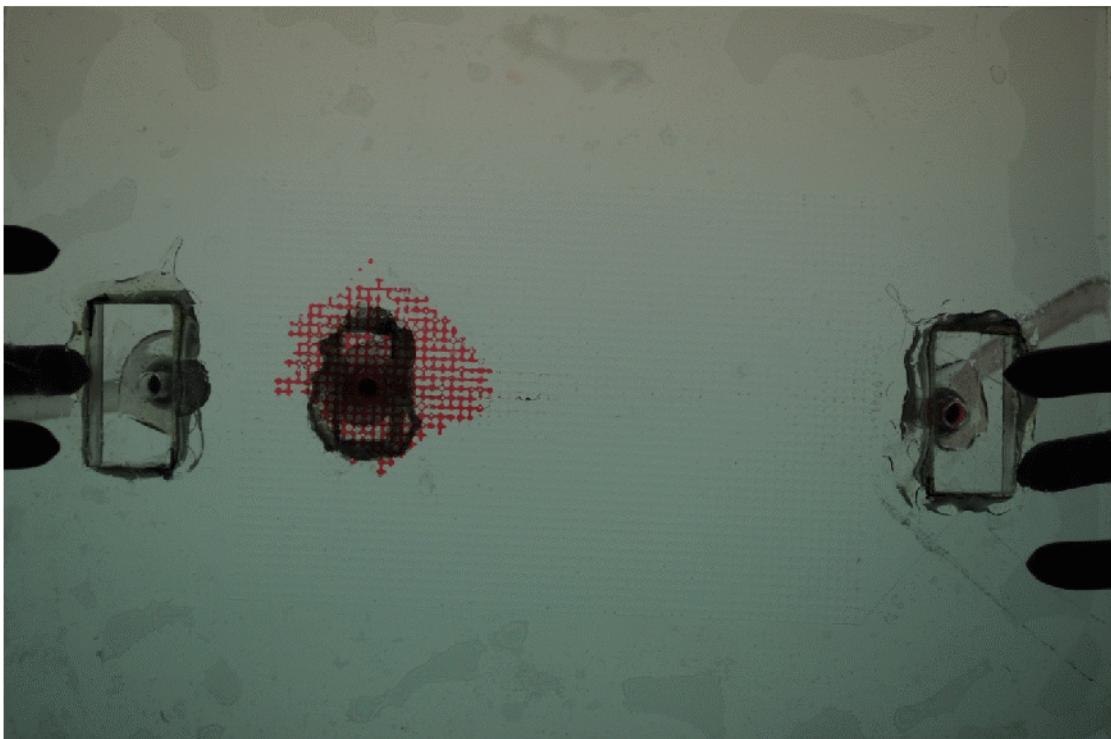
Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι ενώ το πείραμά συνεχίστηκε για αρκετή ώρα ακόμη τα αποτελέσματα δεν ήταν αξιοποιήσιμα. Ο λόγος είναι ότι το TCE διέβρωσε το πλέξιγκλας στη θέση εισαγωγής του, με αποτέλεσμα να υπάρχει εισροή αέρα αλλά και κομματιών πλέξιγκας στο δοκύμιο που κατέστρεψαν το υπόλοιπο πείραμα.



Εικόνα 5.10: Πείραμα μετά την εισαγωγή αέρα

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού εξετάστηκαν αρκετές λύσεις, όμως είτε ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθούν με τον εξοπλισμό που διέθετε το εργαστήριο, το μηχανουργείο και το υαλουργείο του πανεπιστημίου, είτε τα υλικά που απαιτούνταν δεν ήταν δυνατό να σταλθούν στην Ελλάδα. Αναλυτικότερα παρουσιάζονται στα συμπεράσματα του κεφαλαίου.

Μοναδικός τρόπος να συνεχιστούν τα πειράματα ήταν τελικά η συντήρηση των δοκιμών μετά από κάθε πείραμα και η εξέταση του φαινομένου για όσο άντεχαν τα δοκίμια. Με τη πάροδο των πειραμάτων τα δοκίμια άντεχαν όλο και λιγότερο χρονικό διάστημα μέχρι που αχρηστεύονταν εντελώς. Ενδεικτικό της κατάστασης των δοκιμών είναι το τελευταίο πείραμα που έγινε που σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα καταστράφηκε. Αυτός ήταν και ο λόγος που δεν κατέστη δυνατό να ολοκληρωθεί και το δεύτερο σκέλος των πειραμάτων με τη διέλευση κολλοειδών διαλυμάτων.

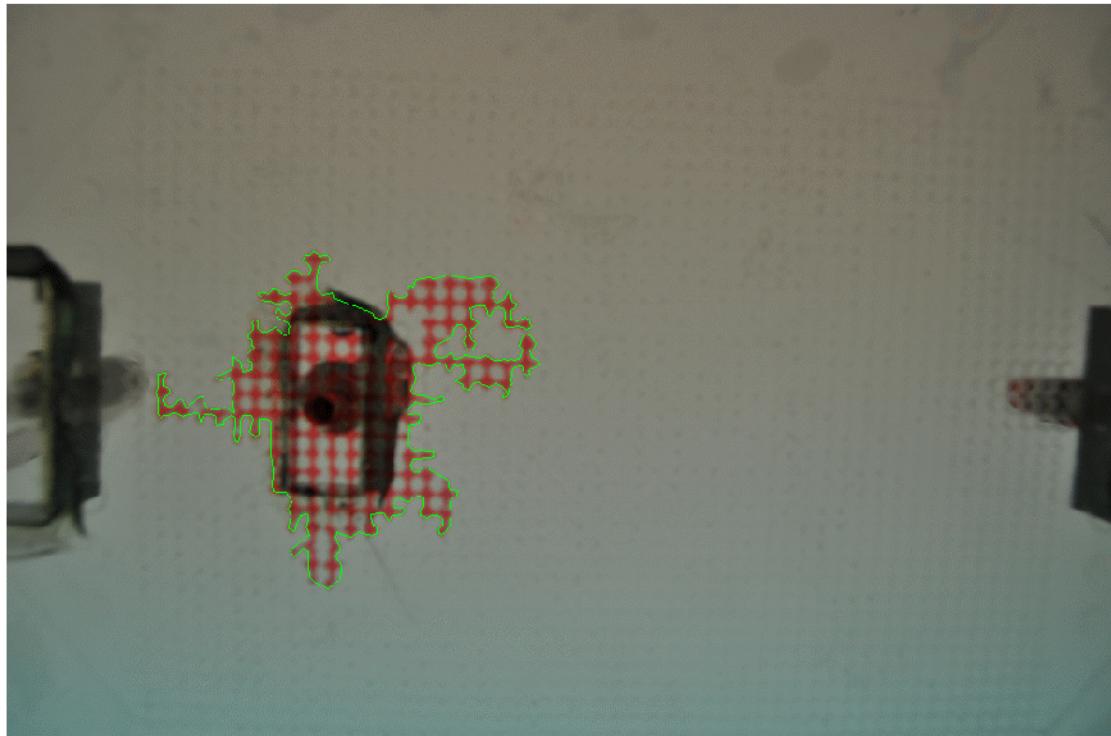


Εικόνα 5.11: Αρχική Φωτογραφία τελευταίου πειράματος

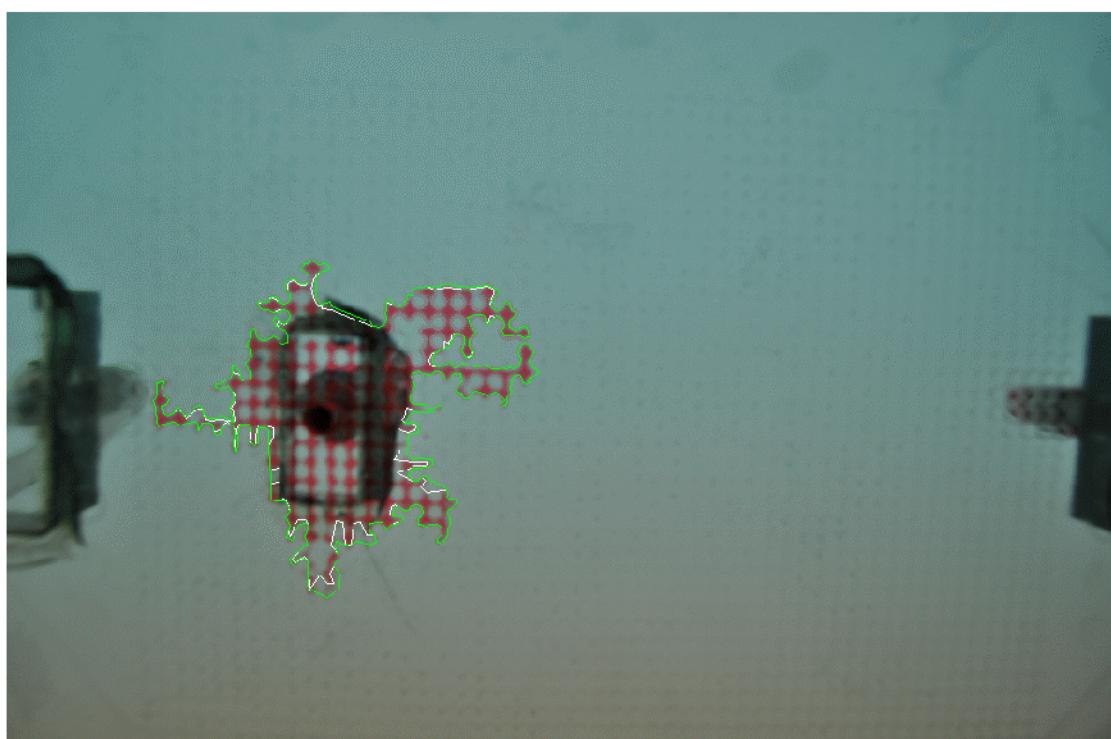


Εικόνα 5.12: Φωτογραφία σε σύντομο χρονικό διάστημα

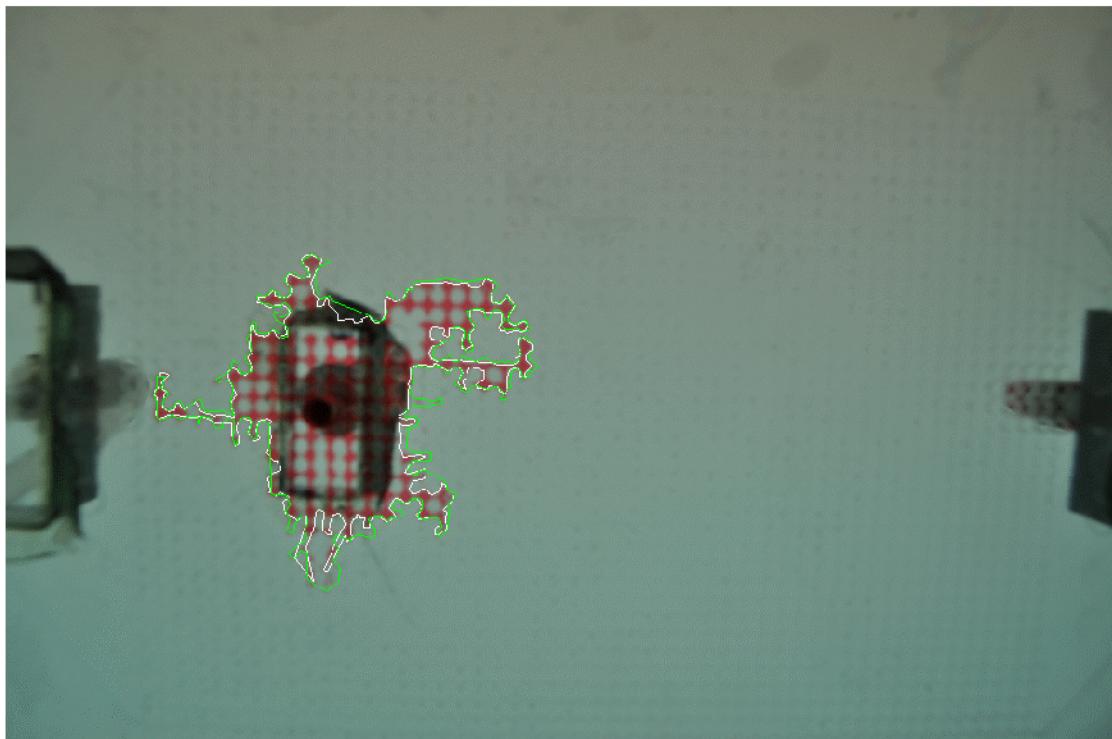
Για την επιβεβαίωση του παραπάνω πειράματος παρουσιάζεται ένα ακόμα το οποίο έχει διεξαχθεί με τις ίδιες ακριβώς συνθήκες, η μοναδική διαφορά παρουσιάζεται στο σχηματισμό της ‘πηγής’ και συγκεκριμένα στην επιφάνεια που καταλαμβάνει και στη περίμετρό της.



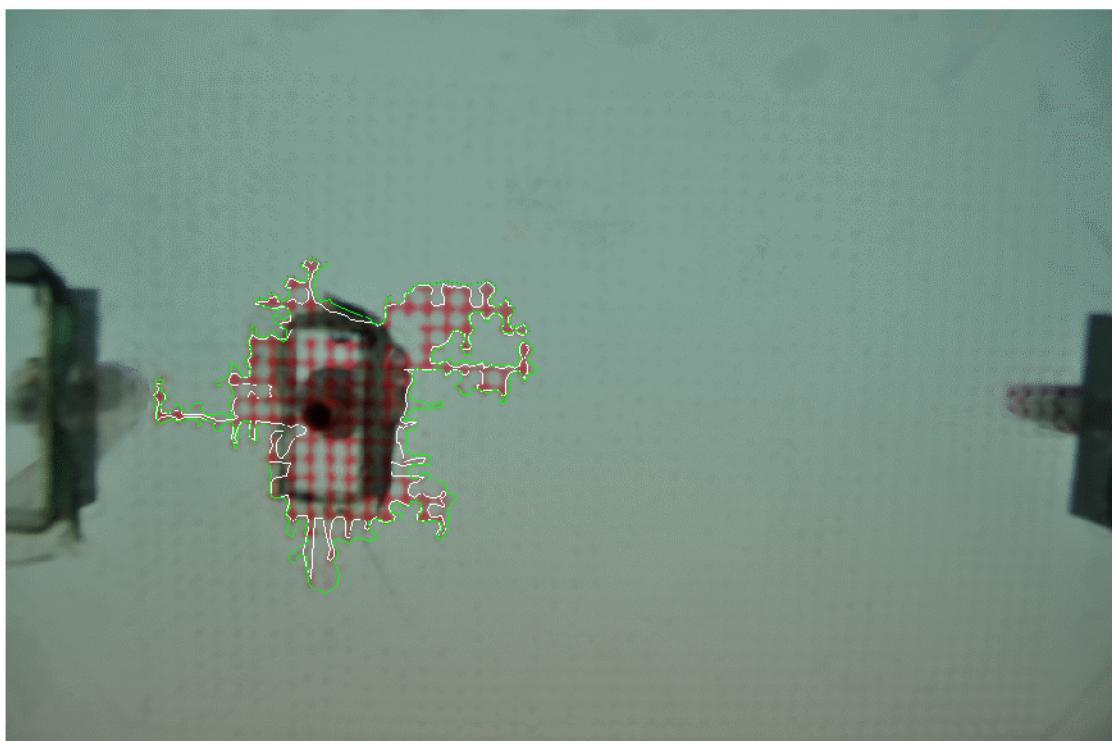
Εικόνα 5.13: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 0$



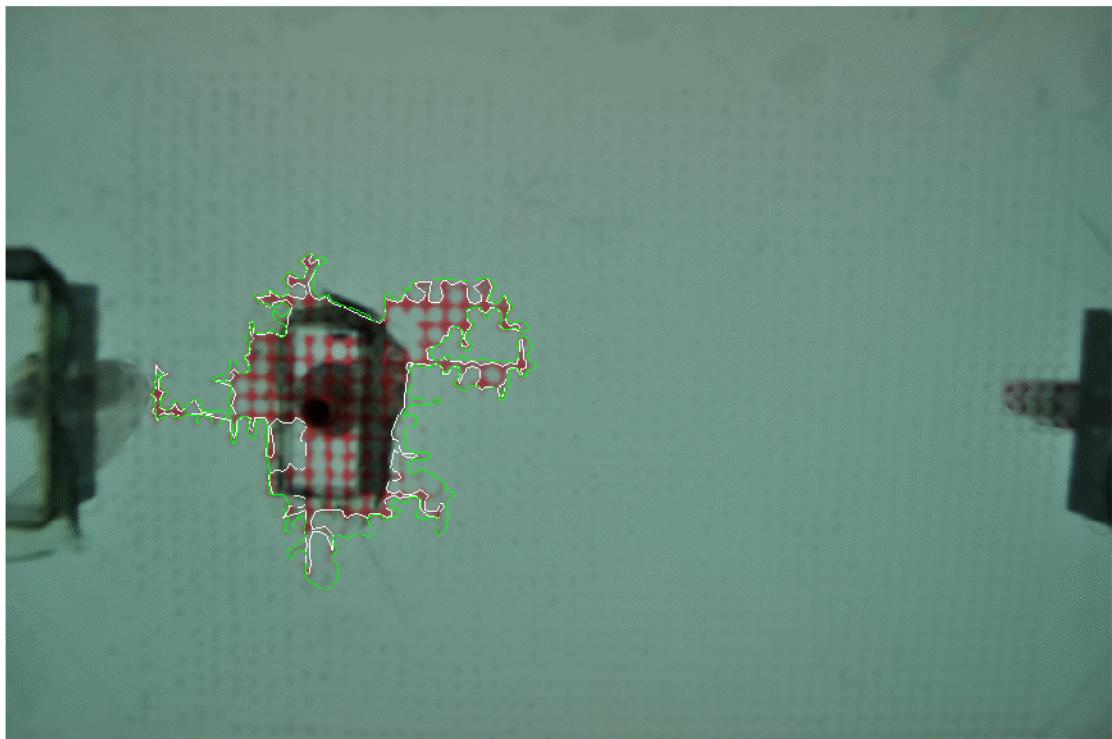
Εικόνα 5.14: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 25 \text{ min}$



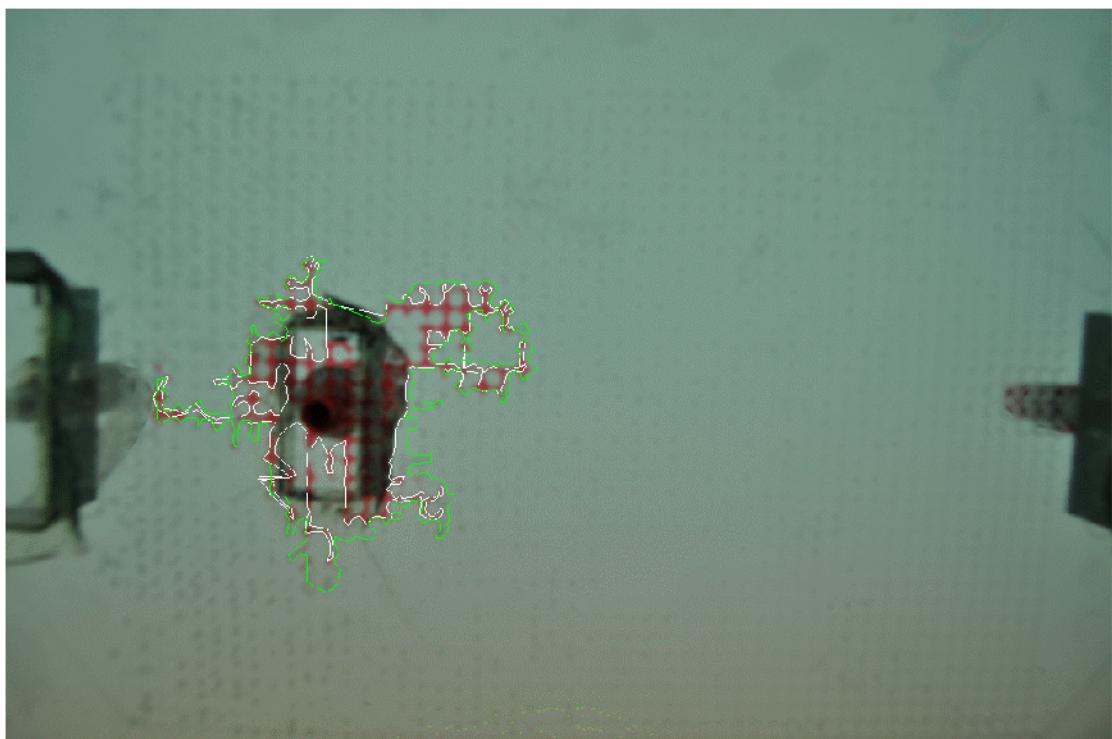
Εικόνα 5.15: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 55 \text{ min}$



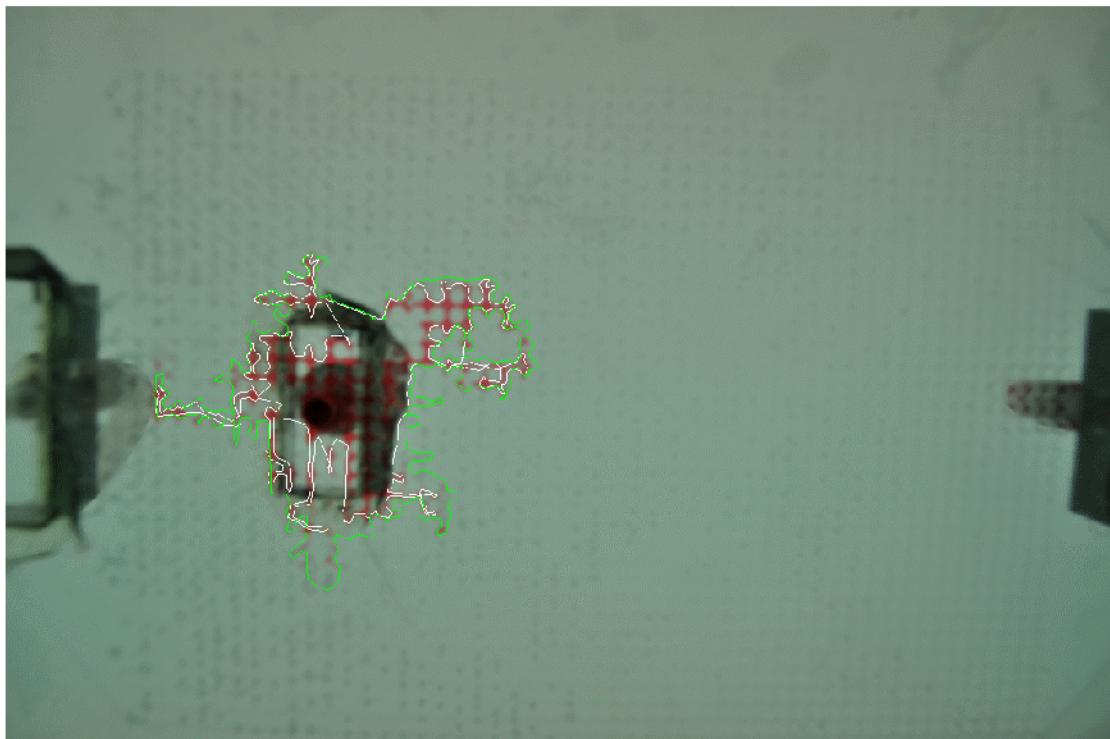
Εικόνα 5.16: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 210 \text{ min}$



Εικόνα 5.17: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 355 \text{ min}$



Εικόνα 5.18: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 400 \text{ min}$



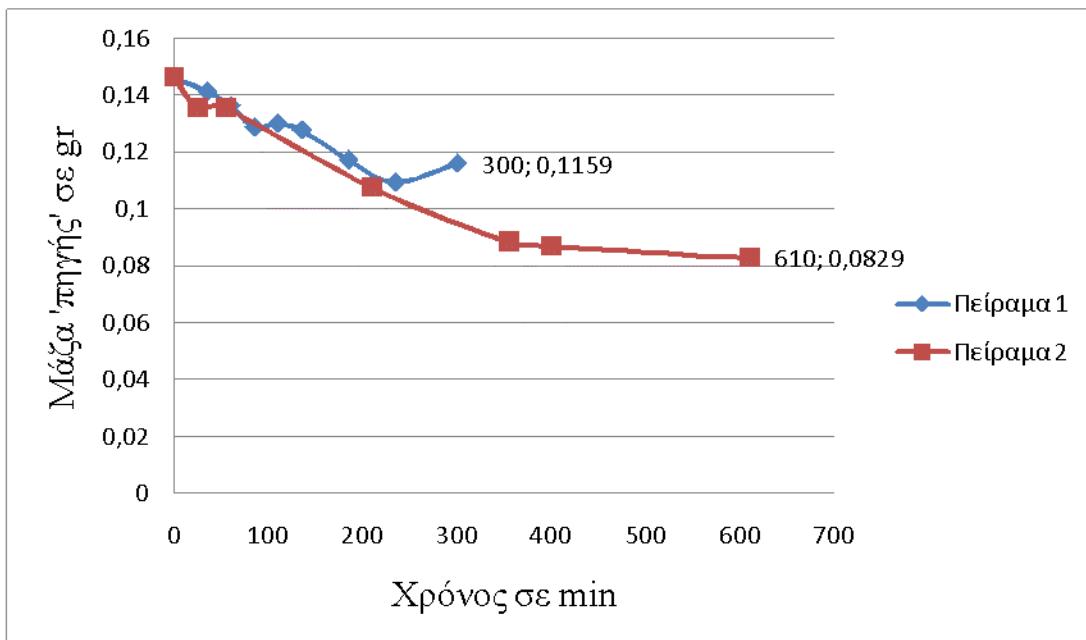
Εικόνα 5.19: Φωτογραφία σε χρόνο $t = 610 \text{ min}$

Ποσοτικά η μείωση της επιφάνειας που καταλαμβάνει η ουσία και η μάζα που διέφυγε παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα.

Χρόνος σε min	Εμβοδό ‘πηγής’	Ποσοστό μείωσης εμβοδού %	Μάζα που διέφυγε σε gr
0	0,0383	0	0
25	0,0355	7,31	0,0107
55	0,0355	7,31	0,0107
210	0,0282	26,37	0,0386
355	0,0232	39,43	0,0577
400	0,0228	40,5	0,0593
610	0,0217	43,34	0,0634

Πίνακας 5.2: Αριθμητικά αποτελέσματα πειράματος

Στο επόμενο σχεδιάγραμμα παρουσιάζεται η μάζα της 'πηγής' συναρτήσει του χρόνου και για τα δύο πειράματα μαζί:



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα μάζας 'πηγής' TCE – χρόνου

Από τα παραπάνω και το σχεδιάγραμμα γίνεται αντιληπτό ότι τα δύο πειράματα εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά με εξαίρεση κάποιες τιμές. Αυτό δείχνει ότι αν και οι σχηματισμένες 'πηγές' διαφέρουν τόσο μεταξύ τους η απώλεια είναι σχετικά ίδια στη πάροδο του χρόνου και οι διαφορές ύστερα από την εξέταση των πηγών δικαιολογούνται. Ο λόγος της διαφοροποίησης του δεύτερου πειράματος σε σχέση με το πρώτο είναι ότι η δεύτερη πηγή αν και καταλαμβάνει μικρότερη επιφάνεια είναι πιο συμπυκνωμένη χωρίς να περικλείει και πόρους με νερό και η περίμετρος της μετρήθηκε αρκετά μεγαλύτερη από την πρώτη. Αποτέλεσμα αυτής της ιδιότητας είναι να υπάρχει μεγαλύτερη επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με τη ροή του νερού και έτσι η μεταφορά μάζας να είναι μεγαλύτερη, πράγμα το οποίο αποτυπώνεται και στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται.

5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάστηκαν πειράματα και δεδομένα που αφορούν στο πρώτο σκέλος που είχε τεθεί ως στόχος κατά την έναρξη του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών. Εξετάστηκε η διάλυση μιας ‘πηγής’ NAPL σε δισδιάστατο πορώδες δοκύμιο σε συνθήκες ομοιόμορφης ροής και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Επίσης, εξετάστηκε πως η διαφορετική γεωμετρία και ο σχηματισμός μια ‘πηγής’ NAPL επηρεάζουν τη διάλυσης και με ποιο τρόπο. Παρ όλη την πραγματοποίηση του ενός μόνο σκέλους του πειράματος είναι ένα σημαντικό βήμα για το εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος καθώς είναι τα πρώτα πειράματα με υγρά μη υδατικής φάσης. Από τα αποτελέσματα αλλά και όλη την πειραματική διαδικασία προκύπτουν συμπεράσματα και υποδείξεις για το μέλλον για όλα τα στάδια της εργασίας.

Αρχικά, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα των πειραμάτων είναι:

- Η διάλυση της πηγής από τη ροή του νερού εμφανίζει τη συμπεριφορά που ήταν αναμενόμενο με βάση τη βιβλιογραφία. Υπάρχει μια συνεχής μεταφορά μάζας από τη πηγή και σταδιακή μείωση της επιφάνειας που καταλαμβάνει. Επίσης, παρατηρείται και μια ελάχιστη μετατόπιση κατά τη κατεύθυνση της ροής.
- Μετρήθηκε η μεταφορά μάζας από τη πηγή μέχρι το σημείο που επέτρεψαν τα πειράματα με γραφική μέθοδο. Από το αρχικό εμβαδό που καταλάμβανε η ουσία κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός του μεγέθους της μάζας που παρασύρθηκε και μεταφέρθηκε από τη ροή του νερού.
- Εξετάστηκε η επίδραση που έχουν στη μεταφορά μάζας η γεωμετρία της πηγής. Από τα δύο πειράματα που παρουσιάστηκαν έγινε αντιληπτό ότι μεγαλύτερο ρόλο στη διάλυση της πηγής έπαιξε η περίμετρος της σχηματιζόμενης πηγής και όχι η επιφάνεια που καταλάμβανε το TCE. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι αν και η διαφορά στο εμβαδό των πηγών ήταν μεγάλη (το πρώτο καταλάμβανε 3πλάσιο εμβαδό από το δεύτερο), η μεταφορά μάζας για το δεύτερο ήταν μεγαλύτερη λόγω του ότι η πηγή είχε μεγαλύτερη περίμετρο και άρα μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής με το νερό, με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη διάλυση της πηγής.
- Η τοξικότητα που παρουσιάζουν τα υγρά μη υδατικής φάσης είναι μεγάλη με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η πρόβλεψη των πιθανών αρνητικών επιπτώσεων και η πρόνοια ώστε να απαλείφονται ή να ελαχιστοποιούνται οι αρνητικές επιπτώσεις που έχουν κατά τη πειραματική διαδικασία.

Η εργασία αυτή μπορεί να αποτελέσει βάση και οδηγό για παρόμοια πειράματα. Τομείς που θα πρέπει να ερευνηθούν μελλοντικά είναι:

- Διάλυση της πηγής ενός NAPL με ροή κολλοειδούς διαλύματος.
- Ροή κολλοειδών διαλυμάτων διαμέσου των δισδιάστατων πορώδων δοκιμών και εξαγωγή μοντέλων της κίνησης αυτής.
- Παρατήρηση σε επίπεδο πόρων με μικροσκόπιο κατά τη κίνηση ουσιών και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα.
- Κίνηση ρύπων διαμέσου σύνθετου δοκιμίου, που θα αποτελείται δηλαδή από διαφορετικά πορώδη και εξέταση της κίνησης καθώς περνά από το ένα δίκτυο πόρων στο άλλο.

Στο σημείο αυτό θα αναφερθούν οι δυσκολίες που υπήρξαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων αλλά και τις προετοιμασίας της πειραματικής διαδικασίας για να γίνει αντιληπτό γιατί δεν ήταν δυνατό να ολοκληρωθούν όλα τα σκέλη της εργασίας. Οι μεγαλύτερες δυσκολίες που προέκυψαν ήταν:

- Η λιθογραφική μέθοδος χάραξης των δοκιμών απαίτησε μεγάλο χρονικό διάστημα και οι επιτυχημένες απόπειρες ήταν ελάχιστες για την προετοιμασία των δοκιμών. Αναφέρεται, ότι μόλις μια στις είκοσι περίπου απόπειρες ήταν επιτυχημένες για τη κατασκευή ενός μόνο δικτύου πόρων. Η μέθοδος είναι ξεπερασμένη με βάση τον εξοπλισμό που έχουν εργαστήρια του εξωτερικού και τις εργασίες της διεθνούς βιβλιογραφίας. Για τη κατασκευή των δοκιμών αυτών απαιτήθηκε πάνω από ένα έτος, οπότε καταστροφή των δοκιμών στη πειραματική διαδικασία σήμαινε και το τέλος των πειραμάτων.
- Η κατασκευή της πειραματικής διάταξης και συγκεκριμένα η αγορά όλου του εξοπλισμού που απαιτήθηκε ήταν επίπονη καθώς οι προμηθευτές του εργαστηρίου δεν είχαν τα απαραίτητα υλικά, οπότε το διάστημα που απαιτήθηκε για την αγορά του κατάλληλου εξοπλισμού ήταν μεγάλο.
- Τα πειράματα αυτά γίνονταν για πρώτη φορά οπότε ο εξοπλισμός του εργαστηρίου δεν ήταν στην επιθυμητή κατάσταση. Αποτέλεσμα αυτού ήταν να αλλάξει αρκετές φορές ο σχεδιασμός ολόκληρου του πειράματος με αποτέλεσμα να χαθεί πολύτιμος χρόνος στη προσπάθεια να ερευνηθεί αν όντως κάποιο όργανο μπορούσε να χρησιμοποιηθεί είτε στην πειραματική διαδικασία είτε στη μέτρηση αποτελεσμάτων. Αυτός ήταν και ο κύριος λόγος που επιλέχθηκε τελικά η οπτική παρακολούθηση των φαινομένου.

- Η διάταξη εισαγωγής του TCE στο δοκίμιο. Δόθηκε μεγάλη βαρύτητα στο συγκεκριμένο τμήμα της πειραματικής διάταξης λόγω της τοξικότητας που παρουσιάζουν τα υγρά μη υδατικής φάσης. Μετά από αρκετές δοκιμές και επαφές με εργαστήρια (Μηχανουργεία Πανεπιστημίου, Υαλουργείο Πανεπιστημίου) διαπιστώθηκε πως δεν ήταν δυνατό να κατασκευαστούν οι επιθυμητές διατάξεις. Οπότε, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη με πλέξιγκας που υπάρχει και στις φωτογραφίες με μέριμνα ώστε το πλέξιγκλας να μην έρχεται σε επαφή καθόλου με το TCE. Παρόλα αυτά, το TCE ερχόταν σε επαφή με το πλέξιγκλας με αποτέλεσμα να μην ολοκληρωθούν όλα τα σκέλη των πειραμάτων που είχαν προγραμματιστεί αφού από ένα σημείο και έπειτα τα δοκίμια καταστρέφονταν εντελώς.
- Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος εξετάστηκε και η αντικατάσταση του TCE από άλλη μη τοξική ουσία. Η ουσία που βρέθηκε ήταν η Hydrofluoroether όμως η διακίνηση της ουσίας εκτός των ορίων των Η.Π.Α. απαγορεύεται.

Από τα παραπάνω γίνεται αντίληπτό ότι οι δυσκολίες που συναντήθηκαν στην παρούσα εργασία αλλά και οι απαιτούμενοι χρόνοι για την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας ήταν απαγορευτικοί για την ολοκλήρωση όλων των σκελών που είχαν προγραμματιστεί αρχικά, στον περιορισμένο χρόνο του Π.Μ.Σ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A. ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Atkins P., (2005), "Φυσικοχημεία", Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο.
- Pecsok R., Shields D., Cairns T. και McWilliam I., (1980), "Σύγχρονες Μέθοδοι στην χημική ανάλυση", Εκδόσεις Γ.Α. Πνευματικός, Αθήνα.
- Χρυσικόπουλος Κ., (2007), "Καθαρισμός Νερού", Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Χρυσικόπουλος Κ., (2007), "Ειδικά Θέματα Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος", Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

B. ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Antoniou C., E. Koukouraki and E. Diamadopoulos, (2006), "Determination of chlorinated volatile organic compounds in water and municipal wastewater using headspace–solid phase microextraction–gas chromatography", *Journal of Chromatography A*, Vol. 1132, pp. 310-314.
- Auset M. and Keller A.A., (2004), "Pore-scale processes that control dispersion of colloids in saturated porous media", *Water Resources Research*, Vol. 40, pp. W03503.
- Baumann Thomas and Werth Charles J., (2004), "Visualization and Modeling of Polystyrol Colloid Transport in a silicon Micromodel", *Vadose Zone Journal*, Vol. 3, pp. 434-443.
- Bedient P., Rifai H. and C. Newell, (1994), "Ground Water Contamination", Prentice Hall.
- Cakmak M. E., Zevi Y, Morales V. L., Gao B., Nieber J. L. and Steenhuis T. S., (2006), "Pore scale modeling of colloid transport in unsaturated porous media with COMSOL", USA.
- Charbeneau R., (2000), "Groundwater Hydraulics and Pollutant Transport", Prentice Hall.

- Chrysikopoulos C., (1995), "Three-dimensional analytical models of contaminant transport from nonaqueous phase liquid pool dissolution in saturated subsurface formations", *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 4, pp. 1137–1145.
- Chrysikopoulos C., K. Lee, (2002), "Dissolution of a well-defined trichloroethylene pool in saturated porous media: Experimental design and aquifer characterization", *Water Resources Research*, Vol. 36, pp. 3911–3918.
- Clark M., (1996), *"Transport Modeling For Environmental Engineers and Scientists"*, Wiley Interscience Publication.
- Corapcioglu M. Y., Fedirchuk P., (1999), "Glass bead micromodel study of solute transport", *Journal of contaminant Hydrology* Vol. 36, pp. 209-230.
- Dietz E. and K. Singley, (1979), "Determination of Chlorinated Hydrocarbons in Water by Headspace Gas Chromatography", *Analytical Chemistry*, Vol. 51, No. 11, pp. 1809–1814.
- Fabbri D., Bezzi R., Torri C., Galletti P. and E. Tagliavini, (2007), "Determination of Tetrachloroethylene and Other Volatile Halogenated Organic Compounds in Oil Wastes by Headspace SPME GC-MS", *Chromatographia*, Vol. 66, No. 5-6, pp. 377-382.
- Fetter C., (1999), *"Contaminant Hydrology"*, Prentice Hall.
- FINAL DRAFT REPORT : Intermedia Transfer For Contaminants Found at Hazardous Waste Sites – Trichloroethylene (TCE), Risk Science Program, Department of Environmental Toxicology, University of California, December 1994.
- Golfinopoulos S., Lekkas T. and A. Nikolaou, (2001), "Comparison of methods for determination of volatile organic compounds in drinking water", *Chemosphere*, Vol. 45, pp. 275-284.
- Hardisty P., Roher J. and J. Dotridge, (2004), "LNAPL Behavior in Fractured Rock:Implications for Characterization and Remediation ", Proc. Conf. 2004 U.S. EPA/NGWA *Fractured Rock Conference:State of the Science and Measuring Success in Remediation*, Portland, Maine, September 13-15, 2004, pp. 129-134.
- Heron G., T. Christensen and C. Enfield (1998), "Henry's law constant for trichloroethylene between 10 and 95 °C ", *Environmental Science and Technology*, Vol. 32, No. 10, pp. 1433-1437.

- Kamon M., Endo K., Kawabata J., Inui T. and T. Katsumi, (2004), "Two-dimensional DNAPL migration affected by groundwater flow in unconfined aquifer", *Journal of Hazardous Materials*, Vol.110, pp. 1-12.
- Kim T. and C. Chrysikopoulos, (1999), "Mass transfer correlations for nonaqueous phase liquid pool dissolution in saturated porous media", *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 2, pp. 449–459.
- Ladaa T., Lee C., Coates J. and R. Falta, (2001), "Cosolvent effects of alcohols on the Henry's law constant and aqueous solubility of tetrachloroethylene (PCE)", *Chemosphere*, Vol. 44, pp. 1137-1143.
- Lambropoulou D., Konstantinou I. and T. Albanis, (2007), "Recent developments in headspace microextraction techniques for the analysis of environmental contaminants in different matrices", *Journal of Chromatography A*, Vol. 1152, pp. 70-96.
- Lee K., Khinast J. and J. Kim, (2007), "Numerical modeling of contaminant transport resulting from dissolution of a coal-tar pool in an experimental aquifer", *Hydrogeology Journal*, Vol. 15, No. 4, pp. 705-714.
- McKellar M. and Wardlaw N.C., (1982), "A method of making two-dimensional glass micromodels of pore systems", *The Journal of Canadian Petroleum*, Vol. 21, pp. 39-41.
- Patzek T., (2001), "Fick's Diffusion Experiments Revisited", available at: <http://petroleum.berkeley.edu/papers/patzek/Fick%20Revisited%20V2.pdf>
- Pumphrey K. and C. Chrysikopoulos (2004), "Non-aqueous phase liquid drop formation within a water saturated fracture", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 240, pp. 199-209.
- Willard H., Merritt L., Dean J. and F. Settle., "Instrumental Methods of analysis", Wadsworth Publishing Company, Belmont, California.
- Zhang F. and J. Smith, (2002), "Visualization of DNAPL Fingering Processes and Mechanisms in Water-Saturated Porous Media", *Transport in Porous Media*, Vol. 48, No. 1, pp. 41-59.
- Zhang Y., Shariati M. and Y. Yortsos, (2000), "The Spreading of Immiscible Fluids in Porous Media under the Influence of Gravity", *Transport in Porous Media*, Vol. 30, No. 1-2, pp. 117-140.