ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα:

«Περιβαλλοντική και Υγειονομική Μηχανική»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

<u>ΚΙΝΗΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΥΠΙΚΩΝ LNAPL ΣΕ ΑΚΟΡΕΣΤΑ</u> <u>ΠΟΡΩΔΗ ΜΕΣΑ –ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ</u> <u>ΕΙΚΟΝΩΝ</u>

ΣΗΜΑΝΤΗΡΑΚΗ ΦΩΤΕΙΝΗ

ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Γιδαράκος Ευάγγελος, (Επιβλέπων Καθηγητής)

Διαμαντόπουλος Ευάγγελος

Καρατζάς Γεώργιος

Χανιά - Οκτώβριος 2008

Πρώτα απ'όλους, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου, κ. Ευάγγελο Γιδαράκο, που μου έδωσε την δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα θέμα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος και μου παρείχε κάθε απαραίτητη υλικοτεχνική υποδομή αλλά και πολύτιμη βοήθεια κατά τη διάρκεια υλοποίησης της παρούσας διατριβής.

Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Την εξεταστική επιτροπή μου και συγκεκριμένα τους Καθηγητές κ. Ευάγγελο Διαμαντόπουλο και κ. Γεώργιο Καρατζά για τη συμβολή τους και τον χρόνο που αφιέρωσαν για την εξέταση αυτής της διατριβής.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ, την συνάδελφο μου, υποψήφια Διδάκτωρ στο Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, κα. Μαρία Αϊβαλιώτη, για την πολύτιμη αρωγή της σε όλα τα επίπεδα και καθ'όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής μέχρι την ολοκλήρωση της.

Επίσης, ιδιαίτερα ευχαριστώ, τον κ. Γρηγόρη Χρυσό, υποψήφιο Διδάκτωρ του Τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, που είναι πάντα δίπλα μου και συνέβαλλε ιδιαίτερα στην ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής με την βοήθειά του στη δημιουργία των αναγκαίων αλγορίθμων σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab.

Τον Αν. Καθ. κ. Ηλία Σταμπολιάδη και το προσωπικό του Εργ. Εμπλουτισμού του Τμ. Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, καθώς επίσης και τον Λέκτορα Εμμανουήλ Στειακάκη και το προσωπικό του Εργ. Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του ίδιου τμήματος, για την παροχή σημαντικής βοήθειας, αλλά και του απαραίτητου εργαστηριακού εξοπλισμού για τη διεξαγωγή πειραμάτων απαραίτητων για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής μου.

Όλους τους προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές του Εργ. Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων για την άριστη συνύπαρξη μας στο εργαστήριο. Ειδικότερα, ευχαριστώ, την υποψήφια Διδάκτωρ στο Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, κα. Καλλιόπη Αναστασιάδου για την βοήθεια της όποτε την χρειάστηκα.

Και τέλος ευχαριστώ, την οικογένεια μου που με στηρίζει καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι τυχαίες διαρροές υδρογονανθράκων, όπου ανήκουν και τα λεγόμενα **Μη Υδατικής Φάσης Υγρά** (Light Non-Aqueous Phase Liquids -LNAPL), αποτελούν μια από τις πιο συχνές πηγές ρύπανσης του υπεδάφους. Τα LNAPL ανήκουν σε μια μεγάλη κατηγορία ρύπων του εδάφους, που είναι δυνατόν να αποτελέσουν μόνιμη και μακράς διαρκείας πηγή υπεδάφιας ρύπανσης. Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση την ρύπανσης, που οφείλεται σε LNAPL, είναι αναγκαία η μελέτη της κίνησης και της κατανομής τους στο έδαφος. Τα LNAPL, τα οποία είναι ορατά, βρίσκονται σε μορφή ελαίου και η μετακίνησή τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, μεταξύ των οποίων, τη βαρύτητα, την άνωση και τις δυνάμεις τριχοειδών φαινομένων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η έρευνα της ροής και της κατανομής δυο τυπικών LNAPL, του Soltrol 220 και του Diesel στην ακόρεστη ζώνη συγκεκριμένου τύπου εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η κίνηση των LNAPL σε δυο διαφορετικά είδη άμμου με απώτερο σκοπό την κατανόηση των συνθηκών μεταφοράς των συγκεκριμένων ρύπων, που επικρατούν έπειτα από μια διαρροή.

Για τη μελέτη της κίνησης των συγκεκριμένων ρύπων πραγματοποιήθηκε ενστάλαξη αυτών σε μια διάταξη κατασκευασμένη από γυαλί, που περιείχε δυο στρώματα άμμου. Η μελέτη έγινε μέσω της τεχνικής ανάλυσης εικόνων. Πιο συγκεκριμένα λαμβάνονταν φωτογραφίες υπό σταθερές συνθήκες κατά τη διάρκεια και μετά την εισαγωγή του ρύπου και έως ότου να μην παρατηρείται καμία μεταβολή στο σχηματιζόμενο πλούμιο. Από την επεξεργασία των εικόνων, μέσω κατάλληλων αλγορίθμων σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab, προέκυψαν τα προφίλ κορεσμού για κάθε διαφορετικό ρύπο και τύπο εδάφους. Μέσω αυτών των προφίλ προσδιορίστηκε ο ρυθμός ροής των ρύπων στα συγκεκριμένα ακόρεστα πορώδη μέσα. Επιπλέον, προσδιορίστηκε ο βαθμός κορεσμού σε κάθε σημείο του πλουμίου.

Η μελέτη της κίνησης των ρύπων στα ακόρεστα πορώδη μέσα ολοκληρώθηκε μέσω της μέτρησης του τριχοειδούς δυναμικού που αναπτύσσεται στο έδαφος λόγω της παρουσίας των LNAPL, με χρήση τενσιόμετρου. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται οι χαρακτηριστικές, πρότυπες καμπύλες πίεσης τριχοειδούςκορεσμού (P-S), που αντιστοιχούν στους ρύπους και προσδιορίζονται οι αντίστοιχες καμπύλες για κάθε πείραμα που πραγματοποιήθηκε. Τέλος, τα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν, χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των παραμέτρων των εξισώσεων Van Genuchten, κλασικών εξισώσεων, που περιγράφουν την δυσδιάστατη κίνηση των LNAPL.

ABSTRACT

Accidental spills of hydrocarbons, such as Light-Non-Aqueous-Phase-Liquids (LNAPLs) consist one of the most common sources of subsurface contamination. LNAPLs are included in a major category of underground contaminants that can be a consistent and long term source of underground contamination. In order to solve LNAPL contamination problems the study of their infiltration and distribution in heterogenous porous media is essential. LNAPL are visible oils and their migration in porous media depends on many factors, among which are the gravity and capillary pressure.

The purpose of this project is to investigate the flow of two typical light nonaqueous phase liquids (LNAPL) in the vadose zone: Soltrol 220 and Diesel Fuel. More specifically their migration in two different types of sand was studied.

In order to study LNAPL movement, a certain amount of the contaminants was inserted in a cell made of glass which was filled with two layers of sand. An image analysis technique was used to determine the two-dimensional saturation and distribution of the LNAPL. More specifically images were taken under constant conditions during the insertion of the LNAPL and after the completion of the spill until no migration was observed on the plume, by the image analysis technique that used certain Matlab algorithms. Continuous, quantitative and dynamic mapping of the LNAPLs saturation was achieved. Additionally, the infiltration rates of the specific LNAPLs in the coarse and fine unsaturated sand were estimated.

The study was completed through the measurement of the capillary pressure in the unsaturated sand, due to LNAPL presence via tentiometers. This way, the P-S (Pressure-Saturation) curves were producted for every experiment.

Finally the experimental data were used for the determination of the of the Van-Genuchten P-S relations, which typically describe the two-dimensional migration of LNAPL in porous media..

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°: ΕΙΣ	ΑΓΩΓΗ	 1	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 20: ΥΠΟΓΕΙΑ ΡΟΗ	3
2.1 Υπόγεια ροή και μεταφορά μάζας στην κορεσμένη ζώνη	3
2.2 Υπόγεια ροή και μεταφορά μάζας στην ακόρεστη ζώνη	3
2.2.1 Εξίσωση του Darcy	5
2.2.2 Εξίσωση του Richard	6
2.3 Υδραυλική αγωγιμότητα	7
2.4 Ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα	8
2.5 Μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων στην ακόρεστη ζώνη	9
2.5.1 Συναγωγή	9
2.5.2 Διάχυση	9
$KΕΦΑΛΑΙΟ 3^{\circ}$: PEYΣTA-LNAPL	13
3.1 Μη υδατικής φάσης υγρά-ΝΑΡL	13
3.2 Κίνηση LNAPL στην ακόρεστη ζώνη	14
3.3 Κατανομή LNAPL στις διάφορες φάσεις	15
3.4 Μεταφορά LNAPL και παράμετροι που την επηρεάζουν	15
3.4.1 Μεταφορά LNAPL σε επίπεδο πόρου	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°: ΠΟΡΩΔΗ ΜΕΣΑ	20
4.1 Πορώδη εδάφη	20
4.1.1 Αμμώδη Εδάφη	20
4.1.2 Αργιλώδη Εδάφη	20
4.2 Μέγεθος και διαβάθμιση κόκκων εδάφους	20
4.3 Πορώδες εδάφους	22
4.4 Υπέδαφος και LNAPL	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°: ΚΑΜΠΥΛΕΣ P-S	26
5.1 Πίεση τριχοειδών	
5.2 Επιφανειακή τάση	

6.1 Φάση Ι	30
6.1.1 Κοκκομετρική ανάλυση	30
6.1.2 Υπολογισμός υδροπερατότητας	32
6.1.2.1 Πειραματική διαδικασία υπολογισμού υδροπερατότητας	35
6.1.3 Υπολογισμός πίεσης τριχοειδούς δυναμικού	37
6.2 Φάση II	37
6.2.1 Πειράματα ροής	37
6.2.2 Περιγραφή Διαδικασίας	40
6.3 Τεχνική ανάλυσης εικόνων	41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	44
7.1 Αποτελέσματα κοκκομετρικών αναλύσεων	44
7.1.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	47
7.2 Αποτελέσματα υπολογισμού διαπερατότητας	48
7.2.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	50
7.3 Υπολογισμός πορώδους	50
7.4 Βαθμονόμηση της μεθόδου ανάλυσης εικόνων	
7.5 Αποτελέσματα πειραμάτων ροής	54
7.5.1 Πείραμα 10	54
7.5.2 Πείραμα 20	61
7.5.3 Πείραμα 30	67
7.5.4 Πείραμα 40	73
7.5.5 Πείραμα 50	78
7.5.6 Πείραμα 60	85
7.6 Καμπύλες P-S – Εξίσωση Van Genuchten	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8° : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	98
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	I
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι :Αλγόριθμοι σε Matlab	ii
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: Υπολογισμός υδροπερατότητας	xiv

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4. 1.Τιμές πορώδους και ενεργού πορώδους διαφόρων εδάφών	23
Πίνακας 6. 1: Συγκεντρωτικός πίνακας συνθηκών των πειραμάτων ροής	32
Πίνακας 7. 1: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης χαλίκων	44
Πίνακας 7. 2: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης μέσης άμμου	45
Πίνακας 7. 3: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης χονδρής άμμου	46
Πίνακας 7. 4: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων κοκκομετρικής ανάλυσης	;48
Πίνακας 7. 5: Συντελεστής υδροπερατότητας πορώδων μέσων για τα δυο LNAPL	50
Πίνακας 7. 6: Ειδική επιφάνεια κόκκων	52
Πίνακας 7. 7:Αποτελέσματα υπολογισμού πορώδους	52
Πίνακας 7. 8:Δεδομένα βαθμονόμησης για την χονδρόκοκκη και την μέση άμμο	53
Πίνακας 7. 9: Αποτελέσματα επεξεργασίας εικόνων-Πείραμα 1°	60
Πίνακας 7. 10: Συνθήκες 2ου πειράματος	61
Πίνακας 7. 11: Αποτελέσματα τεχνικής ανάλυσης εικόνων-Πείραμα 2°	66
Πίνακας 7. 12 : Συνθήκες 3ου πειράματος	67
Πίνακας 7. 13: Αποτελέσματα τεχνικής ανάλυσης εικόνων-Πείραμα 3°	72
Πίνακας 7. 14: Συνθήκες 4ου πειράματος	74
Πίνακας 7. 15: Αποτελέσματα ανάλυσης εικόνων	78
Πίνακας 7. 16: Συνθήκες 5ου πειράματος	79
Πίνακας 7. 17: Αποτελέσματα επεξεργασίας εικόνων	84
Πίνακας 7. 18 : Συνθήκες 6ου πειράματος	85
Πίνακας 7. 19: Αποτελέσματα τεχνικής ανάλυσης εικόνων	90
Πίνακας 7. 20: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων πειραμάτων ροής	91
Πίνακας 7. 21 Αποτελέσματα μέτρησης τριχοειδούς δυναμικού	93
Πίνακας 7. 22: Προσδιορισμός παραμέτρων α, n Van Genuchten	94

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Τομή εδάφους	3
Εικόνα 5.1: Τυπικές καμπύλες επιβράδυνσης, οι οποίες δείχνουν την επίδραση της κατανομής του μεγέθους των εδαφικών σωματιδίων	; 28
Εικόνα 6.1: Μηχανοκίνητη συσκευή κοσκίνισης	.30
Εικόνα 6. 2: Κατάταξη εδαφών με βάση την κοκκομετρία-Πρότυπο ISO2000	34
Εικόνα 6. 3: Διατάξεις μέτρησης διαπερατότητας με την μέθοδο του σταθερού και του μεταβλητού φορτίου	
Εικόνα 6. 4: Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης	41
Εικόνα 6. 5: Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης	. 42
Εικόνα 6. 6: Πειραματική διάταξη και αλληλουχία στρωμάτων (χονδρή/μέση)	43
Εικόνα 6. 7: Πειραματική διάταξη και αλληλουχία στρωμάτων (μέση/χονδρή)	. 43
Εικόνα 7. 1: Κορεσμός (%) Diesel σε χονδρή άμμο (α) και σε μέση άμμο (β)	54
Εικόνα 7. 2:Κορεσμός (%) Soltrol220 σε χονδρή άμμο (γ) και σε μέση άμμο (δ)	54
Εικόνα 7. 3: Σειρά Φωτογραφιών-Πείραμα 10	56
Εικόνα 7. 4: Προφίλ κορεσμού του Diesel (1ο πείραμα)	59
Εικόνα 7. 5: Σειρά φωτογραφιών-Πείραμα 20	63
Εικόνα 7. 6: Προφίλ κορεσμού του Soltrol 220 (2ο πείραμα)	65
Εικόνα 7. 7: Σειρά Φωτογραφιών-Πείραμα 30	69
Εικόνα 7. 8: Προφίλ κίνησης του Soltrol 220 (3ο πείραμα)	71
Εικόνα 7. 9: Σειρά φωτογραφιών-Πείραμα 40	75
Εικόνα 7. 10: Προφίλ κορεσμού του Diesel (4ο πείραμα)	77
Εικόνα 7. 11: Σειρά φωτογραφιών-Πείραμα 5°	81
Εικόνα 7. 12: Προφίλ κορεσμού του Diesel (5ο πείραμα)	83
Εικόνα 7. 13: Σειρά Φωτογραφιών-Πείραμα 6	86
Εικόνα 7. 14: Προφίλ κορεσμού του Soltrol 220 (60 πείραμα)	90

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 7. 1: Κοκκομετρική καμπύλη χαλίκων	45
Διάγραμμα 7. 2: Κοκκομετρική καμπύλη μέσης άμμου	46
Διάγραμμα 7. 3: Κοκκομετρική καμπύλη χονδρόκοκκης άμμου	47
Διάγραμμα 7. 4: Παροχή νερού σε συνάρτηση με τον χρόνο	48
Διάγραμμα 7. 6 : Προφίλ κίνησης του Diesel (1ο πείραμα)	58
Διάγραμμα 7. 7: Προφίλ κίνησης του Soltrol 220 (20 πείραμα)	64
Διάγραμμα 7. 8: Προφίλ κίνησης του Soltrol 220 (3ο πείραμα)	70
Διάγραμμα 7. 9: Προφίλ κίνησης του Diesel (4ο πείραμα)	76
Διάγραμμα 7. 10: Προφίλ κίνησης του Diesel (5ο πείραμα)	81
Διάγραμμα 7. 11: Προφίλ κίνησης του Soltrol 220 (60 πείραμα)	87
Διάγραμμα 7. 12: Χαρακτηριστικές καμπύλες P-S	93
Διάγραμμα 7. 13:Καμπύλες P-S, (Soltrol-Μέση άμμο), προσδιοριζόμενες πειραματικά και με την εξίσωση Van Genuchten	96
Διάγραμμα 7. 14: Καμπύλες P-S, (Soltrol-Xονδρή άμμο), προσδιοριζόμενες πειραματικά και με την εξίσωση Van Genuchten	96
Διάγραμμα 7. 15: Καμπύλες P-S, (Diesel-Μέση άμμο), προσδιοριζόμενες πειραματικά και με την εξίσωση Van Genuchten	96
Διάγραμμα 7. 16: Καμπύλες P-S, (Diesel-Χονδρή άμμο), προσδιοριζόμενες πειραματικά και με την εξίσωση Van Genuchten	97

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες, η ρύπανση από οργανικά χημικά, που οφείλεται σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες, αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα για την ποιότητα, τόσο των εδαφών όσο και των υπογείων υδάτων. Οι οργανικές χημικές ουσίες εισέρχονται στο υπέδαφος από διάφορες πηγές, οι οποίες περιλαμβάνουν διαρροές επιφανειακές, αλλά και υπεδάφιες, δεξαμενές αποθήκευσης και αγωγούς καυσίμων.

Οι τυχαίες διαρροές υδρογονανθράκων, όπως των **Μη Υδατικής Φάσης Υγρών** (Light Non-Aqueous Phase Liquids -LNAPL) αποτελούν μια από τις πιο συχνές πηγές ρύπανσης του υπεδάφους. Τα LNAPL ανήκουν σε μια μεγάλη κατηγορία ρύπων του εδάφους, που είναι δυνατόν να αποτελέσουν μόνιμη και μακράς διαρκείας πηγή υπεδάφιας ρύπανσης. Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση της ρύπανσης που οφείλεται σε LNAPL, είναι αναγκαία η μελέτη της κίνησης και της κατανομής τους στο έδαφος. Τα LNAPL, τα οποία είναι ορατά, βρίσκονται σε μορφή ελαίου και η μετακίνησή τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες μεταξύ των οποίων, τη βαρύτητα, την άνωση και τις δυνάμεις τριχοειδών φαινομένων.

Η κίνηση των ρύπων στην ακόρεστη ζώνη αποτελεί ένα θέμα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος και μεγάλης σπουδαιότητας, καθώς η ρύπανση του υπεδάφους είναι ένα περιβαλλοντικό πρόβλημα που απαιτεί προσεκτική μελέτη και άμεση επίλυση. Η μελέτη της ροής των ρύπων στην ακόρεστη ζώνη είναι πολύπλοκη, καθώς πολλά φαινόμενα, που δύσκολα περιγράφονται με εξισώσεις, λαμβάνουν χώρα. Τα τριχοειδή φαινόμενα είναι αυτά που κυρίως επικρατούν στην ακόρεστη ζώνη.

Για τις ανάγκες της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε στο Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων του Πολυτεχνείου Κρήτης μια γυάλινη δεξαμενή κατάλληλων διαστάσεων. Ο σχεδιασμός της δεξαμενής έγινε με σκοπό αφενός την επίτευξη δυσδιάστατης κίνησης των LNAPL και αφετέρου την κατάλληλη λήψη φωτογραφιών για την άρτια υλοποίηση της τεχνικής ανάλυσης εικόνων. Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν έξι διαφορετικά πειράματα, που διέφεραν ως προς το είδος του LNAPL, την στρωμάτωση στην γυάλινη δεξαμενή, τον ρυθμό αλλά και τον τρόπο εισαγωγής του ρύπου στην άμμο. Οι λοιπές συνθήκες του πειράματος, όπως φωτισμός, θερμοκρασία και θέση φωτογραφικής μηχανής διατηρήθηκαν σταθερές. Σοπός της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή της καινοτόμου τεχνικής ανάλυσης εικόνων για την ποιοτική αποτύπωση του σχηματιζόμενου πλουμίου, που προκαλείται από κάποια διαρροή LNAPL σε ακόρεστα πορώδη μέσα. Ο ακριβής προσδιορισμός της κίνησης και του βαθμού κορεσμού του LNAPL στην ακόρεστη ζώνη είναι ένα ζήτημα ιδιαίτερα πολύπλοκο, που απαιτεί περεταίρω ανάλυση και μελέτη. Μέσω αυτής της εργασίας προσδιορίστηκε ο ρυθμός ροής κάθε μελετούμενου ρύπου (Diesel Fuel ή Soltrol 220) σε χονδρή και μέση άμμο, καθώς και ο βαθμός κορεσμού σε κάθε σημείο από το οποίο πέρασε ο ρύπος. Επιπλέον, μελετήθηκε εάν και κατά πόσο μπορεί να εφαρμοστεί η γνωστή εξίσωση Van Genuchten, που περιγράφει την δυσδιάστατη κίνηση LNAPL σε ακόρεστη ζώνη και προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες τιμές των σταθερών της εξίσωσης για τα δεδομένα των πειραμάτων, που διεξήχθηκαν.

Στα πρώτα κεφάλαια της παρούσας διατριβής, περιγράφεται η υπόγεια ροή στην κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη και στην συνέχεια αναλύονται οι ιδιότητες των πορώδων μέσων, η γνώση των οποίων είναι απαραίτητη για την ακριβέστερη μελέτη της κίνησης των ρευστών σε αυτά. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κοκκομετρικών αναλύσεων, καθώς και οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας και πορώδους για τις δυο βασικές κατηγορίες άμμου, που χρησιμοποιήσαμε κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Τέλος, παρουσιάζονται τα προφίλ της κίνησης και του κορεσμού που προέκυψαν για κάθε ένα πείραμα, καθώς και η εξίσωση Van Genuchten, προσαρμοσμένη στα δεδομένα των πειραμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°: ΥΠΟΓΕΙΑ ΡΟΗ

2.1 Υπόγεια ροή και μεταφορά μάζας στην κορεσμένη ζώνη

Κορεσμένη ονομάζεται η ζώνη που οι πόροι καταλαμβάνονται εξ'ολοκλήρου από νερό. Επίσης, βρίσκονται κάτω από υδροστατική πίεση. Το άνω όριο της κορεσμένης ζώνης είναι ο υδροφόρος ορίζοντας με πίεση ίση με την ατμοσφαιρική. Ο υδροφόρος ορίζοντας αποτελεί και το όριο μεταξύ κορεσμένης και ακόρεστης ζώνης. (Κουμπούρης Ε., 2005). Στην Εικόνα 2.1 φαίνεται σχηματικά τόσο η κορεσμένη όσο και η ακόρεστη ζώνη του υπεδάφους.



Εικόνα 2.1: Τομή εδάφους

Η κίνηση του νερού στην κορεσμένη ζώνη των εδαφών διέπεται από την συνάρτηση του υδραυλικού φορτίου (h) η οποία εκφράζει την μηχανική ενέργεια ανά μονάδα μάζας και ορίζεται από τον τύπο 2.11:

$$h = -\frac{1}{g}(r * g) + \frac{p}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} \quad (2.1)$$

Όπου: g η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s²), p η πίεση (m), v η ταχύτητα ροής (m/s) και γ το ειδικό βάρος νερού (Kg/m³).

2.2 Υπόγεια ροή και μεταφορά μάζας στην ακόρεστη ζώνη

Ακόρεστη ονομάζεται η ζώνη εκείνη του υπεδάφους, όπου οι πόροι καταλαμβάνονται και από αέρα και από νερό και η πίεση μέσα στους πόρους είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής. Στην ακόρεστη ζώνη η υδραυλική πίεση είναι αρνητική, λόγω των επιφανειακών τάσεων των μηνίσκων του νερού των πόρων, που

σχηματίζονται στα εδαφικά κενά με τη βοήθεια των τριχοειδών δυνάμεων. Στις τριχοειδείς δυνάμεις οφείλεται και η ζώνη πλήρους κορεσμού, που παρατηρείται πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και στην οποία αναπτύσσονται αρνητικές υδραυλικές πιέσεις. Το υπόγειο νερό, που καταλαμβάνει την ακόρεστη ζώνη, δεν κινείται, εκτός εάν τού ασκηθεί μεγαλύτερη υποπίεση από την αρνητική πίεση στην οποία βρίσκεται.

Στην ακόρεστη ζώνη διακρίνονται δύο άλλες υποζώνες: η ζώνη του εδαφικού ύδατος και η ζώνη των τριχοειδών φαινομένων. Η πρώτη φτάνει από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το τέλος του ριζικού συστήματος των φυτών. Η δεύτερη εκτείνεται από τον υδροφόρο ορίζοντα μέχρι εκεί που παρατηρούνται τα τριχοειδή φαινόμενα. (Κουμπούρης, 2005).

Οι μηχανισμοί ροής και μεταφοράς μάζας στην ακόρεστη ζώνη είναι πολύ πολύπλοκοι, λόγω των επιδράσεων των τριχοειδών φαινομένων και των μη γραμμικών χαρακτηριστικών του εδάφους. Το ολικό πορώδες ορίζεται ως το άθροισμα των δυο περιεκτικοτήτων υγρασίας:

$$n = \theta_w + \theta_\alpha$$
 (2.2)

Όπου : n:το πορώδες του εδάφους, θ_α :ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών προς τον ολικό όγκο του πορώδους μέσου, θ_w :ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του ύδατος προς τον ολικό όγκο του πορώδους μέσου.

Η ακόρεστη ζώνη αποτελείται από το μέρος του εδάφους όπου η περιεκτικότητα υγρασίας είναι μικρότερη από το πορώδες του εδάφους και η πίεση του ύδατος εντός του εδαφικού υλικού είναι αρνητική.

Κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα παρατηρείται μια παρυφή τριχοειδών φαινομένων (capillary fringe) όπου το ψ έχει μια μικρή αρνητική τιμή. Η τιμή του ψ είναι θετική στην κορεσμένη ζώνη κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα και συνήθως μετράται με ειδικά όργανα, τα τενσιόμετρα. Στην περιοχή αυτή οι πόροι είναι κεκορεσμένοι αλλά η πίεση εντός των πόρων είναι ελαφρώς μικρότερη της ατμοσφαιρικής. Αυτή η ζώνη των τριχοειδών είναι μικρή για αμμώδη εδάφη αλλά μπορεί να φτάσει ακόμα και τα 2m για λεπτόκοκκα εδάφη.

Το νερό στην ακόρεστη ζώνη απορροφάται σαν ένα λεπτό στρώμα-film πάνω στην επιφάνεια των κόκκων και κρατείται ισχυρά από αυτούς (λόγω της αρνητικής πίεσης ή πίεσης απορρόφησης). Εάν προστεθεί περισσότερο νερό στους πόρους η κίνηση του ύδατος περιορίζεται εξαιτίας των ισχυρών δυνάμεων, που εμφανίζονται, λόγω των τριχοειδών φαινομένων. Τελικά, δημιουργείται μια συνεχής υγρή φάση, η οποία εγκλωβίζει τον αέρα μέσα στους μεγάλους πόρους. Ωστόσο, πλήρης κορεσμός ύδατος στην ακόρεστη ζώνη δεν επιτυγχάνεται, λόγω του εναπομείνατος εγκλωβισμένου αέρα.

Οι δυο θεμελιώδεις εξισώσεις της υδραυλικής, η εξίσωση κίνησης και η εξίσωση συνέχειας, περιγράφονται παρακάτω.

2.2.1 Εξίσωση του Darcy

Για την ροή στην ακόρεστη ζώνη μπορεί να εφαρμοστεί ο τύπος 2.2 που συνιστά τον νόμο του Darcy:

$$q = -K(\theta)\frac{dh}{dl}$$
 (2.3)

Όπου: K(θ) είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους, ως συνάρτηση της περιεχόμενης σε αυτό υγρασίας, dh: η απώλεια φορτίου (m), dl: η μεταβολή του μήκους (m).

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο.

Υπάρχουν και περιπτώσεις, που ο νόμος αυτός δεν ισχύει, όπως για παράδειγμα σε περίπτωση μη Νευτώνειας συμπεριφοράς. Τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να παρατηρηθούν όταν:

Η υδραυλική κλίση είναι μικρή και δεν υπάρχει κίνηση του νερού

Η ταχύτητα δεν είναι γραμμική συνάρτηση της υδραυλικής κλίσης

Και στις δυο παραπάνω περιπτώσεις η υδραυλική αγωγιμότητα είναι ανεξάρτητη της υγρασίας.

Η ταχύτητα του Darcy μπορεί να εκφραστεί και με τη βοήθεια του συντελεστή διάχυσης, δεχόμενοι ότι η υδραυλική αγωγιμότητα και το τριχοειδές δυναμικό ψ, είναι μονοσήμαντες συναρτήσεις της υγρασίας θ. Στην περίπτωση αυτή προκύπτουν οι τύποι 2.3 και 2.4:

Ο συντελεστής D μπορεί να προσδιοριστεί είτε πειραματικά είτε με την προσέγγιση του Boltzman.Τέλος, μια άλλη έκφραση του νόμου του Darcy για την ροή στην ακόρεστη ζώνη αποτελεί η εξής σχέση (2.5):

$$q = -K(\psi)\nabla(\phi)(2.6)$$

Όπου: q η παροχή νερού ($L^{3}L^{-2}T^{-1}$), K(ψ) η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα για μια δεδομένη τιμή τριχοειδούς δυναμικού και $\nabla(\phi)$: η κλίση του ολικού δυναμικού του νερού (ως άθροισμα του τριχοειδούς και του βαρυτικού δυναμικού: ψ +z).

2.2.2 Εξίσωση του Richard

Η εξίσωση της συνέχειας ισχύει σε ακόρεστα εδάφη ανεξάρτητα από τον αν μπορεί να εφαρμοστεί ο νόμος του Darcy. Όμως σε περίπτωση που ο νόμος του Darcy δεν ισχύει τότε τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εξίσωση της συνέχειας δεν είναι πολύ ακριβή και αξιόπιστα.

Σύμφωνα με την εξίσωση της συνέχειας ισχύει:

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.7)$$

Συνδυάζοντας την εξίσωση της συνέχειας με το νόμο του Darcy προκύπτει η εξίσωση του Richard:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \left[\mathcal{K}(\psi) \nabla(\phi) \right]$$
 (2.8)

Η τιμή του $\nabla(z)$ είναι 0 στις διευθύνσεις x και y και 1 στη διεύθυνση z. Ακόμη, έχει ήδη αναφερθεί ότι φ=ψ+z. Επομένως, το z θεωρείται θετικό προς τα κάτω και η παραπάνω σχέση μπορεί να πάρει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \left[\mathcal{K}(\psi) \nabla(\phi) \right] - \frac{\partial \mathcal{K}(\psi)}{\partial z}$$
(2.9)

Για μονοδιάστατη ροή έχουμε:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mathcal{K}(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial \mathcal{K}(\psi)}{\partial z} (2.10)$$

Εάν το τριχοειδές δυναμικό είναι πολύ μεγαλύτερο από το βαρυτικό, ο τελευταίος όρος της παραπάνω εξίσωσης μπορεί να παραληφθεί, οπότε προκύπτει:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) (2.11)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις κάνουν την παραδοχή ύπαρξης σταθερής θερμοκρασίας και πίεσης, μη παραμορφώσιμου τμήματος εδάφους, ασυμπίεστου ύδατος καθώς και ότι η πυκνότητα του εδαφικού νερού είναι σταθερή και ανεξάρτητη της συγκέντρωσης του διαλύματος. Επίσης, οι εξισώσεις αυτές αγνοούν την παρουσία του αέρα (εκτός από την επίδραση που έχει στην τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας).

2.3 Υδραυλική αγωγιμότητα

Η ευχέρεια της κίνησης του υπόγειου νερού διαμέσου των εδαφικών πόρων εξαρτάται από την υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity) ή διαπερατότητα (permeability) του εδάφους ή γενικότερα του γεωλογικού σχηματισμού. Η υδραυλική αγωγιμότητα δεν αποτελεί ιδιότητα του κάθε συγκεκριμένου τύπου εδάφους, αλλά εξαρτάται αφενός μεν από τα χαρακτηριστικά του εδάφους (κοκκομετρική διαβάθμιση, σχετική πυκνότητα, σχήμα και χωρική κατανομή των πόρων ή των ρωγμών στη μάζα του εδάφους ή του βράχου), αφετέρου δε από τις ιδιότητες του υγρού των πόρων (πυκνότητα και ιξώδες). Ο ορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας Κ γίνεται μέσω του νόμου του Darcy, το 1856 ο Henry Darcy μελέτησε την ροή του ύδατος διαμέσου οριζόντιων στρωμάτων άμμου που συνήθως χρησιμοποιούνται σαν υδατικά φίλτρα. Το συμπέρασμα της μελέτης του ήταν ότι ο ρυθμός ροής Q/A διαμέσου πορώδους είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος ενός συντελεστή Κ που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής. Η παραπάνω διατύπωση είναι γνωστή ως νόμος του Darcy. Η γενική μορφή της μαθηματικής έκφρασης του νόμου του Darcy παρουσιάζεται με τον τύπο 2.12.

$$\frac{Q}{A} = -K\frac{\Delta h}{L}$$
 (2. 12)

όπου Q: η παροχή (m³/s), A: η επιφάνεια (m²),K: η υδραυλική αγωγιμότητα (m/s), Δ h: η απώλεια φορτίου που εκφράζεται (m), L: το μήκος της στήλης (m).

Ωστόσο, η ταχύτητα Darcy εξορισμού θεωρεί ότι η ροή λαμβάνει χώρα δια μέσου ολικής επιφάνειας χωρίς όμως να λαμβάνει υπόψη το στερεό υλικό και τους πόρους. Ουσιαστικά όμως, σε ένα πορώδες μέσο η ροή περιορίζεται μόνο εντός του χώρου των πόρων και η πραγματική ταχύτητα ορίζεται από τον τύπο 2.13 και ονομάζεται ταχύτητα διήθησης :

$$q_{p} = \frac{Q}{nA} = \frac{q}{n} = -\frac{K}{n}\frac{dh}{dl}$$
 (2.13)

Όπου : Qp: η ταχύτητα διήθησης (m/s), Q: ο ρυθμός παροχής (m³/s), A: η επιφάνεια (m²), n: το πορώδες , q: η ταχύτητα του Darcy, K: η υδραυλική αγωγιμότητα (m/s), h: η απώλεια φορτίου (m) και dL :το μήκος της στήλης (m).

Τα ακόρεστα εδάφη έχουν χαμηλότερη υδραυλική αγωγιμότητα διότι μέρος του πόρου καλύπτεται από αέρα και επομένως δεν είναι δυνατόν να συμβάλει στην μεταφορά ύδατος. Στην περίπτωση που ένα κορεσμένο έδαφος αποξηραίνεται οι μεγάλοι πόροι εκκενώνονται πρώτοι και έτσι χάνεται η ικανότητα του εδαφικού υλικού να μεταφέρει νερό.

2.4 Ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα

Η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα είναι συνάρτηση της περιεκτικότητας ύδατος θ του υλικού δηλαδή K=K(θ) και μπορεί επίσης να εκφραστεί ως συνάρτηση του πιεζομετρικού ύψους ψ δηλαδή K=K(ψ). Επίσης, η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα επηρεάζεται από την θερμοκρασία ύδατος. Μία αλλαγή θερμοκρασίας από 2 σε 25 °C μπορεί να επιφέρει δεκαπλάσια αύξηση της ακόρεστης υδραυλικής αγωγιμότητας.

Επίσης σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την υδραυλική αγωγιμότητα σε ακόρεστα εδάφη είναι: Η υδραυλική κλίση που αλλάζει συνεχώς ανάλογα με την περιεχόμενη στο έδαφος υγρασία. Το τριχοειδές δυναμικό που επηρεάζεται άμεσα από την ποσότητα νερού που περιέχεται στο έδαφος και η ύπαρξη στρωμάτων με διαφορετική κοκκομετρία και υγρασία (Γιδαράκος-Αϊβαλιώτη 2005).

Ο Van Genuchten-1980 ανέπτυξε δυο μαθηματικές εκφράσεις, βάσει των οποίων μπορεί να υπολογιστεί η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα τόσο ως συνάρτηση της περιεκτικότητας ύδατος του υλικού όσο και ως συνάρτηση του πιεζομετρικού ύψους h.

Η εξίσωση Van Genuchten (τύπος 2.14) παρουσιάζεται παρακάτω:

$$K(\theta) = K_s S_e^{\frac{1}{2}} [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m]^2 (2.14)$$

Όπου: $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ (2. 15),

Κ(θ)=ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα σε περιεκτικότητα ύδατος

K_s: κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα, m:εδαφική παράμετρος van Genuchten Οπότε προκύπτει η ακόλουθη σχέση(2.16):

$$K(h) = K_s \frac{\left\{1 - (ah)^{n-1} [1 + (ah^h)]^{-m}\right\}^2}{[1 + (ah)^n]^{\frac{m}{2}}} (2.16)$$

Όπου:h πιεζομετρικό ύψος (m), m, n, α: σταθερές εδαφικές παράμετροι van Genuchten.

2.5 Μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων στην ακόρεστη ζώνη

Υπάρχουν τρεις φυσικοί μηχανισμοί με τους οποίους οι ρύποι μεταφέρονται στην αέρια φάση μέσα στην ακόρεστη ζώνη: η συναγωγή, η διάχυση και η διασπορά.

2.5.1 Συναγωγή

Ο μηχανισμός της συναγωγής αναφέρεται στην κίνηση ενός μορίου ταυτόχρονα με την κίνηση της κύριας μάζας του ρευστού μέσα στο οποίο βρίσκεται. Κατά την μεταφορά μάζας, λόγω συναγωγής, όλα τα μόρια ενός αερίου παρασύρονται από την κίνησή του. Οι μηχανισμοί μεταφοράς λόγω συναγωγής παίζουν σημαντικό ρόλο στην κίνηση των αερίων στο έδαφος. Το γεγονός αυτό ενισχύεται στην περίπτωση, που τα αέρια είναι κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, όπου υφίστανται ατμοσφαιρικές διακυμάνσεις ή κοντά σε κτίρια που δημιουργούν βαθμίδες πίεσης εξαιτίας θερμοκρασιακών διαφορών ή διαφορών πυκνότητας.

Λόγω της ετερογένειας των γεωλογικών υλικών, η μεταφορά μάζας λόγω συναγωγής μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά μέτωπα μεταφοράς ενός ρύπου στα διάφορα γεωλογικά στρώματα.

2.5.2 Διάχυση

Μοριακή διάχυση είναι το φαινόμενο μεταφοράς μάζας που οφείλεται στην κινητική ενέργεια των μορίων. Δηλαδή, περιγράφει την μεταφορά μάζας εξαιτίας της τυχαίας θερμικής κίνησης των ατόμων και των μορίων, που είναι μία διαδικασία γνωστή και ως κίνηση Brown. Η διάχυση προκαλεί ροή μάζας που οφείλεται σε βαθμίδες συγκέντρωσης και συγκεκριμένα από σημεία υψηλής συγκέντρωσης σε σημεία χαμηλής συγκέντρωσης. Η τυχαία κατανομή των μορίων προκαλεί αυξημένη εντροπία. Η ροή μάζας εξαρτάται από την βαθμίδα συγκέντρωσης και εκφράζεται με τους νόμους του Fick. Ο πρώτος νόμος του Fick δίνεται από τον τύπο 2.17.

$$J_D = -D_s(\theta) \frac{dC}{dz}$$
 (2.17)

όπου: D_s : ο συντελεστής μοριακής διάχυσης (L^2T^{-1}) , ο οποίος είναι συνάρτηση της υγρασίας, της και άλλων παραγόντων που σχετίζονται με την διπλή ηλεκτροστατική στιβάδα, C: η συγκέντρωση (M/L^3) και z: η κάθετη απόσταση (L).

Σε περίπτωση που η συγκέντρωση αλλάζει με το χρόνο, η παραπάνω σχέση διαμορφώνεται ως εξής (τύπος 2.18):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_s \left(\theta \right) \frac{\partial C}{\partial z} \right]$$
(2. 18)

Αποτέλεσμα της διάχυσης είναι η εξάπλωση του ρύπου από το σημείο εισαγωγής του σε ένα πορώδες μέσο, ακόμη και στην περίπτωση που δεν υπάρχει ροή υπογείου ύδατος. Στην ακόρεστη ζώνη υπό φυσιολογικές συνθήκες υπάρχουν πολύ μικρές βαθμίδες πίεσης. Επομένως, η μεταφορά μάζας των αερίων συστατικών βασίζεται στη διάχυση στην αέρια φάση, που αποτελεί και τον κυρίαρχο μηχανισμό μεταφοράς των πτητικών οργανικών αέριων στην ακόρεστη ζώνη. Επειδή οι σταθερές διάχυσης στα αέρια είναι πολύ υψηλότερες από ότι στα υγρά, η ροή διάχυσης στην ακόρεστη ζώνη εξαρτάται κυρίως από τα κενά των πόρων, που εμπεριέχουν αέρα, τα οποία με τη σειρά τους εξαρτώνται από το περιεχόμενο νερό των πόρων. Η διάχυση στην αέρια φάση της ακόρεστης ζώνης διαφέρει από τη διάχυση στον ελεύθερο αέρα. Τα στερεά και υγρά εμπόδια μειώνουν την εγκάρσια τεμνόμενη επιφάνεια και αυξάνουν τη μέση διαδρομή για στοιχεία που διαχέονται στο έδαφος. Κάτω από μεταβατικές συνθήκες, η διάχυση στην αέρια φάση, στην ακόρεστη ζώνη επηρεάζεται από την κατανομή του ρύπου στο νερό των πόρων, στη διεπιφάνεια νερού – αέρα και στα στερεά. Οι ουσίες που έχουν ένα μικρό κλάσμα της μάζας τους στην αέρια φάση θα μετακινούνται πιο αργά από ό,τι τα συντηρητικά αέρια. Η δε μετακίνηση τους στο έδαφος θα εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους και τις χημικές ιδιότητες της ουσίας που διαχέεται. Για τον υπολογισμό της ροής διάχυσης των αερίων στην ακόρεστη ζώνη χρησιμοποιούνται οι φαινόμενες σταθερές διάχυσης. Οι φαινόμενες σταθερές διάχυσης υπολογίζονται με παράγοντες αναλογίας, (proportionality factor) που λαμβάνουν υπόψη την επιρροή της φυσικής

εξασθένησης και της κατανομής στις διάφορες φάσεις. Οι φαινόμενες σταθερές διάχυσης (De) σχετίζονται με τη μειωμένη εγκάρσια τεμνόμενη επιφάνεια και την αυξημένη διαδρομή και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό ροών αερίων από τον πρώτο νόμο του Fick ή για την ερμηνεία σταθερών προφίλ αέριων συγκεντρώσεων. Οι σταθερές διάχυσης (Ds) που επηρεάζονται από τη ρόφηση λαμβάνουν υπόψη την αυξημένη διαδρομή και την κατανομή στις φάσεις, όπως είναι η υδατική φάση ή η στερεή. Σε σύγκριση με τη συναγωγή, η διάχυση αποτελεί μία βραδεία διαδικασία μεταφοράς μάζας.

2.5.3 Διασπορά

Η ροή σε περίπτωση ύπαρξης ρύπου στο έδαφος μπορεί να διαχωριστεί σε δυο κατηγορίες: τη ροή του νερού, η οποία περιγράφεται πλήρως από το νόμο του Darcy και τη ροή του ρύπου, η οποία προκύπτει ως γινόμενο της παροχής του νερού και της διαλυμένης συγκέντρωσης της ρυπαντικής ουσίας στο έδαφος. Συμβολίζεται με J και αποτελεί μόνο μια προσέγγιση της ροής του ρύπου μια και η ροή του νερού δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύει πλήρως τις συνθήκες που επικρατούν μέσα στους πόρους ενός ακόρεστου εδάφους. Ακόμη, πρέπει να προστεθεί ένας επιπλέον όρος για τον υπολογισμό της ολικής ροής του ρυπαντή, ο οποίος αντιπροσωπεύει μια επιπρόσθετη κίνηση που λαμβάνει χώρα και είναι η υδροδυναμική διασπορά D_H.

Έτσι, τελικά προκύπτει η εξής εξίσωση (2.19) για τη ροή του ρυπαντή:

$$J_s = J + D_H$$
 (2.19)

Η υδροδυναμική διασπορά είναι μια μη-σταθερών συνθηκών, μη αντιστρέψιμη διεργασία κατά την οποία η μάζα μια ουσίας αναμιγνύεται σε έναν διαλύτη, π.χ. μια χημική ουσία αναμιγνύεται με το ύδωρ που υπάρχει στο έδαφος. Η υδροδυναμική διασπορά αποτελείται από δυο μέρη: τη μηχανική διασπορά και τη μοριακή διάχυση. Αυτά τα δυο φαινόμενα αν και είναι διαφορετικά συνήθως είναι αδιαχώριστα και πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Παρόλα αυτά και τα δυο εξαρτώνται από κάποιες παραμέτρους, οι οποίες είναι δυνατόν να τα επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο. Έτσι, για παράδειγμα, η μηχανική διασπορά λαμβάνει χώρα σε εδάφη όπου επικρατεί μεγάλη υγρασία και υψηλές ταχύτητες ροής, ενώ αντίθετα η μοριακή διάχυση είναι το φαινόμενο που κυριαρχεί σε συνθήκες χαμηλής υγρασίας και μικρής ταχύτητας ροής. Ακόμη, η μηχανική διασπορά παρατηρείται σε επίπεδο πόρων ενώ η μοριακή διάχυση σε επίπεδο μορίων.

Στην περίπτωση που λαμβάνει χώρα υδροδυναμική διασπορά ο ρύπος που εισέρχεται στο έδαφος και το υπάρχον σε αυτό νερό αναμιγνύονται σχεδόν πλήρως και έτσι δεν δημιουργούνται δυο ξεχωριστές φάσεις. Σε περίπτωση όμως που δεν λαμβάνει χώρα διασπορά ή διάχυση, τα δυο ή περισσότερα ρευστά που υπάρχουν στο έδαφος δεν αναμιγνύονται αλλά δημιουργούνται ξεχωριστές φάσεις με διακριτές διεπιφάνειες, κατά μήκος των οποίων αναπτύσσεται δυναμικό λόγω τριχοειδών φαινομένων.

Τα αίτια που προκαλούν την εμφάνιση του φαινομένου της υδροδυναμικής διασποράς είναι κυρίως τα εξής:

- Το εύρος του μεγέθους των πόρων του εδάφους
- Η εγκάρσια διάχυση μέσα στους πόρους, ειδικά σε περιοχές που υπάρχει ακίνητο ύδωρ
- Η μεταβαλλόμενη μοριακή χημική διάχυση

Η διασπορά οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη στερεών διαφορετικού μεγέθους μέσα στους πόρους και εξαρτάται από τη στατιστική κατανομή της ταχύτητας του ρευστού. Λαμβάνει χώρα σε δυο κατευθύνσεις, την οριζόντια, η οποία είναι η μεγαλύτερη και την κάθετη, που είναι συνήθως μικρότερη, εκτός και αν η ταχύτητα ροής και κατά συνέπεια και η οριζόντια διασπορά είναι πολύ μικρή. Η κίνηση ενός ρευστού και επομένως η ταχύτητά του εξαρτάται από το μονοπάτι του ακολουθεί, το μήκος του και το μέγεθος των πόρων.

Η ροή λόγω υδροδυναμικής - μηχανικής διασποράς μπορεί να εκφραστεί από τον τύπο 2.20 [1]:

$$J_H = -D_H \frac{dC}{dz} (2.20)$$

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°: ΡΕΥΣΤΑ-LNAPL

Ρευστά (Fluids) ονομάζονται εκείνα τα υλικά σώματα τα οποία παραμορφώνονται συνεχώς υπό την επίδραση διατμητικών τάσεων. Η διαδικασία της συνεχούς παραμόρφωσης των ρευστών ονομάζεται ροή (Flow). Η ροή αποτελεί τη θεμελιώδη ιδιότητα των ρευστών που επιτρέπει να τη διάκριση τους από τα στερεά σε σχέση πάντα με τη δυναμική (ροϊκή) συμπεριφορά τους.(Γ. Καρατζάς, 2002).

3.1 Μη υδατικής φάσης υγρά-NAPL

Τα NAPL είναι υδρογονάθρακες, που παραμένουν αδιάλυτοι στο υπέδαφος, δεν αναμιγνύονται με το νερό αλλά, αποτελούν ξεχωριστή φάση. Οι διαφορές που υπάρχουν στις φυσικές και χημικές ιδιότητες του νερού και του NAPL έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιάς φυσικής διεπιφάνειας μεταξύ των ρευστών, η οποία εμποδίζει την ανάμιξή τους.

Τα NAPL κατατάσσονται σε DNAPL, τα οποία έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη του νερού και σε LNAPL με πυκνότητα μικρότερη από αυτή του νερού. Τα LNAPL δημιουργούν συχνά προβλήματα ρύπανσης, που σχετίζονται με την έκλυση διαφόρων πετρελαιοειδών στο έδαφος, στο υπέδαφος και στα υπόγεια νερά. Τα προϊόντα αυτά είναι συνήθως σύνθετα μίγματα οργανικών ενώσεων, οι οποίες έχουν διαφορετικές διαλυτότητες στο νερό. Ορισμένα συστατικά (π.χ. αιθέρες, αλκοόλες) χαρακτηρίζονται από υψηλές διαλυτότητες, ενώ άλλα (π.χ. βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλοβενζόλιο) από χαμηλές διαλυτότητες. Σε γενικές γραμμές, τα LNAPL αντιπροσωπεύουν μία σημαντική αιτία μακροπρόθεσμης ρύπανσης των υπογείων νερών σε πολλά πεδία.

Τα NAPL κινούνται υπό την επίδραση της βαρύτητας, της άνωσης και των δυνάμεων τριχοειδών φαινομένων. Αρχικά, ταξιδεύουν εντός της ακόρεστης ζώνης με καθοδική πορεία και κατόπιν τα ελαφρά LNAPL επικάθονται και επιπλέουν επί του υδροφόρου ορίζοντα, ενώ τα βαρύτερα και πυκνότερα ταξιδεύουν εντός της κορεσμένης ζώνης με καθοδική πορεία. Τα NAPL αποτελούν ένα μεγάλο ποσοστό των χημικών ουσιών, που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανική παραγωγή και κατανάλωση και κατά την μεταφορά τους διασπώνται σε σταγονίδια, ένα μεγάλο ποσοστό των οποίων, μένει εγκλωβισμένο στους πόρους, λόγω της ανάπτυξης υψηλών τριχοειδών πιέσεων (Pantazidou and Sitar, 1991).

3.2 Κίνηση LNAPL στην ακόρεστη ζώνη

Η κίνηση των LNAPL στο υπέδαφος ρυθμίζεται από διάφορες διαδικασίες. Με την έκλυση των NAPL στην επιφάνεια του εδάφους, είτε αυτά είναι LNAPL είτε είναι DNAPL, αρχίζει η κίνηση τους προς τα κάτω υπό την επιρροή των βαρυτικών δυνάμεων. Στην περίπτωση που η ποσότητα, που εκλύεται είναι μικρή, τα NAPL θα κινηθούν μέσα στην ακόρεστη ζώνη και ένα κλάσμα τους θα συγκρατηθεί στους πόρους του εδάφους με τη μορφή γαγγλίων από τριχοειδείς δυνάμεις. Με τον τρόπο αυτό, μειώνεται συνεχώς η ποσότητα των NAPL μέχρι να σταματήσει εντελώς η κίνηση τους. Στην περίπτωση, που η ποσότητα των NAPL είναι άφθονη, η κίνηση τους θα συνεχιστεί ώσπου να συναντήσουν κάποιο φυσικό εμπόδιο (π.χ. ένα αδιαπέρατο στρώμα), ή να επηρεαστούν από τις δυνάμεις άνωσης κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα. Όταν το LNAPL φτάσει στη ζώνη τριχοειδούς ανύψωσης (capillary fringe) αρχίζει να κινείται οριζόντια, ως μία οριζόντια ανεξάρτητη φάση κατά μήκος του ανώτερου ορίου της κορεσμένης ζώνης. Παρόλο που η κύρια κατεύθυνση κίνησης του συνήθως είναι προς την κατεύθυνση της υδραυλικής βαθμίδας, είναι δυνατό τα NAPL να κινηθούν ταυτόχρονα και προς άλλες κατευθύνσεις. Άλλωστε, μία μεγάλη συνεχής μάζα LNAPL μπορεί να προκαλέσει καταβίβαση του υδροφόρου ορίζοντα και της ζώνης τριχοειδούς ανύψωσης (capillary fringe). Από τη στιγμή που θα απομακρυνθεί η πηγή ρύπανσης, τα LNAPL κινούνται οριζόντια, η υδροστατική πίεση τους μειώνεται και σταδιακά ο υδροφόρος ορίζοντας ανακάμπτει. Αλλά κατά την κατείσδυση και την επαφή με το υπόγειο νερό θα διαλυθούν τα διαλυτά συστατικά των LNAPL και θα σχηματιστεί ρύπανση, που θα βρίσκεται στην υδατική φάση. Τέλος, είναι πολύ σημαντικό να τονισθεί ότι εξαιτίας της εξάτμισης θα παρατηρηθεί επιπλέον ρύπανση είτε στο νερό, που βρίσκεται εγκλωβισμένο στους πόρους του εδάφους ή στον υδροφόρο ορίζοντα.

Τα NAPL εισέρχονται εντός του εδαφικού υλικού εξαιτίας των υδροστατικών πιέσεων που εξασκεί το ίδιο το NAPL στο πορώδες υλικό. Αρχικά, τα NAPL εμφανίζονται υπό συνεχή μορφή από την πηγή ρύπανσης και χαρακτηρίζονται ως LNAPL ελεύθερης φάσης. Με την χρονική εξασθένιση της πηγής τα NAPL είναι δυνατόν να αφήσουν την ελεύθερη φάση και να εμφανίστούν υπό μορφή φυσαλίδων σταγόνων εντός του πορώδους υλικού.

3.3 Κατανομή LNAPL στις διάφορες φάσεις

Τα LNAPL είναι δυνατό να υφίστανται σε οποιαδήποτε από τις τέσσερις φάσεις μέσα στο υπέδαφος. Δηλαδή, οι ρυπαντικές ουσίες κατανέμονται ανάμεσα στην υδατική, στην αέρια, στην οργανική και στην στερεά φάση (π.χ. υλικά του εδάφους και του υδροφορέα). Στην ακόρεστη ζώνη, οι ρυπαντικές ουσίες υφίστανται και στις τέσσερις φάσεις, ενώ στην κορεσμένη ζώνη συναντώνται στην υδατική φάση, στη στερεά και στην καθαρή συμπυκνωμένη φάση των NAPL. Τα συστατικά των NAPL μπορούν να κατανέμονται, αλλά και να μετακινούνται από τη μία φάση στην άλλη, ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της μετατροπής είναι η διάλυση των διαλυτών συστατικών στο υπόγειο νερό. Το ίδιο μόριο είναι δυνατό να προσροφάται σε μία στερεή επιφάνεια και στη συνέχεια να εκροφάται και να ελευθερώνεται στα υπόγεια ύδατα. Η τάση που παρουσιάζει μία ουσία (ρύπος) να κατανέμεται στις διάφορες φάσεις περιγράφεται από σταθερές κατανομής, όπως είναι η σταθερά του Henry για την κατανομή μεταξύ του νερού και του αέρα, η σταθερά K_n για την κατανομή μεταξύ του αέρα και του NAPL και η σταθερά K_d για την κατανομή μεταξύ της στερεάς και της υδατικής φάσης. Αυτές οι εμπειρικές σταθερές εξαρτώνται από τις ιδιότητες του εδάφους και του NAPL.

3.4 Μεταφορά LNAPL και παράμετροι που την επηρεάζουν

Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη μεταφορά του LNAPL, τόσο σε επίπεδο πόρων όσο και σε επίπεδο πεδίου, έχουν άμεση σχέση με τις ιδιότητες των υλικών του υπεδάφους. Σε επίπεδο πεδίου είναι πολύ πιο δύσκολο να προβλεφθεί η μετακίνηση του LNAPL, γεγονός που οφείλεται στην πολυπλοκότητα των παραγόντων που την επηρεάζουν, όπως είναι η ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών του υπεδάφους. Σε επίπεδο πόρου η κίνηση των LNAPL θα περιγραφεί αναλυτικά στην αμέσως επόμενη παράγραφο.

3.4.1 Μεταφορά LNAPL σε επίπεδο πόρου

Η μεταφορά NAPL στους πόρους λαμβάνει χώρα όταν υπάρχει αρκετή πίεση από πλευράς NAPL, που να δημιουργεί δυνάμεις εισχώρησης στον "λαιμό" του πόρου, έτσι ώστε να εκτοπίζεται τυχόν αέρας ή ύδωρ που καταλαμβάνει τον όγκο του πόρου. Το ποσό της πίεσης, που απαιτείται εξαρτάται από τις δυνάμεις των τριχοειδών φαινομένων, που εξασκώνται σε αμφότερες της πλευρές του λαιμού του πόρου. Ο τρόπος με τον οποίο οι τριχοειδείς δυνάμεις ενεργούν πάνω στα δύο υγρά μπορούν να εξηγηθούν μερικώς με την θεωρία της διαβρεκτικότητας.

Τα LNAPL που έχουν ειδικό βάρος μικρότερο από το νερό κινούνται προς τα βαθύτερα στρώματα του υπεδάφους μέχρι να συναντήσουν τον υδροφόρο ορίζοντα, εκεί σταματά η διήθηση τους και τα LNAPL στην συνέχεια εξαπλώνονται οριζόντια κατά μήκος του υδροφόρου ορίζοντα. Στην περίπτωση που ο υδροφόρος ορίζοντας υποχωρήσει, για παράδειγμα λόγω άντλησης, παρατηρείται περαιτέρω διήθηση η οποία σταματά όταν διακοπεί η περαιτέρω μετακίνηση του υδροφόρου ορίζοντα. Κατά την επαναφορά του υδροφόρου ορίζοντα ένα μεγάλο ποσοστό σταγονιδίων LNAPL παραμένουν εγκλωβισμένα κάτω από αυτόν, διότι οι δυνάμεις άνωσης δεν είναι ικανές να ωθήσουν τα LNAPL στην επιφάνεια. Η ποσότητα των LNAPL που παραμένει εγκλωβισμένη στο υπέδαφος πάνω ή κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα εξαρτάται από τις ιδιότητες του πορώδους μέσου, αλλά και του ρύπου. Η πρόβλεψη της συμπεριφοράς του LNAPL και του ποσοστού κατακράτησής του σε διαφορετικά είδη εδαφών προκαλεί το άμεσο ενδιαφέρον των ρυθμιστικών οργανισμών, αλλά και της βιομηχανίας σε σχέση με την αντιμετώπιση εδαφών ρυπασμένων από LNAPL.

Οι πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες ελευθερώνονται στο υπέδαφος μέσω διαρροών και χαλασμένων σωλήνων και κινούνται στο υπέδαφος αρχικά λόγω βαρύτητας διαμέσω της ακόρεστης ζώνης ή διαμέσω των μερικώς κορεσμένων διαπερατών μέσων πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Τα μη στερεοποιημένα πορώδη μέσα της ακόρεστης ζώνης αποτελούνται από στερεά υλικά και από κενά που ονομάζονται πόροι. Οι πόροι αυτοί γεμίζουν αρχικά με αέρα και μικρές ποσότητες νερού. Το κάτω μέρος της ακόρεστης ζώνης ονομάζεται capillary fringe και είναι μερικώς κορεσμένο με νερό, που ωθείται προς τα πάνω λόγω τριχοειδών πιέσεων από την υποκείμενη κορεσμένη ζώνη. Καθώς τα LNAPL κινούνται από την ακόρεστη ζώνη στην ζώνη τριχοειδών φαινομένων ο ρύπος αντικαθιστά τον αέρα στους πόρους και όχι το νερό. Όταν ο ρύπος-LNAPL φτάσει την ζώνη τριχοειδών φαινομένων αρχίζει να αντικαθιστά το νερό των πόρων. Η ποσότητα του νερού που αντικαθιστάται και ο τελικός όγκος του ρύπου στα αδρανή υλικά είναι αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος.

Η ποσοτική κατανόηση της διασποράς των πετρελαϊκών ρύπων στα πορώδη μέσα και η ανάκτησή τους άρχισε να μελετάται από το 1930 στο Princeton και σε άλλα πανεπιστήμια. Συγκεκριμένα, αναφέρθηκαν στον κρίσιμο ρόλο της επιφανειακής και τριχοειδούς τάσης στην διασπορά του ρύπου στα πορώδη υλικά. Για περισσότερα από 20 χρόνια οι ερευνητές και οι μηχανικοί προσέγγιζαν την αξιοποίηση και ανάκτηση των LNAPL με ένα εννοιολογικό μοντέλο στο οποίο LNAPL βυθισμένο σε επιφάνεια νερού όπως pancake αντικαθιστά σχεδόν όλο το νερό και τον αέρα από τους πόρους του υδροφορέα. Στο μοντέλο αυτό το συμπέρασμα είναι υψηλός κορεσμός των LNAPL από τον υδροφόρο ορίζοντα.

Αν και πολλοί αναγνωρίζουν ότι υπάρχει διαφορά μεταξύ του πάχους του ρύπου που μετράται στο εργαστήριο και του αντίστοιχου στον υδροφορέα, τα απαραίτητα εργαλεία για τον προσδιορισμό αυτής της σχέσης και της εξάρτησής της από τον τύπο του ρύπου και του υδροφορέα δεν είναι ακόμα γνωστά.

Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη μεταφορά και την κατανομή του NAPL σε επίπεδο πόρου είναι οι εξής:

- <u>Πυκνότητα</u>: Ορίζεται ως η μάζα μίας ουσίας ανά μονάδα όγκου. Ένας κοινός τρόπος έκφρασης της πυκνότητας είναι η ειδική πυκνότητα, η οποία είναι ο λόγος της μάζας ανά ορισμένο όγκο σε μία ορισμένη θερμοκρασία. Η πυκνότητα των περισσότερων ρευστών μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επιπλέον, δεν επηρεάζει μόνο την άνωση ενός ρευστού, αλλά και την κινητικότητα στο υπέδαφος.
- <u>Ιζώδες</u>. Το ιζώδες είναι ένα μέτρο της αντίστασης ενός ρευστού κατά τη ροή και εξαρτάται από τη θερμοκρασία, συγκεκριμένα μειώνεται με την αύξησή της. Επιπλέον, όσο πιο μικρό είναι το ιζώδες τόσο χαμηλότερη είναι η ενέργεια που απαιτείται για τη ροή ενός ρευστού σε ένα πορώδες μέσο.
- Διεπιφανειακή τάση. Όταν δύο ρευστά, τα οποία δεν είναι δυνατό να αναμιχθούν, βρίσκονται σε επαφή αναπτύσσεται μεταξύ τους μία διεπιφανειακή ενέργεια, που οδηγεί τελικά στη δημιουργία μιας φυσικής διεπιφάνειας. Η διεπιφανειακή τάση είναι η επιφανειακή ενέργεια πάνω στη διεπιφάνεια, που προκύπτει ως αποτέλεσμα των διαφορετικών δυνάμεων μοριακής έλξης μέσα στα ρευστά και στη διεπιφάνεια. Εκφράζεται σε μονάδες ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας και είναι τόσο μεγαλύτερη όσο πιο σταθερή είναι η διεπιφάνεια μεταξύ των υγρών. Επίσης, εξαρτάται από τη θερμοκρασία.

- Διαβρεξιμότητα. Ορίζεται ως η γενική τάση ενός ρευστού να εξαπλώνεται και να επικαλύπτει σε μία στερεή επιφάνεια (προτίμηση) κατά την παρουσία ενός δεύτερου υγρού με το οποίο όμως δεν είναι αναμίξιμο. Σε ένα πολυφασικό σύστημα, το διαβρέχον ρευστό θα καλύψει τις στερεές επιφάνειες καταλαμβάνοντας τους μικρότερους πόρους, ενώ το μη διαβρέχον ρευστό θα περιοριστεί στους μεγαλύτερους πόρους. Στην ακόρεστη ζώνη, όπου συνυπάρχουν αέρας, νερό και NAPL, τα υγρά και κυρίως το νερό θα καταλάβει τις στερεές επιφάνειες. Παρόλα αυτά κάτω από συνθήκες, στις οποίες υπάργουν μόνο αέρας και ΝΑΡL, το ΝΑΡL είναι εκείνο που θα επικαλύψει τις ορυκτές επιφάνειες, αντικαθιστώντας τον αέρα. Στην κορεσμένη ζώνη, όπου συνυπάρχουν μόνο το νερό και το NAPL, το νερό θα αποτελεί το διαβρέχον υγρό, εκτοπίζοντας το LNAPL από τους πόρους. Εξαρτάται από παράγοντες όπως είναι η σύνθεση του NAPL και της υδατικής φάσης, η παρουσία οργανικής ύλης, η ορυκτολογία και το ιστορικό κορεσμού του πορώδους μέσου.
- Τριχοειδής πίεση. Η τριχοειδής πίεση είναι η διαφορά πίεσης κατά μήκος της διεπιφάνειας μεταξύ του διαβρέχοντος και του μη διαβρέχοντος υγρού και συχνά εκφράζεται με το ύψος της αντίστοιχης στήλης νερού. Καθορίζει το μέγεθος των πόρων στους οποίους είναι δυνατό να υφίσταται μία διεπιφάνεια. Είναι ένα μέτρο της σχετικής έλξης των μορίων ενός υγρού (συνοχή) μεταξύ τους καθώς και με μία στερεή επιφάνεια. Η τριχοειδής πίεση εκφράζει την τάση ενός πορώδους μέσου να έλκει το διαβρέχον υγρό και να απωθεί το μη διαβρέχον υγρό. Επιπλέον, η τριχοειδής πίεση των μεγαλύτερων πόρων πρέπει να ξεπεραστεί, ώστε να μπορεί το μη διαβρέχον υγρό να εισέλθει στους πόρους αυτούς. Η τριχοειδής πίεση αυξάνει καθώς οι πόροι μικραίνουν, καθώς η υγρασία μειώνεται και όταν η διεπιφανειακή τάση αυξάνεται. Γενικά, μπορεί να πει κανείς ότι οι τριχοειδείς συνθήκες καθορίζουν σε σημαντικό ποσοστό τη διαμόρφωση και το μέγεθος του υπολειμματικού NAPL που βρίσκεται παγιδευμένο στους πόρους του εδάφους.Πολλές παρατηρήσεις στο πεδίο οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η κίνηση του LNAPL γίνεται κυρίως μέσα από τους μεγαλύτερους πόρους ενός πορώδους μέσου και όχι διαμέσου των μικρότερων πόρων.

- Κορεσμός και υπολειματικός κορεσμός.Ο κορεσμός είναι το σχετικό κλάσμα του συνολικού χώρου των πόρων, που περιέχουν ένα υγρό (π.χ. NAPL) προς τον αντίστοιχο όγκο των κενών του πορώδους μέσου. Η κινητικότητα του LNAPL σχετίζεται άμεσα με τον κορεσμό στο πορώδες μέσο. Το σημείο εκείνο, στο οποίο ένα συνεχές LNAPL γίνεται ασυνεχές και ακινητοποιείται από τις τριχοειδείς δυνάμεις ονομάζεται υπολειμματικός κορεσμός. Ο υπολειμματικός κορεσμός αντιπροσωπεύει μία πιθανή πηγή συνεχούς ρύπανσης για το υπέδαφος και τα υπόγεια ύδατα, η οποία συγκρατείται με ισχυρές δυνάμεις στους πόρους του εδάφους και δεν είναι δυνατό να αφαιρεθεί με τις σύγχρονες μεθόδους αποκατάστασης του εδάφους. Το μέγεθος του υπολειμματικού κορεσμού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι τα διαφορετικά μεγέθη των πόρων, οι ιδιότητες της διαβρεξιμότητας των ρευστών και των στερεών του εδάφους, οι υδραυλικές βαθμίδες, η διεπιφανειακή τάση, οι λόγοι των ιξώδων και των πυκνοτήτων των ρευστών, η βαρύτητα, οι δυνάμεις άνωσης, τα ποσοστά ροής.
- Σχετική διαπερατότητα. Η σχετική διαπερατότητα είναι ο λόγος της φαινόμενης διαπερατότητας ενός μέσου σε ένα ρευστό για ένα συγκεκριμένο επίπεδο κορεσμού προς τη διαπερατότητα του μέσου στο ρευστό για 100% κορεσμό. Οι τιμές της σχετικής διαπερατότητας κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1. Θεωρώντας ένα υποθετικό σύστημα νερό- LNAPL, παρατηρείται ότι τα δύο υγρά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους έτσι ώστε να μειωθεί η κινητικότητα και των δύο. Επιπλέον, παρατηρείται ότι υπάρχει ένα ελάχιστο επίπεδο κορεσμού, το οποίο πρέπει να επιτευχθεί ώστε η διαπερατότητα σε ένα υγρό να μην είναι μηδενική. Το όριο αυτό στην τιμή του κορεσμού ονομάζεται υπολειμματικός κορεσμός.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°: ΠΟΡΩΔΗ ΜΕΣΑ

4.1 Πορώδη εδάφη

4.1.1 Αμμώδη Εδάφη

Τα αμμώδη εδάφη συντίθενται από μακροσκοπικά στερεά σωματίδια στρογγυλευμένα ή γωνιώδη. Στραγγίζουν εύκολα, δεν διογκώνονται ή συρρικνώνονται κάτω από την επίδραση της υγρασίας και παρουσιάζουν μικρό τριχοειδές δυναμικό. Επίσης, δεν παρουσιάζουν πλαστικότητα, δηλαδή κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες υγρασίας δεν μεταβάλουν τον σχηματισμό.

4.1.2 Αργιλώδη Εδάφη

Τα αργιλώδη εδάφη συντίθενται από μικροσκοπικά στερεά σωματίδια με πλακοειδές σχήμα. Η επιφάνεια των στερεών σωματιδίων είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν των αμμωδών εδαφών, γεγονός που εξηγεί την επίδραση σημαντικών μοριακών δυνάμεων μεταξύ των αργιλικών στερεών και του νερού. Είναι πρακτικώς αδιαπέρατα, διογκώνονται και συρρικνώνονται σημαντικά κάτω από μεταβολές υγρασίας και κατέχουν μεγάλο τριχοειδές δυναμικό.

4.2 Μέγεθος και διαβάθμιση κόκκων εδάφους

Η καταλληλότητα ενός εδάφους ως υλικού θεμελίωσης ή ως δομικού υλικού εξαρτάται από την κοκκομετρική ανάλυση, δηλαδή από τον προσδιορισμό της ποσοστιαίας συμμετοχής των διαμέτρων των κόκκων, στο συνολικό όγκο του θεωρούμενου εδάφους. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται από την κοκκομετρική ανάλυση διευκολύνουν την προβλέψη της συμπεριφοράς των εδαφών, όσον αφορά στην αντοχή και στην παραμόρφωση, της δυνατότητας της κίνησης του υπόγειου νερού (διήθηση) μέσα από τα κενά μεταξύ των κόκκων και της εκτίμησης της επιρροής του παγετού στο έδαφος.

Επίδραση μεγέθους κόκκου στην κίνηση των LNAPL

Η κοκκομετρική διαβάθμιση των εδαφών, η γνώση της οποίας είναι σημαντική ιδιαίτερα για τα χονδρόκοκκα εδάφη, παρουσιάζεται συνήθως παραστατικά με την σχεδίαση κατάλληλης καμπύλης σε διάγραμμα αντιπροσωπευτικής διάστασης των κόκκων του διερχόμενου ή συγκρατούμενου ποσοστού. Επειδή, οι διαστάσεις των κόκκων ποικίλουν μεταξύ μεγάλων ορίων η κλίμακα του αντίστοιχου άξονα είναι λογαριθμική.

Ανάλυση με κόσκινα

Για την κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα εφαρμόζεται ο παρακάτω τύπος 4.1:

$$S_i \% = \frac{B_{o\lambda} - \Sigma B_i}{B_{o\lambda}} * 100$$
 (4.1)

όπου: ΣΒ
i $S_i\% = \frac{B_{o\lambda} - \Sigma B_i}{B_{o\lambda}} *100$ είναι το συνολικό βάρος του δείγματος το οποίο

συγκρατείται στα κόσκινα με διάσταση οπής μεγαλύτερης ή ίσης της di

Αξίζει να σημειωθεί, ότι από πλευράς ευχέρειας στη διήθηση του υπόγειου νερού (δηλαδή ευχέρειας στην κίνηση του νερού εντός του εδάφους) οι γεωλογικοί σχηματισμοί (χαλαρά εδαφικά υλικά και βραχώδεις σχηματισμοί), όταν βρίσκονται κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Τους υδροφορείς (aquifers), οι οποίοι επιτρέπουν την ευχερή διήθηση του υπόγειου νερού διαμέσου της μάζας των, δηλαδή τις ουσίες που έχουν υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα. Είναι προφανές ότι η έννοια της "υψηλής" υδραυλικής αγωγιμότητας είναι σχετική και εξαρτάται από τη δυνατότητα εκμετάλλευσης του υδροφορέα. Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί ότι υδροφορείς είναι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που επιτρέπουν την εκμετάλλευση του υπόγειου νερού που διακινείται διαμέσου της μάζας τους.

<u>Υδροφορέας</u> είναι ένας υπεδάφιος σχηματισμός που περιέχει σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με ύδωρ και τα οποία προμηθεύουν φρέατα και πηγές με υδατικές ποσότητες. Οι υδροφορείς διακρίνονται σε δυο κατηγορίες τους ελεύθερους και τους κορεσμένους.

 Ελεύθερος ονομάζεται ο υδροφορέας όταν η ανώτερη επιφάνεια του είναι ο υδροφόρος ορίζοντας. Περιορισμένος είναι ο υδροφορέας που περιέχει ύδωρ υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και περιορίζεται στην άνω και κάτω επιφάνεια από αδιαπέρατα στρώματα.

2. Τους σχηματισμούς περιορισμένης υδροφορίας (aquitards), οι οποίοι επιτρέπουν την περιορισμένη κίνηση του υπόγειου νερού διαμέσου της μάζας τους, και συνεπώς δεν προσφέρονται πάντοτε για την εκμετάλλευση του υπόγειου νερού που περιέχεται στη μάζα τους. Είναι προφανές ότι η διαφορά των σχηματισμών περιορισμένης υδροφορίας με τους υδροφορείς είναι καθαρά θέμα κλίμακας. Έτσι, π.χ. ένας σχηματισμός που μπορεί να χαρακτηρίζεται ως υδροφορέας για τις ανάγκες ύδρευσης μιας μικρής κοινότητας, μπορεί να χαρακτηρίζεται ως σχηματισμός περιορισμένης υδροφορίας για τη μεγάλης πόλης και να χαρακτηρίζεται ως σχηματισμός περιορισμένης υδροφορίας για τη μεγάλη πόλη.

3. Τους στεγανούς σχηματισμούς (aquifuges ή aquicludes), οι οποίοι πρακτικώς δεν επιτρέπουν την κίνηση του υπόγειου νερού διαμέσου της μάζας των και συνεπώς δεν προσφέρονται για την εκμετάλλευση του υπόγειου νερού.

4.3 Πορώδες εδάφους

Μια από τις πιο σημαντικές υδραυλικές παραμέτρους των πορώδων μέσων είναι το πορώδες.

<u>Πορώδες</u>: ορίζεται ο όγκος των κενών διακένων προς τον συνολικό όγκο του πορώδους μέσου. Το πορώδες που οφείλεται στα διάκενα μεταξύ των εδαφικών κόκκων ονομάζεται πρωτογενές πορώδες ενώ αυτό που οφείλεται στις ρωγμές των πετρωμάτων ή στην χημική διάβρωση που αυτά έχουν υποστεί ονομάζεται δευτερογενές πορώδες. Ωστόσο από την άποψη της υπόγειας ροής το πορώδες δεν είναι απολύτως ενδεικτικό μέγεθος. Πιο ενδεικτικό είναι το ενεργό πορώδες που ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των διακένων τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας διαδρομές ροής προς τον συνολικό όγκο του μέσου. Ωστόσο, με τον

ορισμό αυτό δεν περιλαμβάνεται ο όγκος των απομονωμένων ή τυφλών διακένων. Η διαφορά μεταξύ ενεργού πορώδους και συνολικού πορώδους είναι ότι εδαφικά κενά που είναι απομονωμένα και συνεπώς δεν αποτελούν δίοδο κίνησης του ρευστού δεν συνεισφέρουν στο ενεργό πορώδες το οποίο είναι πάντα μικρότερο ή ίσο του συνολικού πορώδους. Γενικότερα, το ενεργό πορώδες των χονδρόκοκκων εδαφών είναι πρακτικά ίσο με το συνολικό πορώδες. Αντίθετα, το ενεργό πορώδες των πολύ λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών μπορεί να είναι μόνο το 10-20% του συνολικού πορώδους. Οι τιμές ολικού και ενεργού πορώδους για διάφορα εδάφη δίνονται στον πίνακα 4.1.

Παράμετροι που επηρεάζουν το πορώδες

- Σχήμα κενών
- Μέγεθος και διαβάθμιση κόκκων εδάφους
- Διάταξη κόκκων εδάφους
- Υλικό πλήρωσης των κενών
- Γεωλογική ιστορία του εδάφους

Εδάφη	Ολικό πορώδες	Ενεργό Πορώδες
	%	%
Ανυδρίτης	0,5-5	0,05-0,5
Κιμωλία	5-20	0,05-0,5
Ασβεστόλιθος	5-15	0,1-5
Ψαμμίτης	5-15	0,5-10
Σχιστόλιθος	1-10	0,5-5
Γρανίτης	0,1	0,0005
Ρωγματωμένα Κρυσταλλικά	-	0,00005-0,01
πετρώματα		

Πίνακας 4. 1.Τιμές πορώδους και ενεργού πορώδους για διάφορα εδάφη (Σ.Τσότσος, 1991)

4.4 Υπέδαφος και LNAPL

Γενικά, τα LNAPL στο υπέδαφος υφίστανται διάφορες βιοτικές και αβιοτικές διεργασίες (διαλυτοποίηση και εξάτμιση), οι οποίες μπορούν να διαφοροποιήσουν την αρχική σύστασή τους. Οι διεργασίες αυτές μπορούν να τροποποιήσουν τις ιδιότητες του LNAPL και να αυξήσουν για παράδειγμα το ιξώδες, οπότε να επηρεαστεί και η κινητικότητά του. Η τύχη των διάφορων χημικών ουσιών που απαρτίζουν τα LNAPL και κατανέμονται ανάμεσα σε τέσσερις φάσεις αέρας, νερό, στερεά και οργανικά καθορίζεται από την εξάτμιση, τη διαλυτοποίηση, την ρόφηση, και την αποδόμηση.

Πιο αναλυτικά: η εξάτμιση των οργανικών ουσιών πραγματοποιείται με δύο τρόπους: α)εξάτμιση από το νερό

β)εξάτμιση από το LNAPL

Η σταθερά του Henry περιγράφει την κατανομή μίας οργανικής ουσίας μεταξύ των αέριων και των υδατικών φάσεων. Για σχετικά αραιά διαλύματα, ισχύει ότι η τάση των μορίων να διαφεύγουν από τη διαλυτή φάση και να μεταβαίνουν στην αέρια είναι ανάλογη προς τη συγκέντρωσή τους στο νερό. Η σχέση αυτή υποθέτει ότι υπάρχει ισορροπία μεταξύ του νερού και του αέρα και είναι χρήσιμη για τον υπολογισμό του δυναμικού για μεταφορά των χημικών ουσιών από το νερό στον αέρα και από τους ατμούς υδρογονανθράκων στο νερό. Για πιο πυκνά διαλύματα ή για την καθαρή οργανική φάση η εξάτμιση περιγράφεται καλύτερα από τον νόμο του Raoult, σύμφωνα με τον οποίο η πίεση των ατμών πάνω από ένα διάλυμα είναι ίση με το διαλυτό μοριακό κλάσμα επί την πίεση των ατμών του ρευστού στην καθαρή φάση. Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι τόσο ο νόμος του Henry όσο και ο νόμος του Raoult λαμβάνουν ως προϋπόθεση το γεγονός ότι το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία.

<u>Διαλυτοποίηση</u>

Το NAPL που βρίσκεται σε φυσική επαφή με το υπόγειο νερό θα διαλυθεί και θα εισέλθει στην υδατική φάση. Η διαλυτότητα ενός οργανικού συστατικού είναι η συγκέντρωση ισορροπίας του συστατικού σε ορισμένη θερμοκρασία και πίεση , η οποία αντικατοπτρίζει τη μέγιστη συγκέντρωση του συστατικού στο νερό. Όμως, είναι φυσικό ότι οι διαλυτότητες των συστατικών του NAPL είναι διαφορετικές και για το σκοπό αυτό οι συγκεντρώσεις ισορροπίας στη διαλυτή φάση υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τη διαλυτότητα του καθαρού υγρού και το μοριακό του κλάσμα στο NAPL (νόμος του Raoult). Αρκετές από τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη διαλυτότητα είναι η θερμοκρασία, η πίεση, η συνδιαλυτοποίηση με άλλα συστατικά, ο διαλυμένος οργανικός άνθρακας, τα διαλυμένα ανόργανα συστατικά, το pH. Όμως ειδικότερα για το μίγμα NAPL (το οποίο αποτελείται από διάφορα συστατικά και επομένως είναι μία πιο περίπλοκη περίπτωση) οι υψηλοί ρυθμοί διαλυτοποίησης μπορούν να συνδυαστούν με υψηλές ταχύτητες του υπογείου νερού, υψηλά επίπεδα κορεσμού, μεγάλη περιοχή φυσικής επαφής του με το νερό και σημαντικό κλάσμα διαλυτών ουσιών.

<u>Ρόφηση</u>

Η ρόφηση ορίζεται ως η αλληλεπίδραση μιας ρυπαντικής ουσίας με το έδαφος. Στα υλικά του εδάφους ή του υδροφορέα που είναι ρυπασμένα με NAPL ορισμένες ουσίες από το μίγμα που συνιστά το NAPL θα κατανεμηθούν στη στερεή φάση των υλικών. Ο κυριότερος δρόμος που οδηγεί στη διαδικασία αυτή είναι μέσω της υδατικής φάσης. Με άλλα λόγια αν εκλυθεί NAPL στο υπέδαφος, αυτό αρχικά θα διαλυθεί στην υδατική φάση και στη συνέχεια θα κατανεμηθεί στη στερεή φάση των συστατικών του εδάφους. Είναι ποικίλες οι παράμετροι που επηρεάζουν τη ρόφηση σε πεδία που έχουν ρυπανθεί με επικίνδυνα απόβλητα και ορισμένες από αυτές είναι η διαλυτότητα, η πολικότητα, η ιοντική φόρτιση, το pH, το οξειδοαναγωγικό δυναμικό, η σταθερά κατανομής οκτανόλης-νερού.

Γενικά, η στερεή φάση (προσροφημένο) NAPL είναι συνήθως ένα μικρό κλάσμα της συνολικής μάζας του ρύπου στο έδαφος ή στον υδροφορέα, όπου υπάρχει NAPL συνεχούς φάσης ή υπολειμματικό. Το σημαντικότερο κομμάτι της μάζας βρίσκεται στην οργανική φάση. Η εκρόφηση του ρύπου είναι κάποιες φορές η κυρίως υπεύθυνη για την ύπαρξη ουράς στην κατανομή της συγκέντρωσης ρύπων, που παρατηρείται σε συστήματα αποκατάστασης του εδάφους μέσω άντλησης.

<u>Βιοαποδόμηση</u>

Πολλά από τα συστατικά του NAPL υφίστανται βιολογική αποδόμηση κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Βιοαποδόμηση όμως της καθαρής φάσης του NAPL δεν έχει παρατηρηθεί ποτέ, εφόσον οι μικροοργανισμοί δεν δύνανται να επιβιώσουν μέσα σε αυτή.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°: ΚΑΜΠΥΛΕΣ Ρ-S

Η σχέση ανάμεσα στο υδραυλικό ύψος ή το τριχοειδές δυναμικό και το περιεχόμενο του εδάφους σε νερό για ένα συγκεκριμένο έδαφος είναι γνωστή ως χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού (soil-water characteristic curve) ή καμπύλη επιβράδυνσης (retardation curve).

Για την κατασκευή μιας καμπύλης επιβράδυνσης χρησιμοποιούνται εργαστηριακές μετρήσεις του τριχοειδούς δυναμικού, συναρτήσει του περιεχόμενου νερού. Στην περιοχή του υγρού εδάφους (-1 έως -300cm πίεση) χρησιμοποιείται ένας δίσκος έντασης (tension plate). Ένα δείγμα κορεσμένου εδάφους γνωστής περιεκτικότητας σε νερό τοποθετείται σε έναν πορώδη δίσκο σε μία χράνη Buchner. Ο πορώδης δίσκος αρχίζει να συγκρατεί νερό και να γίνεται κορεσμένος ενώ παράλληλα συνδέεται με μια υδατική στήλη, η οποία καταλήγει σε ένα βαθμολογημένο γυάλινο δοχείο. Η θέση του βαθμολογημένου γυάλινου δοχείου μπορεί να αλλάξει για να μειωθεί το δυναμικό πίεσης. Καθώς το δυναμικό ύψος γίνεται όλο και πιο αρνητικό, το νερό αποστραγγίζεται από το δείγμα εδάφους και η ποσότητα που απομακρύνεται μετράται στο βαθμολογημένο δοχείο, μόλις επικρατήσει ισορροπία. Πρέπει να δοθεί προσοχή στο να αποφευχθεί τυχόν εξάτμιση του νερού από το δείγμα εδάφους και το γυάλινο δοχείο. Μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται για διάφορες αρνητικές τιμές του δυναμικού πίεσης, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της καμπύλης ξήρανσης. Όταν επιτευχθεί το πρακτικό όριο του δίσκου έντασης (-300cm), το βαθμονομημένο γυάλινο δοχείο ανυψώνεται σε έναν αριθμό βημάτων, προκειμένου να κατασκευαστεί η καμπύλη ύγρανσης. Αυτή αποτελεί μια αναλυτική καμπύλη ύγρανσης, καθώς το έδαφος δεν αποστραγγίζεται πλήρως σε δυναμικό πίεσης -300cm νερού.

Στην περιοχή ξηρού εδάφους (-300 έως -15.000cm νερού), χρησιμοποιείται ένας δίσκος πίεσης (pressure plate). Το δείγμα εδάφους τοποθετείται σε έναν

κορεσμένο πορώδη δίσκο, ο οποίος βρίσκεται μέσα σε έναν θάλαμο πίεσης. Η πίεση κάτω από τον πορώδη δίσκο διατηρείται σε επίπεδα ατμοσφαιρικής πίεσης, ενώ η πίεση πάνω από τον πορώδη δίσκο μπορεί να οριστεί μεταξύ 0,3 και 15atm (300 έως 15.000cm). Η πίεση κατά μήκος του εδαφικού δείγματος και του πορώδους δίσκου προκαλεί τη ροή του νερού από το εδαφικό δείγμα προς ένα κατώτερο δοχείο.

Στο πεδίο, το τριχοειδές δυναμικό μετράται με τη βοήθεια μετρητών επιφανειακής τάσης. Η συσκευή αυτή αποτελείται από ένα πορώδες κεραμικό κάλυμμα που έχει συνδεθεί με έναν σωλήνα, ο οποίος βρίσκεται θαμμένος στο έδαφος. Αυτός ο σωλήνας γεμίζει με νερό και συνδέεται με μια συσκευή, όπως για παράδειγμα μανόμετρο, μετρητή κενού ή μετατροπέα πίεσης, η οποία μπορεί να μετρήσει την πίεση. Το τριχοειδές δυναμικό του εδάφους προσπαθεί να τραβήξει το νερό από το κορεσμένο πορώδες κάλυμμα και μετριέται η τάση.

Σε ατμοσφαιρική πίεση το έδαφος είναι κορεσμένο και το περιεχόμενο νερού είναι ίσο με το πορώδες θ_s . Το έδαφος παραμένει κορεσμένο καθώς το τριχοειδές δυναμικό σταδιακά μειώνεται. Από κάποιο σημείο και μετά το τριχοειδές δυναμικό θα γίνει αρκετά αρνητικό ώστε το νερό να αρχίσει να αποστραγγίζεται από το έδαφος. Αυτή η τιμή του τριχοειδούς δυναμικού συμβολίζεται με h_b. Η περιεχόμενη υγρασία θα συνεχίσει να μειώνεται καθώς η τιμή του τριχοειδούς δυναμικού συμβολίζεται με h_b.

Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού δείχνει επίσης την κατανομή του μεγέθους των πόρων του εδάφους. Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζονται οι ιδανικές χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού για δυο εδάφη, το ένα από τα οποία αποτελείται από ομοιόμορφου μεγέθους εδαφικά σωματίδια. Στο έδαφος αυτό το εύρος τιμών του τριχοειδούς δυναμικού, ανάλογα με το οποίο μεταβάλλεται η υγρασία του εδάφους, είναι μικρότερο από ότι στο δεύτερο έδαφος. Επίσης, το εύρος τιμών του μεγέθους των σωματιδίων είναι μικρότερο και κατ' επέκταση και το εύρος τιμών του μεγέθους των πόρων είναι μικρότερο. Το σημείο h_b είναι υψηλότερο, λόγω του ότι έχει μεγάλου μεγέθους πόρους, ενώ παράλληλα η απομάκρυνση του νερού από το έδαφος αυτό είναι πολύ γρήγορη.





5.1 Πίεση τριχοειδών

Αν θεωρήσουμε τους εδαφικούς πόρους σαν μικρούς σωληνίσκους με ακτίνα r τότε το νερό εντός αυτών σχηματίζει μια καμπυλότητα μεταξύ της επιφάνειας επαφής νερού αέρα. Η διαφορά πίεσης μεταξύ των επιφανειών νερού-αέρα καλείται πίεση τροχοειδών.

Η πίεση τριχοειδών υπολογίζεται από τον τύπο 5.1

$$P = \frac{2\sigma\cos\gamma}{r} (5.1)$$

Όπου: Ρ η πίεση (N/m²), σ η επιφανειακή τάση (N/m²), r: η ακτίνα του σωληνίσκου (mm) και γ: η επιφανειακή γωνία μεταξύ των δυο ρευστών.

Η υδραυλική αγωγιμότητα Κ σχετίζει την ταχύτητα και την υδραυλική κλίση στην εξίσωση του νόμου του Darcy. Η περιεκτικότητα υγρασίας θ ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του ύδατος προς τον ολικό όγκο μιας μονάδας του πορώδους υλικού..Στην ακόρεστη ροή τόσο η περιεκτικότητα υγρασίας όσο και η υδραυλική διαπερατότητα εξαρτώνται από το τριχοειδές ύψος απορρόφησης ψ.

5.2 Επιφανειακή τάση

Στην διεπιφάνεια ανάμεσα σε δύο μη-αναμίξιμα ρευστά δημιουργείται πάντα μια μεμβράνη (Film) που οφείλεται αποκλειστικά στις ελκτικές δυνάμεις συνοχής και συνάφειας ανάμεσα στα μόρια των ρευστών εκατέρωθεν της διεπιφάνειας. Τα μόρια

του ρευστού στην διεπιφάνεια βρίσκονται υπό τάση που τείνει να τα απομακρύνει προς το εσωτερικό του ρευστού. Συνεπώς, ως επιφανειακή τάση ορίζεται η δύναμη που απαιτείται για να φέρει τα μόρια στην επιφάνεια σχηματίζοντας τη μεμβράνη. Έχουν προσδιοριστεί αρκετές απλές εμπειρικές σχέσεις ανάμεσα στο περιεχόμενο σε νερό ενός εδάφους και το τριχοειδές δυναμικό, δυο από τις οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

A)Εξισώσεις Van Genuchten :

Για σύστημα δυο φάσεων αέρα-νερό η εξίσωση γίνεται ως εξής:

$$S_{w} = [1 + (a \frac{P_{caw}}{\rho_{w}g})^{n}]^{-m}$$
 (5.2)
$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

όπου α και η παράμετροι του πορώδους μέσου.

Για σύστημα τριών φάσεων αέρα-ρύπος νερό

$$S_{w} = [1 + (a\beta_{ow}\frac{P_{cow}}{\rho_{w}g})^{n}]^{-m} \text{ kon } S_{t} = [1 + (a\beta_{ao}\frac{P_{cao}}{\rho_{w}g})^{n}]^{-m} \text{ (5. 3)}$$

Όπου:

$$\beta_{ow} = \frac{\gamma_{aw}}{\gamma_{ow}}, \beta_{ao} = \frac{\gamma_{aw}}{\gamma_{ao}}, \beta_{aw} = 1$$

 $\gamma_{\imath j}$ η επιφανειακή τάση μεταξύ των διαφόρων φάσεων

B) Εξίσωση Brookes and Corey (1966) $\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi}{h_b}\right)^{-\lambda}$ (5.4)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6[°]: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

6.1 Φάση Ι

6.1.1 Κοκκομετρική ανάλυση

Κατά την πρώτη φάση των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε κοκκομετρική ανάλυση των αδρανών υλικών, που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ροής. Η κοκκομετρική ανάλυση είναι μία από τις πλέον βασικές μεθόδους κατάταξης των εδαφών και χρησιμοποιείται διεθνώς. Η καταλληλότητα ενός εδάφους ως υλικού θεμελίωσης ή ως δομικού υλικού εξαρτάται από την κοκκομετρική του σύσταση, δηλαδή από την συμμετοχή των διαμέτρων των κόκκων, ως ποσοστών, στο συνολικό όγκο του θεωρούμενου εδάφους. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται από την κοκκομετρική ανάλυση επιτρέπουν την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των εδαφών, όσον αφορά στην αντοχή και στην παραμόρφωση, στη δυνατότητα κίνησης του υπόγειου νερού (διήθηση) μέσα από τα κενά μεταξύ των κόκκων και στην εκτίμηση της επιρροής του παγετού στο έδαφος. Στην Εικόνα 6.1 παρουσιάζεται συσκευή κοσκίνησης, που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των συγκεκριμένων αναλύσεων.



Εικόνα 6.1:Μηχανοκίνητη συσκευή κοσκίνισης

Οι προδιαγραφές που ακολουθήθηκαν κατά την διεξαγωγή των κοκκομετρικών αναλύσεων είναι οι εξής:

1. «Προδιαγραφές Εργαστηριακών Δοκιμών Εδαφομηχανικής» (Ε 105-86), Φ.Ε.Κ. B955/31-12-86.

2. Αμερικανική Προδιαγραφή ASTM D422-1980

Εργαστηριακός εξοπλισμός

- 1. Ζυγός ευαισθησίας 0,1 gr
- 2. Κλίβανος θέρμανσης
- Κόσκινα, σειρά κοσκίνων διαμέτρου 2, 1.18, 0.425, 0.212, 0.063 mm σύμφωνα τις πρότυπες διαγραφές κατά ISO 11277:1998.
- Συσκευή κονιοποιήσεως –μηχανική συσκευή με γουδί και ηλεκτροκίνητο τριβέα.

Η επιλογή των κοσκίνων έγινε με βάση την πρότυπη κατάταξη της ISO 2000 όπως παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα 6.2.



Εικόνα 6. 2: Κατάταξη εδαφών με βάση την κοκκομετρία- Πρότυπο ISO2000

Πειραματική διαδικασία:

Με βάση τα όσα ορίζονται στις προδιαγραφές εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής, για την κοκκομετρική ανάλυση δειγμάτων άμμου επιλέχθηκε ποσότητα 500gr, αφού προηγήθηκε ξήρανση του δείγματος σε κλίβανο. Για το δείγμα των χαλίκων με μικρή διάμετρο επιλέχθηκε μια ποσότητα 1000gr. Το μέρος του δείγματος, που έχει ξηρανθεί στον αέρα και προορίζεται για μηχανική ανάλυση ζυγίζεται και το βάρος του καταγράφεται ως το ολικό βάρος του δείγματος χωρίς διόρθωση για το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας.

Στην μέση και στην λεπτή άμμο προηγήθηκε υγρή κοσκίνηση πριν την ξήρανση, σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο AASHTO T11. Το ποσοστό που συγκρατήθηκε από το κόσκινο No 200 (0,063mm) οδηγήθηκε στον κλίβανο ξήρανσης και στην συνέχεια στα κόσκινα. Το ποσοστό που διήλθε προκύπτει από την αρχική ποσότητα αν αφαιρεθεί η εναπομείνουσα.

- Τα κόσκινα τοποθετούνται στη συσκευή με τις διαμέτρους αυτών να αυξάνουν από κάτω προς τα πάνω. Το δείγμα εδάφους τοποθετείται στο επάνω κόσκινο (με τη μεγαλύτερη διάμετρο).
- Το δείγμα κοσκινίζεται χειροκίνητα έως 10 λεπτά. Τα κόσκινα ζυγίζονται μαζί με την ποσότητα εδάφους που έχουν συγκρατήσει.
- Στην συνέχεια υπολογίζεται το ποσοστό του συγκρατούμενου υλικού σε κάθε κόσκινο διαιρώντας το βάρος του συγκρατούμενου με το συνολικό βάρος του δείγματος.
- Τέλος, υπολογίζεται το ποσοστό του διερχόμενου ξεκινώντας από το 100% και αφαιρώντας σταδιακά το ποσοστό του συγκρατούμενου σε κάθε κόσκινο.

Το διερχόμενο ποσοστό Si% που αντιστοιχεί στην διάσταση της οπής του κοσκίνου di υπολογίζεται με την σειρά από το μεγαλύτερο κόσκινο προς το

μικρότερο με εφαρμογή της σχέσης
$$S_i \% = \frac{B_{o\lambda} - \Sigma B_i}{B_{o\lambda}} *100$$

Όπου: Σβί είναι το συνολικό βάρος του δείγματος, το οποίο συγκρατήθηκε στα κόσκινα με διάσταση οπής μεγαλύτερης ή ίσης της di. Τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν για την κοκκομετρική ανάλυση των συγκεκριμένων δειγμάτων επιλέχθηκαν με βάση το νομογράφημα ISO 11277:1998 (soil quality-determination of particle size in mineral soil meterial).

6.1.2 Υπολογισμός υδροπερατότητας

Η πειραματική μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας των εδαφικών υλικών γίνεται με τις διατάξεις που φαίνονται στην Εικόνα 6.3. Στην εικόνα αυτή παρουσιάζεται η συσκευή σταθερού φορτίου, στην οποία η διαφορά στάθμης (ίση με ΔΗ) διατηρείται σταθερή και η ροή του νερού διαμέσου του εδαφικού δοκιμίου γίνεται στην κατακόρυφη διεύθυνση με φορά από κάτω προς τα άνω. Στην περίπτωση αυτή ισχύει ο τύπος 6.1:

$$K = \frac{\mu^* k}{p^* g}$$
(6. 1)

όπου : Α το εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου (της κάθετης στην κατεύθυνση ροής) και Q η παροχή που διηθείται διαμέσου του δοκιμίου (όγκος νερού στη μονάδα του χρόνου).





Οι παράγοντες που επηρεάζουν την υδροπερατότητα είναι οι εξής:

 Κοκκομετρία. Ένα ομοιογενές έδαφος διευκολύνει την κίνηση του νερού γιατί επιτρέπει την ύπαρξη συνδεόμενων κενών μεταξύ των κόκκων. Αντίθετα σε ένα μη καλά διαβαθμισμένο έδαφος τα διάκενα των μεγάλων κόκκων φράζονται από τους μικρούς κόκκους και δυσκολεύουν την κίνηση του νερού. Γενικά η κίνηση του νερού διευκολύνεται σε εδάφη μεγάλης κοκκομετρίας και περιορίζεται σε λεπτόκοκκα εδάφη.

- Σχήμα και υφή κόκκων. Από το σχήμα των κόκκων εξαρτάται το μέγεθος των καναλιών που δημιουργούνται μεταξύ των κόκκων, ενώ από την υφή των κόκκων εξαρτάται η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ αυτών και του νερού κατά την κίνησή του.
- Ορυκτολογική σύσταση. Στα λεπτόκοκκα εδάφη η ορυκτολογική σύσταση συντελεί σε μεγάλο βαθμό γιατί υποδηλώνει διαφορετικά ποσά απορροφώμενου νερού σε κάθε κόκκο.
- Πορώδες. Αναφέρεται σε αλληλοσυνδεόμενα κενά μεταξύ των κόκκων, τα οποία επιτρέπουν την κίνηση του νερού με την βοήθεια της βαρύτητας. Μεγάλο ενεργό πορώδες συνιστά υψηλή υδροπερατότητα.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις σταθεράς υδροπερατότητας είναι οι ακόλουθοι:

- Συμπύκνωση. Ο τρόπος με τον οποίο ένα έδαφος τοποθετείται και συμπυκνώνεται στην κυψέλη του περατόμετρου επηρεάζει τη διάταξη των κενών, δηλαδή το ενεργό πορώδες και συνεπώς τη μέτρηση της υδροπερατότητας.
- Κορεσμός. Είναι πολύ σημαντικό η διαδικασία κορεσμού να γίνεται σωστά, καθώς ο βαθμός κορεσμού επηρεάζει άμεσα την μέτρηση της σταθεράς υδροπερατότητας. Ο νόμος Darcy θεωρείται ότι ισχύει ικανοποιητικά έαν το έδαφος είναι κορεσμένο σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80%.
- Θερμοκρασία. Η μετρούμενη σταθερά υδροπερατότητας εξαρτάται άμεσα από το ιξώδες του νερού. Οι μεταβολές του δυναμικού ιξώδους του νερού σε σχέση με τις αλλαγές τις θερμοκρασίας είναι αξιοσημείωτες. Η μετρούμενη τιμή υδροπερατότητας πρέπει πάντα να ανάγεται σε σταθερή θερμοκρασία. Η συνήθης θερμοκρασία για τις εργαστηριακές δοκιμές είναι 20 °C.
- Τύπος ροής. Μία από τις προϋποθέσεις στις οποίες υπακούει ο νόμος Darcy είναι η ύπαρξη γραμμικής ροής. Γραμμική ροή εξασφαλίζεται με αρκετά χαμηλή ταχύτητα ροής. Στην περίπτωση που ξεπεραστεί μια συγκεκριμένη τιμή η ροή μπορεί να μεταπέσει σε τυρβώδη.

6.1.2.1 Πειραματική διαδικασία υπολογισμού υδροπερατότητας

Ο υπολογισμός του συντελεστή υδροπερατότητας για το δείγμα των χαλικιών έγινε με χρήση του περατόμετρο σταθερού φορτίου. Στην κυψέλη του περατόμετρου υπήρχαν δυο υποδοχές που συνδέονταν με τους μανομετρικούς σωλήνες. Κατά την διάρκεια της κίνησης του νερού από σημείο υψηλότερου σε σημείο χαμηλότερου υδραυλικού φορτίου έλαβε χώρα η ροή του νερού μέσα στο δείγμα και οι μανομετρικοί σωλήνες είχαν διαφορετικές ενδείξεις. Η υδραυλική βαθμίδα λαμβάνεται μέσα στο δείγμα και με τον τρόπο αυτό περιορίζονται οι απώλειες μόνο σε αυτές που οφείλονται στους σωλήνες, ένω ο ρυθμός ροής μειώνεται στο ελάχιστο.

Τα στάδια που ακολουθήθηκαν κατά την διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή υδροπερατότητας με την μέθοδο του σταθερού φορτίου είναι τα εξής:

- Το έδαφος εξασφαλίζεται ότι έχει την κατάλληλη υγρασία ώστε να μπορεί να συμπυκνωθεί.
- Στην βάση της κυψέλης τοποθετείται συρμάτινη γάζα και φίλτρο.
- Το υλικό μοιράζεται ώστε να δημιουργηθούν στοίβες δειγμάτων. Το δείγμα τοποθετείται σε τέσσερα στρώματα.
- Μετά την ολοκλήρωση της τοποθέτησης του δείγματος στο περατόμετρο το δείγμα αφήνεται να κορεστεί. Ο κορεσμός του δείγματος επιτυγχάνεται με αργό άνοιγμα της κατάλληλης βαλβίδας που επιτρέπει την κίνηση του νερού μέσα στο δείγμα.
- Η ταχύτητα ροής του νερού είναι αρκετά μικρή ώστε να περιοριστούν οι απώλειες στις σωληνώσεις, να μην διαταραχθεί η διάταξη των κόκκων του δείγματος και να επιτυγχάνεται γραμμική ροή.
- Το δείγμα έχει κορεστεί όταν βγει η πρώτη σταγόνα από την βαλβίδα υπερχείλισης.
- Η βαλβίδα υπερχείλισης κλείνει και ανοίγουν οι βαλβίδες που επιτρέπουν την κίνηση του νερού προς τους μανομετρικούς σωλήνες. Όταν οι σωλήνες γεμίσουν ανοίγεται η βαλβίδα εξόδου στο κάτω μέρος της κυψελίδας.
- Το νερό ρέει μέχρι να σταθεροποιηθεί η υδραυλική κλίση σε τιμή μικρότερη της μονάδας.

Τοποθετείται ογκομετρικός κύλινδρος στην έξοδο της κυψέλης και με την βοήθεια χρονομέτρου λαμβάνονται μετρήσεις όγκου νερού ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Για τον υπολογισμό της υδροπερατότητας των δυο ειδών άμμου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του μεταβλητού φορτίου. Τα βασικά στάδια της πειραματικής διαδικασίας είναι τα εξής:

- Το δείγμα τοποθετείται συμπαγώς στον δειγματολήπτη έτσι ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία περιμετρικών καναλιών προνομιακής κίνησης του νερού.
- Ο δειγματολήπτης αφού πληρωθεί με το δείγμα τοποθετείται μέσα στην δεξαμενή βύθισης η οποία γεμίζεται με απιονισμένο νερό μέχρι το επίπεδο υπερχείλισης.
- Στην συνέχεια η κυψέλη συνδέεται με την παροχή νερού στην κορυφή της μέσω σωλήνα στον οποίο τοποθετείται σφικτήρας. Επίσης στο σύστημα υπάρχουν βαλβίδες ελέγχου της ροής του νερού από την δεξαμενή τροφοδοσίας και βαλβίδα που επιτρέπει το άδειασμα των μανομέτρων χωρίς να περάσει το νερό μέσα από το δείγμα.
- Απαραίτητη προϋπόθεση για την αξιοπιστία των μετρήσεων είναι να μην κυκλοφορεί αέρας από τις ενώσεις. Η εξαέρωση του όλου συστήματος επιτυγχάνεται με την βοήθεια των παραπάνω βαλβίδων.
- Στην συνέχεια το δείγμα αφήνεται να κορεστεί για μια ημέρα. Συγκεκριμένα το νερό επιτρέπεται να κινηθεί προς τα πάνω μέσω του δείγματος και κάτω από μικρή πιεζομετρική πίεση της δεξαμενής με την βοήθεια τριχοειδών δυνάμεων. Όταν το δείγμα εμφανιστεί στην κορυφή της κυψέλης θεωρείται ότι έχει κορεστεί.
- 🗍 Γεμίζεται ο μανομετρικός σωλήνας που έχει επιλεχθεί.
- 🗍 Το νερό αρχίζει να ρέει από το μανόμετρο προς το δείγμα

Μετά τον υπολογισμό των συντελεστών διαπερατότητας (k) για όλα τα είδη εδαφών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων ροής υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές της απόλυτης διαπερατότητας που υπολογίζεται από τον τύπο (6.2):

$$K = \frac{\mu^* k}{p^* g} (6.2)$$

Όπου: μ το ιξώδες του ρευστού των πόρων (M/LT), ρ η πυκνότητα του ρευστού (M/L^3) , k ο συντελεστής υδροπερατότητας (M/T) και g η επιτάχυνση της βαρύτητας (M/T^2) .

6.1.3 Υπολογισμός πίεσης τριχοειδούς δυναμικού

Η πίεση τριχοειδούς δυναμικού μετρήθηκε με την βοήθεια τενσιομέτρου μοντέλο SKD 190 της εταιρείας ScientAct. Η συσκευή αποτελείται από ένα πορώδες κεραμικό κάλυμμα που έχει συνδεθεί με ένα σωλήνα που έχει τοποθετηθεί μέσα στο πορώδες υλικό. Ο σωλήνας γεμίζει με το LNAPL, που μελετάται κάθε φορά και συνδέεται αεροστεγώς με ένα μανόμετρο. Το τριχοειδές δυναμικό του εδάφους προσπαθεί να τραβήξει το υγρό από το κορεσμένο πορώδες κάλυμμα και το μανόμετρο μετράει την διαφορά ύψους του LNAPL μέσα στον σωλήνα. Η διαφορά αυτή μετράται από το μανόμετρο ως πίεση.

6.2 Φάση II

6.2.1 Πειράματα ροής

Για την ολοκλήρωση της δεύτερης και σημαντικότερης φάσης των πειραμάτων ο απαιτούμενος εργαστηριακός εξοπλισμός ήταν ο εξής:

Εργαστηριακός εξοπλισμός

- 1. Δεξαμενή από γυαλί
- 2. Σύστημα βάνας σωλήνων
- 3. Περισταλτική αντλία Watson 250
- 4. Χρωστική σε μορφή σκόνης Sudan III
- 5. Soltrol 220 και Diesel Fuel
- 6. Φωτογραφική μηχανή Kodak 7.2 megapixels και τρίποδο στήριξης

6.2.1.1 Περιγραφή διάταξης

Η δεξαμενή κατασκευάστηκε από γυαλί ώστε να γίνεται καλύτερα η λήψη των φωτογραφιών για την ανάλυση της κίνησης και της κατανομής των μελετούμενων LNAPL. Επιπλέον, επιλέχθηκαν προσεκτικά οι διαστάσεις της δεξαμενής ώστε η τρίτη διάσταση να είναι κατά πολύ μικρότερη από τις άλλες δυο και έτσι να μπορεί να επιτευχθεί δισδιάστατη ροή. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα γυάλινο κελί με 100 cm μήκος, 100 cm ύψος και 2 cm πλάτος. (Εικόνα 6.4). Δεξιά και αριστερά υπάρχουν δυο πηγάδια, με σωλήνες εκροής, που ελέγχονται με βανάκια. Ο πυθμένας αφαιρείται για τη διευκόλυνση της εκκένωσης του. Στον επάνω μέρος υπάρχει καπάκι με οπές διαμέτρου 1 cm για την εισαγωγή του ρύπου αλλά και για τον περιορισμό της εξάτμισης των LNAPL. Ακολουθεί το σκαρίφημα της διάταξης (εικόνα 6.4) καθώς και μια φωτογραφία με την πειραματική διάταξη στο εργαστήριο (εικόνα 6.5).



Εικόνα 6. 4: Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης



Εικόνα 6. 5: Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης

6.2.1.2 Ιδιότητες χρησιμοποιούμενων LNAPL

Το πρώτο LNAPL που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Soltrol 220 και προμηθεύτηκε από την χημική εταιρεία Cevron Phillips, USA. Το Soltrol 220 είναι ένας ισοπαραφινικός διαλύτης, μίγμα των C13 με C17 αλυσίδων υδρογονανθράκων. Έχει πολύ μικρή διαλυτότητα στο νερό, χαμηλή πίεση ατμών (27.6 Pa), πυκνότητα ίση με 0.79 g/cm⁻³ και ιξώδες που ισούται με 0.0048 Pa s. Η επιφανειακή τάση ανάμεσα στην διεπιφάνεια Soltrol 220 –νερό και Soltrol 220 – αέρα είναι 0.036 και 0.026 N/m, αντίστοιχα (Kechavarzi et al 2005). Το Soltrol είναι άχρωμο και για να γίνει εύκολα αντιληπτό και να βελτιστοποιηθούν τα αποτελέσματα της τεχνικής ανάλυσης εικόνων χρησιμοποιήθηκε η χρωστική Sudan III σε συγκέντρωση 0,1%.

Το δεύτερο LNAPL, που χρησιμοποιήθηκε, ήταν το Diesel fuel από τα Ελληνικά Πετρέλαια Α.Ε, Ελλάδα. Το Diesel έχει επίσης αμελητέα διαλυτότητα στο νερό και χαμηλή τάση ατμών (27.6 Pa), πυκνότητα ίση με 0.84 g/cm⁻³ και το ιξώδες του ισούται με 0.0036 Pa s. Το Diesel είναι επίσης άχρωμο και χρωματίστηκε με την χρωστική Sudan III.

6.2.2 Περιγραφή Διαδικασίας

Αρχικά η δεξαμενή γεμίζει με νερό και ακολούθως εισάγεται η άμμος με τέτοιο τρόπο ώστε τα στρώματα άμμου, που θα δημιουργηθούν, να είναι ομοιόμορφα. Στην συνέχεια το νερό απομακρύνεται με την βοήθεια των βανών που βρίσκονται στον πυθμένα των δυο πλαϊνών κελίων της δεξαμενής και η άμμος αφήνεται να ξηρανθεί. Μετά την ξήρανση των στρωμάτων άμμου γίνεται η εισαγωγή του LNAPL. Πριν την ενστάλαξη το LNAPL αναμιγνύεται με μικρή ποσότητα (0,001%) χρωστικής Sudan III ώστε να αποκτήσει κόκκινο χρώμα και να είναι εύκολα διακριτό. Η εισαγωγή έγινε με την βοήθεια μιας περισταλτικής αντλίας (Watson 250s) με ρυθμό 1ml/min για την πρώτη σειρά πειραμάτων. Από την στιγμή της ενστάλαξης της πρώτης σταγόνας στην δεξαμενή μέχρι την ολοκλήρωση της διαμόρφωσης του πλουμίου λαμβάνονταν φωτογραφίες σε συγκεκριμένα και προκαθορισμένα χρονικά διαλείμματα. Οι φωτογραφίες λαμβάνονταν μέσω μιας ψηφιακής φωτογραφικής μηγανής Kodak 7.2 Megapixels η οποία είχε τοποθετηθεί σε απόσταση 20 cm από την δεξαμενή και η θέση της παρέμεινε απόλυτα σταθερή καθ'όλη την διάρκεια των πειραμάτων με την χρήση σταθερού τρίποδου. Το πείραμα θεωρείται ολοκληρωμένο όταν καμία μεταβολή δεν παρατηρείται πλέον στο σχηματιζόμενο πλούμιο, γεγονός που συνέβαινε σε χρονικό διάστημα περίπου 3-4 ωρών κατά μέσο όρο.

Πραγματοποιήθηκαν έξι συνολικά πειράματα. Στα τέσσερα από αυτά τα πειράματα ένα στρώμα χονδρής άμμου ήταν υπερκείμενο ενός στρώματος μέσης άμμου (Εικόνα 6.6). Τα τέσσερα αυτά πειράματα διέφεραν μεταξύ τους ως προς τον τρόπο εισαγωγής των ρυπών στην άμμο, συγκεκριμένα, στα δυο εξ'αυτών η εισαγωγή των LNAPL έγινε επιφανειακά ενώ στα υπόλοιπα δυο έγινε υπεδάφια. Στην υπόλοιπα δυο πειράματα που διεξήχθηκαν, η στρωμάτωση διαφοροποιήθηκε. Συγκεκριμένα, το στρώμα της μέσης άμμου ήταν πάνω από το στρώμα της χονδρόκοκκης άμμου.(Εικόνα 6.7).





Η ενστάλαξη του LNAPL έγινε μέσω μιας οπής στην οροφή της δεξαμενής διαμέτρου 1 cm που απείχε 8 cm από το αριστερό άκρο για το τρία πειράματα με το Diesel και 40 cm από το αριστερό άκρο της δεξαμενής για το τρία πειράματα με το Soltrol 220.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα πειράματα και οι τιμές των βασικών παραμέτρων τους.

			Ύψος στοωμάτων	Ρυθμός εισαγωγής	Όγκος	Τρόπος
Α	Ρύπος	Στρωμάτωση	(cm)	(RPM)	ρύπου(ml)	ενστάλαξης
		Χονδρόκοκκη/μέση				
1	Diesel	άμμος	10/20	4,5	100	Επιφανειακά
		Χονδρόκοκκη/μέση				
2	Soltrol	άμμος	12/20	4,5	100	Επιφανειακά
		Μέση/Χονδρόκοκκη				
3	Diesel	άμμος	3/8	7,5	100	Υπεδάφια
		Μέση/Χονδρόκοκκη				
4	Soltrol	άμμος	4,5/8	7,5	100	Υπεδάφια
		Χονδρόκοκκη/μέση				
5	Diesel	άμμος	10/8	4,5	100	Υπεδάφια
		Χονδρόκοκκη/μέση				
6	Soltrol	άμμος	10/8	4,5	100	Υπεδάφια

Πίνακας 6. 2: Συγκεντρωτικός πίνακας συνθηκών των πειραμάτων ροής

6.3 Τεχνική ανάλυσης εικόνων

Η τεχνική ανάλυσης εικόνων αποτελεί μια πολύτιμη εναλλακτική επιλογή για την μελέτη της διασποράς ενός ρευστού σε όλη την περιοχή του πλουμίου. Πολλοί μελετητές έχουν προσδιορίσει τον βαθμό κορεσμού του εδάφους σε LNAPL μέσω

ψηφιακών εικόνων που επεξεργάζονται κατάλληλα. Οι Gold et al. 1976 και Schincariol et al.1993 στις μελέτες τους συσχέτισαν την οπτική πυκνότητα των ψηφιακών φωτογραφιών με την συγκέντρωση του χρωματισμένου με ιχνηθέτη ρύπου. Οι Van Geel et al. 1994, συσχέτισαν το ποσοστό κορεσμού σε ρύπο με την τιμή της χροιάς του χρώματος.

Το χρώμα μπορεί να εκφραστεί με διάφορους τρόπους. Ο πιο διαδεδομένος είναι ο διαχωρισμός του χρώματος σε κόκκινο, πράσινο και μπλέ. Η χροιά, ο κορεσμός και η ένταση είναι στοιχεία μιας άλλης μεθόδου που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του χρώματος. Σε αυτήν την μέθοδο (HSI format) η χροιά του χρώματος είναι η απόχρωση που περιγράφει το απαλό χρώμα. Η έννοια του κορεσμού αναφέρεται στον βαθμό που το χρώμα έχει διαλυθεί με το άσπρο χρώμα και η ένταση αναφέρεται στο επίπεδο της ασπρόμαυρης κλίμακας.

Hue, Saturation and Intensity (HSI)

Κατά την μετατροπή από RGB σε HSI, η χροιά μπορεί να εκφραστεί από τον τύπο 6.2:

$$H = \cos^{-1} \frac{(R-G) + (R-B)}{2\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}}$$
 (6.2)

Η ένταση του χρώματος (Ι) υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο 6.3 :

$$I = 255 \left(\frac{R+G+B}{3}\right)$$
(6.3)

Όπου: R ο αριθμός των κόκκινων pixel

G ο αριθμός των πράσινων pixel

B ο αριθμός των μπλέ pixel

Οι φωτογραφίες λαμβάνονταν σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα ανάλογα με τον ρυθμό κίνησης του LNAPL Για την υλοποίηση της τεχνικής ανάλυσης εικόνων οι φωτογραφίες επεξεργάστηκαν μέσω κατάλληλου λογισμικού (αλγόριθμων).

Τα βασικά στάδια επεξεργασίας μέσω των αλγόριθμων είναι:

 1° στάδιο επεξεργασίας εικόνων: Μετατροπή RGB σε HSI

 $2^{\rm o}$ στάδιο επεξεργασίας εικόνων: Δημιουργία ακρογραμμής για κάθε φωτογραφία $\mathbf{3}^{\mathrm{o}}$ στάδιο επεξεργασίας εικόνων: Δημιουργία κλίμα
κας βαθμονόμησης

 $4^{\rm o}$ στάδιο επεξεργασίας εικόνων: Δημιουργία προφίλ
 κορεσμού για κάθε πείραμα

Οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν κατά τα προαναφερόμενα στάδια περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Ι.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7°: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.1 Αποτελέσματα κοκκομετρικών αναλύσεων

Στον ακόλουθο Πίνακα 7.1 περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα των κοκκομετρικών αναλύσεων των χαλίκων. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται το ποσοστό χαλίκων που διέρχεται από κάθε κόσκινο, σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο ASTM D 422-1980.

Χάλικες								
Μέγεθος διακ/νων (mm)	Βάρος δοχείου (gr)	Συνολικό βάρος (βάρος+δείγμα)	Παραμένουσα ποσότητα	Διερχόμενο ποσοστό				
()	(81)	(gr)	(gr)	(%)				
6,3	135,2	501,9	366,7	62,1%				
2	135,2	702	566,7	3,5%				
1,18	135,2	169,5	34,3	0,0%				
		Σύνολο	967,7					

Πίνακας 7. 1: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης χαλίκων

Αρχική ποσότητα δείγματος:967,7 gr

Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.1 κατασκευάζεται η κοκκομετρική καμπύλη των χαλίκων (Διάγραμμα 7.1).



Διάγραμμα 7. 1: Κοκκομετρική καμπύλη χαλίκων

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης της μέσης και χονδρής άμμου (Πίνακες 7.2 και 7.3) καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματα με τις κοκκομετρικές καμπύλες τους (Διαγράμματα 7.2 και7.3).

	Μέση άμμος							
Μέγεθος διακ/νων	Βάρος δοχείου (σr)	Συνολικό βάρος (βάρος+δείγμα)	Παραμένουσα ποσότητα	Διερχόμενο ποσοστό				
(mm)	(gr)	(gr)	(gr)	(%)				
2	336,4	345,3	8,9	98,1%				
1,18	336,4	360,3	23,9	93,2%				
0,425	322,7	322,7	187,5	54,2%				
0,212	399,8	530,5	130,7	27,0%				
0,063	251,1	251,1	117,6	2,5%				
υπόλοιπο	133,4	145,6	12,2					

Πίνακας 7. 2:	Αποτελέσματα	κοκκομετρικής	ανάλυσης	μέσης άμμου.
				1

Αρχική ποσότητα δείγματος: 480,8 gr – Έγινε υγρή κοσκίνιση.



Διάγραμμα 7. 2: Κοκκομετρική καμπύλη μέσης άμμου

Χονδρή άμμος						
Μέγεθος διακ/νων (mm)	Βάρος Συνολικό βάρος δοχείου (βάρος+δείγμα)		Παραμένουσα ποσότητα (gr)	Διερχόμενο ποσοστό (%)		
6,3			0	100,0%		
2,36	135,2	248,9	113,7	72,7%		
2	400	431,9	31,9	65,0%		
1,18	133,5	225,4	91,9	43,0%		
0,425	133,4	222,8	89,4	21,5%		
0,212	133,4	168,5	35,1	13,1%		
0,063	133,3	186,3	53	0,3%		
υπόλοιπο	133,4	134,8	1,4			

Αρχική ποσότητα δείγματος: 416,4gr – Έγινε υγρή κοσκίνιση



Διάγραμμα 7. 3: Κοκκομετρική καμπύλη χονδρόκοκκης άμμου

7.1.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Η θέση, η μορφή, η κλίση και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των κοκκομετρικών καμπυλών παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την κοκκομετρική διαβάθμιση των εδαφών και για διάφορες άλλες ιδιότητες τους.

Η παράμετρος d₅₀ μας παρέχει με μια μόνο πληροφορία το μέσο μέγεθος των κόκκων. Η κλίση της καμπύλης εκφράζεται ποσοτικά με την τιμή του λόγου $Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ οποίος ονομάζεται συντελεστής ομοιομορφίας. Για τιμές Cu μικρότερες του 5 θεωρούμε ότι το έδαφος είναι ομοιόμορφο. Ως καλά διαβαθμισμένα εδάφη θεωρούνται τα εδάφη που είναι μη ομοιόμορφα με συντελεστή ομοιομορφίας >15 (Τσότσος, 1991).

Από τις κοκκομετρικές καμπύλες των δειγμάτων, που προέκυψαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της κοκκομετρικής ανάλυσης υπολογίζεται η ενεργός διάμετρος των κόκκων κάθε δείγματος. Ενεργός διάμετρος d₁₀ ονομάζεται η διάμετρος κόκκων που αντιστοιχεί στο 10% του συνολικού βάρους του δείγματος. Η μικρότερη αυτή διάσταση γενικά πλησιάζει τις διαστάσεις των κενών του εδάφους και γιαυτό τον λόγο συνδέεται άμεσα με την υδροπερατότητα του. Από την μελέτη των κοκκομετρικών καμπύλων προσδιορίστηκαν οι βασικοί παράμετροι d₁₀, d₆₀ και Cu (για όλους τους τύπους άμμου που χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω Πίνακα 7.4.

Υλικό/Παράμετρος	d ₁₀ (mm)	d ₆₀ (mm)	Cu	Παρατήρηση
Χάλικες	2,3	6,3	2,7	<5 Μη καλά διαβαθμισμένοι
Μέση άμμος	0,09	0,5	5,6	>5 Καλά διαβαθισμένη
Χονδρή άμμος	0,18	1,98	11	>5Καλά διαβαθμισμένη

Πίνακας 7. 4: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων της κοκκομετρικής ανάλυσης

Όταν ο συντελεστής ομοιομορφίας είναι μεγαλύτερος από 5 (Cu>5) τότε το δείγμα είναι καλά διαβαθμισμένο. Συνεπώς, σύμφωνα με τα αποτελέσματα οι χάλικες δεν είναι καλά διαβαθμισμένοι. Αντίθετα, η μέση και η χονδρή άμμος που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ροής είναι καλά διαβαθμισμένα υλικά.

7.2 Αποτελέσματα υπολογισμού διαπερατότητας

Μια δεύτερη πολύ σημαντική παράμετρος, που έπρεπε να προσδιοριστεί για τα πορώδη μέσα είναι η υδροπερατότητα της άμμου και των χαλίκων.

Για τα χαλίκια χρησιμοποιήθηκε το περατόμετρο σταθερού φορτίου ενώ για την μέση και χονδρή άμμο εφαρμόστηκε η μέθοδος του μεταβλητού φορτίου. Στο ακόλουθο Διάγραμμα 7.4. παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της παροχής του νερού που διέρχεται από το έδαφος σε συνάρτηση με το χρόνο για το πείραμα που διεξήχθη για τα χαλίκια.



Διάγραμμα 7. 4: Παροχή νερού σε συνάρτηση με τον χρόνο

Επειδή, η ζητούμενη σταθερή παροχή ($Q_{\sigma \tau a \theta}$.) δεν είναι πρακτικά εύκολα υπολογίσιμη καθώς για τον σκοπό αυτό απαιτείται συνήθως μεγάλος αριθμός μετρήσεων, κατασκευάστηκε γραφική παράσταση της παροχής που διέρχεται από το στρώμα των χαλικιών σε συνάρτηση με το 1/sqrt(t), (Διάγραμμα 7.5). Η καμπύλη που προκύπτει από το εν λόγω διάγραμμα, αν προεκταθεί τέμνει των άξονα των παροχών σε τιμή σταθερή που λαμβάνεται μετά την πάροδο αρκετού χρόνου.



Διάγραμμα 7. 5:Παροχή νερού σε συνάρτηση με την ρίζα χρόνου.

Η τιμή του συντελεστή υδροπερατότητας με την μέθοδο του σταθερού φορτίου δίνεται από τον τύπο: $k = \frac{Q}{6000 * A * i} (m/s)$ όπου: Q η σταθερή τιμή παροχής, A το εμβαδόν της κάθετης τομής του δείγματος σε (cm²) και i η υδραυλική κλίση (mm/mm). Συνεπώς, ο συντελεστής υδροπερατότητας για τα χαλίκια ίσως με 0,070545cm/s.

Οι τιμές των συντελεστών περατότητας (k) για την μέση και την λεπτή άμμο υπολογίστηκαν ίσες με 8.53·10⁻⁶ cm/s για την μέση άμμο και 1.5·10⁻⁵ cm/s για την χονδρή άμμο αντίστοιχα. Οι πίνακες με τους υπολογισμούς για τα πειράματα μεταβλητού φορτίου για την μέση και την χονδρή άμμο περιλαμβάνονται στο Παράρτημα ΙΙ.

Με βάση αυτές τις τιμές υπολογίστηκαν οι τιμές της απόλυτης διαπερατότητας (K) σύμφωνα με τον τύπο: $k = \frac{K\rho g}{\mu} \Longrightarrow K = \frac{k\mu}{\rho g}$ (7. 1) όπου: K η απόλυτη περατότητα (m²), ρ η πυκνότητα του ρευστού (kg/cm³), g η επιτάχυνση της βαρύτητας (cm/s²) και μ το ιξώδες του ρευστού (kg/cm s).

7.2.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Μετά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων διαμορφώνεται ο παρακάτω Πίνακας 7.5 με τις τιμές του συντελεστή διαπερατότητας και της απόλυτης διαπερατότητας στους 20 °C για όλα τα δείγματα που μελετήθηκαν.

Πίνακας 7. 5:	Συντελεστής υδροτ	ιερατότητας π	ορώδων μέσων	για τα δυο LNAPL

Υλικό	k	Kdiesel	Ksoltrol	
	(cm/s)	(m ²)	(m ²)	
Χάλικες	0,07054474	3 *10 ⁻⁵	4 *10 ⁻⁵	
Μέση άμμος	8,53*10 ⁻⁶	3,66*10 ⁻¹³	3,23*10 ⁻¹³	
Χονδρή άμμος	1,47*10 ⁻⁶	6,43*10 ⁻¹²	5,69*10 ⁻¹²	

7.3 Υπολογισμός πορώδους

Όπως προαναφέρθηκε μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους του εδάφους με καθοριστικό ρόλο στην υπόγεια ροή είναι το πορώδες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βήματα υπολογισμού του πορώδους για τα χαλίκια και τα δυο είδη άμμου που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων ροής.

<u>Τύπος Kozeny</u>

Ο τύπος που αναπτύχθηκε από τον Kozeny (1927) συσχετίζει την υδροπερατότητα, την κοκκομετρία του υλικού, το πορώδες, την γωνιακότητα των κόκκων, την ειδική τους επιφάνεια και το ιξώδες του ρευστού. Η γενική μορφή της εξίσωσης είναι:

$$k = \frac{\rho g}{e C \mu S^2} \frac{n^3}{(1-n)^2}$$
 (7.2)

Όπου: k ο συντελεστής υδροπερατότητας (cm/s), ρ η πυκνότητα του ρευστού (kg/cm³), g η επιτάχυνση της βαρύτητας (cm/s²) και μ το ιξώδες του ρευστού (kg/cm s).

Αυτή η σχέση τροποποιήθηκε από τον Carman (1939), ο οποίος αντικατέστησε το πορώδες με την αναλογία κενών χρησιμοποιώντας την ισότητα

$$n = \frac{e}{1+e}$$
 (7. 3)

Οπότε, προκύπτει η γνωστή εξίσωση των Kozeny-Carman:

$$k = \frac{\rho g}{C\mu S^2} \frac{e^3}{1-e}$$
 (7.4)

C είναι μια σταθερά που σχετίζεται με το σχήμα των σφαιρικών κόκκων και συνήθως ισούται με 5. Ωστόσο, επειδή σπάνια οι κόκκοι είναι σφαιρικοί υπεισέρχεται άλλος ένας παράγοντας f με τον οποίο πολλαπλασιάζεται το C και έτσι λαμβάνεται υπ'όψην η γωνιακότητα των κόκκων.

Συνεπώς :

$$k = \frac{\rho g}{5f \mu S^2} \frac{e^3}{1 - e}$$
 (7.5)

Για τις τιμές του f o Loudon (1952) προτείνει:Στρογγυλεμένους κόκκους: f=1.1Ημί-στρογγυλεμένους: f=1.25Γωνιώδεις: f=1.4.

Επίσης, η ειδική επιφάνεια μπορεί να υπολογιστεί από τις παρακάτω σχέσεις:

$$D_{eff} = 100\% / [\sum (f_i / D_{avei})] (7.6)$$
$$D_{eff} = 100\% / [\sum (f_i / D_{avei})] (7.7)$$

όπου: fi: τα κλάσμα του υλικού που διέρχεται μεταξύ δυο κοσκίνων

Dave: το μέσο μέγεθος μεταξύ δυο μεγεθών ανοίγματος κοσκίνου

Dave $i = Dli^{0,5} x Dsi^{0,5}$

Oπότε :So=6/Deff

Τελικά, υπολογίζεται η ειδική επιφάνεια κόκκων για όλα τα υλικά και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 7.6.

Υλικό	Ειδική επιφάνεια κόκκων S (mm ² /mm ³)
Χάλικες	4
Μέση άμμος	25
Χονδρή άμμος	8

Πίνακας 7. 6: Ειδική επιφάνεια κόκκων

Συνεπώς, υπολογίζεται το πορώδες για τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων ροής και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.7.

Υλικό	Πορώδες n
Χάλικες	0,6
Μέση άμμος	0,37
Χονδρή άμμος	0,43

Πίνακας 7. 7: Αποτελέσματα υπολογισμού πορώδους

7.4 Βαθμονόμηση της μεθόδου ανάλυσης εικόνων

Για τη δημιουργία της κλίμακας βαθμονόμησης, που θα συσχετίζει το βαθμό κορεσμού σε ρύπο (LNAPL) και για τα δυο είδη άμμου, που χρησιμοποιήθηκαν, με την ένταση του κόκκινου χρώματος διεξάχθηκε μια σειρά πειραμάτων κάτω από τις ίδιες συνθήκες φωτισμού, θέσης μηχανής και θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν μικρά γυάλινα κελία μικρότερης κλίμακας και ανάλογων διαστάσεων με την δεξαμενή.

Αφού ολοκληρωνόταν η πλήρωση του κελιού με άμμο ακολουθούσε η ενστάλαξη συγκεκριμένης ποσότητας ρύπου ώστε το έδαφος να έχει 20, 40, 60, 80 και 100% κορεσμό. Η ποσότητα ρύπου για την επίτευξη του εκάστοτε βαθμού

κορεσμού καθορίζεται από το πορώδες, που αντιστοιχεί σε κάθε τύπο άμμου. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τους δύο ρύπους (Soltrol και Diesel) και στα δυο είδη άμμου. Στην συνέχεια λήφθηκαν φωτογραφίες, οι οποίες επεξεργάστηκαν μέσω κατάλληλων αλγορίθμων Matlab και με βάση τις εξισώσεις μετατροπής των κόκκινων πράσινων μπλέ pixel σε HSI. Ως αποτέλεσμα σε κάθε ποσοστό κορεσμού του LNAPL αντιστοιχεί μια συγκεκριμένη τιμή της μέσης έντασης χρώματος. Στον Πίνακα 7.8, που ακολουθεί, περιλαμβάνονται τα δεδομένα βαθμονόμησης για μέση και χονδρή άμμο για τους δυο ρύπους, Soltrol και Diesel. Με βάση αυτές τις τιμές δημιουργήθηκε μια κλίμακα βαθμονόμησης, βάσει της οποίας καθορίζεται ο κορεσμός του LNAPL σε κάθε μια φωτογραφία των πειραμάτων ροής.

	Оүко ς (cm³/cm³)		Μέση ένταση				
LNAPL	Χονδρόκοκκη άμμο	Μέση άμμο	Χονδρόι άμμ	Χονδρόκοκκη άμμο		Μέση άμμος	
Κορεσμός (%)			Soltrol 220	Diesel	Soltrol 220	Diesel	
<20%	0	0	170	225	165	210	
20 %	8.6	7.4	157.4	214	158	193.5	
40 %	17.2	14.8	121	165.5	121	173.31	
60 %	25.8	22.2	77.1	117	77.1	150.4	
80 %	34.4	29.6	42.4	75,5	42.4	124.6	
100 %	43	37	22.3	51	22.3	102	

Πίνακας 7. 8:Δεδομένα βαθμονόμησης για την χονδρόκοκκη και την μέση άμμο

Σύμφωνα με τα δεδομένα βαθμονόμησης παρατηρείται ότι η ένταση είναι γραμμική συνάρτηση του κορεσμού. Στις Εικόνες 7.1 και 7.2 παρουσιάζονται οι στήλες βαθμονόμησης για κάθε LNAPL και για κάθε είδους άμμο.



Εικόνα 7. 1: Κορεσμός (%) Diesel σε χονδρή άμμο (α) και σε μέση άμμο (β)



Εικόνα 7. 2:Κορεσμός (%) Soltrol220 σε χονδρή άμμο (γ) και σε μέση άμμο (δ)

Από τις παραπάνω στήλες βαθμονόμησης προκύπτει ένα άμεσο συμπέρασμα ότι στην χονδρόκοκκο άμμο η ένταση του χρώματος είναι σαφώς μεγαλύτερη από ότι στην μέση. Σύμφωνα με τους Darnault et. al (1997), που πραγματοποίησαν πειράματα κορεσμού μέσω του υπολογισμού του απορροφούμενου φωτός από το στρώμα της άμμου, η χροία του χρώματος σχετίζεται άμεσα με τον βαθμό κορεσμού σε ρύπο.

7.5 Αποτελέσματα πειραμάτων ροής

Πειράματα ροής δυο διαστάσεων έχουν διεξαχθεί με στόχο την μελέτη της συμπεριφοράς των LNAPL στην ακόρεστη ζώνη. Οι Shieg et al. 1990, Host-Madsen et al. 1992, Pantazidou et al. 1993, Van Geel et al. 1994 και Oostrom et al. 2003 είναι μερικοί από αυτούς. Αυτά τα πειράματα παρείχαν πολύτιμα πειραματικά δεδομένα με απώτερο σκοπό την χρήση τους για αναγωγή των συμπερασμάτων από το εργαστήριο στο πεδίο.

7.5.1 Πείραμα 1°

Στο πρώτο πείραμα μελετήθηκε η ροή του Diesel αρχικά ,σε χονδρόκοκκη και στην συνέχεια σε μέση άμμο. Ο ρυθμός εισαγωγής του Diesel ήταν 1ml/min και η ενστάλαξη έγινε με την βοήθεια περισταλτικής αντλίας (Watson 250) μέσω μικρού σωλήνα οπής 0,5 cm. Η θερμοκρασία του εργαστηρίου διατηρήθηκε σταθερή στους 22 °C καθ'όλη την διάρκεια του πειράματος όπως και η θέση της ψηφιακής κάμερας (Kodak 7.0 Megapixels). Η συνολική ποσότητα Diesel που ενσταλάχθηκε στην δεξαμενή ήταν 100 ml.

Ακολουθούν οι εικόνες, που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο πείραμα. Τα χρονικά διαστήματα λήψης των φωτογραφιών μεταβαλλόταν κατά την διάρκεια του πειράματος ανάλογα με τον ρυθμό εξάπλωσης του LNAPL. Αρχικά, οι λήψεις γίνονταν κάθε 5 min και για όσο χρονικό διάστημα η κίνηση λάμβανε χώρα στην χονδρόκοκκη άμμο. Στην συνέχεια κάθε 15 min και τέλος οι φωτογραφίες λαμβάνονταν κάθε 30 min.

Η σειρά των φωτογραφιών για το πρώτο πείραμα παρουσιάζεται παρακάτω:



t=5min

t=10min



t=15min

t=20min



t=155min

t=185min



Με εφαρμογή του πρώτου αλγορίθμου [Παράρτημα Ι] στις εικόνες hue του πειράματος προκύπτει το προφίλ της κίνησης του Diesel από το οποίο εύκολα παρατηρείται το τελικά σχηματιζόμενο πλούμιο, αλλά και η πορεία που ακολούθησε κατά την διάρκεια του πειράματος καθώς κάθε διαφορετικό χρώμα αντιστοιχεί και σε μια διαφορετική φωτογραφία

Στο διάγραμμα 7.6 που ακολουθεί παριστάνεται η ακρογραμμή του σχηματιζόμενου πλουμίου για κάθε φωτογραφία του πειράματος.



Διάγραμμα 7.6 : Προφίλ κίνησης του Diesel (1ο πείραμα)

Στην συνέχεια εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος με την ονομασία Saturation [Παράρτημα Ι] ο οποίος βασιζόμενος στα δεδομένα της στήλης βαθμονόμησης δημιουργεί τα προφίλ κορεσμού για κάθε φωτογραφία του πειράματος. Με αυτή την μέθοδο γνωρίζουμε το ποσοστό κορεσμού του ρύπου σε κάθε κόκκο άμμου καθ'όλη την διάρκεια του πειράματος. Επιπλέον, παρουσιάζεται και πάλι η πορεία της διασποράς του πλουμίου κατά την διάρκεια του δυσδιάστατου πειράματος. Στην Εικόνα 7.4 είναι συγκεντρωμένες οι γραφικές παραστάσεις που αντιστοιχούν στις πέντε πιο χαρακτηριστικές φωτογραφίες που ελήφθησαν και απεικονίζουν τον κορεσμό των πορώδων υλικών σε Diesel για το πρώτο πείραμα.





t=180min

Εικόνα 7. 4: Προφίλ κορεσμού του Diesel (1ο πείραμα)

Μέσω Matlab υπολογίζεται ο αριθμός των pixel που αντιστοιχούν σε κάθε ένα διαφορετικό ποσοστό κορεσμού και η αντίστοιχη επιφάνεια που καταλαμβάνεται σε cm² και στον Πίνακα 7.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν στις εικόνες που επιλέχθηκαν ως οι πιο περιγραφικές της κίνησης, που έλαβε χώρα στην δεξαμενή.

A/A	Χρόνος (min)	Όγκος LNAPL (ml)	Πλούμιο (pixels)	Μέση τιμή έντασης χονδρής άμμου	Μέση τιμή έντασης μέσης άμμου	Περιοχή <20% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 20% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 40% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 60% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 80% κορεσμό LNAPL (cm ²)
1	15	5	6992	95,1	0,0	0,00	0,37	4,03	51,65	11,89
2	30	40	7842	79,0	0,0	0,02	1,82	15,18	65,75	3,32
3	90	90	13119	82,5	90,7	0,08	4,49	16,50	66,30	2,61
10	120	100	62963	89,5	80,5	99,70	81,10	75,17	248,61	28,29
11	180	100	63497	97,6	87,8	78,74	122,14	63,87	219,63	97,85

Πίνακας 7. 9: Αποτελέσματα επεξεργασίας εικόνων-Πείραμα 1°

Σχολιασμός 1^{ov} πειράματος

Κατά τη διάρκεια του πρώτου πειράματος πραγματοποιήθηκε η ενστάλαξη 100 ml Diesel. Μετά την ανάλυση των εικόνων μέσω των αλγορίθμων που δημιουργήθηκαν σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα: Η συνολική μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση του Diesel ανήλθε σε 22 cm και έλαβε χώρα σε χρονικό διάστημα 2,5 ωρών. Ο ρυθμός κίνησης στην χονδρόκοκκη άμμο ήταν 0,3cm/mi, ενώ στην μέση άμμο ήταν 0,13 cm/min. Οι παραπάνω ρυθμοί ήταν αναμενόμενοι και οφείλονταν κυρίως στην διαφορά διαπερατότητας των δυο στρωμάτων άμμου. Η οριζόντια διασπορά ήταν σαφώς πιο περιορισμένη συνολικά σε όλο το πείραμα και πιο συγκεκριμένα μετακινήθηκε 6 cm προς τα αριστερά, στο στρώμα της άμμου με την μεγαλύτερη υδραυλική αγωγιμότητα και 4 cm προς τα δεξιά. Πρέπει να σημειωθεί ότι η πραγματική οριζόντια διασπορά θεωρείται αυτή που παρατηρείται μετά τα 15 πρώτα λεπτά εισαγωγής του Diesel λόγω κλίσης της επιφάνειας του πρώτου στρώματος της άμμου κατά τη διάρκεια δημιουργίας των στρωμάτων στην δεξαμενή. Επίσης, παρατηρήθηκε μεγαλύτερη οριζόντια διασπορά κατά την κίνηση του Diesel στην μέση άμμο. Από την χρονική στιγμή, που το Diesel διαπέρασε την διεπιφάνεια των στρωμάτων, η κατακόρυφη κίνηση περιορίστηκε αισθητά ενώ κατά την οριζόντια διάσταση το πλούμιο του LNAPL εξαπλώθηκε σημαντικά. Η οριζόντια κίνηση του Diesel από την διεπιφάνεια των στρωμάτων και κάτω μπορεί να αποδοθεί κυρίως, στην ύπαρξη των τριχοειδών φαινομένων.

Αναφορικά με τον βαθμό κορεσμού της άμμου σε Diesel, παρατηρήθηκε χαμηλός κορεσμός στην λεπτόκκοκη άμμο ενώ παρουσιάστηκαν υψηλότερα ποσοστά κορεσμού στην διεπιφάνεια των δυο στρωμάτων και ιδιαίτερα στα σημεία που άρχισε το LNAPL να διέρχεται στο στρώμα της μέσης άμμου. Πιο συγκεκριμένα, το ποσοστό κορεσμού με την μεγαλύτερη τιμή ήταν ίσο με 60%, αν και πολλές περιοχές του πλουμίου παρουσίαζαν και χαμηλότερες τιμές ειδικά κατά την διασπορά του Diesel στην μέση άμμο. Σύμφωνα με την μελέτη των Walser et. al. (1999) τα πειραματικά προφίλ κορεσμού εμφανίζουν τιμή ενεργού κορεσμού κοντά στο 100% σε μηδενικό ύψος και ξανά στην διεπιφάνεια δυο στρωμάτων με διαφορετικό πορώδες.

7.5.2 Πείραμα 2°

Για το δεύτερο πείραμα η στρωμάτωση ήταν η ίδια και πραγματοποιήθηκε η μελέτη της ροής του Soltrol 220. Οι συνθήκες ήταν οι ίδιες οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω Πίνακα 7.10.

Ρυθμός εισαγωγής	1ml/min
Όγκος Soltrol 220	110 ml
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	22 °C
Απόσταση κάμερας-δεξαμενής	10 cm
Συγκέντρωση χρωστικής SUDAN III	0,01%
Τρόπος εισαγωγής	επιφανειακά

Πίνακας 7. 10: Συνθήκες 2ου πειράματος
Ακολουθεί στην Εικόνα 7.5 η σειρά των φωτογραφιών που λήφθηκαν από την στιγμή της έναρξης του δεύτερου πειράματος μέχρι τη στιγμή που καμία επιπλέον κίνηση δεν διαπιστώθηκε στο σχηματιζόμενο πλούμιο.



t=5min

t=10min









t=40min

t=60min









t=150min

t=180min

Εικόνα 7. 5: Σειρά φωτογραφιών-Πείραμα 20

Οι εικόνες επεξεργάστηκαν μέσω ειδικών αλγορίθμων σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab. Αρχικά, υπολογίστηκε το Hue (χροιά χρώματος) και στη συνέχεια παράχθηκαν εικόνες στις οποίες με άσπρο χρώμα απεικονίζεται κάθε κόκκινο pixel (δηλαδή αντιστοιχεί σε κάθε σημείο από το οποίο πέρασε ο ρύπος) και με μαύρο χρώμα όλα τα υπόλοιπα pixel της εικόνας. Από την συνένωση των ακρυανών σημείων κάθε εικόνας σχηματίζεται μια γραμμή που αντιστοιχεί στην ακρογραμμή του σχηματιζόμενου πλουμίου. Η απεικόνιση όλων των ακρογραμμών σε μια γραφική παράσταση μας δείχνει συγκεντρωτικά την κίνηση του LNAPL. Για το δεύτερο πείραμα η γραφική παράσταση των ακρογραμμών παρουσιάζεται παρακάτω με το Διάγραμμα 7.7.



Διάγραμμα 7. 7: Προφίλ κίνησης του Soltrol 220 (2ο πείραμα)

Με εφαρμογή του αλγόριθμου Saturation [Παράρτημα Ι] δημιουργούνται τα προφίλ κορεσμού για κάθε φωτογραφία του πειράματος. Στην εικόνα 7.6 συγκεντρώνονται τα προφίλ κορεσμού που αντιστοιχούν σε τέσσερις από τις πιο χαρακτηριστικές φωτογραφίες του συγκεκριμένου πειράματος και απεικονίζουν τον κορεσμό των άμμων σε Soltrol για το δεύτερο πείραμα.







Εικόνα 7. 6: Προφίλ κορεσμού του Soltrol 220 (2ο πείραμα)

Στον Πίνακα 7.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν από την επεξεργασία των εικόνων μέσω των προγραμμάτων της Matlab. Συγκεκριμένα υπολογίζεται ο αριθμός των pixel που αντιστοιχούν σε κάθε ένα διαφορετικό ποσοστό κορεσμού και η αντίστοιχη επιφάνεια που καταλαμβάνεται σε cm².

A/A	Χρόνος (min)	Όγκος LNAPL (ml)	Πλούμιο (pixels)	Μέση τιμή έντασης χονδρής άμμου	Μέση τιμή έντασης μέση άμμος	Περιοχή <20% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 20% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 40% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 60% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 80% κορεσμό LNAPL (cm ²)
1	5	5	1639	138.7	0.0	0.27	0.51	1.10	5.26	0.85
2	30	30	7499	152.3	0.0	0.19	0.70	3.28	14.35	5.98
10	60	60	88702	147.0	170.1	4.50	14.92	25.84	203.30	111.91
11	120	100	111321	152.7	170.2	3.47	17.91	20.38	194.76	178.70

Πίνακας 7. 11: Αποτελέσματα τεχνικής ανάλυσης εικόνων-Πείραμα 2°

Σχολιασμός 2°
υ πειράματος

Στο δεύτερο πείραμα που διεξήχθει χρησιμοποιήθηκε Soltrol 220 και η στρωμάτωση ήταν η ίδια με αυτή του πρώτου πειράματος καθώς επίσης και ο ρυθμός εισαγωγής του ρύπου. Ο ρύπος εισήχθη επιφανειακά και μετακινήθηκε οριζόντια συνολικά 32 cm προς τα δεξιά εκ των οποίων τα 20 cm να αποτελούν την βασική μετακίνηση κατά την διάρκεια του πειράματος. Προς τα αριστερά, η οριζόντια διασπορά που παρατηρήθηκε ήταν 22 cm. Γενικότερα, η οριζόντια διασπορά έλαβε χώρα στην αρχή του πειράματος όταν δηλαδή υπήρχε και επίδραση της αρχικής κλίσης των δημιουργούμενων στρωμάτων και αυτή δεν μεταβλήθηκε σημαντικά κατά την διάρκεια του πειράματος.

Αντίθετα, η κατακόρυφη μετακίνηση λόγω των δυνάμεων βαρύτητας πραγματοποιήθηκε με ρυθμό 0,3 cm/min για την χονδρόκοκκη άμμο και με 0,02 cm/min για την λεπτόκκοκη άμμο. Προκύπτει δηλαδή, ότι το Soltrol στην μέση άμμο μετακινήθηκε με πολύ αργό ρυθμό και εξαπλώθηκε πολύ λίγο, μόλις 2cm συνολικά. Η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση του Soltrol στην μέση άμμο ανήλθε σε 10 cm ενώ η ανάλογη οριζόντια μετακίνηση στην χονδρόκκοκη άμμο με ρυθμό 0,12cm/min αντίστοιχα. Με βάση την μελέτη των Kechavarzi et. al. 2000, η διασπορά του LNAPL μειώθηκε στο στρώμα της μέσης άμμου λόγω μικρότερης διαπερατότητας σε σχέση με την διασπορά που παρατηρήθηκε στην πιο χονδρή άμμο.

Ποσοστό κορεσμού 20 και 40% κυμαινόταν σε χαμηλά επίπεδα κατά την διάρκεια του συγκεκριμένου πειράματος. Γενικά, δεν παρουσιάζονται ούτε πολύ χαμηλές ούτε

πολύ υψηλές συγκεντρώσεις και το ποσοστό κορεσμού με την μεγαλύτερη τιμή είναι αυτό του 60-80% το οποίο και αυξάνεται με το βάθος.

7.5.3 Πείραμα 3°

Για το τρίτο πείραμα η στρωμάτωση άλλαξε καθώς επίσης και ο τρόπος εισαγωγής του ρύπου στην δεξαμενή. Στο τρίτο αλλά και στο τέταρτο πείραμα το στρώμα της χονδρής άμμου ήταν δεύτερο και η εισαγωγή έγινε υπεδάφια στο στρώμα της μέσης άμμου. Οι συνθήκες του πειράματος παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 7.12.

Ρυθμός εισαγωγής	1,5 ml/min
Όγκος Soltrol 220	100 ml
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	22 °C
Απόσταση κάμερας-δεξαμενής	10 cm
Συγκέντρωση χρωστικής SUDAN III	0,01%
Τρόπος εισαγωγής	υπεδάφια

Πίνακας 7. 12 : Συνθήκες 3ου πειράματος

Στην Εικόνα 7.7 παρουσιάζονται δώδεκα φωτογραφίες που λήφθηκαν κατά την διάρκεια του τρίτου πειράματος, σε κατάλληλα χρονικά διαστήματα, ώστε να είναι εύκολα αντιληπτή η κίνηση του ρύπου τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια.



t=5min





t=15min

t=20min



t=25min

t=30min



t=45min

t=60min



t=90min

t=120min



t=150min

t=180min

Εικόνα 7. 7: Σειρά Φωτογραφιών-Πείραμα 3ο

Μέσω της συνένωσης των ακρυανών σημείων κάθε εικόνας σχηματίζεται η ακρογραμμή του σχηματιζόμενου πλουμίου για κάθε φωτογραφία. Η απεικόνιση όλων των ακρογραμμών σε μια γραφική παράσταση μας δείχνει την δυσδιάστατη κίνηση του LNAPL. Για το τρίτο πείραμα η αντίστοιχη γραφική παράσταση παρουσιάζεται επίσης με το Διάγραμμα 7.8.



Διάγραμμα 7. 8: Προφίλ κίνησης του Soltrol 220 (3ο πείραμα)

Στην Εικόνα 7.8 είναι συγκεντρωμένα τα προφίλ κορεσμού των έξι πιο αντιπροσωπευτικών φωτογραφιών του τρίτου πειράματος, όπως αυτά προέκυψαν μετά την επεξεργασία τους μέσω των προγραμμάτων σε Matlab. Οι χάρτες κορεσμού παρέχουν την δυνατότητα της αποτύπωσης του ποσοστού κορεσμού σε κάθε κόκκο άμμου του σχηματιζόμενου πλουμίου.





Εικόνα 7. 8: Προφίλ κίνησης του Soltrol 220 (3ο πείραμα)

Στην συνέχεια υπολογίζεται ο αριθμός των pixel που αντιστοιχούν σε κάθε ένα διαφορετικό ποσοστό κορεσμού και η αντίστοιχη επιφάνεια που καταλαμβάνεται σε cm². Στον Πίνακα 7.13 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μεγέθη για τις φωτογραφίες του τρίτου πειράματος.

A/A	Χρόνος (min)	Όγκος LNAPL (ml)	Πλούμιο (pixels)	Μέση τιμή έντασης χονδρής άμμου	Μέση τιμή έντασης μέσης άμμου	Περιοχή <20% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 20% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 40% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 60% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 80% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 100% κορεσμό LNAPL (cm ²)
1	25	37,5	1917	0	68,36	3,2745	21,8615	0,1178	0,0059	0	0
2	50	75	9193	0	77,61	1,0481	81,2965	0,0932	1,2990	0,0162	0,0021
3	90	100	10247	84,51	73,83	47,0598	91,1017	0,9644	0,2928	0,0015	0
4	120	100	17021	85,64	61,99	4,8518	104,717	2,3598	2,1443	0,1653	0,0012
5	150	100	16159	93,71	72,96	14,9687	140,772	1,7045	2,8005	0,4578	0,006
6	180	100	13177	130,17	77,25	28,6469	72,8682	2,8805	1,4935	0,3571	0,0012

Πίνακας 7. 13: Αποτελέσματα τεχνικής ανάλυσης εικόνων-Πείραμα 3°

Σχολιασμός 3^{ου} πειράματος

Οι βασικές παράμετροι που μεταβλήθηκαν σε αυτό το πείραμα σε σχέση με τα δυο προηγούμενα ήταν η στρωμάτωση, ο ρυθμός εισαγωγής αλλά και ο τρόπος εισαγωγής του LNAPL στο υπερκείμενο στρώμα της άμμου. Σε αυτό αλλά και στο επόμενο πείραμα το υπερκείμενο στρώμα είναι αυτό της μέσης άμμου και η εισαγωγή του ρύπου έγινε υπεδάφια, δηλαδή το σωληνάκι εισαγωγής ήταν μέσα στο πρώτο στρώμα της άμμου σε βάθος 1 cm. με σκοπό να περιοριστεί η κίνηση λόγω της κλίσης των στρωμάτων. Το ύψος του πρώτου στρώματος άμμου ήταν 3 cm και το LNAPL κινήθηκε σε αυτό με ρυθμό 0,06 cm/min. Από την στιγμή που το Soltrol έφτασε την διεπιφάνεια των δυο στρωμάτων και για χρονικό διάστημα μίας ώρας το LNAPL κινήθηκε μόνο οριζόντια και η κατακόρυφη κίνηση ήταν ανύπαρκτη. Στα προφίλ κορεσμού αυτό δεν είναι ξεκάθαρο λόγω της ύπαρξης κλίσης στο δεξί άκρο της δεξαμενής και του ορισμού της διεπιφάνειας των δυο στρωμάτων στο κατώτερο σημείο. Η οριζόντια μετακίνηση ήταν 6 cm αριστερά και 4,5 cm προς τα δεξιά.με ρυθμό οριζόντιας μετακίνησης 0,02 cm/min. Μετά το πέρας μιας ώρας ο ρύπος διέρχεται στο στρώμα της χονδρόκκοκης άμμου, στο δεξί άκρο του στρώματος, όπου υπήρχε μικρή κλίση. Ενώ η συνολική διασπορά στην χονδρόκοκκη άμμο ήταν 0,017 cm/min.

Τα υψηλότερα ποσοστά κορεσμού εμφανίζονται στην διεπιφάνεια μέσης/χονδρής άμμου, η οποία αποτελεί ένα εμπόδιο στην ροή του ρύπου. Αυτό επιβεβαιώνεται και από άλλες μελέτες. Συγκεκριμένα, με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης των Schwille F. (1967) σε στρωματοποιημένα πορώδη μέσα, τα υψηλότερα ποσοστά κορεσμού σε LNAPL μετρήθηκαν στην διεπιφάνεια λιγότερο διαπερατών με περισσότερο διαπερατών στρωμάτων.

7.5.4 Πείραμα 4°

Στο τέταρτο πείραμα μελετήθηκε η ροή του Soltrol 220 στα δυο είδη άμμου. Η εισαγωγή του ρύπου έγινε υπεδάφια και το στρώμα της άμμου με την μικρότερη διαπερατότητα ήταν υπερκείμενο του στρώματος της χονδρόκοκκης άμμου. Οι τιμές των παραμέτρων του πειράματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.14.

Ρυθμός εισαγωγής	1,5ml/min
Όγκος Soltrol 220	100 ml
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	22 °C
Απόσταση κάμερας-δεξαμενής	10 cm
Συγκέντρωση χρωστικής SUDAN III	0,01%
Τρόπος εισαγωγής	Υπεδάφια
Στρωμάτωση	Λεπτή/χονδρή άμμος

Πίνακας	7.	14:	Συνθή	κες 4ου	πειράματα	Iς
						-

Ακολουθεί στην Εικόνα 7.9 η σειρά των φωτογραφιών που λήφθηκαν από την στιγμή της έναρξης του τέταρτου πειράματος μέχρι τη στιγμή που καμία περαιτέρω κίνηση δεν παρατηρήθηκε στο σχηματιζόμενο πλούμιο



t=5min







t=30min









t=90min

t=120min





Εικόνα 7. 9: Σειρά φωτογραφιών-Πείραμα 40

Στο ακόλουθο Διάγραμμα 7.9 παριστάνεται η κίνηση του Soltrol σε δυο διαστάσεις με την βοήθεια των ακρογραμμών που δημιουργήθηκαν μέσω Matlab, για κάθε φωτογραφία που τραβήχτηκε κατά την διάρκεια του πειράματος.



Διάγραμμα 7. 9: Προφίλ κίνησης του Diesel (4ο πείραμα)

Τα προφίλ κορεσμού που αντιστοιχούν σε έξι από τις εικόνες του τέταρτου πειράματος και συνολικά επιτρέπουν την μελέτη της κίνησης και της κατανομής του Diesel, παρουσιάζονται στην ακόλουθη Εικόνα 7.10.





Εικόνα 7. 10: Προφίλ κορεσμού του Diesel (4ο πείραμα)

Μέσω Matlab υπολογίζεται ο αριθμός των pixel που αντιστοιχούν σε κάθε ένα διαφορετικό ποσοστό κορεσμού και η αντίστοιχη επιφάνεια που καταλαμβάνεται σε cm² και στον Πίνακα 7.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν στις εικόνες που επιλέχθηκαν, ως πιο αντιπροσωπευτικές της κίνησης που έλαβε χώρα στηνδεξαμενή.

A/A	Χρόνος (min)	Όγκος LNAPL (ml)	Πλούμιο (pixels)	Μέση τιμή έντασης χονδρής. άμμου	Μέση τιμή έντασης μέσης άμμου	Περιοχή με <20% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 20% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 40% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 60% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 80% κορεσμό LNAPL (cm ²)(Περιοχή με 100% κορεσμό LNAPL (cm ²)
1	5	7,5	766	0	61,6771	0,0331	2,9424	0,0626	0	0	0
2	15	22,5	1239	0	73,8052	0,2339	3,5077	0	0	0	0
3	30	45	8266	77,65	67,8312	1,0574	11,5405	0,5158	0,0321	0,0026	0
4	60	90	15855	93,58	59,3426	8,6641	42,3659	6,4851	1,3910	0,1017	0,0095
5	90	100	17331	90,16	64,9737	12,455	40,6281	6,7290	3,0845	1,4780	0,0657
6	180	100	44566	124,01	77,6011	0,2927	57,3615	11,1292	8,5672	8,7525	3,2363

Πίνακας 7. 15: Αποτελέσματα ανάλυσης εικόνων

Σχολιασμός 4°
υ πειράματος

Στο τέταρτο κατά σειρά πείραμα, μελετήθηκε και πάλι η ροή του Diesel. Η ειδοποιός διαφορά αυτού του πειράματος ήταν ότι η εισαγωγή του ρύπου έγινε σε στρώμα μέσης άμμου που ήταν υπερκείμενο ενός στρώματος χονδρόκκοκης άμμου. Το πρώτο στρώμα είχε ύψος 4,5 cm και το LNAPL κινήθηκε κατακόρυφα σε αυτό, με ρυθμό 0,067 cm/min. Στο συγκεκριμένο πείραμα, η μετάβαση από το ένα στρώμα στο άλλο ήταν πιο γρήγορη, γεγονός που οφείλεται τόσο στο μικρότερο ύψος των στρωμάτων όσο και στην αύξηση του ρυθμού εισαγωγής. Το πλούμιο εξαπλώθηκε περισσότερο οριζόντια παρά κατακόρυφα, με μέγιστη οριζόντια διασπορά τα 8,5 cm αριστερά και τα 8 cm δεξιά και με μέσο ρυθμό οριζόντιας διασποράς ίσο με 0,067 cm/min για το στρώμα της μέσης άμμου και 0,11 cm/min αντίστοιχα, για το στρώμα της άμμου σε Diesel, που κυρίως παρατηρήθηκε κατά την διάρκεια αυτού του πειράματος ήταν ίσος με 50%.

7.5.5 Πείραμα 5°

Για το πέμπτο κατά σειρά πείραμα έγινε επαναφορά στην αρχική στρωμάτωση, δηλαδή ένα στρώμα χονδρής άμμου πάνω από ένα στρώμα μέσης άμμου. Ωστόσο η βασική διαφορά σε σχέση με το πρώτο πείραμα είναι ότι η εισαγωγή του Diesel έγινε υπεδάφια. Οι συνθήκες του πειράματος παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 7.16.

Ρυθμός εισαγωγής	1ml/min
Όγκος Diesel	100 ml
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	22 °C
Απόσταση κάμερας-δεξαμενής	10 cm
Συγκέντρωση χρωστικής SUDAN III	0,01%
Τρόπος εισαγωγής	υπεδάφια

Πίνακας 7. 16: Συνθήκες 5ου πειράματος

Στην Εικόνα 7.11 περιλαμβάνονται δώδεκα φωτογραφίες που λήφθηκαν κατά την διάρκεια του πέμπτου πειράματος σε κατάλληλα χρονικά διαστήματα ανάλογα με τον ρυθμό κίνησης του Diesel ώστε να είναι εύκολα αντιληπτή η τρισδιάστατη κίνηση του ρύπου.



t=5min

t=10min



t=15min

t=30min



t=45min

t=60min



t=75min

t=90min



t=120min

t=150min



t=180min

t=210m

Εικόνα 7. 11: Σειρά φωτογραφιών-Πείραμα 5°

Η απεικόνιση όλων των ακρογραμμών σε μια γραφική παράσταση μας δείχνει συγκεντρωτικά την κίνηση του LNAPL. Στο παρακάτω Διάγραμμα 7.10 διακρίνεται βήμα-βήμα η κίνηση του Diesel τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια.



Διάγραμμα 7. 10: Προφίλ κίνησης του Diesel (5ο πείραμα)

Στην Εικόνα 7.12 συγκεντρώνονται τα προφίλ κορεσμού, που αντιστοιχούν σε 6 φωτογραφίες του πέμπτου πειράματος. Με την προσεκτική παρατήρηση αυτών των εικόνων γίνεται αντιληπτή η κατανομή του ρύπου στα δυο στρώματα της άμμου

κατά την διάρκεια του πειράματος και το ποσοστό κορεσμού του μελετούμενου LNAPL σε κάθε σημείο του σχηματιζόμενου πλουμίου.





Εικόνα 7. 12: Προφίλ κορεσμού του Diesel (5ο πείραμα)

Στον Πίνακα 7.17 παρουσιάζονται οι επιφάνειες σε cm² που καλύπτουν διαφορετικά ποσοστά κορεσμού κατ'αντιστοιχία με τις εικόνες που επιλέχθηκαν ως πιο αντιπροσωπευτικές της κίνησης που έλαβε χώρα στην δεξαμενή κατά την διάρκεια του πέμπτου πειράματος.

A/A	Χρόνος (min)	Όγκος LNAPL (ml)	Πλούμιο (pixels)	Μέση τιμή έντασης χονδρής άμμου	Μέση τιμή έντασης μέσης άμμου	Περιοχή με <20% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 20% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 40% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 60% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 80% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 100% κορεσμό LNAPL (cm ²)
1	30	30	44597	140,48	0	0,022	0,070	1,843	19,90	4,727	1,668
2	45	45	175708	126,49	110,6307	10,279	17,853	22,812	88,83	11,029	2,420
3	60	60	124691	117,31	108,506	19,749	31,959	36,783	105,36	10,420	2,477
4	120	100	221689	162,94	149,1225	37,952	24,138	40,034	113,63	79,390	6,290
5	150	100	155599	151,37	146,3650	49,781	28,667	32,744	29,268	158,440	34,850
6	180	100	199674	186,33	166,8356	68,890	18,115	36,340	74,511	140,554	12,670

Πίνακας 7. 17: Αποτελέσματα επεξεργασίας εικόνων

Σχολιασμός

Κατά την διάρκεια του πέμπτου πειράματος, πραγματοποιήθηκε η ενστάλαξη 100 ml Diesel με ρυθμό 1 ml/min. Αρχικά, σχηματίστηκε ένα πλούμιο που εκτεινόταν κατά 7 cm δεξιά, από το σημείο εισαγωγής του LNAPL και κατά 3 cm αριστερά, ενώ σε 30 min διήνυσε με κατακόρυφη κίνηση όλο το στρώμα της χονδρόκοκκης άμμου ύψους 10 cm. Συγκεκριμένα, ο ρυθμός της κατακόρυφης διασποράς στο στρώμα της χονδρόκοκκης άμμου ήταν 0,33 cm/min. Αναφορικά, με το στρώμα της μέσης άμμου παρατηρήθηκε σημαντική κατακόρυφη και οριζόντια διασπορά σε αντίθεση με το αντίστοιχο πείραμα με χρήση του Soltrol 220. Η οριζόντια μετακίνηση του Diesel στο στρώμα της χονδρόκοκκης άμμου υπολογίστηκε ίση με 0,67 cm/min.

Επιπλέον, η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση ήταν 18cm, η ανάλογη μέγιστη οριζόντια μετακίνηση προς τα δεξιά ήταν 12 cm και η αντίστοιχη τιμή προς τα αριστερά ήταν 11 cm αντίστοιχα. Ο βαθμός κορεσμού της χονδρόκοκκης άμμου σε Soltrol 220, που παρατηρήθηκε σε μεγαλύτερη έκταση ήταν ίσος με 60% και περίπου στα ίδια επίπεδα ήταν και ο βαθμός κορεσμού στο στρώμα της μέσης άμμου.

Οι Van Geel et. al.(1994) παρατήρησαν ότι κατά την διάρκεια δυσδιάστατων πειραμάτων ροής ο κορεσμός του LNAPL είχε θετική συσχέτιση με τον συνολικό αριθμό των pixels.

7.5.6 Πείραμα 6°

Για το έκτο και τελευταίο πείραμα διαμορφώθηκε ένα στρώμα χονδρής άμμου πάνω από ένα στρώμα μέσης άμμου και μελετήθηκε η ροή του Soltrol 220. Οι τιμές των βασικών παραμέτρων του πειράματος παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω Πίνακα 7.18.

Ρυθμός εισαγωγής	1ml/min
Όγκος Soltrol 220	100 ml
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	22 °C
Απόσταση κάμερας-δεξαμενής	10 cm
Συγκέντρωση χρωστικής SUDAN III	0,01%
Τρόπος εισαγωγής	επιφανειακά

Πίνακας 7. 18 : Συνθήκες 6ου πειράματος

Ακολουθεί στην Εικόνα 7.13 η σειρά των φωτογραφιών που λήφθηκαν από την στιγμή της έναρξης του έκτου πειράματος μέχρι τη στιγμή που καμία περαιτέρω ίνηση δεν διαπιστώθηκε στο σχηματιζόμενο πλούμιο.



t=5min







t=45min



t =60min

t=90min



t=120min t=150min Εικόνα 7. 13: Σειρά Φωτογραφιών-Πείραμα 6

Για το έκτο πείραμα η γραφική παράσταση των ακρογραμμών του σχηματιζόμενου πλουμίου που αντιστοιχούν στις πιο αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες του πειράματος, παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 7.11.



Διάγραμμα 7. 11: Προφίλ κίνησης του Soltrol 220 (60 πείραμα)

Στην Εικόνα 7.14 παρουσιάζονται τα προφίλ κορεσμού που αντιστοιχούν σε 7 από τις φωτογραφίες του έκτου κατά σειρά πειράματος και από τα οποία προκύπτουν συμπεράσματα για την κατανομή του Soltrol στα δυο είδη άμμου της δεξαμενής.





t=30min



t=90min



t=120min





t=180 min



Στον Πίνακα 7.19 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπολογισμού του αριθμού των pixels που αντιστοιχούν σε κάθε ένα διαφορετικό ποσοστό κορεσμού και η αντίστοιχη επιφάνεια που καταλαμβάνεται σε cm², για τις εικόνες που επιλέχθηκαν ως πιο περιγραφικές της κίνησης που έλαβε χώρα στην δεξαμενή.

A/A	Χρόνος (min)	Όγκος LNAPL (ml)	Πλούμιο (pixels)	Μέση τιμή έντασης χονδρής άμμου	Μέση τιμή έντασης μέσης άμμου	Περιοχή με<20% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 20% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 40% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 60% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 80% κορεσμό LNAPL (cm ²)	Περιοχή με 100% κορεσμό LNAPL (cm ²)
1	10	10	19238	145,3917	0	0,0005	0,0068	0,0897	2,3338	13,6061	9,1050
2	30	30	53561	177,9582	0	0	0,0005	0,0412	0,6270	4,9798	39,6910
3	90	90	20347	151,3120	0	0	0	0,0007	5,0011	44,2865	77,8485
4	120	100	225103	143,7763	123,102	0,0445	2,1626	1,9563	34,1435	81,0325	95,37
5	150	100	225269	135,0402	117,930	0,1705	4,5770	3,2191	48,9087	101,2866	70,1797
6	180	100	311022	143,7602	116,645	0,2539	10,9784	4,1086	44,8715	108,4407	104,2176

Σχολιασμός

Κατά την διάρκεια της πρώτης μισής ώρας εισαγωγής του ρύπου, ο ρυθμός της κατακόρυφης διασποράς στο στρώμα της χονδρόκοκκης άμμου ήταν 0,12 cm/min. Στην συνέχεια, μειώθηκε σε 0,05 cm/min και αυτός ο ρυθμός διατηρήθηκε μέχρι το Soltrol 220 να φτάσει την διεπιφάνεια των δυο στρωμάτων. Από την στιγμή εκείνη, η κατακόρυφη κίνηση περιορίστηκε, όπως συνέβη και στο προηγούμενο αντίστοιχο πείραμα 2, με την τιμή του ρυθμού της κατακόρυφης μετακίνησης του Diesel στην μέση άμμο να υπολογίζεται ίση με 0,025 cm/min. Αναφορικά με την οριζόντια εξάπλωση για το στρώμα της χονδρόκοκκης άμμου παρατηρήθηκε μετακίνηση κατά 9 cm δεξιά μέχρι να φτάσει την διεπιφάνεια και κατά 7 cm προς τα αριστερά, αντίστοιχα. Στην συνέχεια 5 cm δεξιά και 4 cm αριστερά μετά την επαφή του ρύπου με το στρώμα της μέσης άμμου. Ο ρυθμός της οριζόντιας μετακίνησης ήταν 0,1 cm/min κατά μέσο όρο και για τις δυο κατευθύνσεις. Ενώ, στο υπερκείμενο στρώμα αυξήθηκε σε 0,17 cm/min μετά την επαφή με το δεύτερο στρώμα. Η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση ήταν 12 cm ενώ η μέγιστη οριζόντια ήταν 14 cm προς τα δεξιά και 9 cm προς τα αριστερά, αντίστοιγα. Ο βαθμός κορεσμού της άμμου κυμαινόταν σε 70-80% στην μεγαλύτερη έκταση του σχηματιζόμενου πλουμίου. Στον συγκεντρωτικό Πίνακα 7.20 παρουσιάζονται οι τιμές του μέσου ρυθμού οριζόντιας και κατακόρυφης διασποράς καθώς και η μέγιστη οριζόντια και κατακόρυφη εξάπλωση για όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν.

Αριθμός πειράματος /Παράμετρος	Μέ ρυθμός α διασ: (cm/	έσος οριζόντιας ποράς /min)	Μέσος κατακό διασπ (cm/i	ρυθμός ορυφης οράς min)	Μ: ορι δια (έγιστη ζόντια ασπορά mm)	Μέγιστη κατακόρυφη διασπορά (mm).
	Χονδρή άμμος	Μέση άμμος	Χονδρή άμμος	Μέση άμμος	Δεξιά	Αριστερά	
1(Diesel)	0,17	0,13	0,3	0,13	4	6	22
2(Soltrol)	0,12	0,01	0,21	0,02	20	22	13
3 (Soltrol)	0,09	0,02	0,11	0,06	4,5	6	5,5

Πίνακας 7. 20: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων πειραμάτων ροής

4(Diesel)	0,11	0,067	0,12	0,13	8	8,5	7
5(Soltrol)	0,09	0,1	0,23	0,1	12	11	18
6(Diesel)	0,1	0,17	0,25	0,025	14	9	12

Σύμφωνα με τον παραπάνω συγκεντρωτικό πίνακα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Η κατακόρυφη ταχύτητα ροής στην χονδρή άμμο ήταν πάντα μεγαλύτερη από ότι στην μέση άμμο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην διαφορετική τιμή του συντελεστή διαπερατότητας του Diesel για τα δυο είδη άμμου. Ο συντελεστής διαπερατότητας υπολογίστηκε ίσος με 1,47 *10⁻⁶ m² για την χονδρή και 8,53 *10⁻⁶m² για την μέση άμμο αντίστοιχα. Η χονδρή άμμος επιτρέπει την κίνηση του LNAPL διαμέσω των πόρων της πιο εύκολα από ότι η μέση άμμος. Συγκεκριμένα, ο κατακόρυφος ρυθμός ροής του Diesel στην μέση άμμο ήταν σχεδόν ο μισός από τον αντίστοιχο στην χονδρόκοκκη άμμο.

Επιπλέον, η κατακόρυφη ταχύτητα ροής ήταν αισθητά μικρότερη στο στρώμα της χονδρής άμμου κατά το δεύτερο πείραμα με Diesel, καθώς η διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ μέσης και χονδρής άμμου εμπόδιζε την γρήγορη μετάβαση του στο υποκείμενο στρώμα της χονδρής άμμου. Στα πειράματα ροής με Diesel διαπιστώθηκε επίσης ότι η ροή στην μέση άμμο κατά την κατακόρυφη διάσταση, είναι επίσης σημαντική, εν αντιθέσει με τα πειράματα του Soltrol κατά την διάρκεια των οποίων η κίνηση του LNAPL στο στρώμα της μέσης άμμου, ειδικά όταν είναι το δεύτερο στρώμα, ήταν πολύ περιορισμένη. Ο ρυθμός της κατακόρυφης διασποράς του Soltrol 220 ήταν επίσης μεγαλύτερος στο στρώμα της χονδρής άμμου από ότι στο στρώμα της μέσης άμμου και μικρότερος από τους αντίστοιχους ρυθμούς του Diesel. Όσον αφορά την κατακόρυφη κίνηση στο στρώμα της μέσης άμμου, Στα πειράματα ένα και τρία η κατακόρυφη διασπορά ήταν πολύ περιορισμένη και έλαβε χώρα με αργό ρυθμό.

7.6 Καμπύλες P-S –Εξίσωση Van Genuchten

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων πίεσης και για τα δυο είδη LNAPL και στα δυο είδη άμμου, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στον Πίνακα 7.21 και

κατασκευάζεται το Διάγραμμα 7.12 στο οποίο παριστάνεται η πίεση τριχοειδούς σε συνάρτηση με τον κορεσμό του εδάφους για κάθε δυνατό συνδυασμό.

	Πίεση Soltrol (hpa)		Πίεση Diesel (hpa)		
Saturation (%)	Χονδρή άμμος	Μέση άμμος	Χονδρή άμμος	Μέση άμμος	
0	-100	-80	-200	-150	
20	-40	-30	-120	-80	
80	-15	-5	-70	-20	
100	0	0	0	0	

Πίνακας 7. 21 Αποτελέσματα μέτρησης τριχοειδούς δυναμικού



Διάγραμμα 7. 12: Χαρακτηριστικές καμπύλες P-S

Είναι προφανές ότι η σχέση μεταξύ του βαθμού κορεσμού της άμμου σε LNAPL και της πίεσης τριχοειδούς δυναμικού δεν μπορεί να περιγραφεί μέσω μιας γραμμικής σχέσης αλλά παριστάνεται με μια σιγμοειδή καμπύλη. Ωστόσο, για το ίδιο πορώδες μέσο η μορφή της καμπύλης εξαρτάται από την επιφανειακή τάση των υγρών και την γωνία επαφής μεταξύ του ρευστού και των πόρων του μέσου. (Sharma et al. 2000). Συγκεκριμένα, η πίεση μειώνεται όσο μειώνεται η επιφανειακή τάση μεταξύ των ρευστών σύμφωνα με την μελέτη των Sharma et al. 2003. Επιπλέον, η πίεση είναι μεγαλύτερη στην μέση άμμο και αυτό οφείλεται στο μέγεθος των πόρων.

Για συστήματα δυο φάσεων οι εξισώσεις P-S προκύπτουν με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα και επαληθεύονται με την βοήθεια εμπειρικών μαθηματικών εξισώσεων που αναπτύχθηκαν από παλαιότερους μελετητές όπως οι Brooks and Corey 1966, Van Genuchten 1980, Parker et al. 1987, οι οποίοι πρότειναν μια γενικευμένη εξίσωση του μοντέλου Van Genuchten η οποία είναι η εξής (7.1):

$$\overline{S}_{j}^{ij} = \frac{S_{j}^{ij} - S_{m}}{(1 - S_{m})} = [1 + (a_{ij} |P|_{ij})^{n}]^{-m} P_{ij} > 0$$
(7.1)
$$\overline{S}_{j}^{ij} = 1 P_{ij} \le 0$$

Όπου: $\overline{S}_{j}^{\ ij}$ ο ενεργός κορεσμός, $S_{j}^{\ ij}$ ο κορεσμός, S_{m} ο υπολειματικός κορεσμός, a_{ij} η σταθερά Van Genuchten και P_{ij} η πίεση τριχοειδούς δυναμικού. Η σχέση 7.1 ισχύει για κάθε σύστημα δύο φάσεων. Στην παρούσα εργασία μελετάται εάν η σχέση μεταξύ πίεσης και ποσοστού κορεσμού του εδάφους σε LNAPL για συστήματα δύο φάσεων επαληθεύονται με το μοντέλο Van Genuchten. Επιπλέον, προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες τιμές των σταθερών α, n, m ώστε τα αποτελέσματα να προσεγγίζουν περισσότερο αυτά που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις.

Έαν λυθεί η εξίσωση 7.1 ως προς την πίεση του τριχοειδούς δυναμικού (P) η $(S^{\frac{1}{m}}-1)^{\frac{1}{n}}$

εξίσωση λαμβάνει την μορφή: $P = \frac{(S^{\frac{1}{m}} - 1)^{\frac{1}{n}}}{a}$ (7.2)

Συνεπώς, μέσω του αλγόριθμου με την ονομασία, Veltistopoihsi [Παράρτημα Ι] και γνωρίζοντας το εύρος των σταθερών α, n, αναζητήθηκε η βέλτιστη τιμή αυτών των σταθερών, ώστε για κάθε πείραμα να προκύπτει αποτέλεσμα με την μικρότερη δυνατή απόκλιση από το αντίστοιχο πειραματικό.

Στον ακόλουθο πίνακα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν με βάση την εξίσωση του VanGenuchten.

Soltrol -Μέση άμμος						
S (%)	Ρ _{πειραματικό} (cm)	P _{VanGenuchten} (cm)	n	a		
0	80	79,98	8,92	0,04		
20	30	30,03	8,92	0,04		
80	10	21,72	8,92	0,04		
100	0	0	8,92	0,04		

Πίνακας 7. 22 Προσδιορισμός παραμέτρων α, n Van Genuchten

Soltrol-Χονδρή άμμος						
S	P _{πειραματικό}	P _{VanGenuchten}				
(%)	(cm)	(cm)	n	a		
0	100	103,4975	9,46	0,0297		
20	40	41,34671	9,46	0,0297		
80	15	30,49536	9,46	0,0297		
100	0	0	9,46	0,0297		
Diesel-Μέση άμμος						
S	P _{πειραματικό}	P _{VanGenuchten}				
(%)	(cm)	(cm)	n	a		
0	150	150,0238	8,01	0,0248		
20	60	49,64458	8,01	0,0248		
80	30	34,55512	8,01	0,0248		
100	0	0	8,01	0,0248		
Diesel-Χονδρή άμμος						
S	P _{πειραματικό}	P _{VanGenuchten}				
(%)	(cm)	(cm)	n	a		
0	200	200,094	9,38	0,015		
20	80	79,24396	9,38	0,015		
80	20	58,28858	9,38	0,015		
100	0	0	9,38	0,015		

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα, προκύπτει ότι οι τιμές των παραμέτρων δεν είναι σταθερές αλλά εξαρτώνται από την φύση του ρευστού, η οποία είναι ανεξάρτητη από την πειραματική διαδικασία αλλά και από το πορώδες μέσο. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από άλλους μελετητές όπως οι Kechavarzi et al. 2005, Lenhard et al. 2003, οι οποίοι προσδιόρισαν τις καλύτερες τιμές αυτών των παραμέτρων για τα είδη των ρευστών και των μέσων που μελέτησαν. Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα μελέτη οι τιμές της παραμέτρου α, που αντιστοιχούν στην κατακόρυφη θέση της καμπύλης P-S, είναι μεγαλύτερες για την μέση άμμο. Επιπλέον, αναφορικά με την σχέση της τιμής της παραμέτρου α με το είδος του ρευστού, παρατηρήθηκε ότι για το Soltrol οι τιμές της παραμέτρου ήταν μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για το Diesel.

Η τιμή της παραμέτρου η αντικατοπτρίζει την κλίση της καμπύλης P-S και σχετίζεται άμεσα με την κοκκομετρία του πορώδους μέσου. Συγκεκριμένα, η τιμή της παραμέτρου η είναι μεγαλύτερη για την μέση άμμο και στα δυο είδη LNAPL που μελετήθηκαν. Το γεγονός αυτό, αποδεικνύει ότι η καμπύλη P-S που αντιστοιχεί σε πιο λεπτόκοκκα εδάφη είναι πιο πλατιά από την αντίστοιχη σιγμοειδή καμπύλη για χονδρόκοκκο έδαφος.



Διάγραμμα 7. 13:Καμπύλες P-S για Soltrol στη μέση άμμο, προσδιοριζόμενες πειραματικά και με την εξίσωση Van Genuchten.



Διάγραμμα 7. 14: Καμπύλες P-S για το Soltrol στη χονδρή άμμο, προσδιοριζόμενες πειραματικά και με την εξίσωση Van Genuchten.



Διάγραμμα 7. 15: Καμπύλες P-S, για το Diesel στη μέση άμμο, προσδιοριζόμενες πειραματικά και με την εξίσωση Van Genuchten.



Διάγραμμα 7. 16: Καμπύλες P-S, για το Diesel σε χονδρή άμμο, προσδιοριζόμενες πειραματικά και με την εξίσωση Van Genuchten.

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, προκύπτει ότι το μοντέλο Van Genuchten μπορεί να εφαρμοστεί για δυσδιάστατα πειράματα ροής LNAPL σε αμμώδη εδάφη δίνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα.

Συνεπώς, οι εξισώσεις Van Genuchten για τους διαφορετικούς συνδυασμούς άμμου και ρύπου που μελετήθηκαν διαμορφώνονται ως εξής:

1. Για την ροή Soltrol 220 σε μέση άμμο:

$$S = [1 + (aP)^n]^{-m} = [1 + (0,04P)^{8,92}]^{0,887}$$

2. Για την ροή Soltrol 220 σε χονδρή άμμο:

$$S = [1 + (aP)^{n}]^{-m} = [1 + (0,0297P)^{9,46}]^{0,894}$$

3. Για την ροή Diesel σε μέση άμμο:

$$S = [1 + (aP)^{n}]^{-m} = [1 + (0,0248P)^{8,01}]^{0,875}$$

4. Για την ροή Diesel σε χονδρή άμμο:

$$S = [1 + (aP)^n]^{-m} = [1 + (0,015P)^{9,38}]^{0,893}$$

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις και το ποσοστό κορεσμού που προκύπτει από τα αντίστοιχα προφίλ για κάθε πείραμα είναι δυνατόν να υπολογιστεί η πίεση σε κάθε σημείο του πλουμίου.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8° : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων της παρούσας εργασίας προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Η ροή των LNAPL σε ένα πορώδες μέσο εξαρτάται από τις δυο πιο σημαντικές ιδιότητες του εδάφους, το πορώδες και την διαπερατότητα. Το πορώδες των εδαφών υπολογίστηκε με βάση τον εμπειρικό τύπο των Karmen-Kozeny ίσο με 0,42 για την χονδρή άμμο και 0,37 για την μέση άμμο, αντίστοιχα Ο συντελεστής υδροπερατότητας για τα ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν, υπολογίστηκε μέσω υδραυλικών πειραμάτων, ίσος με 0,015 cm/s για τη μέση και 0,025cm/s για τη χονδρή άμμο, αντίστοιχα. Όπως ήταν αναμενόμενο, η ροή στο στρώμα της μέσης άμμου έλαβε χώρα με μικρότερη ταχύτητα. Συγκεκριμένα, ο μέσος ρυθμός κατακόρυφης ροής του Diesel στην μέση άμμο υπολογίστηκε σε 0,13 cm/min κατά μέσο όρο, ενώ η αντίστοιχη τιμή για την χονδρή άμμο υπολογίστηκε σε 0,33 cm/min, αντίστοιχα Για το Soltrol 220 ο μέσος ρυθμός κατακόρυφης ροής στην μέση άμμο ήταν 0,03cm/min και 0,05 cm/min για την χονδρή άμμο, αντίστοιχα.
- Η ροή των LNAPL εξαρτάται από τις ιδιότητες του ρευστού. Στα πειράματα ροής που διεξήχθηκαν, το Diesel που έχει μεγαλύτερο ιξώδες και μεγαλύτερη πυκνότητα από το Soltrol 220, κινήθηκε πιο γρήγορα. Το φαινόμενο αυτό αιτιολογείται με το ότι το ρευστό με την μεγαλύτερη πυκνότητα κινείται πιο γρήγορα υπό την επίδραση μεγαλύτερων βαρυτικών δυνάμεων, οι οποίες υπερισχύουν των δυνάμεων τριχοειδούς δυναμικού. Το σχηματιζόμενο πλούμιο σε όλα τα πειράματα με Diesel ήταν μεγαλύτερο από το αντίστοιχο με Soltrol.
- Ο βαθμός κορεσμού του LNAPL ήταν μεγαλύτερος στην διεπιφάνεια μεταξύ μέσης και χονδρής άμμου. Αυτό συμβαίνει επειδή το στρώμα της μέσης άμμου όταν είναι υπερκείμενο του στρώματος της χονδρής άμμου, αποτελεί ένα εμπόδιο τριχοειδούς (capillary barrier). Το φαινόμενο αυτό έγινε ιδιαίτερα αντιληπτό κατά την διάρκεια του τρίτου πειράματος κατά το οποίο η διαχωριστική επιφάνεια των δυο στρωμάτων εμποδίζε το LNAPL να διέλθει στο στρώμα της χονδρής άμμου. Στο αντίστοιχο πείραμα με το Diesel, ο

αυξημένος ρυθμός ροής και η μεγαλύτερη πυκνότητα (μεγαλύτερες βαρυτικές δυνάμεις) υπερνίκησαν τις δυνάμεις τριχοειδούς σε μικρότερο χρονικό διάστηκα με συνέπεια το Diesel να εξαπλώθεί και στο στρώμα της χονδρής άμμου. Γενικότερα, προκύπτει ότι ο κορεσμός στην διεπιφάνεια των δυο στρωμάτων αυξάνει τόσο όσο μειώνεται η πίεση των τριχοειδών στην διαχωριστική επιφάνεια των στρωμάτων.

- Αντίθετα, στην περίπτωση που το στρώμα της χονδρής άμμου είναι υπερκείμενο του στρώματος της μέσης άμμου, παρατηρήθηκε ότι η διεπιφάνεια των δυο στρωμάτων δεν μπορεί να συγκρατήσει ισχυρά τον ρύπο από το να εισέλθει στο επόμενο στρώμα.
- Ο βαθμός κορεσμού του LNAPL έχει θετική συσχέτιση με την ένταση του χρώματος, για τον λόγο αυτό, στην χονδρόκοκκη άμμο εμφανίστηκαν μεγαλύτερα ποσοστά κορεσμού σε σχέση με την μέση άμμο.
- Στα πειράματα που το στρώμα της χονδρόκοκκης άμμου ήταν υπερκείμενο, η επικρατούσα ροή ήταν η κατακόρυφη για το στρώμα της χονδρής άμμου, ενώ οι δυνάμεις τριχοειδούς στο στρώμα της μέσης άμμου εξανάγκαζαν το ρευστό να κινηθεί κυρίως οριζόντια. Κατά την διάρκεια των δυο πρώτων πειραμάτων ήταν φανερή η επίδραση των δυνάμεων τριχοειδούς στην ανάπτυξη της οριζόντιας διασποράς.
- Επίσης, εξετάστηκε η επίδραση της αύξησης του ρυθμού ροής αλλά και της υπεδάφιας εισαγωγής του ρύπου σε σχέση με την επιφανειακή. Το σχηματιζόμενο πλούμιο, στα πειράματα με τον μεγαλύτερο ρυθμό εισαγωγής, ήταν μεγαλύτερο από ότι στα υπόλοιπα. Επιπλέον, η υπεδάφια ροή εξασφαλίζει πιο γρήγορη εξάπλωση προς όλες τις διευθύνσεις καθώς δεν υφίσταται χρονική καθυστέρηση για την υπερνίκηση των επιφανειακών δυνάμεων.
- Η τεχνική ανάλυσης εικόνων εξασφαλίζει την ποιοτική αποτύπωση του κορεσμού του εδάφους, σε κάθε σημείο του σχηματιζόμενου πλουμίου για κάθε χρονική στιγμή λήψης της φωτογραφίας, βασιζόμενη στην χροιά και την

ένταση του χρώματος. Η εφαρμογή της διευκολύνει την μελέτη της κίνησης των ρύπων στην ακόρεστη ζώνη.

- Η εξίσωση Van Genucthen μπορεί να εφαρμοστεί για δυσδιάστατα πειράματα ροής με μεγάλη αξιοπιστία. Μεγαλύτερη σύγκλιση παρουσιάστηκε στα πειράματα με το Soltrol 220.
- Οι τιμές της παραμέτρου α του μοντέλου Van Genuchten ήταν μεγαλύτερες για το Soltrol 220 σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για το Diesel.
- Η τιμή της παραμέτρου η είναι μεγαλύτερη για την μέση άμμο και στα δυο είδη LNAPL που μελετήθηκαν. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την εξάρτηση μεταξύ αυτής της παραμέτρου η και της κοκκομετρίας του πορώδους μέσου.
- Η ακόρεστη ζώνη αποτελεί φυσικό εμπόδιο των ρύπων και δύναται να μειώσει σημαντικά το ρυπαντικό φορτίο που εισέρχεται στον υδροφορέα, ειδικότερα, όταν ένα στρώμα μικρότερης κοκκομετρίας είναι υπερκείμενο ένος στρώματος μεγαλύτερης κοκκομετρίας. Για το λόγο αυτό, η ακόρεστη ζώνη θα πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπ'όψην κατά την εφαρμογή μοντέλων υπόγειας ροής.

Προτάσεις

Για την περαιτέρω μελέτη της κίνησης και της διασποράς των LNAPL στην ακόρεστη ζώνη, με σκοπό την ολοκληρωμένη αντιμετώπιση των προβλημάτων ρύπανσης του υπεδάφους προτείνονται τα εξής:

- Μελέτη της κίνησης και της διασποράς και άλλων LNAPL, ώστε να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με τις ιδιότητες των ρευστών που επηρεάζουν περισσότερο την διασπορά τους.
- Πρόβλεψη της συμπεριφοράς του LNAPL και του ποσοστού κατακράτησής του σε διαφορετικά είδη εδαφών με στόχο την καλύτερη αντιμετώπιση του προβλήματος της υπεδάφιας ρύπανσης.
- Μελέτη της κίνησης και των DNAPL υπό τις ίδιες συνθήκες, ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά που προέκυψαν από την μελέτη της κίνησης των LNAPL.
- Μελέτη της επίδρασης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στην κίνηση των LNAPL.
- Ανάλυση της εκροής της δεξαμενής με στόχο τον εντοπισμό του ποσοστού κατακράτησης του ρύπου από το εκάστοτε πορώδες μέσο.
- Εφαρμογή μοντέλων ροής που να λαμβάνουν υπ'όψην τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην ακόρεστη ζώνη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξένη:

- Van Geel, P. J., Sykes J. F., (1994) "Laboratory and model simulations of a LNAPL spill in a variably-saturated sand: 1: Laboratory experiment and image analysis Techniques", Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 17 pp. 1-25.
- E. L. Wipfler, M. Ness, G. D. Breedveld, A. Marsman, S.E.A.T.M. van der Zee, "Infiltration and redistribution of LNAPL into unsaturated layered porous media", Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 71 pp. 47-66.
- Radhey S. Sharma, Mostafa H.A Mohamed, "An experimental investigation of LNAPL migration in an unsaturated/saturated sand", Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 70 pp. 305-313.
- 4. Head, K.H. (1992) "Manual of soil laboratory testing", Volume 1, London.
- Kechavarzi C., Soga K. and Illangasekare T.H. (2005) "Two-dimensional laboratory simulation of LNAPL infiltration and redistribution in the vadose zone" Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 76, pp. 211-233.
- A. Wilson (1988) "What color is color?" The Electronic System Design Magazine, pp. 38-44
- Christophe J.G Darnault, James A. Throop, David A. DiCarlo Alon Rimmer, Tammo S. Steenhuis, J-Yves Parlange (1997)"Visualization by light transmission of oil and water contents in transient two-phase flow fields", Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 31 pp. 337-348.
- C. Kechavarzi, K. Soga, P. Wiart, (2000), "Multispectral image analysis method to determine dynamic fluid saturation distribution in two-dimensional three-fluid phase flow laboratory experiments", Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 46 pp. 265-593.
- Gabriele S. Walser, Tissa H. Illangasekare, Arthur T. Corey (1999) "Retention of liquid contaminants in layered soils", Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 39 pp. 91-108.
- 10. Schwille F. (1967) Petroleum contamination of the subsoil-a hydrological problem In Hepple, P. (ED) **The Joint Problems of the oil and water Industries**. The

Institute of Petroleum, London England.

 Simantiraki F., Aivalioti M., Gidarakos E., «LNAPL infiltration and distribution in unsaturated porous media-implementation of an image analysis technique. Submitted to Desalination.

Ελληνική βιβλιογραφία:

- Αιβαλιώτη Μ., «Υπόγεια ροή και μεταφορά ρύπων στην ακόρεστη ζώνη», Εργασία στο Νέου Μεταπτυχιακού πρόγραμματος σπουδών «Περιβαλλοντική και Υγειονομική Μηχανική», 2005, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ. «Τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών και υπογείων υδάτων από επικίνδυνους ρύπους», 2005, Εκδόσεις Ζυγός, Θεσσαλονίκη.
- Καρατζάς Γ., Ακαδημαϊκές σημειώσεις του Μαθήματος «Υπόγεια ροή και μεταφορά ρύπων, 2002, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- 4. Κουμπούρης Ε., «Ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου προσομοίωσης PTC στον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής Λιμένα Χερσονήσου-Ηρακλείου», Διπλωματική Εργασία, 2005, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Τσότσος Στ., «Εδαφομηχανική-Θεωρία-Μέθοδοι-Εφαρμογές»,1991, Εκδόσεις Πολυχρονίδη, Θεσσαλονίκη.
- **6.** ΚΥΑ 955Β-ΦΕΚ 31-12-1986 «Εγκριση Προδιαγραφών και επί τόπου δοκιμών εδαφομηχανικής».
- Κλειδοπούλου Μ., Βαβαδάκης Δ., Εργαστηριακές σημειώσεις για το μάθημα «Υδρογεωλογία και υδροτεχνικά έργα», 2005, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: Αλγόριθμοι Matlab

Αλγόριθμοι σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab

Ο πρώτος αλγόριθμος επεξεργάζεται τις εικόνες με βάση τους τύπους της Matlab, οι οποίοι υπολογίζουν την χροιά του χρώματος σε συνάρτηση με τον αρίθμό των κόκκινων πράσσινων και μπλε pixels.

```
function final_image()
```

```
% processing('13-08-2008 049.jpg','hue_13-08-2008 049.jpg','intensity_13-08-2008 049.jpg',1);
```

```
% processing('13-08-2008 050.jpg','hue_13-08-2008 050.jpg','intensity_13-08-2008 050.jpg',1);
```

return

```
function processing(initial_image,hue_image,intensity_image,initial_pos)
```

img =imread(initial_image);

```
[x,y] = size(img(:,:,1));
```

```
num = initial_pos;
```

```
counter_x = 1;
```

```
counter_y = 1;
```

```
number_of_pixels = 0;
```

```
I = 0;
```

```
for i = 1:x
```

```
counter_y = 1;
```

```
for j = num: y
```

```
R = double(img(i,j,1));
```

```
G = double(img(i,j,2));
```

```
B = double(img(i,j,3));
```

```
if (2*\operatorname{sqrt}(\operatorname{double}((R-G)^2+(R-B)*(G-B))) \sim = 0)
```

```
H = (360/(2*pi))*acos((2*R-G-B)/(2*sqrt(double((R-G)^2+(R-B)*(G-B)))));
```

else

H = 45;

End

```
if(H > 350 | H < 10)
img_hue(counter_x,counter_y) = 255;
else
img_hue(counter_x,counter_y) = 0;
end
counter_y = counter_y + 1;
end
counter_x = counter_x + 1;</pre>
```

end

```
imwrite(img_hue,hue_image);
```

return

Ο δευτερος αλγόριθμος ενώνει τα ακρυανά σημεία του σχηματιζόμενου πλουμίου στις hue εικόνες και σχηματίζει την ακρογραμμή που αντιστοιχεί σε κάθε φωτογραφία. Τελικά, παρουσιάζονται όλες οι ακρογραμμές σε ένα κοινό διάγραμμα.

function graphical()

```
b = processing('hue_25-08-2008 002k.jpg');
```

```
c = processing('hue_25-08-2008 003k.jpg');
```

```
d = processing('hue_25-08-2008 005k.jpg');
```

```
img =imread('hue_13-08-2008 028.jpg');
```

[x,y] = size(img(:,:));

plot(1:y,(-1)*b,'y',1:y,(-1)*c,'m',1:y,(-1)*d,'c');

return

```
function array1 = processing(initial_image)
```

```
img =imread(initial_image);
```

```
[x,y] = size(img(:,:));
```

```
array = [];
```

flag1 = 0;

```
i_high = x;
```

```
for i = 1:x
```

```
for j = 1:y
```

```
if(img(i,j) > 250)
       i high = i;
       flag1 = 1;
       break;
     end
  end
  if(flag1 == 1)
     break;
  end
  end
i_high
i_new = i_high;
for j = 1:y
  for i = 1:x
     if(img(i,j) > 250)
       i new = i;
     end
  end
  array(j) = i_new;
  i new = i high;
end
array1 = array - i high;
return
   function put_ruler()
img1= processing('coloured 0437.jpg','hue 0437.jpg');
img2 = processing('coloured 0438.jpg','hue 0438.jpg');
img3 = processing('coloured_0439.jpg','hue_0439.jpg');
imwrite(img1,'diesel_0437.jpg','jpg');
imwrite(img2,'diesel_0438.jpg','jpg');
```

```
imwrite(img3,'diesel_0439.jpg','jpg');
return
function img = processing(init_img,hue_img)
img = imread(init_img);
hue = imread(hue_img);
[x,y] = size(hue(:,:));
width_white_sand = 836;
i high = 0;
flag = 0;
for i = 1:x
  for j = 1:y
   if(hue(i,j) > 250)
     i_high = i;
     flag = 1;
     break;
    end
  end
  if(flag == 1)
    break;
  end
end
i = i_high
for j = 1:104:y
  for k = i_high-5:i_high
   img(k,j) = 0;
  end
end
j = 50;
for k = i_high:x
```

```
img(k,j) = 0;
end
for k = i_high:78:x
for i = j:j+5
img(k,i) = 0;
end
end
```

return

Ο αλγόριθμος colouring παράγει τα προφίλ κορεσμού κάθε φωτογραφίας αντιστοιχώντας την τιμή της χροιάς του χρώματος σε μια τιμή κορεσμού με βάση τις στήλες βαθμονόμησης.

function colouring()

processing('hue_328.jpg','100_0328.jpg');

processing('hue_330.jpg','100_0330.jpg');

processing('hue_339.jpg','100_0339.jpg');

processing('hue_350.jpg','100_0350.jpg');

processing('hue_355.jpg','100_0355.jpg');

processing('hue_359.jpg','100_0359.jpg');

return

```
function processing(image,init_img,final_image)
```

hue = imread(image);

```
init_image = imread(init_img);
```

```
[x,y] = size(hue(:,:));
```

width_coarse_sand = 836; %DIESEL

array1 = [51 75.5 117 165.5 214];

array2 = [102 124.6 150.4 173.31 193.4];

% width_coarse_sand = 224; %SOLTROL

% array1 = [22.3 42.4 77.1 121 157.4]; % coarse sand

% array2 = [60 107 131.5 167.25 219.5]; % fine sand

```
% % width_fine_sand = 510; %Soltrol
% array2 = [22.3 42.4 77.1 121 157.4];% coarse sand
% array1 = [60 107 131.5 167.25 219.5];% fine sand
img = zeros(x,y,3);
for i = 1:x
  for j = 1:y
   img(i,j,1) = 255;
   img(i,j,2) = 255;
   img(i,j,3) = 255;
 end
end
i_high = 0;
flag = 0;
intensity = 0;
counter_10 = 0; counter_20 = 0; counter_40 = 0; counter_60 = 0; counter_80 = 0;
counter 100 = 0;
for i = 1:x
  for j = 1:y
   if(hue(i,j) > 250)
     i high = i;
     flag = 1;
     break;
   end
  end
 if(flag == 1)
   break;
 end
end
flag = 0;
for j = 1:y
```

```
for i = 1:x
   if(hue(i,j) > 250)
     j\_left = j;
     flag = 1;
      break;
    end
  end
 if(flag == 1)
    break;
  end
end
flag = 0;
for j = y:-1:1
  for i = 1:x
   if (hue(i,j) > 250)
     j_right = j;
     flag = 1;
     break; end
  end
  if(flag == 1)
    break;
  end
end
previous_height = 0;
  for j = j_left:j_right
  for i = x:-1:i_high
   if(hue(i,j) > 250)
      break;
    end
```

```
end
    if(i == i high)
    i = previous height;
 end
 previous height = i;
   for k = i:-1:i high
   intensity =
(double(init image(k,j,1))+double(init image(k,j,2))+double(init image(k,j,2)))/3;
   if(k <= i high + width coarse sand)
     if(array1(1) \ge intensity)
       counter_{10} = counter_{10} + 1;
       img(k,j,1) = 222;
          img(k,j,2) = 222;
       img(k,j,3) = 222;
     elseif(array1(2) >= intensity)
       img(k,j,1) = 185;
          img(k,j,2) = 185;
         img(k,j,3) = 185;
         counter 20 = \text{counter } 20+1;
     elseif(array1(3) >= intensity)
       img(k,j,1) = 148;
          img(k,j,2) = 148;
         img(k,j,3) = 148;
       counter 40 = \text{counter } 40+1;
      elseif(array1(4) >= intensity)
       img(k,j,1) = 111;
          img(k,j,2) = 111;
         img(k,j,3) = 111;
       counter_{60} = counter_{60+1};
      elseif(array1(5) >= intensity)
```

img(k,j,1) = 74; img(k,j,2) = 74; img(k,j,3) = 74; counter_80 = counter_80+1;

else

```
img(k,j,1) = 37;
img(k,j,2) = 37;
img(k,j,3) = 37;
counter_100 = counter_100+1;
```

end

else

```
if(array2(1) >= intensity)
  counter 10 = \text{counter } 10 + 1;
  img(k,j,1) = 222;
    img(k,j,2) = 222;
  img(k,j,3) = 222;
elseif(array2(2) >= intensity)
     counter 20 = \text{counter } 20+1;
  img(k,j,1) = 185;
    img(k,j,2) = 185;
  img(k,j,3) = 185;
elseif(array2(3) >= intensity)
     counter_{40} = counter_{40+1};
  img(k,j,1) = 148;
    img(k,j,2) = 148;
  img(k,j,3) = 148;
elseif(array2(4) >= intensity)
     counter 60 = \text{counter } 60+1;
  img(k,j,1) = 111;
```

```
img(k,j,2) = 111;
       img(k,j,3) = 111;
     elseif(array2(5) >= intensity)
           counter 80 = \text{counter } 80+1;
       img(k,j,1) = 74;
          img(k,j,2) = 74;
       img(k,j,3) = 74;
     else
           counter 100 = \text{counter } 100+1;
       img(k,j,1) = 37;
          img(k,j,2) = 37;
       img(k,j,3) = 37;
     end
   end
  end
for j = 1:y
 img(i high+width coarse sand,j,1) = 0;
 img(i_high+width_coarse_sand,j,2) = 0;
```

```
img(i high+width coarse sand, j, 3) = 0;
```

end

end

Με τις παρακάτω εντολές δημιουργείται η κλίμακα βαθμονόμησης για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς LNAPL και άμμου.

```
% stili = zeros(200,25,3);
% for i = 1:200
% for j = 1:25
%
      if(i \le 20)
%
        stili(i,j,1) = 222;
%
        stili(i,j,2) = 222;
```

% %imwrite(rgb2gray(uint8(stili)),'ypodeigma_xromaton.jpg','jpg');

final_counter = counter_10 + counter_20 + counter_40 + counter_60 + counter_80 + counter_100;

array = [counter_10 counter_20 counter_40 counter_60 counter_80 counter_100
final_counter];

%array.*(2.622*10^-3)%diesel

% array.*(1.762*10^-3)%soltrol

Ο παρακάτω αλγόριθμος βρίσκει την καλύτερη τιμή των παραμέτρων α, n του μοντέλου VanGenuchten ώστε η απόκλιση μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων μετά την εφαρμογή της Εξίσωσης Van Genuchten να είναι η μικρότερη δυνατή για όλα τα ποσοστά κορεσμού που μελετήσαμε.

```
function veltistopoihsi()
```

%P_original =[80 30 10 2]; P_original =[100 40 15 2]; %P_original =[150 50 15 2]; %P_original =[200 80 20 2];

```
S = [0.0001 \ 0.2 \ 0.8 \ 1];
min dif = 1000;
velt n = -1;
velt a = -1;
A = [];
k = 1;
for a = 0.01 : 0.0001 : 0.04
  for n = 1.01 : 0.01 : 15
     m = 1 - (1/n);
     for i = 1:4
       P comput(i) = (abs((S(i)^{(-1/m)}) - 1)^{(1/n)})/a;
     end
     dif = sum(abs(P_original - P_comput))/4;
     if(dif < min dif)
        velt n = n;
        velt a = a;
        min dif = dif;
     end
     k = k + 1;
  end
end
velt n
velt a
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: Υπολογισμός υδροπερατότητας

Πίνακας Ι: Αποτελέσματα υπολογισμού υδροπερατότητας χαλίκων

t(min)	1sqrtt (min- 1/2)	Δt (min)	V (ml)	ΔV (ml)	Q (ml/min)
2	0,70711	2	540	540	270
4	0,50000	2	1080	540	270
6	0,40825	2	1530	450	
8	0,35355	2	2000	470	
10	0,31623	2	2490	490	245
15	0,25820	5	3690	1200	240
20	0,22361	5	4880	1190	238
25	0,20000	5	6040	1160	232
30	0,18257	5	7230	1190	238
35	0,16903	5	8390	1160	232
40	0,15811	5	9530	1140	228

Δεν λαμβάνεται η τρίτη και η τέταρτη μέτρηση καθώς κρίνονται λανθασμένες και επηρεάζουν τον συντελεστή συσχέτισης των αποτελεσμάτων.

	Απόσταση	t	Κτ	K ₂₀ °C	Μέση	
		(sec)	(m/s)		τιμη/μετρηση	
1η μέτρηση	h12	49	2,81142E-06	2,47405E-06	2,50841E-06	
	h13	21	3,27996E-06	2,88636E-06		
	h32	28	2,46001E-06	2,16481E-06		k20avg=
2η μέτρηση	h12	22	6,26179E-06	5,51038E-06	5,51038E-06	8,53E-06
	h13	11	6,26174E-06	5,51033E-06		
	h32	11	6,26185E-06	5,51043E-06		
3η μέτρηση	h12	7	1,96799E-05	1,73183E-05	1,75589E-05	
	h13	3	2,29597E-05	2,02046E-05		
	h32	4	1,72201E-05	1,51537E-05		
Т	25,3					
ητ/η20	0,88					
a=	0,0724	cm2				
L=	13,075	cm				
A=	77,91	cm2				
$\log(h1/h2)=$	0,4920984					
$\log(h1/h3)=$	0,2460471					
$\log(h3/h2)=$	0,2460513					
h1=	118	cm				
h2=	38	cm				
h3=	66,963	cm				
Σταθερά	0,02304					

Πίνακας ΙΙ: Αποτελέσματα υπολογισμού υδροπερατότητας μέσης άμμου

Απόσταση	t	Κτ	K ₂₀ °C	Μέση	Απόσταση	t
	(sec)	(m/s)		τιμη/μετρηση		(sec)
1η μέτρηση	h12	95	1,4501E-06	1,29E-06	1,37E-06	
	h13	34	2,02586E-06	1,8E-06		
	h32	61	1,12919E-06	1E-06		k20avg=
2η μέτρηση	h12	93	1,48128E-06	1,32E-06	1,4E-06	1,47E-06
	h13	33	2,08725E-06	1,86E-06		
	h32	60	1,14801E-06	1,02E-06		
3η μέτρηση	h12	79	1,74379E-06	1,55E-06	1,65E-06	
	h13	28	2,45997E-06	2,19E-06		
	h32	51	1,35059E-06	1,2E-06		
			Т	24,4		
			ητ/η20	0,89		
a=	0,0724	cm2				
L=	13,075	cm				
A=	77,91	cm2				
log(h1/h2)=	0,492098					
log(h1/h3)=	0,246047		-			
log(h3/h2)=	0,246051		-			
h1=	118	cm				
h2=	38	cm				
h3=	66,963	cm				

Πίνακας ΙΙΙ: Αποτελέσματα υπολογισμού υδροπερατότητας χονδρόκοκκης άμμου.