

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΣΕ ΠΟΡΩΔΗ ΥΛΙΚΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΖΑΒΕΡΔΑΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ
ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Δρ. ΘΕΟΔΩΡΟΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΙΑ

ΠΑΤΡΑ 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε από τους φοιτητές Οικονόμου Αλέξανδρος και Ζαβέρδας Γεράσιμος του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε του Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας. Αρχικά θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά και να εκφράσουμε την ειλικρινή μας ευγνωμοσύνη, σε όσους στάθηκαν δίπλα μας με κάθε τρόπο και μας βοήθησαν στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την καθηγήτρια Δρ. Θεοδωροπούλου Π. Μαρία επειδή μας ανέθεσε αυτήν την πτυχιακή εργασία, επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαιτέρως τον Δρ. Αγγελόπουλο Χρήστο για το υλικό που μας παραχώρησε, τον Δρ. Τσακίρογλου Χρήστο για τον επιστημονικό εργαστήριο (ΕΙΧΗΜΥΘ). Η καθοδήγηση τους, και η βοήθεια τους κατά την διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μας εργασίας ήταν πολύτιμη.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές
(Ονοματεπώνυμο)

.....
(Υπογραφή)

.....
(Υπογραφή)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα πορώδη υλικά χαρακτηρίζονται ως στερεά σώματα με μικρά διάκενα, περισσότερο ή λιγότερο εκτεταμένα, που διακρίνονται είτε μακροσκοπικά είτε μικροσκοπικά. Παραδείγματα μακροσκοπικού πορώδους είναι οι σπόγγοι, οι ελαφρόπετρες, ωστόσο το πορώδες σε βαθμό μικροσκοπικής παρατήρησης οφείλεται στην παρουσία διακένων (πόρων) μεταξύ των μορίων.

Πειραματικές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για την ανάλυση της ροής μέσα σε πορώδη υλικά. Αποτέλεσμα είναι η ροή δύο ή περισσότερων φάσεων σε πορώδη υλικά να έχει μελετηθεί εκτενώς και συνεχίζει να μελετάται λόγω της ευρείας εφαρμογής της σε διεργασίες που αφορούν τόσο τη βιομηχανία (πχ. εξόρυξη πετρελαίου) όσο και το περιβάλλον (πχ. αποθεραπεία του μολυσμένου υδροφόρου ορίζοντα). Οι περισσότεροι πορώδεις σχηματισμοί που συναντώνται στο περιβάλλον είναι κλασματικής διαβροχής. Τα κλασματικής διαβροχής πορώδη υλικά ερευνώνται ευρύτατα στις μέρες μας λόγω της πληθώρας των εφαρμογών τους (συλλέκτες νερού, ναοκεραμικά, βιοϋλικά, κτλ.).

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο την Διφασική Ροή σε Πορώδη Υλικά και Τεχνολογικές Εφαρμογές. Στην εισαγωγή αναφέρεται ο σκοπός της παρούσας εργασίας και αναπτύσσονται όλες οι έννοιες που θα χρειαστούν κατά την εκπόνηση της.

Στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα πορώδη υλικά. Αναλύεται ο σχηματισμός και τα φυσικά χαρακτηριστικά όπως επίσης και τα τοπολογικά χαρακτηριστικά των πορώδων μέσων. Στόχος του κεφαλαίου είναι η ανάπτυξη και η κατανόηση των ιδιοτήτων των πορώδων μέσων και οι μέθοδοι προσδιορισμού τους. Επιπλέον, αναλύεται η διαπερατότητα, ο παράγοντας σχηματισμού και τα τριχοειδή φαινόμενα που αναπτύσσονται στα πορώδη υλικά. Γίνεται περιγραφή και ανάλυση της κίνησης των διεπιγανειών και της πίεσης αποσύνδεσης.

Στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του φαινομένου ροής. Ανάλυση της θεωρίας διείσδυσης και των χαρακτηριστικών της. Αναπτύσσεται η ροή μια φάσης σε πορώδη μέσα και στην συνέχεια η ροή δύο μη αναμίξιμων φάσεων σε πορώδη μέσα. Για την κατανόηση της ροής αναφέρονται οι παράμετροι ροής, η ιστορία ροής και οι διαβρεκτικότητα στα πορώδη μέσα. Ωστόσο, η ροή επηρεάζεται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες με αποτέλεσμα να απαιτείται πλήρη ανάλυσή τους.

Τέλος στο 3^ο Κεφάλαιο αναφέρονται οι τεχνολογικές εφαρμογές που παρατηρείται η διφασική ροή σε πορώδη μέσα. Η πρώτη τεχνολογική εφαρμογή είναι η αποκατάσταση του εδάφους και οι τρόποι απορρύπανσης του, ποίες είναι οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται και πως εφαρμόζονται. Στην συνέχεια αναπτύσσεται η εξόρυξη του πετρελαίου, ποια είναι τα στάδια δημιουργίας του και ποία η διαδικασία εξόρυξης του.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | | |
|--|---|----|
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ | | 1 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΟΡΩΔΗ ΥΛΙΚΑ | | |
| 1.1 | ΠΟΡΩΔΗ ΥΛΙΚΑ | 4 |
| 1.1.1 | Σχηματισμός και φυσικά χαρακτηριστικά πορωδών μέσων | 5 |
| 1.1.2 | Τοπολογικά χαρακτηριστικά πορωδών υλικών | 6 |
| 1.2. | ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΟΡΩΔΩΝ ΜΕΣΩΝ | 7 |
| 1.2.1 | Πορώδες | 7 |
| 1.2.1.1 | Μέθοδοι προσδιορισμού πορώδους υλικού | 7 |
| 1.2.1.2 | Πορομετρία υδράργυρου | 9 |
| 1.2.2 | Διαπερατότητα | 12 |
| 1.3 | ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ | 13 |
| 1.4. | ΤΡΙΧΟΕΙΔΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ | 14 |
| 1.5 | ΚΙΝΗΣΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ | 15 |
| 1.6 | ΠΙΕΣΗ ΑΠΟΣΥΝΔΕΣΗΣ | 18 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΠΟΡΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ | | |
| 2.1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 20 |
| 2.2 | ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΡΟΗΣ | 20 |
| 2.2.1 | Μοντέλα δικτύων πόρων | 21 |
| 2.3 | ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ | 22 |
| 2.3.1 | Χαρακτηρισμός ενός συστήματος διείσδυσης | 24 |
| 2.4 | ΡΟΗ ΜΙΑΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΠΟΡΩΔΗ ΜΕΣΑ | 24 |
| 2.4.1 | Νόμος του Darcy | 25 |
| 2.5 | ΡΟΗ ΔΥΟ ΜΗ ΑΝΑΜΙΞΙΜΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΣΕ ΠΟΡΩΔΗ ΜΕΣΑ | 28 |
| 2.5.1 | Σχετικές διαπερατότητες | 28 |
| 2.5.2 | Παράμετροι ροής | 30 |
| 2.5.2.1 | Ιστορία της ροής | 31 |
| 2.5.2.2 | Μορφολογία της πορώδους δομής | 32 |
| 2.5.2.3 | Διαβρεκτικότητα | 32 |
| 2.5.2.4 | Λόγος ιξωδών | 36 |
| 2.5.2.5 | Τριχοειδής αριθμός | 36 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.5.2.6 | Κατανομή των ρευστών στον πορώδη χώρο | 37 |
| 2.6 | ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ | 37 |
| 2.7 | ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ ΣΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ | 39 |
| 2.8 | ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ | 39 |
| 2.9 | ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΠΟΡΩΝ | 40 |
| 2.9.1 | Μοντέλα διείσδυσης δεσμού για αποστράγγιση (bond percolation model) | 40 |
| 2.10 | ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ | 42 |
| 2.10.1 | Μοντέλα διείσδυσης δεσμού – κλασματικής τραχύτητας | 43 |
| 2.11 | ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΤΡΙΧΟΕΙΔΗ ΠΙΕΣΗ | 45 |
| 2.12 | ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ | 46 |
| 2.13 | ΜΗ ΑΝΑΜΙΞΙΜΕΣ ΕΚΤΟΠΙΣΕΙΣ ΔΥΟ ΦΑΣΕΩΝ | 47 |
| 2.13.1 | Επίδραση της άνοσης στο πρότυπο εκτόπισης δύο φάσεων | 47 |
| 2.14 | ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΕΙΚΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΠΙΕΣΗΣ | 50 |
| 2.15 | ΧΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΕΜΠΕΔΗΣΗ | 52 |
| 2.15.1 | Δείκτης χωρητικής αντίστασης | 53 |
| 2.16 | ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΡΙΚΩΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ | 54 |
| 2.17 | ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ | 57 |
| 2.17.1 | Θεωρία αποτελεσματικού μέσου | 57 |
| 2.17.2 | Μέθοδος σύνθετου δείκτη διάθλασης | 58 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

| | | |
|---------|--|----|
| 3.1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 59 |
| 3.2 | ΑΠΟΚΑΤΣΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ | 59 |
| 3.2.1 | Έδαφος | 59 |
| 3.2.2 | Ακόρεστη – Κορεσμένη ζώνη εδάφους – Υδροφόρου ορίζοντα | 60 |
| 3.2.3 | Μέθοδοι απορρύπανσης | 61 |
| 3.2.3.1 | Επιλογή μεθόδου απορρύπανσης | 63 |
| 3.2.4 | Διάνοιξη υδραυλικών ρωγμών | 64 |
| 3.2.4.1 | Διάνοιξη υδραυλικών ρωγμών με πίεση υγρού | 65 |
| 3.2.5 | Περιγραφή μεθόδων απορρύπανσης | 68 |
| 3.3. | ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ | 73 |
| 3.3.1 | Προέλευση πετρελαίου | 73 |
| 3.3.2 | Αργό πετρέλαιο και η σύστασή του | 76 |
| 3.3.3 | Ταξινόμηση πετρελαίου | 77 |
| 3.3.4 | Διαδικασία εξόρυξης πετρελαίου | 78 |
| 3.3.5 | Ανάκτηση πετρελαίου | 82 |

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και η ανάλυση της διαφασικής ροής σε πορώδη μέσα. Επιπλέον, αναφερόμαστε και στις τεχνολογικές εφαρμογές που γίνεται χρήση της διαφασικής ροής στα πορώδη μέσα.

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΈΝΝΟΙΕΣ

Μία σειρά από διεργασίες εξαιρετικού ενδιαφέροντος, τόσο από πρακτική όσο και από θεωρητική άποψη λαμβάνουν χώρα στα πορώδη υλικά. Διεργασίες όπως διήθηση, φυγοκέντρωση, ξήρανση και ροή πολλών φάσεων σε στήλες με πληρωτικά υλικά παρουσιάζουν επιστημονικό ενδιαφέρον. Επίσης, τα πορώδη υλικά έχουν άμεση σχέση με σημαντικές δραστηριότητες όπως η αποκατάσταση εδαφών και η βιομηχανία πετρελαίου.

Για την βιομηχανία πετρελαίου, είναι γνωστό ότι περισσότερο από το μισό πετρέλαιο που βρίσκεται στους ταμιευτήρες παραμένει σε αυτούς, μετά το τέλος των παραδοσιακών διεργασιών της πρωτογενούς και δευτερογενούς ανάκτησης. Με την πάροδο των χρόνων βελτιωμένες μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση του πετρελαίου με σκοπό την ολική εκμετάλλευση του, αυτή είναι και μία από τους βασικούς στόχους τις βιομηχανίας πετρελαίου. Επίσης, η επιστήμη του εδάφους και της υδρολογίας προσπαθεί να δώσει τις λύσεις στοχεύοντας με τα πορώδη υλικά την μελέτη των υπόγειων υδάτων.

Επομένως, ένας από τους βασικούς τομείς των πορωδών μέσων είναι η προστασία του περιβάλλοντος με σκοπό την αποκατάσταση των υδροφόρων κοιτασμάτων που έχουν μολυνθεί από υγρά απόβλητα.

Σε αυτές της διεργασίες υπάρχει ταυτόχρονη ροή δύο μη αναμειξιμων ρευστών στον πορώδη χώρο του μέσου, η οποία εμφανίζεται είτε σε μεταβατική κατάσταση, ως εκτόπιση του ενός ρευστού από το άλλο, είτε σε μόνιμη κατάσταση ως ταυτόχρονη ροή των δύο ρευστών με σταθερές παροχές σε κάθε σημείο του πορώδους μέσου.

Κατά την ροή των δύο μη αναμειξιμων ρευστών σε ένα πορώδες μέσο, τα ρευστά έχουν την δυνατότητα να είναι είτε σε συνεχή μορφή σταγόνων, είτε σε ασυνεχή μορφή σταγόνων, είτε και στις δύο καταστάσεις. Σημαντικό ρόλο στην μορφή των ρευστών παίζουν οι συνθήκες στις οποίες βρίσκονται. Ο όρος γάγγλιο χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει μία σταγόνα της διαβρέχουσας φάσης που βρίσκεται στον πορώδη χώρο ενός διαπερατού μέσου.

Τα διαπερατά πορώδη μέσα χαρακτηρίζονται από την δυνατότητα τους να άγουν ρευστές φάσεις μέσα από την μάζα τους με ιξώδη ροή, διαμέσου ενός δικτύου πόρων που συνδέονται μεταξύ τους. Αν το πορώδες διαθέτει ένα δίκτυο πόρων χωρίς να συνδέεται με το περιβάλλον ονομάζεται κλειστός πορώδης όγκος. Στην περίπτωση που δεν συνδέεται με το περιβάλλον και δεν διαθέτει πόρους ονομάζεται αδιαπέραστο.

Στην περίπτωση της εκτόπισης, το εκτοπιζον ρευστό ονομάζεται εισβολέας και το εκτοπιζόμενο ονομάζεται υπερασπιστής. Ο υπερασπιστής στις περισσότερες περιπτώσεις είναι το μη διαβρέχον ρευστό. Αποτέλεσμα αυτού είναι η εκτόπιση να προχωρά με αύξηση του κορεσμού του διαβρέχοντος ρευστού και η διεργασία ονομάζεται εισρόφιση. Στην περίπτωση που η παραπάνω διαδικασία είναι αντίστροφη, δηλαδή η σταδιακή αύξηση του κορεσμού του μη διαβρέχοντος ρευστού καλείται αποστράγγιση. Επίσης, ο κορεσμός ορίζεται ως το ποσοστό του πορώδες ή κενού όγκου του πορώδες μέσου που καταλαμβάνεται από μία φάση.

Στην περίπτωση που υπάρχει ταυτόχρονη ροή ακολουθείται η ίδια συμβατή για την ταξινόμηση διεργασιών. Άρα στην τελική μόνιμη κατάσταση ο κορεσμός του διαβρέχοντος ρευστού είναι μεγαλύτερος από τον αρχικό κορεσμό, η διεργασία θεωρείται ότι αντιστοιχεί σε συνθήκες αποστράγγισης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει μεγάλη διάφορα μεταξύ μιας διαδικασίας εισρόφησης και μίας διαδικασίας αποστράγγισης. Οι φυσικές ιδιότητες που μετριούνται σε αντίστοιχες διαδικασίες διαφέρουν μεταξύ τους παρουσιάζοντας δηλαδή υστέρηση. Ο κύριος λόγος για αυτό είναι ότι οι διαμορφώσεις, σε διαφορετικές συνθήκες διαβρεκτικότητας. Σε μία εκτόπιση αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό στην εισρόφηση όταν υποβοηθούν οι τριχοειδής δύναμης τον εισβολέα, ο οποίος προχώρα αρχικά από τους μικρότερους πόρους στους μεγαλύτερους και σχηματίζει έναν μικρό υμένα, ο οποίος καλύπτει τα τοιχώματα. Στην αντίθετη περίπτωση της αποστράγγισης οι τριχοειδής δυνάμεις εμποδίζουν τον εισβολέα, όπου σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιείται η κίνηση του από τους μεγαλύτερους πόρους καταλαμβάνοντας το εσωτερικό τους. (Αβραάμ Δ., 1996)

Για την απεικόνιση του φαινομένου ροής σε ένα πορώδες μέσο γίνεται χρήση αρκετών κλιμάκων μεγέθους, στις οποίες το πορώδες μπορεί να είναι ή να μην είναι ομογενές.

Μια πρώτη θεμελιώδη κλίμακα μεγέθους είναι η L. Η κλίμακα αυτή χαρακτηρίζει την είτε την έκταση είτε τον χώρο της ροής. Ωστόσο, η συγκεκριμένη κλίμακα διαχωρίζεται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες οι οποίες είναι οι εξής:

• Εργαστηριακή $\rightarrow 0 - 10^0$:

Σχετίζεται με εργαστηριακές μετρήσεις που αφορούν μικρά ή μεγάλα δείγματα από το πορώδες μέσο, κλίνες ή στήλες με πληρωτικά υλικά και πρότυπα δοκίμια πορωδών μέσων.

• Τοπική $\rightarrow 10^1 - 10^2$:

Σχετίζεται με το πάχος του ταμιευτήρα και με φαινόμενα που ασχολούνται με την διάνοιξη ρωγμών και την ροή του εδάφους. Η ετερογένεια σε αυτή την περίπτωση μπορεί να προέλθει από τις μεταβολές της διαπερατότητας.

• Περιφερειακή $\rightarrow 10^3 - 10^5$

Σχετίζεται με όλο τον ταμιευτήρα ή τον πορώδη σχηματισμό και τις διαδικασίες εκμετάλλευση του και επηρεάζεται από ετερογένειες στην χωρητικότητα και την διαπερατότητα του ταμιευτήρα.

Μια δεύτερη κλίμακα μεγέθους είναι η I. Η κλίμακα αυτή αφορά την διάσταση στην οποία εμφανίζονται τα ετερογενή χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου. Πιο συγκεκριμένα αφορά την διάσταση όπου οι ιδιότητες του μέσου παύουν να συσχετίζονται. Επιπλέον, η κλίμακα αυτή μπορεί να προσδιοριστεί στατιστικά και θεωρείται ότι $I \ll L$ αποτέλεσμα αυτού είναι η δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων για το πορώδες μέσο από μικρότερα δείγματα.

Μία τρίτη θεμελιώδης κλίμακα είναι η D. Η κλίμακα αυτή ασχολείται με τις φυσικές ιδιότητες που έχουν την δυνατότητα να παρασταθούν από τις μέσες τιμές τους στον πορώδη χώρο. Η κλίμακα αυτή σχετίζεται με τις διαστάσεις των μετρητικών οργάνων και των περιοχών που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Όλα τα μετρητικά όργανα παρουσιάζονται ως συσκευές μέσων τιμών και για αυτό η κλίμακα μπορεί να περιλαμβάνει χαρακτηριστικά μεγέθη από τις διαστάσεις των εργαστηριακών δοκιμών, έως τις διαστάσεις ενός πηγαδιού στον ταμιευτήρα ή και σε ολόκληρο τον σχηματισμό. Σύμφωνα λοιπόν με τα όσο προαναφέρθηκαν καταλήγουμε στην εξής κατάταξη των κλιμάκων $I \ll D \ll L$.

Επιπλέον υπάρχει η μικροσκοπική κλίμακα η οποία ορίζεται ως την κλίμακα που το χαρακτηριστικό της μήκος κυμαίνεται από 1 έως 10^2 χαρακτηριστικών διαμέτρων των πόρων του πορώδους μέσο ωστόσο, υπάρχει και η μακροσκοπική ορίζεται ως την κλίμακας που το χαρακτηριστικό της μήκος κυμαίνεται από 10^2 έως 10^5 .

Τα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά την διάρκεια της ροής δύο φάσεων σε μόνιμη ή μεταβατική κατάσταση ταξινομούνται ανάλογα με την κλίμακα μεγέθους που χρησιμοποιείται για να περιγραφούν.

Τα συνήθη πορώδη μέσα είναι μακροσκοπικά, ομογενή, ισότροπα και χαρακτηρίζονται από τις ιδιότητες του πορώδους χώρου (πορώδες και κατανομές μεγέθους των πόρων) και από τον συντελεστή μεταφοράς όπως η απόλυτη και οι σχετικές διαπερατότητες. (Αβραάμ Δ., 1996)

1.1.1. Σχηματισμός και φυσικά χαρακτηριστικά πορωδών μέσων

Τα κυριότερα μορφολογικά – δομικά χαρακτηριστικά των πορωδών μέσων είναι τα εξής:

- Πορώδες
- Σχήμα πόρων και διαστάσεις των πόρων
- Διασύνδεση των πόρων (αριθμός σύνταξης ή γένος ανά μονάδα όγκου)
- Ανισοτροπία του πορώδους μέσου
- Μικροτραχύτητα των τοιχωμάτων των πόρων
- Ανομοιογένεια του πορώδους μέσου

Το πορώδες ενός πετρώματος φ, είναι το ποσοστό του συνολικού όγκου, που είναι κενό. Αποτελείται από το πρωτογενές και το δευτερογενές πορώδες.

• **Πρωτογενές πορώδες:** προέρχεται από τον αρχικό χώρο ανάμεσα στους κόκκους του ιζήματος

• **Δευτερογενές πορώδες:** οφείλεται στην μερική ή ολική διάσπαση ασταθών κόκκων που βρίσκονται ανάμεσα στους αρχικούς.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το δευτερογενές πορώδες θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικό για τα ψαμμιτικά πετρώματα και τα ανθρακικά των ταμιευτήρων. Το πορώδες των κυριότερων πετρωμάτων κυμαίνεται από 2% έως και 30%.

Ως πόρος θεωρείται κάθε κενός χώρος μέσα στη δομή του πορώδους μέσου, ανεξάρτητα από το σχήμα ή το μέγεθος του. Το σχήμα και οι διαστάσεις των πόρων καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από το είδος του πετρώματος και την διαδικασία διαγένεσης, η οποία καθορίζει τον τελικό σχηματισμό. Ο σχηματισμός των πετρωμάτων των ταμιευτήρων ξεκινά με την εναπόθεση ιζήματος και ακολουθείται από την συμπίεση και τη φυσικοχημική μεταβολή του. Τα περισσότερα ιζηματογενή πετρώματα των ταμιευτήρων έχουν κοκκώδη μορφή. Κατά την διαγένεση το περιβάλλον των κόκκων μεταβάλλεται και αντιδρά με αυτούς παράγοντας νέα συστατικά.

Τα κύρια χαρακτηριστικά διαγένεσης είναι:

- Μηχανική παραμόρφωση των κόκκων
- Διάλυση των ορυκτών των κόκκων
- Μεταβολή των κόκκων
- Καταβύθιση των κόκκων

Το τελικό πέτρωμα είναι αποτελέσματα της αρχικής σύστασης του και της σύστασης του περιβάλλοντος του στη λεκάνη της ιζηματογένεσης. Επίσης, επιδρούν οι περιβαλλοντικοί παράγοντες, πίεση θερμοκρασία, καθώς και οι διαδοχικές καταβυθίσεις και ανοδικές μεταπτώσεις του πετρώματος στην διάρκεια της διαγένεσης. Η γνώση της διαδικασίας αυτής δίνει τα στοιχεία για την πορώδη δομή και την ικανότητα του πετρώματος να δώσει πετρέλαιο που πιθανόν περιέχει.

Τα φυσικά πετρώματα αποτελούνται από δύο ειδών πόρους. Οι μεγαλύτεροι πόροι που ονομάζονται θάλαμοι και οι διαστάσεις τους είναι συγκρίσιμες με αυτές των κόκκων και οι μικρότεροι που ονομάζονται λαιμοί, έχουν την μορφή καναλιών και συνδέουν τους θαλάμους. Προσεγγιστικά μπορεί να αποδοθεί μια χαρακτηριστική διάσταση στους θαλάμους και τους λαιμούς, ως αποτελεσματική ακτίνα της σφαίρας που έχει τον ίδιο όγκο με τους πόρους. Η διαδικασία αυτή ορίζει τους πόρους μεγαλύτερους ή μικρότερους της σφαίρας αυτής.

Επίσης, το πορώδες μπορεί να αναπαρασταθεί σαν δίκτυο, στους κόμβους του οποίου είναι οι θάλαμοι και ενώ οι λαιμοί τοποθετούνται στους δεσμούς. Το πορώδες μπορεί να αποδοθεί είτε όλο στους θαλάμους, είτε όλο στους λαιμούς είτε ανάμεσα στους δύο τύπους πόρων. Οι θάλαμοι μπορούν να χαρακτηριστούν από ισόδύναμη ογκομετρική διάμετρο και οι αποτελεσματικές διαμέτροι που προκύπτουν είναι τυχαία κατανεμημένες σε διάστημα που κυμαίνεται από 5 έως 100 μm. Οι λαιμοί από την πλευρά τους παρουσιάζουν σχισμοειδές και ακανόνιστο σχήμα και ο χαρακτηρισμός τους απαιτεί πλάτος, πάχος και μήκος. Το μήκος τους είναι συγκρίσιμο με αυτό των κόκκων του πετρώματος, το πάχος τους κυμαίνεται από 1 έως 10 μm και το πλάτος είναι συγκρίσιμο με τους θαλάμους.

Οι πληροφορίες για τους πόρους μπορούν να συνοψιστούν στις κατανομές μεγέθους των πόρων. Οι κατανομές χαρακτηρίζονται από το αποτελεσματικό χαρακτηριστικό μέγεθος των πόρων. Οι κατανομές αυτές, αντίθετα με την κατανομή μεγέθους κόκκων εξαρτώνται από την πειραματική μέθοδο και το πρότυπο σχήμα των πόρων, το οποίο χρησιμοποιείται για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Οι κυριότερες μέθοδοι για την μέτρηση του μεγέθους των πόρων είναι η πυρομετρία υδραργύρου, προσρόφηση εκρόφηση αερίων. Ωστόσο, υπάρχουν και νεότερες μέθοδοι όπως των ακτινών X και η σκέδαση νετρονίων.

Κάθε μέθοδο έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αποτέλεσμα αυτού είναι για τον ακριβή προσδιορισμό του πορώδες να γίνεται χρήση δύο ή και περισσότερων μεθόδων. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι πολύ δύσκολη, διότι οι πληροφορίες είναι ισχυρά συνελγμένες με το σχήμα και την διασύνδεση των όρων και την τοπολογία του πορώδους.

Η διασύνδεση των όρων εκφράζεται ποσοτικά με τον αριθμό συνδιάταξης, Z , θεωρείται ως τον αριθμό των λαιμών που συνδέονται με έναν θάλαμο. Ο μέσος αριθμός συνδιάταξης σχετίζεται με τα τοπολογικά χαρακτηριστικά της πορώδους δομής. Ο αριθμός αυτός κυμαίνεται από 5 έως 7, αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις που ξεπερνά το 25. Ο λόγος της διαμέτρου θαλάμου προς το πάχος του λαιμού κυμαίνεται από 3 έως 10. Ο λόγος αυτός είναι σημαντικός διότι καθορίζει τα φαινόμενα αστάθειας των διεπιφανειών και τελικά το ποσοστό του πετρελαίου που είναι παγιδευμένο στον πορώδη χώρο. (Αβρααμ Δ., 1996)

1.1.2. Τοπολογικά χαρακτηριστικά πορώδων υλικών

Κάθε πορώδες μέσο αποτελείται από τον πορώδη ή κενό χώρο και στον στερεό χώρο. Μεταξύ τους διαχωρίζονται από τα τοιχώματα των πόρων τα οποία σχηματίζουν μία διεπιφάνεια. Ο αριθμός συνδιάταξης, Z , είναι ο απλούστερος τρόπος για να χαρακτηριστεί η τοπολογία των πετρωμάτων. Ωστόσο, ο υπολογισμός του είναι αρκετά δύσκολος. Σε ένα επαρκώς μεγάλο δείγμα πορώδους μέσου υπολογίζεται ο μέσος αριθμός συνδιάταξης.

Ακριβέστερες πληροφορίες για τα τοπολογικά χαρακτηριστικά της πορώδους δομής, μπορούν να ληφθούν από τους αριθμούς Betti. Για να μπορέσουν να χαρακτηριστούν αν δύο δομές είναι τοπολογικά ισοδύναμες θα πρέπει οι αριθμοί Betti να είναι ίδιοι, αυτό είναι πρακτικά αδύνατον γιατί οι αριθμοί αυτοί είναι παρά πολύ. Ωστόσο, πειραματικές μελέτες έχουν αποδείξει ότι αρκούν αν είναι ίδιοι οι τρεις πρώτοι αριθμοί.

1.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΟΡΩΔΩΝ ΜΕΣΩΝ

1.2.1. Πορώδες

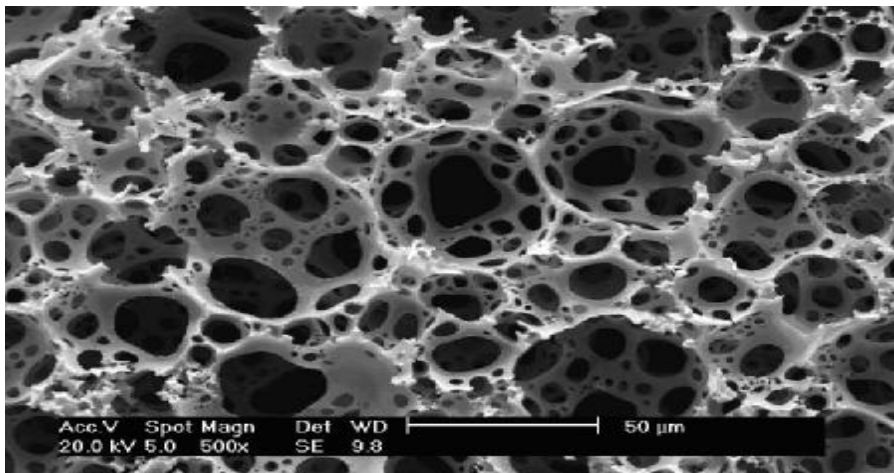
Πορώδες ορίζεται ο λόγος του όγκου του κενού χώρου, δηλαδή του όγκου των πόρων, προς τον ολικό όγκο, ενός δείγματος του πορώδους μέσου:

$$j = \frac{V_p}{V_s} \quad (1.1)$$

Όπου:

V_p = Όγκος κενού χώρου
 V_s = Ολικός όγκος

Επιπλέον, το πορώδες ονομάζεται απόλυτο ή ολικό όταν αναφέρεται στον ολικό όγκο των πόρων, ανεξάρτητα αν αυτοί συνδέονται ή όχι μεταξύ τους. Η ροή μέσα στα πορώδη μέσα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον όταν οι πόροι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Αποτέλεσμα αυτού είναι το ενεργό ή αποτελεσματικό πορώδες να ορίζεται ως ο λόγος του συνεκτικού όγκου των πόρων, δηλαδή του όγκου των πόρων που συνδέονται μεταξύ τους προς τον ολικό όγκο του μέσου. (Τακίρογλου Χ., 1989)



Εικόνα 1.2: Πορώδες υλικό.
[Πηγή: <http://oasys2.confex.com>]

1.2.1.1. Μέθοδοι προσδιορισμού πορώδους υλικού

Με την πάροδο των χρόνων έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που έχουν την δυνατότητα να προσδιορίζουν και να χαρακτηρίζουν ένα πορώδες υλικό. Οι μέθοδοι αυτοί διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Ø *Άμεσες Μέθοδοι:* Βασίζονται στην μέτρηση του όγκου των πόρων και του όγκου του δείγματος.
- Ø *Έμμεσες Μέθοδοι:* Βασίζονται στη μέτρηση κάποιας ιδιότητας του κενού χώρου του υλικού.

Η λεπτομερής περιγραφή της πορώδους δομής δεν είναι δυνατή, η πρόοδος των πειρατικών μελετών δεν έχει δώσει ακόμα λύση στην ακριβή περιγραφή της δομής. Οι σπουδαιότερες πειραματικές τεχνικές για την μέτρηση ορισμένων φυσικών μεταβλητών που έχουν άμεση και έμμεση σχέση με τα χαρακτηριστικά του πορώδους είναι οι εξής:

Ø Μέθοδος Εισρόφησης:

Σε ένα τέλεια διαβρέχον υγρό βυθίζουμε το πορώδες δείγμα σε συνθήκες κενού για μεγάλο χρονικό διάστημα, με σκοπό την εισρόφηση του υγρού σε όλο τον πορώδη χώρο. Αρχικά, ζυγίζεται το δείγμα πριν την εισρόφηση και στην συνέχεια ακολουθεί η ίδια διαδικασία μετά την εισρόφηση σε συνδυασμό με την πυκνότητα του υγρού. Με αυτό τον τρόπο δύναται η δυνατότητα του υπολογισμού του όγκου των πόρων.

Στην περίπτωση που το δείγμα είναι πλήρως κορεσμένο με το διαβρέχον υγρό, μια μέτρηση της ογκομετρικής εκτόπισης μέσα στο ίδιο υγρό δίνει άμεσα τον ολικό όγκο του δείγματος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εισρόφηση πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτικά, ώστε τα αποτελέσματα του ενεργού πορώδους να είναι αυτά που το αντιπροσωπεύουν πλήρως δίνοντας τις «καλύτερες» τιμές του.

Ø Μέθοδος Είσδυσης Υδραργύρου:

Η μέθοδος αυτή πραγματοποιείται όταν είναι γνωστά ο όγκος και το βάρος ενός υποδοχέα, δηλαδή ενός διεισδύμετρου υδραργύρου. Μετρώντας το βάρος του δείγματος και το βάρος υποδοχέα-δείγματος-υδραργύρου σε συνδυασμό με την πυκνότητα του υδραργύρου υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστεί ο ολικός όγκος του δείγματος. Επίσης, ο ολικός όγκος των πόρων που συνδέονται μεταξύ τους υπολογίζεται από τον όγκο είσδυσης υδραργύρου στην μέγιστη πίεση. Ωστόσο, θεωρείται ότι ο υδράργυρος έχει την δυνατότητα να εισδύει και στους μικρότερους πόρους.

Ø Μέθοδος Εκτόνωσης Αερίου:

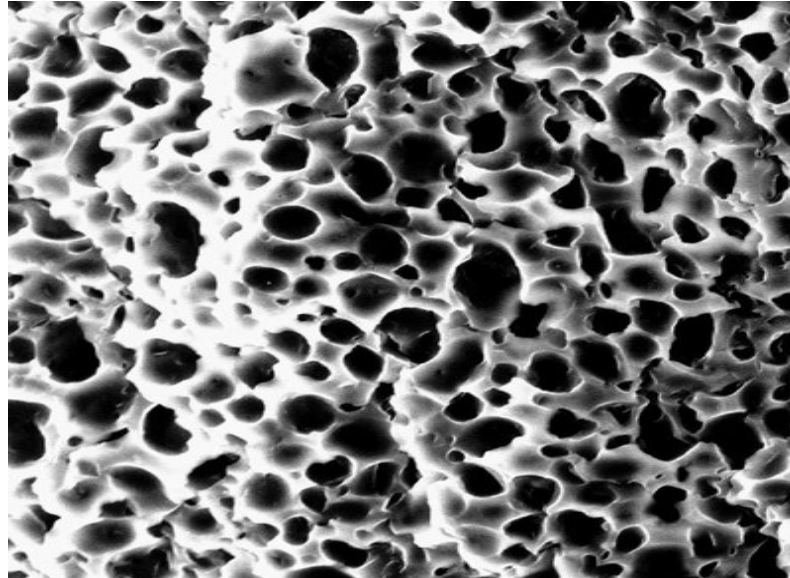
Ο ολικός όγκος του δείγματος προσδιορίζεται με την εξής διαδικασία, αρχικά, το δείγμα τοποθετείται σε ένα δοχείο γνωστού όγκου υπό γνωστή πίεση αερίου και συνδέεται με ένα δοχείο εκτόνωσης γνωστού όγκου. Ακολουθεί, το άνοιγμα της βαλβίδας μεταξύ των δοχείων με συνέπεια το αέριο να εκτονωθεί μέσα στο δοχείο εκτόνωσης και η πίεσή του κατά συνέπεια να ελαττωθεί. Ο ενεργός όγκος των πόρων υπολογίζεται με βάση το νόμο των ιδανικών αερίων, αφού έχουμε γνωστή την τελική πίεση και τον όγκο του δείγματος.

Ø Οπτικές Μέθοδοι:

Η πορώδης δομή, όπως προαναφέραμε είναι τυχαία με συνέπεια το πορώδες να είναι ίσο με το λόγο της επιφάνειας των πόρων προς την ολική επιφάνεια σε μία λεία τυχαία επίπεδη τομή του δείγματος όπως προκύπτει από στερεολογικούς προσδιορισμούς.

Οι οπτικές μελέτες ενός απλού ηλεκτρονικού μικροσκοπίου δίνουν τις πρώτες ενδείξεις για την πολυπλοκότητα ως προς τα μεγέθη, τα σχήματα, αλλά και τον τρόπο σύνδεσης των πόρων μεταξύ τους σε ένα υλικό. Κάθε πορώδες υλικό αποτελείται από ποικιλία σχημάτων και μεγεθών, τα οποία και καθορίζουν την πολυπλοκότητα βάση της σύνδεσης τους. Ερευνητικές μελέτες έχουν καταλήξει ότι ένας πορώδης χώρος μεγάλων σχετικά πόρων είναι θάλαμος στον οποίο συνδέονται μεταξύ τους μικρότερες στενώσεις που ονομάζονται λαιμοί.

Η πολυπλοκότητα της πορώδους δομής οφείλεται σε διάφορους παράγοντες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα ιζηματογενή πετρώματα που παράγονται με δυο διαφορετικούς τρόπους είτε με μηχανικά μέσα είτε με χημικά μέσα. Κάποια από τα ιζήματα που σχηματίζονται με μηχανικά μέσα περιλαμβάνει άμμο, χαλίκια, αέρας και νερό. Κάποια από τα ιζήματα που σχηματίζονται με χημικά μέσα περιλαμβάνει ενεργό άνθρακα, θειικά και φωσφορικά άλατα.



Εικόνα 1.3: Απεικόνιση πορώδους υλικού.
[Πηγή: <http://www.washington.edu/news>]

1.2.1.2. Πορομετρία Υδραργύρου

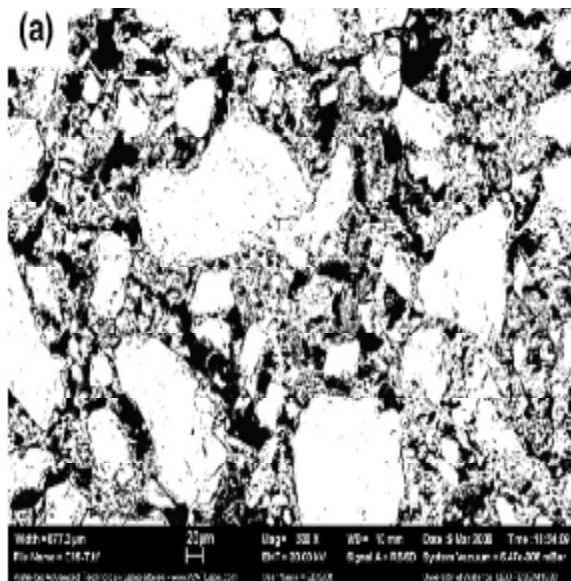
Η πορομετρία υδραργύρου είναι μία από τις βασικότερες μεθόδους ανάλυσης της δομής των πορωδών μέσων. Περιλαμβάνει μια πειραματική τεχνική και μια μέθοδο θεωρητικής ανάλυσης των δεδομένων. Αρχικά, η πειραματική τεχνική βασίζεται στην βαθμιαία είσδυση υδραργύρου σε ένα εκκενωμένο πορώδες υλικό όπου η εξωτερική πίεση αυξάνεται σταδιακά. Στην συνέχεια ακολουθεί απομάκρυνση του υδραργύρου που πραγματοποιείται με την σταδιακή ελάττωση της πίεσης. Οι σχέσεις μεταξύ κορεσμού υδραργύρου και πίεσης για ένα δεδομένο υλικό αποτελούν τις καμπύλες τριχοειδούς πίεσης.

Οι καμπύλες δίνουν βασικές πληροφορίες για την πορώδη δομή. Αναπόφευκτα κάθε θεωρητική μέθοδος που έχει σχεδιαστεί για την αναπαράσταση της κατανομής μεγέθους πόρων από τις καμπύλες τριχοειδούς πίεσης βασίζεται σε υποθέσεις που αφορούν τα σχήματα των πόρων και τον τρόπο αλληλοσύνδεσής τους. Αυτός είναι και ο σημαντικότερος παράγοντας δυσκολίας στην ερμηνεία καμπυλών τριχοειδούς πίεσης με σκοπό την απόκτηση πραγματικών κατανομών μεγέθους πόρων.

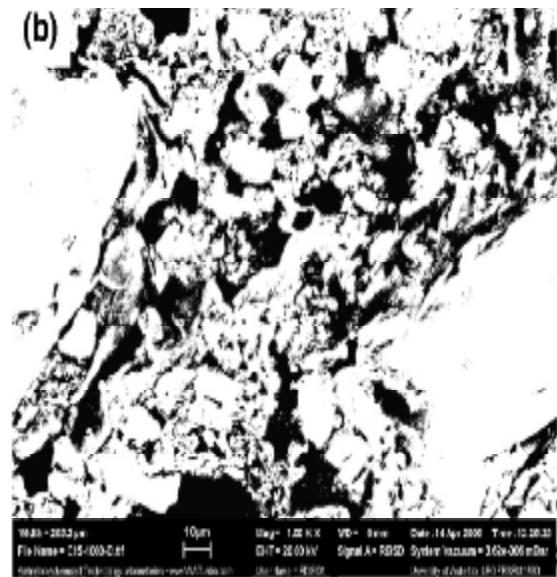
Η συμβατική μέθοδος αυτή, που βασίζεται στο μοντέλο της παράλληλης δέσμης κυλινδρικών σωλήνων, τα αποτελέσματα της δεν θεωρούνται αξιόπιστα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για προσεγγιστική ή συγκριτική βάση. Ωστόσο, χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα. Ερευνητικές μελέτες έχουν προσπαθήσει να ερμηνεύσουν δεδομένα πορομετρίας υδραργύρου σε στερεοποιημένα πορώδη υλικά όπως σε κλίνες κόκκων άμμου, σε εδάφη, υποθέτοντας ότι ο πορώδης χώρος είναι παρόμοιος με αυτόν που σχηματίζεται σε μία διάταξη ομοιόμορφων σφαιρών.

Επίσης, μοντέλα δικτύων πόρων έχουν χρησιμοποιηθεί για την μελέτη της επίδρασης γεωμετρικών, τοπολογικών και στατιστικών παραμέτρων των πορώδων μέσω των καμπύλων τριχοειδούς πίεσης. Σε αυτή την περίπτωση ο πορώδης χώρος αναπαριστάται με ένα δίκτυο κόμβων και κλάδων όπου δίνεται το σχήμα και το μέγεθος.

Ένα πορώδες μέσο μπορεί να θεωρηθεί σαν δίκτυο αλληλοσυνδεόμενων τριχοειδών σωλήνων διαφορετικών μεγεθών ή και ακόμα σαν ένα δίκτυο μεγάλων σχετικά πόρων, τους θαλάμους αλληλοσυνδεόμενων διαμέσου στενότερων χώρων, τους λαιμούς. Οπτικές μελέτες δείχνουν ότι τα μοντέλα δικτύων λαιμών-θαλάμων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναπαραστήσουν επιτυχώς την πορώδη δομή ενός υλικού.



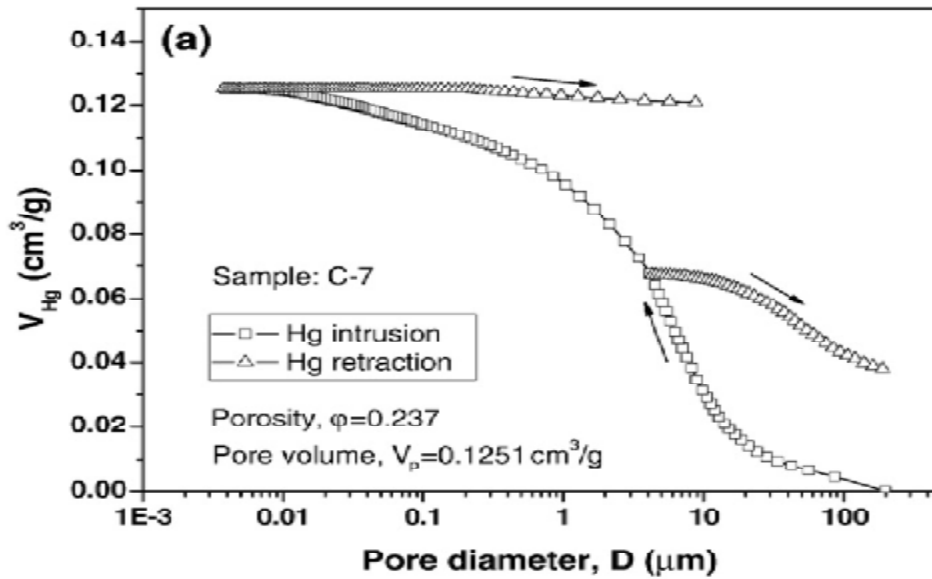
Εικόνα 1.3. (a): Δυαδικές εικόνες BSEM, πορώδες σε μεγέθυνση 300. (Aggelopoulos et al., 2005)



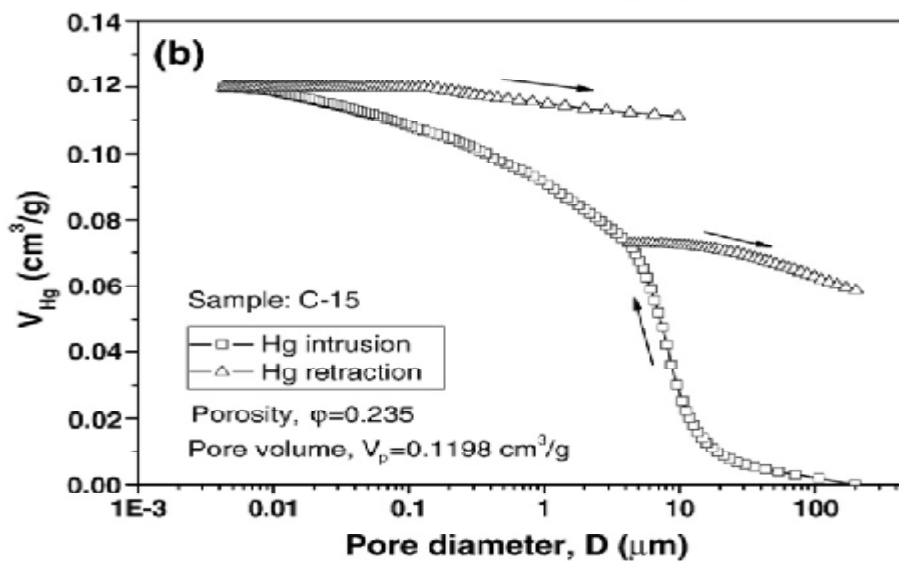
Εικόνα 1.3. (b): Δυαδικές εικόνες BSEM, πορώδες σε μεγέθυνση 1000. (Aggelopoulos et al., 2005)

Οι πειραματικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε επίπεδα δίκτυα λαιμών-θαλάμων, χαραγμένα σε γυάλινες πλάκες έχουν την δυνατότητα να δώσουν πληροφορίες σχετικά με τους μηχανισμούς είσδυσης και απομάκρυνσης υδραργύρου. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να διατυπωθεί η σχέση της επίδρασης της διαβρεκτικότητας του συστήματος αέρας – υδράργυρος – στερεό, όπως επίσης οι γεωμετρικές, τοπολογικές και στατιστικές ιδιοότητες των δικτύων. Η πορομετρία υδραργύρου θεωρείται επιτυχής γιατί καλύπτει μια μεγάλη περιοχή μετρίσιμων μεγεθών.

Αποτέλεσμα αυτού είναι η δυνατή παρακολούθηση τόσο των σχετικά μεγάλων πόρων ενός ψαμμιτικού πετρώματος όσο και των μικρών πόρων ενός καταλύτη. Οι οπτικές μέθοδοι περιορίζονται στην μέτρηση μεγεθών μεγαλύτερων από 0,2 μm περίπου στην μέγιστη μεγέθυνση, ενώ οι ισόθερμες ροφήσεις αζώτου στις μεθόδους εκτόνωσης αερίου μετρούν με ακρίβεια μεγέθη μικρότερα από 0,1 μm περίπου.



Διάγραμμα 1.1. (a): Τυπικές καμπύλες παρείσφρυσης/απόσυρσης υδραργύρου σε εδαφολογικά δείγματα. (Aggelopoulos et al., 2005)



Διάγραμμα 1.1. (b): Τυπικές καμπύλες παρείσφρυσης/απόσυρσης υδραργύρου σε εδαφολογικά δείγματα. (Aggelopoulos et al., 2005)

Με την πάροδο των χρόνων οι πειραματικές μελέτες έχουν καταλήξει στο συνδυασμό διαφορών τεχνικών με σκοπό την συλλογή καλύτερων αποτελεσμάτων. Η πορομετρία υδραργύρου είναι μια από της συνιστώσες τεχνικές. Επιπλέον, η ανάλυση δεδομένων σειριακών τομών ποροχυτευμάτων έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της κατανομής μεγέθους των θαλάμων. Παραμέτρων δηλαδή, που καθορίζουν την συνεκτικότητα του δικτύου των πόρων και την απόκτηση πληροφοριών σε σχέση με την στατική συσχέτιση γειτονικών θαλάμων.

Οι καμπύλες τριχοειδούς πίεσης χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της κατανομής μεγέθους λαιμών, το ποσοτικό χαρακτηρισμό των στατιστικών συσχετίσεων μεταξύ των μεγεθών λαιμών και θαλάμων και για τον χαρακτηρισμό της τραχύτητας των τοιχωμάτων των πόρων.

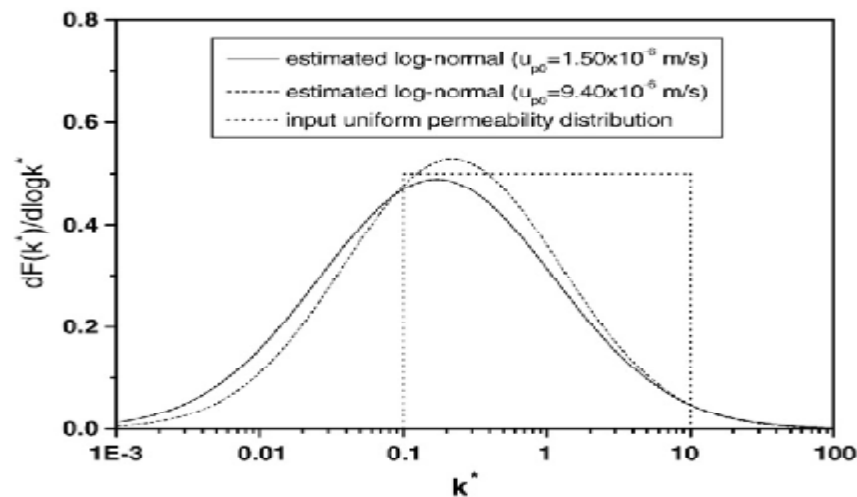
1.2.2. Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα αποτελεί μέτρο της υδραυλικής αγωγιμότητας ενός πορώδους μέσου σε συνθήκες μονοφασικής ροής ενός Νευτώνειου ρευστού. Εξαρτάται από γεωμετρικά και τοπολογικά χαρακτηριστικά της πορώδους δομής. Η διαπερατότητα ορίζεται από τον νόμο του *Darcy* για έρπουσα μόνιμη μονοδιάστατη ροή ασυμπίεστων ρευστών σε πορώδη μέσα ($Re \ll 1$), και εκφράζεται με τον εξής τύπο:

$$Q = \left(\frac{KA}{m} \right) \frac{\Delta P}{L} \quad (1.2)$$

Όπου:

- Q = Ογκομετρική παροχή
- A = Εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του πορώδους δείγματος κάθετα στην διεύθυνση ροής
- L = Μήκος του πορώδους δείγματος στην διεύθυνση ροής
- ΔP = Διαφορά πίεσης
- μ = Ιξώδες του ρευστού.



Διάγραμμα 1.2: Λογαριθμικό διάγραμμα για την διανομή διαπερατότητας στις περιοχές ενός πορώδους μέσου ως προς την ομοιόμορφη κατανομή της πραγματικής διαπερατότητας. (Aggelopoulos et al., 2005)

Για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση της διαπερατότητας, χρησιμοποιούνται κυλινδρικοί πυρήνες γνωστού μήκους. Στους κυλίνδρους αυτούς εισάγεται ρευστό με συγκεκριμένο ιξώδες σε συγκεκριμένη παροχή και σε οριζόντια ή κάθετη ροή αερίου ή υγρού. Πειραματικές μελέτες έχουν αποδείξει ότι οι καλύτερες μετρήσεις δίνονται από αέρια, επειδή τα υγρά συνήθως αλληλεπιδρούν με την πορώδη δομή με αποτέλεσμα η ροή να προκαλεί αναδιάταξη μερικών σωματιδίων ή προσρόφηση υγρών με χημικές αντιδράσεις. Η

διαπερατότητα υπολογίζεται με την εκτέλεση διαφόρων μετρήσεων ρυθμού ροής-πτώσης πίεσης και προσαρμογή των δεδομένων σε ευθεία, ως προς την ογκομετρική παροχή όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση 1.2.

1.3. ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ

Ο παράγοντας σχηματισμού συμβολίζεται με F, είναι ο λόγος της ηλεκτρικής αντίστασης του πορώδους υλικού πλήρως κορεσμένου με ένα ηλεκτρολύτη προς την αντίσταση του ηλεκτρολύτη, όταν καταλαμβάνει πλήρως το χώρο ($\phi=1$):

$$F = \frac{R_0}{R_w} \quad (1.3.)$$

Όπου:

- F = Παράγοντας σχηματισμού
- R_0 = Ηλεκτρική Αντίσταση του πορώδους υλικού πλήρως κορεσμένου με ένα ηλεκτρολύτη
- R_w = Ηλεκτρική Αντίσταση του ηλεκτρολύτη

Ο παράγοντας σχηματισμού (formation factor) είναι το μέτρο της επίδρασης της πορώδους δομής στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του περιεχομένου στους πόρους του ηλεκτρολύτη. Μπορεί να οριστεί για υλικά στα οποία η στερεή μήτρα έχει αμελητέα ηλεκτρική αγωγιμότητα, χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα πετρώματα. Για την μέτρηση του παράγοντα σχηματισμού χρησιμοποιούνται κυλινδρικοί πυρήνες του υλικού που γεμίζονται υπό κενό με ένα διάλυμα NaCl συγκέντρωσης μεγαλύτερης από 10gr/lit. Επιπλέον, ο παράγοντας σχηματισμού εξαρτάται μόνο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πορώδους, όταν όμως δεν υπάρχει επιφανειακή αγωγή από την αλληλεπίδραση ρευστού - στερεού.

Η επίδραση της πορώδους δομής στην ηλεκτρική αγωγιμότητα εξαρτάται από τα εξής:

- Από την εγκάρσια διατομή που το ρευστό έχει διαθέσιμη για ροή.
- Από τον προσανατολισμό και στην τοπολογία των αγωγίμων πόρων.

Με το πέρασμα το χρόνων οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί για την συσχέτιση μεταξύ των παραγόντων σχηματισμού και μακροσκοπικών παραμέτρων καταλήγουν στην εξής μαθηματική εξίσωση του Archie:

$$F = a j^{-m} \quad (1.4)$$

Όπου:

- F = Παράγοντας σχηματισμού
- ϕ = Πορώδες
- m = Εκθέτης ενοποίησης (cementation exponent)
- a = Παράγοντας σχήματος (shape factor).

Με τη βοήθεια της θεωρίας αποτελεσματικού μέσου (effective medium theory) έχει βρεθεί ότι:

$$m = \frac{c_n}{c_{n-2}} \quad (1.5)$$

Όπου:

- c_n = Αριθμός συνδιάταξης ενός δικτύου πόρων
- m = Εκθέτης ενοποίησης (cementation exponent)

Με τον όρο συνδιάταξη εννοούμε τον αριθμό συνδέσεων ανά πόρο. Όπως προαναφέραμε, τα υδατικά διαλύματα που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του παράγοντα σχηματισμού έχουν μεγαλύτερη συγκέντρωση από 10gr/lit. Διότι αν θέλουμε να προσδιορίσουμε τον παράγοντα σχηματισμού καταλήγουμε στην άμεση εξάρτηση του από τις ειδικές αγωγιμότητες του πορώδους μέσου το οποίο είναι γεμάτο με το υδατικό διάλυμα και του υδατικού διαλύματος. Άρα ο παράγοντας σχηματισμού δίνεται από την σχέση:

$$F = \frac{k_w}{k_p} \quad (1.6)$$

Όπου:

- F = Παράγοντας σχηματισμού
- k_w = Ειδική αγωγιμότητα του πορώδους μέσου γεμάτου με το υδατικό διάλυμα
- k_p = Ειδική αγωγιμότητα υδατικού διαλύματος

Η στερεή επιφάνεια ενός πορώδους πετρώματος ή εδάφους υπό κανονικές συνθήκες είναι αρνητικά φορτισμένη και έχει την δυνατότητα να έλκει τα κατιόντα του υδατικού διαλύματος. Τα κατιόντα αποτελούνται από ένα πλήθος κινούμενων ιόντων προς την αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια των πόρων, αφού έλκονται με δύναμης ηλεκτροστατικής φύσης. Η ειδική αγωγιμότητα των κατιόντων είναι γνωστή σαν αγωγιμότητα διπλής ιονοστοιβάδας.

Για υδατικά διαλύματα μεγάλης συγκέντρωσης, όπου το k_w είναι μεγάλο, η επίδραση της επιφανειακής αγωγιμότητας είναι ασήμαντη. Για υδατικά διαλύματα χαμηλής συγκέντρωσης η επίδραση αυτή γίνεται αρκετά σημαντική, όπως φαίνεται από την παρακάτω τύπο:

$$\frac{k_p}{k_w} = \frac{k_p + k_s}{k_w} = \frac{1}{F} + \frac{k_s}{k_w} \quad (1.7)$$

Όπου:

- k_w = Ειδική αγωγιμότητα του πορώδους μέσου γεμάτου με το υδατικό διάλυμα
- k_p = Ειδική αγωγιμότητα υδατικού διαλύματος
- k_s = Ειδική αγωγιμότητα των κατιόντων
- F = Παράγοντας σχηματισμού

Άρα σύμφωνα με τα παραπάνω θα πρέπει η συγκέντρωση του διαλύματος να είναι μεγάλη έτσι ώστε να υπερνικάται η επίδραση της διπλής ιονοστοιβάδας.

1.4. ΤΡΙΧΟΕΙΔΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

Τα τριχοειδή φαινόμενα εμφανίζονται σε μία ευρεία περιοχή φυσικών και τεχνολογικών διαδικασιών και παίζουν σημαντικό ρόλο αφού χαρακτηρίζουν την στατική και δυναμική συμπεριφορά πολυφασικών συστημάτων ρευστών στους κενούς χώρους πορωδών υλικών.

Στην περίπτωση πορωδών υλικών με πόρους μικρού μεγέθους η τριχοειδής συμπίκνωση και εξάτμιση λαμβάνονται υπόψη για την ερμηνεία φαινομένων προσφοράς και εκρόφησης αερίων σε ενδιάμεσες και υψηλές σχετικές πιέσεις. Όμως, στην περίπτωση πορωδών υλικών που χαρακτηρίζονται από μεγάλα μεγέθη πόρων η εκτόπιση ενός ρευστού από ένα άλλο από τον πορώδη χώρο είναι σημαντική σε μια ποικιλία εφαρμογών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η εξόρυξη πετρελαίου και η μεταφορά υγρασίας στα εδάφη.

Επιπλέον, οι τριχοειδείς δυνάμεις που ασκούνται σε διεπιφάνειες ρευστού ή στερεού σε συνδυασμό με την σύνθετη γεωμετρία των πόρων προκαλούν φαινόμενα τριχοειδούς υστέρησης σε διαδικασίες που σχετίζονται με εκτοπίσεις ρευστών. Η κατανόηση των τριχοειδών φαινομένων σε μικροσκοπικό επίπεδο πόρων είναι σημαντική για την ερμηνεία των αντιστοιχών μακροσκοπικών ιδιοτήτων των διαφόρων τύπων πορώδων υλικών. Οι πιο σημαντικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της πορώδους δομής υλικών βασίζονται στις συσχετίσεις της τριχοειδούς πίεσης, της σχετικής πίεσης του ρευστού και των μεγεθών των πόρων. (Aggelopoulos et al., 2005)

1.5. ΚΙΝΗΣΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Η διεπιφάνεια μεταξύ δύο ρευστών είναι μια μεταβατική ζώνη με πάχος συγκρίσιμο με τις μοριακές διαστάσεις μια υγρής φάσης ($2 - 4 * 10^{-8}$ cm). Έτσι, για τον ορισμό των διαφόρων θερμοδυναμικών ποσοτήτων μιας διεπιφάνειας χρησιμοποιείται μια μαθηματική επιφάνεια που παρουσιάζει δισδιάστατη ομοιογένεια ως προς τις επιφανειακές πυκνότητες, μάζας, ενέργειας, και εντροπίας. Η μηχανική ισορροπία μιας τέτοιας καμπύλης επιφάνειας εκφράζεται από την εξίσωση *Young - Laplace*:

$$P_c = P_a - P_b = \gamma J \quad (1.8)$$

Όπου:

- P_c = Τριχοειδής πίεση
- $P_a - P_b$ = Διαφορά πιέσεων των δυο ρευστών στην γειτονία της διεπιφάνειας
- γ = Διεπιφανειακή τάση μεταξύ των δυο ρευστών
- J = Μέση καμπυλότητα σε οποιαδήποτε σημείο της επιφάνειας.

Η δυναμική θεωρία της αστάθειας μιας απείρου μήκους κυλινδρικής στήλης ενός ασυμπίεστου μη ιξώδους ρευστού κάτω από την επίδραση τριχοειδών δυνάμεων, έχει ως αποτέλεσμα ότι αν η στήλη αυτή υποστεί μια διαταραχή με μήκος κύματος να ισχύει η σχέση:

$$I_c > 2\pi a_c \quad (1.9)$$

Όπου:

- λ_c = Μήκος κύματος
- a_c = Ακτίνα της αδιατάρακτης στήλης

Η ισορροπία στην περίπτωση αυτή γίνεται ασταθής. Το μήκος κύματος της διαταραχής που αναπτύσσεται με την μέγιστη ταχύτητα, δηλαδή το όριο μέγιστης αστάθειας, καταλήγει στην σχέση:

$$I_c = 4.51 * 2a_c \quad (1.10)$$

Ωστόσο, ερευνητικές μελέτες έχουν ασχοληθεί και με την περίπτωση μια άπειρης κυλινδρικής στήλης ενός ασυμπίεστου ιξώδους ρευστού. Σε αυτή την περίπτωση οι μελετητές αγνόησαν την επίδραση του περιβάλλοντος ρευστού και την υπόθεση ότι το ιξώδες είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με την αδράνεια. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας ήταν ότι

η μέγιστη αστάθεια αναπτύσσεται όταν το μήκος κύματος της διαταραχής είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με την ακτίνα του κυλίνδρου δηλαδή όταν το $\lambda_c = \infty$. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν κάποιες παρατηρήσεις σχετικά με τον τρόπο σχηματισμού μίας κυλινδρικής ίνας ενός ρευστού με την επίδραση της ιξώδους οπισθέλκουσας δύναμης ενός άλλου ρευστού τοποθετώντας μία μικρή σταγόνα ενός ιξώδους υγρού. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε για ορισμένα διατμητικά πεδία ροής ενός άλλου ιξώδους υγρού όπου δημιουργείται γαλάκτωμα.

Σε αυτή την πειραματική διαδικασία διαπιστώθηκε ότι ενώ η σταγόνα φαινόταν αρκετά ευσταθής κάτω από την επίδραση του πεδίου ροής, έσπασε σε έναν αριθμό μικρών σταγόνων ομοιόμορφου μεγέθους όταν η ροή σταμάτησε. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ανάγκη μελέτης της ευστάθειας κυλινδρικών ινών κάτω από την επίδραση ιξωδών δυνάμεων του περιβάλλοντος ρευστού. Στην συνέχεια μελετήθηκε η ευστάθεια μια άπειρης κυλινδρικής ίνας ενός ιξώδους ρευστού που περιβάλλεται από κάποιο άλλο ιξώδες ρευστό άπειρης μάζας σε ηρεμία. Για την ανάλυση αυτού του φαινομένου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των μικρών ταλαντώσεων, θεωρήθηκε ότι οι κινήσεις είναι συμμετρικές ως προς τον άξονα κυλινδρικής στήλης και ελήφθη υπόψη η επίδραση ιξωδών και τριχοειδών δυνάμεων.

Στις περιπτώσεις που ο λόγος των ιξωδών των δύο ρευστών παίρνει πεπερασμένες τιμές, η μέγιστη αστάθεια πραγματοποιείται σε πεπερασμένες τιμές του μήκους κύματος της διαταραχής και αυξάνει απεριόριστα καθώς ο λόγος των ιξωδών τείνει στο μηδέν ή στο άπειρο. Η μελέτη της επίδρασης της ροής του περιβάλλοντος ρευστού στην ευστάθεια της ίνας σε κάποιες κινήσεις που προκαλούνται από μικρές διαταραχές, απέδειξε ότι η ροή του περιβάλλοντος ρευστού περιορίζει την αύξηση οποιασδήποτε αρχικής διαταραχής σε μία πεπερασμένη τιμή, με συνέπεια το πεδίο ροής να ασκεί σταθεροποιητική επίδραση στην κυλινδρική ίνα. Για την επιβεβαίωση του συμπεράσματος αυτού πραγματοποιήθηκαν αρκετές πειραματικές μελέτες.

Σε όλα τα παραπάνω η τριχοειδής αστάθεια μελετάται χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των στερεών τοιχωμάτων που περιορίζουν τα ρευστά. Για αυτό τον λόγο οι μελέτες επεσήμαναν τους βασικούς παράγοντες που καθορίζουν την αστάθεια ή την ευστάθεια άπειρων κυλινδρικών ινών σε άπειρο μέσο και κατέληξαν ότι οι διαδικασίες αυτές δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν άμεσα σε φαινόμενα τριχοειδούς ευστάθειας σε πορώδη μέσα όπου υπάρχουν στερεά τοιχώματα με πεπερασμένες διαστάσεις. Έχουν γίνει αρκετά πειράματα χωρίς όμως να έχει δοθεί κάποια γενική λύση εξαιτίας του γεγονότος ότι οι συνοριακές συνθήκες μεταβάλλουν την υφή του προβλήματος.

Η ανάλυση της δυναμικής ευστάθειας λεπτών, μη ιξωδών υγρών υμένων με αξονική συμμετρία που γεφυρώνουν το κενό μεταξύ ομοιοαξονικών δίσκων ίσης διαμέτρου, παραμερίζοντας την επίδραση της βαρύτητας και του περιβάλλοντος ρευστού έχει μελετηθεί θεωρητικά. Ωστόσο, κάποιοι ερευνητές ακολουθώντας την ίδια κατεύθυνση μελέτησαν το ίδιο πρόβλημα για την περίπτωση όμως ιξώδους ρευστού κάτω από την επίδραση ιξώδους βαρύτητας και έλαβαν υπόψη και την παρουσία εξωτερικού υγρού. Ακολούθησε η μελέτη της ροής και η παραμόρφωση μιας μεγάλης σταγόνας υγρού που αιωρείται μέσα από άλλο υγρό ίσης πυκνότητας το οποίο κινείται με στρωτή ροή μέσα σε τριχοειδή σωλήνα και σχηματίζει ένα λεπτό υμένα μεταξύ της σταγόνας και των τοιχωμάτων του τριχοειδούς. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η σταγόνα ήταν ευσταθής όσο υπήρχε ροή και έσπασε σε έναν αριθμό μικρών σταγόνων ίσου μήκους όταν η ροή σταμάτησε. Ο λόγος που διασπάστηκε η σταγόνα ήταν η ανάπτυξη τριχοειδών διαταραχών που κατευθύνθηκαν από τα άκρα της προς το κέντρο της.

Η κίνηση διεπιφανειών σε πόρους παρουσιάζει ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον εξαιτίας της σημασίας που έχει ένα τέτοιο φαινόμενο στην ροή δύο φάσεων σε πορώδη μέσα. Ειδικότερα σε διαδικασία όπως είναι η εξόρυξη πετρελαίου.

Μια προσεγγιστική θεωρητική ανάλυση και πειραματική επαλήθευση της εξίσωσης κίνησης ενός δείκτη υδραργύρου μέσα από κυλινδρικούς τριχοειδείς σωλήνες κάτω από

σταθερή πτώση πίεσης δόθηκε από πειραματικές μελέτες οι οποίες έθεσαν συνθήκες στρωτής ροής και διεπιφάνειες σταθερής καμπυλότητας. Επιπλέον, με την βοήθεια αυτών των πειραματικών αποτελεσμάτων οι ερευνητές κατέληξαν ότι η πτώση πίεσης και ταχύτητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του ιξώδους τους ρευστού καθώς επίσης και ότι η διαφορά των γωνιών επαφής είναι πρακτικά ανεξάρτητη από την ταχύτητα κίνησης.

Η τριχοειδής είσδυση των υγρών σε κατακόρυφους και οριζόντιους τριχοειδούς κυλινδρικούς σωλήνες σε διάφορα συστήματα μελετήθηκαν πειραματικά με σκοπό να δώσουν μια συσχέτιση μεταξύ μήκους είσδυσης και χρόνου. Η ιξώδης ροή και η τριχοειδής πίεση για διεπιφάνεια θεωρούνται σταθερής καμπυλότητας. Έτσι, οι πειραματικές μελέτες έχουν καταλήξει στα εξής αποτελέσματα, όταν το μήκος του ρευστού στον τριχοειδή σωλήνα είναι μεγάλο σε σχέση με την διάμετρο του υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις ακόμα και στην περίπτωση που η συνθήκη ικανοποιείται. Επιπλέον, οι ιξώδεις δυνάμεις μπορούν να επηρεάσουν το σχήμα της διεπιφάνειας ενώ μη ιξώδης ροή κοντά στην διεπιφάνειες μπορεί να επηρεάσει την ταχύτητα της κίνησης τους.

Ο μηχανισμός με τον οποίο μια διεπιφάνεια κινείται κατά μήκος των τοιχωμάτων ενός τριχοειδούς σωλήνα θεωρείται δεδομένος. Κάτω από δυναμικές συνθήκες υπάρχει η δυνατότητα η διεπιφάνεια να τέμνει τα τοιχώματα του τριχοειδούς σωλήνα σχηματίζοντας μια κινούμενη γραμμή επαφής ρευστού - ρευστού - στερεού. Επιπλέον, υπάρχει η περίπτωση να υποχωρήσει ένας λεπτός υμένας του ρευστού με συνέπεια να παραμείνει μεταξύ του εισβάλλοντος ρευστού και του τοιχώματος. Σε αυτή την περίπτωση η ροή περιγράφεται με όρους κίνησης μιας φαινομενικής γραμμής επαφής, ωστόσο αυτό γίνεται μόνο όταν η ροή υφίσταται μεγαλύτερη σε κλίμακα σε σύγκριση με το πάχος του υμένα.

Όσο αφορά τις μετρούμενες δυναμικές γωνίες είναι φαινομενικές αφού στην περιοχή της γραμμής επαφής το σχήμα των διεπιφανειών μπορεί να μεταβάλλεται σε κλίμακα μικρότερη από αυτή που παρατηρείται εξαιτίας των ιξωδών δυνάμεων. Διάφορες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό της εξάρτησης δυναμικών γωνιών επαφής από την ταχύτητα κίνησης των διεπιφανειών.

Η παραδοχή ότι δεν υπάρχει ολίσθηση σε μία κινούμενη γραμμή επαφής οδηγεί σε κινηματικά ασύμβατη συνθήκη και σε άπειρη δύναμη αντίστασης της κίνησης. Κάποιες πειραματικές μελέτες υποστηρίζουν ότι ίσως η συνθήκη μη ολίσθησης να μην ισχύει σε μία κινούμενη γραμμή επαφής. Κάποιες άλλες πειραματικές μελέτες διαβεβαιώνουν ότι μια τέτοια συνθήκη είναι κινηματικά συμβατή αν θεωρηθεί ότι υπάρχει ένα είδος περιστροφικής κίνησης υλικών σημείων του ενός ρευστού μεταξύ της διεπιφάνειας και της γραμμής επαφής.

Η διατύπωση μίας συνοριακής συνθήκης ολίσθησης κοντά στην γραμμή επαφής μπορεί να χαρακτηρίσει την κατεύθυνση της μελέτης της κίνησης της γραμμής επαφής. Οι πρώτες πειραματικές μελέτες χρησιμοποίησαν αρχικά την μέθοδο ασυμπτωτικής ανάπτυξης κατά την διάρκεια της βύθισης μιας πλάκας σε ένα λουτρό υγρού. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι τα πεδία ταχύτητας που αντιστοιχούν σε τρία διαφορετικά μοντέλα ολίσθησης διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους, ενώ σε μεγαλύτερες κλίμακες το πεδίο ροής και το σχήμα της διεπιφάνειας ήταν ανεπηρέαστα από την μορφή της συνοριακής συνθήκη ολίσθησης. Άρα, ενώ η ολική αντίσταση στην ροή επηρεάζεται την ολίσθηση, η μαθηματική μορφή της συνοριακής συνθήκης ολίσθησης είναι δευτερεύουσας σημασίας έξω από την άμεση γειτονία της κινούμενης γραμμής επαφής.

Για την εκτίμηση των συντελεστών ολίσθησης θα πρέπει να εξισωθεί το μήκος ολίσθησης και το μήκος κλίμακας του φαινομένου που προκαλεί την ολίσθηση. Ωστόσο, υπάρχουν μελετητές που υποστηρίζουν ότι το φαινόμενο αυτό αναλύεται από μία συνοριακή συνθήκη ολίσθησης με την βοήθεια μίας μεθόδου ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων της μόνιμης έρπουσας κίνησης μια ελεύθερης επιφάνειας υγρού-κενού σε ένα τριχοειδή σωλήνα. Συνέπεια αυτού ήταν οι επιστήμονες να υποθέσουν ότι η ολίσθηση στην γραμμή επαφής είναι μοριακό φαινόμενο όπως η επιφανειακή διάχυση και χρησιμοποίησαν ένα μήκος ολίσθησης

μοριακής διάστασης. Επίσης, υπέθεσαν ότι υπάρχει μια απλή διατμητική ροή πάνω σε αυλακωτή επιφάνεια με ραβδώσεις προσανατολισμένες κάθετα στην διεύθυνση ροής.

Η μέση ταχύτητα σε μία φαινομενικά επίπεδη επιφάνεια, όπως είναι και οι παραπάνω περιπτώσεις, είναι ανάλογη με την διατμητική τάση πάνω από την επιφάνεια. Το μήκος ολίσθησης είναι της τάξης του βάθους των ρηχών ραβδώσεων ή του πάχους βαθέων ραβδώσεων ενώ αγνοήθηκε η επίδραση ραβδώσεων παράλληλα προς την διεύθυνση ολικής ροής. Ωστόσο, με την πάροδο των χρόνων οι ερευνητές πρόσθεσαν έναν μηχανισμό στον οποίο η φαινομενική γραμμή επαφής κινείται με μία ακολουθία μικρών αλμάτων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε κάθε άλμα η διεπιφάνεια πλαταίνει πάνω στην στερεή επιφάνεια και μπροστά από μία σταθερή γραμμή επαφής, σχηματίζοντας έτσι ένα λεπτό υμένα εκτοπισμένου ρευστού. Ωστόσο, σχηματίζεται μία νέα γραμμή επαφής όταν ο υμένας γίνεται ασταθής και καταρρέει. Ένας τέτοιος μηχανισμός δεν λαμβάνει υπόψη την παρουσία τραχύτητας και ονομάζεται μηχανισμός κίνησης-ολίσθησης.

Ο μηχανισμός κίνησης-ολίσθησης μιας διεπιφάνειας κατά μήκος μίας επιφάνειας με μονοδιάστατα περιοδικά στοιχεία τραχύτητας απέδειξε ότι ένα μήκος ολίσθησης το οποίο μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με τον τριχοειδή αριθμό (λόγος ιξωδών προς τριχοειδείς δυνάμεις) θα υπήρχε η δυνατότητα να ήταν μεγαλύτερος από την κλίμακα της τραχύτητας. Για την λύση λοιπόν των εξισώσεων κίνησης αναπτύχθηκε μία μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων για μία μόνιμη κατάσταση μίας διεπιφάνειας δύο ιξωδών ρευστών κάτω από συνθήκες αμελητέων δυνάμεων βαρύτητας και αδράνειας. Τα αποτελέσματα αυτής ήταν η επιβεβαίωση της αλληλεπίδρασης ιξωδών και τριχοειδών δυνάμεων στον προσδιορισμό την δημιουργίας της διεπιφάνειας και της απαιτούμενης πτώσης πίεσης για την εκτόπιση. Επίσης, σε αυτή την διαδικασία θεωρήθηκε ότι υπήρχε κατάσταση ολίσθησης κατά μήκος του τριχοειδούς σωλήνα κοντά στην γραμμή επαφής και ο συντελεστής ολίσθησης μπήκε σαν παράμετρο στο μοντέλο. Με αυτό τον τρόπο οι πειραματικές μελέτες κατέληξαν ότι οι φαινομενικές γωνίες επαφής είναι δυνατόν να διαφέρουν σημαντικά σε σχέση με τις αντίστοιχες πραγματικές.

Η κίνηση των διεπιφανειών μέσα από πόρους ανομοιόμορφης γεωμετρίας χαρακτηρίζεται από τα άλματα Haines, αυτά οφείλονται στην μετάβαση από ευσταθείς σε ασταθείς διεπιφανειακές διαμορφώσεις. Επιπλέον, κατά την κίνηση μιας διεπιφάνειας μέσα από ένα πόρο συγκλίνουσας και αποκλίνουσας γεωμετρίας οι διάφορες θέσεις της γραμμής επαφής είναι ευσταθείς εφόσον η συνεχής εκτόπιση της διαβρέχουσας φάσης αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη διεπιφανειακή καμπυλότητα. Οι θέσεις όπου η καμπυλότητα μειώνεται είναι ασταθείς με συνέπεια την απότομη κίνηση της διεπιφάνειας και το άμεσο γέμισμα του πόρου που βρίσκεται μπροστά από στένωση. Αυτό συνήθως παρατηρείται σε πειραματικές διαδικασίες μέτρησης καμπύλων τριχοειδούς πίεσης. Τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων οδηγούν σε ασυνεχείς μεταβολές της τριχοειδούς πίεσης με τον κορεσμό και ερμηνεύουν ως ένα βαθμό την μη αντιστρεπτότητα αυτών των διαδικασιών.

1.6. ΠΙΕΣΗ ΑΠΟΣΥΝΔΕΣΗΣ

Κατά τις διαδικασίες εκτόπισης δυο μη αναμίξιμων ρευστών μέσα σε πορώδη μέσα κάτω από συνθήκες σχεδόν τέλει διαβροχής ($\theta_e \approx 0$) λεπτοί υμένες διαβρέχοντος υγρού σχηματίζονται μεταξύ των στερεών τοιχωμάτων και των πόρων και της μη διαβρέχουσας φάσης κυρίως σε περιοχές μικροτραχύτητας και γωνιών των πόρων. Στην περίπτωση που το πάχος των υμένων είναι μικρό, τότε το διαβρέχον υγρό σταματά να συμπεριφέρεται όπως η κυρία φάση. Η διαφορά μεταξύ τους ονομάζεται πίεση αποσύνδεσης και είναι άμεσα εξαρτωμένη από το πάχος του υμένα. Αποτέλεσμα είναι η τριχοειδής πίεση και η καμπυλότητα να μην είναι η ίδια κατά μήκος του λεπτού υμένα και κατά μήκος της

διεπιφάνειας των κυρίων φάσεων. Το σχήμα του μηνίσκου από την περιοχή του λεπτού υμένα προς την περιοχή των ολικών φάσεων περιγράφεται από την επαυξημένη εξίσωση Young – Laplace:

$$P_c = \gamma J + \pi (h) \quad (1.11)$$

Όπου:

- P_c = Τριχοειδής πίεση μεταξύ των ομογενών φάσεων των δυο ρευστών
- π = Πίεση αποσύνδεσης
- h = Πάχος του υμένα.
- γ = Διεπιφανειακή τάση μεταξύ των δυο ρευστών

Υπάρχει μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στη ροή σε επίπεδα δίκτυα και στη ροή σε τρισδιάστατα δίκτυα. Στα τρισδιάστατα δίκτυα το ρευστό μπορεί εύκολα να παρακάμψει περιοχές χαμηλής διαπερατότητας, ενώ αυτό είναι περισσότερο δύσκολο στα επίπεδα δίκτυα πόρων. Στη περίπτωση διφασικής ροής, η διαφορά είναι ακόμη σημαντικότερη, καθόσον κατά τη διάρκεια μιας αρχικής εκτόπισης (όπου όλο το δίκτυο είναι γεμάτο από τη μη διαβρέχουσα φάση) σε ένα επίπεδο δίκτυο, το διαβρέχον ρευστό δεν είναι δυνατό να διασχίσει το πορώδες μέσο χωρίς να διαχωρίσει το μη διαβρέχον ρευστό, ενώ στα μη επίπεδα αυτό είναι δυνατόν. (Τακίρογλου Χ., 1989)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΠΟΡΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σωστή ερμηνεία και περιγραφή των συνθηκών ροής της τριχοειδούς πίεσης υδατικής και μη υδατικής φάσης στα πορώδη υλικά είναι χρήσιμη σε διάφορες διεργασίες στην βιομηχανία κυρίως. Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα εξής:

- Στον προσδιορισμό του επιπέδου ρύπανσης ταμειυτήρων υπογείων υδάτων μεοργανικούς ρύπους (non-aqueous phase liquids, NAPLs)
- Στην εκτίμηση κορεσμού του συμφυούς νερού (connate water) και των αποθεμάτων πετρελαίου ενός κοιτάσματος (μηχανική των ταμειυτήρων)
- Στην μέτρηση της υγρασίας των εδαφών
- Στην διαδικασία εξόρυξης υδρογονανθράκων είτε με ελεύθερη εισρόφηση ή με εισπίεση νερού, καθώς επίσης και στην εκτίμηση της εισχώρησης NAPLs στην ακόρεστη και κορεσμένη ζώνη του υπεδάφους

2.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΡΟΗΣ

Η περιγραφή των φαινομένων ροής μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με συνεχή είτε με διακριτά πρότυπα. Τα συνεχή πρότυπα αποτελούν την κλασσική προσέγγιση του θέματος για την περιγραφή φαινομένων σε πορώδη μέσα με πολύπλοκη ανομοιόμορφη δομή ή δομή που χαρακτηρίζεται από πολλές κλίμακες μεγέθους.

Οι φυσικοί νόμοι που διέπουν την ροή των ρευστών στη μικροσκοπική κλίμακα είναι καλά προσδιορισμένοι. Υπάρχει η δυνατότητα να γίνει χρήση των εξισώσεων ορμής, μάζας και ενέργειας με τις κατάλληλες αρχικές και συνοριακές συνθήκες για την διεπιφάνεια ρευστού – στερεού. Ωστόσο, ο προσδιορισμός της πολύπλοκης δομής της διεπιφάνειας είναι σχεδόν αδύνατος, στις περισσότερες περιπτώσεις. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι η απαίτηση της περιγραφή του φαινομένου σε μία κλίμακα μεγέθους μεγαλύτερη από το μέγεθος των πόρων του μέσου.

Οι μακροσκοπικές ιδιότητες των πορωδών όπως και οι αποτελεσματικοί συντελεστές μεταφοράς ορίζονται ως μέσες τιμές των αντίστοιχων μακροσκοπικών ιδιοτήτων. Οι μέθοδοι μέσης τιμής ή μέθοδοι ομογενοποίησης, εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες.

Στην πρώτη κατηγορία ένας στοιχειώδης όγκος ορίζεται με κέντρο κάθε σημείο του πορώδους μέσου και η μέση τιμή λαμβάνεται σε αυτόν. Ο όγκος καλείται στοιχειώδης αντιπροσωπευτικός όγκος και πρέπει να είναι αρκετά μικρός σε σχέση με τον όγκο του συστήματος, αλλά αρκετά μεγάλος για την εξαγωγή τιμών, ώστε οι εξισώσεις αλλαγής που θα προκύψουν να ισχύουν στον όγκο αυτό.

Στην δεύτερη κατηγορία γίνεται χρήση μία ορισμένης συνάρτησης βάρους $m(x)$ οπού x είναι το διάνυσμα θέσης του πορώδους. Οι μακροσκοπικές ιδιότητες εξάγονται από την συνέλιξη των μακροσκοπικών ιδιοτήτων με συνάρτηση του βάρους. Ωστόσο θα πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε μετρικό όργανο σχετίζεται με μία διαδικασία μέσης τιμής, μέσω μιας συγκεκριμένης συνάρτησης βάρους.

Εξαιτίας της πολυπλοκότητας της δομής των πορωδών η εξαγωγή μέσων τιμών είναι δύσκολη. Η χρήση κατάλληλων αποτελεσματικών συντελεστών μεταφοράς+ περιγράφουν το

σύστημα ως συνεχές. Τα πρότυπα που σχετίζονται με την κλασική αυτή περιγραφή καλούνται συνεχή πρότυπα.

Τα διακριτά πρότυπα δεν εμποδίζονται από τους παραπάνω περιορισμούς, τα περισσότερα βασίζονται στην αναπαράσταση του πορώδους μέσου ως ένα δίκτυο πόρων. Με την πάροδο του χρόνου οι πειραματικές μελέτες κατέληξαν ότι μία τυχαία πορώδης δομή μπορεί να χαρακτηριστεί από ισοδύναμο τυχαίο δίκτυο κόμβων και δεσμών. Με δεδομένη την αναπαράσταση αυτή υπάρχει η δυνατότητα να μελετηθεί η ροή σε ένα πορώδες μέσο με μεγαλύτερη ακρίβεια.

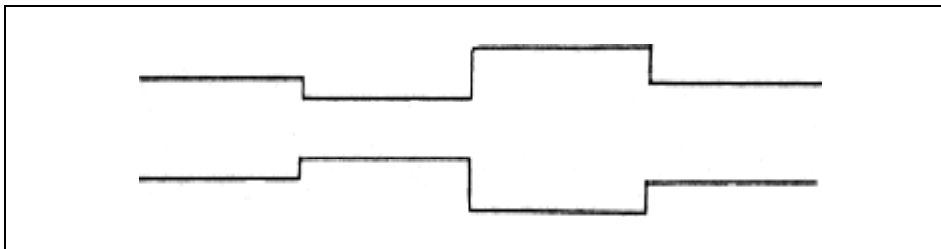
Η θεωρία της διαπέρασης είναι μία εναλλακτική μέθοδος προσέγγισης των φαινομένων μεταφοράς σε πορώδη υλικά μέσα σε τυχαία μικροδομή. Η ιδέα προέρχεται από την στατιστική φυσική και οδηγεί σε γενικούς νόμους και συντελεστές που κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις είναι ανεξάρτητοι από την πορώδη μικροδομή.

2.2.1. Μοντέλα δικτύων πόρων

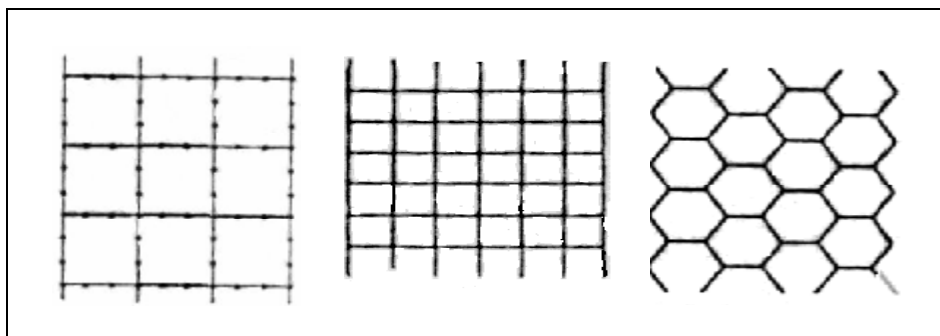
Η δομή των πορωδών υλικών μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα τρισδιάστατο δίκτυο αλληλοσυνδεόμενων πόρων πολύπλοκης γεωμετρίας. Τα δίκτυα αυτά συνδέονται τυχαία μεταξύ τους. Οι πόροι κατανέμονται μέσα στο δίκτυο σε διαφορετικά σχήματα με συνέπεια να δημιουργούνται περίπλοκες και ανώμαλες γεωμετρίες. Για να πραγματοποιηθεί η αναπαράσταση ενός δικτύου χρησιμοποιούνται απλοποιημένα μοντέλα δικτύων πόρων με ομαλή γεωμετρία με σκοπό οι φυσικοχημικές διεργασίες που συμβαίνουν σε πορώδη μέσα να μπορούν να περιγραφούν με μαθηματικές εξισώσεις.

Έτσι λοιπόν, ένα μονοδιάστατο δίκτυο είναι μια αλυσίδα τριχοειδών τμημάτων διαφορετικού μεγέθους και συγκεκριμένου σχήματος (Σχήμα 2.2. (a)). Ωστόσο μία πορώδης δομή μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα τρισδιάστατο πλέγμα κόμβων και δεσμών. Κάποια διδιάστατα δίκτυα παρουσιάζουν ένα είδος συμμετρίας (Σχήμα 2.2. (b)). Επιπλέον ένα δίκτυο μπορεί να αναπαρασταθεί σε διάφορες θεωρητικές μελέτες χωρίς να είναι αναγκαίο να έχει σχήμα τετραγωνικό ή τριγωνικό ή κυκλικό.

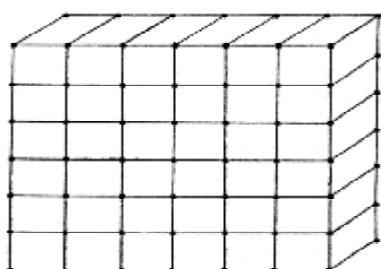
Οι δεσμοί που περιλαμβάνει ένα δίκτυο θεωρούνται τριχοειδείς σωλήνες διάφορων μεγεθών αλλά ίδιου σχήματος. Οι κόμβοι (nodes) θεωρούνται σαν περιοχές τομής των διαφόρων τριχοειδών σωλήνων χωρίς αντίσταση (υδραυλική, ηλεκτρική). Σε μια πιο ρεαλιστική αναπαράσταση της πορώδους δομής, τα μεγέθη και τα σχήματα αντιστοιχούν στους δεσμούς και στους κόμβους του δικτύου. Για την αναπαράσταση της πορώδους δομής μιας μεγάλης ποικιλίας πορωδών μέσων, οι κόμβοι αντιστοιχούν σε σχετικά μεγάλους κενούς χώρους που ονομάζονται θάλαμοι ενώ οι δεσμοί αναπαριστούν στενότερους πόρους σύνδεσης που ονομάζονται λαιμοί.



Σχήμα 2.1.(a): Μονοδιάστατο δίκτυο τριχοειδών σωλήνων.



Σχήμα 2.1.(b): Διάφοροι τύποι διδιάστατων δικτύων



Σχήμα 2.1.(c): Τρισδιάστατο δίκτυο δύο ορόφων

Ένα τρισδιάστατο δίκτυο μπορεί να κατασκευασθεί με την τοποθέτηση πολλών διδιάστατων δικτύων σε παράλληλα στρώματα και ενδιάμεσων δεσμών μεταξύ των κόμβων των και διαδοχικών στρωμάτων.

Για τον χαρακτηρισμό ενός διδιάστατου ή τρισδιάστατου δικτύου λαιμών / θαλάμων λαμβάνονται υπόψη κάποιοι παράμετροι ήτοι:

- Η διάσταση του πλέγματος
- Η κατανομή μεγεθών των θαλάμων
- Η κατανομή μεγεθών των λαιμών
- Τα χαρακτηριστικά σχήματα λαιμών και θαλάμων.
- Το πορώδες του δικτύου
- Ο αριθμός συνδιάταξης που εκφράζει τον αριθμό των λαιμών που συνδέονται με κάθε θάλαμο.

Ωστόσο, σημαντική επίδραση στις ιδιότητες μεταφοράς στα πορώδη μέσα έχουν:

- Οι στατιστικές συσχετίσεις μεταξύ των μεγεθών γειτονικών θαλάμων και συνδεδεμένων θαλάμων/ λαιμών.
- Η τραχύτητα των τοιχωμάτων των πόρων.

2.3. ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ

Τα μοντέλα δικτύων πόρων χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των μακροσκοπικών συντελεστών μεταφοράς υπογείων ταμιευτήρων. Πειραματικές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σε φαινόμενα μεταφοράς των πορωδών μέσων που βασίζονται στην στατιστική φυσική των τυχαίων μέσων. Για να περιγράψουμε τις διαδικασίες μεταφοράς, δηλαδή την ροή στο πορώδες υλικό, χρησιμοποιείται η θεωρία της διείσδυσης σε ένα τυχαίο μέσο και των ιδιοτήτων αγωγιμότητας μιγμάτων ηλεκτρικά αγωγίμων και μη αγωγίμων

υλικών. Πειραματικές μελέτες έδειξαν ότι η ίδια επιστημονική προσέγγιση είναι εφαρμόσιμη στην μοντελοποίηση της διαφασικής ροής σε πορώδη μέσα.

Έτσι, η θεωρία της διείσδυσης δίνει την δυνατότητα κατανόησης και των πολυφασικών ιδιοτήτων μεταφοράς των πορωδών μέσων. Στην περιοχή του ορίου διείσδυσης (percolation threshold), η κρίσιμη συμπεριφορά ενός συστήματος μπορεί να περιγραφεί από τους γενικούς νόμους κλιμάκωσης. Οι μακροσκοπικές ιδιότητες του πορώδους υλικού γίνονται ανεξάρτητες από την μικροσκοπική τους δομή.

Όπως έχουμε προαναφέρει ένα πορώδες δείγμα αποτελείται από μια ομάδα συνδεδεμένων πόρων. Θεωρητικά είναι το κλάσμα των πόρων που έχει την ιδιότητα να μεταβιβάσει ρευστό. Τα μεγέθη των πόρων αυτών απαιτούνται να είναι μεγαλύτερα από κάποια τιμή για την εισβολή μιας μη διαβρέχουσας φάσης. Οι πόροι αυτοί ονομάζονται ανοιχτοί, ωστόσο η θέση τους στο δείγμα είναι τυχαία.

Το κλάσμα των ανοιχτών πόρων συμβολίζεται με (p) . Στην ουσία οι πόροι αυτοί είναι οι κοινοί δηλαδή, οι πόροι που υπάρχουν στο υλικό και έχουν την δυνατότητα να διαβιβάσουν το μη διαβρέχον ρευστό (open pores). Ορισμένοι πόροι συνδέονται με την εξωτερική επιφάνεια του δείγματος μέσω συνεχών μονοπατιών αυτοί ονομάζονται προσβάσιμοι (accessible) και το κλάσμα τους είναι X_a . Άρα οι προσβάσιμοι πόροι για ένα μεγάλο δείγμα είναι αυτοί που συνδέονται σε μια άπειρη συστάδα συνεχών ανοιχτών πόρων.

Στην περίπτωση που η τιμή του κλάσματος των ανοιχτών πόρων είναι μικρή καμία άπειρη συστάδα αυτού του είδους δεν υπάρχει, με συνέπεια οι ανοιχτοί πόροι να κατανέμονται σαν απλοί πόροι (singlets) ή μικρές συστάδες απομονωμένων πόρων. Όμως, στην περίπτωση που η τιμή του κλάσματος των ανοιχτών πόρων είναι μεγάλη οι απομονωμένες συστάδες μεγαλώνουν σε μέγεθος και συνδέονται μεταξύ τους ώστε σε μια κρίσιμη τιμή του κλάσματος (p) να εμφανιστεί για πρώτη φορά μια άπειρη συστάδα συνεχών ανοιχτών πόρων (network spanning cluster) διαμέσου του δείγματος.

Η κρίσιμη τιμή του κλάσματος αυτού συμβολίζεται με (p_c) και ονομάζεται κατώφλι διείσδυσης (percolation threshold) του πορώδους μέσου. Όταν το κλάσμα των ανοιχτών πόρων (p) αυξάνεται πάνω από την κρίσιμη τιμή (p_c) , τότε το κλάσμα των προσβάσιμων πόρων X_a , σε ένα άπειρο μέσο, αυξάνεται πάνω από το μηδέν, με συνέπεια βαθμιαία να φθάνει στη μονάδα αφού και το κλάσμα των ανοιχτών πόρων (p) τείνει προς τη μονάδα. Η σχέση μεταξύ του κλάσματος των ανοιχτών πόρων (p) και του κλάσματος των προσβάσιμων πόρων (X_a) ονομάζεται συνάρτηση πρόσβασης (accessibility function). Σε μία γενική περίπτωση θεωρείται ότι καθορίζεται από την τοπολογία και ετερογένεια του πορώδους υλικού.

Οι κατηγορίες των μοντέλων διείσδυσης που χρησιμοποιούνται στην εξομοίωση διεργασιών ροής δύο φάσεων σε δίκτυα θαλάμων και λαϊμών είναι οι εξής:

a) *Μοντέλο διείσδυσης δεσμού:*

Κάθε δεσμός ανεξάρτητα από όλους τους άλλους έχει μια σταθερή πιθανότητα να είναι ανοιχτός ενώ όλοι οι κόμβοι είναι ανοιχτοί, η πιθανότητα ίση με τη μονάδα.

b) *Μοντέλο διείσδυσης κόμβου:*

Κάθε κόμβος έχει μια σταθερή πιθανότητα να είναι ανοιχτός ενώ όλοι οι δεσμοί είναι ανοιχτοί.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι και τα δύο μοντέλα έχουν διαφορετικές συναρτήσεις πρόσβασης με συνέπεια να έχουν και διαφορετικές τιμές στην κρίσιμη τιμή κλάσματος (p_c) .

2.3.1. Χαρακτηρισμός ενός συστήματος διείσδυσης

Η συνεκτικότητα των συστάδων καθώς επίσης και οι ιδιότητες μεταφοράς χαρακτηρίζονται από ορισμένες ποσότητες, οι οποίες είναι:

- Πιθανότητα διείσδυσης $P(p)$: ορίζεται σαν η πιθανότητα ενός δεδομένου δεσμού να ανήκει στην συστάδα διείσδυσης (percolation cluster), όταν το κλάσμα των ανοικτών δεσμών είναι p .
- Συνάρτηση πρόσβασης $X_a(p)$: ορίζει το κλάσμα των ανοικτών δεσμών που ανήκουν στην συστάδα διείσδυσης.
- Μήκος συσχέτισης $\xi_p(p)$: είναι η τυπική ακτίνα της συστάδας διείσδυσης για $p < p_c$, και η κλίμακα μήκους πάνω από την οποία το σύστημα είναι μακροσκοπικά ομογενές για $p > p_c$.
- Αποτελεσματική αγωγιμότητα g_e : ορίζεται σαν το κλάσμα της αγωγιμότητας της συστάδας διείσδυσης προς την αγωγιμότητα του δικτύου αν όλοι οι δεσμοί ήταν αγωγιμοί.

Μέσω προσομοιώσεων σε δίκτυα αυξανόμενου μεγέθους Μελετητές έχουν ορίσει κάποιους γενικευμένους νόμους κλιμάκωσης (universal scaling laws) της θεωρίας διείσδυσης. Οι βασικότεροι νόμοι κλιμάκωσης στο κατώφλι διείσδυσης (p_c) είναι οι κάτωθι:

$$P_{(p)} \propto (p - p_c)^{b_p} \quad (2.1)$$

$$X_a(p) \propto (p - p_c)^{b_p} \quad (2.2)$$

$$X_p(p) \propto |p - p_c|^{-\nu_p} \quad (2.3)$$

$$g_e(p) \propto (p - p_c)^m \quad (2.4)$$

Οι εκθέτες που παρατηρούνται στους νόμους κλιμάκωσης είναι οι (β_p), (ν_p), και (μ) και ονομάζονται κρίσιμοι εκθέτες. Εξαρτώνται μόνο από την διαστατικότητα (d) του συστήματος και είναι ανεξάρτητοι από την μικροσκοπική λεπτομερή του συστήματος. Ο Πίνακας 2.1. περιλαμβάνει τις τιμές των εκθετών για διδιάστατα ($d=2$) και τρισδιάστατα ($d=3$) συστήματα. Οι τιμές αυτές ισχύουν για μεγάλα δίκτυα ενώ στα μικρότερα δίκτυα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση του μεγέθους.

| ΕΚΘΕΤΗΣ | d=2 | d=3 |
|-----------|------|------|
| β_p | 5/36 | 0.41 |
| ν_p | 4/3 | 0.80 |
| M | 1.3 | 2.00 |

Πίνακας 2.1. Τιμές των κρίσιμων εκθετών

2.4.ΡΟΗ ΜΙΑΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΠΟΡΩΔΗ ΜΕΣΑ

2.4.1. Νόμος Darcy

Ως απόλυτη ή ειδική διαπερατότητα ορίζεται η αγωγιμότητα που παρουσιάζει ένα διαπερατό πορώδες μέσο κατά τη ροή σε αυτό ενός Νευτώνειου ρευστού. Η απόλυτη διαπερατότητα είναι συμφυής ιδιότητα του πορώδους μέσου και εξαρτάται μόνο από την πορώδη δομή.

Ορισμός της απόλυτης διαπερατότητας δίνεται μέσω του νόμου του Darcy, που ανακαλύφθηκε πειραματικά το 1856. Ο νόμος αυτός ισχύει με μεγάλη ακρίβεια για το είδος το ροών σε πορώδη μέσα, στις οποίες οι αδρανειακές δυνάμεις είναι αμελητέες.

Η εξίσωση Navier - Stokes για ισόθερμη ροή ασυμπίεστου Νευτώνειου ρευστού δίνεται από την σχέση:

$$\frac{Dv^*}{Dt^*} = \frac{\partial v^*}{\partial t^*} + (v^* \cdot \nabla^*) \cdot v^* = -\nabla^* \cdot p^* + \frac{1}{Re} \cdot \nabla^{*2} \cdot v^* + \frac{1}{Fr} \cdot g^* \quad (2.5)$$

Για τον αριθμό Reynolds ισχύει η σχέση:

$$Re = \frac{r \cdot n \cdot d}{m} \quad (2.6)$$

Για τον αριθμό Froude ισχύει η σχέση:

$$Fr = \frac{v^2}{d \cdot g} \quad (2.7)$$

Όπου:

- ρ= Πυκνότητα
- v= Μέτρο ταχύτητας
- d= Χαρακτηριστικό μήκος ροής
- μ= Ιξώδες
- g= Επιτάχυνση βαρύτητας

Σε περιπτώσεις που η ροή ενός ή περισσότερων ρευστών μέσα σε ένα πορώδες μέσο είναι αργή, τότε υπάρχει περίπτωση και ο αριθμός Reynolds να είναι πολύ μικρός. Επίσης, αν και ο όρος $\left| \frac{\partial v^*}{\partial t^*} \right|$ είναι πολύ μικρός, τότε όλος ο όρος των αδρανειακών δυνάμεων είναι μικρός σε σύγκριση με την πίεση ή τις ιξώδεις δυνάμεις. Αγνοώντας των όρο των αδρανειακών δυνάμεων, λαμβάνεται η εξίσωση Stokes σε σταθερή κατάσταση.

$$\frac{1}{Re} \cdot \nabla^{*2} \cdot v^* = \nabla^* \cdot p^* - \frac{1}{Fr} \cdot g^* = \nabla^* \cdot p^* \quad (2.8)$$

Η εξίσωση Stokes, που διέπει την έρπουσα ροή είναι γραμμική και συνήθως επιλύεται εύκολα. Σε διαστατική μορφή η εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$m \cdot \nabla^2 \cdot n = \nabla P \quad (2.9)$$

Όπου η ολική πίεση υπολογίζεται από την σχέση:

$$P = p + \rho \cdot g \cdot z \quad (2.10)$$

Όπου:

- P= Ολική πίεση
- μ = Ιξώδες
- v Ταχύτητα
- z= Ύψος από το επίπεδο αναφοράς

Όταν ισχύουν οι προϋποθέσεις για έρπουσα ροή σε ένα πορώδες μέσο τότε ισχύει ο νόμος του Darcy:

$$\langle n \rangle = -\frac{k}{m} \cdot \langle \nabla P \rangle \quad (2.11)$$

Όπου:

- $\langle n \rangle$ = Μέση ταχύτητα (επιφανειακή ταχύτητα ή ταχύτητα φίλτρου)
- k= Διαπερατότητα
- μ = Ιξώδες
- $\langle \nabla P \rangle$ = Μέση μακροσκοπική βαθμίδα της ολικής πίεσης

Η εξίσωση του Darcy είναι γραμμική όπως και η εξίσωση του Stokes. Η ολοκληρωτική μορφή για ροή στη μία διάσταση δίνεται από την σχέση:

$$q = -\frac{k}{m} \cdot A \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (2.12)$$

Όπου:

- q= Παροχή του ρευστού που διοχετεύεται
- A= Επιφάνεια της διατομής του πορώδους μέσου (περιλαμβάνει τον πορώδη χώρο)
- P= Ολική πίεση
- L= Μήκος του πορώδους μέσου
- k= Διαπερατότητα
- μ = Ιξώδες

Αν το πορώδες μέσο είναι ανισόρροπο τότε ο νόμος του Darcy γενικεύεται και η διαπερατότητα είναι ένας τανυστής δεύτερης τάξης

$$\langle n \rangle = -\frac{K}{m} \cdot \langle \nabla P \rangle \quad (2.13)$$

Η απόλυτη διαπερατότητα έχει διαστάσεις επιφάνειας, για αυτό τον λόγο ερμηνεύεται συνήθως ως ένδειξη της ροής του ρευστού στη στερεή επιφάνεια του πορώδους μέσου. Αν η εξίσωση 2.9 αναφέρεται σε ένα στοιχειώδη όγκο και αντικατασταθεί με την εξίσωση 2.13, τότε δίνεται η σχέση:

$$\langle n \rangle = -K \cdot \langle \nabla^2 \cdot v \rangle \quad (2.14)$$

Όπου :

$K=$ Η διαπερατότητα που προκύπτει από την ολοκλήρωση της διαδικασίας

Η εξίσωση Navier – Stokes συνδυαζόμενη με την ασυμπίεστοτητα του ρευστού και την συνθήκη της μη ολίσθησης στα τοιχώματα οδηγεί σε μία ακριβή διατύπωση για την σταθερή ροή σε πορώδη μέσα. Στην περίπτωση που οι αδρανειακοί όροι είναι αμελητέοι τότε η μακροσκοπική μέση ταχύτητα της ροής είναι ανάλογη με την μακροσκοπική μέση βαθμίδα πίεσης. Ωστόσο, για να ισχύουν τα όσα προαναφέρθηκαν θα πρέπει το πορώδες μέσο να είναι επαρκώς ομογενές στην κλίμακα της ολοκλήρωσης, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να υπάρχουν μέσες τιμές.

Στην πραγματικότητα ο νόμος του Darcy συνδέει τις μέσες τιμές των ιδιοτήτων, όπου η ολοκλήρωση πραγματοποιείται σε κάποιον όγκο του πορώδους μέσου με αποτέλεσμα να εξαρτάται από την πορώδη δομή. Σε αντίθετη περίπτωση η εξίσωση Navier – Stokes και όσες προέκυψαν από αυτή περιλαμβάνει τοπικές τιμές ταχυτήτων και πιέσεων όπου ορίζονται μέσα σε ξεχωριστούς πόρους του μέσου.

Ο νόμος Darcy προκύπτει με διαδικασία μέσης τιμής όταν η εξίσωση Navier – Stokes είναι διατυπωμένη για τους πόρους του συστήματος και εφοδιασμένη με τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες, ολοκληρώνεται σε ένα αντιπροσωπευτικό στοιχειώδη όγκο και διατυπώνεται ως εξής:

$$\langle n_b \rangle = -\frac{K}{m} \cdot (\nabla \langle P_b \rangle^b - r_b \cdot g) \quad (2.15)$$

Όπου:

$\beta=$ Ο κάτω δείκτης υποδεικνύει την ποσότητα που υπάρχει στην πορώδη δομή και ο άνω δείκτης υποδηλώνει μέσες τιμές στον πορώδη όγκο

Η διαπερατότητα K υπολογίζεται από την σχέση:

$$K = e_b \cdot T^{-1} \quad (2.16)$$

Όπου ο τανυστής T υπολογίζεται από την σχέση:

$$T = -\frac{1}{V_b} \cdot \int_{A_b} n_{ba} \cdot (\nabla B - I b) \cdot dA \quad (2.17)$$

Όπου:

$e_b =$ Πορώδες

$V_\beta =$ Όγκος του πορώδους

$n_{\alpha\beta} =$ Κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα στην διεπιφάνεια μεταξύ των φάσεων α και β

$A_\beta =$ Αντίστοιχη επιφάνεια στο πορώδες

$B =$ Τανυστής που προκύπτει από τις αποκλίσεις των τοπικών τιμών της ταχύτητας και τις πιέσεις από τις μέσες τιμές στο εσωτερικό του υλικού.

$b =$ Διάνυσμα που προκύπτει από τις αποκλίσεις των τοπικών τιμών της ταχύτητας και τις πιέσεις από τις μέσες τιμές στο εσωτερικό του υλικού.

Η μακροσκοπική περιγραφή συμπληρώνεται από τον μακροσκοπικό νόμο συνέχειας, ο οποίος για ασυμπίεστο ρευστό διατυπώνεται ως εξής:

$$\nabla \cdot \langle n_b \rangle = 0 \quad (2.18)$$

2.5.ΡΟΗ ΔΥΟ ΜΗ ΑΝΑΜΕΙΞΙΜΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΣΕ ΠΟΡΩΔΗ ΜΕΣΑ

2.5.1. Σχετικές διαπερατότητες

Το πρόβλημα της ροής δύο μη αναμειξιμων φάσεων σε πορώδη μέσα δεν έχει άμεση σχέση με την ροή σε μία φάση. Ωστόσο, όλα τα παραπάνω είναι χρήσιμα για να κατανοήσουμε τις κύριες παραμέτρους που εμπλέκονται στην περιγραφή των πορώδων μέσων και των προβλημάτων μεταφοράς σε αυτά.

Όταν στο πορώδες υπάρχουν δύο μη αναμειξιμα ρευστά, το πρόβλημα της περιγραφής της ροής γίνεται ακόμα πιο σύνθετο. Αυτό γίνεται διότι οι διεπιφάνειες που αναπτύσσονται στους πόρους δημιουργούν επιπλέον προβλήματα στην περιγραφή της πολύπλοκης πορώδους δομής. Ακόμα, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η διαμόρφωση των δύο ρευστών στον πορώδη χώρο.

Για την περιγραφή της διφασικής ροής δυο μη αναμειξιμων ρευστών αρχικά γίνεται χρήση της εξίσωσης του Stokes και της εξίσωσης της συνέχειας για δύο ρευστές φάσεις. Οι φάσεις αυτές προσδιορίζονται ως β και γ και για κάθε μια ορίζονται οι κατάλληλες αρχικές και συνοριακές συνθήκες,. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι η εξαγωγή των παρακάτω εξισώσεων, οι οποίες συνδέονται με τις μέσες ταχύτητες των δύο ρευστών, τις μέσες πιέσεις τους καθώς και τους κορεσμούς των δύο φάσεων. (Αβραάμ Δ., 1996)

$$\langle \mathbf{n}_b \rangle = -\frac{\mathbf{K}_b}{m_b} \cdot (\nabla \cdot \langle P_b \rangle^b - \mathbf{r}_b \cdot \mathbf{g}) + \mathbf{K}_{bg} \cdot \langle \mathbf{n}_g \rangle \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial S_b}{\partial t} + \nabla \cdot \langle \mathbf{n}_b \rangle = 0 \quad (2.20)$$

$$\langle \mathbf{n}_g \rangle = -\frac{\mathbf{K}_g}{m_g} \cdot (\nabla \cdot \langle P_g \rangle^g - \mathbf{r}_g \cdot \mathbf{g}) + \mathbf{K}_{gb} \cdot \langle \mathbf{n}_b \rangle \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial S_g}{\partial t} + \nabla \cdot \langle \mathbf{n}_g \rangle = 0 \quad (2.22)$$

$$S_b + S_g = 1 \quad (2.23)$$

Όπου:

- ρ= Πυκνότητα
- $\langle v \rangle$ = Μέση ταχύτητα
- $\langle P \rangle$ = Μέση πίεση
- μ= Ιξώδες
- g= Επιτάχυνση βαρύτητας
- K= Διαβρεκτικότητα
- S= Κορεσμός

Όπου β και γ αναφέρεται σε κάθε ρευστή φάση αντίστοιχα.

Οι παραπάνω εξισώσεις περιλαμβάνουν δύο όρους. Ο πρώτος είναι γενίκευση του νόμου του Darcy για την αντίστοιχη φάση, ενώ ο δεύτερος είναι ο όρος σύζευξης των δύο φάσεων, που προκύπτει από την αλληλεπίδραση τους. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι προαναφερόμενες σχέσεις ισχύουν μόνο στην περίπτωση που ο τριχοειδής αριθμός είναι μικρός, δηλαδή $Ca \ll 1$ και όταν η επίδραση από την κίνηση των γραμμών επαφής είναι αμελητέα.

Ο τριχοειδής αριθμός ορίζεται ως εξής:

$$Ca = \frac{m \cdot n}{g} \quad (2.24)$$

Όπου:

$\gamma =$ Διεπιφανειακή τάση των δύο φάσεων
 $\mu =$ Ιξώδες
 $v =$ Ταχύτητα

Ο τριχοειδής αριθμός εκφράζει τον λόγο των ιξωδών προς τις τριχοειδείς δυνάμεις και είναι συνήθως ένας πολύ μικρός αριθμός που κυμαίνεται από 10^{-4} έως και 10^{-8} . Επιπλέον, ο τριχοειδής αριθμός αναφέρεται στην διαβρέχουσα φάση.

Ωστόσο, υπάρχουν και δύο ακόμα αδιάστατοι αριθμοί που χαρακτηρίζουν την ροή σε πορώδη μέσα: ο λόγος των αδρανειακών προς τις τριχοειδείς δυνάμεις που ονομάζεται αριθμός του Weber και ο λόγος των βαρυτικών προς τις τριχοειδείς δυνάμεις που ονομάζεται αριθμός Bond. Οι σχέσεις που τους εκφράζουν είναι οι εξής:

Για τον αριθμό Weber ισχύει η σχέση:

$$We = \frac{r \cdot n^2 \cdot d}{g} \quad (2.25)$$

Για τον αριθμό Bond ισχύει η σχέση:

$$Bo = \frac{\Delta \cdot r \cdot g \cdot d^2}{g} \quad (2.26)$$

Συνδυασμοί των παραπάνω αδιάστατων ομάδων παράγουν άλλους αδιάστατους αριθμούς:

Για τον αριθμό Reynolds ισχύει η σχέση:

$$Re = \frac{We}{Ca} \quad (2.27)$$

Για τον αριθμό Froude ισχύει η σχέση:

$$Fr = \frac{We}{Bo} \quad (2.28)$$

Στα πορώδη μέσα η χαρακτηριστική διάσταση d είναι πολύ μικρή και για αυτό οι αριθμοί που την περιέχουν θεωρούνται αμελητέοι. Άρα ο αδιάστατος αριθμός που παίζει σημαντικό ρόλο είναι ο τριχοειδής αριθμός Ca .

Σε αναλογία με την θερμοδυναμική των αντιστρεπτών διεργασιών, πειραματικές μελέτες έχουν αποδείξει ότι $K_{\beta\gamma} = K_{\gamma\beta}$. Ωστόσο, υπάρχουν και περιπτώσεις που η σχέση αυτή δεν ισχύει, όταν στη ροή δυο μη αναμειξιμων φάσεων, συμβαίνουν γεγονότα που σχετίζονται με την κίνηση των διεπιφανειών, τα οποία είναι καταστρεπτικά και δεν τηρούν τις απαραίτητες προϋποθέσεις.

Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι οι όροι σύζευξης είναι πολύ σημαντικοί όταν $\mu_\beta = \mu_\gamma$. Όμως υπάρχουν και περιπτώσεις που οι διαφορά των ιξωδών των δύο φάσεων είναι εξίσου σπουδαία. Όλα αυτά όμως αποδείχθηκαν στην περίπτωση που υπάρχει κίνηση και των δύο φάσεων είτε σε συνεχή είτε σε ασυνεχή μορφή.

Στην βιομηχανία του πετρελαίου οι όροι σύζευξης αμελούνται. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι αυτό που απομένει από τους συντελεστές στις μακροσκοπικές ιδιότητες είναι οι διαπερατότητες (απόλυτες και σχετικές) των δύο φάσεων K_β και $K_{\beta\gamma}$. Στην περίπτωση που οι συντελεστές αυτοί διαιρεθούν με την απόλυτη διαπερατότητα ορίζονται οι σχετικές διαπερατότητες των δύο φάσεων ως εξής:

$$k_{eb} = \frac{K_b}{K} \quad (2.29)$$

$$k_{eg} = \frac{K_g}{K} \quad (2.30)$$

Η έννοια των σχετικών διαπερατοτήτων θεωρείται ότι είναι μία επέκταση του νόμου του Darcy στην περίπτωση της ροής των δύο φάσεων. Ωστόσο, η δικαιολόγηση των σχετικών διαπερατοτήτων απαιτεί τα εξής:

- Η οπισθέλκουσα της ροής στην περιοχή να είναι αμελητέα
- Η διεπιφάνεια να μπορεί να θεωρηθεί άκαμπτη, ως μία συνέχεια της διεπιφάνειας του ρευστού και του στερεού.

Υπό τις προαναφερόμενες συνθήκες οι όροι σύζευξης θεωρούνται αμελητέοι και η περιγραφή της ροής των δύο φάσεων απαιτεί μόνο τη μέτρηση των σχετικών διαπερατοτήτων. Πειραματικές μελέτες απέδειξαν ότι στην περίπτωση που υπάρχει αύξηση του ιξώδου της διεπιφάνειας οι όροι σύζευξης γίνονται λιγότερο σημαντικοί. Επιπλέον, αποδείχτηκε ότι η επίδραση του λόγου των ιξωδών είναι εξίσου σημαντική στις σχετικές διαπερατότητες και στους όρους σύζευξης. (Αβρααμ Δ., 1996)

2.5.2. Παράμετροι ροής

Οι παράμετροι που επηρεάζουν τις σχετικές διαπερατότητες είναι ο κορεσμός των δύο φάσεων και ο τρόπος με τον οποίο επιτεύχθηκαν οι κορεσμοί. Ωστόσο, ένας σημαντικός ακόμα αριθμός παραμέτρων πρέπει να εξετασθεί προσεκτικά όπως:

- Μορφολογία πορώδους χώρου
- Χαρακτηριστικά της διαβρεκτικότητα των ρευστών
- Ο λόγος των ιξωδών των ρευστών
- Τριχοειδής αριθμός

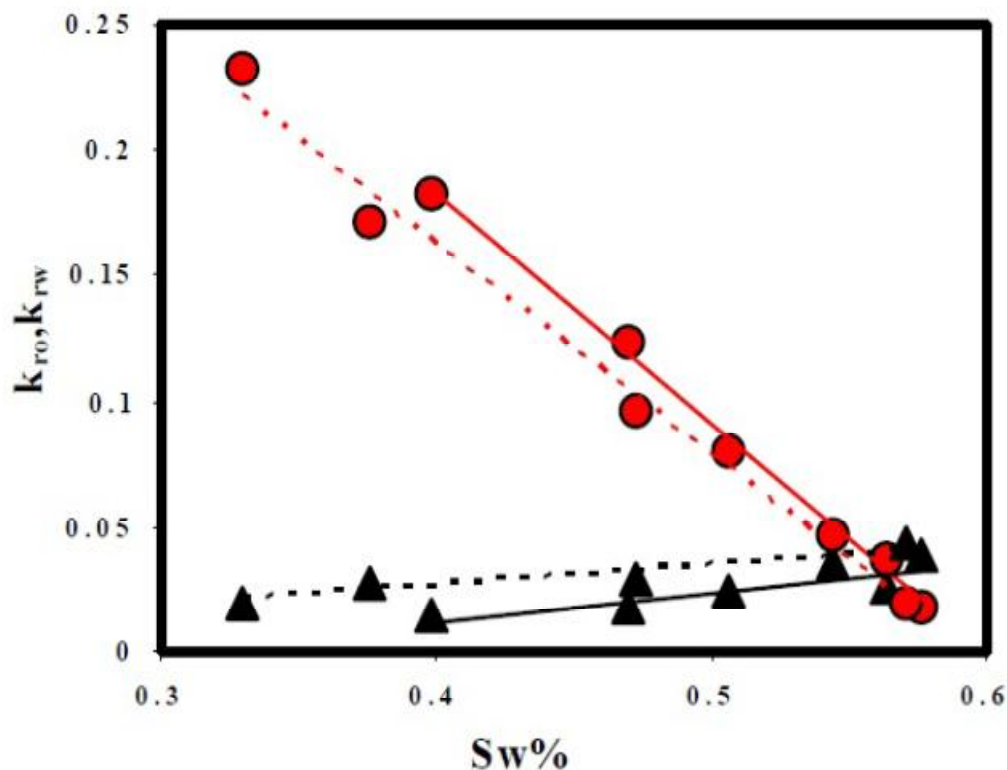
Σημαντικός παράγοντας είναι και ο τρόπος κατανομής των ρευστών μέσα στον πορώδη χώρο, είτε σε μόνιμη είτε σε μεταβατική κατάσταση. Η παράμετρος αυτή είναι μικροσκοπική, δηλαδή πρέπει να πραγματοποιηθεί έλεγχος στην κλίμακα μεγέθους πόρων. Είναι πολύ σημαντική για την σωστή περιγραφή της ροής στην μακροσκοπική κλίμακα.

2.5.2.1. Ιστορία της ροής

Έχει αποδειχθεί ότι η ιστορία της ροής είναι συνυφασμένη με τις σχετικές διαπερατότητες. Ο λόγος που οι σχετικές διαπερατότητες εξαρτώνται από την ιστορία της ροής δηλαδή από τον τρόπο με τον οποίο έγιναν οι αλλαγές στον κορεσμό των δύο ρευστών, είναι η ύπαρξη πολλών διαφορετικών διαμορφώσεων των ρευστών. Οι διαμορφώσεις αυτές πρέπει να ικανοποιούν την εξίσωση Stokes. Η εξίσωση μετατρέπεται σε μη γραμμική εξαιτίας των ελεύθερων διεπιφανειών που δημιουργούνται κατά την ροή.

Όπως είναι λογικό κάθε διαμόρφωση περιλαμβάνει διαφορετικά σχήματα διεπιφανειών, τα οποία είναι σταθερά ή μετασταθή κάτω από τις τοπικές συνθήκες πίεσης και την γεωμετρία του πορώδους.

Η εξάρτηση από την ιστορία της ροής είναι ο κύριος λόγος της εξάρτησης των τιμών των σχετικών διαπερατοτήτων στις συγκεκριμένες συνθήκες ροής, δηλαδή, εάν οι κορεσμοί έχουν επιτευχθεί με διαδικασία εισρόφησης ή αποστράγγισης.



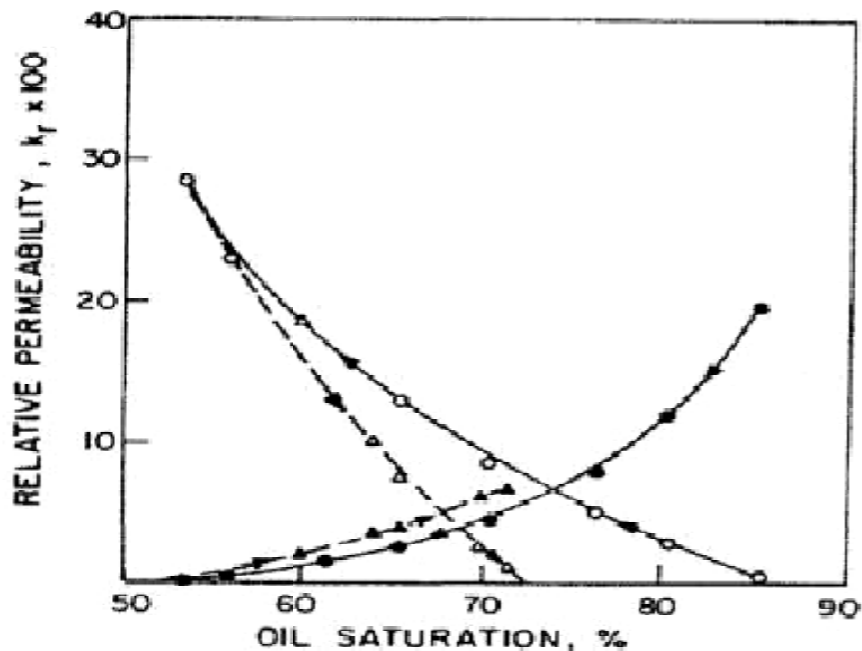
Διάγραμμα 2.1: Σχετικές διαπερατότητες σε συνάρτηση με τον κορεσμό του νερού. Φαίνεται καθαρά η υστέρηση που παρουσιάζουν οι σχετικές διαπερατότητες (οι συνεχείς γραμμές αντιστοιχούν σε εισρόφηση και οι διακεκομμένες σε αποστράγγιση, με κόκκινο αναπαριστώνται οι σχετικές διαπερατότητες ελαϊκής φάσης και με μαύρο αυτές της υδατικής φάσης). (Αλεξόπουλος Α., 2013)

2.5.2.2.Μορφολογία της πορώδους δομής

Τα πετρώματα με μεγάλους πόρους και αντίστοιχα μεγάλη επιφάνεια, έχουν μικρούς μη αγωγίμους κορεσμούς σε νερό (~0.18), οι οποίοι αφήνουν ένα μεγάλο μέρος του πορώδους χώρου στη ροή. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι τελικές τιμές των σχετικών διαπερατοτήτων είναι μεγάλες και κυμαίνονται σε μεγάλο εύρος τιμών του κορεσμού (0.18-0.70).

Σε αντίθετη περίπτωση που τα πετρώματα είναι μικρού μεγέθους έχουν και αντίστοιχους μικρούς πόρους και μικρή ειδική επιφάνεια, με αποτέλεσμα ο χώρος που είναι διαθέσιμος να είναι πολύ μικρότερος για την ροή. Οι τελικές σχετικές διαπερατότητες είναι μικρές και οι κορεσμοί κυμαίνονται σε χαμηλότερο εύρος (0.33-0.73).

Στην περίπτωση που ένα πέτρωμα αποτελείται και από μικρούς και από μεγάλους πόρους παρουσιάζουν ίδια σχετική διαπερατότητα του πετρελαίου με τα πετρώματα μικρών πόρων, ενώ η σχετική διαπερατότητα του νερού παρουσιάζεται λίγο μεγαλύτερη.



Διάγραμμα 2.2: Σχετικές διαπερατοτητες ως συναρτήσει του κορεσμού του πετρελαίου. Οι συνεχείς γραμμές αντιστοιχούν σε αποστράγγιση και οι διακεκομμένες σε ειρρόφηση. Τα πλήρη σύμβολα αναφέρονται στο πετρέλαιο (διαβρέχουσα φάση) και τα κενά στο αέριο (μη διαβρέχουσα φάση). (Αβράαμ Δ., 1996)

2.5.2.3.Διαβρεκτικότητα

Η μηχανική ισορροπία στην γραμμή επαφής ενός στερεού, (S), και δυο ρευστών A και B εκφράζεται από την εξίσωση του Young – Dupre, η οποία είναι:

$$\text{Cos}\theta_E = \frac{g_{BS} - g_{AS}}{g_{AB}} \quad (2.31)$$

Όπου:

$$\begin{aligned}
\theta_E &= \text{Γωνία επαφής μετρημένη ως προς την φάση A} \\
g_{BS} &= \text{Διεπιφανειακές τάσεις στερεού} \\
g_{AS} &= \text{Διεπιφανειακές τάσεις ρευστού} \\
g_{AB} &= \text{Διεπιφανειακή τάση μεταξύ των δυο ρευστών A και B.}
\end{aligned}$$

Η στερεή επιφάνεια είναι λεία, καθαρή, μη παραμορφώσιμη και ομογενής ως προς την επιφανειακή ενέργεια. Επίσης, η γωνία επαφής θεωρείται ότι είναι θεμελιώδης ιδιότητα του συστήματος και αναφέρεται σαν πραγματική γωνία επαφής σε ισορροπία. Οι συνθήκες για την παρατήρηση πραγματικών γωνιών επαφής συναντώνται σε ορισμένα συστήματα υγρού-αέρα σε λείες επιφάνειες οργανικών πολυμερών. Η ορολογία που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των διαφόρων περιοχών της γωνίας επαφής, (θ_E), είναι αρκετά συγκεχυμένη. Ένα ρευστό διαβρέχει ένα στερεό αν η γωνία επαφής μετρημένη από την πλευρά του ρευστού είναι μικρότερο από 90° . Αντίστοιχα το ρευστό που παρουσιάζει γωνία επαφής μεγαλύτερη από 90° δεν διαβρέχει το στερεό. Ωστόσο, υπάρχουν και περιπτώσεις που δεν υπάρχει καμία θέση ισορροπίας της κοινής γραμμής επαφής ρευστού-ρευστού-στερεού, όταν ισχύει:

$$\gamma_{AS} > \gamma_{AS} + \gamma_{AB} \quad (2.32)$$

Στην περίπτωση αυτή καμία τιμή της γωνίας επαφής θ_E δεν ικανοποιεί την εξίσωση 2.31. και το ρευστό A καλύπτει όλη την επιφάνεια του στερεού. Σε αυτήν την περίπτωση το ρευστό A διαβρέχει τέλεια το στερεό και το ισοζύγιο δυνάμεων εκφράζεται από τον συντελεστή εξάπλωσης.

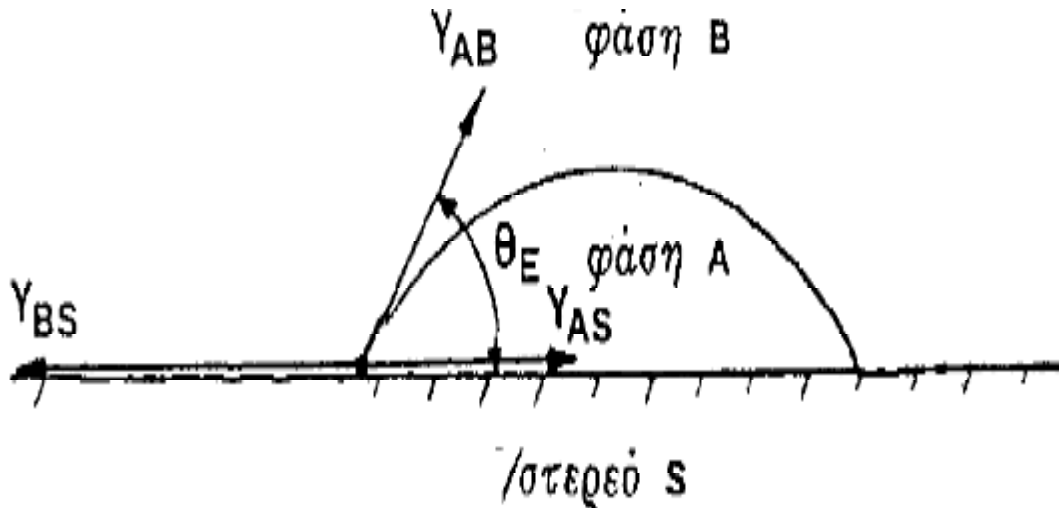
$$S_{AS} = \gamma_{BS} - \gamma_{AB} - \gamma_{AS} \quad (2.33)$$

Στην πραγματικότητα οι μετρούμενες γωνίες επαφής παρουσιάζουν υστέρηση που εξαρτάται από το εάν η κοινή γραμμή επαφής έχει προχωρήσει η αποχωρήσει ως προς την φάση διαμέσου της οποίας μετράται η γωνία επαφής. Συνήθως η γωνία επαφής αναφέρεται ως προς την διαβρέχουσα φάση ($\theta_E < 90^\circ$) και ορίζεται ως προϊούσα, θ_A , και ως υποχωρούσα θ_R γωνία επαφής, ενώ γενικά ισχύει:

$$\theta_R \leq \theta_E \leq \theta_A \quad (2.34)$$

Στην περίπτωση όπου η γραμμή επαφής βρίσκεται σε ισορροπία η γωνία επαφής ονομάζεται στατική ενώ στην περίπτωση που η γωνία επαφής κινείται με κάποια ταχύτητα η γωνία επαφής ονομάζεται δυναμική. Η υστέρηση της στατικής γωνίας επαφής προκύπτει εξαιτίας της παρουσίας τραχύτητας, χημικών μολύνσεων και ετερογενειών στην στερεή επιφάνεια. Η ομοιογένεια της επιφάνειας λόγω της διαφορετικής χημικής σύστασης από σημείο σε σημείο ή χημικές μολύνσεις λόγω της προσρόφησης διαφόρων ουσιών έχουν επιδράσει στην υστέρηση της στατικής γωνίας. Επιπλέον, φαινόμενα υστέρησης μπορούν να δημιουργηθούν από επιφανειακά ενεργές ουσίες διαλυμένες στο ένα ρευστό.

Η προσρόφηση πολικών συστατικών και η επικάθηση οργανικών συστατικών στην στερεή επιφάνεια από τα ρευστά με τα οποία έρχεται σε επαφή δημιουργεί δραστικές αλλαγές στην διαβρεκτικότητα όπως αυτή καθορίζεται από την γωνία επαφής. Η διαβρεκτικότητα είναι το σύνολο των αλληλεπιδράσεων ρευστών - στερεού. Δηλαδή είναι η τάση που έχει ένα ρευστό να προσκολληθεί ή να εξαπλωθεί σε μια στερεή επιφάνεια με την παρουσία άλλων μη αναμίξιμων με αυτό ρευστών. Η ιδιότητα της διαβρεκτικότητας σε ένα σύστημα στερεού – υγρού – υγρού που μας επιτρέπει να την μετρήσουμε, είναι η γωνία επαφής ισορροπίας όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Ορισμός της πραγματικής γωνίας επαφής (θ_E) και των διεπιφανειακών τάσεων γ_{AS} , γ_{BS} , γ_{AB} για ένα σύστημα δύο ρευστών A (water) και B (oil), σε επαφή με μια λεία στερεή επιφάνεια S. (Αβρααμ Δ., 1996)

Οι τρεις διεπιφανειακές τάσεις στην ισορροπία συνδέονται με τη σχέση Young-Dupree:

$$g_{ow} \cos \theta_E = g_{os} - g_{ws} \quad (2.35)$$

Όπου:

- g_{ow} = Διεπιφανειακή τάση μεταξύ της ελαϊκής και της υδατικής φάσης.
- g_{os} = Διεπιφανειακές τάσεις της ελαϊκής με τη στερεή επιφάνεια.
- g_{ws} = Διεπιφανειακές τάσεις της υδατικής φάσης με τη στερεή επιφάνεια.

Η γωνία επαφής ισορροπίας θ_E δίνει το μέτρο της διαβρεκτικότητας:

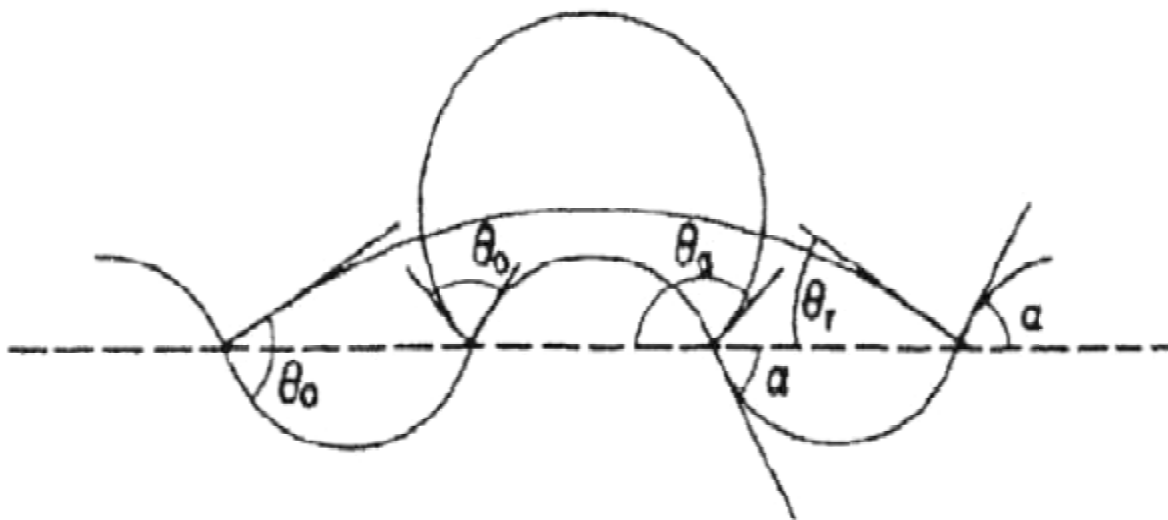
- Αν $\theta_E < 65^\circ$ η επιφάνεια θεωρείται υδατοδιαβρεκτική.
- Αν $150^\circ < \theta_E < 180^\circ$ η επιφάνεια θεωρείται ελαιοδιαβρεκτική.
- Αν $65^\circ < \theta_E < 150^\circ$ η επιφάνεια είναι ενδιάμεσης διαβροχής και δε δείχνει ιδιαίτερη προτίμηση σε κάποιο από τα δύο ρευστά.
- Αν $\theta_E = 0^\circ$ τότε το ρευστό διαβρέχει πλήρως την επιφάνεια και αναπτύσσεται ένας διαβρέχων υμένας που διαχωρίζει το στερεό από το άλλο ρευστό και οι συνθήκες αυτές αποκαλούνται συνθήκες τέλει διαβροχής.

Η γωνία επαφής ισορροπίας της εξίσωσης Young – Dupree θεωρείται ως η πραγματική ή θερμοδυναμική γωνία επαφής, ενώ στα πραγματικά συστήματα παρατηρείται η φαινομενική γωνία επαφής. Η γωνία που μετριέται έτσι, παρουσιάζει πολλές διαφορετικές τιμές, εμφανίζει δηλαδή υστέρηση.

$$q_r^o < q_{app} < q_a^o \quad (2.36)$$

Όπου:

- q_r^o = Στατική οπισθοχωρούσα γωνία, που παρατηρείται όταν η επιφάνεια
Επαφής στερεού – ρευστού τείνει να αυξηθεί
- q_a^o = Στατική προϊούσα γωνία
Επαφής, που παρατηρείται όταν η επιφάνεια επαφής τείνει να συρρικνωθεί.
- q_{app} = Φαινομενική γωνία επαφής



Σχήμα 2.2: Σταγόνα που ηρεμεί πάνω σε ομόκεντρα αυλάκια. Μικροσκοπικά και για τις δυο διαμορφώσεις η γωνία επαφής είναι ίδια, αν και μακροσκοπικά διαφέρει. (Αβρααμ Δ., 1996)

Οι λόγοι που πιθανόν οδηγούν στην υστέρηση της γωνίας επαφής είναι οι εξής:

- Η τραχύτητα της επιφανείας.
- Η χημική ετερογένεια ή η μόλυνση της διεπιφάνειας.
- Η ακινησία της διεπιφάνειας σε μακρομοριακό επίπεδο.

Στην περίπτωση που η γραμμή επαφής κινείται, τότε η φαινομενική γωνία επαφής θ_{app} , λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές και καλείται δυναμική γωνία επαφής θ_d . Ο προσδιορισμός της κίνησης της γραμμής επαφής είναι αρκετά δύσκολος δεδομένου του γεγονότος ότι η συνθήκη της μη ολίσθησης στα σύνορα του ρευστού με τη στερεά πλάκα οδηγεί σε αποκλίσεις. Η δυναμική γωνία επαφής σε τριχοειδεις σωλήνες συνδέεται με τον τοπικό τριχοειδή αριθμό μέσω εμπειρικών σχέσεων της μορφής:

$$\cos q_d - \cos q_a = aCa^x \quad (2.37)$$

Όπου:

- $x =$ Λαμβάνει την τιμή 1/2
- $0 < \theta_d < 180$ θ_d : δυναμική γωνία επαφής
- $\theta_d \sim Ca^{1/3}$: Νόμος του Tanner

Η επίδραση της ταχύτητας στην τριχοειδή πίεση μεταξύ δύο ρευστών και κατά συνέπεια του θ_b σε πορώδη μέσα υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_c \cong \frac{\sigma_{fs}}{r_t} \cdot (-1 + B_2 \cdot Ca^*) \quad (2.38)$$

Όπου:

$$\begin{aligned} \sigma_{fs} &= \text{Διεπιφανειακή τάση μεταξύ του ρευστού και της στερεής επιφάνειας} \\ r_t &= \text{Τυπική ακτίνα των λαιμών του πόρου} \\ B_2 &= 300 \end{aligned}$$

2.5.2.4. Λόγος ιξωδών

Ο λόγος των ιξωδών ορίζεται από την σχέση:

$$k = \frac{m_o}{m} \quad (2.39)$$

Όπου:

$$\begin{aligned} \mu_o &= \text{Ιξώδες του εισβολέα} \\ \mu &= \text{Ιξώδες του υπερασπιστή} \end{aligned}$$

Έχει παρατηρηθεί πως για λόγο ιξωδών πολύ μεγαλύτερο της μονάδας και σχετικά μεγάλους τριχοειδείς αριθμούς η εκτόπιση σταθεροποιείται και ακολουθεί μετωπικό πρότυπο ανάπτυξης. Αντίθετα, για λόγους ιξωδών πολύ μικρότερους της μονάδας και σχετικά μεγάλους τριχοειδείς αριθμούς η εκτόπιση αποσταθεροποιείται και χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό ιξωδών δακτύλων (viscous fingering). Σε πολύ μικρούς τριχοειδείς αριθμούς, η εκτόπιση ελέγχεται από την ανάπτυξη τριχοειδών δακτύλων, ανεξαρτήτως του λόγου των ιξωδών. (Αβράαμ Δ.,1996)

2.5.2.5. Τριχοειδής αριθμός

Η χρησιμότητα των σχέσεων διαπερατότητας και των όρων του ιξώδους σύζευξης στην περιγραφή δύο μη αναμειξιμων φάσεων σε πορώδη μέσα προϋποθέτει την ανεξαρτησία τους και από άλλους παραμέτρους, πλην του κορεσμού των ρευστών και τα φυσικά χαρακτηριστικά της πορώδους δομής. Η εξάρτηση από τον τριχοειδή αριθμό περιορίζει δραστικά την αξία των σχετικών διαπερατοτήτων και καθιστά τους εμπειρικούς συντελεστές. Ο νόμος του Darcy είναι πλέον ισχυρά γραμμικός.

Ωστόσο, πειραματικές μελέτες απέδειξαν ότι υπάρχει ισχυρή επίδραση του τριχοειδούς αριθμού στις σχετικές διαπερατότητες. Στην περίπτωση που ο τριχοειδής αριθμός είναι μικρός η επίδραση του στις σχετικές διαπερατότητες δεν είναι σημαντικός. Όμως κατά την αύξηση του οι καμπύλες των σχετικών διαπερατοτήτων χάνουν την καμπυλότητα τους και τείνουν σε ευθείες γραμμές.

2.5.2.6. Κατανομή των ρευστών στον πορώδη χώρο

Πάρα πολλές πειραματικές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί με σκοπό τον προσδιορισμό της μικροσκοπικής κατανομής των ρευστών στον πορώδη χώρο. Δύο είναι οι κύριες μακροσκοπικές εικόνες της ροής.

∅ Διακτυλοειδής ροή σε όλους τους όρους

Τα δύο ρευστά είναι παρόντα σε κάθε πόρο του πορώδους μέσου. Το μη διαβρέχον ρευστό καταλαμβάνει το κεντρικό τμήμα του πορώδους μέσου ενώ το διαβρέχοντος καταλαμβάνει τον χώρο κοντά στα τοιχώματα και περιβάλλει το μη διαβρέχον ενώ το διαχωρίζει ταυτόχρονα από το στερεό τοίχωμα. Η αύξηση του κορεσμού του μη διαβρέχον ρευστού έχει ως συνέπεια την αύξηση του κεντρικού τμήματος του πόρου. Η μέση καμπυλότητα της διεπιφάνειας μικραίνει και η τριχοειδής πίεση ελαττώνεται. Ωστόσο, η αύξηση του κορεσμού της μη διαβρέχουσας φάσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τριχοειδούς πίεσης, άρα το πραγματικό φαινόμενο έχει αντίθετη κατεύθυνση από την θεωρία.

∅ Ροή σε διαχωρισμένα μονοπάτια

Η ροή δύο φάσεων σε συνθετικά πορώδη μέσα έδειξε πως είναι πιθανόν κάθε φάση να σχηματίζει το δίο της μονοπάτι μέσα στο πορώδες υλικό, δηλαδή να σχηματίζει κάθε φάση το δικό της δίκτυο ροής από συνδεδεμένους πόρους του μέσου. Το μη διαβρέχον ρευστό καταλαμβάνει τους μεγαλύτερους πόρους και το διαβρέχον ρευστό τους μικρότερους. Τα δύο διαχωρισμένα δίκτυα έρχονται σε επαφή μέσω σταθερών και ακίνητων διεπιφανειών που σχηματίζονται σε πόρους στα σύνορα των δύο δικτύων. Οι πόροι αυτοί καλούνται ψευδο – αδιέξοδοι.

Επίσης ένα ποσοστό του διαβρέχοντος ρευστού εξακολουθεί να βρίσκεται σε πόρους που είναι κολλημένοι από τη μη διαβρέχουσα φάση με την μορφή ενός διαβρέχοντος υμένα. Η αύξηση του κορεσμού σε ένα από τα δύο ρευστά οδηγεί στην κατάληψη μεγαλύτερου αριθμού των πόρων από το ρευστό αυτό. Η μείωση της σχετικής διαπερατότητας των ρευστών με τη μείωση του αντιστοίχου κορεσμού οδηγεί σε μηδενισμό της σχετικής διαπερατότητας σε κορεσμό μικρότερο από την πεπερασμένη τιμή. Όλα τα προαναφερόμενα είναι η απόδειξη της ύπαρξης ενός δικτύου από αγωγίμους δεσμούς το οποίο εκτείνεται από άκρη σε άκρη του πορώδους μέσου.

Οι δύο τιμές του κορεσμού για το διαβρέχον και το μη διαβρέχον ρευστό θεωρούνται ενδεικτικές για το μη αγωγίμο κορεσμένο υγρό και τον υπολειπόμενο κορεσμό σε πετρέλαιο

2.6. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Η εξίσωση του Archie (1942), ερμηνεύει τις μετρήσεις του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης συνδυαζόμενου με τον δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης ενός μερικώς κορεσμένου πετρώματος με το επίπεδο κορεσμού του νερού. Η εξίσωση είναι η εξής:

$$I_R = \frac{R_t}{R_0} = S_w^{-n} \quad (2.40)$$

Όπου:

- R_t = Ηλεκτρική αντίσταση μερικώς κορεσμένου με νερό πετρώματος
- R_0 = Ηλεκτρική αντίσταση πλήρως κορεσμένου με νερό πετρώματος

n = Εκθέτης κορεσμού (saturation exponent)
 S_w = Επίπεδο κορεσμού του νερού

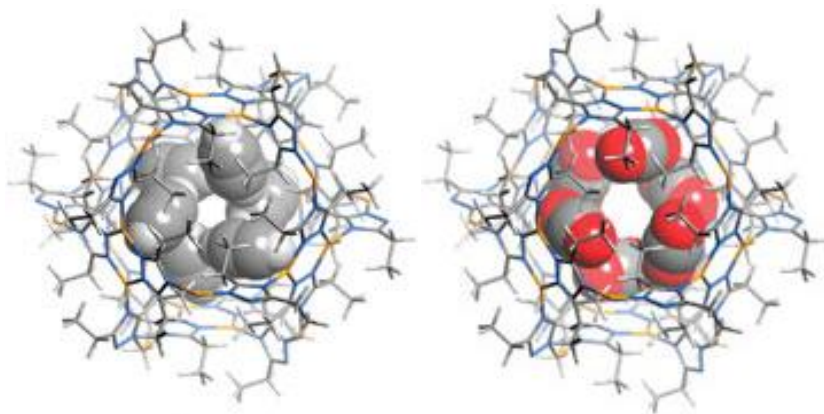
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ηλεκτρικές αντιστάσεις μερικώς και πλήρως κορεσμένου με νερό πετρώματος μετρώνται αντίστοιχα με δοκιμές φρεατίων (well-logs). Ενώ ο εκθέτης κορεσμού βρίσκεται μέσω εργαστηριακών μετρήσεων σε πυρήνες πετρωμάτων (cores).

Η παραπάνω σχέση ισχύει κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις που είναι οι εξής:

- Η σχέση I_R και S_w χαρακτηρίζεται από ένα σταθερό και μοναδικό εκθέτη n για ένα πορώδες μέσο.
- Οι εργαστηριακά προσδιοριζόμενες τιμές του n είναι εφαρμόσιμες στον ταμιευτήρα.

Ωστόσο, υπάρχουν και περιπτώσεις που οι παραπάνω προϋποθέσεις δεν ισχύουν. Ειδικότερα:

- Ο εκθέτης κορεσμού για το ίδιο πορώδες δείγμα, μπορεί να είναι συνάρτηση του κορεσμού της υδατικής φάσης και της ιστορίας κορεσμού.
- Η τιμή του εκθέτη κορεσμού επηρεάζεται από τις συνθήκες πραγματοποίησης των μετρήσεων ηλεκτρικής αντίστασης.
- Οι τιμές του εκθέτη κορεσμού μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικές του ταμιευτήρα. (Αν υπάρχει διαφορά της διαβρεκτικότητας των πυρήνων και του πορώδους σχηματισμού).



Εικόνα 2.1.: Ηλεκτρικές ιδιότητες πορώδων υλικών.

Οι γεωμετρικές ιδιότητες των πόρων, η κατανομή μεγέθους πόρων οι ιδιότητες της πορώδους δομής, ακόμα και η παρουσία μικροπορώδους, επηρεάζουν δραστικά την ηλεκτρική συμπεριφορά.

- Οι τιμές του εκθέτη κορεσμού μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικές του ταμιευτήρα. (Αν υπάρχει διαφορά της διαβρεκτικότητας των πυρήνων και του πορώδους σχηματισμού).

Ο εκθέτης κορεσμού διαφοροποιείται μεταξύ των πειραμάτων ισορροπίας και των δυναμικών παραμέτρων. Επίσης, ο εκθέτης κορεσμού επηρεάζεται από τις δυνάμεις άνωσης

που με την σειρά τους επηρεάζουν την κατανομή των ρευστών σε ένα πορώδες μέσο μεγάλου μήκους. (Aggelopoulos et al., 2005)

2.7. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ ΣΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Οι ιδιότητες των πορωδών υλικών που επηρεάζουν την ροή μέσω αυτών είναι οι εξής:

- Η απόλυτη διαπερατότητα
- Οι σχετικές διαπερατότητες ρευστών
- Ο παράγοντας σχηματισμού
- Ο δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης.

Επιπλέον, οι παραπάνω ιδιότητες συνδέονται στενά με τα χαρακτηριστικά της μικροδομής του πορώδη χώρου. Ο πορώδης χώρος με την σειρά του εξαρτάται από:

- Τα μεγέθη των πόρων
- Τα σχήματα των πόρων
- Την συνεκτικότητα δικτύου των πόρων
- Τις στατιστικές συσχετίσεις μεγεθών των πόρων
- Τις ετερογένειες σε διάφορες κλίμακες
- Την διαβροχή της επιφάνειας του πετρώματος.

Ωστόσο, η ηλεκτρική συμπεριφορά μίας πορώδους δομής ενός κορεσμένου πορώδους μέσου είναι σημαντική, διότι επηρεάζει την αύξηση της τιμής του λόγου πόρου/λαιμού. Επιπλέον, ο αριθμός συνδιάταξης, (c_n), είναι ο αριθμός των λαιμών που κάθε πόρος έχει με τους γειτονικούς πόρους, η αύξησή του προκαλεί μείωση στον δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης για σταθερό πορώδες και του λόγου πόρου/λαιμού. Η μεγαλύτερη συνεκτικότητα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της τιμής του εκθέτη κορεσμού και για τα ελαιοδιαβρεκτά συστήματα όσο και για υδατοδιαβρεκτά συστήματα.

2.8. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Η διαβρεκτικότητα επηρεάζει και αυτή τον εκθέτη κορεσμού και την υστέρηση που παρατηρείται στην τιμή του μεταξύ αποστράγγισης και εισρόφησης. Οι διεργασίες εισρόφησης και αποστράγγισης είναι δύο διαφορετικές διαδικασίες οι οποίες δεν έχουν κοινά σημεία. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι οι φυσικές ιδιότητες που μετρώνται παρουσιάζουν υστέρηση. Αυτό οφείλεται στις διαμορφώσεις των ρευστών και στις διαφορές των διεπιφανειών που τα διαχωρίζουν λόγω διαφορετικών συνθηκών διαβροχής.

Στην εισρόφηση (imbibition), οι τριχοειδείς δυνάμεις υποβοηθούν τον εισβολέα, πιο συγκεκριμένα εκτοπίζουν το ρευστό. Η διαδρομή που ακολουθεί το ρευστό σε αυτή την περίπτωση ξεκινά από τους μικρότερους πόρους σχηματίζοντας έναν υμένα ο οποίος καλύπτει τα τοιχώματά τους. Στην περίπτωση της αποστράγγισης οι τριχοειδείς δυνάμεις εμποδίζουν τον εισβολέα, ο οποίος τώρα κινείται μέσω των μεγαλύτερων πόρων καταλαμβάνοντας το εσωτερικό τους.

Πειραματικές μελέτες κατέληξαν ότι οι τιμές που παρουσιάζουν τον εκθέτη κορεσμού είναι αρκετά μεγαλύτερες για ελαιοδιαβρεκτά συστήματα σε αντίθεση με αυτές για υδατοδιαβρεκτά. Η υστέρηση στα υδατοδιαβρεκτά συστήματα ήταν είτε ανύπαρκτη είτε πολύ

μικρή. Αντίθετα, η υστέρηση σε ελαιοδιαβρεκτά συστήματα βρέθηκε να είναι σε υψηλά επίπεδα.

Οι πειραματικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί ασχολήθηκαν και με την θεωρητική ερμηνεία αποκλίσεων από τον νόμο του Archie καθώς επίσης και για την προσομοίωση του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης. Ωστόσο, κανένα πείραμα μέχρι και σήμερα δεν έχει καταλήξει σε μία συστηματική μελέτη για την κατανόηση και ανάλυση της επίδρασης των μικροδομικών ιδιοτήτων του πορώδους και της διαβρεκτικότητας της επιφάνειας στον δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης και αυτό οφείλεται στον μεγάλο αριθμό των υπεισερχόμενων παραμέτρων. (Aggelopoulos et al., 2005)

2.9. ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΠΟΡΩΝ

Με το πέρασμα των χρόνων έχουν πραγματοποιηθεί πολλές πειραματικές μελέτες και έρευνες με σκοπό την προσομοίωση της ηλεκτρικής αντίστασης μερικώς κορεσμένων με νερό πορώδων μέσων. Οι προσομοιώσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν και αναλύθηκαν με τα μοντέλα δικτύων πόρων. Η αρχική τους χρήση έγινε από κυλινδρικούς πόρους, όπου και διαπιστώθηκε ότι ο εκθέτης κορεσμού επηρεάζεται από τον αριθμό συνδιάταξης (coordination number) και το εύρος της κατανομής των μεγεθών των πόρων. Επιπλέον, οι προσομοιώσεις απέδειξαν ότι εκθέτης κορεσμού μειώνεται σε χαμηλές τιμές κορεσμού αν ληφθεί υπόψη το πάχος του στρώματος νερού που απομένει κατά μήκος της τραχύτητας των τοιχωμάτων των πόρων.

Σύμφωνα με ότι προαναφέρθηκε μπορεί να εξηγηθεί η ανώμαλη συμπεριφορά που παρατηρείται σε κάποια είδη άμμων. Ωστόσο, το 1988 ο Wang και ο Sharma ανέπτυξαν ένα νέο μοντέλο δικτύου με σκοπό την προσομοίωση των καμπυλών του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης πορώδων πετρωμάτων για διαδικασίες αποστράγγισης (drainage) και εισρόφησης (imbibition). Ακόμα, σε χαμηλές τιμές του εκθέτη κορεσμού οδηγεί η υψηλή συνεκτικότητα του δικτύου που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας κανονικών κυβικών πλεγμάτων. Αυτό παρατηρείται για ισχυρά υδατοδιαβρεκτά και ελαιοδιαβρεκτά δίκτυα πόρων.

Επιπλέον, ο εκθέτης κορεσμού μειώνεται κατά αναλογία με τον λόγο πόρου/λαιμού για υδατοδιαβρεκτά δίκτυα πόρων, όμως ο εκθέτης κορεσμού αυξάνεται και εμφανίζει φαινόμενα υστέρησης για ελαιοδιαβρεκτά δίκτυα πόρων. Με συνεχείς έρευνες και προσομοιώσεις σε κανονικά κυβικά δίκτυα οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η υστέρηση μεταξύ των καμπυλών του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης για αποστράγγιση και εισρόφηση είναι πιο έντονη για ελαιοδιαβρεκτά παρά για υδατοδιαβρεκτά συστήματα.

2.9.1. Μοντέλο διείσδυσης δεσμού για αποστράγγιση (bond percolation model).

Οι παραδοχές στις οποίες βασίζονται το μοντέλο διείσδυσης δεσμού για αποστράγγιση είναι οι εξής:

- ✓ Το δίκτυο πόρων καταλαμβάνεται μόνο από το νερό, το οποίο είναι ένα τέλεια διαβρέχον και ηλεκτρικά αγωγίμο ρευστό.
- ✓ Η πίεση του διαβρέχοντος ρευστού παραμένει σταθερή ενώ του λαδιού αυξάνεται σταδιακά.
- ✓ Οι δεσμοί στην είσοδο του δικτύου είναι σε επαφή με μια μη διαβρέχουσα και μη αγωγήμη φάση όπως το λάδι.

- ✓ Στην έξοδο του δικτύου τοποθετείται μεμβράνη η οποία είναι διαπερατή μόνο από το νερό και όχι από το λάδι.
- ✓ Η διαφορά τάσης, (ΔU), εφαρμόζεται κατά τη διεύθυνση εισόδου/εξόδου ενώ περιοδικές οριακές συνθήκες επικρατούν κατά μήκος των άλλων διευθύνσεων έτσι ώστε οι επιδράσεις άκρων να είναι αμελητέες.

Η διεργασία διείσδυσης χωρίς παγίδευση της διαβρέχουσας φάσης μοντελοποιείται από την εκτόπιση της διαβρέχουσας από τη μη διαβρέχουσα φάση (αποστράγγιση).

Η τριχοειδής πίεση δίνεται από την σχέση:

$$P_c = \frac{\sigma}{r_p} \quad (2.41)$$

Όπου:

- P_c = Τριχοειδής πίεση.
- γ = Διεπιφανειακή τάση μεταξύ των δυο ρευστών.
- r_p = Ελάχιστη ακτίνα πόρου.

Το κλάσμα των ανοιχτών δεσμών στο διαβρέχον ρευστό δίνεται από την σχέση:

$$q = \int_0^{r_p} f(r) dr = F(r_p) \quad (2.42)$$

Όπου:

- q = Κλάσμα των ανοιχτών δεσμών.
- F = Παράγοντας σχηματισμού.
- r_p = Ελάχιστη ακτίνα πόρου.

Η υδραυλική συνέχεια της διαβρέχουσας φάσης θεωρείται πως διατηρείται μέσω λεπτών υγρών υμένων (thin liquid films) που απομένουν κατά μήκος της τραχύτητας των τοιχωμάτων των πόρων. Η αγωγιμότητα της διαβρέχουσας φάσης χάνεται όταν ξεπερνά το όριο διείσδυσης. Πειραματικές μελέτες κατέληξαν ότι για προβλήματα διείσδυσης δεσμού το όριο διείσδυσης της μη διαβρέχουσας φάσης δίνεται από τη σχέση:

$$p_c \cong 1 - \frac{d}{(d-1)c_n} \quad (2.43)$$

Όπου:

- p_c = Όριο διείσδυσης της μη διαβρέχουσας φάσης..
- d = Τοπολογική διάσταση.
- c_n = Αριθμός συνδιάταξης.

Το μοντέλο διείσδυσης έχει μια κύρια διαφορά από προηγούμενα μοντέλα που βασίζονται στη θεωρία διείσδυσης εισβολής. Αρχικά, το δίκτυο πόρων αποτελείται μόνο από δεσμούς δηλαδή τριχοειδείς σωλήνες και οι κόμβοι δεν έχουν καμία οντότητα. Επιπλέον, ένας κόμβος καταλαμβάνεται από τη μη διαβρέχουσα φάση, η υδραυλική και η ηλεκτρική επικοινωνία κάθε ζεύγους συνδεδεμένων πόρων, οι οποίοι είναι ακόμα κατειλημμένοι από το διαβρέχον ρευστό, δηλαδή το νερό δεν διακόπτεται.

Η συνέχεια της διαβρέχουσας φάσης έχει την δυνατότητα να διατηρηθεί και για χαμηλές τιμές του κλάσματος των ανοιχτών δεσμών. Έτσι λοιπόν, το όριο διείσδυσης της

διαβρέχουσας φάσης συνδέεται με το όριο διείσδυσης της μη διαβρέχουσας, και δίνεται από την σχέση:

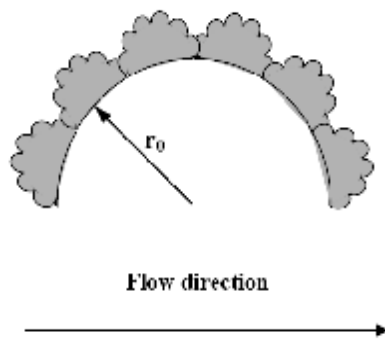
$$q_c \cong 1 - p_c \quad (2.44)$$

Όπου:

- q_c = Όριο διείσδυσης της διαβρέχουσας φάσης.
- p_c = Όριο διείσδυσης της μη διαβρέχουσας φάσης.
- c_n = Αριθμός συνδιάταξης.

2.10. ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

Η εσωτερική επιφάνεια των πόρων μπορεί να αναπαρασταθεί με την βοήθεια κλασματικών μοντέλων αυτο-ομοιότητας τύπου κερήθρας. Η κατασκευή αυτού του μοντέλου πραγματοποιείται θεωρώντας πως η περίμετρος της διατομής του πόρου συντίθεται από κυκλικά τόξα που έχουν την ίδια ακτίνα και κοινή εφαπτομένη, ενώ τα κέντρα τους βρίσκονται στην επιφάνεια του πόρου.



Η διαδοχική ταξινόμηση όμοιων τόξων με μικρότερες ακτίνες πάνω σε κάθε τόξο του προηγούμενου στρώματος γεννά την επιθυμητή κλασματική δομή όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2.

Σχήμα 2.3: Αυτό-όμοια κλασματική επιφάνεια.

Η κλασματική διάσταση μιας τέτοιας αυτο-όμοιας δομής εκφράζεται με την σχέση:

$$D_f = \frac{\ln v_s}{\ln I_s^{-1}} \quad (2.45)$$

Όπου:

- D_f = Κλασματική διάσταση.
- v_s = Αριθμός των υπο-δομών που τοποθετούνται πάνω στην προηγούμενη δομή.
- λ_s = Λόγος μεγεθών της χαρακτηριστικής διάστασης σε δύο διαδοχικές δομές.

Στην περίπτωση που τα χαρακτηριστικά της κλασματικής τραχύτητας είναι παράλληλα στην διεύθυνση της ροής και ο πρωτογενής πόρος είναι κατειλημμένος από τη μη αγωγίμη και μη διαβρέχουσα φάση κάθε αλλαγή στον κορεσμό ύδατος και στο δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης οφείλεται στη μεταβολή της διατομής του πόρου που είναι κατειλημμένος με νερό. Επομένως, ισχύει:

$$A \propto S_w \quad \rightarrow \quad I_R \propto S_w^{-1} \quad (2.46)$$

$$R = r \frac{l}{A} \quad \rightarrow \quad R \propto A^{-1} \quad (2.47)$$

Όπου:

- A= Διατομή πόρου.
- S_w Δείκτης κορεσμού.
- R= Ηλεκτρική αντίσταση.
- ρ = Ειδική ηλεκτρική αντίσταση.
- l = Μήκος πόρου.

Σαν αποτέλεσμα των όσων προαναφέρθηκαν παρατηρείται ότι ο εκθέτης κορεσμού είναι πάντα μονάδα στην περιοχή χαμηλού κορεσμού ύδατος ανεξάρτητα από τις κλασματικές ιδιότητες της πορώδους δομής.

Στην περίπτωση που τα χαρακτηριστικά της κλασματικής τραχύτητας είναι κάθετα στην κύρια διεύθυνση της ροής εκτός από τη μείωση της διατομής του πόρου, αυξάνονται και τα αποτελεσματικά μήκη των αγώγιμων μερών των χαρακτηριστικών της τραχύτητας καθώς μειώνεται ο κορεσμός της αγώγιμης υδατικής φάσης. Στην περίπτωση αυτή, στον δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης εισάγεται ένας παράγοντας ηλεκτρικού δαιδαλώδους (electrical tortuosity factor), και ο εκθέτης κορεσμού εξαρτάται από την κλασματική διάσταση τραχύτητας.

Η γραμμική κλασματική διάσταση δίνεται από τον τύπο:

$$D_L = \frac{\ln n_f}{\ln(n_f/\rho)} \quad (2.48)$$

Όπου:

- D_L = Γραμμική κλασματική διάσταση.
- n_f = Χαρακτηριστικός αριθμός των αυτό-όμοιων χαρακτηριστικών τραχύτητας που τοποθετούνται πάνω σε ένα χαρακτηριστικό του προηγούμενου στρώματος.

Επιπλέον, η γραμμική κλασματική διάσταση συνδέεται με την επιφανειακή κλασματική διάσταση με τη σχέση:

$$D_L = D_s - 1 \quad (2.49)$$

Όπου:

- D_L = Γραμμική κλασματική διάσταση.
- D_s = Επιφανειακή κλασματική διάσταση.

2.10.1. Μοντέλο διείσδυσης δεσμού-κλασματικής τραχύτητας

Η αποστράγγιση δυο ρευστών (π.χ. νερού – λαδιού) περιγράφεται σύμφωνα με τους παραπάνω κανόνες, ωστόσο πρέπει να ληφθούν υπόψη κάποιες τροποποιήσεις. Κάθε πόρος στον οποίο έχει ήδη εισχωρήσει η μη διαβρέχουσα φάση (λάδι) είναι μερικώς κορεσμένος από την διαβρέχουσα φάση (νερό).

Σε αυτή την περίπτωση ο όγκος του νερού που βρίσκεται στον πόρο υπολογίζεται από την σχέση:

$$V_w(r) = c_p \left(\frac{r}{r_p}\right)^{D_s-3} V(r) \quad (2.50)$$

Όπου:

- $V_{w(r)}$ = Όγκος νερού.
- $V_{(r)}$ = Όγκος πόρου.
- c_p = Λόγος του κλασματικού πορώδους προς το συνολικό πορώδες.
- r = Ακτίνα πόρου.
- r_p = Ελάχιστη ακτίνα πόρου όπου επιτρέπεται να εισχωρήσει το μη διαβρέχον ρευστό.
- D_s = Επιφανειακή κλασματική διάσταση.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του πόρου υπολογίζεται από την σχέση:

$$g_w(r) = \frac{1}{B} \left(\frac{r}{r_p}\right)^{-D_s+1} g(r) \quad (2.51)$$

Όπου:

- $g_{w(r)}$ = Ηλεκτρική αγωγιμότητα νερού.
- $g_{(r)}$ = Ηλεκτρική αγωγιμότητα πόρου.
- c_p = Λόγος του κλασματικού πορώδους προς το συνολικό πορώδες
- r = Ακτίνα πόρου.
- r_p = Ελάχιστη ακτίνα πόρου όπου επιτρέπεται να εισχωρήσει το μη διαβρέχον ρευστό.
- D_s = Επιφανειακή κλασματική διάσταση.
- B = Λόγος της κλασματικής ηλεκτρικής αντίστασης προς τη συνολική ηλεκτρική αντίσταση.

Στην περίπτωση που ο πόρος είναι πλήρως κατειλημμένος με νερό, ισχύουν οι αναλογίες της μορφής:

$$V(r) = c_1 r^b \quad (2.52)$$

Όπου:

- $V_{(r)}$ = Όγκος πόρου.
- c_1 = Σύνθετη συνάρτηση των άλλων διαστάσεων των πόρων.
- β = Εκθέτης που συνδέεται με το γεωμετρικό μοντέλο πόρων.

$$g(r) = c_2 r^a \quad (2.53)$$

Όπου:

- $g_{(r)}$ = Ηλεκτρική αγωγιμότητα πόρου.
- c_2 = Σύνθετη συνάρτηση των άλλων διαστάσεων των πόρων.
- α = Εκθέτης που συνδέεται με το γεωμετρικό μοντέλο πόρων.

Στην περίπτωση που έχει ξεπεραστεί το όριο διείσδυσης μπορεί ακόμα να διατηρείται η υδραυλική και η ηλεκτρική συνέχεια της διαβρέχουσας φάσης. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει ακόμα ένα ποσό του αγωγίμου ρευστού που παραμένει κατά μήκος της τραχύτητας των τοιχωμάτων των πόρων. Άρα ούτε η διαβρέχουσα φάση παγιδεύεται στο δίκτυο πόρων, ούτε ο δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης γίνεται άπειρος κοντά στο όριο διείσδυσης της διαβρέχουσας φάσης.

2.11. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΔΕΙΚΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΤΡΙΧΟΕΙΔΗ ΠΙΕΣΗ

Για την διατύπωση των συμπερασμάτων ερευνητές έκαναν χρήση ενός μοντέλου δικτύου πόρων, με σκοπό την μελέτη των συνεργιστικών επιδράσεων των γεωμετρικών, τοπολογικών και κλασματικών ιδιοτήτων του πορώδους χώρου, στο δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης στις περιοχές υψηλού, μέσου και χαμηλού κορεσμού υδατικής φάσης. Η χρήση της προσέγγισης του ενεργού μέσου, των νόμων κλιμάκωσης της θεωρίας διείσδυσης και της κλασματικής γεωμετρίας ανέπτυξαν αναλυτικές προσεγγιστικές σχέσεις για το δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης, τον εκθέτη κορεσμού και την τριχοειδή πίεση.

Πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να διατυπώσουν και να αναλύσουν τις αλλαγές που παρατηρούνται στις καμπύλες του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης και τριχοειδούς πίεσης που προκαλούνται από την μόνιμη παγίδευση του διαβρέχοντος ρευστού. Επιπλέον, επισημάνθηκε ότι ο εκθέτης κορεσμού είναι πεπερασμένος μόνο όταν το ρευστό παραμένει παγιδευμένο στην διαβρέχουσα φάση κατά μήκος των τοιχωμάτων των πόρων. Σε περίπτωση μόνιμης παγίδευσης του διαβρέχοντος ρευστού, μια προσεγγιστική σχέση που συνδέει τον κορεσμό του νερού με την τριχοειδή πίεση στην περιοχή του ορίου διείσδυσης της διαβρέχουσας φάσης, είναι η εξής:

$$\frac{P_c}{g_{ow}} \cong \frac{1}{\langle r_t \rangle} \left[\frac{S_w - S_{wc1}}{c_p (1 - S_{wc1})} \right]^{-1/(3-D_s)} \quad (2.54)$$

Όπου:

- P_c = Τριχοειδής πίεση μεταξύ των ομογενών φάσεων των δυο ρευστών.
- g_{ow} = Διεπιφανειακή τάση μεταξύ των δύο ρευστών..
- r_t = Μέση ακτίνα λαιμών.
- S_{wc1} = Κορεσμός της υδατικής φάσης που παγιδεύεται σε άπειρη τριχοειδή πίεση.
- S_w = Δείκτης κορεσμού
- c_p = Λόγος του κλασματικού πορώδους προς το συνολικό πορώδες.
- D_s = Επιφανειακή κλασματική διάσταση.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όταν αναφερόμαστε στον κορεσμό της υδατικής φάσης που παγιδεύεται σε άπειρη τριχοειδή πίεση εννοούμε όταν αποστραγγιστεί όλο το νερό που απομένει σε περιοχές τραχύτητας των πόρων.

Ο δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης δίνεται από τον τύπο:

$$\left(\frac{dp}{dx} = -|B| < 0 \right) \quad (2.55)$$

$$I_R \cong B \left[\frac{S_w - S_{wc1}}{c_p (1 - S_{wc1})} \right]^{-(D_s-1)/(3-D_s)} \quad (2.56)$$

Όπου:

- B = Λόγος της κλασματικής ηλεκτρικής αντίστασης προς τη συνολική ηλεκτρική αντίσταση.
- S_{wc1} = Κορεσμός της υδατικής φάσης που παγιδεύεται σε άπειρη τριχοειδή πίεση.
- S_w = Δείκτης κορεσμού

$c_p =$ Λόγος του κλασματικού πορώδους προς το συνολικό πορώδες.
 $D_s =$ Επιφανειακή κλασματική διάσταση.

Ο εκθέτης κορεσμού δίνεται από τη σχέση:

$$n = \frac{d \ln I_R}{d \ln S_w} \quad (2.57)$$

Όπου:

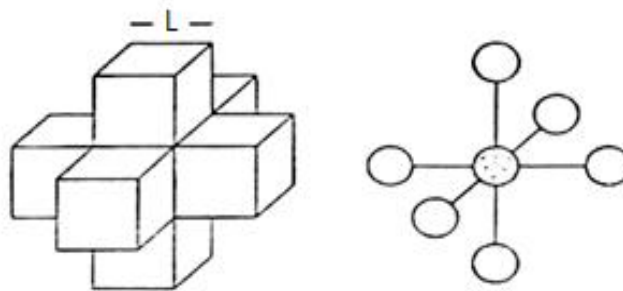
$n =$ Εκθέτης κορεσμού.
 $I_R =$ Δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης.
 $S_w =$ Δείκτης κορεσμού

Σε χαμηλούς κορεσμούς ύδατος, παρατηρείται αυξομείωση για τα πορώδη συστήματα με χαμηλή ή υψηλή τιμή της κλασματικής τραχύτητας, αντίστοιχα. Ο εκθέτης κορεσμού έχει την δυνατότητα να πάρει πεπερασμένες τιμές, σε μικρές τιμές του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης, μόνο όταν το διαβρέχον ρευστό δεν παγιδεύεται στο δίκτυο πόρων.

Άρα ο δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να περιγραφεί από διαφορές γενικευμένες παραμετρικές συναρτήσεις του κορεσμού ύδατος. Οι τιμές των παραμέτρων είναι στενά συνδεδεμένες με τις γεωμετρικές, τοπολογικές και κλασματικές ιδιότητες της πορώδους δομής και της διαβροχής της επιφάνειας των πόρων.

2.12. ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ

Η θεωρία διείσδυσης μεγάλης κλίμακας (large-scale percolation theory) είναι σημαντική για να περιγραφεί επιτυχώς η διαδικασία εκτόπισης σε ετερογενή πορώδη μέσα μεγάλου μήκους. Αρχές από τη θεωρία διείσδυσης εφαρμόζονται σε μια μακροσκοπικά ετερογενή περιοχή στην οποία η κατανομή διαπερατοτήτων είναι τυχαία.



Σχήμα 2.4. Δίκτυο κύβων.

Ένα πορώδες μέσο μήκους L , παρουσιάζει απόλυτη διαπερατότητα είναι μια συνεχής μεταβλητή των συντεταγμένων του χώρου. Επίσης, μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα δίκτυο κύβων ακμής L . Κάθε κύβος έχει τα δικά του χαρακτηριστικά, όπως και διαφορετική τιμή διαπερατότητας, διαφορετική τιμή τριχοειδούς πίεσης και μπορεί να διαθέτει έξι εγγύτατους γείτονες όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4. Πρόκειται για ένα μοντέλο στο οποίο κάθε πόρος συνδέεται με έξι γειτονικούς πόρους μέσω δεσμών, οι οποίοι δεν έχουν οντότητα.

2.13. ΜΗ ΑΝΑΜΙΞΙΜΕΣ ΕΚΤΟΠΙΣΕΙΣ ΔΥΟ ΦΑΣΕΩΝ

2.13.1. Επίδραση της άνωσης στο πρότυπο εκτόπισης δυο φάσεων

Στην περίπτωση μη αναμίξιμης εκτόπισης ενός διαβρέχοντος ρευστού από ένα μη διαβρέχον σε ένα πορώδες μέσο (αποστράγγιση) και με την απουσία ιξωδών και των βαρυτικών δυνάμεων, η αποστράγγιση έχει την δυνατότητα να ελεγχθεί μόνο από την τριχοειδή πίεση. Που υπολογίζεται από την διαφορά πίεσης που δημιουργείται μεταξύ των δύο ρευστών και η σχέση είναι:

$$P_c = P_{nw} - P_w \quad (2.58)$$

Όπου:

- $P_c =$ Τριχοειδής πίεση μεταξύ των δυο ρευστών.
- $P_{nw} =$ Πίεση μη διαβρέχουσας.
- $P_w =$ Πίεση διαβρέχουσας φάσης.

Η θεωρία διείσδυσης εισβολής (invasion percolation-IP), μπορεί να δώσει την λύση του προβλήματος του πόρου και να μοντελοποιηθεί. Σε αυτή την περίπτωση το μέτωπο που διαχωρίζει τα δύο ρευστά προχωρά εισχωρώντας στους πόρους, με τη μικρότερη τριχοειδή αντίσταση. Επίσης ανάλογη θεωρία με την θεωρία διείσδυσης εισβολής είναι η κλασσική θεωρία διείσδυσης.

Με την παρουσία των βαρυτικών και την απουσία ιξωδών δυνάμεων η μοντελοποίηση της αποστράγγισης, έδειξε ότι η τριχοειδής πίεση μεταβάλλεται γραμμικά κατά τη διεύθυνση της εκτόπισης (x). Η μεταβολή περιγράφεται από τις παρακάτω περιπτώσεις.

▼ Περίπτωση 1^η : $B < 0$

Σε αυτή την περίπτωση αναφερόμαστε στην σταθεροποίηση της εκτόπισης, όπου πιθανότητα διείσδυσης μειώνεται κατά τη διεύθυνση της εκτόπισης:

$$\left(\frac{dp}{dx} = -|B| < 0 \right) \quad (2.59)$$

Αυτό παρατηρείται όταν για παράδειγμα υπάρχει εκτόπιση ενός ρευστού προς τα κάτω, από κάποιο άλλο ρευστό μικρότερης πυκνότητας.

Η περιοχή του μετώπου όπου η εισβολή του ρευστού έχει τα χαρακτηριστικά μιας συστάδας διείσδυσης (percolation cluster), έχει πεπερασμένη έκταση και το πάχος της και δίνεται από τη σχέση:

$$s = B^{-n/(n+1)} \quad (2.60)$$

Όπου:

- $\sigma =$ Πάχος συστάδας διείσδυσης.
- $v =$ Εκθέτης του μήκους συσχέτισης.

▼ Περίπτωση 2^η : $\mathbf{B} > \mathbf{0}$

Σε αυτή την περίπτωση αναφερόμαστε στην αποσταθεροποιημένης εκτόπισης, όπου η πιθανότητα διεύθυνσης αυξάνεται κατά τη διεύθυνση της εκτόπισης:

$$\left(\frac{dp}{dx} = |B| > 0 \right) \quad (2.61)$$

Αυτό παρατηρείται όταν υπάρχει εκτόπιση ρευστού προς τα πάνω από άλλο ρευστό χαμηλότερης πυκνότητας. Συνέπεια όλων αυτών είναι ότι η εκτόπιση προχωρά με τη μορφή τριχοειδών δακτύλων (capillary fingering), το πάχος των οποίων υπολογίζεται από την σχέση:

$$s = B^{-\frac{n}{n+1}} \quad (2.62)$$

Όπου:

- σ = Πάχος τριχοειδών δακτύλων.
- ν = Εκθέτης του μήκους συσχέτισης.

Με την παρουσία τριχοειδών και ιξωδών δυνάμεων, η εκτόπιση χαρακτηρίζεται από τρεις αδιάστατους αριθμούς:

- Τον τριχοειδή αριθμό.
- Το λόγο ιξωδών.
- Το αδιάστατο μέγεθος του συστήματος, L , εκφρασμένο σε μονάδες του μέσου μήκους του πόρου, l .

Όσο έχουμε την αύξηση του τριχοειδούς αριθμού ή το μέγεθος του συστήματος, οι ιξώδεις δυνάμεις γίνονται συγκρίσιμες με τις τριχοειδείς. Δίνεται η σχέση που συνδέει το πάχος του μετώπου με τον τριχοειδή αριθμό:

$$s = Ca^{-a} \quad (2.63)$$

Ο εκθέτης (a) δίνεται από την σχέση:

$$a = \frac{\nu}{(m - b_p + 1 + \nu)} \quad (2.64)$$

Όπου:

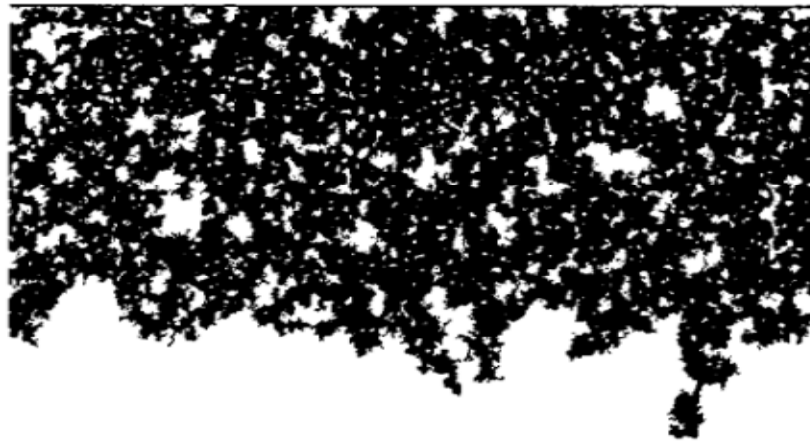
- σ = Πάχος του μετώπου.
- Ca = Τριχοειδής αριθμός.
- μ = Εκθέτης κλιμάκωσης της αγωγιμότητας.
- b_p = Εκθέτης συνάρτησης πρόσβασης.
- ν = Εκθέτης του μήκους συσχέτισης.

Οι πειραματικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για την μέτρηση της καμπύλης $I_R(S_w)$ είναι βασισμένες στο ενδεχόμενο ότι ο κορεσμός δια μέσου του πορώδους δείγματος είναι ομογενής. Ωστόσο, αυτή η συνθήκη επιτυγχάνεται σπάνια στη διάρκεια μιας εκτόπισης που λαμβάνει χώρα σε ένα πορώδες δείγμα μεγάλου μήκους.

Βάση όλων των παραπάνω καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

∅ Η ανάπτυξη ενός σταθερού μετώπου σε μια εκτόπιση ενοείται από:

- Û Υψηλούς ρυθμούς έκχυσης
- Û Λόγους ιξωδών μεγαλύτερους της μονάδας
- Û Αρνητικές διαφορές πυκνότητας μεταξύ του εκτοπίζοντος και του εκτοπιζόμενου ρευστού.



Σχήμα 2.5.(a): Μη αναμίξιμη εκτόπιση υδατικής (άσπρο) από μη υδατική φάση (μαύρο)
Ανάπτυξη σταθερού μετώπου.

∅ Ο σχηματισμός τριχοειδών δακτύλων (capillary fingering) ενοείται από:

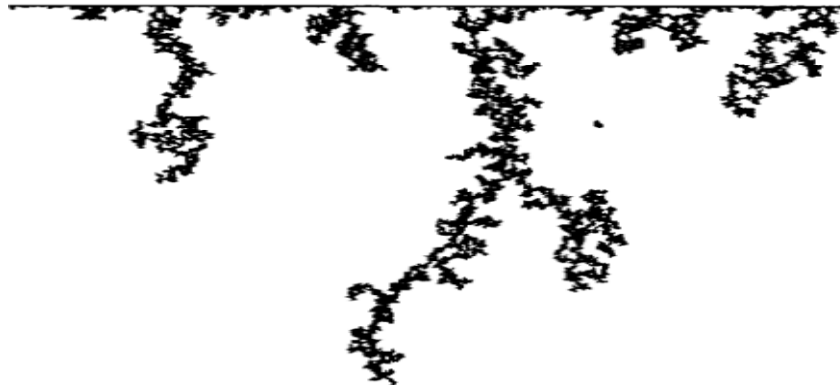
- Û Χαμηλούς ρυθμούς έκχυσης
- Û Θετικές διαφορές πυκνότητας



Σχήμα 2.5.(b): Μη αναμίξιμη εκτόπιση υδατικής (άσπρο) από μη υδατική φάση (μαύρο)
Σχηματισμός τριχοειδών δακτύλων (capillary fingering).

Ø Οι μη σταθεροί και εξαρτώμενοι από την κλίμακα παρατήρησης ιξώδεις δάκτυλοι (viscous fingering) εννοούνται από:

- ü Λόγους ιξωδών μικρότερους της μονάδας
- ü Υψηλούς ρυθμούς ροής



Σχήμα 2.5. (c): Μη αναμίξιμη εκτόπιση υδατικής (άσπρο) από μη υδατική φάση (μαύρο)
Σχηματισμός ιξωδών δακτύλων (viscous fingering)

Άρα σύμφωνα με τα προαναφερόμενα γίνεται αντιληπτό ότι το μεταβατικό πρότυπο εκτόπισης που αναπτύσσεται μέσα σε ένα πορώδες μέσο είναι σημαντικό για την σωστή ερμηνεία των δεδομένων της ηλεκτρικής αντίστασης πετρωμάτων που προέρχονται από εργαστηριακές δοκιμές ισορροπίας ή δυναμικές.

2.14. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΕΙΚΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΠΙΕΣΗΣ

Με την πάροδο των χρόνων έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μέθοδοι για τον υπολογισμό και την μέτρηση των καμπυλών δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης και τριχοειδούς πίεσης. Οι βασικότερες ήτοι:

Ø *Μέθοδος πορώδους πλάκας* (porous plate)

Στην μέθοδο αυτή ο δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης μετράται συγχρόνως με την καμπύλη τριχοειδούς πίεσης κάτω από συνθήκες τριχοειδούς ισορροπίας. Παρατηρείται ότι υπάρχει σταθερή αύξηση της τριχοειδούς πίεσης αφού αρχικά έχει επιτευχθεί η αποκατάσταση της ισορροπίας του συστήματος. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει ένα βασικό μειονέκτημα, είναι αρκετά χρονοβόρα προκειμένου το σύστημα να φτάσει σε ισορροπία σε κάθε πίεση. Για την βελτίωση του μειονεκτήματος γίνεται χρήση της τεχνικής της μικροπορώδους μεμβράνης (αντί κεραμικής μεμβράνης) όπου ο χρόνος κατά την πειραματικής διαδικασίας μειώθηκε αισθητά.

Επιπλέον, σε αυτή την μέθοδο κάποιες φορές δεν λαμβάνεται υπόψη, η σταθεροποίηση ή η αποσταθεροποίηση που μπορεί να προκληθεί σε μια κατακόρυφη εκτόπιση λόγω των δυνάμεων άνωσης, όταν τα δύο ρευστά έχουν διαφορετικές πυκνότητες.

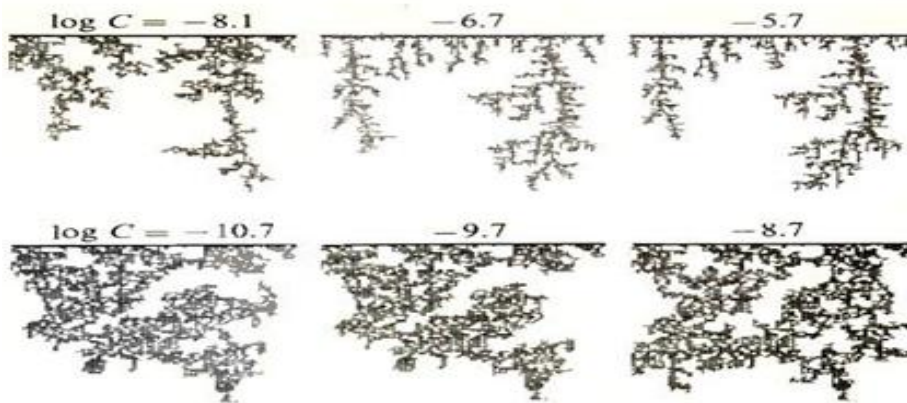
Ø *Μέθοδος συνεχούς έγχυσης* (continuous injection)

Ø *Μέθοδος σταθερής κατάστασης* (steady state)

Ø *Μέθοδος γρήγορης μέτρησης του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης* (FRIM)

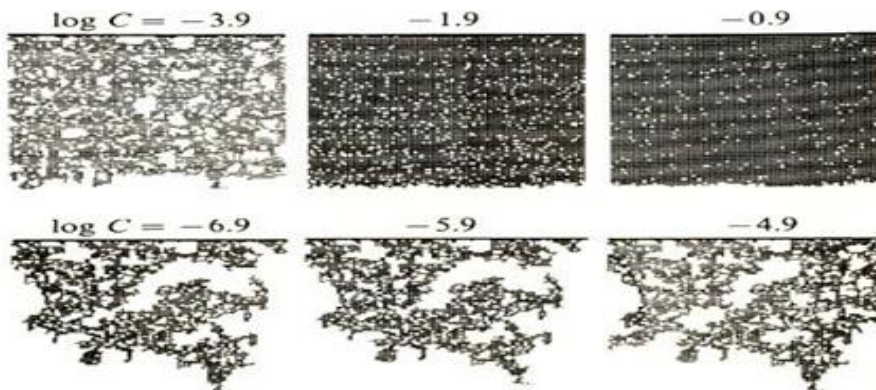
Οι παραπάνω μέθοδοι επιτρέπουν την πραγματοποίηση δυναμικών δοκιμών που εκτελούνται κάτω από συγκεκριμένους ρυθμούς ροής. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων συγκλίνουν στο ότι η χρονική μεταβολή της κατανομής των δύο φάσεων στους πόρους επηρεάζεται άμεσα από την αλληλεπίδραση των τριχοειδών, των ιξωδών και των δυνάμεων άνωσης. Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα των μεθόδων αυτών είναι η γρήγορη και αποτελεσματική μέτρηση των καμπυλών του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτός είναι και ο λόγος που προτιμούνται.

Στην περίπτωση που το εκτοπίζον ρευστό έχει μικρότερο ιξώδες από το εκτοπιζόμενο ($M > 1$) και η εκτόπιση πραγματοποιείται με γρήγορο ρυθμό, δηλαδή υψηλό αριθμό Ca, το πρότυπο εκτόπισης έχει τη μορφή ιξωδών δακτύλων. Όμως σε περίπτωση ελαττώσεως του ρυθμού εκτόπισης η μορφή του καθεστώτος ροής αλλάζει και παρατηρούνται τριχοειδείς δάκτυλοι.



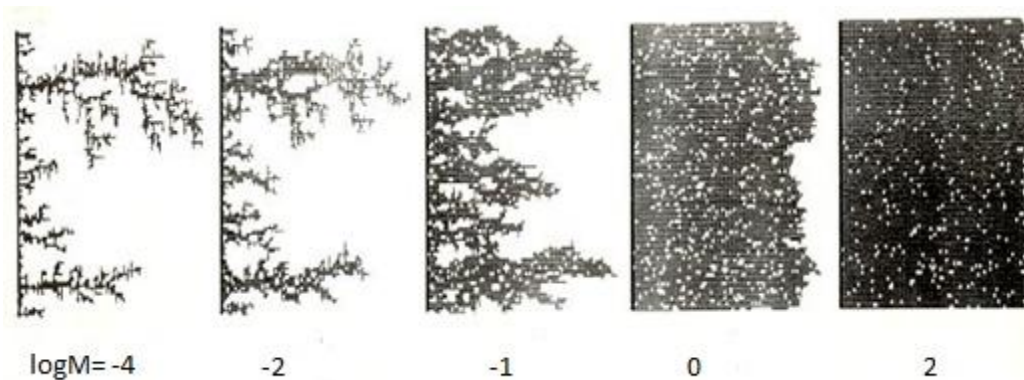
Σχήμα 2.6.(a): Μετάβαση μεταβατικού προτύπου εκτόπισης. Ιξώδεις δακτύλους σε τριχοειδείς δακτύλους.

Στην περίπτωση που υπάρχει μια συνεχής μετάβαση μεταξύ δύο μορφών εκτόπισης, το πρώτο είδος εκτόπισης που πραγματοποιείται γίνεται σε χαμηλούς τριχοειδείς αριθμούς, όπου επικρατούν τα τριχοειδή φαινόμενα, με συνέπεια η εκτόπιση να προχωρά με τη μορφή τριχοειδών δακτύλων. Το δεύτερο είδος πραγματοποιείται σε υψηλούς τριχοειδείς αριθμούς όπου παρατηρείται σταθερό μέτωπο.



Σχήμα 2.6.(b): Μετάβαση μεταβατικού προτύπου εκτόπισης. Σταθερή εκτόπιση σε τριχοειδείς δακτύλους

Στην περίπτωση που επικρατεί σταθερός ρυθμός ροής, το μεταβατικό πρότυπο εκτόπισης μεταβάλλεται προοδευτικά καθώς ο λόγος ιξωδών αντί να παρουσιάζει τιμές μικρότερες της μονάδας λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας, με συνέπεια από τη μορφή των ιξωδών δακτύλων σταδιακά μεταβαίνουμε σε σταθερή εκτόπιση.



Σχήμα 2.6.(c): Μετάβαση μεταβατικού προτύπου εκτόπισης. Ιξώδεις δακτύλους σε σταθερή εκτόπιση.

Άρα σύμφωνα με την μέθοδο που χρησιμοποιείται και ανάλογα με την πειραματική διαδικασία η χωρική και χρονική κατανομή του κορεσμού δια μέσου του πορώδους μέσου διαφέρει. Σύμφωνα με τα προαναφερόμενα υπάρχει η δυνατότητα να κατανοηθεί πλήρως τι συμβαίνει στην διάρκεια της μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης σε δείγματα μεγάλου σχετικά μήκους. Συνεπώς, η τιμή του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης που μετράται με δυναμικές μεθόδους δεν είναι μοναδική και οι συνθήκες ροής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση των δεδομένων.

2.15. ΧΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΕΜΠΕΔΗΣΗ

Η χωρητική άεργη αντίσταση, δηλαδή η μη ωμική αντίσταση του πυκνωτή ορίζεται με την σχέση:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (2.65)$$

Όπου η γωνιακή ταχύτητα υπολογίζεται από την σχέση :

$$\omega = 2\pi f \quad (2.66)$$

Όπου:

- X_c = χωρητική άεργη αντίσταση
- ω = γωνιακή συχνότητα
- C = Χωρητικότητα πυκνωτή
- f = Συχνότητα

Η εμπέδηση του πυκνωτή ορίζεται από τη σχέση:

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C} = -jX_c \quad (2.67)$$

Όπου:

- Z_c = Εμπέδηση πυκνωτή
- X_c = χωρητική άεργη αντίσταση
- ω = γωνιακή συχνότητα
- C = Χωρητικότητα πυκνωτή
- j = Φανταστική μονάδα.

Για ένα κύκλωμα που περιλαμβάνει ωμική αντίσταση και πυκνωτή μπορούμε να ορίσουμε μια σύνθετη αντίσταση, Z , η οποία ονομάζεται εμπέδηση και μετράται σε Ω . Οι εμπεδήσεις συνδυάζονται σε σειρά ή παράλληλα όπως ακριβώς και οι αντιστάσεις. Στην περίπτωση που η αντίσταση και ο πυκνωτής συνδυάζονται σε σειρά, ισχύει η σχέση:

$$Z = R + Z_c \quad (2.68)$$

Όπου:

- Z = Εμπέδηση (σύνθετη αντίσταση)
- Z_c = Εμπέδηση πυκνωτή
- R = Ωμική αντίσταση

Στην περίπτωση που η αντίσταση και ο πυκνωτής συνδυάζονται σε παράλληλη σύνδεση, ισχύει η σχέση:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + \frac{1}{Z_c} \quad (2.69)$$

Όπου:

- Z = Εμπέδηση (σύνθετη αντίσταση)
- Z_c = Εμπέδηση πυκνωτή
- R = Ωμική αντίσταση

2.15.1. Δείκτης χωρητικής αντίστασης

Δείκτης χωρητικής αντίστασης (reactivity index) ορίζεται ο λόγος της χωρητικής αντίστασης ενός μερικώς κορεσμένου με νερό πορώδους προς την χωρητική τους αντίσταση όταν πλήρως κορεσμένο με νερό και η σχέση διατυπώνεται ως εξής:

$$I_t = \frac{X_t}{X_0} \quad (2.70)$$

Όπου:

- I_t = Δείκτης χωρητικής αντίστασης.
- X_t = Χωρητική αντίσταση ενός μερικώς κορεσμένου με νερό πορώδους δείγματος.
- X_0 = Χωρητική του αντίσταση όταν είναι πλήρως κορεσμένο με νερό.

Ο δείκτης χωρητικής αντίστασης σε συνάρτηση με τον κορεσμό του νερού δίνεται από τη σχέση:

$$I_x = S_w^{-n} \quad (2.71)$$

Όπου:

$I_x =$ Δείκτη χωρητικής αντίστασης.

$S_w =$ Δείκτης κορεσμού.

$n^* =$ εκθέτης κορεσμού του δείκτη χωρητικής αντίστασης κατά αντιστοιχία με τον εκθέτη κορεσμού του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης (n) στο νόμο του Archie.

Η παραπάνω σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του κορεσμού του νερού στον πορώδη χώρο σε συχνότητες μεγαλύτερες από 100 KHz όπου παρατηρείται και αισθητή μείωση του εκθέτη κορεσμού. Επίσης, ο εκθέτης κορεσμού του δείκτη χωρητικής αντίστασης συνδέεται με τον εκθέτη κορεσμού του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης με τη σχέση:

$$n^* = 2n - p \quad (2.72)$$

Όπου:

$n^* =$ Εκθέτης κορεσμού του δείκτη χωρητικής αντίστασης.

$n =$ Εκθέτης κορεσμού του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης.

$p =$ Τιμή κοντά στην μονάδα.

2.16. ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΡΙΚΩΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Σε πορώδη πετρώματα πλήρως κορεσμένα με ηλεκτρολύτη, οι αλληλεπιδράσεις ρευστού-ορυκτού οδηγούν σε φαινόμενα πόλωσης. Με την απουσία ενός εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου, τα ιόντα έχουν την δυνατότητα να δημιουργούν μια διπλή ιονοστοιβάδα.

Στην περίπτωση που εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή από 10Hz έως 10MHz τα ιόντα πολώνονται γύρω από τους κόκκους της στερεάς φάσης με συνέπεια την εμφάνιση μεγάλων διπόλων και μεγάλων διαφορετικών διηλεκτρικών σταθερών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα φορτία των ιόντων διαχωρίζονται σε μια απόσταση της τάξης του μεγέθους των κόκκων. Στην περίπτωση που η συχνότητα κυμαίνεται στο επίπεδο από 10MHz έως 10GHz τα ιόντα διανύουν μικρότερη απόσταση, άρα πολώνονται λιγότερο, με συνέπεια να συνεισφέρουν περισσότερο στην αγωγιμότητα.

Στην περιοχή συχνοτήτων 10Hz-10MHz, η διηλεκτρική σταθερά επηρεάζεται από παράγοντες που επηρεάζουν την πόλωση στις διεπιφάνειες. Οι παράγοντες αυτοί είναι:

• Συγκέντρωση του υδατικού διαλύματος NaCl

• Κορεσμός του νερού

• Διαβροχή

Ένα από τα σπουδαιότερα προβλήματα που αντιμετώπισαν οι ερευνητές ήταν ο προσδιορισμός της διηλεκτρικής σταθεράς ενός σύνθετου υλικού. Η διηλεκτρική σταθερά ενός υλικού προκύπτει από τη σύνθεση των ξεχωριστών διηλεκτρικών σταθερών των διάφορων στοιχείων του υλικού, του κλασματικού όγκου των στοιχείων, της γεωμετρίας των στοιχείων και των ηλεκτροχημικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ αυτών. Η σύνθετη διηλεκτρική σταθερά προσδιορίζεται από την σχέση:

$$e_c = e_r - ie_{im} \quad (2.73)$$

Όπου:

$e_c =$ Σύνθετη διηλεκτρική σταθερά

- $\epsilon_r =$ Διηλεκτρικής σταθεράς (πραγματικό μέρος)
 $i\epsilon_{im} =$ Φανταστικό μέρος της σύνθετης διηλεκτρικής σταθεράς (loss factor).

Επιστημονικό ενδιαφέρον παρουσιάζει ο θεωρητικός υπολογισμός της διηλεκτρικής σταθεράς ενός πορώδους δείγματος το οποίο περιέχει ποικίλες ποσότητες νερού. Ο υπολογισμός της μέτρησης της διηλεκτρικής σταθεράς στη μηχανική ταμειυτήρων υδρογονανθράκων όσο και της μέτρησης της μόλυνσης υπογείων υδάτων, έχει την δυνατότητα να δώσει σημαντικές πληροφορίες για τον προσδιορισμό του επιπέδου του κορεσμού του νερού. Επίσης, από μετρήσεις της διηλεκτρικής σταθεράς υπάρχει η δυνατότητα να αποκομισθούν πληροφορίες σχετικά με τη διαβροχή της επιφάνειας των πόρων. Πρέπει να τονίσουμε ότι η διαβροχή επηρεάζει τις ηλεκτρικές ιδιότητες των πετρωμάτων σύμφωνα με επίπεδο των συχνοτήτων

Οι πειραματικές διαδικασίες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα σε ελαιοδιαβρεκτά μέσα είχαν τα εξής αποτελέσματα, οι μετρήσεις έδειξαν αύξηση των εκθετών κορεσμού των δεικτών ηλεκτρικής χωρητικής αντίστασης σε σχέση με τις τιμές που λαμβάνουν οι εκθέτες αυτοί σε υδατοδιαβρεκτά μέσα. Οι πειραματικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν σε χαμηλές συχνότητες (5Hz - 4MHz) για διάφορα δείγματα άμμου, με σ διαφορετικούς κορεσμούς νερού με σκοπό την μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς. Αποτέλεσμα αυτού ήταν οι επιστήμονες να διατυπώσουν μια εκθετική συσχέτιση της διηλεκτρικής σταθεράς με τη γωνιακή συχνότητα της μορφής:

$$e_r = A\omega^{-a} \quad (2.74)$$

Όπου:

- $\epsilon_r =$ Διηλεκτρική σταθεράς
 $\omega =$ Γωνιακή ταχύτητα
 $A =$ Εμπειρική σταθερά
 $a =$ Εμπειρική σταθερά

Ωστόσο, οι ερευνητές προσπάθησαν να αναλύσουν και να διατυπώσουν την διηλεκτρική σταθερά με διαφορές πειραματικές διαδικασίες. Έτσι, χρησιμοποίησαν την μέθοδο των τεσσάρων ηλεκτροδίων μετρώντας αρχικά τη σύνθετη εμπέδηση δειγμάτων άμμου στο επίπεδο συχνοτήτων από 10Hz- έως 0.1MHz με σκοπό τον προσδιορισμό της διηλεκτρικής σταθεράς, τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας ήταν η μείωση της κατά ένα παράγοντα 5όταν υπάρχει αυξήσει της συχνότητας από 100 Hz στα 1000 Hz για ένα 5% κολλοειδές αώρημα σε νερό.

Η μεταβολή του κορεσμού με την ενεργό διηλεκτρική σταθερά δίνεται από την σχέση:

$$e_r = e_{r,100} (S_w)^p \quad (2.75)$$

Όπου:

- $\epsilon_r =$ Διηλεκτρικής σταθεράς
 $e_{r,100} =$ Ενεργή διηλεκτρική σταθερά για $S_w = 1$
 $p =$ Τιμή κοντά στην μονάδα
 $S_w =$ Δείκτης κορεσμού του νερού

Σε 67 δείγματα που μετρήθηκαν η διηλεκτρική σταθερά και αγωγιμότητα κυρίως γρανίτη και ψαμμίτη μερικώς κορεσμένα με διάλυμα NaCl. Τα αποτελέσματα αυτών οδήγησαν σε μια εμπειρική σχέση που συνδέει την διηλεκτρική σταθερά του μερικώς κορεσμένου πετρώματος με την αγωγιμότητά του στα 100Hz και τη συχνότητα.

$$e_r = 58140 (s_{100})^{0.5151} (f)^{-0.597} \quad (2.76)$$

Όπου:

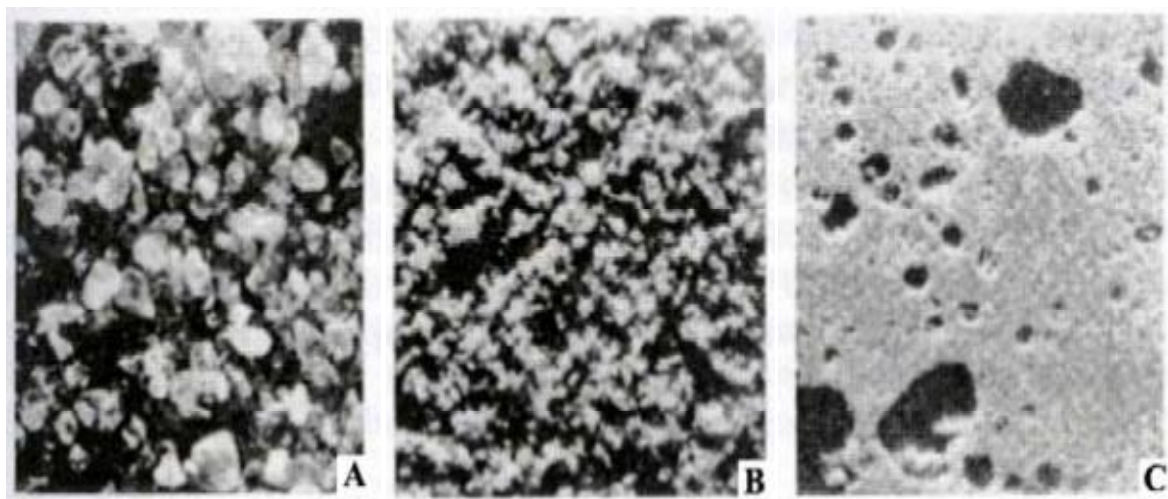
$\epsilon_r =$ Διηλεκτρικής σταθεράς.
 $\sigma_{100} =$ η αγωγιμότητα του μερικώς κορεσμένου πετρώματος στα 100 Hz.
 $f =$ Συχνότητα.

Γύρω από τους φορτισμένους κόκκους του στερεού υπάρχουν ιόντα και κινούμενα μόρια που πολώνονται. Τα φαινόμενα πόλωσης των ιόντων στην διεπιφάνεια στερεού – ρευστού πραγματοποιούνται στην περιοχή των συχνοτήτων 10Hz έως 10MHz δίνοντας πολύ μεγάλες φαινομενικές διηλεκτρικές σταθερές. Η διηλεκτρική σταθερά λαμβάνει πολύ υψηλές τιμές σε χαμηλές συχνότητες της τάξης των 106KHz και τα πορώδη μέσα παρουσιάζουν κορεσμένα με υδατικά διαλύματα NaCl. Στην περίπτωση της αύξησης της συγκέντρωσης του υδατικού διαλύματος σε NaCl παρατηρείται και αύξηση στην τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς. Ωστόσο, αυτό το φαινόμενο γίνεται εντονότερο στην περιοχή από 1MHz και κάτω, στην περιοχή των GHz η συγκέντρωση του υδατικού διαλύματος σε NaCl δεν έχει σημαντική επίδραση στην διηλεκτρική σταθερά.

Σε ένα μερικώς κορεσμένο με ηλεκτρολυτικό διάλυμα πορώδες μέσο η αγώγιμη φάση είναι το νερό. Την μόνωση την αποτελούν οι στερεοί κόκκοι και οποιαδήποτε άλλη φάση αν υπάρχει στους πόρους. Άρα βάση των προαναφερόμενων οι τρεις φάσεις είναι η αιτία που επηρεάζεται η διηλεκτρική σταθερά από τον σχετικό όγκο και τη χωρική κατανομή. Επιπλέον, συγκεκριμένες τιμές λαμβάνουν τα εξής:

- Όγκος
- Κατανομή
- Γεωμετρία του στερεού.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με την τεχνική που θα χρησιμοποιηθεί, η χωρική κατανομή των δύο ρευστών στο πορώδη χώρο καθορίζει και την μεταβολή του κορεσμού.



Εικόνα 2.2: Διάφορα φυσικά πορώδη υλικά σε μεγέθυνση 1:10
 (A) Κόκκοι άμμοι (B) Ψαμμίτης (C) Ασβεστόλιθος

2.17. ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Για τον προσδιορισμό της διηλεκτρικής σταθεράς ενός κορεσμένου με νερό πορώδους μέσου (για συστήματα νερού/αέρα) βασίζονται από τα εξής:

- Θεωρία αποτελεσματικού μέσου.
- Μέθοδο σύνθετου δείκτη διάθλασης (complex refractive index method- CRIM).

2.17.1. Θεωρία αποτελεσματικού μέσου

Στην περίπτωση που μελετάται ένα μέσο το οποίο δεν παρουσιάζει ομοιογένεια, υπάρχει η δυνατότητα να αντικατασταθεί με ένα αποτελεσματικό (effective) μέσο που είναι υποθετικά ομοιογενές και μιμείται τη μέση συμπεριφορά του αρχικού μέσου. Αυτό γίνεται με σκοπό τον καλύτερο υπολογισμό των ιδιοτήτων μεταφοράς του μέσου. Όταν λοιπόν, η αντικατάσταση αυτή είναι εφικτή, τότε υπάρχει δυνατότητα να δοθεί απλούστερη λύση στο πρόβλημα του υπολογισμού των αποτελεσματικών ιδιοτήτων μεταφοράς του ομογενούς συστήματος. Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης, ότι αυτή η αντικατάσταση είναι μόνο για την προσέγγιση του αρχικού προβλήματος. Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για την υλοποίηση αυτής της ιδέας.

Ø Προσέγγιση 1^η:

Εφαρμόζεται στην περίπτωση που απομονωμένες εγκλείσεις βυθίζονται σε μια συνεχή μήτρα (matrix) που αποτελείται από μία μόνο φάση. Οι ενεργές ιδιότητες του μη κανονικού συστήματος προκύπτουν βάζοντας μια σφαίρα ή μια έλλειψη του ομογενούς ή ενεργού μέσου σε αυτή τη μήτρα.

Ø Προσέγγιση 2^η:

Εφαρμόζεται στην περίπτωση που η ομογενοποίηση δεν μεταβάλλει το κατά μέσο όρο εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται προσέγγιση αποτελεσματικού μέσου (Effective Medium Approximation) και πρακτικά είναι ένας αξιόλογος και έξυπνος τρόπος αντικατάστασης της κατανομής ιδιοτήτων από μία μέση ιδιότητα.

Για ένα σύστημα τριών φάσεων προκύπτει ότι η ενεργός διηλεκτρική σταθερά, και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$(1-j) \frac{e_s - e_{eff}}{e_s + \left(\frac{c_n}{2} - 1\right) e_{eff}} + j S_w \frac{e_w - e_{eff}}{e_w + \left(\frac{c_n}{2} - 1\right) e_{eff}} + j (1 - S_w) \frac{e_{oil} - e_{eff}}{e_{oil} + \left(\frac{c_n}{2} - 1\right) e_{eff}} = 0 \quad (2.77)$$

Όπου:

- ϵ_s = Διηλεκτρική σταθερά στερεού.
- ϵ_w = Διηλεκτρική σταθερά νερού.
- ϵ_{oil} = Διηλεκτρική σταθερά λαδιού.
- φ = Πορώδες.
- c_n = Αριθμός συνδιάλεξης.

2.17.2. Μέθοδος σύνθετου δείκτη διάθλασης

Η διηλεκτρική σταθερά υπολογίζεται σύμφωνα με την μέθοδο του σύνθετου δείκτη διάθλασης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν είναι γνωστά η διηλεκτρική σταθερά κάθε στοιχείου καθώς και όγκος τους. Η σχέση για τον προσδιορισμό της διηλεκτρικής σταθεράς είναι η εξής:

$$\sqrt{\epsilon_r} = \sum V_i \sqrt{\epsilon_i} \quad (2.78)$$

Όπου:

- $\epsilon_r =$ Διηλεκτρική σταθερά
- $\epsilon_i =$ Διηλεκτρική σταθερά κάθε στοιχείου
- $V_i =$ Όγκος κάθε στοιχείου

Η μαθηματική έκφραση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση ενός πορώδους μέσου κορεσμένου από διάλυμα ηλεκτρολύτη και μια μη αγωγίμη υγρή φάση. Ωστόσο, θα χρειαστεί κάποιες μικρές μετατροπές αφού το σύστημα αποτελείται από ξηρό πέτρωμα (d), υδατική (w) και μη υδατική φάση (h). Η διηλεκτρική σταθερά δίνεται από την έκφραση:

$$\sqrt{\epsilon_r} = (1-j) \sqrt{\epsilon_d} + S_w \sqrt{\epsilon_w} + (1-S_w)j \sqrt{\epsilon_h} \quad (2.79)$$

Όπου:

- $\epsilon_r =$ Διηλεκτρική σταθερά
- $\epsilon_d =$ Διηλεκτρική σταθερά πετρώματος
- $\epsilon_h =$ Διηλεκτρική σταθερά μη υδατικής φάσης
- $\epsilon_w =$ Διηλεκτρική σταθερά υδατικής φάσης
- $S_w =$ Δείκτης κορεσμού υδατικής φάσης
- $\varphi =$ Πορώδες

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η γεωμετρία των στοιχείων και οι ηλεκτροχημικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους.

Πειραματικές μελέτες κατέληξαν στο εξής συμπέρασμα, όταν η μέθοδος του σύνθετου δείκτη διάθλασης (CRIM) χρησιμοποιείται στην πρωτότυπη μορφή της και γίνεται χρήση των διηλεκτρικών σταθερών και του κλασματικού όγκου του ξηρού πετρώματος, του νερού και του αέρα, δεν παρουσιάζεται συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Στην περίπτωση όμως που εφαρμοστεί η εξίσωση CRIM θεωρώντας πως το σύστημά αποτελείται από πέτρωμα που έχει διαβρέχει από νερό και αέρα εξίσωση (3.20) έχει την δυνατότητα να δώσει μια καλή προσαρμογή σε πειραματικά δεδομένα.

$$\sqrt{\epsilon_r} = (1-j_c) \sqrt{\epsilon_{wd}} + S_{wc} \sqrt{\epsilon_{bw}} + (1-S_{wc})j_c \sqrt{\epsilon_a} \quad (2.80)$$

Όπου:

- $\epsilon_r =$ Διηλεκτρική σταθερά
- $\epsilon_a =$ Διηλεκτρική σταθερά αέρα
- $\epsilon_{wd} =$ Διηλεκτρική σταθερά πετρώματος που έχει διαβρεχεί
- $S_{wc} =$ Δείκτης κορεσμού υδατικής φάσης
- $\varphi_c =$ Πορώδες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διφασική και πολυφασική ροή είναι οι συνηθέστερες ροές που συναντούμε στην ροή των ρευστών στη φύση. Βασικά παραδείγματα διφασικών και πολυφασικών συστημάτων στην καθημερινότητα του ανθρώπου είναι η ροή του αίματος, η κίνηση των σύννεφων, όπως επίσης και η παρασκευή του γαλλικού καφέ. Οι πολυφασικές ροές είναι περισσότερες και είναι φυσικές και χημικές. Το βασικότερο παράδειγμα πολυφασικής ροής είναι η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Πειραματικές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί με σκοπό την ανάλυση των ροών για την χρήση τους σε διαφορές τεχνολογικές εφαρμογές.

3.2. ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

3.2.1. Έδαφος

Το έδαφος αποτελεί το πιο γνωστό πορώδες μέσο που συναντάται στο φυσικό κόσμο και καλύπτει το ανώτατο στρώμα του φλοιού της γης, δηλαδή το επιφανειακό στρώμα σε απόσταση μέχρι 50 cm από την επιφάνειά της. Σε κατώτερα στρώματα καλείται υπέδαφος και εκτείνεται από 0.5-5 m από την επιφάνεια, ως εκεί δηλαδή που προχωρούν οι ρίζες των φυτών και ξεκινά ο υδροφόρος ορίζοντας.

Το έδαφος σχηματίζεται με φυσικό τρόπο από την αποσάθρωση (διάβρωση) των επιφανειακών πετρωμάτων της γης που συντελείται με την επίδραση ορισμένων παραγόντων όπως οι συνεχείς μεταβολές της θερμοκρασίας, η βροχή, ο παγετός, ο άνεμος, οι μικροοργανισμοί, τα ανώτερα φυτά και οι ζωικοί οργανισμοί. Συνήθως για το σχηματισμό ενός στρώματος από χώμα μέσω φυσικών διαδικασιών αποσάθρωσης πετρωμάτων χρειάζονται από 100 έως 1000 χρόνια ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος. Γι' αυτό το λόγο το έδαφος δεν αποτελεί ανανεώσιμο φυσικό πόρο.

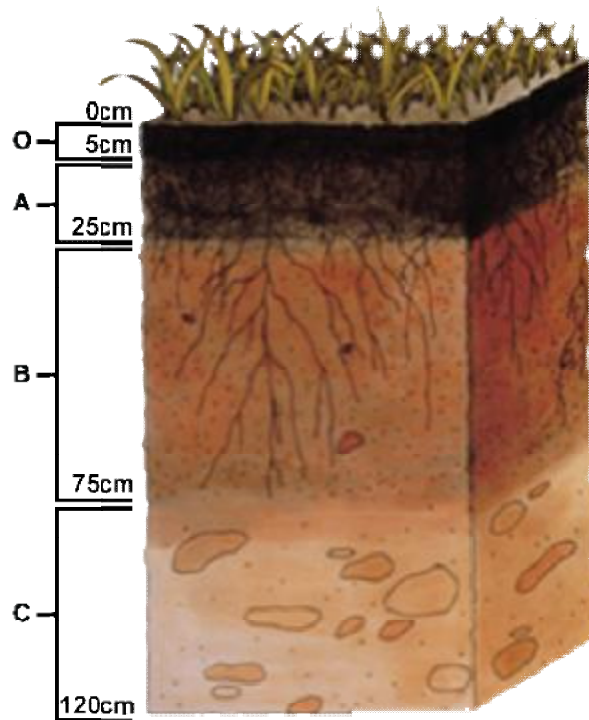
Το έδαφος αποτελεί το μέσο στήριξης και θρέψης των φυτών, συνιστά τη βάση της αγροτικής και δασικής παραγωγής, το φυσικό φίλτρο και το προστατευτικό στρώμα των αποθεμάτων του υπόγειου νερού καθώς επίσης και το χώρο όπου ζουν πολυάριθμοι μικροοργανισμοί που συμμετέχουν στην διαδικασία ανακύκλωση στοιχείων όπως του αζώτου και του άνθρακα. (Τζοβόλου Δ.,2001)

Ø *Εδαφικοί ορίζοντες:*

Η διαδικασία σχηματισμού του εδάφους δημιουργεί διαφορετικά οριζόντια στρώματα που ονομάζονται εδαφικοί ορίζοντες (soil horizons). Οι εδαφικοί ορίζοντες είναι για το κάθε έδαφος και διαφέρουν ως προς το μέγεθος, το χρώμα και τη σύσταση. Οι εδαφικοί ορίζοντες είναι οι εξής:

- Ø **0-ορίζοντας:** το ανώτατο στρώμα εδάφους με φυτά, οργανικά υπολείμματα πεσμένα φύλλα δένδρων και μερικώς αποσυντιθεμένη οργανική ύλη
- Ø **A-ορίζοντας:** τα πρώτα 30-50 cm εδάφους (topsoil) με χουμικά οξέα, μερικά ανόργανα ορυκτά, οργανική ύλη, ζωντανούς οργανισμούς με τη μεγαλύτερη βιολογική δραστηριότητα από όλες τις άλλες στιβάδες.

- Ø **E-ορίζοντας:** είναι η ζώνη που διαχωρίζει το επιφανειακό έδαφος από το υπέδαφος. Η διαλυμένη ή αιωρούμενη ύλη κινείται προς τη στιβάδα αυτή και γι' αυτό καλείται *ζώνη έκπλυσης* (leaching zone).
- Ø **B-ορίζοντας ή υπέδαφος:** είναι ορίζοντας εμπλουτισμού όπου συγκεντρώνονται τα χουμικά οξέα, αργιλικά υλικά, οξειδία του σιδήρου, του μαγνησίου και του αλουμινίου, μετά το στράγγισμα από τις επάνω ζώνες.
- Ø **C-ορίζοντας:** ελαφρά διαβρωμένο βραχώδες έδαφος που περιέχει τα ορυκτά συστατικά του κύριου εδάφους.
- Ø **R:** πέτρωμα (bedrock) που δεν επηρεάζεται από διάβρωση.



Εικόνα 3.1: Εδαφική ορίζοντες.
[Πηγή: <http://axirokipos.blogspot.com>]

3.2.2. Ακόρεστη-κορεσμένη ζώνη εδάφους-υδροφόρος ορίζοντας

Η κατακόρυφη κατανομή νερού και αέρα στο έδαφος περιγράφεται συνήθως σαν κατανομή νερού και είναι σημαντική στην κατανόηση της μετακίνησης υγρών ρύπων και ατμών. Η συνύπαρξη νερού και αέρα ορίζει την ακόρεστη ζώνη (unsaturated ή vadose zone), ενώ η απουσία αέρα ορίζει την κορεσμένη ζώνη (saturated ή phreatic zone). Το όριο μεταξύ αυτών των δύο ζωνών είναι ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας, ο οποίος ορίζεται ως η επιφάνεια νερού στο υπέδαφος στην οποία η πίεση είναι ακριβώς ίση με την ατμοσφαιρική πίεση και είναι το επίπεδο εκείνο όπου θα ανυψωθεί το νερό σε ένα φρεάτιο που έχει ανοιχθεί με γεώτρηση στην κορεσμένη ζώνη. Η ανύψωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα έχει φυσικές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του χρόνου με αλλαγές στα πρότυπα φόρτισης/αποφόρτισης λόγω βροχοπτώσεων/προσρόφησης νερού.

Η ακόρεστη ζώνη ορίζεται ως η ζώνη πάνω από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα όπου η πίεση του νερού στους πόρους του εδάφους είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική (λόγω

τριχοειδούς πίεσης). Στο μεγαλύτερο τμήμα της ακόρεστης ζώνης, οι πόροι δεν είναι πλήρως γεμάτοι με νερό αλλά περιέχουν και αέρα. Το νερό μετακινείται προς τα κάτω λόγω βαρύτητας (gravity flow) και προς τα επάνω λόγω τριχοειδούς εισρόφησης (capillary imbibition). Τα εδαφικά αέρια μπορούν να μετακινηθούν προς όλες τις διευθύνσεις.

Κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα βρίσκεται η κορεσμένη ζώνη του εδάφους όπου οι πόροι είναι πλήρως κορεσμένοι με νερό και η πίεση του νερού στους πόρους είναι μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική. Η ταχύτητα με την οποία το νερό θα μετακινείται στην κορεσμένη ζώνη του εδάφους εξαρτάται από τις ιδιότητες του γεωλογικού υλικού, όπως η υδραυλική αγωγιμότητα και το πορώδες, και από την υδραυλική βαθμίδα (πτώση πίεσης). Οι κύριες πηγές υπόγειου νερού σε μια περιοχή είναι η τοπική βροχόπτωση και η διήθηση, ή η υπόγεια ροή από μια φορτισμένη περιοχή. Η φορτισμένη περιοχή μπορεί να είναι μια υψηλού ρυθμού βροχόπτωση ή μέρος από σύστημα ποταμού που αυτοτροφοδοτείται με νερό από μια απομακρυσμένη περιοχή βροχοπτώσεων.

Η μεταβατική ζώνη (capillary fringe) είναι μια ζώνη εδάφους κορεσμένη με νερό που βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Το πάχος της καθορίζεται από το μέγιστο ύψος διείδυσης νερού μέσω των πόρων του εδάφους λόγω αυθόρμητης εισρόφησης. Εδάφη με μικρό μέγεθος πόρων έχουν παχύτερες μεταβατικές ζώνες συγκριτικά με αυτά που έχουν πιο μεγάλο μέγεθος πόρων. Σε λεπτόκοκκα εδάφη, η μεταβατική ζώνη μπορεί να έχει πάχος πάνω από 1 m, ενώ σε ένα χονδρόκοκκο αμμώδες θα έχει πάχος λιγότερο από 1 mm. Η περιεκτικότητα του νερού μειώνεται με αύξηση του ύψους, πράγμα που εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους. Όσο μειώνεται η περιεκτικότητα του νερού τόσο αυξάνεται ο αέρας του πορώδους.

Οι εδαφικές στρώσεις που παρεμβάλλονται μεταξύ ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης μπορεί να είναι αδιαπέρατες (aquiclude), αδιαπέρατες στεγανές (aquifluge), υδροφορείς (aquifer) ή ημιδιαπερατές (aquitard). Ανάλογα με το είδος των στρώσεων διακρίνουμε δύο είδη υδροφορέων στην κορεσμένη ζώνη.

❖ *Περιορισμένους ή υπό πίεση υδροφορείς:* Υδροφορείς περιορισμένοι προς τα άνω και προς τα κάτω από αδιαπέρατους σχηματισμούς με ροή ανάλογη της ροής σε κλειστούς αγωγούς. Στην περίπτωση που το πιεζομετρικό ύψος βρίσκεται υψηλότερα της επιφάνειας του εδάφους τότε έχουμε αρτεσιανό υδροφορέα.

❖ *Φρεάτιους ή μη περιορισμένους υδροφορείς:* Υδροφορείς περιορισμένοι προς τα κάτω από αδιαπέρατους σχηματισμούς και με ελεύθερη επιφάνεια προς τα πάνω. Η ροή του υπόγειου νερού μέσω αυτών είναι ανάλογη της ροής σε ανοιχτούς αγωγούς. (Τζοβόλου Δ.,2001)

3.2.3. Μέθοδοι απορρύπανσης

Ως αποτέλεσμα λοιπόν της όλο και αυξανόμενης ανάγκης για αντιμετώπιση της ρύπανσης του περιβάλλοντος, σε συνδυασμό με τη μελέτη και την κατανόηση των μηχανισμών μεταφοράς και μετατροπής των ρύπων μέσα σ' αυτό, οδήγησαν σταδιακά στην ανάπτυξη πολλών αποτελεσματικών μεθόδων απορρύπανσης εδάφους και υπόγειων υδάτων. Οι μέθοδοι απορρύπανσης μπορεί να ορισθούν ως αυτές που καταστρέφουν, απομακρύνουν ή αποδυναμώνουν την τοξικότητα των ρύπων.

Με τις μεθόδους απορρύπανσης επιτυγχάνεται η απομάκρυνση των ρύπων καθώς επίσης και η επεξεργασία τους. Ωστόσο, η ποιότητα του νερού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως τις υδροδυναμικές συνθήκες μεταφοράς και από τις επικρατούσες συνθήκες οι οποίες είναι φυσικές, χημικές και βιολογικές.

Οι ρυπαντές των υπόγειων υδροφορέων μπορεί να είναι είτε υγροί ελαφρύτεροι (LNAPLs, Light Non-Aqueous Phase Liquids) από το νερό με συνέπεια να μην

αναμειγνύονται με αυτό και να απομακρύνονται σχετικά εύκολα, είτε να είναι βαρύτεροι (DNAPLs, Dense Non-Aqueous Phase Liquids) από το νερό με αποτέλεσμα να καταβυθίζονται χωρίς να αναμειγνύονται και η απομάκρυνση τους να είναι δύσκολη.

Οι υπάρχουσες μέθοδοι απορρύπανσης είναι αρκετά εξειδικευμένες και είναι δυνατόν να ταξινομηθούν σε ξεχωριστές κατηγορίες βάσει κάποιου κριτηρίου. Κατ' αρχάς διακρίνονται σε απομακρυσμένες (*ex-situ*) και επιτόπιες (*in-situ*), ανάλογα με το αν περιλαμβάνουν την απομάκρυνση του ρυπασμένου μέσου και την επεξεργασία του μακριά από το πεδίο σε ειδικές εγκαταστάσεις ή αν εφαρμόζονται απευθείας στο πεδίο, αντίστοιχα. Μια άλλου είδους κατηγοριοποίηση αφορά στους μηχανισμούς τους οποίους χρησιμοποιεί κάθε μέθοδος για την απομάκρυνση του εκάστοτε ρύπου, οι οποίοι αν είναι φυσικοί, κατατάσσουν την αντίστοιχη μέθοδο στις φυσικές μεθόδους επεξεργασίας εδαφών και υπόγειων υδάτων, αν είναι χημικοί, στις χημικές μεθόδους, και αν είναι βιοτικοί, στις βιολογικές μεθόδους.

Οι χημικές μέθοδοι περιλαμβάνουν την άμεση έγχυση οξειδωτικών χημικών στο ρυπασμένο έδαφος ή στο υπόγειο νερό, αλλάζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη χημεία του προς επεξεργασία μέσου. Οι βιολογικές μέθοδοι περιλαμβάνουν συνήθως τη διάσπαση των ρύπων σε μη τοξικές μορφές χρησιμοποιώντας μικροβιολογικές διεργασίες.

Μια συγκεκριμένη ρυπασμένη περιοχή μπορεί να απαιτεί συνδυασμό διαδικασιών ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα απορρύπανσης για τις επικρατούσες συνθήκες. Κατά συνέπεια, συνδυασμοί βιολογικών, φυσικών και χημικών μεθόδων απορρύπανσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό μεταξύ τους ώστε να μειωθούν τα επίπεδα των ρύπων στα ασφαλή και νομοθετικά αποδεκτά επίπεδα.

Η επεξεργασία ρυπασμένων εδαφών με *ex situ* μεθόδους παρέχει γενικότερα τη δυνατότητα να επιτυγχάνονται βέλτιστες συνθήκες κατά την εφαρμογή τους και να γίνεται έλεγχος πιθανής διάδοσης των ρύπων. Όμως, ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα που συνδέονται με τις *ex situ* μεθόδους απορρύπανσης είναι το υψηλό κόστος λειτουργίας τους για ενέργεια όπως π.χ. η εκσκαφή εδάφους και η άντληση νερού από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα.

Από την άλλη μεριά, οι *in situ* μέθοδοι απορρύπανσης έχουν το πλεονέκτημα της ελάχιστης διατάραξης του προς επεξεργασία συστήματος και είναι συγκριτικά πιο οικονομικές. Άλλωστε αυτοί ήταν και οι κύριοι λόγοι όπου προέκυψε η ανάγκη δημιουργίας των *in situ* μεθόδων: να μειωθεί το συνολικό κόστος της επεξεργασίας και η επίδραση στο περιβάλλον κατά την εφαρμογή τους. Το κύριο μειονέκτημα όμως των *in situ* μεθόδων απορρύπανσης είναι ότι έχουν πιο περίπλοκο σχεδιασμό, εφαρμογή και διαχείριση, πράγμα που αποτελεί εμπόδιο στην ευρεία εφαρμογή τους. Τα τελευταία χρόνια όμως, η συνεχής έρευνα και οι εξελίξεις στο χώρο της τεχνολογίας έχουν βοηθήσει στη δημιουργία νέων, πιο αποτελεσματικών *in situ* μεθόδων απορρύπανσης και παρατηρείται πλέον μια αλματώδης τάση στην εφαρμογή τους στην απορρύπανση εδαφών και υπόγειων υδάτων.

Για τις περισσότερες μεθόδους απορρύπανσης, δύο είναι τα κύρια προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν. Το πρώτο είναι η διαχείριση του ρυπασμένου μέσου, δηλαδή του εδάφους ή του νερού. Οι *ex situ* μέθοδοι που δεν εφαρμόζονται επί τόπου προαπαιτούν πρόσβαση στο ρυπασμένο μέσο με άντληση ή εκσκαφή, ενώ κάποιες *in situ* μέθοδοι προϋποθέτουν υδραυλικό έλεγχο σε μεγαλύτερο (π.χ. εισπίεση ουσιών για να επιτευχθεί διάσπαση των ρύπων) ή μικρότερο βαθμό (π.χ. παρεμβολή στην κατεύθυνση εξάπλωσης του ρύπου ενός φράγματος μικρής περατότητας το οποίο περιέχει συστατικά κατάλληλα για να αντιδράσει ο ρύπος μέσα σε αυτό και να εξέλθει σε μικρότερη, αποδεκτή συγκέντρωση). Το δεύτερο πρόβλημα είναι η διαχείριση του ρύπου, δηλαδή ο εντοπισμός και εφαρμογή των διεργασιών με τις οποίες ο ρύπος μπορεί να ακινητοποιηθεί, να απομακρυνθεί από το ρυπασμένο μέσο ή να διασπαστεί. (Τζοβόλου Δ., 2001)

3.2.3.1.Επιλογή Μεθόδου απορρύπανσης

Για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου απορρύπανσης επιβάλλεται μελέτη με σκοπό τον καθορισμό της παρουσίας ή της απουσίας της ρύπανσης, αλλά και την αξιολόγηση της έκτασης της. Επίσης, ο έλεγχος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της υπόγειας ρύπανσης.

Οι τρόποι για την αξιολόγηση της ρύπανσης είναι οι εξής:

- Κατασκευή υδρογεωτρήσεων παρακολούθησης της ποιότητας του υπόγειου νερού
- Παρακολούθηση των αερίων του εδάφους
- Δειγματοληψία του εδάφους
- Γεωφυσικές έρευνες

Οι εργαστηριακές μελέτες σε συνδυασμό με τις μεθόδους εντοπισμού της ρύπανσης οδηγούν στην κατανόηση της χημικής φύσης και συμπεριφοράς των ρυπαντών του υπογείου νερού αλλά και στην επιλογή της κατάλληλης μεθόδου απορρύπανσης. Για την σωστή διεκπεραίωση της έρευνας και της απορρύπανσης χρειάζεται κατάλληλος εξοπλισμός.

Ο βασικότερος εξοπλισμός απορρύπανσης είναι:

- Δειγματολήπτες εδάφους
- Δειγματολήπτες υπεδάφους (χειροκίνητοι δειγματολήπτες)
- Γεωτρύπανα δειγματοληψίας.
- Εξοπλισμός κατασκευής υδρογεωτρήσεων (γεωτρύπανα, αντλίες, σωλήνες)
- Δειγματολήπτες νερού από γεωτρήσεις.
- Όργανα εκτέλεσης επί τόπου μετρήσεων και αναλύσεων (πεχάμετρα, αγωγιμόμετρα)

Με την πάροδο των χρόνων και με την εξέλιξη της τεχνολογίας έχουν αναπτυχθεί αρκετοί μέθοδοι απορρύπανσης. Η ταξινόμηση τους πραγματοποιείται με βάση τις εφαρμοζόμενες τεχνολογίες σε:

- Ø **Φυσικές μέθοδοι αφαίρεσης των ρύπων:** η απορρύπανση επιτυγχάνεται με φυσικές διεργασίες.
- Ø **Φυσικές μέθοδοι παγίδευσης των ρύπων:** οι οποίες είτε εγκλωβίζουν, είτε σταθεροποιούν τον ρύπο, επί τόπου με φυσικές διεργασίες.
- Ø **Χημικές και ηλεκτροχημικές μέθοδοι:** με τις οποίες αφαιρείται ή μετασχηματίζεται σε άλλη μορφή ο ρύπος, όπως η δράση ενός διαλύτη ή ενός οξέως ή ενός ηλεκτρολύτη.
- Ø **Θερμικές μέθοδοι:** οι οποίες στηρίζονται στην αρχή της θέρμανσης του ρυπαντή, με αποτέλεσμα να καταστραφεί ή να ακινητοποιηθεί.
- Ø **Βιολογικές μέθοδοι:** οι οποίες στηρίζονται στη δράση και το μεταβολισμό ζώντων οργανισμών (βακτήρια), τα οποία εποίκοδομούν τον ρύπο και μειώνουν την αιτία ρύπανσης.

Υπάρχει άμεση σύνδεση των ρυπασμένων εδαφών και των υπόγειων υδάτων. Η ρύπανση έχει την δυνατότητα να εξαπλώνεται σε όλα τα στρώματα με αποτέλεσμα να ρυπαίνει όχι μόνο το έδαφος αλλά και τον υδροφόρο ορίζοντα. Οι ρύποι έχουν την δυνατότητα να κινηθούν είτε σε οριζόντια είτε σε κατακόρυφη διεύθυνση, με συνέπεια την εξάπλωση τους σε διαφορετικά επίπεδα. Επομένως, η ρύπανση μπορεί να εξαπλωθεί είτε από το έδαφος στα υπόγεια ύδατα είτε το αντίστροφο. Για την αντιμετώπιση της πρέπει να πραγματοποιείται απορρύπανση όλων των στρωμάτων, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο.

Αρα οι μέθοδοι ενεργητικής απορρύπανσης των ταμιευτήρων υπόγειων υδάτων διαχωρίζονται στις μεθόδους απορρύπανσης εδαφών και τις μεθόδους απορρύπανσης υπόγειων υδάτων.

Οι κυριότερες μέθοδοι απορρύπανσης εδαφών είναι:

- Û Βιολογική αποκατάσταση
- Û Έκπλυση του εδάφους με χημικές ουσίες
- Û Εκσκαφή του εδάφους
- Û Θερμική επεξεργασία με απλή θέρμανση, καύση ή επεξεργασία με ατμό
- Û Χημική επεξεργασία
- Û Απορρύπανση με εφαρμογή υποπίεσης ή απλού αερισμού
- Û Εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων
- Û

Οι κυριότερες μέθοδοι απορρύπανσης υπογείων υδάτων είναι:

- Û Βιολογική αποκατάσταση
- Û Άντληση διαλυμένων ρύπων
- Û Άντληση επιπλεόντων ρύπων
- Û Τεχνολογία απορρύπανση με εφαρμογή υποπίεσης
- Û Τεχνολογία απορρύπανση από βαρέα μέταλλα
- Û Απονίτρωση υπόγειων υδάτων
- Û Υπέρθερμος ατμός
- Û Τεχνολογία πλύματος

3.2.4. Διάνοιξη υδραυλικών ρωγμών

Η διάνοιξη υδραυλικών ρωγμών είναι μια τεχνική που μέσω μιας φυσικής διαδικασίας άσκησης πίεσης οδηγεί στη δημιουργία ρωγμών και κατά συνέπεια καναλιών ροής ενός ρευστού στο υπέδαφος. Οι ρωγμές που δημιουργούνται έχουν κοινώς τη μορφή φύλλου που το μήκος τους μπορεί να φθάσει τα 20 m και το πάχος τους τα 1-20 mm ανάλογα με το είδος του εγγεόμενου ρευστού. Από έρευνες που έχουν γίνει στη Β. Αμερική έχει αποδειχθεί ότι οι ρωγμές που δημιουργούνται σε λεπτόκοκκα ρυπασμένα εδάφη αυξάνουν το ρυθμό ροής των ρευστών από και προς τα φρεάτια κατά 1 ή 2 τάξεις μεγέθους. Επίσης, η διάνοιξη υδραυλικών ρωγμών φαίνεται να είναι μια τεχνική που μπορεί να παρέχει τη δυνατότητα σημαντικής αύξησης της αποτελεσματικότητας των μεθόδων απορρύπανσης που εφαρμόζονται σε εδάφη με χαμηλή διαπερατότητα και απαιτούν μεταφορά ρευστού στο υπέδαφος.

Ανάλογα με το μέσο που χρησιμοποιείται για τη διάνοιξη των ρωγμών έχουμε την υδραυλική (hydraulic) και την πνευματική (pneumatic) ρωγμάτωση. Η πνευματική διάνοιξη ρωγμών περιλαμβάνει την έγχυση αέρα σε έναν γεωλογικό σχηματισμό με πίεση που ξεπερνάει τη φυσική επιτόπια τάση και με ροή που ξεπερνάει τη διαπερατότητα του σχηματισμού (μέσου). Αυτή η διαδικασία προκαλεί επιτόπια κατάρρευση του υπεδάφους και σχηματισμό ακτινωτού δικτύου ρωγμών που ξεκινάει από το σημείο έγχυσης και δημιουργεί ένα δίκτυο ρωγμών ακτινικά από το σημείο έγχυσης. Όταν σταθεροποιηθούν οι σχηματιζόμενες ρωγμές, αυξάνεται η ροή του αέρα και των ατμών διαμέσου των σχηματισθέντων ρωγμών και έτσι ο ρύπος καθίσταται πιο προσεγγίσιμος.

Παρομοίως, στην υδραυλική διάνοιξη ρωγμών, ένα υγρό μίγμα που συνήθως περιέχει άμμο και πολυμερές υλικό εγχέεται στο φρεάτιο μέχρι να επιτευχθεί μια κρίσιμη πίεση και να δημιουργηθούν ρωγμές στο υπέδαφος. Η άμμος που εγχέεται με τη μορφή λάσπης λειτουργεί ως υποστηρικτικό μέσο και διατηρεί ανοικτή τη ρωγμή. Τα φρεάτια εισαγωγής της λάσπης μπορεί να είναι κάθετα οριζόντια ή πλάγια στο έδαφος.

Η διάνοιξη ρωγμών με πίεση αέρα είναι σχετικά απλή διαδικασία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά. Παρόλα αυτά, οι ρωγμές δεν διατηρούνται εύκολα ανοικτές και μερικές φορές μπορεί να κλείσουν, οπότε και απαιτείται επανάληψη της διαδικασίας. Από την άλλη μεριά, η διάνοιξη ρωγμών με πίεση υγρού είναι πιο πολύπλοκη ως διαδικασία αλλά παρέχει ένα πιο σταθερό δίκτυο ανοικτών ρωγμών. Επιπλέον, η διάνοιξη ρωγμών με πίεση υγρού μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά και στην παθητική απορρύπανση μιας και μέσω των σταθερών ρωγμών που δημιουργούνται μπορούν να διαβιβαστούν διάφορα υλικά όπως π.χ. θρεπτικά συστατικά, χημικές ουσίες κ.ά. (Τζοβόλου Δ.,2001)

3.2.4.1. Διάνοιξη υδραυλικών ρωγμών με πίεση υγρού

Η διάνοιξη ρωγμών με πίεση υγρού χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία πετρελαίου προκειμένου να αυξήσει την παραγωγή αργού πετρελαίου από ταμειυτήρες χαμηλής διαπερατότητας. Πρόσφατα η τεχνολογία διάνοιξης υδραυλικών ρωγμών έχει χρησιμοποιηθεί για την εκμετάλλευση του φυσικού αερίου σχιστολίθων (shale gas). Μελετητές χρησιμοποίησαν υδραυλικές ρωγμές για να αυξήσουν την απόδοση κάποιων μεθόδων απορρύπανσης όπως της εξαναγκασμένης εξαγωγής ατμών υπεδάφους (soil vapour extraction, SVE), της βιοαποικοδόμησης και της άντλησης και επεξεργασίας (pump and treat). Μέσα από πολυετή σειρά εφαρμογών είναι πλέον κοινώς αποδεκτό ότι η διάνοιξη ρωγμών με πίεση υγρού αποτελεί μια ιδιαίτερα αποτελεσματική τεχνική στην αύξηση της απόδοσης μεθόδων απορρύπανσης που εφαρμόζονται σε εδάφη με χαμηλή διαπερατότητα.

Περιγραφή υδραυλικών ρωγμών με πίεση υγρού

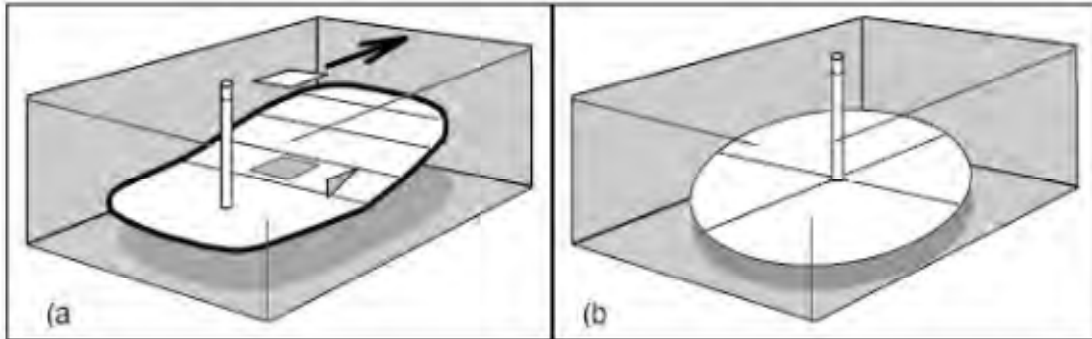
Οι υδραυλικές ρωγμές με πίεση υγρού δημιουργούνται με τη διοχέτευση παχύρευστης λάσπης σε ένα φρεάτιο. Η λάσπη περιέχει ένα εναιώρημα στερεού κοκκώδους υλικού οποιουδήποτε τύπου, όπως άμμου, γραφίτη, ή μπετονίτη (bentonite), σε ένα υγρό όπως, guar gum, διάλυμα θρεπτικών συστατικών ή υπεροξειδίων. Όταν επιτευχθεί μια κρίσιμη πίεση, δημιουργείται ένας πυρήνας ρωγμής στο περιβάλλον έδαφος. Η λάσπη τότε εγχέεται καθώς η ρωγμή επεκτείνεται μακριά από το φρεάτιο.

Μέσα σε 24 ώρες από τη δημιουργία των ρωγμών, ειδικά ένζυμα που είχαν αρχικά προστεθεί στη λάσπη, αποικοδομούν το υγρό τμήμα (συνήθως πολυμερές υλικό) με αποτέλεσμα να παραμένει στο υπέδαφος μόνο το κοκκώδες υλικό. Ανάλογα με το είδος της λάσπης που εγχέεται, οι ρωγμές που θα δημιουργηθούν θα παρέχουν μονοπάτια υψηλής διαπερατότητας στη μεταφορά ρευστών στο υπέδαφος προκειμένου να ενισχύσουν συγκεκριμένες διεργασίες. Για παράδειγμα, όταν παρέχονται χημικές ουσίες ενισχύεται η διάσπαση του ρύπου σε φιλικά προς το περιβάλλον τελικά προϊόντα ενώ όταν παρέχεται αέρας ή θρεπτικά συστατικά ενισχύεται η βιοαποικοδόμηση του ρύπου. Η υδραυλική ρωγμή που σχηματίζεται είναι συνήθως ένας επίπεδος ελαφρά κεκλιμένος δίσκος.

Γενικώς, ο όγκος της εγχεόμενης λάσπης καθορίζει και το μέγεθος της ρωγμής. Για παράδειγμα, αν διαβιβασθούν 0.3 m³ λάσπης σε βάθος 3 m τότε η ρωγμή που τυπικά δημιουργείται θα έχει μήκος γύρω στα 8 m και άνοιγμα (aperture) 1-2 cm. Η πίεση της εγχεόμενης λάσπης στην αρχή της ανάπτυξης των ρωγμών που δημιουργούνται σε πολύ μεγάλο βάθος, αυξάνεται από 250 kPa σε 350 kPa. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης η πίεση συνήθως πέφτει κάτω από 100 kPa. Σε βάθη παραπάνω από λίγα μέτρα, οι πιέσεις έγχυσης αυξάνονται από 15-20 kPa/m .

Σε πολλές εφαρμογές απαιτείται η δημιουργία πολλών ρωγμών σε διαφορετικά βάθη. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με την επανάληψη της διαδικασίας σε κάθε βάθος ξεχωριστά είτε με ταυτόχρονη δημιουργία πυρήνων ρωγμών σε διαφορετικά βάθη.

Τέλος, η μορφή των υδραυλικών ρωγμών καθώς και η ακριβής διεύθυνση ανάπτυξής τους εξαρτάται από τα γεωλογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους, τις μηχανικές του ιδιότητες καθώς και από τη μέθοδο δημιουργίας τους. (Τζοβόλου Δ.,2001)



Σχήμα 3.1: Τυπικό σχήμα υδραυλικής ρωγμής που προκύπτει από μετρήσεις πεδίου. Το βέλος δείχνει τη φορά επέκτασης ενώ το τρίγωνο τη γωνία κλίσης, (β) Ιδανική μορφή υδραυλικών ρωγμών. (Τζοβόλου Δ.,2001)

Μέθοδος σχηματισμού οριζόντιων υδραυλικών ρωγμών με πίεση υγρού

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι δημιουργίας οριζόντιων υδραυλικών ρωγμών με πίεση υγρού. Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου έχει να κάνει τόσο με τα χαρακτηριστικά του εδάφους όσο και με το ζητούμενο βάθος των ρωγμών, τη μέθοδο απορρύπανσης που θα εφαρμοστεί, το κόστος, τα τυχόν υπάρχοντα εμπόδια στο υπέδαφος όπως π.χ. φρεάτια, κ.ά.

Παρότι λοιπόν δεν μπορεί να γίνει ακριβής περιγραφή του τρόπου σχηματισμού οριζόντιων υδραυλικών ρωγμών με πίεση υγρού για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, υπάρχουν κάποια συγκεκριμένα βήματα που ακολουθούνται σε όλες τις μεθόδους και αναφέρονται στη συνέχεια:

α) Εισαγωγή περιβλήματος: Ένα ατσαλένιο περίβλημα με εσωτερική ράβδο βυθίζεται, είτε με σφυρηλάτηση είτε με απευθείας πίεση, στο επιθυμητό βάθος του εδάφους. Η μια τους άκρη είναι κωνική και λογχοειδής ενώ στην άλλη άκρη υπάρχει μια κεφαλή οδηγός που συγκρατεί το περίβλημα και τη ράβδο μαζί. Πριν την εισαγωγή του περιβλήματος, μπορεί για διευκόλυνση να εκσκαφεί μια τρύπα μερικά μέτρα πάνω από την επιθυμητή ζώνη δημιουργίας της ρωγμής και κατόπιν να γίνει η εισαγωγή του.

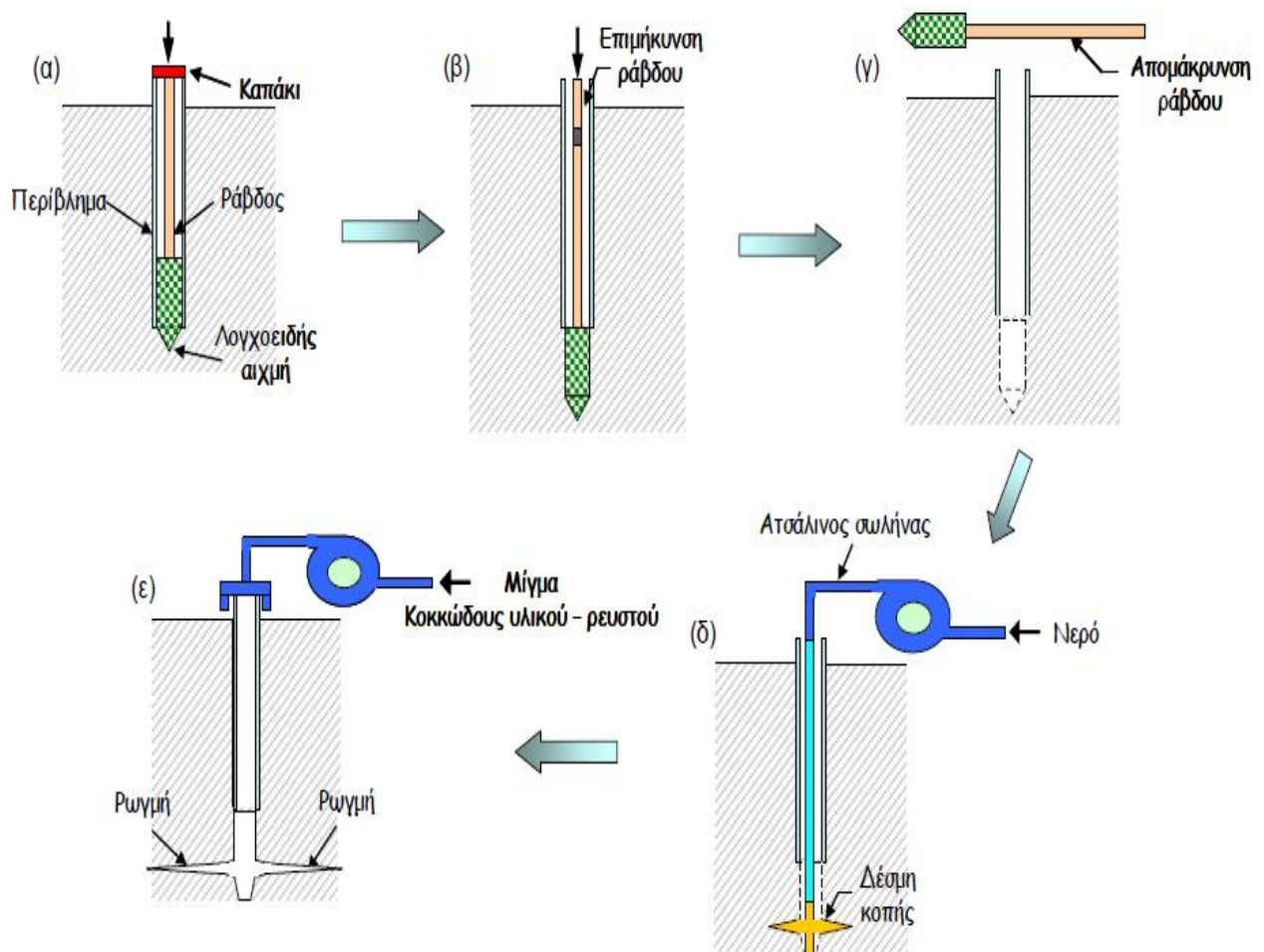
β) Έκθεση φρεατίου: Γίνεται κατακόρυφη μετακίνηση της κεφαλής οδηγού για μερικά εκατοστά ώστε να εκτεθεί ένα κυλινδρικό τμήμα του εδάφους.

γ) Δημιουργία εγκοπής στο φρεάτιο: Μια δέσμη νερού υψηλής ενέργειας εισάγεται στον πυθμένα, στο σημείο που βρίσκεται εκτεθειμένο το κυλινδρικό τοίχωμα του εδάφους. Με οριζόντια περιστροφική κίνηση της δέσμης νερού υψηλής ενέργειας, δημιουργείται μια δισκοειδής εγκοπή. Αυτή η εγκοπή αποτελεί τη βάση για τη δημιουργία πυρήνα ρωγμής.

δ) Δημιουργία πυρήνα ρωγμής: Με εφαρμογή πίεσης στο φρεάτιο και στην εγκοπή δημιουργείται ένας πυρήνας ρωγμής. Η δισκοειδής μορφή της εγκοπής εστιάζει την πίεση κατά μήκος της περιφέρειάς της οπότε και η ρωγμή δημιουργείται κατά μήκος αυτής.

ε) Ανάπτυξη ρωγμής: Η ανάπτυξη της ρωγμής στο επιθυμητό μέγεθος γίνεται με την έγχυση της λάσπης ή κοκκώδους υλικού σε ένα κατάλληλο φέρον ρευστό. Τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του φέροντος ρευστού είναι τέτοια ώστε να είναι εφικτή η αιώρηση στερεών σωματιδίων υψηλής συγκέντρωσης ενώ ταυτόχρονα να μπορεί να ρέει ομαλά όταν αντλείται.

Το ρευστό και τα στερεά σωματίδια αναμιγνύονται πριν την εφαρμογή πίεσης. Γενικώς, αντλίες θετικής μετατόπισης βρίσκουν καλύτερη εφαρμογή σε κοκκώδη λάσπη και έτσι η ανάπτυξη της ρωγμής διεξάγεται συνήθως με σταθερό ογκομετρικό ρυθμό. (Τζοβόλου Δ., 2011)



Εικόνα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση των βασικών σταδίων δημιουργίας υδραυλικών ρωγμών με πίεση υγρού. (Τζοβόλου Δ., 2011)

3.2.5. Περιγραφή μεθόδων απορρύπανσης

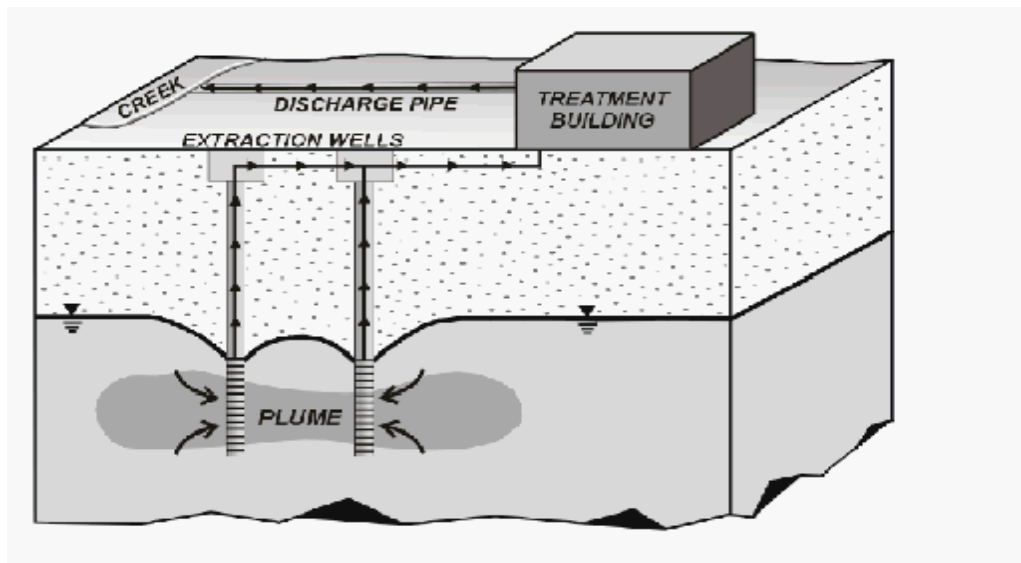
Ø Απορρύπανση με άντληση επιπλέοντων ρύπων (dual pump free product recovery)

Οι ρύποι οι οποίοι είναι ελαφρύτεροι από το νερό έχουν την δυνατότητα να επιπλέουν στην επιφάνεια του χωρίς να αναμειγνύονται με συνέπεια ο διαχωρισμός τους να είναι ευκολότερος. Το σύστημα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απορρύπανση των επιπλέοντων ρυπαντών είναι της διπλής άντλησης του ρυπαντή (dual pump free product recovery).

Η εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιείται ως εξής, αρχικά γίνεται άντληση του υπόγειου νερού και στην συνέχεια ο ρυπαντής κινείται προς την γεώτρηση και αυτό οφείλεται στην υδραυλική κλίση του συστήματος. Όταν το νερό φτάσει στην γεώτρηση γίνεται άντληση με δεύτερη αντλία. Στόχος της μεθόδου είναι η απομάκρυνση των ρύπων και η διαφύλαξη του υδροφορέα σε όλο το πάχος του από την ρύπανση.

Οι βασικότεροι ρύποι που ανήκουν στην κατηγορία των ελαφριών πετρελαιοειδών είναι το πετρέλαιο, η βενζίνη και η κηροζίνη ονομάζονται LNAPLs (Light Non-Aqueous Phase Liquids). Στην περίπτωση που τα πετρελαιοειδή διαφεύγουν στο έδαφος κατακρατούνται στους πόρους του εντός της μερικής κορεσμένης ζώνης και αυτό οφείλεται στην εμφάνιση τριχοειδών δυνάμεων. Στην περίπτωση που τα πετρελαιοειδή βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες τότε το έδαφος αδυνατεί να τους συγκρατήσει με αποτέλεσμα να εισέρχονται στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα και να συγκεντρώνονται στην επιφάνεια του. Το μικρό τους βάρος τα βοηθά να επιπλέουν στο νερό με αποτέλεσμα να ενώνονται και να δημιουργούν κηλίδες.

Οι κηλίδες που δημιουργούνται διαχέονται σε οριζόντια κατεύθυνση και με το πέρασμα του χρόνου υπάρχει δυνατότητα να επεκταθεί σε μεγάλη απόσταση από το αρχικό σημείο διαρροής. Οι κηλίδες ακολουθούν την διακύμανση της στάθμης του υπογείου ορίζοντα της στάθμης επηρεαζόμενες από τις εποχιακές μεταβολές και ρυπαίνοντας την μερική κορεσμένη ζώνη του εδάφους καθ' ύψος σε μεγάλη απόσταση από την πηγή της ρύπανσης. Τέτοιου τύπου ρύπανση παρατηρείται συνήθως είτε σε περιοχές διυλιστηρίων είτε σε βιομηχανικές. (Καββαδάς Μ., Πανταζίδου Μ., 2007)



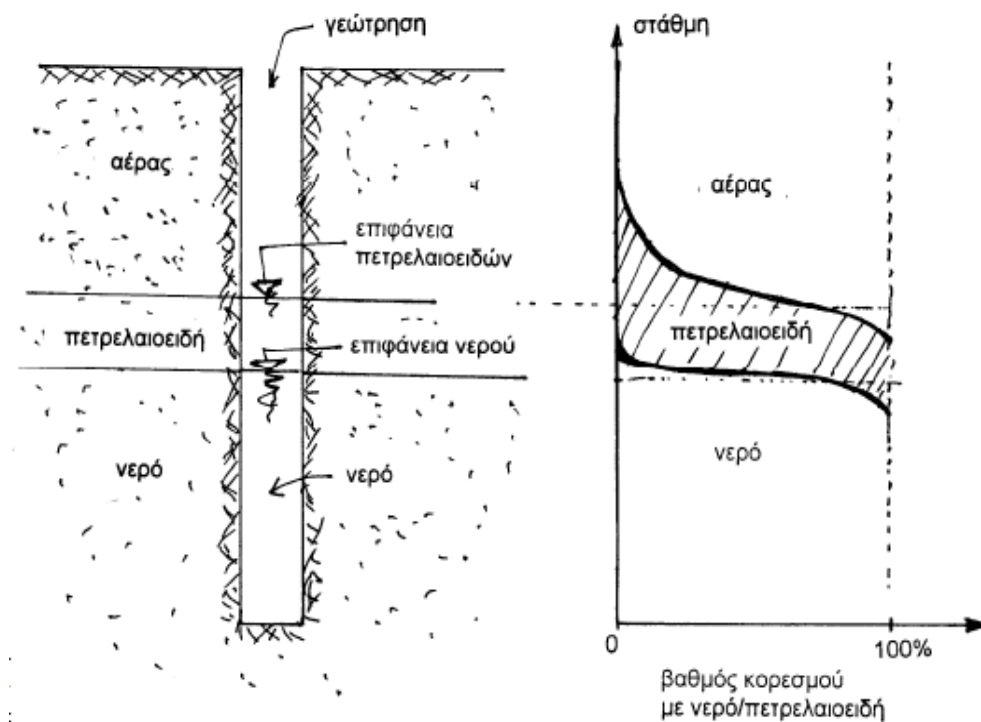
Σχήμα 3.2: Σχηματισμός κηλίδας από ελαφριά πετρελαιοειδή σε υπόγειο ταμιευτήρα νερού.

Για την διαπίστωση της έκτασης της ρύπανσης από επιπλέοντα πετρελαιοειδή χρησιμοποιούνται γεωτρήσεις. Οι γεωτρήσεις έχουν την δυνατότητα να φτάσουν στην στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και να πάρουν τα απαιτούμενα δείγματα για τις έρευνες. Τα δείγματα που λαμβάνονται προσδιορίζουν την υπάρχουσα περιεκτικότητα των πετρελαιοειδών στα ύδατα και γίνεται χρήση χημικών μεθόδων όπως η πύρωση. Με την πάροδο του χρόνου συγκεντρώνονται επιπλέοντα πετρελαιοειδή μέσα στη γεώτρηση.

Για να αποκατασταθούν οι συνθήκες υδροστατικής ισορροπίας θα πρέπει το πάχος της στρώσης των υδρογονανθράκων στην επιφάνεια του νερού να ισούται πρακτικά με το πάχος της πλήρως κορεσμένης με πετρελαιοειδή στοιβάδας εντός του εδάφους. Πάνω από τη ζώνη του εδάφους που είναι κορεσμένη με πετρελαιοειδή, υπάρχει μια μερικώς κορεσμένη ζώνη, όπου στους πόρους του εδάφους συγκρατείται πετρέλαιο, αυτό οφείλεται στις τριχοειδείς δυνάμεις και στην πρόσφυση των υδρογονανθράκων στην επιφάνεια των εδαφικών κόκκων.

Για τον υπολογισμό του όγκου της κηλίδας των πετρελαιοειδών αρκεί να πολλαπλασιάσουμε το πάχος της επί την επιφάνεια της κηλίδας, Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το πάχος της μετράται στο εσωτερικό της γεώτρησης και η επιφάνεια συνυπολογίζει το άθροισμα των γεωτρήσεων που έχουν δημιουργηθεί στην περιοχή που έχει ρυπανθεί.

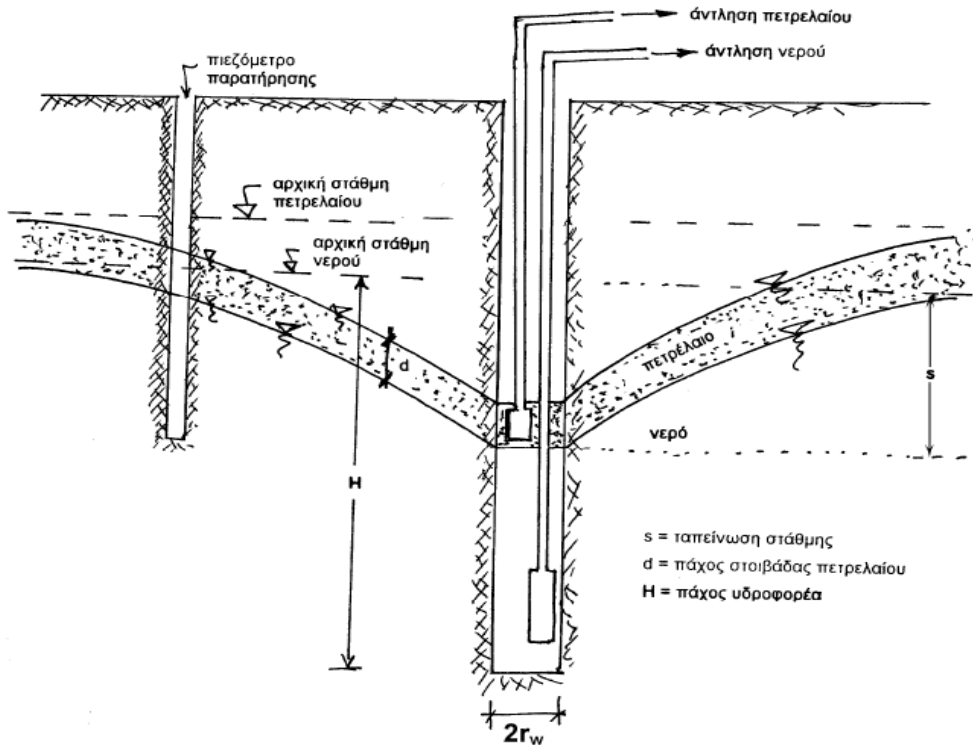
Με την μέθοδο της άντλησης επιπλεόντων ρύπων αντλείται το νερό από τον ταμιευτήρα με την βοήθεια γεώτρησης, με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένας κώνος ταπείνωσης της στάθμης του. Οι ρύποι που επιπλέον κινούνται προς την γεώτρηση ακολουθώντας την υδραυλική κλίση και στην συνέχεια αντλούνται με μία δεύτερη αντλία. Οι δύο αντλίες καθορίζουν την απόδοση της μεθόδου διότι εξαρτάται από την παροχή τους.



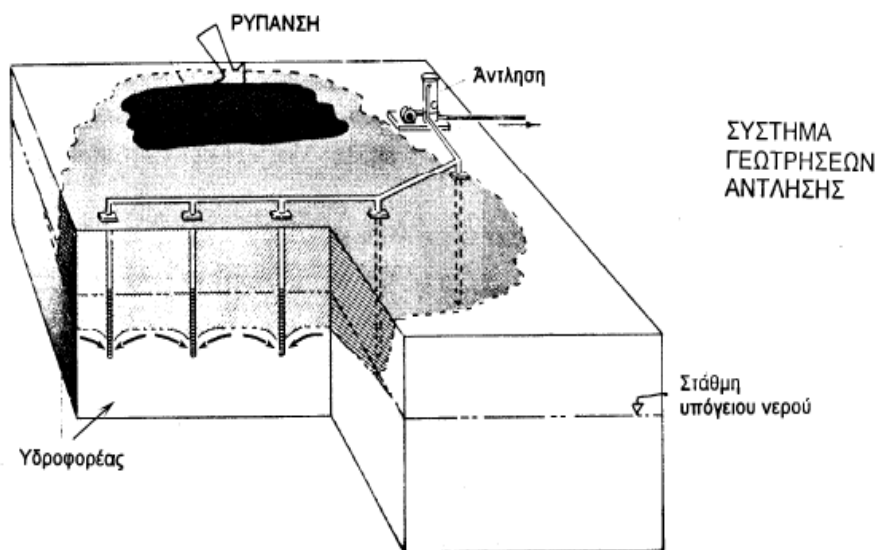
Σχήμα 3.3: Ρύπανση του υπόγειου ορίζοντα με επιπλέοντα πετρελαιοειδή (LNAPLs). (Καβαδάς Μ., Πανταζίδου Μ., 2007)

Μια αρχική εκτίμηση είναι ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ταπείνωση της στάθμης του υδροφορέα, τόσο αυξάνει η παροχή άντλησης του επιπλεόντος ρύπου και συνεπώς αυξάνει η απόδοση της μεθόδου. Όμως, θα πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι αυξάνοντας την ταπείνωση της

στάθμης του ταμιευτήρα, τα επιπλέοντα πετρελαιοειδή ρυπαίνουν τον ταμιευτήρα καθ' ύψος σε όλη την έκταση του κώνου ταπείνωσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ποσότητας του ρύπου που συγκρατείται στους πόρους του ταμιευτήρα, χωρίς να μπορεί να ανακτηθεί με τη μέθοδο της άντλησης και να απαιτεί τη χρήση άλλων μεθόδων, όπως η εφαρμογή υποπίεσης, η θέρμανσης. (Καββαδάς Μ., Πανταζίδου Μ., 2007)



Σχήμα 3.4.(α): Τομή μεθόδου διπλής άντλησης για απορρύπανση από επιπλέοντες ρύπους. (Καββαδάς Μ., Πανταζίδου Μ., 2007)



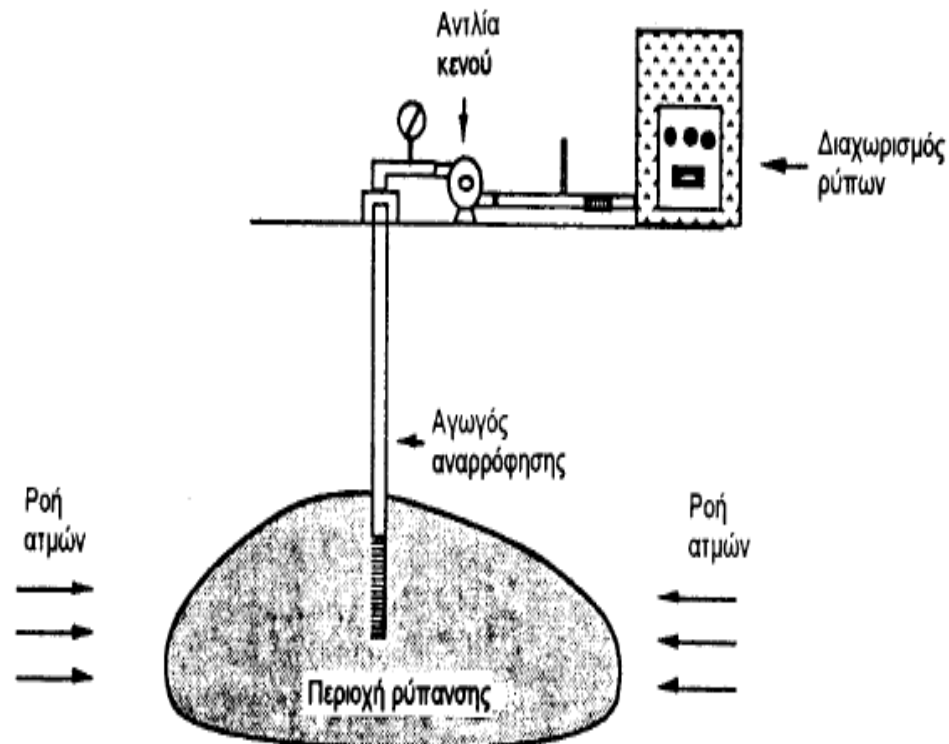
Σχήμα 3.4.(β): Μέθοδος διπλής άντλησης για απορρύπανση από επιπλέοντες ρύπους. (Καββαδάς Μ., Πανταζίδου Μ., 2007)

Συμπέρασμα των ανωτέρων είναι ότι η ρύθμιση της ταπείνωσης της στάθμης του ταμιευτήρα θα πρέπει να γίνεται με προσοχή. Δηλαδή, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι πιθανές συνέπειες λόγω της υποχώρησης της επιφάνειας του εδάφους. Η υποχώρηση αυτή οφείλεται στη μεταβολή των ενεργών τάσεων και μπορεί να εκτιμηθεί με τις συνήθεις μεθόδους της Εδαφομηχανικής.

Η αντλούμενη παροχή του επιπλέοντος ρύπου απαιτεί προσεκτική ρύθμιση για μια συγκεκριμένη ταπείνωση της στάθμης του ταμιευτήρα. Η απόδοση της μεθόδου μειώνεται όταν η αντλούμενη παροχή του ρύπου είναι πολύ μικρή. Στην περίπτωση που η αντλούμενη παροχή του ρύπου είναι πολύ μεγάλη, τότε η ανώτερη αντλία θα αρχίσει να παράγει μίγμα πετρελαίου με νερό, τα οποία θα πρέπει να διαχωριστούν αυξάνοντας το κόστος λειτουργίας της μεθόδου. (Καββαδάς Μ., Πανταζίδου Μ., 2007)

Ø Απορρύπανση με εφαρμογή υποπίεσης (vacuum extraction) ή απλού αερισμού (soil venting).

Η απορρύπανση με εφαρμογή υποπίεσης (vacuum extraction) ονομάζεται και μέθοδος απλού αερισμού (soil venting). Η μέθοδος αυτή θεωρείται κατάλληλη για την απορρύπανση της μερικώς κορεσμένης ζώνης εδαφών από πτητικούς υδρογονάνθρακες, όπως είναι τα ελαφρά πετρελαιοειδή. Αν και είναι πρόσφατη, οι πειραματικές μελέτες την θεωρούν ως την πιο κατάλληλη για την απορρύπανση των εδαφών. Στην μέθοδο αυτή πραγματοποιείται διάνοιξη γεωτρήσεων εντός της μερικώς κορεσμένης ζώνης και στην εφαρμογή αναρρόφησης (υποπίεσης). Στόχος της εφαρμογής είναι η εξάτμιση των πτητικών υδρογονανθράκων και η περισυλλογή τους με τον αναρροφούμενο αέρα.



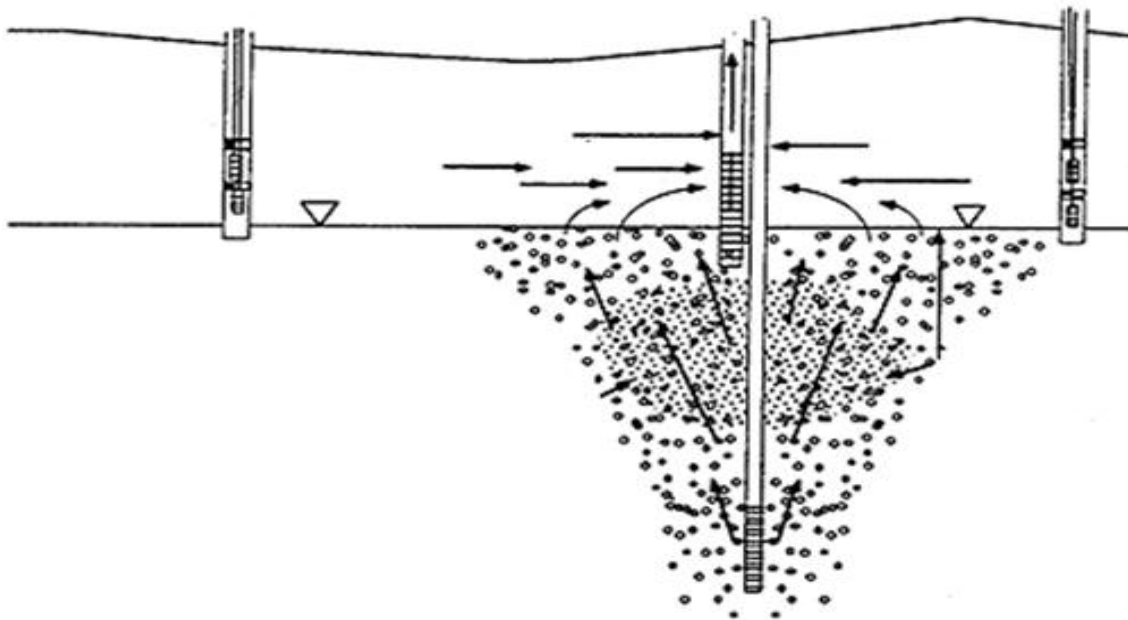
Σχήμα 3.5: Σύστημα απορρύπανσης εδαφών με εφαρμογή υποπίεσης.
(Καββαδάς Μ., Πανταζίδου Μ., 2007)

Η μέθοδος θεωρείται κατάλληλη για χονδρόκοκα εδάφη με $k > 10^{-4}$ cm/sec. Ο λόγος που η μέθοδος δεν είναι αποδοτική σε λεπτόκοκα εδάφη είναι επειδή έχουν μικρή αγωγιμότητα και η εφαρμογή δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μεγάλες ζώνες γύρω από τις γεωτρήσεις. Επιπλέον, η μέθοδος της υποπίεσης χρησιμοποιείται με ιδιαίτερη επιτυχία για την απορρύπανση υπόγειων υδροφορέων που είναι ρυπασμένοι από ελαφριά επιπλέοντα πετρελαιοειδή.

Η εφαρμογή της βασίζεται στην εξάτμιση των πτητικών πετρελαιοειδών τα οποία επιπλέον στην επιφάνεια των υπογείων νερών και στην συνέχεια συλλέγονται μαζί με τον αναρροφούμενο αέρα. Η ανάκτηση των ελαφρών πετρελαιοειδών από την επιφάνεια υπόγειων υδροφορέων, μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με την μέθοδο διπλής άντλησης είτε με την μέθοδο υποπίεσης.

Οι εφαρμογές που έχουν πραγματοποιηθεί έχουν καταλήξει σε κάποια συμπεράσματα, οδηγώντας την δεύτερη μέθοδο να πλεονεκτεί στην ταχύτητα απορρύπανσης με τον μικρότερο χρόνο αλλά και στο χαμηλότερο κόστος για την διεκπεραίωση της. Επίσης, έχει την δυνατότητα να απορρυπάνει ταυτόχρονα τη μερικώς κορεσμένη ζώνη και τους επιπλέοντες υδρογονάνθρακες, σε αντίθεση με την μέθοδο της διπλής άντλησης που περιορίζεται στην ανάκτηση των υδρογονανθράκων που επιπλέον στο υπόγειο νερό.

Ωστόσο, η εφαρμογή της υποπίεσης παρουσιάζει ένα βασικό μειονέκτημα το οποίο είναι η ανάγκη της απομόνωσης της μερικώς κορεσμένης ζώνης του εδάφους από τον ατμοσφαιρικό αέρα, για να είναι αποδοτική η εφαρμογή της. Αυτό συμβαίνει διότι, η προσωρινή κάλυψη της επιφάνειας του εδάφους γίνεται με συνθετική μεμβράνη, όμως οι χώροι είναι ήδη καλυμμένοι επιφανειακά είτε με ασφαλτοτάπητα είτε με κτίρια με αποτέλεσμα η απαίτηση αυτή δεν ισχύει. (Καββαδάς Μ., Πανταζίδου Μ., 2007)



Σχήμα 3.6: Τυπική διάταξη εφαρμογής απορρύπανσης με υποπίεσης.

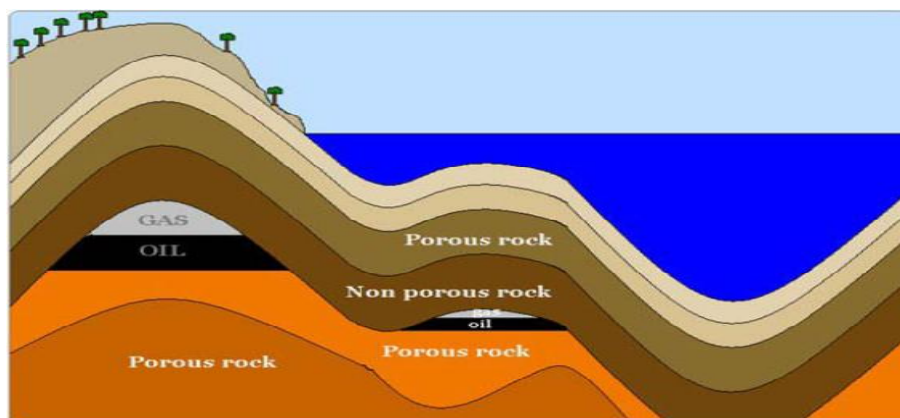
3.3.ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στην διφασική ροή των πορωδών μέσων, με συνέπεια να ασχοληθεί αποκλειστικά με την ροή υγρού - υγρού που συμβαίνει κατά τη ροή δύο μη αναμίξιμων ρευστών, όπως για παράδειγμα την ταυτόχρονη ροή νερού-πετρελαίου. Επιπλέον, η ενασχόληση της εργασίας με μόνο μία κατηγορία των πορωδών μέσων δηλαδή τα πετρελαιοφόρα πετρώματα γίνεται για την μεγάλη σημασία του πετρελαίου στις μέρες μας. Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι με την βοήθεια των γεωτρήσεων (οι οποίες πάντα περιλαμβάνουν διφασική ροή και κάποιες φορές τριφασική ροή) πραγματοποιείται η παραγωγή πετρελαίου.

3.3.1. Προέλευση πετρελαίου

Υπάρχουν διαφορές θεωρίες για την δημιουργία του πετρελαίου, αρκετές από αυτές είναι αλληλοσυγκρουόμενες. Αρχικά οι χημικοί και οι γεωλόγοι ερευνητές έκαναν λόγο ότι ο σχηματισμός πετρελαίου ήταν από ανθρακομεταλλικές ενώσεις, τα λεγόμενα καρβίδια όπως από το ανθρακαργίλιο που σχηματίζει μεθάνιο, από το ανθρακοασβέστιο που σχηματίζει το ακετυλένιο, και από άλλα καρβίδια τα οποία είναι κατώτεροι υδρογονάνθρακες όπως αυτοί που απαντώνται στο πετρέλαιο. Αυτή η θεωρία ανάγει την δημιουργία πετρελαίου από ανόργανες πρώτες ύλες, ωστόσο με το πέρασμα των χρόνων η θεωρία αυτή έχει εγκαταλειφθεί. Μία δεύτερη θεωρία υποστηρίζει ότι η δημιουργία πετρελαίου οφείλεται σε φυτικές και ζωικές πρώτες ύλες. Η θεωρία αυτή γίνεται ιδιαίτερα αποδεκτή για δύο ισχυρούς λόγους, αρχικά παρατηρείται παρουσία αζωτούχων ενώσεων και στη συνέχεια παρουσιάζεται οπτική στροφική ικανότητα ορισμένων πετρελαίων.

Ο γεωλόγος Ποτονιέ ήταν ο πρώτος που κάνει λόγο και δέχεται ότι το πετρέλαιο είναι προϊόν αποσύνθεσης ζωικών και φυτικών οργανισμών που εγκλείστηκαν μέσα στα πετρώματα σε μεγάλο βάθος στη Γη. Επιπλέον, χημικοί και γεωλόγοι υποστηρίζουν ότι οι οργανισμοί ήταν κυρίως θαλάσσιοι και ανάλογοι με εκείνους που αποτελούν το πλαγκτόν. Τα λείψανα αυτών των οργανισμών παρασύρθηκαν από θαλάσσια ρεύματα και ανέμους και συγκεντρώθηκαν κατά μεγάλες ποσότητες στους πυθμένες θαλασσίων λεκανών. Στην συνέχεια επικράτησαν κάποιες αναστατώσεις στην επιφάνεια της Γής με συνέπεια οι λεκάνες να αποκλεισθούν και να καταχωθούν. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ο αποκλεισμένος του οργανικού υλικού και η αποσύνθεση του υπό την επίδραση αναεροβίων βακτηρίων, το πετρέλαιο.



Σχήμα 3.7: Σχηματισμός πετρελαίου.
(Αλεξόπουλος Α., 2013)

Η θεωρία αυτή βασίστηκε στο γεγονός ότι σε διάφορα πετρέλαια ίχνη χλωροφύλλης και αμύνης. Η ύπαρξη των ενώσεων αυτών αποδεικνύει τη φυτική και ζωική προέλευση καθώς επίσης και ότι η δημιουργία αυτή έγινε κάτω από ήπια βιολογική δράση, δεδομένου ότι οι ενώσεις αυτές αποσυντίθενται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 250 βαθμών. Η θεωρία αυτή ενισχύεται ακόμη περισσότερο και από το γεγονός ότι τα πετρέλαια σήμερα εντοπίζονται πάντα σε τυπικά ιζηματογενή πετρώματα, ενώ στη βάση των πετρελαϊκών κοιτασμάτων ανευρίσκεται συνήθως αλμυρό νερό.

Τα διάφορα στάδια δημιουργίας πετρελαίου είναι τα εξής:

Ø *Ανώριμο στάδιο* (διαγένεση):

Στο στάδιο αυτό σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και πίεση καθώς επίσης και με τη βοήθεια βακτηριακής δράσης δημιουργείται το κηρογόνο (kerogen) και το βιογενές μεθάνιο (biogenic methane), το οποίο συμμετέχει περίπου κατά 20% στα παγκόσμια αποθέματα μεθανίου. Το κηρογόνο συνίσταται από άνθρακα (69-80%), υδρογόνο (7-11%), άζωτο (1,25-2,5%), θείο (1-8%) και οξυγόνο (9-17%).

Ø *Ωριμο στάδιο:*

Σε μεγαλύτερα βάθη, υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις και κάτω από την προϋπόθεση της απομάκρυνσης του οξυγόνου και του αζώτου με κάποιο μηχανισμό το κηρογόνο μετατράπηκε σε αργό πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Το αρχικό υγρό ήταν μίγμα πετρελαίου και νερού, το οποίο με το χρόνο διαχωρίστηκε για να δημιουργηθούν τα κοιτάσματα πετρελαίου.

Ø *Μετα-ώριμο στάδιο:*

Σε ιδιαίτερα υψηλή θερμοκρασία το αργό πετρέλαιο μετατράπηκε σε φυσικό αέριο πλούσιο σε μεθάνιο. Επειδή, το πετρέλαιο είναι ρευστό, έχει την δυνατότητα να μετακινηθεί μέσα στο υπέδαφος καθώς σχηματίζεται.

Για τον σχηματισμό μεγάλων αποθεμάτων πετρελαίου απαραίτητη προϋπόθεση είναι η παρουσία συγκεκριμένων γεωλογικών σχηματισμών:

• Ενός ταμιευτήρα (ή λίμνης - oilpool, reservoir) πετρελαίου

• Ένα πέτρωμα- κάλυμμα (παγίδα - oiltrap, caprock) του πετρελαίου.

Ένας ταμιευτήρας πετρελαίου χαρακτηρίζεται από υψηλό πορώδες (3-30%) και ικανή διαπερατότητα. Στην ουσία ένας ταμιευτήρας πετρελαίου είναι μια συλλογή σταγόνων πετρελαίου σε ένα πορώδες ή σε ένα αμμώδες πέτρωμα. Έχει παρατηρηθεί ότι οι υδρογονάνθρακες συσσωρεύονται κυρίως σε πορώδη ψαμμιτικά ή ασβεστολιθικά πετρώματα. Ωστόσο, ένα πέτρωμα – κάλυμμα πετρελαίου είναι ο σχηματισμός μη πορώδους πετρώματος που συγκρατεί στη θέση του το πετρέλαιο του ταμιευτήρα.

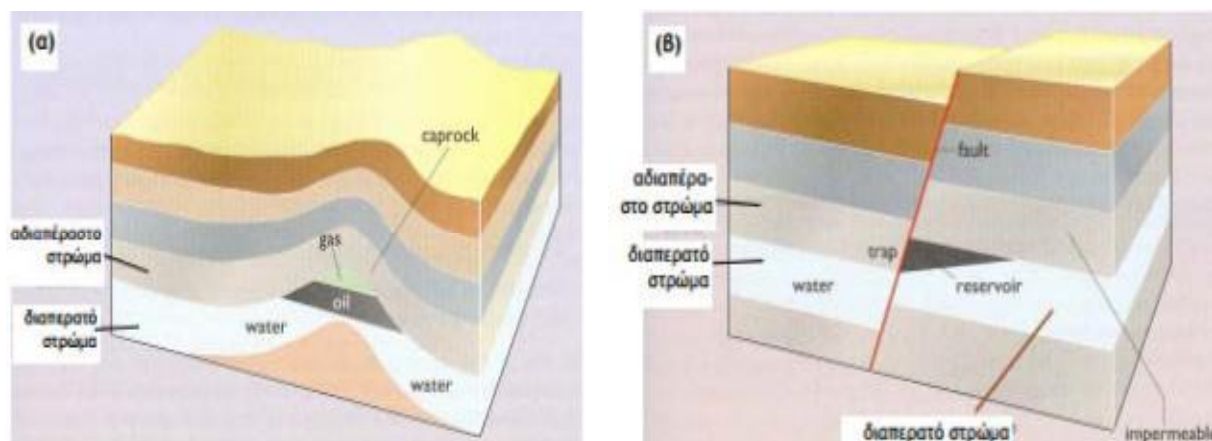
Για την ακινητοποίηση το πετρελαίου και των αερίων είναι φανερό ότι θα πρέπει να είναι παγιδευμένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην μπορούν να μετακινηθούν – μεταναστεύσουν ούτε προς την επιφάνεια της Γής αλλά ούτε και πλευρικά. Επιπλέον, τα πετρώματα -καλύμματα αποτελούνται συνήθως από σχιστόλιθους, αργίλους, ορυκτό αλάτι και γύψο. Οι μηχανικές ιδιότητες αυτών των πετρωμάτων θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από την πλαστικότητα τους, ώστε όταν δέχονται πιέσεις να ρηγματώνονται.

Ταμιευτήρες πετρελαίου μπορούν να σχηματιστούν με διαφορετικούς τρόπους. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι όταν διαστρωματωμένα ιζηματογενή πετρώματα (layered sedimentary rocks), που περικλείουν και ένα πέτρωμα-κάλυμμα, αναδιπλώνονται σε ένα αντίκλινο, απεικόνιση στο Σχήμα 4.8.(α). Ερευνητικές μελέτες κατέληξαν στο ότι τα αντίκλινα θεωρούνται οι καλύτερες περιοχές για αναζήτηση πετρελαίου αφού σε τέτοιους γεωλογικούς σχηματισμούς βρίσκεται περίπου το 88% των πόρων πετρελαίου και φυσικού

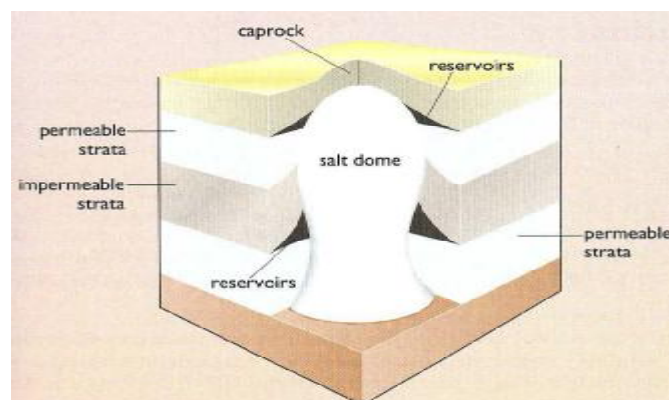
αερίου. Η κάλυψη ενός πετρώματος που περιέχει πετρέλαιο από πέτρωμα- κάλυμμα μπορεί να πραγματοποιηθεί και λόγω συνδυασμού ρηγμάτων (faults), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.8.(β).

Άλλες περιπτώσεις που υπάρχει δυνατότητα να σχηματιστούν κυρτά ιζηματογενή στρώματα είναι η πτύχωση των ιζημάτων ως προς ένα υψηλό σημείο και ο σχηματισμός τοξωτής κλίνης από την κίνηση προς τα πάνω ενός θόλου άλατος. Στον ταμιευτήρα με τα χρόνια τα διάφορα ρευστά κατανέμονται σε σχεδόν οριζόντιες ζώνες ανάλογα με την πυκνότητά τους. Έτσι, το φυσικό αέριο βρίσκεται στο ανώτερο τμήμα του ταμιευτήρα και το αλατούχο νερό (αλμόλοιπο-brine) στο κατώτερο τμήμα του ταμιευτήρα.

Το αργό πετρέλαιο βρίσκεται κυρίως εγκλωβισμένο σε πορώδεις ψαμμίτες οι οποίοι καλύπτονται από αδιαπέραστα πετρώματα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8 και Σχήμα 4.9. Το αλάτι θεωρείται ότι μπορεί να αποτελέσει ένα τέλειο αδιαπέραστο στρώμα, αφού έχει την μορφή μικρών κόκκων. Επίσης, προέρχεται από την εξάτμιση θαλασσινού νερού. Το πετρέλαιο που μπορεί να ανακτηθεί με την πρωτογενή και τη δευτερογενή ανάκτηση κυμαίνεται σε ποσοστό 20 έως 40% του συνολικού πετρελαίου που βρίσκεται σε έναν ταμιευτήρα και καλείται συμβατικό πετρέλαιο (conventional oil). Το υπόλοιπο ποσοστό που μπορεί εν μέρει να ανακτηθεί με εξειδικευμένες και δαπανηρές μεθόδους καλείται μη-συμβατικό πετρέλαιο.



Σχήμα 3.8: Συμβατικό και μη-συμβατικό πετρέλαιο.



Σχήμα 3.9: Το αργό πετρέλαιο το οποίο βρίσκεται σε πορώδεις ψαμμίτες οι οποίοι καλύπτονται από αδιαπέραστα πετρώματα. (Αλεξόπουλος Α., 2013)

Ακόμα υπάρχει μια δεύτερη κατηγορία που κατατάσσονται τα πετρέλαια που έχουν ανακτηθεί είτε από τους βιτουμενιούχους σχίστες (shaleoil, κοιτάσματα στις δυτικές Η.Π.Α.), είτε από πισσούχους άμμους (tarsands, βρίσκονται στον Καναδά), είτε από το βαρύ πετρέλαιο. Τέτοιου τύπου πετρέλαια σχηματίζονται κατά την μετακίνηση του αργού πετρελαίου προς την επιφάνεια της γης και την απώλεια των ελαφρύτερων και πτητικότερων συστατικών του. (Αλεξόπουλος Α., 2013)

3.3.2. Αργό πετρέλαιο και η σύσταση του

Το αργό ή ακατέργαστο πετρέλαιο είναι υγρό πέτρωμα, μίγμα υδρογονανθράκων, δηλαδή ουσιών που περιέχουν άνθρακα και υδρογόνο, κατά ένα μεγάλο μέρος της σειράς των αλκανίων, που όμως περιέχει και αρκετούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, καθώς και άλλες οργανικές ενώσεις και το οποίο βρίσκεται μέσα σε πορώδη πετρώματα στα ανώτερα στρώματα μερικών περιοχών τού φλοιού της γης.

Το αργό πετρέλαιο είναι ένα ανομοιογενές υγρό που αποτελείται από πληθώρα υδρογονανθράκων. Περισσότερες από 3000 ενώσεις έχουν ταυτοποιηθεί στο αργό πετρέλαιο και περιλαμβάνουν από αέρια, όπως το μεθάνιο, μέχρι και βαριές ασφαλικές ενώσεις που δεν αποστάζονται. Η σύστασή του κατά βάρος είναι κατά 80-87% άνθρακας και κατά 11-16% από υδρογόνο, ενώ βρίσκονται σε μικρότερες ποσότητες οξυγόνο (<3%), θείο (<4%) και αζώτο (<1%). Επίσης απαντώνται και πολύ μικρές συγκεντρώσεις (μέχρι 0,1%) μετάλλων, όπως σίδηρος, νικέλιο, χρώμιο και βανάδιο.

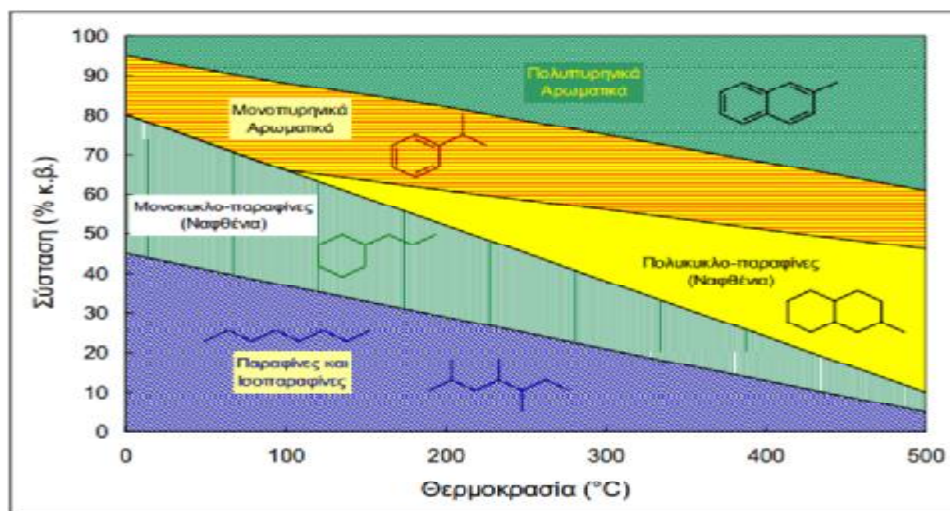
| α/α | ΣΤΟΙΧΕΙΑ | ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ (%κ.β.) |
|-----|---------------------|------------------------|
| 1 | Άνθρακας | 83.90 – 86.80 |
| 2 | Υδρογόνο | 11.40 – 14.00 |
| 3 | Θείο | 0.06 – 8.00 |
| 4 | Άζωτο | 0.11 – 1.70 |
| 5 | Οξυγόνο | 0.50 |
| 6 | Μέταλλα (Fe, V, Ni) | 0.03 |

Πίνακας 3.1: Σύσταση Αργού Πετρελαίου.

Το αργό πετρέλαιο παρουσιάζει μεγάλες διαφορές σε όλες τις φυσικές ιδιότητές του, εξαιτίας της έντονης διαφοροποίησής της σύστασής του. Το χρώμα του μπορεί να είναι μαύρο ή πράσινο ή φαιοκίτρινο. Η πυκνότητά του και το ιξώδες ποικίλλουν αρκετά. Το σημείο ζέσεως των διαφόρων συστατικών του πετρελαίου κυμαίνεται από -160°C μέχρι 540°C. Οι κυριότερες οργανικές ενώσεις στο αργό πετρέλαιο ανήκουν στις παραφινικές, τις ολεφινικές, τις ναφθενικές και τις αρωματικές σειρές υδρογονανθράκων και περιέχουν συνήθως από πέντε μέχρι είκοσι άτομα άνθρακα. Οι παραφίνες συγκεντρώνονται κυρίως στα χαμηλού σημείου ζέσεως κλάσματα, οι ναφθενικές και οι μονοαρωματικές ενώσεις στα μέσου σημείου ζέσεως κλάσματα, ενώ τα πολυαρωματικά μόνο στα βαριά κλάσματα.

Η σύσταση του αργού πετρελαίου και οι ιδιότητές του εξαρτώνται σημαντικά από την περιοχή από την οποία προέρχεται το κοίτασμα. Τα πετρέλαια που είναι πλούσια σε θείο

παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα κατά την επεξεργασία και την αξιοποίησή τους, όπως είναι η διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών, οι οσμές, η χαμηλή απόδοση και οι εκπομπές οξειδίων του θείου. Οι φυσικές διεργασίες της διύλισης πετρελαίου (κλασματική απόσταξη, απορρόφηση και ψύξη) επηρεάζονται σημαντικά από τις ιδιότητες των υδρογονανθράκων, ενώ οι χημικές διεργασίες (π.χ. αποθείωση, πυρόλυση) επηρεάζονται από την παρουσία του θείου, του αζώτου και του οξυγόνου και από το είδος των υδρογονανθράκων. (Αλεξόπουλος Α., 2013)



Διάγραμμα 3.1: Σύσταση αργού πετρελαίου βάση της θερμοκρασίας του. (Αλεξόπουλος Α., 2013)

3.3.3. Ταξινόμηση πετρελαίου

Το αργό πετρέλαιο ταξινομείται με διάφορους τρόπους. Ο πλέον συνήθης τρόπος αφορά στην ταξινόμησή του σε σχέση με την πυκνότητά του σε μια ορισμένη θερμοκρασία στην κλίμακα °API, η οποία ορίζεται ως:

$$^{\circ}API = 141.5 / \rho - 131.5 \quad (3.1)$$

Όπου:

ρ = Ειδικό βάρος του πετρελαίου στους 15.6 °C
 $^{\circ}API$ = 10 και αντιστοιχεί σε $\rho = 1$

| α/α | Στοιχείο | $^{\circ}API$ | ρ (στους 15.6 °C) |
|-----|-----------|---------------|------------------------|
| 1 | Ελαφρύ | >40 °API | < 0,825 |
| 2 | Μέσο | 30 - 40 °API | 0,825-0,875 |
| 3 | Βαρύ | < 30 °API | 0,825- 0,875 |
| 4 | Πολύ βαρύ | < 10 °API | > 1 |

Πίνακας 3.2: Ταξινόμηση του πετρελαίου σε σχέση με την πυκνότητά του.

Τα περισσότερα πετρέλαια ανήκουν στην κατηγορία των ελαφρών και των ενδιάμεσων αργών πετρελαίων. Βαρύτερα πετρέλαια χαρακτηρίζονται ως μη συμβατικά. Ένα ελαφρύ αργό πετρέλαιο παράγει κατά τη διύλισή του πολύ περισσότερα ελαφρά προϊόντα (βενζίνη) και λιγότερα βαριά από ότι παράγει ένα βαρύ αργό πετρέλαιο.

3.3.4. Διαδικασία εξόρυξης πετρελαίου

Για την επιβεβαίωση της ύπαρξης πετρελαίου σε μία ιζηματογενή λεκάνη πραγματοποιείται μελέτη με ειδικευμένο προσωπικό, το οποίο θα αποτελείται από γεωλόγους, γεωφυσικούς και γεωχημικούς. Σε καμία περίπτωση δεν πραγματοποιείται γεώτρηση αν οι επιστήμονες δεν ολοκληρώσουν την επεξεργασία ως προς τις πιθανότητες προσοδοφόρας κατάληξης του εγχειρήματος και δεν δώσουν την έγκρισή τους. Επιπλέον, πρέπει να πραγματοποιηθούν υπολογισμοί ως προς τη συνολική βιωσιμότητα του κοιτάσματος και τις πιθανότητες αποπληρωμής του έργου. Ωστόσο, η πιθανότητα διάνοιξης φρέατος άνευ κοιτάσματος παραμένει υψηλή. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε μια τέτοια έρευνα είναι απαραίτητο να ανακατασκευαστούν οι συνθήκες σχηματισμού των υδρογονανθράκων σε χρονολογικό και γεωγραφικό πλαίσιο, και να ελεγχθεί κατά πόσο τα ταμειυτήρια πετρώματα είναι σε θέση να παγιδεύσουν πετρέλαιο.

Κατάλληλες συνθήκες για το σχηματισμό και τη συγκέντρωση του πετρελαίου υπάρχουν σε τμήματα του φλοιού της γης στραμμένα προς τα κάτω, όπου στρώματα από κατακαθίσεις έχουν μαζευτεί σε μεγάλο πάχος (παχύτερα στη μέση και λεπτότερα στις άκρες). Τέτοιες τοποθεσίες γενικά θεωρούνται άξιες λόγου για έρευνα πετρελαίου. Το πετρέλαιο και τα αέρια μπορούν να συγκεντρωθούν σε κοιτάσματα αν υπάρχουν ορισμένες γεωλογικές συνθήκες:

- Η παρουσία ενός βράχου που χρησιμεύει ως αποθήκη και έχει πόρους συνδεδεμένους μεταξύ τους ή ρωγμές και κενά.
- Η παρουσία πάνω από τη βράχο-αποθήκη ενός σχηματισμού αδιάβροχου.
- Η ύπαρξη ενός «κλεισίματος» δηλαδή ενός γεωλογικού σχηματισμού που εμποδίζει τη διαφυγή των υγρών και αερίων.

Η έρευνα για την ανακάλυψη πετρελαίου περιλαμβάνει:

- Φωτογράφιση του χώρου: όπου φαίνονται καθαρά οι πιθανές τοποθεσίες για γεώτρηση.
- Γεωλογική έρευνα: γίνεται χαρτογράφηση των πετρωμάτων και συμπληρώνεται με παρατηρήσεις παλαιότερων γεωλόγων και με ότι άλλα στοιχεία ενδεχομένως υπάρχουν.
- Γεωφυσική έρευνα: γίνεται με κατάλληλα όργανα, με τα οποία μελετώνται ορισμένες ιδιότητες των πετρωμάτων.

Ανεξάρτητα όμως των παραπάνω ενδείξεων οι γεωλόγοι ερευνητές αναγκάζονται να ακολουθήσουν διάφορες μεθόδους ικανές προς εξαγωγή σαφέστερων συμπερασμάτων. Στην πράξη, σπάνια χρησιμοποιείται μία μοναδική μέθοδος. Συνήθως χρησιμοποιείται, συνδυασμός περισσότερων της μιας μεθόδων.

- Σεισμική Μέθοδος
- Ηλεκτρική Μέθοδος: Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος
- Σταθμική ή βαρυτομετρική μέθοδος
- Ραδιενεργή μέθοδος

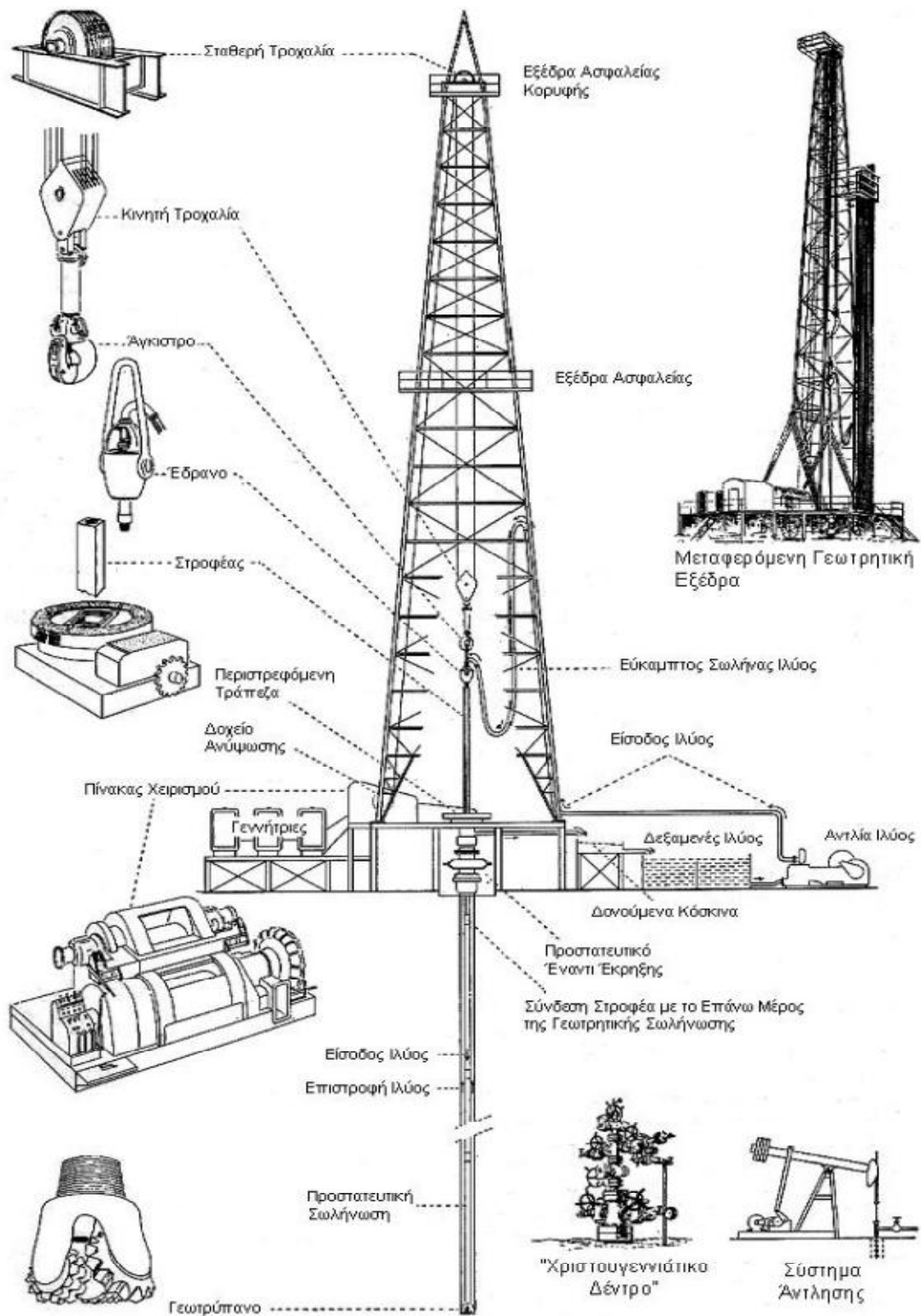
Για την έρευνα και παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου, απαιτείται η διάνοιξη γεωτρήσεων σε μεγάλα βάθη. Οι διανοίξεις για τον εντοπισμό και την εξερεύνηση των κοιτασμάτων είναι γνωστές ως ερευνητικά φρέατα (exploratory wells), ενώ οι διανοίξεις που χρησιμοποιούνται για παραγωγή από τα κοιτάσματα είναι γνωστές ως παραγωγικά φρέατα (production wells). Τα επιτυχημένα ερευνητικά φρέατα μετατρέπονται σε παραγωγικά με την προσθήκη του κατάλληλου εξοπλισμού.

Τα ερευνητικά φρέατα πρέπει να διανοιχτούν με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για το πέτρωμα και το προς εξερεύνηση κοιτάσμα. Αυτό γίνεται με δειγματοληψία πετρωμάτων, όπως για παράδειγμα με τη μορφή καρότων, δειγματοληψία υλικών που βρίσκονται στο πέτρωμα (νερό, πετρέλαιο, αέριο), συλλογή δεδομένων από μεγάλο αριθμό γεωφυσικών μετρήσεων, διεξαγωγή δοκιμών, παραγωγικότητα και μέτρηση της προκύπτουσας συμπεριφοράς του κοιτάσματος.

Τα παραγωγικά φρέατα πρέπει να διανοίγονται και να ολοκληρώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε το κόστος της προκύπτουσας παραγωγής να είναι το ελάχιστο δυνατό, να μπορεί να παραχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ποσότητα από τα αποθέματα με οικονομικό τρόπο, να γίνει βέλτιστη χρήση της παραγωγικής δυναμικότητας, να απαιτηθεί η διάνοιξη του ελάχιστου αριθμού φρεάτων για την ανάπτυξη του κοιτάσματος, και να επιτευχθεί παραγωγή χωρίς προβλήματα καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του κοιτάσματος.

Στο πέρας των χρόνων αναπτύχθηκε η τεχνική της περιστροφικής γεώτρησης με ανακυκλοφορία γεωτρητικής ιλύος. Με αυτόν τον τρόπο έγινε δυνατή η διάνοιξη οπών σε μεγαλύτερα βάθη για την παραγωγή άνθρακα, ποτάσας και ορυκτού αλατιού.

Η χρήση της μεθόδου της περιστροφικής γεώτρησης παραμένει η κυρίαρχη μέθοδος γεώτρησης. Τα κύρια χαρακτηριστικά της περιστροφικής γεώτρησης είναι η ανακυκλοφορούσα θιξοτροπική γεωτρητική ιλύς και χρήση ισχυρών κεφαλών γεωτρυπάνων. Αυτά, σε συνδυασμό με άλλα τυπικά χαρακτηριστικά λειτουργίας έχουν συμβάλλει στην καθιέρωση της μεθόδου ως της σημαντικότερης για την εξερεύνηση και ανάπτυξη βαθέων κοιτασμάτων υδρογονανθράκων. Οι απότομες εκτονώσεις και οι πίδακες που κάποτε ήταν πολυάριθμες, σήμερα αποτελούν σπανιότατο γεγονός. Τα βασικά μέρη και η λειτουργία μιας περιστροφικής εξέδρας γεώτρησης δίνονται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10: Διάγραμμα περιστροφικής εξέδρας γεώτρησης.
 (Αλεξόπουλος Α., 2013)

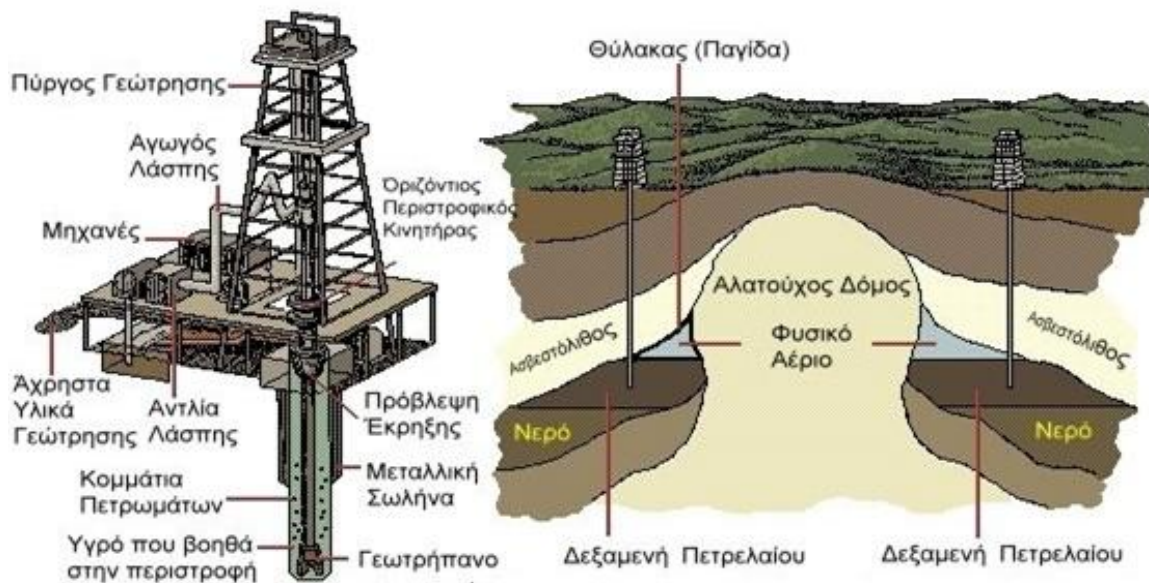
Οι παράμετροι της ιλύος (ρεολογικές ιδιότητες, μηχανική και θερμική κατάσταση του κολλοειδούς συστήματος) ρυθμίζονται ανάλογα με την ταχύτητα γεώτρησης, την ισχύ της αντλίας, τον τύπο κεφαλής του γεωτρήπανου, τη διάμετρο γεώτρησης, την πίεση στους πόρους του πετρώματος, τη θερμοκρασία, τη φύση του διανοιγόμενου πετρώματος (περιοχές απώλειας ιλύος στους διανοιγόμενους γεωλογικούς σχηματισμούς), τις εισροές στην οπή της γεώτρησης, και την περιεκτικότητα σε στερεά.

Πυκνότητα της ιλύος κυμαινόμενη μεταξύ 1.10 και 1.40 g/cm³ είναι συνήθως αποτελεσματική για να ανταποκριθεί στην πίεση του κοιτάσματος, και σε οριακές καταστάσεις όπως η επίδραση του εμβολισμού και οι αδρανειακές δυνάμεις κατά την έλξη της συστοιχίας των σωλήνων της γεώτρησης. Σε ειδικές περιπτώσεις μπορεί να απαιτηθεί πυκνότητα χαμηλότερη από 1 g/cm³ ή πάνω από 2.5 g/cm³.

Η διήθηση του νερού από την ιλύ στα πορώδη πετρώματα, προς σχηματισμό διηθητού πλακούντα εξελίσσεται σύμφωνα με το νόμο διήθησης του Darcy. Η ποσότητα του διηθήματος είναι ανάλογη της διαπερατότητας του πλακούντα, της εφαρμοζόμενης διαφοράς πίεσης και της ενεργού επιφάνειας διήθησης, και αντιστρόφως ανάλογη του ιξώδους του διηθήματος και του πάχους του πλακούντα. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα της ιλύος, το pH και η περιεκτικότητα σε χλωριόντα, θειικά, ασβέστιο και όξινα ανθρακικά είναι παράμετροι που βρίσκονται υπό συνεχή παρακολούθηση. Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του κολλοειδούς συστήματος της ιλύος είναι:

- Αργιούχα υλικά (μπεντονίτης)
- Βαρέα υλικά (βαρίτης, αιματίτης)
- Συστατικά μείωσης ιξώδους, διασπαρτικά, υλικά διατήρησης του κολλοειδούς
- Γαλακτωματοποιητές, λιπαντικά (λάδι, για να μειώσει την εσωτερική τριβή)
- Παρεμποδιστές

Υπάρχουν γεωτρητικές ιλύες υδατικής ή ελαιώδους βάσης. Η οπή της γεώτρησης χωρίζεται σε τμήματα από την κορυφή προς τον πυθμένα. Καθένα από αυτά τα τμήματα σταθεροποιείται με τη βοήθεια κατάλληλου υποστηρίγματος που στερεώνεται στα τοιχώματα με ειδικό σκυρόδεμα.



Σχήμα 3.11: Πύργος γεώτρησης και περιοχή με δεξαμενή –λεκάνη πετρελαίου.

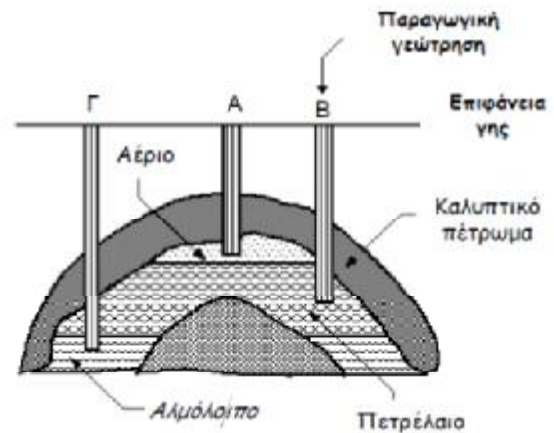
3.3.5. Ανάκτηση πετρελαίου

Η ανάκτηση του πετρελαίου γίνεται με γεώτρηση στη τοποθεσία που έχουν επιλέξει οι γεωλόγοι. Στο Σχήμα 3.12. φαίνεται ότι από τις τρεις γεωτρήσεις, μόνον η γεώτρηση Β θα δώσει πετρέλαιο. Επιπλέον γεωτρήσεις χρειάζονται για να διαπιστωθεί το μέγεθος του κοιτάσματος και το βάθος του. Η εξόρυξη του πετρελαίου γίνεται με διάφορους τρόπους και με διαφορετικό κόστος. Συνήθως διακρίνεται σε:

▼ Πρωτογενής ανάκτηση (*primary recovery*):

Η ανάκτηση αυτή βασίζεται στη φυσική ροή του πετρελαίου λόγω της πίεσης που επικρατεί στον ταμιευτήρα και στην άντληση.

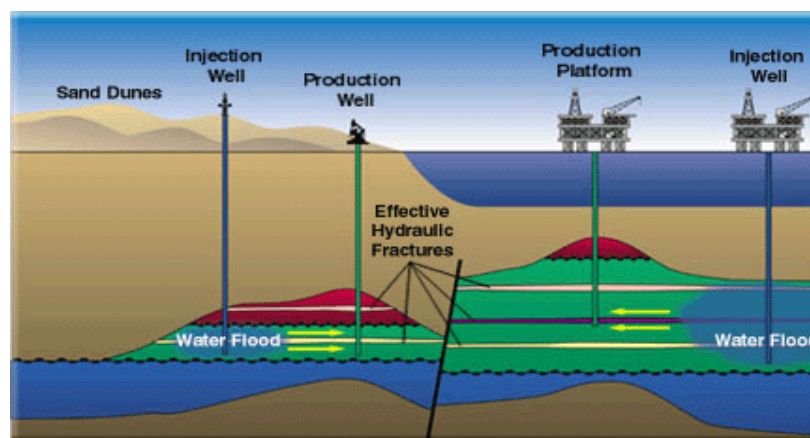
Σε μερικές περιοχές στη Μέση Ανατολή η φυσική ροή ανέρχεται σε 65 m³/hr. Κατά μέσο όρο ανακτάται περίπου το 15-20% των αποθεμάτων, αν και η πρωτογενής ανάκτηση μπορεί να φτάνει μόλις το 5%. Αν και η πρώτη ουσιαστικά γεώτρηση πετρελαίου έφτασε στα 21 m, σήμερα έχουν γίνει ερευνητικές γεωτρήσεις σε βάθος 8 km.



Σχήμα 3.12: Επιλογή θέσης για γεώτρηση πετρελαίου.

▼ Δευτερογενής ανάκτηση (*secondary recovery*):

Η ανάκτηση αυτή βασίζεται στην πλημμύριση του κοιτάσματος με νερό ή στην εισαγωγή αερίου. Συνήθως ανακτάται ένα 5-20% από το κοιτάσμα. Ο συνδυασμός πρωτογενούς και δευτερογενούς ανάκτησης καλείται συμβατική ανάκτηση. Με τη συμβατική ανάκτηση εξορύσσεται κατά μέσο όρο το 30% ενός κοιτάσματος (η περιοχή τιμών κυμαίνεται από 15-40%).



Σχήμα 3.13: Δευτερογενής ανάκτηση πετρελαίου με την εισαγωγή νερού και αερίων.

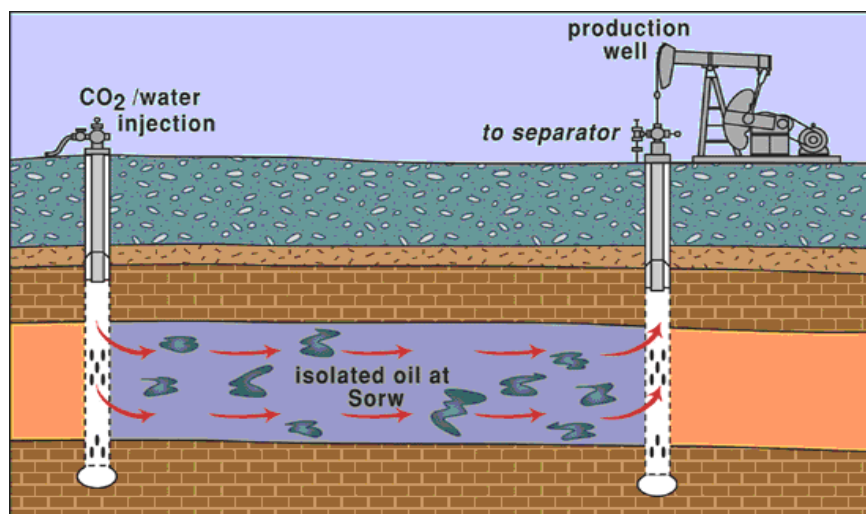
Σε μερικές από αυτές τις μεθόδους η εκτοπίζουσα και η εκτοπιζόμενη φάση είναι μη αναμειξιμες (π.χ. εκτόπιση με διάλυμα πολυμερών) ενώ σε άλλες οι δύο φάσεις είναι αναμειξιμες (π.χ. εκτόπιση με υδρογονάνθρακες). Μερικές μέθοδοι αρχίζουν έχοντας τις δύο φάσεις αναμειξιμες αλλά πολύ γρήγορα, κατά την εξέλιξη της διεργασίας, οι δύο φάσεις αποχωρίζονται και καταλήγουν να γίνουν μη αναμειξιμες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι χημικές πλημμύρες που περιέχουν επιφανειακά ενεργές ουσίες (surfactants και cosurfactants) και που στην αρχή σχηματίζουν γαλάκτωμα με τη πετρελαϊκή φάση.

Η χημική πλημμύρα προωθείται από διάλυμα πολυμερών για να μειωθεί η τάση για σχηματισμό δακτύλων (fingering). Κατά τη διάρκεια της εκτόπισης όμως, αρκετοί φυσικοχημικοί μηχανισμοί οδηγούν στην απώλεια των χημικών ουσιών που προστέθηκαν αρχικά στην εκτοπίζουσα φάση. Αυτοί οι μηχανισμοί περιλαμβάνουν απορρόφηση των πολυμερών και των επιφανειακά ενεργών ουσιών στα τοιχώματα του πετρώματος, καθίζηση ή παγίδευση στα ακίνητα γάγγλια πετρελαίου των πολυμερών και των επιφανειακά ενεργών ουσιών, μηχανική παγίδευση των πολυμερών στους στενούς πόρους, αποικοδόμηση (degradation) των πολυμερών.

Έτσι η αρχικά αναμειξιμη πλημμύρα με το μεγάλο βαθμό αποτελεσματικότητας εκφυλίζεται σε μη αναμειξιμη πλημμύρα με χαμηλή αποτελεσματικότητα. Για τους παραπάνω λόγους η μη αναμειξιμη εκτόπιση είναι πρόβλημα πρωταρχικής σημασίας στη βελτιωμένη απόληψη πετρελαίου. Από τη στιγμή που η εκτόπιση είναι μη αναμειξιμη, η περαιτέρω επιτυχία ή αποτυχία της μεθόδου εξαρτάται από το αν θα σχηματισθεί τράπεζα πετρελαίου (oil bank), η οποία βέβαια θα πρέπει να διατηρηθεί ως το πηγάδι παραγωγής. Λέγοντας τράπεζα πετρελαίου εννοούμε μια ζώνη με υψηλή συγκέντρωση πετρελαίου, η οποία ταξιδεύει με το μέτωπο της πλημμύρας. (Αλεξόπουλος Α., 2013)

▼ Τριτογενής ή προχωρημένη ανάκτηση (tertiary or enhanced recovery):

Αποτελεί δαπανηρή μέθοδο και πραγματοποιείται με τη μείωση του ιξώδους του πετρελαίου που επιτυγχάνεται με θέρμανση με ατμό ή με εισαγωγή διοξειδίου του άνθρακα ή κατάλληλων τασιενεργών ουσιών. Αποδοτικότερη είναι η τριτογενής ανάκτηση με την εισαγωγή ατμού. Με το συνδυασμό των τριών τρόπων ανάκτησης μπορεί να ανακτηθεί ποσοστό πετρελαίου της τάξης του 40 με 80%, αλλά ξοδεύεται περίπου το ένα τρίτο της παραγωγής.



Σχήμα 3.14: Τριτογενής ή προχωρημένη ανάκτηση (tertiary or enhanced recovery).

Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται κατά το τριτοβάθμιο στάδιο ονομάζονται μέθοδοι βελτιωμένης απόληψης πετρελαίου (enhanced oil recovery methods). Στόχος των μεθόδων αυτών είναι η κινητοποίηση και/ή η διαλυτοποίηση των παγιδευμένων γαγγλίων ώστε να καταστεί δυνατή η απόληψη σημαντικού ποσού πετρελαίου με αποδεκτό κόστος.

Οι μέθοδοι βελτιωμένης απόληψης πετρελαίου μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες:

- **Θερμικές μέθοδοι:** περιλαμβάνουν τη μέθοδο εκτόπισης με ατμό και τη μέθοδο της επιτόπου καύσης (in situ combustion). Στη μέθοδο της επιτόπου καύσης δημιουργείται και προωθείται διαμέσου του πετρελαιοφόρου πετρώματος ένα καίόμενο μέτωπο που κινείται και συντηρείται από αέρα ή οξυγόνο και πολλές φορές και από νερό με σκοπό τη μείωση του ιξώδους του πετρελαίου λόγω θέρμανσης και την ευκολότερη απόληψή του.
- **Μέθοδοι εκτόπισης με αέριο:** η εκτοπίζουσα φάση είναι αέριο, π.χ υδρογονάνθρακας, ή CO₂, ή N₂.
- **Χημικές πλημμύρες:** η εκτοπίζουσα φάση είναι υδατικό διάλυμα πολυμερών (συνήθως πολυακρυλαμιδίων ή πολυσακχαριδίων), ή γαλάκτωμα (αποτελούμενο από άλμη, επιφανειακά ενεργές ουσίες, αλκοόλη και πετρέλαιο, ώστε το γαλάκτωμα να είναι σταθερό) που προωθείται με διάλυμα πολυμερών, ή είναι διάλυμα αλκαλικών ουσιών (π.χ. NaOH ή αλάτων Na). Βέβαια υπάρχουν και συνδυασμοί των παραπάνω μεθόδων, ή τροποποιήσεις των μεθόδων αυτών, όπως π.χ. η προσθήκη αφρού (foam) στην εκτοπίζουσα φάση με σκοπό την αύξηση του ιξώδους της.

Σε μερικές από αυτές τις μεθόδους η εκτοπίζουσα και η εκτοπιζόμενη φάση είναι μη αναμειξίμες (π.χ. εκτόπιση με διάλυμα πολυμερών) ενώ σε άλλες οι δύο φάσεις είναι αναμειξίμες (π.χ. εκτόπιση με υδρογονάνθρακες). Μερικές μέθοδοι αρχίζουν έχοντας τις δύο φάσεις αναμειξίμες αλλά πολύ γρήγορα, κατά την εξέλιξη της διεργασίας, οι δύο φάσεις αποχωρίζονται και καταλήγουν να γίνουν μη αναμειξίμες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι χημικές πλημμύρες που περιέχουν επιφανειακά ενεργές ουσίες (surfactants και cosurfactants) και π ο υ σ την αρχή σχηματίζουν γαλάκτωμα με τη πετρελαϊκή φάση. Η χημική πλημμύρα προωθείται από διάλυμα πολυμερών για να μειωθεί η τάση για σχηματισμό δακτύλων (fingering).

Κατά τη διάρκεια της εκτόπισης όμως, αρκετοί φυσικοχημικοί μηχανισμοί οδηγούν στην απώλεια των χημικών ουσιών που προστέθηκαν αρχικά στην εκτοπίζουσα φάση. Αυτοί οι μηχανισμοί περιλαμβάνουν απορρόφηση των πολυμερών και των επιφανειακά ενεργών ουσιών στα τοιχώματα του πετρώματος, καθίζηση ή παγίδευση στα ακίνητα γάγγλια πετρελαίου των πολυμερών και των επιφανειακά ενεργών ουσιών, μηχανική παγίδευση των πολυμερών στους στενούς πόρους, αποικοδόμηση (degradation) των πολυμερών. Έτσι η αρχικά αναμειξίμη πλημμύρα με το μεγάλο βαθμό αποτελεσματικότητας εκφυλίζεται σε μη αναμειξίμη πλημμύρα με χαμηλή αποτελεσματικότητα.

Για τους παραπάνω λόγους η μη αναμειξίμη εκτόπιση είναι πρόβλημα πρωταρχικής σημασίας στη βελτιωμένη απόληψη πετρελαίου. Από τη στιγμή που η εκτόπιση είναι μη αναμειξίμη, η περαιτέρω επιτυχία ή αποτυχία της μεθόδου εξαρτάται από το αν θα σχηματισθεί τράπεζα πετρελαίου (oil bank), η οποία βέβαια θα πρέπει να διατηρηθεί ως το πηγάδι παραγωγής

Ο ταμειυτήρας πετρελαίου συχνά βρίσκεται στη θάλασσα, οπότε πρέπει να κατασκευαστεί κάποιο είδος σταθερής πλατφόρμας για να προχωρήσει η συχνά επικίνδυνη

και δαπανηρή διαδικασία ανόρυξης της γεώτρησης. Οι πλατφόρμες χωρίζονται σε επιπλέουσες με αγκύρωση και σε σταθερές. Η ανόρυξη γεωτρήσεων στη θάλασσα κοστίζουν μέχρι και 10 φορές περισσότερο από το αν η ανόρυξη γινόταν στην ξηρά.

Με τη διάνοιξη και την ανάπτυξη του κοιτάσματος προσδιορίζονται οι πιο βασικές ιδιότητες του: πίεση κοιτάσματος, διαπερατότητα πετρωμάτων, ιξώδες παραγόμενου ρευστού, παρουσία και χαρακτηριστικά νερού ως μηχανισμός προώθησης. Αυτές οι παράμετροι είναι θεμελιώδεις για τον προγραμματισμό των μεθόδων και του ρυθμού παραγωγής καθώς και του απαιτούμενου εξοπλισμού. Κατά κύριο λόγο είναι διαθέσιμες οι ακόλουθες μέθοδοι παραγωγής:

- Û Παραγωγή με ροή
- Û Ανύψωση με αέριο
- Û Φυγοκεντρικές αντλίες
- Û Εμβολοφόρες ή υδραυλικές αντλίες

Με αυτές τις μεθόδους παράγονται περίπου $3.25 \times 10^9 \text{ m}^3$ αργού πετρελαίου ανά έτος, από βάθη έως τα 6000 m. (Αλεξόπουλος Α., 2013)

✓ Μέθοδος Παραγωγής με Ροή:

Ως αποτέλεσμα της παραγωγής, εμφανίζεται μια πτώση στην πίεση που επεκτείνεται, σε σχήμα χοάνης, γύρω από την οπή. Κάτω από την επίδραση αυτής της βαθμίδας πίεσης, το ρευστό του ταμιευτήρα ρέει προς την οπή, εισέρχεται μέσω των οπών της διάτρησης, ανέρχεται μέσω της σωλήνωσης προς την επιφάνεια, και ρέει στην επιφάνεια μέσω αγωγών στον αγωγό συλλογής προς την κεντρική εγκατάσταση.

Στην κεντρική εγκατάσταση συλλέγεται η παραγωγή από όλα τα πεδία, εξυδατώνεται, και μεταφέρεται προς τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας (δυλιστήρια). Η πίεση ροής στο βάθος του κοιτάσματος είναι επαρκής για να υπερνικήσει την υδροστατική πίεση της στήλης παραγωγής και τις απώλειες τριβής στην ακολουθία σωληνώσεων και τους αγωγούς επιφάνειας.

Ο ρυθμός παραγωγής με ροή υπολογίζεται ως συνάρτηση της πίεσης ροής στον πυθμένα, της διαμέτρου των σωληνώσεων, και της πίεσης στην επιφάνεια σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τις εμπειρικές παραμέτρους που καθορίζουν τη διασπαστική ροή. Η διάρκεια αυτής της οικονομικά συμφέρουσας φάσης παραγωγής μπορεί να επεκταθεί με καλή ρύθμιση του ρυθμού παραγωγής ως προς τη διατομή του αγωγού παραγωγής.

✓ Μέθοδος Παραγωγής λόγω Ανύψωσης με Αέριο:

Στη μέθοδο ανύψωσης με αέριο, το αέριο εγχέεται στη σωλήνωση σε ένα σημείο ή για να ελαχιστοποιήσει την αρχική πίεση - σε διάφορα διαδοχικά σημεία και κατ' αυτό τον τρόπο έχει ξεκινήσει η ροή φυσαλίδων ή η εμβολική ροή, όπως ισχύει για αυτήν την είδους την παραγωγή. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνεχώς ή περιοδικά, ανάλογα με το ρυθμό ροής, το ρυθμό παραγωγής, και τη διαθεσιμότητα αερίου. Η φάση εκρηκτικής παραγωγής συχνά υποστηρίζεται με την ανύψωση λόγω αερίου ή μεταπηδά στην ανύψωση λόγω αερίου όταν μειώνεται η κλίση πίεσης μεταξύ της γεώτρησης και του ταμιευτήρα.

Η δυνατότητα εφαρμογής αυτής της ευέλικτης μεθόδου παραγωγής περιορίζεται όταν υπάρχει έλλειψη αερίου ή το κόστος συμπίεσης αερίου είναι πάρα πολύ υψηλό. Όπου είναι διαθέσιμη ικανοποιητική ποσότητα αερίου, το πεδίο εφαρμογής είναι ευρύ λόγω της ευελιξίας αυτής της μεθόδου όσον αφορά το ρυθμό παραγωγής και το βάθος. Σε γεωτρήσεις

με μεγάλη κλίση και εάν παράγονται από κοινού και αποξεστικά υλικά, η μέθοδος ανύψωσης με αέριο συνήθως πλεονεκτεί όλων των άλλων μεθόδων παραγωγής (κανένα κινούμενο μέρος).

Οι βάνες ανύψωσης αερίου που ελέγχονται από την πίεση έγχυσης προσαρμίζονται στη σωλήνωση, στην οποία εγγέουν το αέριο ανύψωσης. Η πίεση στη βάνα ελέγχεται μέσω ενός μηχανισμού πίεσης (pressure bellow) που λειτουργεί με ή χωρίς υποστήριξη ελατηρίου (ανάλογα με τον τύπο). Ο μηχανισμός πίεσης ρυθμίζεται σε ορισμένη πίεση ανοίγματος και κλεισίματος στην επιφάνεια πριν την εγκατάστασή του. Δεδομένου ότι στο ξεκίνημα της λειτουργίας ενός φρέατος σε λειτουργία με ανύψωση λόγω αερίου η αντίθλιψη ολόκληρης της στήλης υγρού απαιτεί μια υψηλή πίεση έγχυσης, διάφορες βάνες ανύψωσης είναι εγκατεστημένες και κατανεμημένες στη σωλήνωση, οι πιέσεις ανοίγματος των οποίων συντονίζονται μεταξύ τους. (Αλεξόπουλος Α., 2013)

▼ Μέθοδος Παραγωγής με Υπόγειες Αντλίες:

Οι υπόγειες αντλίες είναι η πιο διαδεδομένη μορφή για την παραγωγή πετρελαίου, το οποίο συνήθως περιέχει και σημαντική ποσότητα νερού. Οι τύποι αντλιών που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν ηλεκτρικές εμβυθισμένες φυγοκεντρικές αντλίες και μηχανικές ή υδραυλικές υπόγειες εμβολοφόρες αντλίες. Οι αντλίες εγκαθίστανται κάτω από τη στάθμη του υγρού επίπεδο στα φρέατα και, σε δύσκολες υπόγειες συνθήκες, πρέπει να υπερνικήσουν την υδραυλική πίεση αρκετών εκατοντάδων έως μερικών χιλιάδων μέτρων. Οι τύποι υπογείων αντλιών που χρησιμοποιούνται είναι:

▼ Ηλεκτρικές Εμβυθισμένες Φυγοκεντρικές Αντλίες:

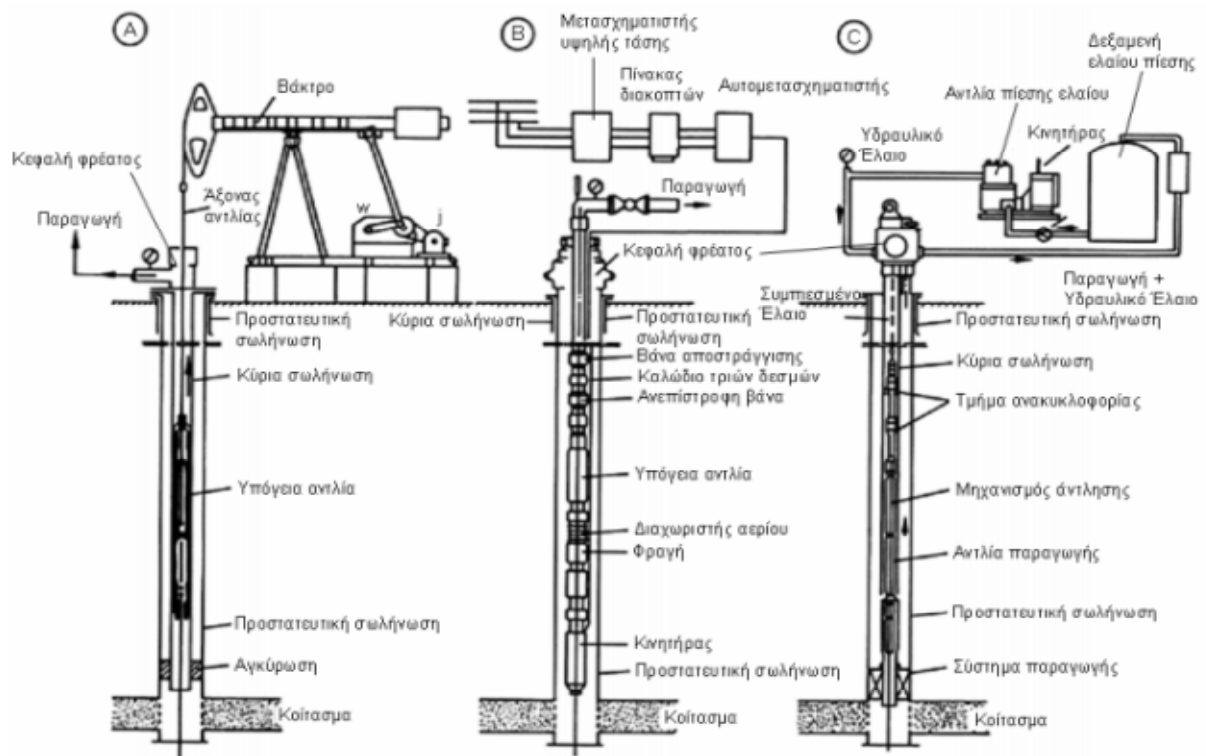
Είναι πολυβάθμιες φυγοκεντρικές αντλίες εμβυθισμένες στο προς παραγωγή υγρό, εγκατεστημένες στην οπή του φρέατος, συνδεδεμένες άμεσα με τον κινητήρα, και αναρτημένες στη σωλήνωση

▼ Μηχανικές Υπόγειες Αντλίες με Βάκτρο:

Η παραγωγή πετρελαίου ήταν για μια μεγάλη περίοδο συνώνυμη της χρήσης αντλιών με βάκτρο, που είναι εγκατεστημένες ως αντλίες σωλήνωσης ή είναι τοποθετημένες στο βάθος άντλησης, ως εισηγμένες αντλίες στο βάκτρο άντλησης. Αυτές οι αντλίες κινούνται από την επιφάνεια μέσω βάκτρων με κινητήρα, γραναζοκιβώτιο, και σύστημα ανύψωσης, που περιλαμβάνει το τυπικό βάκτρο με την "κεφαλή γαϊδάρου" στο οποίο προσαρμίζεται το συρματόσχοινο της άντλησης.

▼ Υδραυλικές Υπόγειες Εμβολοφόρες Αντλίες:

Όπως οι ηλεκτρικές εμβυθισμένες φυγοκεντρικές αντλίες, αυτές οι αντλίες λειτουργούν υπόγεια, με ρευστό πίεσης. Τα προβλήματα με το συρματόσχοινο αποφεύγονται με την υδραυλική μετάδοση της κινητικής ενέργειας με ένα βοηθητικό υγρό από την επιφάνεια σε μια αντλία που εγκαθίσταται στη γεώτρηση. Μια αντλητική εγκατάσταση υψηλής πίεσης παρέχει το έλαιο πίεσης που τροφοδοτείται στα ανεξάρτητα παραγωγικά φρέατα και την αντλία μέσω της σειράς σωληνώσεων. (Αλεξόπουλος Α., 2013)



Σχήμα 3.15: Διαφορετικοί τύποι αντλιών.

A) Υπόγεια με βάκτρο, με βηματική οδήγηση.

B) Ηλεκτρική εμβυθισμένη φυγοκεντρική αντλία.

C) Υδραυλική υπόγεια εμβολοφόρος αντλία με παροχή πίεσης ελαίου στο ανοιχτό σύστημα. (Αλεξόπουλος Α., 2013)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αβραάμ Δημητρίος, 1996, *Σχετικές διαπερατότητες και καθεστώτα ροής δυο μη αναμειζιμων ρευστών κατά τη ροή τους σε πορώδη σώματα*, Διδακτορική Διατριβή, Πάτρα.
2. Τσακίρογλου Χ., 1989, Διδακτορική Διατριβή, Πάτρα.
3. Τζοβόλου Δ., 2011, *Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων απορρύπανσης της ακόρεστης ζώνης εδάφους μολυσμένου με κηροζίνη*, Διδακτορική Διατριβή, Πάτρα.
4. Συγγούνη Β., 2007, *Μια νέα μέθοδος μέτρησης της κλασματικής διαβροχής πορώδων μέσων από πειράματα εκτόπισης δύο φάσεων*, Διδακτορική Διατριβή, Πάτρα.
5. Αλεξόπουλος Α., 2013, *Τεχνολογία εξόρυξης πετρελαίου*, Έκδοση Τ.Ε.Ι Δυτικής Ελλάδας, Πάτρα.
6. Καββαδάς Μ., Πανταζίδου Μ., 2007, *Στοιχεία περιβαλλοντικής γεωτεχνικής*, Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείο, Αθήνα.
7. Aggelopoulos et al., 2005, *Large –scale effects on resistivity index of porous media*.
8. Bear, J., 1972, *Dynamics of fluids in porous media*. Elsevier, New York.
9. Bruggeman, G.A., 1999. Analytical solutions of geohydrological problems. Elsevier, New York.
10. Bruderer, C., Bernabe, Y., 2001, *Network modelling of dispersion: transition from Taylor dispersion in homogeneous networks to mechanical dispersion in very heterogeneous ones*, Water Resour. Res. 37, 897–908.
11. Comegna, V., Coppola, A., Sommella, A., 2001, *Effectiveness of equilibrium and physical non-equilibrium approaches for interpreting solute transport through undisturbed soil columns*, J. Contam. Hydrol. 50, 121–138.
12. Drazer, G., Chertcoff, R., Bruno, L., Rosen, M., Hulin, J.P., 1999, *Tracer dispersion in packings of porous activated carbon grains*, Chem. Eng. Sci. 54, 4137–4144.
13. Hendrickx, J.M.H., Flury, M., 2001, *Uniform and preferential flow mechanisms in the vadose zone: conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone*, Nat. Res. Council. Nat. Acad. Press, Washington D.C., pp. 149–187.
14. Roychoudhury, A.N., 2001, *Dispersion in unconsolidated aquatic sediments*, Estuar. Coast. Shelf. S. 53, 745–757.

15. Tsakiroglou, C.D., Payatakes, A.C., 1990, *A new simulator of mercury porosimetry for the characterization of porous materials*, J. Colloid Interface Sci. 137, 315–339.
16. Tsakiroglou, C.D., Payatakes, A.C., 1991, *Effects of pore-size correlations on mercury porosimetry curves*, J. Colloid Interface Sci. 146, 479–494.
17. Abriola, L.M., Pinder, G.F., 1985a, *A multiphase approach to the modeling of porous media contamination by organic compounds. 1. Equation development*, Water Resour. Res. 21, 11–18.
18. Abriola, L.M., Pinder, G.F., 1985b, *A multiphase approach to the modeling of porous media contamination by organic compounds. 2. Numerical simulation*, Water Resour. Res. 21, 19–26.
19. Aggelopoulos, C.A., Tsakiroglou, C.D., 2008a, *The effect of micro-heterogeneity and capillary number on capillary pressure and relative permeability curves of soils*, Geoderma 148, 25–34.
20. Aggelopoulos, C., Klepetsanis, P., Theodoropoulou, M.A., Pomoni, K., Tsakiroglou, C.D., 2005, *Large-scale effects on resistivity index of porous media*, J. Contam. Hydrol. 77, 299–323.
21. Ataie-Ashtiani, B., Hassanizadeh, S.M., Celia, M.A., 2002, *Effects of heterogeneities on capillary pressure-saturation–relative permeability relationships*, J. Contam. Hydrol. 56, 175–192.
22. Bartoli, F., Bird, N.R.A., Gomendy, V., Vivier, H., Niquet, S., 1999, *The relation between silty soil structures and their mercury porosimetry curve counterparts: fractals and percolation*, Eur. J. Soil Sci. 50, 9–22.
23. Chang, Y.C., Mohanty, K.K., 1997, *Scale-up of two-phase flow in heterogeneous porous media*, J. Pet. Sci. Eng. 18, 21–34.
24. Chaouche, M., Rakotomalala, N., Salin, D., Xu, B., Yortsos, Y.C., 1994, *Capillary effects in drainage in heterogeneous porous media: continuum modelling, experiments and pore network simulations*, Chem. Eng. Sci. 49 (15), 2447–2466.
25. Chen, J., Hopmans, J.W., Grismer, M.E., 1999, *Parameter estimation of two fluid capillary pressure-saturation and permeability functions*, Adv. Water Resour. 22, 479–493.
26. Das, D.B., Mirzaei, M., Widdows, N., 2006, *Non-uniqueness in capillary pressure-saturation–relative permeability relationships for two-phase flow in porous media: Interplay between intensity and distribution of random micro-heterogeneities*, Chem. Eng. Sci. 61, 6786–6803.
27. Desparats, A.J., 1995, *Upscaling capillary pressure-saturation curves in heterogeneous porous media*, Water Resour. Res. 31, 281–288.

28. Hoteit, H., Firoozabadi, A., 2008, *Numerical modelling of two-phase flow in heterogeneous permeable media with different capillarity pressures*, Adv. Water Resour. 31 (1), 56–73.
29. Knackstedt, M.A., Sheppard, A.P., Sahimi, M., 2001, *Pore network modelling of two-phase flow in porous rock: the effect of correlated heterogeneity*, Adv. Water Resour 24, 257–277.
30. Kueper, B.H., Frind, E.O., 1991a, *Two-phase flow in heterogeneous porous media. 1. Model development*, Water Resour. Res. 27, 1049–1057.
31. Kueper, B.H., Frind, E.O., 1991b, *Two-phase flow in heterogeneous porous media. 2. Model application*, Water Resour. Res. 27, 1059–1070.
32. Miller, C.T., Christakos, G., Imhoff, P.T., McBride, J.F., Pedit, J.A., 1998, *Multiphase flow and transport modelling in heterogeneous porous media: challenges and approaches*, Adv. Water Resour. 21, 77–120.
33. Mirzaei, M., Das, D.B., 2007, *Dynamic effects in capillary pressure-saturation relationships for two-phase flow in 3D porous media: implications of micro-heterogeneities*, Chem. Eng. Sci. 62, 1927–1947.
34. Pinder, G.E., Celia, M.A., 2006. *Subsurface hydrology*. Wiley, Hoboken, New Jersey.
- Theodoropoulou, M., Sygouni, V., Karoutsos, V., Tsakiroglou, C.D., 2005, *Relative permeability and capillary pressure functions of porous media as related to the displacement growth pattern*, Int. J. Multiph. Flow 31, 1155–1180.
35. Tsakiroglou, C.D., Ioannidis, M.A., 2008, *Dual-porosity modeling of the pore structure and transport properties of a contaminated soil*, Eur. J. Soil Sci. 59, 744–761.
36. Tsakiroglou, C.D., Theodoropoulou, M., Karoutsos, V., 2003, *Non-equilibrium capillary pressure and relative permeability curves of porous media*, AIChE J. 49, 2472–2486.
37. Tsakiroglou, C.D., Theodoropoulou, M.A., Karoutsos, V., Papanicolaou, D., 2005, *Determination of the effective transport coefficients of pore networks from transient immiscible and miscible displacement experiments*, Water Resour. Res. 41 (2), W02014.
38. Vasin, M., Lehmann, P., Kaestner, A., Hassanein, R., Nowak, W., Helmig, R., Neuweiler, I., 2008, *Drainage in heterogeneous sand columns with different geometric structures*, Adv. Water Resour. 31, 1205–1220.
39. Dullien, F. A. L., 1979, *Porous media: Fluid transport and pore structure*, New York: Elsevier.
40. Lenormand, R. 1995, *A stream tube model for miscible flow*, Transport in Porous Media, 18, 245–261.

41. Tsakiroglou, C. D., Theodoropoulou, M. A., Karoutsos, V., & Papanicolaou, D., 2005a, *Determination of the effective transport coefficients of pore networks from transient immiscible and miscible displacement experiments*, Water Resources Research, 41(2), W02014.

Διαδίκτυο

1. <http://oasys2.confex.com>
2. <http://www.washington.edu/news>
3. <https://www.orthoworld.com>