

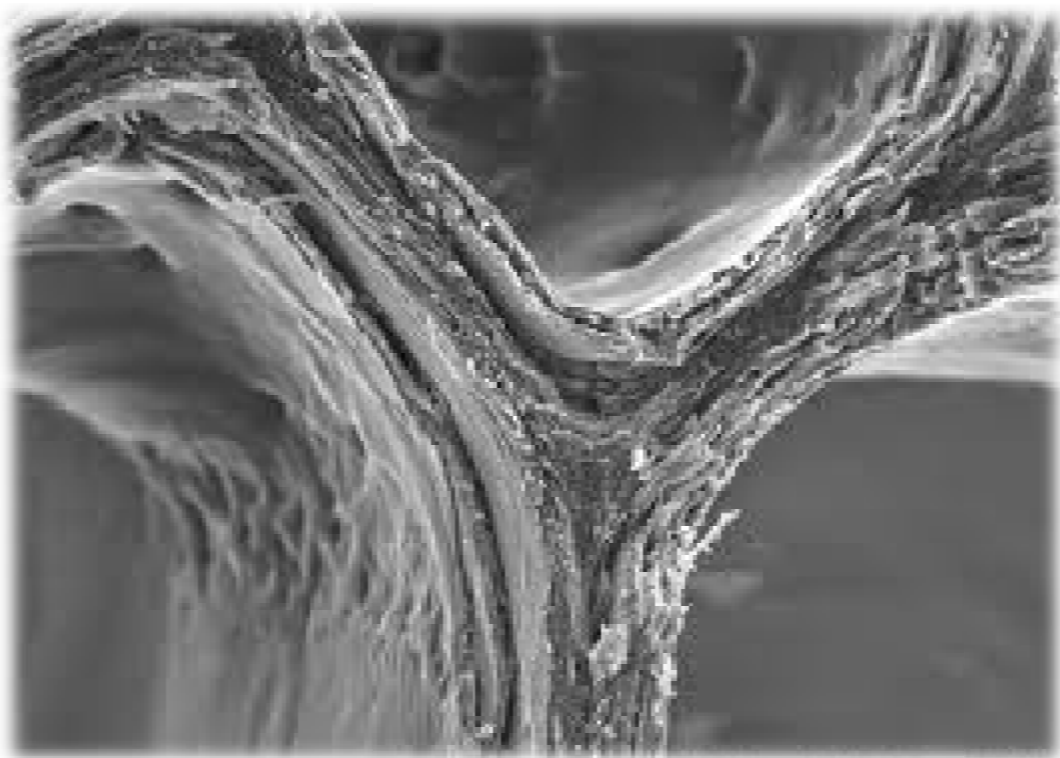
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ

ΣΧΟΛΗ: ΣΤΕ

ΤΜΗΜΑ: ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΡΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:** ΚΑΒΒΑΔΑ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ

ΜΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

**ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ:** ΔΡ. ΘΕΟΔΩΡΟΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΙΑ

ΠΑΤΡΑ 2013

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά και να εκφράσουμε την ειλικρινή μας ευγνωμοσύνη, σε όσους στάθηκαν δίπλα μου με κάθε τρόπο και μας βοήθησαν στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την καθηγήτρια Δρ. Θεοδοροπούλου Π. Μαρία επειδή μας ανέθεσε αυτήν την πτυχιακή εργασία, επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαιτέρως τον Δρ. Αγγελόπουλο Χρήστο για τον χρόνο που μας αφιέρωσε και 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.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα υλικά ανάλογα με την δομή τους τα χαρακτηρίζουμε σε κρυσταλλικά άμορφα και πορώδη υλικά. Τα πορώδη μέσα αποτελούν μια σημαντική κατηγορία υλικών τόσο του φυσικού κόσμου όσο και της βιομηχανίας. Πορώδη πετρώματα όπως ασβεστόλιθοι και ψαμμίτες αποτελούν τις πιο σημαντικές κατηγορίες αποταμιευτικών πετρελαίου και φυσικού αερίου. Μια σημαντική κατηγορία πορωδών υλικών στην βιομηχανία είναι ο καταλύτης, αποτελούν βασική πρώτη υλη ετερογενών χημικών αντιδράσεων. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους είναι τα σχήματα και τα μεγέθη των πόρων και ο τρόπος αλληλοσυνδέσεις τους που οδήγησαν στην δημιουργία του υλικού. Φυσικές ιδιότητες των πορωδών υλικών είναι η διαπερατότητα και η ενεργός διαχυτικότητα και επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό από τα δομικά χαρακτηριστικά.

Μπορούν να αναφερθούν πολλά παραδείγματα όπως οι οργανικές λειτουργίες των φυτικών και ζωικών οργανισμών, όπως η αναπνοή και η κυκλοφορία ρευστών, που πραγματοποιούνται μέσα από πορώδεις δομές. Τα πετρώματα ιζηματογενούς προέλευσης όπως ασβεστόλιθοι, δολομίτες και ψαμμίτες που αποτελούν τις πιο σημαντικές κατηγορίες αποταμιευτήρων πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι πορώδη. Δια μέσου των πόρων του υπεδάφους ρέουν τα υπόγεια νερά. Χρησιμοποιούνται φίλτρα για τον καθαρισμό υγρών και αερίων που οφείλουν τη δράση τους σε πόρους. Πορώδη υλικά βρίσκουμε στην καθημερινότητα μας είναι το μπετόν, το τσιμέντο, το ξύλο, το ύφασμα και το χαρτί μεγάλης σημασίας για τις δραστηριότητες μας.

Για να χαρακτηριστεί ένα υλικό πορώδες μέσο πρέπει να ικανοποιεί κάποια κριτήρια:

1. πρέπει να περιέχει κενούς χώρους οι όποιοι να ονομάζονται πόροι
2. πρέπει να είναι διαπερατό σε μια ποικιλία ρευστών.

Κάθε πορώδες υλικό έχει κάποια δομικά χαρακτηριστικά όπως το σχήμα, το μέγεθος των πόρων καθώς επίσης και τον τρόπο αλληλοσύνδεσης των πόρων μεταξύ τους. Αυτό σχετίζεται με την διαδικασία που οδήγησε στην δημιουργία του υλικού. Μια διαδικασία χρονοβόρα που μετρά εκατομμύρια χρόνια και συνεχίζει να συμβαίνει ακόμη και σήμερα καθορίζει την πολυπλοκότητα της δομής των πορωδών υλικών για παράδειγμα των ιζηματογενών πετρωμάτων. Η διαπερατότητα, ο παράγοντας σχηματισμού είναι φυσικές ιδιότητες των πορωδών υλικών που επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό τα δομικά χαρακτηριστικά. Γι' αυτό και η μελέτη τους παρουσιάζει ξεχωριστό ενδιαφέρον.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία μελετά της ηλεκτρικές ιδιότητες στις οποίες κάνει μια εκτενή ανασκόπηση των είδη υπαρχόντων πειραμάτων του Δρ. Αγγελόπουλου Χρήστου. Όπως έχει αποδειχτεί έχει μεγάλη σημασία στην μελέτη της ρύπανσης του υπεδάφους, στις τεχνολογίες εξορύξεις πετρελαίου και στις ιδιότητες των εδαφών. Η μελέτη τους συσχετίζεται άμεσα με τις ιδιότητες με αναμίξιμη ή μη αναμίξιμη ροής και τα τοπολογικά χαρακτηριστικά των διαφόρων πορωδών υλικών.

Η βιβλιογραφία μας περιέχει πλήθος πειραματικών μετρήσεων που στοχεύουν στην καταγραφή και την ανάλυση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πορωδών υλικών από την επιστημονική ομάδα του Δρ. Αγγελόπουλου Χρήστου που έγιναν κατά συνεχή έτη του 2005-2009. Οι μέθοδοι που χρησιμοποίησαν είναι από τις πιο σύγχρονες με σκοπό την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

# ΠΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.	Μακροσκοπικές ιδιότητες πορωδών υλικών	1
1.1.	Πορώδες.	1
1.2.	Πορομετρία Υδραργύρου.	3
1.3.	Διαπερατότητα.	6
1.4.	Τριχοειδή Φαινόμενα.	7
1.5.	Ισορροπία Διεπιφανειών.	8
1.5.1.	Κίνηση Διεπιφανειών.	8
1.5.2.	Ευστάθεια Διεπιφανειών.	11
1.6.	Διαβρεκτικότητα.	12
1.7.	Πίεση Αποσύνδεση.	15
1.8.	Ροή σε Πορώδη Υλικά	15
1.8.1	Επίδραση της Διαβρεκτικότητας στη Ροή.	16
1.9.	Μοντέλα Δικτύων Πόρων.	16
1.9.1	Θεωρητικά Μοντέλα Ροής σε Πορώδη Υλικά.	18
1.10.	Χαρακτηρισμός ενός Συστήματος Διείσδυσης.	20
1.11.	Μη Αναμίξιμες Εκτοπίσεις δυο Φάσεων.	21
1.11.1	Παράμετροι της Ροής.	21
1.11.2.	Επίδραση της Άνωσης στο Πρότυπο Εκτόπισης δυο Φάσεων.	21
1.12	Παράγοντες Σχηματισμού.	27

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

		29
2.1.	Ηλεκτρικές Ιδιότητες Πορωδών Υλικών.	29
2.2.	Θεωρητική Ερμηνεία Δείκτη Ηλεκτρικής Αντίστασης με Μοντέλα Δικτύων Πόρων.	31
2.2.1.	Μοντέλο Διείσδυσης Δεσμού για Αποστράγγιση (bond percolation model)	31
2.2.2.	Μοντέλο Κλασματικής Τραχύτητας	33
2.2.3.	Μοντέλο Διείσδυσης Δεσμού – Κλασματικής Τραχύτητας.	33
2.3.	Προσεγγιστικές Σχέσεις για τον Δείκτη Ηλεκτρικής Αντίστασης και τη Τριχοειδή Πίεση.	36
2.3.1.	Μοντέλο Διείσδυσης Μεγάλης Κλίμακας.	37
2.4.	Μέθοδοι Μέτρηση Δείκτη Ηλεκτρικής Αντίστασης και Καμπυλών Τριχοειδούς Πίεσης.	38

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

		39
3.1.	Διηλεκτρικές Ιδιότητες Πορωδών Υλικών.	39
3.1.1.	Πυκνωτές	39
3.2.	Χωρητική Αντίσταση και Εμπέδηση.	41
3.2.1.	Δείκτης Χωρητικής Αντίστασης.	42
3.3.	Διηλεκτρικές Ιδιότητες Μερικώς Κορεσμένων Πετρωμάτων.	43

3.4.	Θεωρητικά Μοντέλα.	45
3.4.1.	Θεωρία Αποτελεσματικού Μέσου.	45
3.5.	Μέθοδος Σύνθετου Δείκτη Διάθλασης.	46
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b>		<b>48</b>
4.1.	Πειραματική Μέτρηση Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας.	48
4.1.1.	Πειραματικές Διατάξεις.	48
4.2.	Πειραματικός Προσδιορισμός Φυσικοχημικών Ιδιοτήτων Ρευστών .	53
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b>		<b>56</b>
5.1.	Θεωρητικό Υπόβαθρο Πειραματικών Αποτελεσμάτων.	56
5.1.1.	Θεωρητική Ερμηνεία Πειραμάτων.	56
5.2.	Σταθεροποιημένη Αποστράγγιση Υπό Συνθήκες Τριχοειδούς Ισορροπίας.	57
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b>		<b>67</b>
6.1.	Πειραματική Διαδικασία και Πειραματικά Αποτελέσματα.	67
6.1.1.	Προσδιορισμός Ιδιοτήτων Μεταφοράς Κλίνης Άμμου.	67
6.1.2.	Παράγοντας Σχηματισμού.	67
6.2.	Απόλυτη Διαπερατότητα.	68
6.3.	Πειράματα Τριχοειδούς Ισορροπίας.	69
6.4.	Πειράματα Συνεχούς Έκχυσης.	71
6.5.	Πειραματικά Αποτελέσματα Δείκτη Ηλεκτρικής Αντίστασης και Τριχοειδούς Πίεσης.	71
6.6.	Πειραματικά Αποτελέσματα Δείκτη Χωρητικής Αντίστασης.	79
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7</b>		<b>81</b>
7.1.	Ανάμιξη εκτόπισης.	81
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>		<b>87</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

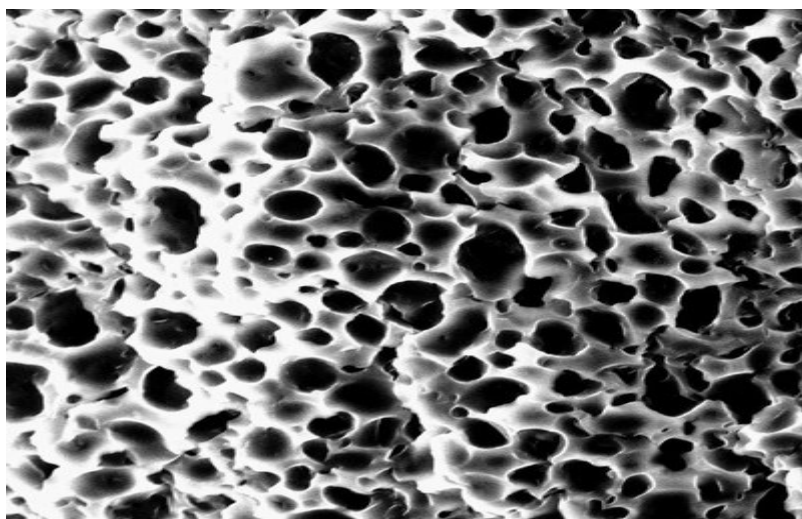
### 1. ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΟΡΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.

#### 1.1. Πορώδες.

Το κυριότερο χαρακτηριστικό ενός πορώδους μέσου είναι το πορώδες το οποίο ορίζεται σαν ο λόγος του όγκου του κενού χώρου ( $V_p$ ), δηλαδή του όγκου των πόρων, προς τον ολικό όγκο ( $V_s$ ), ενός δείγματος του πορώδους μέσου:

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

Το πορώδες ονομάζεται απόλυτο ή ολικό όταν αναφέρεται στον ολικό όγκο ( $V_p$ ), των πόρων ανεξάρτητα αν αυτοί συνδέονται ή όχι μεταξύ τους. Όμως όσον αφορά τη ροή μέσα από ένα πορώδες υλικό, ενδιαφέρον παρουσιάζουν μόνο οι πόροι που συνδέονται μεταξύ τους. Έτσι το ενεργό ή αποτελεσματικό πορώδες ορίζεται σαν ο λόγος του συνεκτικού όγκου των πόρων, δηλαδή του όγκου των πόρων που συνδέονται μεταξύ τους προς τον ολικό όγκο του μέσου.



Εικόνα 1.1.: Πορώδες υλικό.

Πολλές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό του πορώδους οι οποίες γενικά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες οι οποίες είναι:

- άμεσες μέθοδοι που βασίζονται στην μέτρηση του όγκου των πόρων και του όγκου του δείγματος,

- έμμεσες μέθοδοι που βασίζονται στη μέτρηση κάποιας ιδιότητας του κενού χώρου του υλικού.

Η πλήρης περιγραφή της πορώδους δομής είναι ανέφικτη παρά την σημαντική πρόοδο που έχει γίνει από ερευνητές τα τελευταία χρόνια. Μερικές από τις πιο γνωστές και ευρύτερα χρησιμοποιημένες πειραματικές τεχνικές για την μέτρηση ορισμένων φυσικών μεταβλητών που έχουν είτε άμεση είτε έμμεση σχέση με τα χαρακτηριστικά του πορώδους είναι:

Άμεσες μέθοδοι :

- Ø **Μέθοδος εισρόφησης.** Σε ένα τέλεια διαβρέχον υγρό βυθίζουμε το πορώδες δείγμα σε συνθήκες κενού για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να έχει σαν αποτέλεσμα την εισρόφηση του υγρού σε όλο τον πορώδη χώρο. Ζυγίζουμε το δείγμα πριν και μετά την εισρόφηση σε συνδυασμό με την πυκνότητα του υγρού. Έτσι έχουμε τον υπολογισμό του όγκου των πόρων. Αν 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. Για τον λόγο αυτό πρέπει να γίνεται η εισρόφηση προσεκτικά ώστε να πάρουμε τις καλύτερες τιμές για το ενεργό πορώδες.
- Ø **Μέθοδος εισόδου υδραργύρου.** Γνωρίζοντας τον όγκο και το βάρος ενός υποδοχέα (διεισδύμετρο υδραργύρου) και μετρώντας το βάρος του δείγματος και το βάρος υποδοχέα-δείγματος-υδραργύρου σε συνδυασμό με την πυκνότητα του υδραργύρου μπορούμε να υπολογίσουμε τον ολικό όγκο του δείγματος. Ο ολικός όγκος των πόρων που συνδέονται μεταξύ τους υπολογίζεται από τον όγκο εισόδου υδραργύρου στην μέγιστη πίεση με την προϋπόθεση βέβαια ότι ο υδράργυρος εισδύει και στους μικρότερους πόρους.
- Ø **Μέθοδος εκτόνωσης αερίου.** Αρχικά ο ολικός όγκος του δείγματος προσδιορίζεται ως εξής: το δείγμα τοποθετείται σε ένα δοχείο γνωστού όγκου υπό γνωστή πίεση αερίου και συνδέεται με ένα δοχείο εκτόνωσης γνωστού όγκου. Το άνοιγμα της βαλβίδας μεταξύ των δοχείων έχει σαν αποτέλεσμα το αέριο να εκτονωθεί μέσα στο δοχείο εκτόνωσης και η πίεσή του κατά συνέπεια να ελαττωθεί. Ο ενεργός όγκος των πόρων μπορεί να υπολογιστεί με βάση το νόμο των ιδανικών αερίων, αφού έχουμε γνωστή την τελική πίεση και τον όγκο του δείγματος.
- Ø **Οπτικές μέθοδοι.** Η πορώδης δομή θεωρείται ότι είναι τυχαία οπότε το πορώδες θα 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.

Επίσης οπτικές μελέτες απλού ηλεκτρονικού μικροσκοπίου μας δίνουν μια πρώτη ένδειξη για την πολυπλοκότητα ως προς τα μεγέθη, τα σχήματα, αλλά και τον τρόπο σύνδεσης των πόρων μεταξύ τους. Ένα πορώδες υλικό αποτελείται από μια ποικιλία σχημάτων και μεγεθών και έχει πολυπλοκότητα ως προς την σύνδεση τους. Έτσι έχει θεωρηθεί στις μετρήσεις αυτές ότι ο πορώδης χώρος μεγάλων σχετικά πόρων είναι οι θάλαμοι οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με μικρότερες στενώσεις που είναι οι λαιμοί.

Για την κατανόηση της πολυπλοκότητας της πορώδους δομής είναι αναγκαία η γνώση των παραγόντων εκείνων που οδήγησαν στον σχηματισμό τους για παραδείγματα

ιζηματογενή πετρώματα που παράγονται με δυο διαφορετικούς τρόπους: με μηχανικά μέσα και με χημικά μέσα. Τα ιζήματα που σχηματίζονται με μηχανικά μέσα είναι η άμμος, χαλίκια, αέρας, νερό. Ιζήματα που σχηματίζονται με χημικά μέσα είναι ο ενεργός άνθρακας, θειικά, φωσφορικά κτλ. Σχεδόν όλα προέρχονται από χημική καθίζηση. Η καθίζηση μπορεί να προκληθεί είτε από εξάτμιση ή με ανόργανες αντιδράσεις μεταξύ διαλυμένων αλάτων είτε έμμεσα με οργανισμούς. Οι κυριότερες διαδικασίες είναι:

- Συμπύεση: Όταν τα ιζήματα θάβονται τα στερεά σωματίδια του ιζήματος συμπιέζονται με αποτέλεσμα το ρευστό που γεμίζει τους πόρους στο ιζήμα να πρέπει να μετακινηθεί άγρα προς τα πάνω δια μέσου του εναποθέματος.
- Διάλυση: μέρος του πρωταρχικού υλικού διασπάτε στο συμφυές νερό των πόρων κατά την διαγέννηση.

Οι διαφορετικές αυτές διεργασίες οδηγούν σε διαφορετικές πορώδεις δομές και άρα σε διαφορετικά είδη πετρωμάτων.

## **1.2. Πορομετρία Υδραργύρου.**

Αναφερόμαστε ιδιαίτερα στην πορομετρία υδραργύρου γιατί είναι μια από τις σπουδαιότερες μεθόδους ανάλυσης της δομής των πορωδών μέσων. Περιλαμβάνει μια πειραματική τεχνική και μια μέθοδο θεωρητικής ανάλυσης των δεδομένων. Η πειραματική τεχνική βασίζεται στην βαθμιαία είσδυση υδραργύρου σε ένα εκκενωμένο πορώδες υλικό καθώς η εξωτερική πίεση αυξάνεται και στην απομάκρυνση υδραργύρου από αυτό καθώς η πίεση ελαττώνεται. Οι σχέσεις μεταξύ κορεσμού υδραργύρου και πίεσης για ένα δεδομένο υλικό αποτελούν τις καμπύλες τριχοειδούς πίεσης.

Πληροφορίες με την πορώδη δομή περιέχονται σε αυτές τις καμπύλες αλλά σε αρκετά περίπλοκη μορφή. 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. Σε αυτό ακριβώς το σημείο βρίσκεται η κύρια δυσκολία στην ερμηνεία καμπυλών τριχοειδούς πίεσης με σκοπό την απόκτηση πραγματικών κατανομών μεγέθους πόρων.

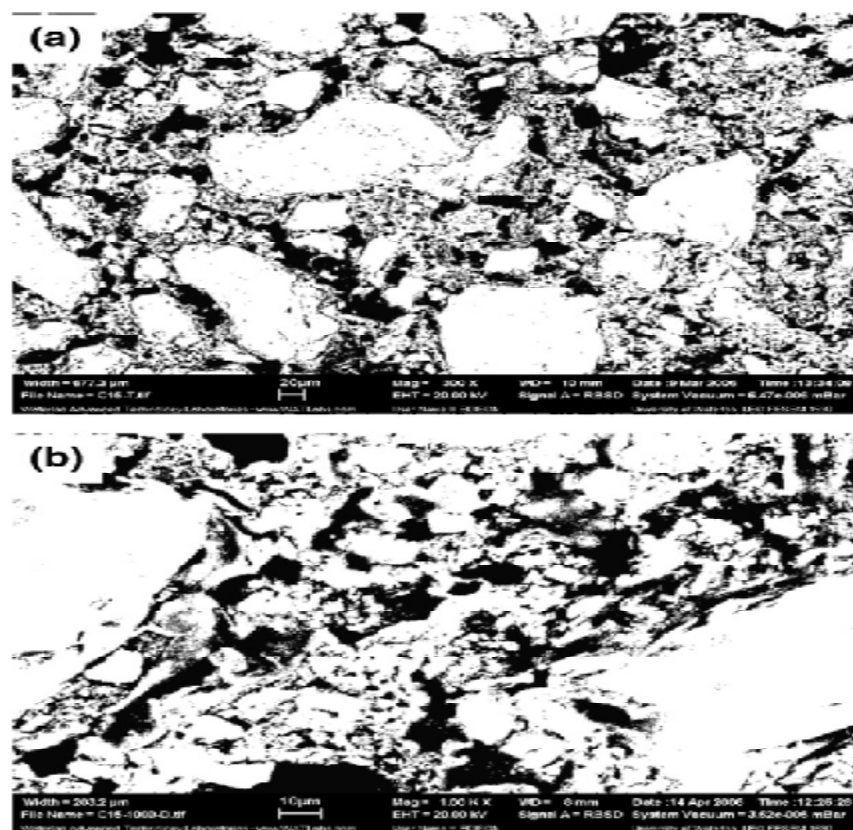
Η συμβατική μέθοδος ανάλυσης βασίζεται στο μοντέλο της παράλληλης δέσμης κυλινδρικών σωλήνων και χρησιμοποιείται ευρύτατα ακόμα και σήμερα, παρόλο που έχει γενικά αναγνωριστεί ότι τα αποτελέσματα της δεν είναι αξιόπιστα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε προσεγγιστική ή συγκριτική βάση.

Αρκετοί ερευνητές 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 αυτών που σχηματίζεται σε μία διάταξη ομοιόμορφων σφαιρών.



Μοντέλα δικτύων πόρων έχουν χρησιμοποιηθεί για την μελέτη της επίδρασης γεωμετρικών, τοπολογικών και στατιστικών παραμέτρων των πορώδων μέσων στις καμπύλες τριχοειδούς πίεσης. Σε αυτά τα μοντέλα ο πορώδης χώρος αναπαριστάνεται με ένα δίκτυο κόμβων και κλάδων όπου σχήμα και μέγεθος δίνεται είτε μόνο στους κλάδους ή σε κόμβους και κλάδους του δικτύου

Το πορώδες μέσο μπορεί να θεωρηθεί σαν δίκτυο αλληλοσυνδεόμενων τριχοειδών σωλήνων διαφορετικών μεγεθών η σαν δίκτυο μεγάλων σχετικά πόρων – (θάλαμοι) αλληλοσυνδεόμενων διαμέσου στενότερων χώρων (λαιμοί). Οπτικές μελέτες σε κοκκώδη υλικά όπως κλίνες κόκκων άμμου καθώς επίσης και σε ορισμένους τύπους ιζηματογενών πετρωμάτων, δείχνουν ότι τα μοντέλα δικτύων λαιμών-θαλαμων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναπαραστήσουν την πορώδη δομή τους.

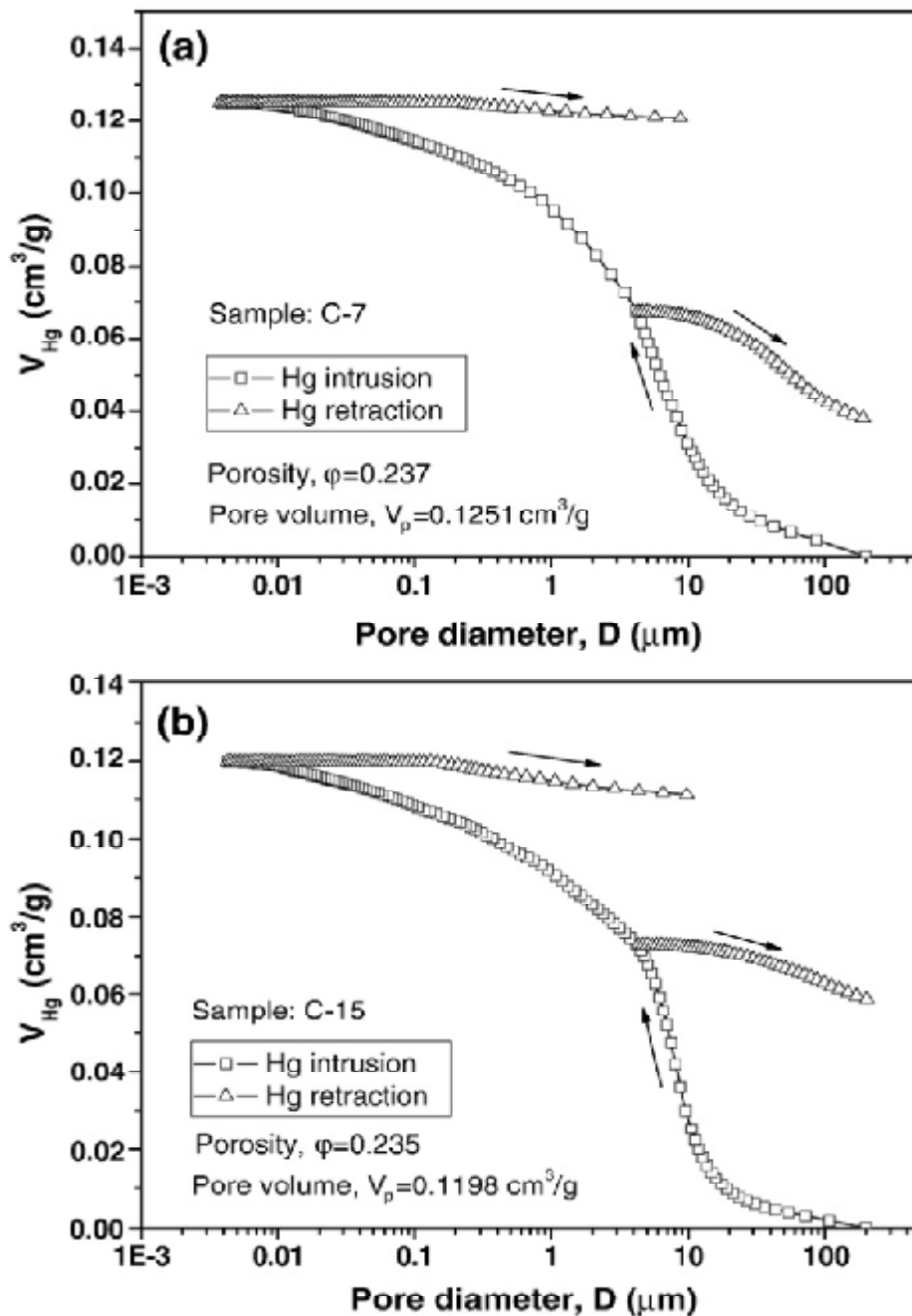


**Εικόνα 1.2.:** Δυαδικές εικόνες BSEM, πορώδες σε δύο μεγεθύνσεις  
(α) 300 (β) 1000.

Πειραματικές μελέτες σε επίπεδα δίκτυα λαιμών-θαλάμων χαραγμένα σε γυάλινες πλάκες μπορούν να δώσουν πληροφορίες σε σχέση με τους μηχανισμούς είσδυσης και απομάκρυνσης υδραργύρου καθώς επίσης και σε σχέση με την επίδραση της

διαβρεκτικότητας του συστήματος αέρας-υδραργύρος-στερεό και γεωμετρικών, τοπολογικών και στατιστικών ιδιοτήτων των δικτύων.

Η μεγάλη σπουδαιότητα της πορομετρίας υδραργύρου όπως εφαρμόζεται σε βιομηχανική κλίμακα βρίσκεται στο γεγονός ότι καλύπτει μια μεγάλη περιοχή μετρίσιμων μεγεθών. Έτσι καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση τόσο των σχετικά μεγάλων πόρων ενός ψαμμιτικού πετρώματος όσο και των μικρών πόρων ενός καταλύτη. Αντίθετα οι οπτικές μέθοδοι περιορίζονται στην μέτρηση μεγεθών μεγαλύτερων από 0,2  $\mu\text{m}$  περίπου στην μέγιστη μεγέθυνση, ενώ οι ισόθερμες ροφήσεις αζώτου μετρούν με ακρίβεια μεγέθη μικρότερα από 0,1  $\mu\text{m}$  περίπου.



**Διάγραμμα 1.1.:** Τυπικές καμπύλες παρείσφρυσης/απόσυρσης υδραργύρου των εδαφολογικών δειγμάτων.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναγνωριστεί ότι μια από τις πιο ακριβείς μεθόδους ανάλυσης της πορώδους δομής διαπερατών στερεών που μπορούν να θεωρηθούν σαν δίκτυα λαιμών-θαλάμων θα μπορούσε να αποτελείται από τον κατάλληλο συνδυασμό τεχνικών όπου η πορομετρία υδραργύρου είναι μια από της συνιστώσες τεχνικές.

Η ανάλυση δεδομένων σειριακών τομών ποροχυτευμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της κατανομής μεγέθους των θαλάμων, παραμέτρων που καθορίζουν την συνεκτικότητα του δικτύου των πόρων και την απόκτηση πληροφοριών σε σχέση με την στατική συσχέτιση γειτονικών θαλάμων. Στην συνέχεια οι καμπύλες τριχοειδούς πίεσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν 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.

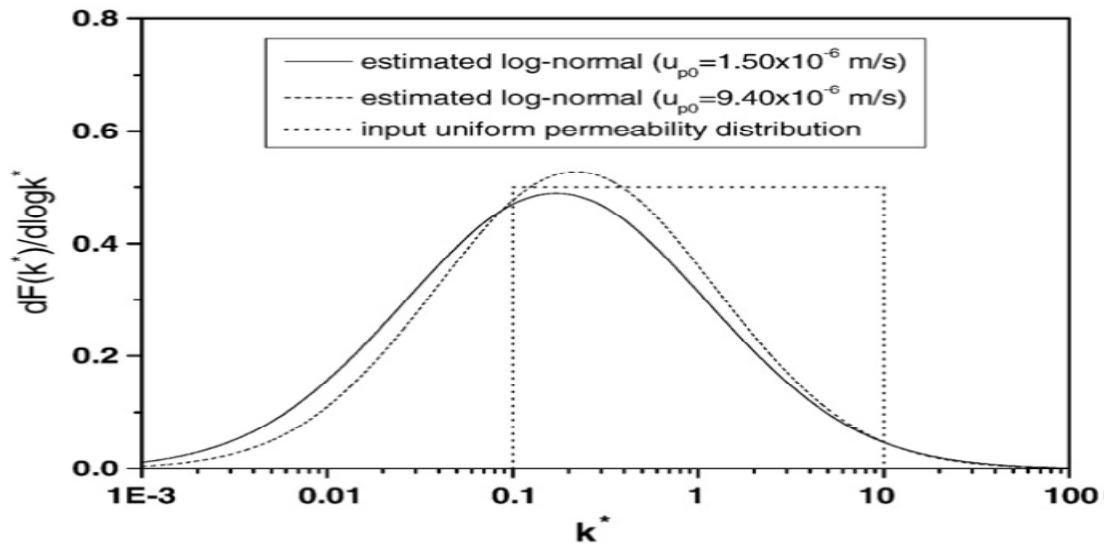
### 1.3. Διαπερατότητα.

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

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

Όπου: Q είναι η ογκομετρική παροχή, A είναι το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του πορώδους δείγματος κάθετα στην διεύθυνση ροής, L είναι το μήκος του πορώδους δείγματος στην διεύθυνση ροής, P είναι η πίεση και  $\mu$  είναι το ιξώδες του ρευστού.

Για τη μέτρηση της διαπερατότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν κυλινδρικοί πυρήνες γνωστού μήκους στους οποίους εισάγεται ρευστό ιξώδες σε συγκεκριμένη παροχή σε οριζόντια ή κάθετη ροή αερίου ή υγρού. Καλύτερες μετρήσεις έχουμε με την χρήση αερίων 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, σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση Q.



**Διάγραμμα 1.2:** Λογαριθμικό διάγραμμα για την διανομή διαπερατότητας στις περιοχές του πορώδους μέσου PM2 όπως συγκρίνεται με την ομοιόμορφη διανομή της πραγματικής διαπερατότητας..

#### 1.4. Τριχοειδή Φαινόμενα.

Τα τριχοειδή φαινόμενα εμφανίζονται και παίζουν σημαντικό ρόλο σε μια ευρεία περιοχή φυσικών και τεχνολογικών διαδικασιών που αφορούν την στατική και δυναμική συμπεριφορά πολυφασικών συστημάτων ρευστών στους κενούς χώρους πορωδών υλικών. Όσον αφορά υλικά με πόρους μικρού μεγέθους η τριχοειδής συμπίκνωση και εξάτμιση πρέπει να ληφθούν υπόψη για την ερμηνεία φαινομένων προσφόρησης και εκρόφησης αέριων σε ενδιάμεσες και υψηλές σχετικές πιέσεις .

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, όπως η εξόρυξη πετρελαίου και η μεταφορά υγρασίας στα εδάφη. 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 θεμελιώδους σπουδαιότητας για την ερμηνεία των αντιστοιχών μακροσκοπικών ιδιοτήτων των διαφόρων τύπων πορωδών υλικών. Άλλωστε οι πιο σημαντικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της πορώδους δομής υλικών βασίζονται στις συσχετίσεις ανάμεσα την τριχοειδή πίεση ή στην σχετική πίεση αερίου και τα μεγέθη πόρων.

## 1.5. Ισορροπία Διεπιφανειών.

Γενικά η διεπιφάνεια μεταξύ δύο ρευστών είναι μια μεταβατική ζώνη με πάχος συγκρίσιμο με τις μοριακές διαστάσεις μια υγρής φάσης ( $2-4 * 10^{-8}$  cm). Για τον ορισμό όμως των διαφόρων θερμοδυναμικών ποσοτήτων μια διεπιφάνεια αναπαριστάται με 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:

$$P_c = P_a - P_b = \gamma J \quad (1.3)$$

όπου  $P_c$  είναι η τριχοειδής πίεση δηλαδή η διαφορά πιέσεων των δυο ρευστών στην γειτονία της διεπιφάνειας,  $\gamma$  είναι η διεπιφανειακή τάση μεταξύ των δυο ρευστών,  $J$  είναι η μέση καμπυλότητα σε οποιαδήποτε σημείο της επιφάνειας.

### 1.5.1. Κίνηση Διεπιφανειών.

Η κίνηση διεπιφανειών σε πόρους έχει γίνει αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών εξαιτίας της σημασίας που έχει ένα τέτοιο φαινόμενο στην ροή δύο φάσεων σε πορώδη μέσα ειδικά σε αναφορά σε διαδικασία εξόρυξης 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 ερευνητές οι οποίοι θεώρησαν συνθήκες στρωτής ροής και διεπιφάνειες σταθερής καμπυλότητας.

Είναι κοινό συμπέρασμα της βιβλιογραφίας ότι οι πειραματικές τιμές πτώσης πίεσης και ταχύτητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό του ιξώδους και ότι οι διαφορές των γωνιών επαφής είναι πρακτικά ανεξάρτητη από την ταχύτητα κίνησης.

Η τριχοειδής είσδυση υγρών σε κατακόρυφους και οριζόντιους τριχοειδούς κυλινδρικούς σωλήνες σε πάρα πολλά συστήματα μπορούν να μελετηθούν πειραματικά έτσι ώστε να δώσουν μια συσχέτιση μεταξύ μήκους είσδυσης και χρόνου θεωρώντας ιξώδη ροή και τριχοειδή πίεση για διεπιφάνεια σταθερής καμπυλότητας.

Όταν το μήκος του ρευστού στον τριχοειδή σωλήνα είναι μεγάλο σε σχέση με την διάμετρο του σωλήνα έχουν παρατηρηθεί σοβαρές αποκλίσεις ακόμη και όταν αυτή η συνθήκη ικανοποιείται. Ιξώδεις δυνάμεις μπορούν να επηρεάσουν το σχήμα της διεπιφάνειας ενώ μη ιξώδης ροή κοντά στην διεπιφάνεια μπορεί να επηρεάσει την ταχύτητα της κίνησης της.

Ο μηχανισμός με τον οποίο μια διεπιφάνεια κινείται κατά μήκος των τοιχωμάτων ενός τριχοειδούς σωλήνα είναι δεδομένος. Κάτω από δυναμικές συνθήκες είναι δυνατόν η διεπιφάνεια να τέμνει τα τοιχώματα του τριχοειδούς σωλήνες σχηματίζοντας μια κινούμενη γραμμή επαφής ρευστού-ρευστού-στερεού. Επίσης είναι δυνατόν ένας λεπτός υμένας του ρευστού που υποχωρεί, να παραμείνει μεταξύ του εισβάλλοντος ρευστού και του τοιχώματος.

Στην περίπτωση αυτή είναι προτιμότερο να περιγραφεί η ροή με όρους κίνησης μιας φαινομενικής γραμμής επαφής εφόσον η ροή υφίσταται σε κλίμακα πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με το πάχος του υμένα. Οι μετρούμενες δυναμικές γωνίες επαφής είναι φαινομενικές καθόσον στην περιοχή της γραμμής επαφής το σχήμα των διεπιφανειών μπορεί να μεταβάλλεται σε κλίμακα μικρότερη από αυτή που παρατηρείται στο πείραμα εξαιτίας ιξωδών δυνάμεων. Διάφορες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό της εξάρτησης δυναμικών γωνιών επαφής από την ταχύτητα κίνησης των διεπιφανειών.

Η παραδοχή ότι δεν υφίσταται ολίσθηση σε μία κινούμενη γραμμή επαφής οδηγεί σε μία κινηματικά ασύμβατη συνθήκη και σε άπειρη δύναμη αντίστασης της κίνησης, γεγονός που στερούνται φυσικής σημασίας. Κάποιοι ερευνητές υπέθεσαν ότι ίσως η συνθήκη μη ολίσθησης να μην ισχύει σε μία κινούμενη γραμμή επαφής. Στην συνέχεια άλλοι ερευνητές έδειξαν ότι μια τέτοια συνθήκη είναι κινηματικά συμβατή θεωρώντας ένα είδος περιστροφικής κίνησης υλών σημείων του ενός ρευστού μεταξύ της διεπιφάνειας και της γραμμής επαφής.

Η διατύπωση μίας συνοριακής συνθήκης ολίσθησης κοντά στην γραμμή επαφής μπορεί να βοηθήσει στην κατεύθυνση της μελέτης της κίνησης της γραμμής επαφής. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε μέθοδος ασυμπτωτικής ανάπτυξης κατά την διάρκεια της βύθισης μιας πλάκας σε ένα μπάνιο υγρού και οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι τα πεδία ταχύτητας που αντιστοιχούν σε τρία διαφορετικά μοντέλα ολίσθησης διαφέρουν πολύ, ενώ σε μεγαλύτερες κλίμακες το πεδίο ροής και το σχήμα της διεπιφάνειας ήταν αναίσητα στην μορφή της συνοριακής συνθήκης ολίσθησης.

Αυτό σημαίνει ότι ενώ η ολική αντίστασή στην ροή επηρεάζεται από το μέγεθος της ολίσθησης, 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 εξισώνονται το μήκος ολίσθησης με το μήκος κλίμακας του φαινομένου που υποτίθεται ότι προκαλεί την ολίσθηση. Άλλοι ερευνητές χρησιμοποίησαν μια συνοριακή συνθήκη ολίσθησης σε μία μέθοδο ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων της μόνιμης έρπουσας κίνησης μια ελεύθερης επιφάνειας υγρού-κενού σε ένα τριχοειδή σωλήνα.

Υπέθεσαν ότι η ολίσθηση στην γραμμή επαφής είναι μοριακό φαινόμενο όπως η επιφανειακή διάχυση και χρησιμοποίησαν ένα μήκος ολίσθησης μοριακής διάστασης. Επίσης θεώρησαν μια απλή διατμητική ροή πάνω σε αυλακωτή επιφάνεια με ραβδώσεις προσανατολισμένες κάθετα στην διεύθυνση ροής.

Στις περιπτώσεις αυτές η μέση ταχύτητα σε μια φαινομενικά επίπεδη επιφάνεια ήταν ανάλογη με την διατμητική τάση πάνω από την επιφάνεια. Το μήκος ολίσθησης ήταν της τάξης του βάθους των ρηχών ραβδώσεων ή του πάχους βαθέων ραβδώσεων ενώ αγνοήθηκε η επίδραση ραβδώσεων παράλληλα προς την διεύθυνση ολικής ροής.

Στην συνέχεια προτάθηκε από διάφορους ερευνητές ένας μηχανισμός στον οποίο η φαινομενική γραμμή επαφής κινείται με μία ακολουθία μικρών αλμάτων. Σε κάθε άλμα η διεπιφάνεια πλαταίνει πάνω από την στερεή επιφάνεια και μπροστά από μία σταθερή γραμμή επαφής, σχηματίζοντας έναν λεπτό υμένα εκτοπισμένου ρευστού. Μια νέα γραμμή επαφής σχηματίζεται όταν αυτός ο υμένας γίνεται ασταθής και καταρρέει. Ένας τέτοιος μηχανισμός δεν απαιτεί την παρουσία τραχύτητας και ονομάζεται μηχανισμός κίνησης-ολίσθησης.

Ο μηχανισμός κίνησης-ολίσθησης μιας διεπιφάνειας κατά μήκος μίας επιφάνειας με μονοδιάστατα περιοδικά στοιχεία τραχύτητας έδειξε ότι ένα μήκος ολίσθησης το οποίο μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με τον τριχοειδή αριθμό (λόγος ιξωδών προς τριχοειδείς δυνάμεις) θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερο από την κλίμακα της τραχύτητας.

Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκε μια μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων για την λύση των εξισώσεων της κίνησης σε μία μόνιμη κατάσταση μίας διεπιφάνειας δύο ιξωδών ρευστών κάτω από συνθήκες αμελητέων δυνάμεων βαρύτητας και αδράνειας. Με την μέθοδο αυτή διαπιστώθηκε η αλληλεπίδραση ιξωδών και τριχοειδών δυνάμεων στον προσδιορισμό του σχήματος της διεπιφάνειας και της απαιτούμενης πτώσης πίεσης για την εκτόπιση.

Στο μοντέλο αυτό θεωρήθηκε ότι συμβαίνει ολίσθηση κατά μήκος του τριχοειδούς σωλήνα κοντά στην γραμμή επαφής και ο συντελεστής ολίσθησης μπήκε σαν παράμετρο στο μοντέλο. Διαπιστώθηκε ακόμη ότι οι φαινομενικές γωνίες επαφής είναι δυνατόν να διαφέρουν σημαντικά σε σχέση με τις αντίστοιχες πραγματικές.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό της κίνησης διεπιφανειών μέσα από πόρους ανομοιόμορφης γεωμετρίας είναι τα άλματα Haines που προκύπτουν εξαιτίας της μετάβασης από ευσταθείς σε ασταθείς διεπιφανειακές διαμορφώσεις. 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 στις οποίες η καμπυλότητα ελαττώνεται είναι ασταθείς με αποτέλεσμα την απότομη κίνηση της διεπιφάνειας και γέμισμα του πόρου που βρίσκεται μπροστά από στένωση. Τέτοια διαδοχικά φαινόμενα σε συστήματα πόρων συμβαίνουν σε πειράματα μέτρησης καμπυλών τριχοειδούς πίεσης, και έχουν σαν αποτέλεσμα ασυνεχείς μεταβολές της τριχοειδούς πίεσης με τον κορεσμό και ερμηνεύουν ως ένα βαθμό την μη αντιστρεπτότητα αυτών των διαδικασιών.

### 1.5.2. Ευστάθεια Διεπιφανειών.

Από διάφορους ερευνητές έχει διαπιστωθεί η δυναμική θεωρία της αστάθειας μιας απείρου μήκους κυλινδρικής στήλης ενός ασυμπίεστου μη ιξώδους ρευστού κάτω από την επίδραση τριχοειδών δυνάμεων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα τους αν η στήλη υποστεί μια διαταραχή με μήκος κύματος  $I_c$  ισχύει:

$$I_c > 2pa_c \quad (1.4)$$

Όπου  $a_c$  η ακτίνα της αδιατάρακτης στήλης. Εδώ η ισορροπία γίνεται ασταθής σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της στατικής θεωρίας. Το μήκος κύματος της διαταραχής που αναπτύσσεται με την μέγιστη ταχύτητα, (όριο μέγιστης αστάθειας) βρέθηκε:

$$I_c = 4.51 * 2a_c \quad (1.5)$$

Η περίπτωση μίας άπειρης κυλινδρικής στήλης ενός ασυμπίεστου ιξώδους ρευστού έχει επίσης ερευνηθεί εκτενέστατα. Αγνοώντας την επίδραση του περιβάλλοντος ρευστού και υποθέτοντας ότι το ιξώδες είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με την αδράνεια, βρέθηκε ότι η μέγιστη αστάθεια αναπτύσσεται όταν το μήκος κύματος της διαταραχής είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με την ακτίνα του κυλίνδρου δηλαδή όταν το  $\lambda_c = \infty$ .

Ενδιαφέρουσες είναι οι πειραματικές παρατηρήσεις σχετικά με τον τρόπο σχηματισμού μιας κυλινδρικής ίνας ενός ρευστού με την επίδραση της ιξώδους οπισθέλκουσας δύναμης ενός άλλου ρευστού τοποθετώντας μία μικρή σταγόνα ενός ιξώδους υγρού, σε ορισμένα διατμητικά πεδία ροής ενός άλλου ιξώδους υγρού για την διαδικασία που είναι πάρα πολύ σημαντική στην μελέτη σχηματισμού γαλακτωμάτων.

Διαπιστώθηκε λοιπόν 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. Έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη μελέτης της ευστάθειας κυλινδρικών ινών κάτω από την επίδραση ιξωδών δυνάμεων του περιβάλλοντος ρευστού.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, μελετήθηκε η ευστάθεια μια άπειρης κυλινδρικής ίνας ενός ιξώδους ρευστού που περιβάλλεται από κάποιο άλλο ιξώδες ρευστό άπειρης μάζας σε ηρεμία. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των μικρών ταλαντώσεων υποθέτοντας κινήσεις συμμετρικές ως προς τον άξονα κυλινδρικής στήλης και έλαβε υπόψη την επίδραση ιξωδών και τριχοειδών δυνάμεων.

Όταν ο λόγος των ιξωδών των δύο ρευστών παίρνει πεπερασμένες τιμές, η μέγιστη αστάθεια συμβαίνει σε πεπερασμένες τιμές του μήκους κύματος της διαταραχής και αυξάνει απεριόριστα καθώς αυτός ο λόγος τείνει στο μηδέν ή στο άπειρο. Μελετήθηκε η επίδραση



της ροής του περιβάλλοντος ρευστού στην ευστάθεια της ίνας σε μερικές κινήσεις που προκαλούνται από μικρές διαταραχές.

Διαπιστώθηκε ότι η ροή του περιβάλλοντος ρευστού περιορίζει την αύξηση οποιασδήποτε αρχικής διαταραχής σε μία πεπερασμένη τιμή γεγονός που σημαίνει ότι το πεδίο ροής ασκεί σταθεροποιητική επίδραση στην κυλινδρική ίνα. Αυτές οι διαπιστώσεις ενισχύθηκαν με πάρα πολλά πειραματικά αποτελέσματα και εξελίχθηκαν με πολύ ακριβές θεωρητικές αναλύσεις.

Σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις, η τριχοειδής αστάθεια μελετάται χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των στερεών τοιχωμάτων που περιορίζουν τα ρευστά. Ενώ λοιπόν αυτές οι μελέτες επεσήμαναν τους παράγοντες που καθορίζουν την αστάθεια ή την ευστάθεια άπειρων κυλινδρικών ινών σε άπειρο μέσο δεν μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα σε φαινόμενα τριχοειδούς ευστάθειας σε πορώδη μέσα όπου υπάρχουν στερεά σύνορα με πεπερασμένες διαστάσεις. Έχουν γίνει αρκετά πειράματα χωρίς όμως να έχει δοθεί κάποια γενική λύση εξαιτίας του γεγονότος ότι οι συνοριακές συνθήκες μεταβάλουν την υφή του προβλήματος.

Κάποιοι ερευνητές μελέτησαν θεωρητικά την δυναμική ευστάθεια λεπτών, μη ιζωδών υγρών υμένων με αξονική συμμετρία που γεφυρώνουν το κενό μεταξύ ομοιοαξονικών δίσκων ίσης διαμέτρου αγνοώντας την επίδραση της βαρύτητας και του περιβάλλοντος ρευστού. Στη ίδια κατεύθυνση άλλοι ερευνητές μελέτησαν το ίδιο πρόβλημα για την περίπτωση ιζώδους ρευστού κάτω από την επίδραση ιζώδους βαρύτητας και έλαβαν υπόψη και την παρουσία εξωτερικού υγρού.

Στην συνέχεια μελετήθηκε η ροή και η παραμόρφωση μιας μεγάλης σταγόνας υγρού που αιωρείται μέσα άλλο υγρό ίδιας πυκνότητας το οποίο κινείται με στρωτή ροή μέσα σε τριχοειδή σωλήνα και σχηματίζει ένα λεπτό υμένα μεταξύ της σταγόνας και των τοιχωμάτων του τριχοειδούς. Διαπιστώθηκε ότι η σταγόνα ήταν ευσταθής όσο υπήρχε ροή και έσπασε σε έναν αριθμό μικρών σταγόνων ίσου μήκους όταν η ροή σταμάτησε με την ανάπτυξη τριχοειδών διαταραχών που κατευθύνθηκαν από τα άκρα προς το κέντρο της σταγόνας.

## 1.6. Διαβρεκτικότητα.

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

$$\text{Cos}\theta_E = \frac{g_{BS} - g_{AS}}{g_{AB}} \quad (1.6)$$

όπου  $\theta_E$  η γωνιά επαφής μετρημένη ως προς την φάση A,  $g_{BS}$  και  $g_{AS}$  οι αντίστοιχες

διεπιφανειακές τάσεις στερεού-ρευστού και  $\gamma_{AB}$  η διεπιφανειακή τάση μεταξύ των δυο ρευστών A και B.

Στην παραπάνω εξίσωση θεωρείται ότι η στερεή επιφάνεια είναι λεία, καθαρή μη παραμορφώσιμη και ομογενής ως προς την επιφανειακή ενέργεια. Σε αυτή την περίπτωση η γωνία επαφής 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, ( $\theta_E$ ), είναι αρκετά συγκεχυμένη. Στην συνέχεια θα λέμε ότι ένα ρευστό διαβρέχει ένα στερεό αν η γωνία επαφής μετρημένη από την πλευρά του ρευστού είναι μικρότερο από  $90^\circ$ . Αντίστοιχα το ρευστό που παρουσιάζει γωνία επαφής μεγαλύτερη από  $90^\circ$  δεν διαβρέχει το στερεό.

Σε ορισμένες περιπτώσεις δεν υπάρχει καμία θέση ισορροπίας της κοινής γραμμής επαφής ρευστού/ρευστού/στερεού. Όταν για παράδειγμα ισχύει:

$$\gamma_{AS} > \gamma_{AS} + \gamma_{AB} \quad (1.7)$$

καμία τιμή της γωνίας επαφής  $\theta_E$  δεν ικανοποιεί την εξίσωση 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.

$$S_{AS} = \gamma_{BS} - \gamma_{AB} - \gamma_{AS} \quad (1.8)$$

Στην πραγματικότητα οι μετρούμενες γωνίες επαφής παρουσιάζουν υστέρηση που εξαρτάται από το γεγονός 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 προϊούσα,  $\theta_A$ , και η υποχωρούσα  $\theta_R$  γωνία επαφής, ενώ γενικά ισχύει:

$$\theta_R \leq \theta_E \leq \theta_A \quad (1.9)$$

Αν η γραμμή επαφής βρίσκεται σε ισορροπία η γωνία επαφής ονομάζεται στατική ενώ εάν 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 ετερογενών στην στερεή επιφάνεια. Η ομοιογένεια της επιφάνειας εξαιτίας της διαφορετικής χημικής σύστασης από σημείο σε σημείο ή χημικές μολύνσεις εξαιτίας της προσρόφησης διαφόρων ουσιών έχουν επιδράσει στην υστέρηση της στατικής γωνίας. Επίσης 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 είναι σε επαφή μπορεί να δημιουργήσει 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 1.1.

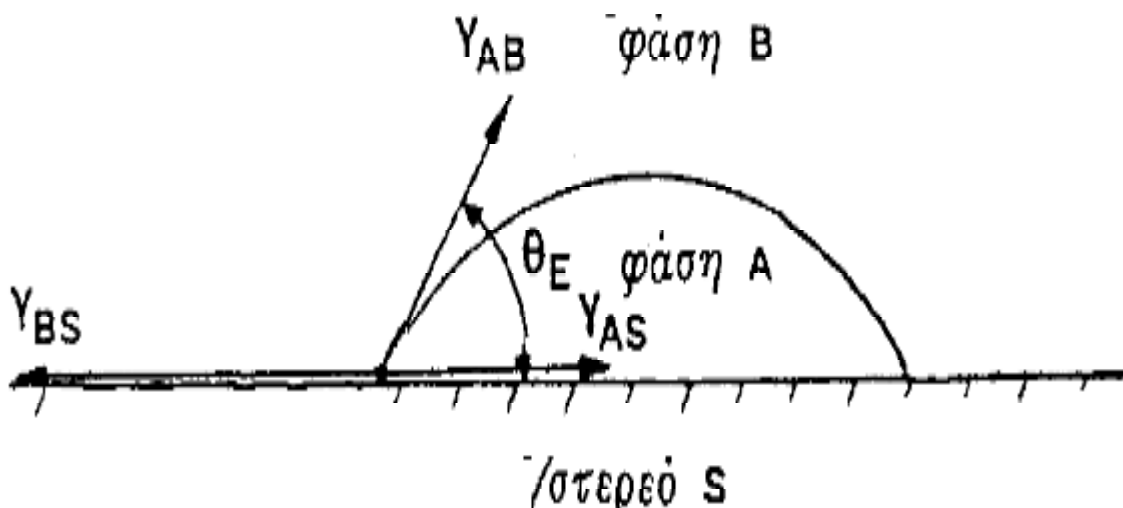
Οι τρεις διεπιφανειακές τάσεις στην ισορροπία συνδέονται με τη σχέση Young-Dupree:

$$g_{ow} \cos \theta_E = g_{os} - g_{ws} \quad (1.10)$$

όπου ( $g_{ow}$ ) η διεπιφανειακή τάση μεταξύ της ελαϊκής και της υδατικής φάσης ενώ, οι ( $g_{os}$ ) και ( $g_{ws}$ ) διεπιφανειακές τάσεις της ελαϊκής και της υδατικής φάσης με τη στερεή επιφάνεια αντίστοιχα.

Η γωνία επαφής ισορροπίας  $\theta_E$  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.



**Σχήμα 1.1:** Ορισμός της πραγματικής γωνίας επαφής ( $\theta_E$ ) και των διεπιφανειακών τάσεων  $\gamma_{AS}$ ,  $\gamma_{BS}$ ,  $\gamma_{AB}$  για ένα σύστημα δύο ρευστών A (water) και B (oil), σε επαφή με μια λεία στερεή επιφάνεια S.

## 1.7. Πίεση Αποσύνδεσης.

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. Αν το πάχος αυτών των υμένων είναι αρκετά μικρό το διαβρέχον υγρό παύει να συμπεριφέρεται όπως η κυρία φάση, η διαφορά τους ονομάζεται πίεση αποσύνδεσης και γενικά εξαρτάται από το πάχος του υμένα.

Σε αυτήν την περίπτωση η τριχοειδής πίεση και η καμπυλότητα δεν 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  $P_c$  είναι η τριχοειδής πίεση μεταξύ των ομογενών φάσεων των δυο ρευστών,  $\pi$  η πίεση αποσύνδεσης και  $h$  το πάχος του υμένα.

## 1.8. Ροή σε Πορώδη Υλικά.

Οι ιδιότητες των πορώδων υλικών που επηρεάζουν την ροή μέσω αυτών είναι:

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

όπου συνδέονται στενά με τα χαρακτηριστικά της μικροδομής του πορώδη χώρου.

Ο πορώδης χώρος περιγράφεται πλήρως 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.

Σημαντική είναι η ηλεκτρική συμπεριφορά μίας πορώδους δομής ενός κορεσμένου πορώδους μέσου.

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 τον λόγο 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.

### **1.8.1. Επίδραση της Διαβρεκτικότητας στη Ροή.**

Η διαβρεκτικότητα επηρεάζει τον εκθέτη κορεσμού και την υστέρηση που παρατηρείται στην τιμή του μεταξύ αποστράγγισης και εισρόφησης. Οι διεργασίες εισρόφησης και αποστράγγισης είναι δύο διαφορετικές διαδικασίες και διαφέρουν πολύ μεταξύ τους με αποτέλεσμα οι φυσικές ιδιότητες που μετρώνται να παρουσιάζουν υστέρηση. Αυτό οφείλεται στις διαμορφώσεις των ρευστών και στις διαφορές των διεπιφανειών που τα διαχωρίζουν λόγω διαφορετικών συνθηκών διαβροχής.

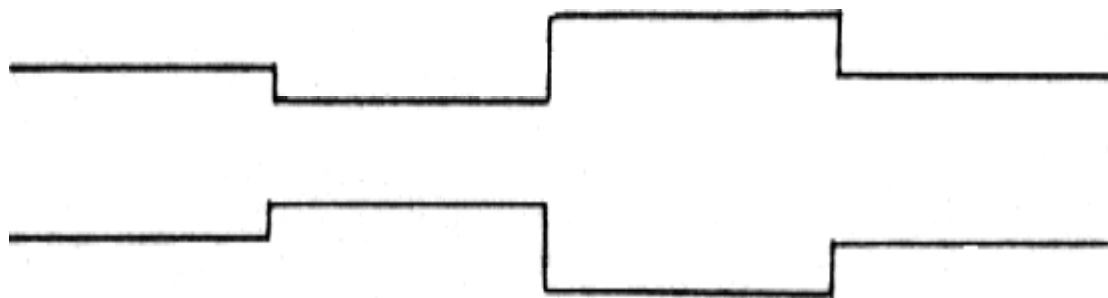
Στην εισρόφηση (imbibition), οι τριχοειδείς δυνάμεις υποβοηθούν τον εισβολέα δηλαδή το εκτοπίζον ρευστό, η διαδρομή που ακολουθεί ξεκινά από τους μικρότερους πόρους και σχηματίζει έναν λεπτό υμένα που καλύπτει τα τοιχώματά τους, ενώ στην αποστράγγιση οι τριχοειδείς δυνάμεις εμποδίζουν τον εισβολέα, ο οποίος τώρα κινείται μέσω των μεγαλύτερων πόρων καταλαμβάνοντας το εσωτερικό τους.

Οι τιμές του 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.

## **1.9. Μοντέλα Δικτύων Πόρων.**

Σαν ένα τρισδιάστατο δίκτυο αλληλοσυνδεόμενων πόρων πολύπλοκης γεωμετρίας μπορεί να θεωρηθεί η δομή των περισσότερο πραγματικών πορωδών μέσων. Τα δίκτυα αυτά συνδέονται με έναν τυχαίο ή μη σύνθετο τρόπο μεταξύ τους, οι πόροι κατανέμονται μέσα στο δίκτυο σε διαφορετικά σχήματα δημιουργώντας ανώμαλη γεωμετρία.

Η αναπαράσταση τους γίνεται με απλοποιημένα μοντέλα δικτύων πόρων με ομαλή γεωμετρία ώστε οι φυσικοχημικές διεργασίες που συμβαίνουν σε πορώδη μέσα να μπορούν να γίνουν με μαθηματική περιγραφή. Ένα μονοδιάστατο δίκτυο είναι μια αλυσίδα τριχοειδών τμημάτων διαφορετικού μεγέθους και συγκεκριμένου σχήματος.



**Σχήμα 1.2: α)** Μονοδιάστατο δίκτυο τριχοειδών σωλήνων.

Μια πορώδης δομή μπορεί να αναπαρασταθεί στην από ένα τρισδιάστατο πλέγμα κόμβων και δεσμών, ορισμένα διδιάστατα δίκτυα παρουσιάζουν κάποιο είδος συμμετρίας. Ένα δίκτυο δεν είναι αναγκαίο να έχει τετραγωνικό ή τριγωνικό ή κυκλικό σχήμα αλλά είναι αναγκασμένο να μπορεί να αναπαρασταθεί γεωμετρικά στις διάφορες θεωρητικές μελέτες. Οι δεσμοί θεωρούνται τριχοειδείς σωλήνες διάφορων μεγεθών αλλά ίδιου σχήματος.

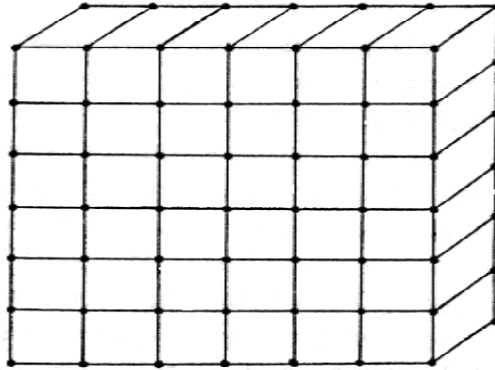
Οι κόμβοι, (nodes) θεωρούνται σαν περιοχές τομής των διαφόρων τριχοειδών χωρίς αντίσταση (υδραυλική, ηλεκτρική). Σε μια πιο ρεαλιστική αναπαράσταση της πορώδους δομής, τα μεγέθη και τα σχήματα αποδίδονται τόσο στους δεσμούς όσο και στους κόμβους του δικτύου.



**Σχήμα 1.2: β)** Διάφοροι τύποι διδιάστατων δικτύων

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.

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



. **Σχήμα 1.2:** γ) Τρισδιάστατο δίκτυο δύο επιπέδων.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον ποσοτικό χαρακτηρισμό ενός διδιάστατου ή τρισδιάστατου δικτύου λαιμών / θαλάμων είναι:

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

Σημαντική επίδραση στις ιδιότητες μεταφοράς πορωδών μέσων έχουν:

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

### **1.9.1. Θεωρητικά Μοντέλα Ροής σε Πορώδη Υλικά.**

Για την πρόβλεψη των μακροσκοπικών συντελεστών μεταφοράς υπογείων ταμιευτήρων χρησιμοποιούνται μοντέλα δικτύων πόρων. Τα τελευταία χρόνια, έχουν εφαρμοστεί σε φαινόμενα μεταφοράς των πορωδών μέσων ιδέες από τη στατιστική φυσική των τυχαίων μέσων.

Στη πράξη μπορούμε να περιγράψουμε τις διαδικασίες μεταφοράς (ροής) στο πορώδες υλικό με την θεωρία διείσδυσης σε τυχαίο μέσο, των ιδιοτήτων αγωγιμότητας μιγμάτων ηλεκτρικά αγωγίμων και μη αγωγίμων υλικών. Με το πέρας του χρόνου μέσα από πειράματα έγινε αντιληπτό πως οι ίδιες αρχές είναι εφαρμόσιμες στην μοντελοποίηση της διαφασικής ροής σε πορώδη μέσα. Έτσι λοιπόν για την κατανόηση και την ερμηνεία των πολυφασικών ιδιοτήτων μεταφοράς των πορωδών μέσων χρησιμοποιήθηκε η θεωρία διείσδυσης.

Στην περιοχή του ορίου διείσδυσης (percolation threshold), η κρίσιμη συμπεριφορά ενός συστήματος περιγράφεται από τους γενικούς νόμους κλιμάκωσης, καθώς οι μακροσκοπικές του ιδιότητες γίνονται ανεξάρτητες από την μικροσκοπική τους δομή. Στη συνέχεια αναφέρονται οι βασικότερες ιδέες της θεωρίας διείσδυσης όπως εκφράζονται σε πορώδη μέσα.

Ένα πορώδες δείγμα είναι μια μεγάλη συλλογή συνδεδεμένων πόρων, είναι το κλάσμα των πόρων έχει την ιδιότητα να μεταβιβάσει ρευστό, διότι τα μεγέθη των πόρων αυτών είναι μεγαλύτερα από κάποια τιμή για την εισβολή μιας μη διαβρέχουσας φάσης. Οι πόροι αυτοί ονομάζονται ανοιχτοί αλλά η θέση τους στο δείγμα είναι τυχαία.

Το  $(p)$  είναι το κλάσμα των ανοιχτών πόρων δηλαδή των όρων που είναι καινούρια να διαβιβαστούν στο μη διαβρέχον ρευστό (open pores). Ορισμένοι από αυτούς συνδέονται με την εξωτερική επιφάνεια του δείγματος μέσω συνεχών μονοπατιών, το κλάσμα τους είναι  $X_a$  και ονομάζονται προσβάσιμοι (accessible). Προσβάσιμοι πόροι για ένα μεγάλο δείγμα είναι αυτοί που συνδέονται σε μια άπειρη συστάδα συνεχών ανοιχτών πόρων.

Αν η τιμή του  $p$  είναι μικρή καμία άπειρη συστάδα αυτού του είδους δεν υπάρχει και οι ανοιχτοί πόροι κατανέμονται σαν απλοί πόροι (singlets) ή μικρές συστάδες απομονωμένων πόρων. Καθώς το  $p$  αυξάνεται, οι απομονωμένες συστάδες μεγαλώνουν σε μέγεθος και συνδέονται μεταξύ τους έτσι ώστε σε μια κρίσιμη τιμή του  $p$  να εμφανιστεί για πρώτη φορά συνεχών ανοιχτών πόρων (network spanning cluster) διαμέσου του δείγματος μια άπειρη συστάδα.

Αυτή η κρίσιμη τιμή,  $p_c$ , ονομάζεται «κατώφλι διείσδυσης» (percolation threshold) του πορώδους μέσου. Καθώς το  $p$  αυξάνεται πάνω από το  $p_c$  το κλάσμα των προσβάσιμων πόρων  $X_a$ , σε ένα άπειρο μέσο αυξάνεται πάνω από το μηδέν και βαθμιαία φθάνει στη μονάδα καθώς το  $p$  τείνει προς τη μονάδα. Η σχέση μεταξύ  $p$  και  $X_a$  ονομάζεται συνάρτηση πρόσβασης (accessibility function) και στη γενική περίπτωση καθορίζεται από την τοπολογία και ετερογένεια του πορώδους.

Οι κατηγορίες των μοντέλων διείσδυσης που χρησιμοποιούνται στην εξομοίωση διεργασιών ροής δύο φάσεων σε δίκτυα λαιμών και θαλάμων είναι δυο:

- Στο 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.
- Στα μοντέλα διείσδυσης κόμβου. Κάθε κόμβος έχει μια σταθερή πιθανότητα να είναι ανοιχτός ενώ όλοι οι δεσμοί είναι ανοιχτοί.

Και τα δύο μοντέλα έχουν διαφορετικές συναρτήσεις πρόσβασης καθώς επίσης διαφορετικές τιμές  $P_c$ , (κατώφλι διείσδυσης).



## 1.10. Χαρακτηρισμός Ενός Συστήματος Διείσδυσης.

Οι ιδιότητες μεταφοράς της διείσδυσης και η συνεκτικότητα των συστάδων χαρακτηρίζονται από ορισμένες ποσότητες, οι οποίες είναι:

- Η πιθανότητα διείσδυσης  $P(p)$ , που ορίζεται σαν η πιθανότητα ένας δεδομένου δεσμού να ανήκει στην συστάδα διείσδυσης (percolation cluster), όταν το κλάσμα των ανοικτών δεσμών είναι  $p$ .
- Η συνάρτηση πρόσβασης  $X_a(p)$ , η οποία ορίζει το κλάσμα των ανοικτών δεσμών που ανήκουν στην συστάδα διείσδυσης.
- Το μήκος συσχέτισης  $\xi_p(p)$ , το οποίο 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  $p > p_c$ .
- Η αποτελεσματική αγωγιμότητα  $g_e$ , ορίζεται σαν το κλάσμα της αγωγιμότητας της συστάδας διείσδυσης προς την αγωγιμότητα του δικτύου αν όλοι οι δεσμοί ήταν αγωγιμοί.

Κάποιοι γενικευμένοι νόμοι κλιμάκωσης (universal scaling laws) της θεωρίας διείσδυσης έχουν εξαχθεί μέσω προσομοιώσεων σε δίκτυα αυξανόμενου μεγέθους. Κοντά στο κατώφλι διείσδυσης ( $p_c$ ), ισχύουν οι ακόλουθοι νόμοι κλιμάκωσης:

$$\begin{aligned}
 p_{(p)} &\propto (p - p_c)^{\beta_p} \\
 X_a(p) &\propto (p - p_c)^{\beta_p} \\
 \xi_p(p) &\propto |p - p_c|^{-\nu_p} \\
 g_e(p) &\propto (p - p_c)^m
 \end{aligned} \tag{1.12}$$

Οι εκθέτες ( $\beta_p$ ), ( $\nu_p$ ), και ( $m$ ) ονομάζονται κρίσιμοι εκθέτες, εξαρτώνται μόνο από την διαστατικότητα ( $d$ ) του συστήματος και είναι ανεξάρτητοι από μικροσκοπικές λεπτομέρειες του συστήματος. Στον πίνακα που ακολουθεί αναγράφονται οι 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
$\beta_p$	5/36	0.41
$\nu_p$	4/3	0.80
M	1.3	2.00

**Πίνακας 1.1:** Τιμές των κρίσιμων εκθετών.

## 1.11. Μη Αναμίξιμες Εκτοπίσεις δυο Φάσεων.

### 1.11.1. Παράμετροι της Ροής

Οι αδιάστατοι παράμετροι που έχουν επίδραση στο μεταβατικό πρότυπο εκτόπισης είναι οι εξής:

- **Τριχοειδής αριθμός:** Ο τριχοειδής αριθμός (capillary number) ορίζεται ως ο λόγος των ιξωδών προς τις τριχοειδείς δυνάμεις και δίνεται από τη σχέση:

$$Ca = \frac{u_o m_o}{g_{ow}} \quad (1.13)$$

Όπου  $u_o$  και  $m_o$  η φαινομενική ταχύτητα και το ιξώδες του εκτοπίζοντος ρευστού και  $g_{ow}$  η διεπιφανειακή τάση μεταξύ των δύο ρευστών.

- **Λόγος ιξωδών:** Ο λόγος ιξωδών ορίζεται ως ο λόγος του ιξώδους του εκτοπίζοντος ρευστού προς το ιξώδες του εκτοπιζόμενου ρευστού, δηλαδή:

$$M = \frac{m_o}{m_w} \quad (1.14)$$

- **Αριθμός Bond:** Ο αριθμός Bond ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων άνωσης προς τις τριχοειδείς δυνάμεις σε κλίμακα πόρου και δίνεται από τη σχέση:

$$B = \frac{\Delta r g_z \langle r_t \rangle \langle d_g \rangle}{2g_{ow} \cos \theta_E} \quad (1.15)$$

Όπου ( $g_z$ ) είναι η συνιστώσα της βαρύτητας κατά τη διεύθυνση της ροής, ( $\langle d_g \rangle$ ) η μέση διάμετρος των κόκκων, ( $g_{ow}$ ) η διεπιφανειακή τάση, ( $\theta_E$ ) η γωνία επαφής στην ισορροπία και  $\Delta\rho = \rho_o - \rho_w$  η διαφορά πυκνότητας μεταξύ των δύο ρευστών.

### 1.11.2. Επίδραση της Άνωσης στο Πρότυπο Εκτόπισης Δυο Φάσεων.

Η αποστράγγιση ελέγχεται μόνο από την τριχοειδή πίεση που υπολογίζεται από την διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο ρευστών

$$P_c = P_{nw} - P_w \quad (1.16)$$

όπου ( $P_{nw}$ ), ( $P_w$ ) είναι η πίεση της μη διαβρέχουσας και της διαβρέχουσας φάσης αντίστοιχα.

Συνεπώς αναφερόμαστε στην περίπτωση της μη αναμίξιμης εκτόπισης ενός διαβρέχοντος ρευστού από ένα μη διαβρέχον σε ένα πορώδες μέσο (αποστράγγιση) και απουσία ιξωδών και βαρυτικών δυνάμεων.

Μια ακόμη ανάλογη μέθοδος της κλασσικής θεωρίας διείσδυσης είναι η θεωρία διείσδυσης εισβολής. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον πόρο και να μοντελοποιηθεί με τη βοήθεια της θεωρίας διείσδυσης εισβολής (invasion percolation-IP), στην οποία το μέτωπο που διαχωρίζει τα δύο ρευστά προχωρά εισχωρώντας στους πόρους με το μεγαλύτερο μέγεθος (με τη μικρότερη τριχοειδή αντίσταση).

Η αποστράγγιση έχει μοντελοποιηθεί με τη βοήθεια της θεωρίας διείσδυσης εισβολής υπό βαθμίδα (gradient invasion percolation), δέχεται την παρουσία βαρυτικών και την απουσία ιξωδών δυνάμεων, όπου η τριχοειδής πίεση μεταβάλλεται γραμμικά κατά τη διεύθυνση της εκτόπισης  $x$ . Κατά την μελέτη της διαδικασίας αυτής διακρίνουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις που αντιστοιχούν σε σταθεροποιημένη ή αποσταθεροποιημένη εκτόπιση.

- Στην πρώτη περίπτωση όπου  $B < 0$

Όταν υπάρχει εκτόπιση ενός ρευστού προς τα κάτω από κάποιο άλλο μικρότερης πυκνότητας, η πιθανότητα διείσδυσης μειώνεται κατά τη διεύθυνση της εκτόπισης:

$$\left( \frac{dp}{dx} = -|B| < 0 \right) \quad (1.17)$$

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

$$s = B^{-n/(n+1)} \quad (1.18)$$

όπου  $n$  είναι ο εκθέτης του μήκους συσχέτισης.

- Στην περίπτωση αποσταθεροποιημένης εκτόπισης με  $B > 0$

Όταν υπάρχει εκτόπιση ρευστού προς τα πάνω από άλλο χαμηλότερης πυκνότητας, η πιθανότητα διείσδυσης αυξάνεται κατά τη διεύθυνση της εκτόπισης:

$$\left( \frac{dp}{dx} = |B| > 0 \right) \quad (1.19)$$

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η εκτόπιση να προχωρά με τη μορφή τριχοειδών δακτύλων (capillary fingering), το πάχος των οποίων επίσης ικανοποιεί την εξίσωση:

$$s = B^{n/(n+1)} \quad (1.20)$$

Παρουσία τόσο τριχοειδών όσο και ιξωδών δυνάμεων, η εκτόπιση χαρακτηρίζεται από τρεις αδιάστατους αριθμούς:

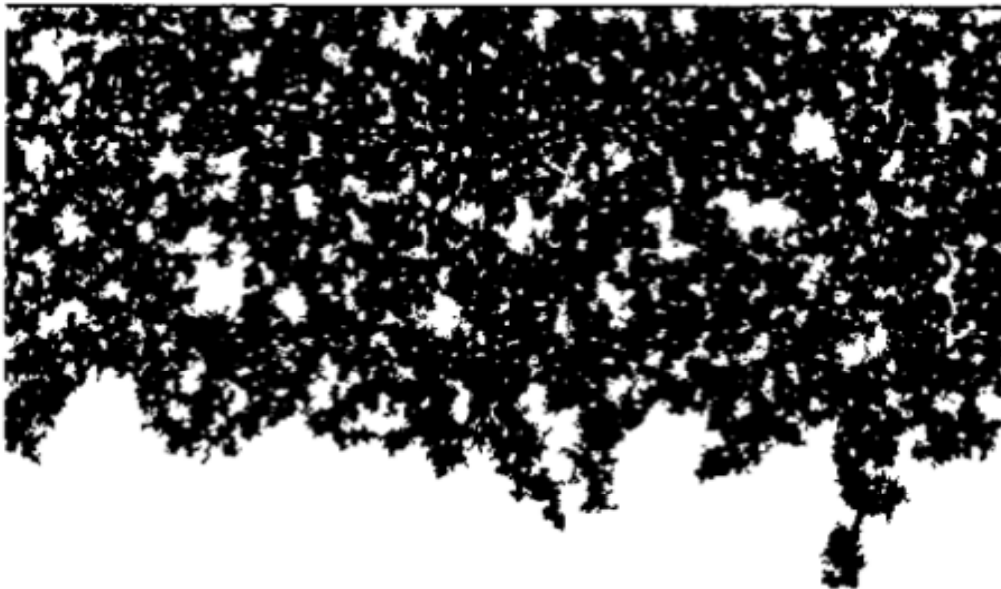
- Τον τριχοειδή αριθμό.
- Το λόγο ιξωδών.
- Το αδιάστατο μέγεθος του συστήματος,  $L$ , εκφρασμένο σε μονάδες του μέσου μήκους του πόρου,  $l$ .

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

$$s = Ca^{-a} \quad (1.21)$$

Όπου  $a$  είναι ο εκθέτης που εξαρτάται από τις ιδιότητες πρόσβασης και το μήκος συσχέτισης.

Συμπερασματικά: η ανάπτυξη ενός σταθερού μετώπου όπως παρατηρούμε στην εικόνα 3 (α) σε μια εκτόπιση ευνοείται από υψηλούς ρυθμούς έκχυσης, λόγους ιξωδών μεγαλύτερους της μονάδας και από αρνητικές διαφορές πυκνότητας μεταξύ του εκτοπίζοντος και του εκτοπιζόμενου ρευστού.



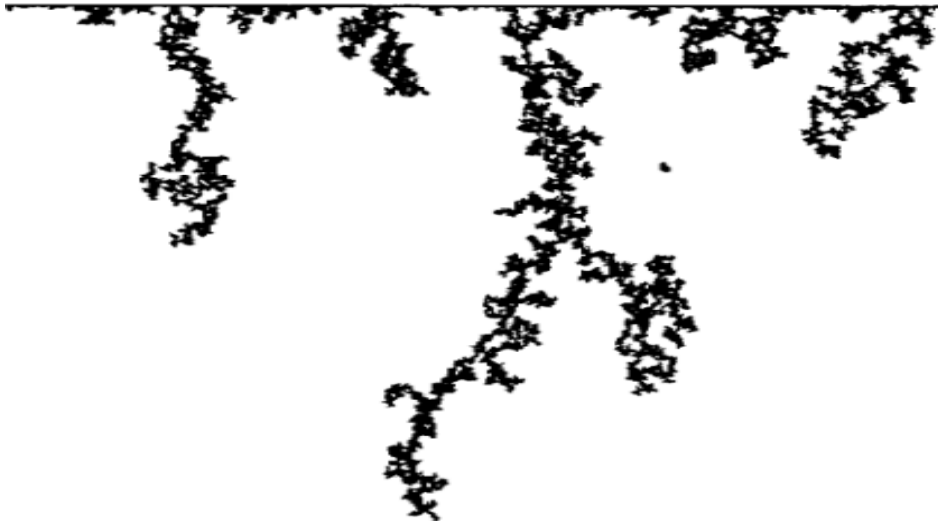
**Εικόνα 1.3.:** Μη αναμίξιμη εκτόπιση υδατικής (άσπρο) από μη υδατικής φάσης (μαύρο)  
(α) Ανάπτυξη σταθερού μετώπου.

Ο σχηματισμός τριχοειδών δακτύλων (capillary fingering) όπως βλέπουμε την εικόνα 3 (β) εννοείται από χαμηλούς ρυθμούς έκχυσης και θετικές διαφορές πυκνότητας.



**Εικόνα 1.3.:** Μη αναμίξιμη εκτόπιση υδατικής (άσπρο) από μη υδατικής φάσης (μαύρο).  
(β) Σχηματισμός τριχοειδών δακτύλων (capillary fingering)

Σε αντίθεση με τους μη σταθερούς και εξαρτώμενους από την κλίμακα παρατήρησης ιξώδεις δάκτυλοι (viscous fingering) όπως φαίνεται και στην εικόνα 3 (γ) εννοούνται από λόγους ιξωδών μικρότερους της μονάδας και από υψηλούς ρυθμούς ροής.



**Εικόνα 1.3.:** Μη αναμίξιμη εκτόπιση υδατικής (άσπρο) από μη υδατικής φάσης (μαύρο).  
(γ) Σχηματισμός ιξωδών δακτύλων (viscous fingering).

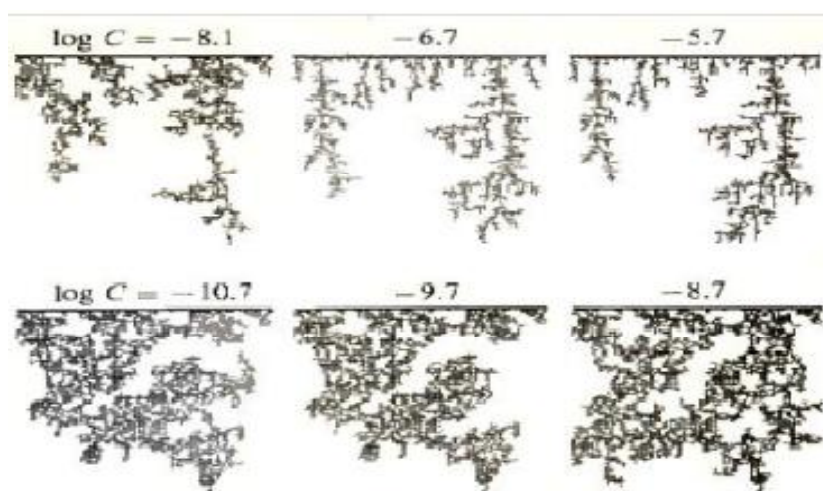
Το μεταβατικό πρότυπο εκτόπισης που αναπτύσσεται μέσα σε ένα πορώδες μέσο είναι μεγάλης σημασίας για την σωστή διατύπωση και ερμηνεία των δεδομένων της ηλεκτρικής αντίστασης πετρωμάτων που προέρχονται από εργαστηριακές δοκιμές ισορροπίας ή δυναμικές.

Όταν το εκτοπίζον ρευστό έχει μικρότερο ιξώδες από το εκτοπιζόμενο ( $M > 1$ ) και η εκτόπιση πραγματοποιείται με γρήγορο ρυθμό (υψηλός Ca), το πρότυπο εκτόπισης έχει τη μορφή ιξωδών δακτύλων. Αν, όμως, ελαττωθεί ο ρυθμός εκτόπισης η μορφή του καθεστώτος ροής αλλάζει και πλέον παρατηρούνται τριχοειδείς δάκτυλοι (Εικόνα 4 α).

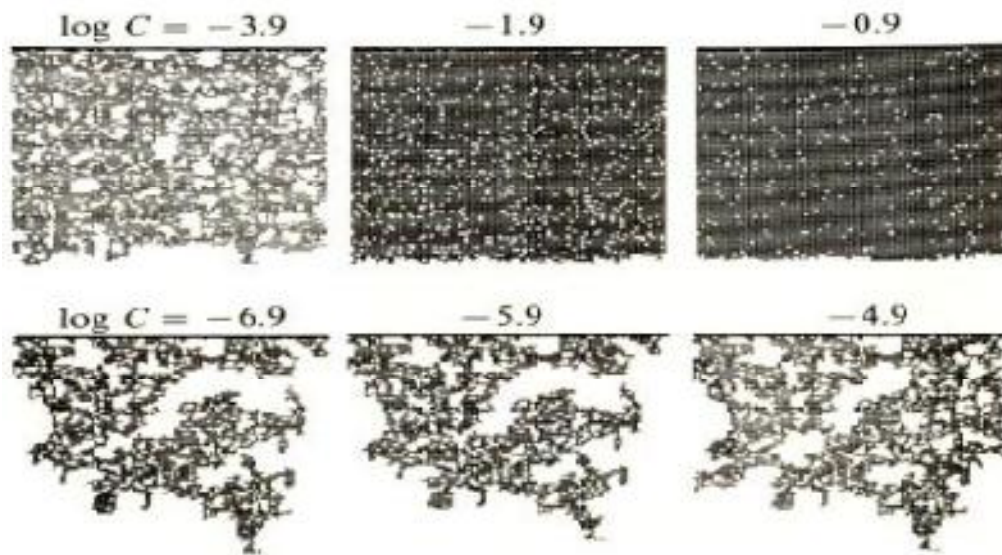
Στην περίπτωση που παρατηρείται μια συνεχής μετάβαση μεταξύ δύο μορφών εκτόπισης. Το πρώτο είδος εκτόπισης επικρατεί σε χαμηλούς τριχοειδείς αριθμούς, όπου επικρατούν τα τριχοειδή φαινόμενα και η εκτόπιση προχωρά με τη μορφή τριχοειδών δακτύλων, και το δεύτερο σε υψηλούς τριχοειδείς αριθμούς όπου παρατηρείται σταθερό μέτωπο (Εικόνα 4 β).

Τέλος, στην περίπτωση σταθερού ρυθμού ροής, το μεταβατικό πρότυπο εκτόπισης μεταβάλλεται προοδευτικά καθώς ο λόγος ιξωδών από τιμές μικρότερες της μονάδας λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας και από τη μορφή των ιξωδών δακτύλων σταδιακά μεταβαίνουμε σε σταθερή εκτόπιση (Εικόνα 4 γ).

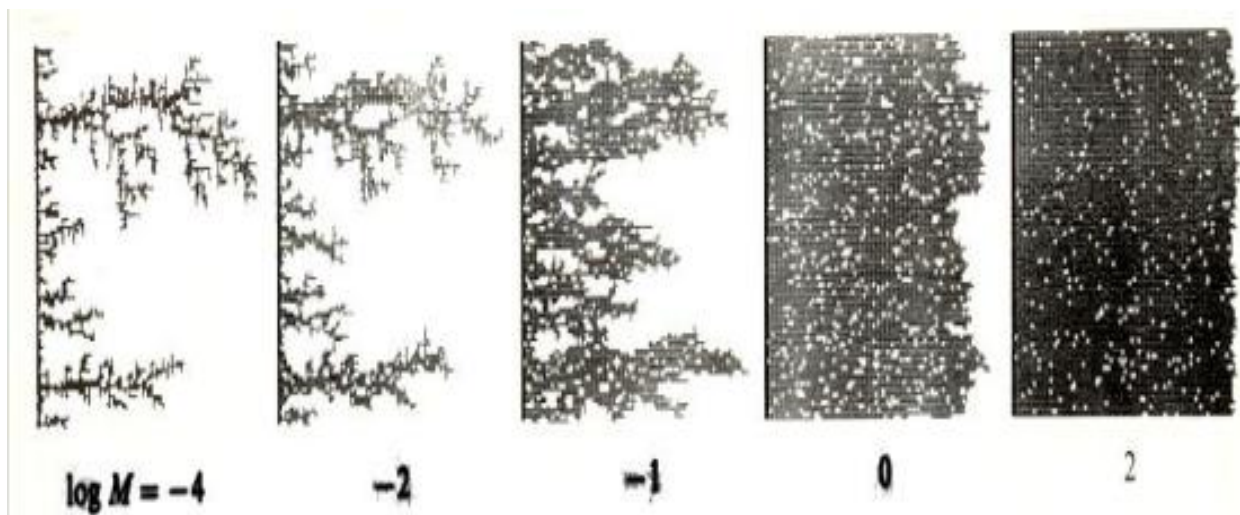
Ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιείται και ανάλογα με την πειραματική διαδικασία η χωρική και χρονική κατανομή του κορεσμού δια μέσου του πορώδους μέσου διαφέρει. Με την ανάλυση που πραγματοποιήσαμε παραπάνω μπορούμε να κατανοήσουμε τι συμβαίνει κατά την διάρκεια της μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης σε δείγματα μεγάλου σχετικά μήκους. α)



β)



γ)



**Εικόνα 1.4.:** Μετάβαση μεταβατικού προτύπου εκτόπισης.  
(α) Ιξώδεις δακτύλους σε τριχοειδείς δακτύλους.  
(β) Σταθερή εκτόπιση σε τριχοειδείς δακτύλους  
(γ) Ιξώδεις δακτύλους σε σταθερή εκτόπιση.

## 1.12. Παράγοντας Σχηματισμού.

Ο παράγοντας σχηματισμού ( $F$ ), είναι ο λόγος της ηλεκτρικής αντίστασης ( $R_0$ ), του πορώδους υλικού πλήρως κορεσμένου με ένα ηλεκτρολύτη προς την αντίσταση του ηλεκτρολύτη ( $R_w$ ), όταν καταλαμβάνει πλήρως το χώρο ( $\phi=1$ ):

$$F = \frac{R_0}{R_w} \quad (1.22)$$

Ο παράγοντας σχηματισμού (formation factor) είναι το μέτρο της επίδρασης της πορώδους δομής στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του περιεχομένου στους πόρους του ηλεκτρολύτη. Ορίζεται για υλικά στα οποία η στερεή μήτρα έχει αμελητέα ηλεκτρική αγωγιμότητα όπως 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. Επίσης ο παράγοντας σχηματισμού καθορίζεται μόνο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πορώδους εφόσον δεν υπάρχει επιφανειακή αγωγή από την αλληλεπίδραση ρευστού-στερεού.

Η επίδραση της πορώδους δομής στην ηλεκτρική αγωγιμότητα μπορεί να αποδοθεί σε δύο αιτίες:

- Στην ελάττωση της εγκάρσιας διατομής που το ρευστό έχει διαθέσιμη για ροή.
- Στον προσανατολισμό και στην τοπολογία των αγωγίμων πόρων.

Κατά καιρούς έχουν πραγματοποιηθεί από έρευνες για τις συσχετίσεις μεταξύ του παράγοντα σχηματισμού και μακροσκοπικών παραμέτρων, με ποιο γνωστή την εξίσωση του Archie:

$$F = a j^{-m} \quad (1.23)$$

όπου ( $\phi$ ) είναι το πορώδες, ( $m$ ) εκθέτης ενοποίησης (cementation exponent) και ( $a$ ) ο παράγοντας σχήματος (shape factor).

Με τη βοήθεια της θεωρίας αποτελεσματικού μέσου (effective medium theory) έχει βρεθεί ότι ο εκθέτης ενοποίησης δίνεται από την σχέση:

$$m = \frac{c_n}{c_{n-2}} \quad (1.24)$$

όπου ( $c_n$ ) ο αριθμός συνδιάταξης ενός δικτύου πόρων. Με τον όρο συνδιάταξη εννοούμε τον αριθμό συνδέσεων ανά πόρο.



Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται υδατικά διαλύματα NaCl συγκέντρωσης μεγαλύτερης από 10gr/lit και για τον προσδιορισμό του παράγοντα σχηματισμού είναι: Αν  $k_p$ ,  $k_w$  είναι οι ειδικές αγωγιμότητες του πορώδους μέσου γεμάτου με το υδατικό διάλυμα και του υδατικού διαλύματος, αντίστοιχα, ο παράγοντας σχηματισμού μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$F = \frac{k_w}{k_p} \quad (1.25)$$

Η στερεή επιφάνεια ενός πορώδους πετρώματος ή εδάφους υπό κανονικές συνθήκες είναι αρνητικά φορτισμένη και 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 συμβολίζεται με  $k_s$  και 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:

$$\frac{k_r}{k_w} = \frac{k_p + k_s}{k_w} = \frac{1}{F} + \frac{k_s}{k_w} \quad (1.26)$$

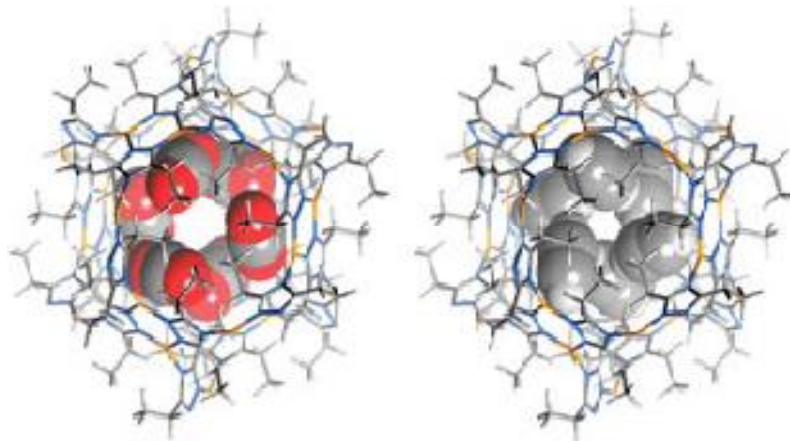
Άρα θα πρέπει η συγκέντρωση του διαλύματος να είναι μεγάλη έτσι ώστε να υπερνικάτε η επίδραση της διπλής ιονοστοιβάδας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2.1. Ηλεκτρικές Ιδιότητες Πορωδών Υλικών.

Η ερμηνεία των καμπυλών δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης και της τριχοειδούς πίεσης υδατικής / μη υδατικής φάσης των πορωδών υλικών είναι χρήσιμη σε πολλές εργασίες της μηχανικής όπως:

- (α) Στον προσδιορισμό του επιπέδου ρύπανσης ταμιευτήρων υπογείων υδάτων με οργανικούς ρύπους (non-aqueous phase liquids, NAPLs).
- (β) Στην εκτίμηση κορεσμού του συμφυούς νερού (connate water) και των αποθεμάτων πετρελαίου ενός κοιτάσματος όπως η μηχανική των ταμιευτήρων.
- (γ) Στην μέτρηση της υγρασίας εδαφών.
- (δ) 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.



**Εικόνα 2.1.:** Ηλεκτρικές ιδιότητες πορωδών υλικών

Η ερμηνεία των μετρήσεων δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης βασίζεται στην εξίσωση του Archie, που συνδέει το δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης ενός μερικώς κορεσμένου πετρώματος με το επίπεδο κορεσμού του νερού σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_R = \frac{R_t}{R_o} = S_w^{-n} \quad (2.1)$$

όπου ( $R_t$ ), ( $R_o$ ) είναι οι ηλεκτρικές αντιστάσεις μερικώς και πλήρως κορεσμένου με νερό πετρώματος αντίστοιχα και μετρώνται αντίστοιχα με δοκιμές φρεατίων (well-logs), ενώ ( $n$ ) είναι ο εκθέτης κορεσμού (saturation exponent) που βρίσκεται μέσω εργαστηριακών μετρήσεων σε πυρήνες πετρωμάτων (cores).

Η παραπάνω σχέση ισχύει υπό δύο προϋποθέσεις :

- Η σχέση  $I_R(S_w)$  χαρακτηρίζεται από ένα σταθερό και μοναδικό εκθέτη ( $n$ ) για ένα πορώδες μέσο.
- Οι εργαστηριακά προσδιοριζόμενες τιμές του ( $n$ ) είναι εφαρμόσιμες στον ταμιευτήρα (δηλαδή ισχύουν για τον συγκεκριμένο ταμιευτήρα).

Σε ορισμένες περιπτώσεις οι παραπάνω υποθέσεις μπορεί να μην ισχύουν. Ειδικότερα:

1. Ο εκθέτης κορεσμού για το ίδιο πορώδες δείγμα, μπορεί να είναι συνάρτηση του κορεσμού της υδατικής φάσης και της ιστορίας κορεσμού.
2. Οι τιμές του εκθέτη κορεσμού μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικές του ταμιευτήρα. (Αν υπάρχει διαφορά της διαβρεκτικότητας των πυρήνων και του πορώδους σχηματισμού).
3. Οι γεωμετρικές ιδιότητες των πόρων, η κατανομή μεγέθους πόρων οι ιδιότητες της πορώδους δομής, ακόμα και η παρουσία μικροπορώδους, επηρεάζουν δραστικά την ηλεκτρική συμπεριφορά.
4. Η τιμή του εκθέτη κορεσμού επηρεάζεται από τις συνθήκες πραγματοποίησης των μετρήσεων ηλεκτρικής αντίστασης.

Οι τιμές του εκθέτη κορεσμού διαφοροποιούνται μεταξύ των πειραμάτων ισορροπίας και των δυναμικών πειραμάτων. Ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει τιμή του εκθέτη κορεσμού μπορεί να είναι οι δυνάμεις άνωσης που επηρεάζουν την κατανομή των ρευστών σε ένα πορώδες μέσο μεγάλου μήκους.

Έχουν γίνει πειράματα για τη θεωρητική ερμηνεία των αποκλίσεων από τον νόμο του Archie καθώς επίσης και για την προσομοίωση του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης. Όμως κανένα πείραμα δεν έχει καταλήξει σε μία συστηματική μελέτη για την έκφραση γενικής μαθηματικής σχέσης που να συνδέει την επίδραση των μικροδομικών ιδιοτήτων του πορώδους και της διαβρεκτικότητας της επιφάνειας στον δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης, εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των παραμέτρων που απαιτούνται για να περιγράψουμε το πρόβλημα.

## 2.2. Θεωρητική Ερμηνεία Δείκτη Ηλεκτρικής Αντίστασης με Μοντέλα Δικτύων Πόρων.

Έχουν γίνει αρκετές έρευνες και πειράματα για να προσομοιώσουν την ηλεκτρική αντίσταση μερικώς κορεσμένων με νερό πορωδών μέσω των χρησιμοποιώντας μοντέλα δικτύων πόρων. Τα κυριότερα μοντέλα που έχουν προταθεί για την ερμηνεία των δεικτών ηλεκτρικής αντίστασης είναι τα εξής:

- **Μοντέλο διείσδυσης – εισβολής.**

Όταν χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά τα δίκτυα από κυλινδρικούς πόρους διαπιστώθηκε ότι ο εκθέτης κορεσμού επηρεάζεται από τον αριθμό συνδιάταξης (coordination number) και το εύρος της κατανομής των μεγεθών των πόρων. Επίσης, ο 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.

- **Μοντέλο Wang – Sharma.**

Με βάση τα παραπάνω μπορεί να εξηγηθεί η ανώμαλη συμπεριφορά που παρατηρείται σε κάποια είδη άμμων. Ένα άλλο μοντέλο δικτύου αναπτύχθηκε από τους Wang και Sharma με σκοπό την προσομοίωση των καμπυλών του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης πορωδών πετρωμάτων για διαδικασίες αποστράγγισης (drainage) και εισρόφησης (imbibition).

Για να ερμηνευθεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα κανονικών κυβικών πλεγμάτων βρέθηκε ότι η υψηλή συνεκτικότητα του δικτύου οδηγεί σε σχετικά χαμηλές τιμές του εκθέτη κορεσμού για ισχυρά υδατοδιαβρεκτά και ελαιοδιαβρεκτά δίκτυα πόρων.

Ο εκθέτης κορεσμού μειώνεται όσο ο λόγος πόρου / λαιμού μειώνεται για υδατοδιαβρεκτά δίκτυα πόρων, ενώ ο εκθέτης κορεσμού αυξάνεται και εμφανίζονται φαινόμενα υστέρησης για ελαιοδιαβρεκτά δίκτυα πόρων. Προσομοιώσεις σε κανονικά κυβικά δίκτυα έδειξαν ότι η υστέρηση μεταξύ των καμπυλών του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης για αποστράγγιση και εισρόφηση είναι πιο έντονη για ελαιοδιαβρεκτά παρά για υδατοδιαβρεκτά συστήματα.

### 2.2.1. Μοντέλο Διείσδυσης Δεσμού για Αποστράγγιση (bond percolation model).

Το μοντέλο διείσδυσης δεσμού για αποστράγγιση μπορεί να ερμηνευθεί αρκετά ικανοποιητικά για την ηλεκτρική συμπεριφορά των πορωδών υλικών και βασίζεται στις εξής παραδοχές:

- Το δίκτυο πόρων καταλαμβάνεται μόνο από ένα τέλει διαβρέχον και ηλεκτρικά αγωγίμο ρευστό, το νερό.
- 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 αγωγιμη φάση όπως το λάδι.

- Στην έξοδο του δικτύου τοποθετείται μεμβράνη η οποία είναι διαπερατή μόνο από το νερό και όχι από το λάδι κατά την πειραματική μελέτη του συστήματος.
- Η διαφορά τάσης, ( $\Delta U$ ), 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, ( $P_c$ ), και το κλάσμα των ανοιχτών δεσμών στο διαβρέχον ρευστό, δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_c = \frac{g}{r_p} \quad (2.2)$$

$$q = \int_0^{r_p} f(r) dr = F(r_p) \quad (2.3)$$

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 ξεπερνάται το όριο διείσδυσης. Για προβλήματα διείσδυσης δεσμού, μελέτες έχουν δείξει ότι το όριο διείσδυσης της μη διαβρέχουσας φάσης, ( $P_c$ ), δίνεται από τη σχέση:

$$p_c \cong 1 - \frac{d}{(d-1)c_n} \quad (2.4)$$

όπου ( $d$ ) είναι η τοπολογική διάσταση και ( $c_n$ ) ο αριθμός συνδιάταξης.

Το μοντέλο διείσδυσης έχει μια κύρια διαφορά από προηγούμενα μοντέλα που βασίζονται στη θεωρία διείσδυσης εισβολής, δηλαδή:

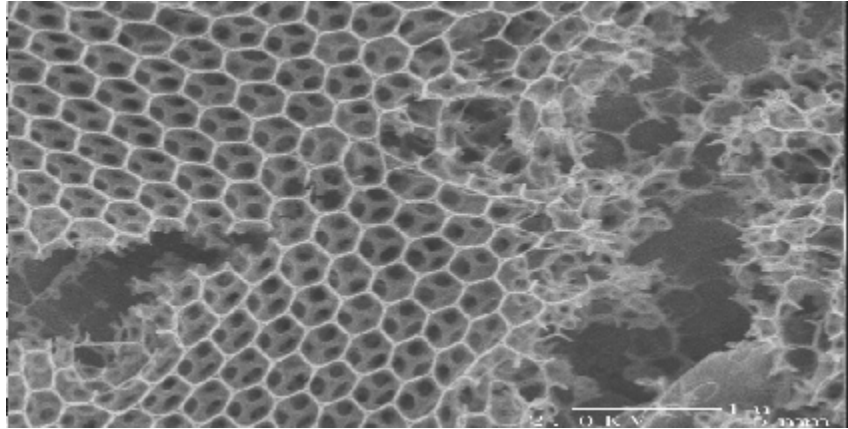
- Το δίκτυο πόρων αποτελείται μόνο από δεσμούς δηλαδή τριχοειδείς σωλήνες και οι κόμβοι δεν έχουν καμία οντότητα.
- Ένας κόμβος καταλαμβάνεται από τη μη διαβρέχουσα φάση, υπάρχει και υδραυλική και ηλεκτρική επικοινωνία κάθε ζεύγους συνδεδεμένων πόρων, οι οποίοι είναι ακόμα κατειλημμένοι από το διαβρέχον ρευστό, δηλαδή το νερό δεν διακόπτεται.

Η συνέχεια της διαβρέχουσας φάσης διατηρείται ακόμα και για χαμηλές τιμές του κλάσματος των ανοιχτών δεσμών, ( $q$ ), και το όριο διείσδυσης της διαβρέχουσας φάσης, ( $q_c$ ), συνδέεται με το όριο διείσδυσης της μη διαβρέχουσας, ( $p_c$ ), μέσω της σχέσης:

$$q_c \cong 1 - p_c \quad (2.5)$$

### 2.2.2. Μοντέλο Κλασματικής Τραχύτητας.

Η εσωτερική επιφάνεια των πόρων μπορεί να αναπαρασταθεί στο μοντέλο αυτό με κλασματικά μοντέλα αυτό-ομοιότητας τύπου κηρήθρας. Στο μοντέλο αυτό το πορώδες υλικό μπορεί να κατασκευάζεται 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.



Εικόνα 2.2.: Κλασματικά μοντέλα τύπου κηρήθρας.

Η διαδοχική ταξινόμηση όμοιων τόξων με μικρότερες ακτίνες πάνω σε κάθε τόξο του προηγούμενου στρώματος γεννά την επιθυμητή κλασματική δομή όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο σχήμα 2.1. Η κλασματική διάσταση, ( $D_f$ ), μιας τέτοιας αυτό-όμοιας δομής είναι ίση με:

$$D_f = \frac{\ln v_s}{\ln I_s^{-1}} \quad (2.6)$$

Όπου ( $v_s$ ) ο αριθμός των υπο-δομών που τοποθετούνται πάνω στην προηγούμενη δομή και ( $I_s$ ) ο λόγος μεγεθών της χαρακτηριστικής διάστασης σε δύο διαδοχικές δομές.

Όταν τα αυτοόμοια 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  $A \propto S_w$  και κατ' επέκταση:

$$I_R \propto S_w^{-1} \quad (2.7)$$

δεδομένου ότι από τη σχέση  $R = r \frac{l}{A}$  έχουμε ότι  $R \propto A^{-1}$ .

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ότι ο εκθέτης κορεσμού είναι πάντα μονάδα στην περιοχή χαμηλού κορεσμού ύδατος ανεξάρτητα από τις κλασματικές ιδιότητες της πορώδους δομής.

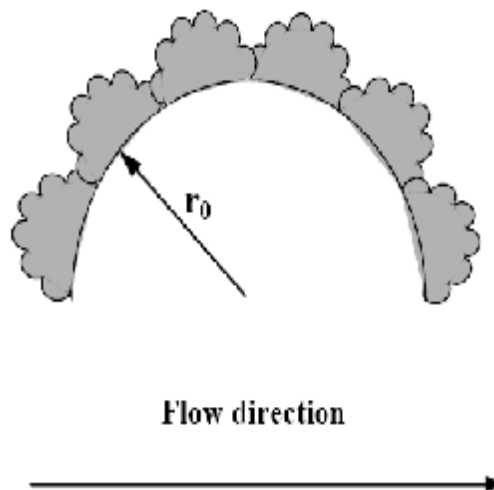
Όταν τα αυτοόμοια χαρακτηριστικά της κλασματικής τραχύτητας είναι κάθετα στην κύρια διεύθυνση της ροής εκτός από τη μείωση της διατομής του πόρου, αυξάνονται και τα αποτελεσματικά μήκη των αγωγίμων μερών των χαρακτηριστικών της τραχύτητας καθώς μειώνεται ο κορεσμός της αγωγίμης υδατικής φάσης. Στην περίπτωση 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, ( $D_L$ ), δίνεται από τη σχέση:

$$D_L = \frac{\ln n_f}{\ln(n_f/p)} \quad (2.8)$$

Όπου ( $n_f$ ) ο χαρακτηριστικός αριθμός των αυτό-όμοιων χαρακτηριστικών τραχύτητας που τοποθετούνται πάνω σε ένα χαρακτηριστικό του προηγούμενου στρώματος. Η γραμμική κλασματική διάσταση συνδέεται με την επιφανειακή κλασματική διάσταση, ( $D_s$ ), με τη σχέση:

$$D_L = D_s - 1 \quad (2.9)$$



**Σχήμα 2.1:** Αυτό-όμοια κλασματική επιφάνεια.

### 2.2.3. Μοντέλο Διείσδυσης Δεσμού - Κλασματικής Τραχύτητας.

Στο μοντέλο η αποστράγγιση λαδιού-νερού περιγράφεται σύμφωνα με τους παραπάνω κανόνες, λαμβάνοντας υπόψη τις ακόλουθες τροποποιήσεις:

- Ø Κάθε πόρος στον οποίο έχει ήδη εισχωρήσει η μη διαβρέχουσα φάση (λάδι) είναι μερικώς κορεσμένος από την διαβρέχουσα φάση (νερό). Σ'αυτή την περίπτωση ο όγκος του νερού που βρίσκεται στον πόρο και η ηλεκτρική του αγωγιμότητα δίνονται από τις σχέσεις:

$$V_w(r) = c_p \left(\frac{r}{r_p}\right)^{D_s-3} V(r) \quad (2.10)$$

$$g_w(r) = \frac{1}{B} \left(\frac{r}{r_p}\right)^{-D_s+1} g(r) \quad (2.11)$$

όπου  $(V_r)$ ,  $(g_r)$  είναι ο όγκος του πόρου και η ηλεκτρική του αγωγιμότητα

Όταν είναι πλήρως κατειλημμένος με νερό και δίνονται από σχέσεις:

$$V(r) = c_1 r^b \quad (2.12)$$

$$g(r) = c_2 r^a \quad (2.13)$$

Στις παραπάνω σχέσεις είναι η ακτίνα ( $r$ ) του πόρου και η ελάχιστη ακτίνα ( $r_p$ ) των πόρων όπου επιτρέπεται να εισχωρήσει το μη διαβρέχον ρευστό. Οι παράγοντες,  $(C_1)$ ,  $(C_2)$  είναι σύνθετες συναρτήσεις των άλλων διαστάσεων των πόρων, ενώ οι εκθέτες ( $a$ ), και ( $b$ ) συνδέονται με το γεωμετρικό μοντέλο των πόρων. Τέλος, με  $(c_p)$  συμβολίζεται ο λόγος του κλασματικού πορώδους προς το συνολικό πορώδες και με  $(B)$  ο λόγος της κλασματικής ηλεκτρικής αντίστασης προς τη συνολική ηλεκτρική αντίσταση.

- Ø όταν ξεπεραστεί το όριο διείσδυσης μπορεί ακόμα να διατηρείται η υδραυλική και η ηλεκτρική συνέχεια της διαβρέχουσας φάσης, αφού 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.



### 2.3. Προσεγγιστικές Σχέσεις για το Δείκτη Ηλεκτρικής Αντίστασης, και την Τριχοειδή Πίεση.

Αρκετοί ερευνητές για να καταλήξουν και να βγάλουν κάποια συμπεράσματα χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο δικτύου πόρων για τη 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.

Έτσι με τη χρήση της προσέγγισης 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.

Επίσης ασχολήθηκαν με τις αλλαγές στις καμπύλες του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης και τριχοειδούς πίεσης που προκαλούνται από την μόνιμη παγίδευση του διαβρέχοντος ρευστού. Ο εκθέτης κορεσμού είναι πεπερασμένος μόνο όταν παραμένει και παγιδεύεται στην διαβρέχουσα φάση κατά μήκος των τοιχωμάτων των πόρων.

Στην περίπτωση που έχουμε μόνιμη παγίδευση του διαβρέχοντος ρευστού, μια προσεγγιστική σχέση που συνδέει τον κορεσμό του νερού με την τριχοειδή πίεση στην γειτονιά του ορίου διείσδυσης της διαβρέχουσας φάσης, είναι η εξής:

$$\frac{P_c}{g_{ow}} \cong \frac{1}{\langle r_t \rangle} \left[ \frac{s_w - s_{wc1}}{c_p (1 - s_{wc1})} \right]^{-1/(3-D_s)} \quad (2.14)$$

όπου  $\langle r_t \rangle$  είναι η μέση ακτίνα λαιμών και ( $s_{wc1}$ ) ο κορεσμός της υδατικής φάσης που παγιδεύεται σε άπειρη τριχοειδή πίεση (δηλαδή όταν αποστραγγιστεί όλο το νερό που απομένει σε περιοχές τραχύτητας των πόρων). Αντίστοιχα, ο δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης δίνεται από τη σχέση:

$$\left( \frac{dp}{dx} = -|B| < 0 \right) \quad (2.15)$$

$$I_R \cong B \left[ \frac{s_w - s_{wc1}}{c_p (1 - s_{wc1})} \right]^{-(D_s-1)/(3-D_s)} \quad (2.16)$$

Ο εκθέτης κορεσμού δίνεται από τη σχέση:

$$n = \frac{d \ln I_R}{d \ln s_w} \quad (2.17)$$

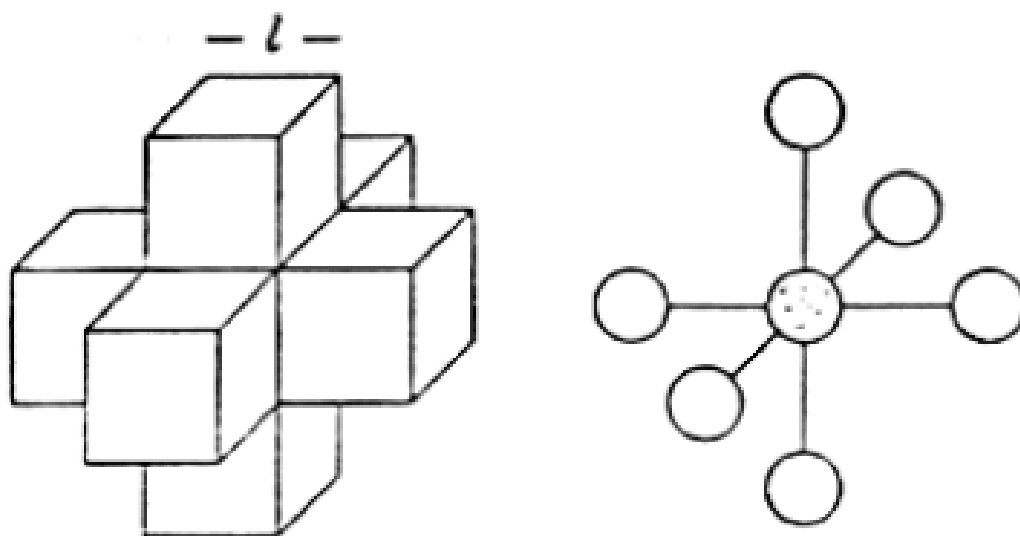
Σε χαμηλούς κορεσμούς ύδατος, έχουμε αυξομείωση για τα πορώδη συστήματα με χαμηλή ή υψηλή τιμή της κλασματικής τραχύτητας, αντίστοιχα. Το  $(n)$  παίρνει πεπερασμένες τιμές, σε μικρές τιμές ( $S_w$ ), μόνο όταν το διαβρέχον ρευστό δεν παγιδεύεται στο δίκτυο πόρων.

Από γενικευμένες παραμετρικές συναρτήσεις του κορεσμού ύδατος μπορεί να περιγραφεί επιτυχώς ο δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης, όπου οι τιμές των παραμέτρων είναι στενά συνδεδεμένες με τις γεωμετρικές, τοπολογικές και κλασματικές ιδιότητες της πορώδους δομής και τη διαβροχή της επιφάνειας των πόρων.

### 2.3.1. Μοντέλο Διείσδυσης Μεγάλης Κλίμακας.

Για την περιγραφή των διαδικασιών εκτόπισης σε ετερογενή πορώδη μέσα μεγάλου μήκους είναι σημαντική η θεωρία διείσδυσης μεγάλης κλίμακας (large-scale percolation theory). Αρχές από τη θεωρία διείσδυσης εφαρμόζονται σε μια μακροσκοπικά ετερογενή περιοχή στην οποία η κατανομή διαπερατοτήτων είναι τυχαία.

Σε ένα πορώδες μέσο μήκους  $L$ , η απόλυτη διαπερατότητα είναι μια συνεχής μεταβλητή των συντεταγμένων του χώρου και μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα δίκτυο κύβων ακμής  $l$ . Κάθε κύβος έχει τα δικά του χαρακτηριστικά, όπως την διαφορετική τιμή διαπερατότητας, διαφορετική τιμή τριχοειδούς πίεσης και επίσης μπορεί να διαθέτει έξι εγγύτατους γείτονες όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο Σχήμα 2.3. Πρόκειται δηλαδή για μοντέλο στο οποίο κάθε πόρος συνδέεται με έξι γειτονικούς πόρους μέσω δεσμών, οι οποίοι δεν έχουν οντότητα.



Σχήμα 2.2: Δίκτυο κύβων

## 2.4. Μέθοδοι Μέτρησης Δείκτη Ηλεκτρικής Αντίστασης και Καμπύλων Τριχοειδούς Πίεσης.

Η μέτρηση της καμπύλης  $I_R(S_w)$  είναι βασισμένη στο ότι ο κορεσμός δια μέσου του πορώδους δείγματος είναι ομογενής. Είναι λοιπόν μια συνθήκη που σπάνια επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια μιας εκτόπισης που πραγματοποιείται σε ένα πορώδες δείγμα μεγάλου μήκους.

Για τον υπολογισμό και την μέτρηση των καμπυλών δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης και τριχοειδούς πίεσης υπάρχουν διάφορες μέθοδοι.

**Μέθοδος πορώδους πλάκας (porous plate):** πραγματοποιείται όταν ο δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης μετράται συγχρόνως με την καμπύλη τριχοειδούς πίεσης κάτω από συνθήκες τριχοειδούς ισορροπίας. Έχουμε την σταθερή αύξηση της τριχοειδούς πίεσης αφού προηγουμένως επιτυγχάνεται η αποκατάσταση της ισορροπίας του συστήματος.

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι είναι αρκετά χρονοβόρα προκειμένου το σύστημα να φτάσει σε ισορροπία σε κάθε πίεση, αν και η χρήση της τεχνικής της μικροπορώδους μεμβράνης (αντί κεραμικής μεμβράνης) έχει μειώσει αισθητά τη χρονική διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

Συνήθως 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.

**Η μέθοδος συνεχούς έκχυσης (continuous injection), η μέθοδος σταθερής κατάστασης (steady state) και η μέθοδος γρήγορης μέτρησης του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης (FRIM):** Σε δυναμικές δοκιμές που εκτελέστηκαν κάτω από συγκεκριμένους ρυθμούς ροής έγινε φανερό πως η χρονική μεταβολή της κατανομής των δύο φάσεων στους πόρους επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση τριών βασικών παραγόντων:

- α) των τριχοειδών
- β) των ιξωδών και
- γ) των δυνάμεων άνωσης.

Το πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι η γρήγορη και αποτελεσματική μέτρηση των καμπυλών του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης. Για τον λόγο αυτό θεωρείται καλύτερη η επιλογή τους.

Η τιμή του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης που μετράται με δυναμικές μεθόδους δεν είναι μοναδική και οι συνθήκες ροής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση δεδομένων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1. Διηλεκτρικές Ιδιότητες Πορωδών Υλικών.

#### 3.1.1. Πυκνωτές.

Δυο αγωγοί που διαχωρίζονται από ένα μονωτή αποτελούν ένα πυκνωτή. Ένας πυκνωτής όταν φέρει φορτίο  $Q$ , είναι οπλισμένος αγωγός με το θετικό δυναμικό έχει φορτίο  $Q$  και ο οπλισμένος αγωγός με το αρνητικό δυναμικό έχει φορτίο  $-Q$ . Η χωρητικότητα  $C$  ενός πυκνωτή είναι ο λόγος του μέτρου του φορτίου  $Q$  των δύο οπλισμών προς το μέτρο της διαφοράς δυναμικού  $V$  μεταξύ των οπλισμών:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (3.1)$$

Ένας επίπεδος πυκνωτής αποτελείται από δύο παράλληλες αγωγίμες πλάκες, εμβαδού  $A$ , που απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $d$ . Η χωρητικότητά του στο κενό δίνεται από τη σχέση:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (3.2)$$

όπου  $\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά του κενού με τιμή  $8.854e^{-12}$  F/m.

Οι πυκνωτές στην διάταξη τους έχουν ένα μη αγωγίμο υλικό, δηλαδή ένα διηλεκτρικό, μεταξύ των οπλισμών τους. Οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές χρησιμοποιούν ένα πολύ λεπτό στρώμα μη αγωγίμου οξειδίου μεταξύ μιας μεταλλικής πλάκας και ενός αγωγίμου διαλύματος. Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή όταν παρεμβάλλεται διηλεκτρικό μεταξύ των οπλισμών του είναι:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (3.3)$$

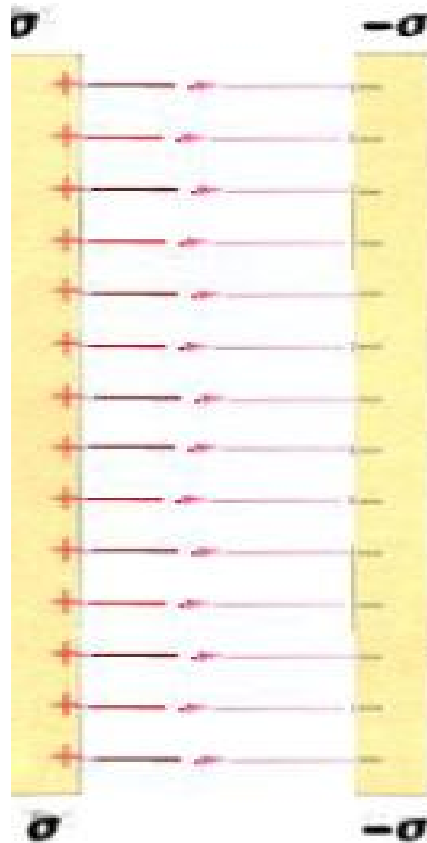
Ο λόγος της χωρητικότητας ενός πυκνωτή όταν μεταξύ των οπλισμών του υπάρχει διηλεκτρικό προς τη χωρητικότητά του όταν μεταξύ των οπλισμών του υπάρχει κενό, ονομάζεται διηλεκτρική σταθερά του υλικού ( $\epsilon_r$ ), δηλαδή:

$$e_r = \frac{C}{C_0} = \frac{e}{e_0} \quad (3.4)$$

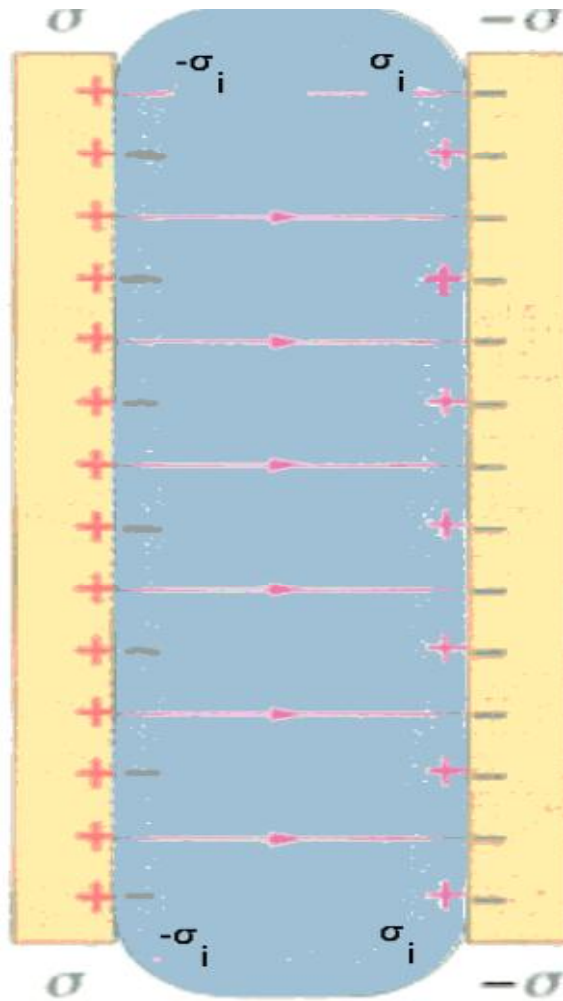
Στο παρακάτω Σχήμα 3.1 φαίνεται η επίδραση που έχει η παρουσία ενός διηλεκτρικού στην κατανομή των φορτίων. Όταν μεταξύ των οπλισμών ενός πυκνωτή παρεμβάλλεται διηλεκτρικό προκαλείται μείωση του ηλεκτρικού πεδίου που υπάρχει μεταξύ των οπλισμών και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της η επιφανειακής πυκνότητας ( $\sigma_i$ ).

Η επιφανειακή πυκνότητα στους αγωγίμους οπλισμούς δεν μεταβάλλεται, όμως επάγεται αντίθετο φορτίο στην κάθε μία επιφάνεια του διηλεκτρικού. Τα επαγόμενα επιφανειακά φορτία είναι αποτέλεσμα της μη επανακατανομής του φορτίου μέσα στο διηλεκτρικό υλικό και το φαινόμενο αυτό ονομάζεται πόλωση.

Με με ( $\sigma_i$ ) συμβολίζεται το μέτρο του φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας που επάγεται στις επιφάνειες του διηλεκτρικού (επαγόμενη επιφανειακή πυκνότητα).



**Σχήμα 3.1:** α) Ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές μεταξύ των οπλισμών επίπεδου πυκνωτή απουσία διηλεκτρικού.



**Σχήμα 3.1:** β) Ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές μεταξύ των οπλισμών επίπεδου πυκνωτή παρουσία διηλεκτρικού

### 3.2. Χωρητική Αντίσταση και Εμπέδηση.

Η χωρητική άεργη (μη ωμική) αντίσταση, ( $X_C$ ), του πυκνωτή ορίζεται ως:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (3.5)$$

όπου ( $\omega$ ) η γωνιακή συχνότητα που ισούται με  $\omega = 2\pi f$  ( $f$  :συχνότητα).

Ορίζουμε μια σύνθετη αντίσταση, ( $Z$ ), η οποία ονομάζεται εμπέδηση και μετράται σε  $\Omega$  για ένα κύκλωμα που περιλαμβάνει ωμική αντίσταση και πυκνωτή. Η εμπέδηση του πυκνωτή ορίζεται από τη σχέση:

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C} = -jX_c \quad (3.6)$$

όπου  $j$  είναι η φανταστική μονάδα.

Οι εμπεδήσεις συνδυάζονται σε σειρά ή παράλληλα όπως ακριβώς και οι αντιστάσεις. Αν αντίσταση και πυκνωτής συνδυάζονται σε σειρά, τότε:

$$Z = R + Z_c \quad (3.7)$$

ενώ αν αντίσταση και πυκνωτής για παράλληλη σύνδεση, τότε:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + \frac{1}{Z_c} \quad (3.8)$$

### 3.2.1. Δείκτης Χωρητικής Αντίστασης.

Ορίζουμε ως δείκτη χωρητικής αντίστασης (reactivity index), ( $I_r$ ), το λόγο της χωρητικής αντίστασης ενός μερικώς κορεσμένου με νερό πορώδους δείγματος, ( $X_r$ ), προς τη χωρητική του αντίσταση όταν είναι πλήρως κορεσμένο με νερό, ( $X_0$ ), δηλαδή:

$$e_r = 58140(s_{100})^{0.5151} (f)^{-0.597} \quad (3.9)$$

$$I_r = \frac{X_r}{X_0} \quad (3.10)$$

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

$$I_x = S_w^{-n^*} \quad (3.11)$$

όπου ( $n^*$ ) είναι ο 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 έχουμε αισθητή μείωση του ο εκθέτη κορεσμού ( $n$ ).

Ο εκθέτης κορεσμού του δείκτη χωρητικής αντίστασης συνδέεται με τον εκθέτη κορεσμού του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης με τη σχέση:

$$n^* = 2n - p \quad (3.12)$$

όπου το  $p$  παίρνει τιμή κοντά στην μονάδα.

### 3.3. Διηλεκτρικές Ιδιότητες Μερικώς Κορεσμένων Πετρωμάτων.

Σε φαινόμενα πόλωσης οδηγούν οι αλληλεπιδράσεις ρευστού-ορυκτού από πορώδη πετρώματα πλήρως κορεσμένα με ηλεκτρολύτη. Όταν δεν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο, τα ιόντα δημιουργούν μια διπλή ιονοστοιβάδα στη διεπιφάνεια νερού/ στερεάς μήτρας.

Όταν εφαρμόζεται ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο, στη περιοχή συχνοτήτων μεταξύ (10Hz) έως (10MHz) τα ιόντα πολώνονται γύρω από τους κόκκους της στερεάς φάσης με αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλων διπόλων και μεγάλων διαφορετικών διηλεκτρικών σταθερών.

Με την αύξηση της συχνότητας (10MHz-10GHz), τα ιόντα κινούνται σε μικρότερες απόστασης με αποτέλεσμα να πολώνονται λιγότερο και συνεισφέρουν περισσότερο στην αγωγιμότητα. Στην περιοχή συχνοτήτων (10Hz-10MHz), η διηλεκτρική σταθερά επηρεάζεται ισχυρά από παράγοντες που επηρεάζουν την πόλωση στις διεπιφάνειες όπως η συγκέντρωση του υδατικού διαλύματος NaCl, ο κορεσμός του νερού και η διαβροχή.

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, ( $e_c$ ), μπορεί να γραφεί ως:

$$e_c = e_r - ie_{im} \quad (3.13)$$



όπου ( $e_r$ ) είναι το πραγματικό μέρος και ( $ie_{im}$ ) το φανταστικό μέρος της σύνθετης διηλεκτρικής σταθεράς (loss factor).

Ο θεωρητικός υπολογισμός του ( $e_r$ ) ενός πορώδους δείγματος το οποίο περιέχει ποικίλες ποσότητες νερού παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον. Η μέτρηση του ( $e_r$ ) στη μηχανική ταμειυτήρων υδρογονανθράκων όσο και στην μέτρηση της μόλυνσης υπογείων υδάτων, μπορεί να μας φανεί χρήσιμη για τον προσδιορισμό του επιπέδου του κορεσμού του νερού.

Από μετρήσεις της διηλεκτρικής σταθεράς είναι δυνατόν να αποκτηθεί πληροφορία σχετικά με τη διαβροχή της επιφάνειας των πόρων. Σε όλα τα επίπεδα των συχνοτήτων η διαβροχή επηρεάζει τις ηλεκτρικές ιδιότητες των πετρωμάτων. Στα πειράματα που έχουν λάβει χώρα μέχρι σήμερα σε ελαιοδιαβρεκτά μέσα οι μετρήσεις τους έδειξαν αύξηση των εκθετών κορεσμού των δεικτών ηλεκτρικής και χωρητικής αντίστασης σε σχέση με τις τιμές που λαμβάνουν οι εκθέτες αυτοί σε υδατοδιαβρεκτά μέσα.

Πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο (Δρ. Αγγελόπουλος Χρήστος) έδειξαν ότι η διηλεκτρική σταθερά οκτώ δειγμάτων άμμου σε διαφορετικούς κορεσμούς νερού στην περιοχή συχνοτήτων 5Hz έως 4MHz και παρατήρησαν μια εκθετική συσχέτιση της διηλεκτρικής σταθεράς με τη γωνιακή συχνότητα της μορφής:

$$e_r = Aw^{-a} \quad (3.14)$$

όπου  $A$  και  $a$  είναι εμπειρικές σταθερές.

Ερευνητές μέτρησαν με τη μέθοδο των τεσσάρων ηλεκτροδίων τη σύνθετη εμπέδηση δειγμάτων άμμου στην περιοχή συχνοτήτων 10Hz-0.1MHz. Τα αποτελέσματά των πειραμάτων έδειξαν την μείωση της διηλεκτρικής σταθεράς κατά ένα παράγοντα 5 όταν έχουμε αύξηση της συχνότητας από τα 100 στα 1000Hz για ένα 5% κολλοειδές αιώρημα σε νερό. Η μεταβολή του κορεσμού με την ενεργό διηλεκτρική σταθερά δίνεται από την σχέση:

$$e_r = e_{r,100} (S_w)^p \quad (3.15)$$

όπου ( $e_{r,100}$ ) είναι η ενεργή διηλεκτρική σταθερά για  $S_w=1$  και το ( $p$ ) είναι περίπου ίσο με μονάδα.

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο (Δρ. Αγγελόπουλος Χρήστος) για την διηλεκτρική σταθερά και αγωγιμότητα σε περισσότερα από 67 δείγματα γρανίτη και ψαμμίτη μερικώς κορεσμένα με διάλυμα NaCl οδήγησαν σε μια εμπειρική σχέση που συνδέει την διηλεκτρική σταθερά του μερικώς κορεσμένου πετρώματος με την αγωγιμότητά του στα 100Hz και τη συχνότητα.

$$e_r = 58140(s_{100})^{0.5151} (f)^{-0.597} \quad (3.16)$$

όπου ( $s_{100}$ ) η αγωγιμότητα του μερικώς κορεσμένου πετρώματος στα 100 Hz και ( $f$ ) η συχνότητα.

Ιόντα και κινούμενα πολικά μόρια πολώνονται γύρω από φορτισμένους κόκκους του στερεού. Τα φαινόμενα πόλωσης των ιόντων στην διεπιφάνεια στερεού – ρευστού γίνονται στην περιοχή των συχνοτήτων 10Hz-10MHz δίνοντας αφορμή για πολύ μεγάλες φαινομενικές διηλεκτρικές σταθερές.

Υψηλές τιμές διηλεκτρικής σταθεράς σε χαμηλές συχνότητες, της τάξης 10<sup>6</sup> στην περιοχή των KHz παρουσιάζουν τα πορώδη μέσα κορεσμένα με υδατικά διαλύματα NaCl. Όσο αυξάνεται η συγκέντρωση του υδατικού διαλύματος σε NaCl τόσο αυξάνεται και η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς. Το φαινόμενο παρατηρείται πιο έντονο στην περιοχή από 1MHz και κάτω και όχι τόσο στην περιοχή των GHz όπου η συγκέντρωση του υδατικού διαλύματος σε NaCl δεν έχει ουσιαστική επίδραση στην διηλεκτρική σταθερά.

Η αγώγιμη φάση σε ένα μερικώς κορεσμένο με ηλεκτρολυτικό διάλυμα πορώδες μέσο είναι το νερό, ενώ οι στερεοί κόκκοι και οποιαδήποτε άλλη φάση ενυπάρχει στους πόρους αποτελούν τον μονωτή. Συνεπώς, οι τρεις φάσεις είναι η αιτία που επηρεάζεται η διηλεκτρική σταθερά από τον σχετικό όγκο και τη χωρική κατανομή. Συγκεκριμένες τιμές έχουν ο όγκος, η κατανομή και η γεωμετρία του στερεού. Ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιούμε η χωρική κατανομή του νερού και του λαδιού στον πορώδη χώρο καθορίζει και την μεταβολή του κορεσμού.

### 3.4. Θεωρητικά Μοντέλα.

Για τον προσδιορισμό της διηλεκτρικής σταθεράς ενός κορεσμένου με νερό πορώδους μέσου (για συστήματα νερού/ αέρα) οι θεωρητικές προσεγγίσεις που έχουν αναπτυχθεί είναι οι:

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

#### 3.4.1. Θεωρία Αποτελεσματικού Μέσου.

Για να καταφέρουμε να υπολογίσουμε τις καλύτερες ιδιότητες μεταφοράς ενός μέσου που δεν παρουσιάζει ομοιογένεια, μπορούμε να αντικαταστήσουμε το μέσο αυτό με ένα αποτελεσματικό (effective) που είναι υποθετικά ομοιογενές και μιμείται τη μέση συμπεριφορά του αρχικού μέσου.

Όταν μια τέτοια αντικατάσταση είναι εφικτή, τότε δίνεται απλούστερη λύση στο πρόβλημα του υπολογισμού των αποτελεσματικών ιδιοτήτων μεταφοράς του ομογενούς

συστήματος, καθώς αυτή η αντικατάσταση είναι μόνο μια προσέγγιση του αρχικού προβλήματος.

Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για την υλοποίηση αυτής της ιδέας.

- Στην πρώτη προσέγγιση με τον προσδιορισμό των διηλεκτρικών ιδιοτήτων αναπτύχθηκε μια προσέγγιση η οποία 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.
- Στην δεύτερη προσέγγιση που αναπτύχθηκε η αποτελεσματική διηλεκτρική σταθερά υπολογίζεται έτσι, ώστε η ομογενοποίηση να μη μεταβάλλει το κατά μέσο όρο εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται προσέγγιση αποτελεσματικού μέσου (Effective Medium Approximation) και πρακτικά είναι ένας έξυπνος τρόπος αντικατάστασης της κατανομής ιδιοτήτων από μία μέση ιδιότητα.

Για ένα σύστημα τριών φάσεων προκύπτει ότι η ενεργός διηλεκτρική σταθερά,  $\epsilon_{eff}$ , προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$(1-j) \frac{e_s - e_{eff}}{e_s + \left(\frac{c_n}{2} - 1\right) e_{eff}} + j S_w \frac{e_w - e_{eff}}{e_w + \left(\frac{c_n}{2} - 1\right) e_{eff}} + j (1 - S_w) \frac{e_{oil} - e_{eff}}{e_{oil} + \left(\frac{c_n}{2} - 1\right) e_{eff}} = 0 \quad (3.17)$$

όπου  $(e_s)$ ,  $(e_w)$ ,  $(e_{oil})$  οι διηλεκτρικές σταθερές του στερεού, του νερού και του λαδιού, αντίστοιχα,  $(\phi)$  το πορώδες και  $(c_n)$  ο αριθμός συνδιάταξης.

### 3.5. Μέθοδος Σύνθετου Δείκτη Διάθλασης.

Η διηλεκτρική σταθερά  $(e_r)$ , υπολογίζεται σύμφωνα με την μέθοδο αυτή αν δίνονται μόνο η διηλεκτρική σταθερά  $(e_i)$  και ο όγκος  $(V_i)$  του κάθε στοιχείου σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sqrt{e_r} = \sum V_i \sqrt{e_i} \quad (3.18)$$

Η μαθηματική έκφραση αυτή μπορεί να επεκταθεί και στην περίπτωση ενός πορώδους μέσου κορεσμένου από διάλυμα ηλεκτρολύτη και μια μη αγώγιμη υγρή φάση.

Το σύστημα αποτελείται από ξηρό πέτρωμα (d), υδατική (w) και μη υδατική φάση (h). Η διηλεκτρική σταθερά δίνεται από την έκφραση:

$$\sqrt{e_r} = (1-j) \sqrt{e_d} + S_w \sqrt{e_w} + (1-S_w)j \sqrt{e_h} \quad (3.19)$$

Δε λαμβάνεται υπόψη η γεωμετρία των στοιχείων και οι ηλεκτροχημικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους.

Όταν η μέθοδος σύνθετου δείκτη διάθλασης χρησιμοποιείται στην πρωτότυπη μορφή της, χρησιμοποιώντας τις διηλεκτρικές σταθερές και τους κλασματικούς όγκους του ξηρού πετρώματος, του νερού και του αέρα, δεν υπάρχει συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.

Αν γράψουμε την εξίσωση σύνθετου δείκτη διάθλασης θεωρώντας πως το σύστημά μας αποτελείται από πέτρωμα που έχει διαβραχεί από νερό και αέρα η παρακάτω εξίσωση μπορεί να δώσει καλή προσαρμογή σε πειραματικά δεδομένα.

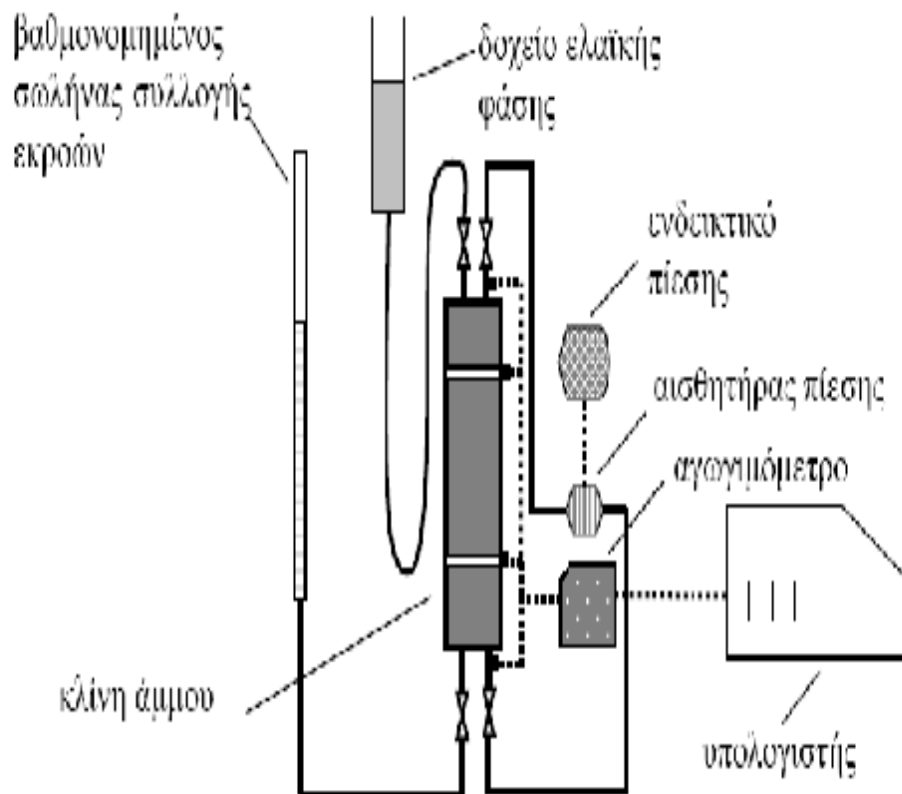
$$\sqrt{e_r} = (1-j_c) \sqrt{e_{wd}} + S_{wc} \sqrt{e_{bw}} + (1-S_{wc})j_c \sqrt{e_a} \quad (3.20)$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

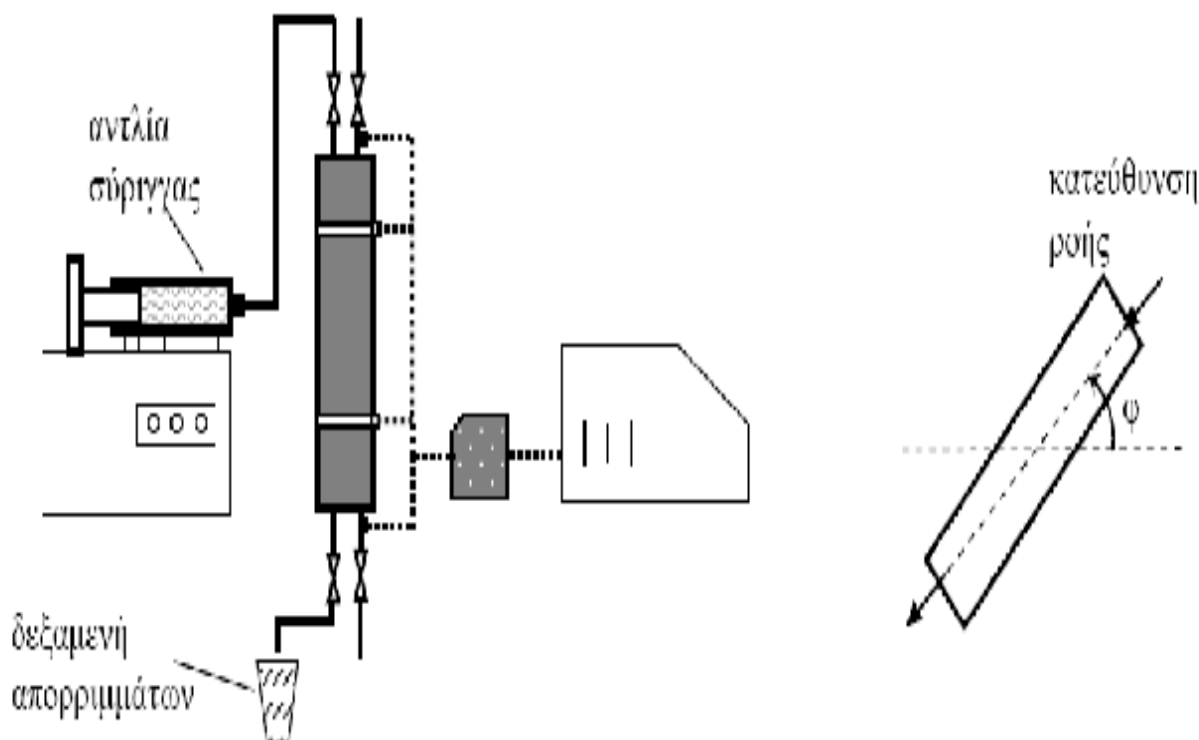
### 4.1. Πειράματα μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

#### 4.1.1. Πειραματικές Διατάξεις.

Η πειραματική συσκευή που χρησιμοποιείται με σκοπό τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας κλινών άμμου ή οποιουδήποτε άλλου μη στερεοποιημένου πορώδους μέσου σε συνθήκες ισορροπίας και σε δυναμικές συνθήκες.



Σχήμα 4.1. Πειραματική συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα ισορροπίας.



**Σχήμα 4.1.2.** Πειραματική συσκευή για δυναμικά πειράματα.

Αποτελείται από:

- Το κελί μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης.
- Το αγωγιμόμετρο.
- Το σύστημα μέτρησης της πίεσης.

Η διάταξη τοποθετείται μέσα σε θερμοστατούμενο θάλαμο έτσι ώστε η θερμοκρασία να παραμένει σταθερή (  $25^{\circ}\text{C}$  ) καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

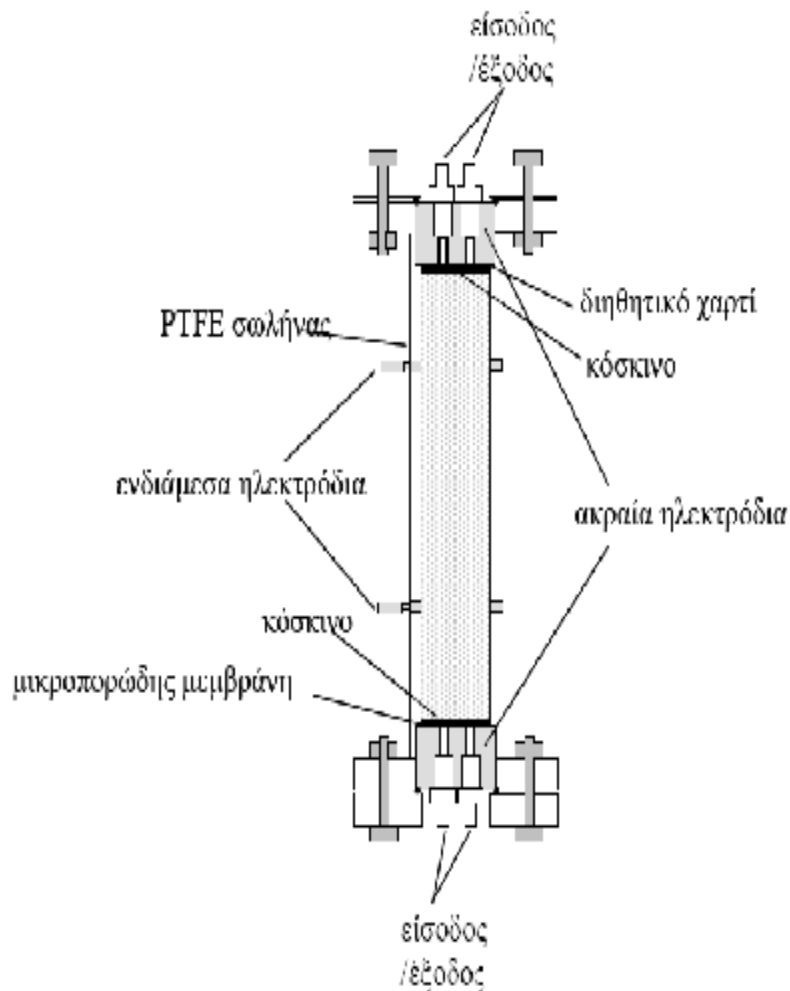
Στο πάνω και κάτω μέρος του κελιού ηλεκτρικής αντίστασης τοποθετούνται δύο κυλινδρικές μεταλλικές πλάκες που χρησιμοποιούνται ως ακραία ηλεκτρόδια (end electrodes) και για τη διέλευση των ρευστών από και προς την κλίνη.

Επίσης, στη μέση της στήλης δρουν ως εσωτερικά ηλεκτρόδια (inner electrodes) δύο δακτυλιοειδείς μεταλλικοί δίσκοι. Τα ηλεκτρόδια είναι κατασκευασμένα από ένα κράμα Fe/Ni/Cr (inconel) το οποίο αντιστέκεται στη διάβρωση που προκαλεί το NaCl. Στην είσοδο και έξοδο της στήλης υπάρχουν δύο ανοξειδωτά κόσκινα (σήτες) τοποθετημένα στις άκρες της κλίνης άμμου. Η τοποθέτηση αυτή γίνεται προκειμένου να βελτιωθεί η ηλεκτρική επαφή της άμμου με τα δύο ακραία ηλεκτρόδια και να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη κατανομή της ροής.

Σε κάθε ακραίο ηλεκτρόδιο υπάρχουν δύο οπές όπου προσαρμόζονται σύνδεσμοι κατάλληλων διαστάσεων :

- Για την έκχυση της εκτοπίζουσας φάσης/ απομάκρυνση της εκτοπιζόμενης φάσης.
- Για την μέτρηση της διαφοράς πίεσης μεταξύ εισόδου/ εξόδου της κλίνης άμμου.

Για την διαβίβαση των ρευστών χρησιμοποιείται αντλία σύριγγας και για τη μέτρηση της διαφοράς πίεσης χρησιμοποιείται αισθητήρας διαφορικής πίεσης, συνδεδεμένος με ενδεικτική οθόνη και κάρτα συλλογής δεδομένων. Το περίβλημα της κλίνης είναι από PTFE (πολυτετραφθοροαιθυλένιο) και αποτελείται από τρία ξεχωριστά τμήματα μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται τα εσωτερικά ηλεκτρόδια.

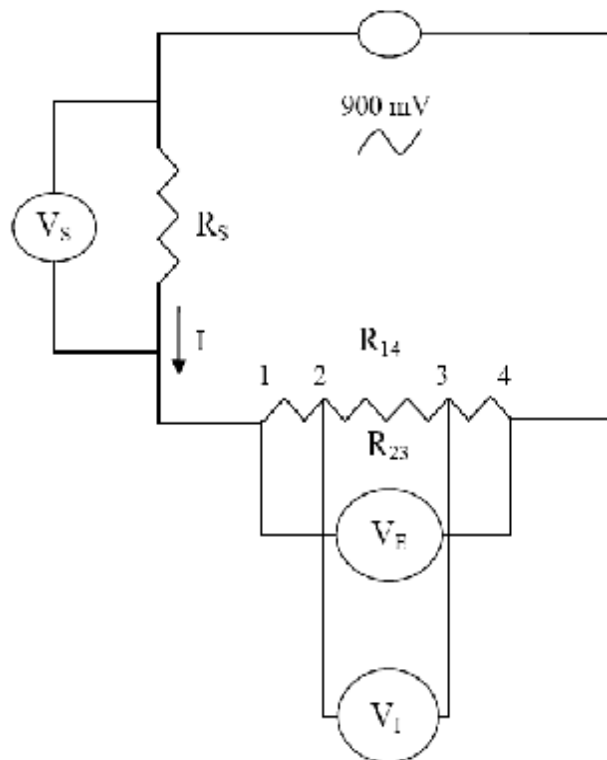


**Σχήμα 4.2.** Κελί ηλεκτρικής αντίστασης.

Η συσκευή συνδέεται με ένα αγωγιμόμετρο τεσσάρων ηλεκτροδίων, προκειμένου να μετράται με συνεχή τρόπο η αγωγιμότητα του κελιού μεταξύ των ακραίων ή και των ενδιάμεσων ηλεκτροδίων. Η διάταξη αυτή δεν υπάρχει στο εμπόριο και πρέπει να κατασκευάζεται εξολοκλήρου για κάθε πειραματική διάταξη. Οι μετρήσεις αποθηκεύονται σε μια κάρτα συλλογής δεδομένων η οποία είναι εγκατεστημένη σε έναν υπολογιστή. Η ακρίβεια των μετρήσεων ελέγχεται με αναφορά σε ένα αγωγιμόμετρο του εμπορίου.

Από μια πηγή παράγεται εναλλασσόμενο (ac) ηλεκτρικό ρεύμα και προσδιορίζεται η αγωγιμότητα μετρώντας την τάση στα άκρα μιας πρότυπης αντίστασης  $1\text{K}\Omega$  η οποία συνδέεται σε σειρά με την κλίνη. Μετρώντας τις αντίστοιχες τάσεις που κυμαίνονται μεταξύ  $0.1\text{V}$  και  $0.8\text{V}$  προσδιορίζεται η αγωγιμότητα κάθε τμήματος της κλίνης. Καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος πρέπει η συχνότητα να διατηρείται σταθερή συχνότητα  $500\text{ Hz}$ .

Στο Σχήμα 4.3 που ακολουθεί παριστάνονται με  $R_s, R_{14}, R_{23}$  η πρότυπη αντίσταση, η αντίσταση μεταξύ των ακραίων ηλεκτροδίων της κλίνης και η αντίσταση μεταξύ των ενδιάμεσων ηλεκτροδίων της κλίνης, αντίστοιχα. Οι τάσεις στα άκρα αυτών των αντιστάσεων συμβολίζονται με  $V_s, V_I, V_E$ .



**Σχήμα 4.3.** Αγωγιμόμετρο τεσσάρων ηλεκτροδίων.



Ο δείκτης χωρητικής αντίστασης μετράται με αναλυτή εμπέδησης, σε ένα κύκλωμα R-C είναι φανερό πως το πραγματικό μέρος μας δίνει την ηλεκτρική αντίσταση του κυκλώματος και το φανταστικό μέρος την χωρητική αντίσταση.

Από την συσκευή λαμβάνονται άμεσα μετρήσεις τόσο για το πραγματικό, όσο και για το φανταστικό μέρος. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε ένα συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων (μεταξύ 100Hz- 100KHz).

Η χωρητικότητα του συστήματός για ( $Z_{im} < 0$ ) υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσης:

$$C = -\frac{1}{Z_{im}(2\pi f)} \quad (4.1)$$

όπου  $f$  η συχνότητα.

Τα ρευστά επιλέγονται ε τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπάρχουν μεγάλες διαφορές στις φυσικοχημικές ιδιότητες.

Οι φυσικοχημικές ιδιότητες των ρευστών δίνονται στον Πίνακα 4.1:

<p>Διαβρέχουσα φάση</p> <p>Πυκνότητα, <math>r_0 \left( \frac{kg}{m^3} \right)</math></p> <p>Ιξώδες, <math>m_0</math> (Pa s)</p>	<p>Υδατικό διάλυμα <i>NaCl</i> 0,5% κ.ο.</p> <p>1000.0</p> <p>0.00095</p>
<p>Μη διαβρέχουσα φάση</p> <p>Πυκνότητα <math>r_0 \left( \frac{kg}{m^3} \right)</math></p> <p>Ιξώδες, <math>m_0</math> (Pa s)</p>	<p>Δωδεκάνιο</p> <p>750</p> <p>0.00135</p>
<p>Διεπιφανειακή τάση, <math>g_{ow} \left( \frac{Nt}{m} \right)</math></p>	<p><math>51 * 10^{-3}</math></p>
<p>Γωνία επαφής, <math>q_E (^{\circ})</math></p>	<p>6.0</p>

**Πίνακας 4.1.** Φυσικοχημικές ιδιότητες των ρευστών.

Το υλικό (πυριτική άμμος) πλήρωσης της στήλης κοσκινίζεται σε σύστημα κοσκίνων έτσι ώστε να χωρισθεί σε κλάσματα διαφόρων διαμέτρων, επιλέγεται εξ όλων ένα κλάσμα για τις διαστάσεις της στήλης κατάλληλο θεωρείται το κλάσμα με διαμέτρους κόκκων μεταξύ 125-250  $\mu\text{m}$  και πακετάρεται μέσα σε μια στήλη από πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE). Προκειμένου να επιτύχουμε ένα πυκνό πακετάρισμα των κόκκων άμμου και να αποφύγουμε την παγίδευση φυσαλίδων αέρα ο σωλήνας PTFE γεμίζεται, με μια μικρή ποσότητα υδατικού διαλύματος NaCl και πακετάρεται με ένα στρώμα άμμου. η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μερί να γεμίσει πλήρως η στήλη.

Στο ένα άκρο βρίσκεται η είσοδος που διαβιβάζεται η μη αγωγή ελαϊκή φάση (δωδεκάνιο), ενώ στο άλλο άκρο της στήλης βρίσκεται η έξοδος και εξέρχεται η εκτοπιζόμενη υδατική φάση.

Ένα κομμάτι διηθητικού χαρτιού τοποθετείται μεταξύ του κόσκινου και της άμμου στην είσοδο με σκοπό τη μείωση της αντίστασης επαφής (contact resistance). Η αντίσταση επαφής είναι η υψηλή αντίσταση που προκαλείται από τους μικροσκοπικούς θύλακες της ελαϊκής φάσης που μπορούν να απλωθούν πάνω στην επιφάνεια εισόδου της άμμου και να επισκιάσουν οποιαδήποτε μεταβολή της αντίστασης της άμμου που οφείλεται σε μικρές αλλαγές του κορεσμού της υδατικής φάσης.

Σε σειρά δρα η αντίσταση επαφής με την αντίσταση της κλίνης, η τιμή της διαφοροποιείται από πείραμα σε πείραμα και εκτιμάται από προεκβολή (extrapolation) των μετρούμενων αντιστάσεων σε κορεσμό ύδατος  $S_w = 1$ . Αφού ολοκληρωθεί η συλλογή των δεδομένων, οι μετρήσεις διορθώνονται αφαιρώντας την αντίσταση επαφής από τη συνολική αντίσταση.

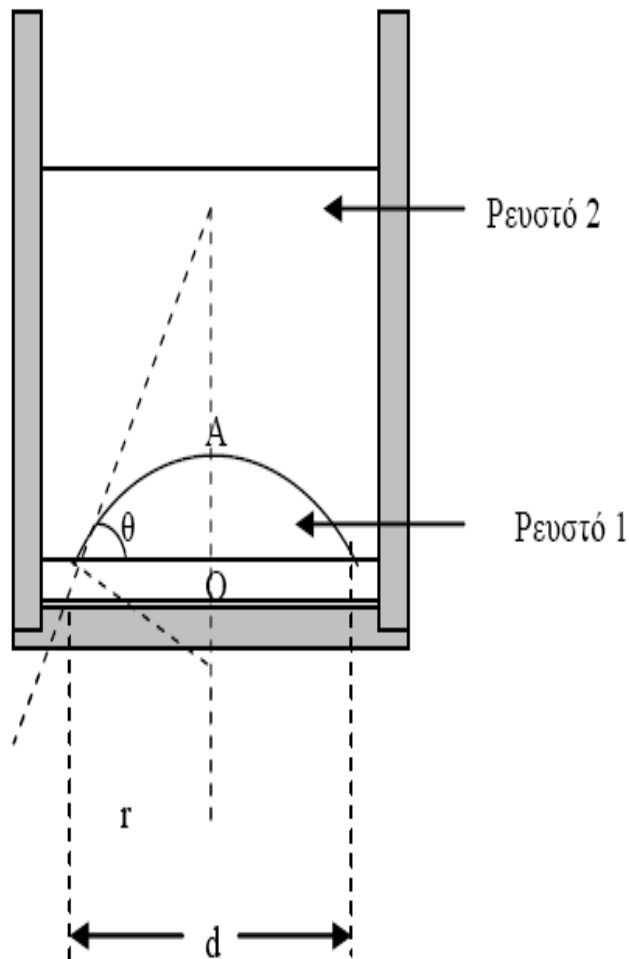
## 4.2. Πειραματικός προσδιορισμός φυσικοχημικών ιδιοτήτων ρευστών.

Η μέτρηση της διεπιφανειακής τάσης πραγματοποιείται με τενσιομέτρου, το οποίο αποτελείται από ένα δαχτυλίδι από πλατίνα συγκεκριμένου βάρους που προσαρμόζεται σε μια οπή στο επάνω μέρος του οργάνου. Στο εσωτερικό του υπάρχει ένας κενός χώρος στον οποίο τοποθετείται το δοχείο που περιέχει τις δύο φάσεις. Αφού μηδενιστεί η ένδειξη του οργάνου, το δοχείο γεμίζεται μέχρι τη μέση με τη φάση που έχει τη μεγαλύτερη πυκνότητα και το δαχτυλίδι βυθίζεται μέσα στο ρευστό. Στη συνέχεια προστίθεται η ελαφρύτερη φάση χωρίς να διαταραχθεί η ισορροπία στην οποία βρίσκεται το σύστημα.

Τέλος, ενεργοποιείται η διαδικασία και το δαχτυλίδι αρχίζει να ανεβαίνει προς τη διεπιφάνεια των δύο φάσεων. Η τιμή αυξάνεται σταδιακά, οι τιμές καταγράφονται σε μια οθόνη που είναι συνδεδεμένη με την συσκευή. Η διαδικασία φτάνει στο τέλος της τη στιγμή που το δαχτυλίδι φθάνει στη διεπιφάνεια παρέχοντας μια σταθερή τιμή που είναι η ζητούμενη διεπιφανειακή τάση.

Για την μέτρηση της γωνιάς επαφής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της σταγόνας. Μια κυψελίδα μικρού μεγέθους γεμίζεται με τη φάση που έχει τη μικρότερη πυκνότητα δωδεκανίου. Βυθίζεται αργά ένα μικρό κομμάτι όμοιο με αυτό της επιφάνειας του πορώδους μέσου φτάνοντας στον πυθμένα. Το κομμάτι αυτό μπορεί να είναι γυαλί, πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE) ή οτιδήποτε άλλο.

Μια σταγόνα του άλλου ρευστού με την μεγαλύτερη πυκνότητα (νερό) τοποθετείται πάνω σε αυτή την επιφάνεια με μια μικροσύριγγα καταγράφοντας την ακριβή τιμή του όγκου της που κυμαίνεται από 5 έως 10 ml. Με μία κάμερα προσαρμοσμένη σε στερεοσκόπιο και καθρέφτη τοποθετημένο υπό γωνία 45° λαμβάνεται το είδωλο της πλάγιας όψης της σταγόνας, αφού πρώτα έχει αποκατασταθεί η ισορροπία του συστήματος.



**Σχήμα 4.4.** Αναπαράσταση μεθόδου μέτρησης γωνιάς επαφής ισορροπίας.

Η σταγόνα θεωρείται ότι είναι τμήμα μιας πεπλατυσμένης σφαίρας ακτίνας  $r$ , μετράται το μήκος ( $d$ ) και το ύψος του τόξου (OA) με τη βοήθεια ενός προγράμματος επεξεργασίας εικόνας. Η ακτίνα της σφαίρας υπολογίζεται γεωμετρικά μέσω της σχέσης:

$$\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (OA)^2 = 2(OA)r \quad (4.2)$$

Πλέον η γωνία επαφής μπορεί να υπολογιστεί με δύο τρόπους:

- Γεωμετρικά, με τη βοήθεια της σχέσης:

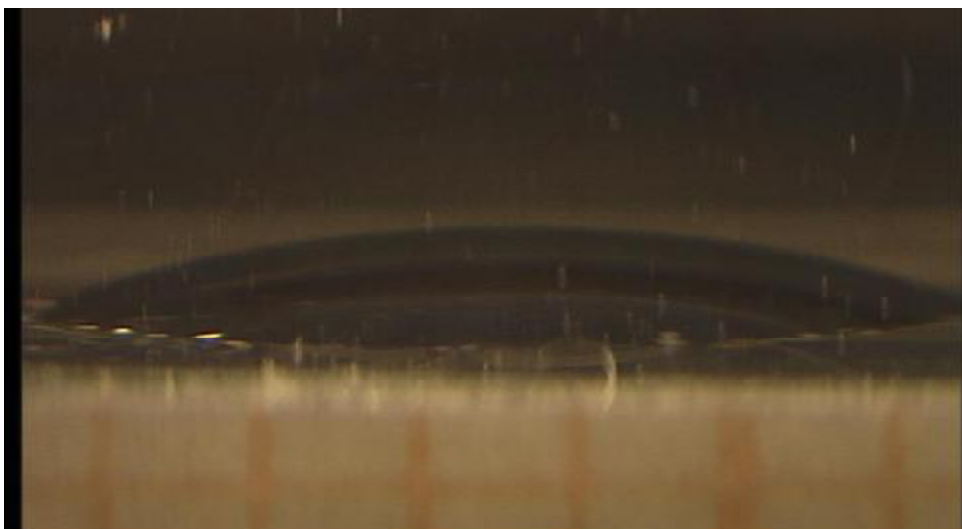
$$\sin q_E = \frac{\left(\frac{d}{2}\right)}{r} \quad (4.3)$$

- Ογκομετρικά, επιλύοντας την παρακάτω εξίσωση με τη μέθοδο Newton Raphson:

$$V = \frac{\rho r^3}{g_{ow}} \left[ 3 \tan \frac{q_E}{2} + \left( \tan \frac{q_E}{2} \right)^3 \right] \quad (4.4)$$

όπου  $V$  είναι ο όγκος της σταγόνας,  $q_E$  η γωνία επαφής ισορροπίας,  $r$  είναι η ακτίνα της σφαίρας και  $g_{ow}$  η διεπιφανειακή τάση των δύο ρευστών.

Οι σύγκριση των δυο τρόπων μας δείχνει ότι ο τελευταίος είναι πιο αξιόπιστος με δεδομένη την ακριβή τιμή του όγκου της σταγόνας. Η μικροσύριγγας που χρησιμοποιείται είναι πολύ μεγάλης ακρίβειας. Στην συνέχεια ακολουθεί μια εικόνα που έχει ληφθεί με τη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη.



**Εικόνα 4.1.:** Σταγόνα υδατικού διαλύματος NaCl σε δωδεκάνιο πάνω σε γυάλινη επιφάνεια.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5.1. Θεωρητικό Υπόβαθρο Πειραματικών Αποτελεσμάτων.

#### 5.1.1 Θεωρητική Ερμηνεία Πειραμάτων.

Κατά τη διάρκεια της εκτόπισης υδατικής διαβρέχουσας φάσης από ελαϊκή μη διαβρέχουσα σε μια κλίνη κόκκων άμμου, δηλαδή σε πειράματα αποστράγγισης, η χωρική κατανομή των δύο φάσεων εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως είναι:

$$(C_a, B, q_E) \quad (5.1)$$

Με το οριζόντιο επίπεδο η στήλη άμμου σχηματίζει γωνία  $\varphi$ , έτσι η συνιστώσα της βαρύτητας κατά τη διεύθυνση της ροής δίνεται από τον τύπο:

$$g_z = g \sin j \quad (5.2)$$

δημιουργεί τριχοειδείς δυνάμεις που δρουν σε συνεργασία με τις υδροστατικές πιέσεις που προκαλεί, που βρίσκονται σε τυχαία κατανομή σε ένα πορώδες μέσο..

Ο λόγος των δυνάμεων άνωσης προς τις τριχοειδείς δυνάμεις σε κλίμακα πόρου ορίζεται σαν αριθμός Bond και δίνεται από τον τύπο:

$$B = \frac{\Delta r g_z \langle r_t \rangle \langle d_g \rangle}{2g \cos q} \quad (5.3)$$

Μια διεργασία που γίνεται με σταδιακή αύξηση της εξωτερικής πίεσης μπορεί να πραγματοποιηθεί κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες τριχοειδούς ισορροπίας. Η τοπική διαφορά πίεσης μεταξύ λαδιού και νερού σε απόσταση  $z$  από την είσοδο της στήλης ορίζεται σαν τριχοειδής πίεση  $P_{cz}$  και δίνεται από τον τύπο:

$$P_{cz} = P_{c0} + \Delta r g_z z \quad (5.4)$$

όπου  $P_{c0}$  είναι η τριχοειδής πίεση στην είσοδο της στήλης.

Η τριχοειδής πίεση ισορροπίας που απαιτείται για ένα μηνίσκο λαδιού-νερού να εισχωρήσει σε ένα λαιμό ακτίνας  $r_t$  που βρίσκεται σε βάθος  $z$  από την είσοδο της στήλης δίνεται από τη σχέση:

$$P_{cz} = \frac{2g \cos \theta}{r_t} \quad (5.5)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

$$P_{c0} = \frac{2g \cos \theta}{r_t} - \Delta r g_z z \quad (5.6)$$

Η εξωτερική πίεση εφαρμόζεται στην ελαϊκή φάση με σκοπό ο μηνίσκος λαδιού/ νερού να εισχωρήσει και να γεμίσει ένα λαιμό σε απόσταση  $z$  από την είσοδο. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται με την παραπάνω σχέση.

Στην εκτόπιση όπου η ελαφρύτερη ελαϊκή φάση εκτοπίζει προς τα κάτω την βαρύτερη υδατική φάση ( $\Delta r < 0, g_z > 0$ ), απαιτείται τριχοειδής πίεση  $P_{c0}$  για την εισβολή του λαδιού σε ένα λαιμό δεδομένου μεγέθους, αυξανόμενη από τα πάνω στρώματα της στήλης προς στα κάτω στρώματα αυτής.

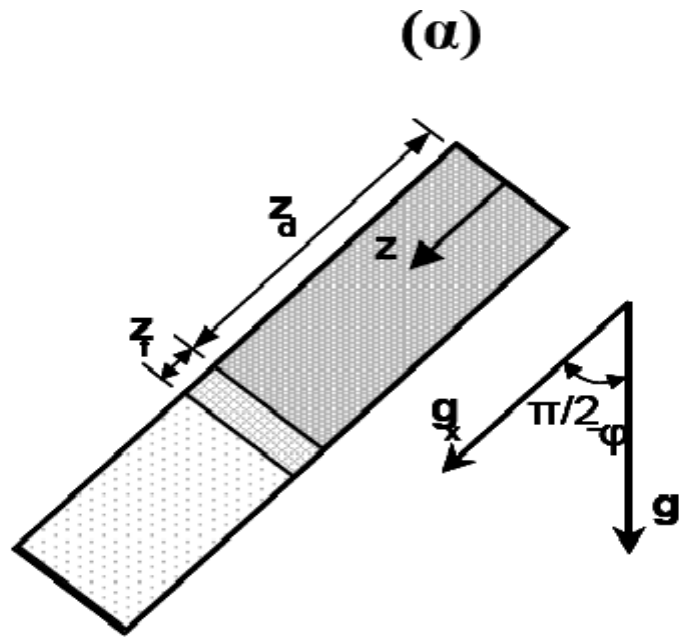
Η εισβολή μηνίσκων λαδιού/ νερού σε λαιμούς ανώτερων στρωμάτων είναι καλύτερη σε σχέση με την εισβολή μηνίσκων σε λαιμούς κατώτερων στρωμάτων, λόγω των δυνάμεων της άνωσης που υπάρχουν και δρουν στο σήστημα.

Όταν ένα βαρύτερο ρευστό εκτοπίζει προς τα κάτω ένα ελαφρύτερο ρευστό ( $\Delta r > 0, g_z > 0$ ) ή όταν ένα ελαφρύτερο ρευστό εκτοπίζει προς τα πάνω ένα βαρύτερο ρευστό ( $\Delta r < 0, g_z < 0$ ) έχουμε μείωση της τριχοειδούς πίεσης κατά τη διεύθυνση της ροής, και επιπλέον ευνοείται καλύτερα το γέμισμα λαιμών που βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις από την είσοδο της στήλης, δηλαδή η εκτόπιση προχωρά με τη μορφή τριχοειδών δακτύλων με αποτέλεσμα να είναι αποσταθεροποιημένη.

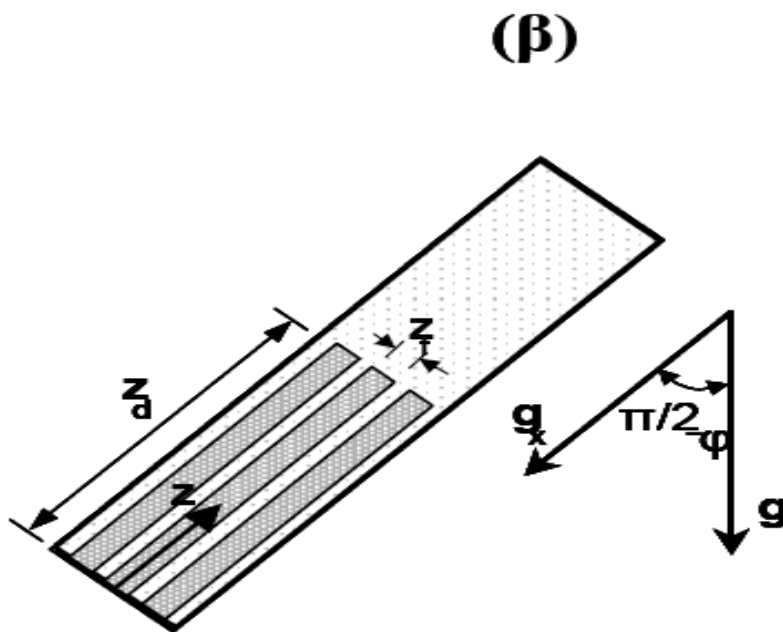
Άρα η βαρύτητα επηρεάζει την διεργασία με αποτέλεσμα η τριχοειδής συμπεριφορά εξαρτάται από αυτήν, όπως προβλέπει και η θεωρία διείσδυσης εισβολής υπό βαθμίδα (gradient invasion percolation theory).

## 5.2. Σταθεροποιημένη Αποστράγγιση Υπό Συνθήκες Τριχοειδούς Ισορροπίας.

Το σταθεροποιημένο πρότυπο εκτόπισης λαδιού/ νερού ( $\Delta r g_z < 0$ ) σε ένα πορώδες μέσο σχετικά μεγάλου μήκους αποτελείται από τρεις ζώνες (Σχήμα 5.1α).

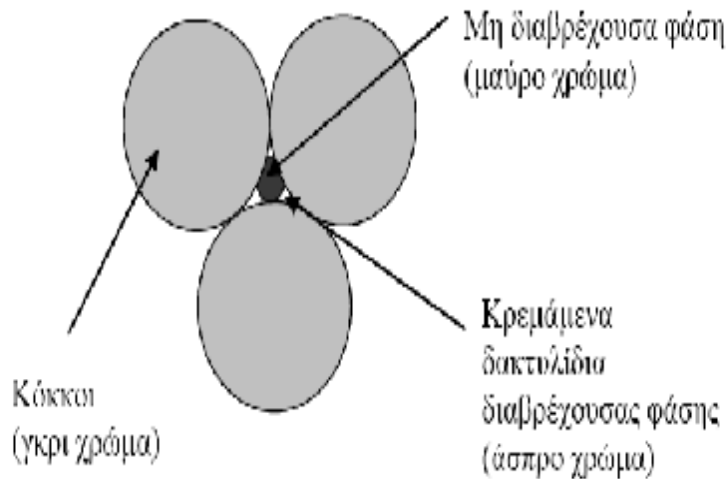


**Σχήμα 5.1.:** (α) Σταθεροποιημένο καθεστώς εκτόπισης κατά τη διάρκεια αποστράγγισης σε μια στήλη άμμου.  $z_d$ : ζώνη πλήρους εκτόπισης. ( $z_f$ )



**Σχήμα 5.1.:** (β) Αποσταθεροποιημένο καθεστώς εκτόπισης κατά τη διάρκεια αποστράγγισης σε μια στήλη άμμου.

Την πλήρη εκτόπιση έχουμε σε μια ζώνη πάχους  $z_d$ . Υπάρχει ένα πρότυπο ανάπτυξης, (αυτό είναι συμπαγές) και η υδατική φάση εκφράζεται και κινείται υπό τη μορφή βολβών (blobs) που έχουν αποσπασθεί μερικά από την συνεχή φάση και προσπαθούν μέσω λεπτών υμένων (thin films) και κρεμάμενων δακτυλιδιών (pendular rings) να διατηρούν την υδραυλική και ηλεκτρική τους συνέχεια στην διαβρέχουσα φάση και παραμένουν στα τοιχώματα και τις γωνίες των πόρων, αντίστοιχα (Σχήμα 5.2).



**Σχήμα 5.2.:** Αναπαράσταση σχηματισμού κρεμάμενων δακτυλιδιών (pendular rings).

Για τον υπολογισμό της τραχύτητας των τοιχωμάτων των πόρων χρησιμοποιείται προσεγγιστικά μια κλασματική (fractal) δομή και μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με την βοήθεια δύο παραμέτρων:

- Το λόγο του κλασματικού πορώδους προς το συνολικό πορώδες, ( $c_p$ ).
- Την κλασματική επιφανειακή διάσταση, ( $D_s$ ).

Η αύξηση του τοπικού κορεσμού ( $S_{wl}(z)$ ) σε συνάρτηση με την απόσταση  $z$  δίνεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\frac{S_{wl}(z) - S_{wc}}{1 - S_{wc}} = c_p \left( \frac{P_{cz} \langle r_t \rangle}{2g \cos \theta} \right)^{D_s - 3} \quad (5.7)$$

όπου, ( $S_{wc}$ ) ο κορεσμός της υδατικής φάσης που παγιδεύεται σε άπειρη τριχοειδή πίεση.



Ο συνολικός κορεσμός σε αυτή τη ζώνη, ( $S_{wd}$ ), δίνεται με την ένωση των δύο παραπάνω σχέσεων και έτσι προκύπτει για  $z=0$  έως  $z=z_d$ :

$$S_{wd} = \frac{1}{L} \left\{ S_{wc} z_d + \frac{c_p (1 - S_{wc})}{\Delta r g_z (D_s - 2)} \left( \frac{\langle r_t \rangle}{2g \cos q} \right)^{D_s - 3} \left[ (P_{c0} + \Delta r g_z z_d)^{D_s - 2} - P_{c0}^{D_s - 2} \right] \right\} \quad (5.8)$$

Σε υψηλές τριχοειδείς πιέσεις δημιουργείται η τριχοειδής εκτόπιση σε περιοχές τραχύτητας των τοιχωμάτων των πόρων, αντίθετα σε συγκριτικά χαμηλές τριχοειδείς πιέσεις δημιουργείται μια ομογενής στήλη όπου είναι το κατώφλι διείσδυσης (breakthrough) του λαδιού.

Το ( $S_{wd}$ ) μπορεί να θεωρηθεί σταθερό όταν παραλείψουμε οποιαδήποτε μεταβολή στον κορεσμό του νερού που οφείλεται σε αποστράγγισή του από περιοχές τραχύτητας, και δίνεται κατά προσέγγιση ίσος με:

$$S_{wd} \cong S_{wc} + c_p (1 - S_{wc}) \quad (5.9)$$

Ο δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης αυτής της ζώνης δίνεται και αυτός κατά προσέγγιση ίσος με:

$$I_{Rd} \cong c_e S_{wd}^{-n_d} \quad (5.10)$$

όπου ( $n_d$ ), είναι ένας εκθέτης που ονομάζεται εκθέτης κορεσμού που επικρατεί σ' αυτή τη ζώνη ( $c_e$ ) και είναι ο λόγος της ηλεκτρικής αντίστασης του πορώδους που ανήκει σε κλασματική τραχύτητα (fractal roughness porosity) προς αυτή του συνολικού πορώδους.

Η συνολική αντίσταση του νερού δίνεται από τον τύπο:

$$R_d = F r_w \left( \frac{z_d}{A} \right) c_e S_{wd}^{-n_d} \quad (5.11)$$

Ενώ συνολικός όγκος του νερού δίνεται από τον τύπο:

$$V_{wd} = e A S_{wd} z_d \quad (5.12)$$

Με την τριχοειδή πίεση συνδέεται το μήκος της ζώνης εκτόπισης και δίνεται κατά προσέγγιση από την σχέση:

$$z_d \cong \frac{P_{c0} - 2g \cos \theta / \langle r_t \rangle}{-\Delta r g_z} \quad (5.13)$$

Μια μετωπική ζώνη πάχους ( $z_f$ ), όπου η εκτόπιση δεν έχει πραγματοποιηθεί πλήρως και το μεταβατικό πρότυπο ανάπτυξης της εξαρτάται από τριχοειδείς δυνάμεις, η εισβολή έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία χαρακτηρίζονται σαν εκτόπιση συστάδας διείσδυσης (percolation cluster) και ο δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$I_{Rf} = S_{wf}^{-n_f} \quad (5.14)$$

όπου ( $S_{wf}$ ) ο συνολικός κορεσμός ύδατος σ' αυτή τη ζώνη, ενώ ο εκθέτης κορεσμού ( $n_f$ ) εξαρτάται από τοπολογικές και γεωμετρικές ιδιότητες του πορώδους μέσου.

Το πάχος της ζώνης και η κατανομή κατά μήκος του άξονα της στήλης του κορεσμού δίνονται και περιγράφονται από τις σχέσεις:

$$z_f \propto |B|^{-n/(1+n)} \quad (5.15)$$

$$S_{wf} \propto z_f^{-b/n} \quad (5.16)$$

όπου ( $\nu$ ) είναι ο εκθέτης κλιμάκωσης του μήκους συσχέτισης και ( $\beta$ ) είναι ο εκθέτης της συνάρτησης πρόσβασης (accessibility function).

Η ηλεκτρική αντίσταση της ζώνης δίνεται από τη σχέση:

$$n = \frac{1 - \frac{A_f N_f}{A} (1 - S_{wf})}{1 - S_{wf}} \left( \frac{S_{wf}^{-n_f} - 1}{S_{wf}^{-n_f}} \right) \quad (5.17)$$

ενώ ο πορώδης χώρος αυτής της ζώνης είναι ο συνολικός όγκος νερού που καταλαμβάνει και ισούται με:

$$V_{wf} = eAS_{wf}z_f \quad (5.18)$$

Όταν ο κορεσμός ύδατος και ο δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης είναι ίσοι με τη μονάδα:

$$S_{wu} = 1, \quad I_{Ru} = 1$$

και όταν δεν έχει προχωρήσει ακόμη το μέτωπο της εκτόπισης έχουμε ζώνη πάχους ίση με:

$$(L - z_b - z_f)$$

Η ηλεκτρική αντίσταση του νερού σ' αυτή τη ζώνη δίνεται από τον τύπο:

$$R \cong F r_w \left( \frac{L - z_d - z_f}{A} \right) \quad (5.19)$$

Ο όγκος του νερού σ' αυτή τη ζώνη δίνεται από τον τύπο:

$$V_{wu} = eA(L - z_d - z_f) \quad (5.20)$$

Η υποδιαίρεση της στήλης σε ξεχωριστές ζώνες είναι έγκυρη όταν ισχύει:

$$(z_d < L)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει πως ο συνολικός δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης ( $I_{Re}$ ), δίνεται από τη σχέση:

$$I_{Re} = \frac{1}{L} \left( c_e S_{wd}^{-n_f} z_d + S_{wf}^{-n_f} z_f + L - z_f - z_d \right) \quad (5.21)$$

Από τις εξισώσεις προκύπτει ο συνολικός όγκος νερού της στήλης που δίνεται από τη σχέση:

$$V_w = eA \left( z_d S_{wd} + z_f S_{wf} + L - z_f - z_d \right) \quad (5.22)$$

Άρα ο κορεσμός του νερού είναι ίσος με:

$$S_{we} = \frac{1}{L} \left( z_d S_{wd} + z_f S_{wf} + L - z_f - z_d \right) \quad (5.23)$$

Αφού:

$$S_{we} = \frac{V_w}{V_t} \quad \text{και} \quad V_t = eAL \quad (5.24)$$

Ο εκθέτης κορεσμού που προκύπτει από τις εξισώσεις και είναι ίσος με:

$$n = - \frac{d \ln I_{Re}}{d \ln S_{we}} = - \frac{S_{we}}{I_{Re}} \left( \frac{dI_{Re}/dz_d}{dS_{we}/dz_d} \right) \cong \frac{L - z_d (1 - S_{wd}) - z_f (1 - S_{wf})}{L + z_d (c_e S_{wd}^{-nd} - 1) + z_f (S_{wf}^{-n_f} - 1)} \left( \frac{c_e S_{wd}^{-nd} - 1}{1 - S_{wd}} \right) \quad (5.25)$$

Ισχύει ότι:

$$\frac{Jn}{Jz_d} < 0 \quad \text{και} \quad \frac{Jn}{Jz_f} < 0$$

Καθώς το μέτωπο της εκτόπισης προχωρά προς τον πυθμένα της στήλης ο εκθέτης κορεσμού αυξάνεται το εύρος της περιοχής του μετώπου. Κοντά στο κατώφλι διείσδυσης του λαδιού, καθώς το  $z_d \rightarrow L$ , οι δύο χαμηλότερες ζώνες κινδυνεύουν να εξαφανιστούν με αποτέλεσμα:

$$n \equiv \frac{S_{wd} (c_e S_{wd}^{-n_d} - 1)}{c_e S_{wd}^{-n_d} (1 - S_{wd})} \quad (5.26)$$

Άρα έχουμε αποσταθεροποιημένη αποστράγγιση υπό συνθήκες τριχοειδούς ισορροπίας.

Το αποσταθεροποιημένο πρότυπο εκτόπισης λαδιού/ νερού ( $\Delta r g_z > 0$ ) σε ένα πορώδες μέσο μεγάλου μήκους αποτελείται από δύο ζώνες

Σε μια ζώνη εκτόπισης πάχους, ( $z_d$ ), όταν το πρότυπο εκτόπισης περιγράφεται από τριχοειδείς δακτύλους που καθένας έχει τη δομή των κλασματικών συστάδων διείσδυσης (fractal percolation clusters). Το εύρος κάθε δακτύλου, ( $z_f$ ), και ο κορεσμός με νερό, ( $S_{wf}$ ), εξαρτώνται από τον αριθμό Bond. Βασιζόμενοι στην απλουστευμένη υπόθεση της ανάπτυξης ( $I_{Rf}$ ), δακτύλων ίσου μήκους, ( $N_f$ ), και εμβαδού επιφανείας ( $A_f$ ), ο όγκος του νερού της ζώνης δίνεται από τον τύπο:

$$V_{wd} = e A_f N_f S_{wf} z_d + e (A - N_f A_f) z_d \quad (5.27)$$

Οι τριχοειδείς δακτύλοι και η υδατική φάση που μένει μεταξύ τους σχηματίζουν ένα σύστημα παραλλήλων αντιστάσεων. Η αντίσταση των τριχοειδών δακτύλων δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$R_1 = F r_w \frac{z_d S_{wf}^{-n_f}}{A_f N_f} \quad (5.28)$$

ενώ η αντίσταση της υδατικής φάσης που απομένει μεταξύ τους ισούται με:

$$R_2 = F r_w \frac{z_d}{A - A_f N_f} \quad (5.29)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$R_d = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.30)$$

Η συνολική αντίσταση του συστήματος των παράλληλων αντιστάσεων γίνεται:

$$R_d = F r_w \frac{z_d S_{wf}^{-n_f}}{A_f N_f + (A - A_f N_f) S_{wf}^{-n_f}} \quad (5.31)$$

Σε μια ζώνη μήκους ( $L \rightarrow z_d$ ), όπου ο κορεσμός του νερού και ο δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης είναι ίσοι με τη μονάδα, επομένως ο όγκος του νερού και η ηλεκτρική αντίσταση αυτής της ζώνης δίνονται από τις σχέσεις:

$$V_{wu} = eA(L - z_d) \quad (5.32)$$

και

$$R_u \cong F r_w \left( \frac{L - z_d}{A} \right) \quad (5.33)$$

Ο συνολικός κορεσμός του νερού της στήλης δίνεται από τον τύπο:

$$S_{we} = 1 - \frac{A_f N_f}{A} \frac{z_d}{L} (1 - S_{wf}) \quad (5.34)$$

Ο δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης της στήλης δίνεται από τον τύπο:

$$I_{Re} = \frac{\left( \frac{z_d}{L} \right) S_{wf}^{-n_f} + \left( 1 - \frac{z_d}{L} \right) \frac{A_f N_f}{A} + \left( 1 - \frac{A_f N_f}{A} \right) S_{wf}^{-n_f}}{A_f N_f + \left( 1 - \frac{A_f N_f}{A} \right) S_{wf}^{-n_f}} \quad (5.35)$$

Αν θεωρήσουμε ότι δεν προκαλείται σημαντική μεταβολή στο ( $S_{wf}$ ), όσο η εκτόπιση προχωρά ( $z_d < L$ ), ο εκθέτης κορεσμού θα δίνεται από τον τύπο:

$$n = - \frac{S_{we}}{I_{Re}} \frac{dI_{Re}/dz_d}{dS_{we}/dz_d} \cong \frac{1 - \left( \frac{z_d}{L} \right) \frac{A_f N_f}{A} (1 - S_{wf})}{\left( \frac{z_d}{L} \right) \frac{A_f N_f}{A} (S_{wf}^{-n_f} - 1) + \left( 1 - \frac{A_f N_f}{A} \right) S_{wf}^{-n_f} + \frac{A_f N_f}{A}} \left( \frac{S_{wf}^{-n_f} - 1}{1 - S_{wf}} \right) \quad (5.36)$$

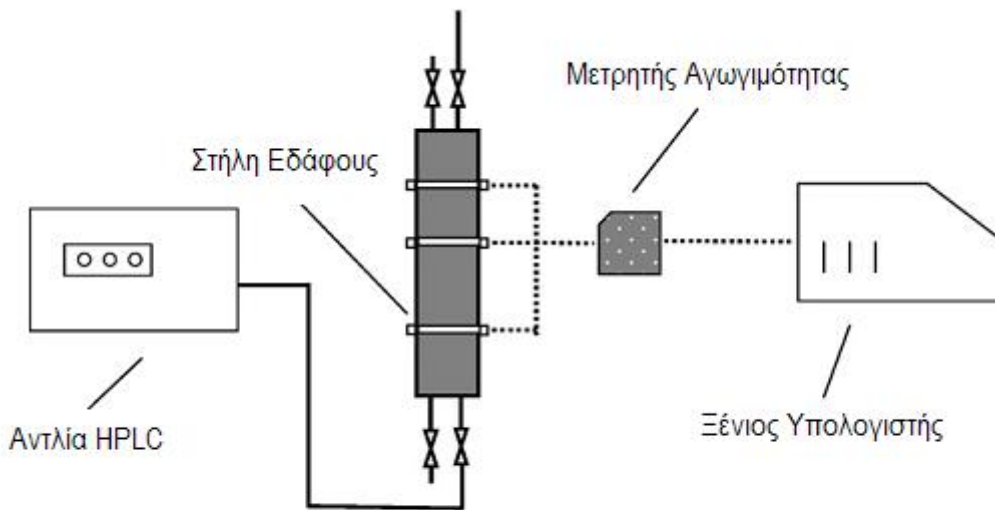
Αν ισχύει  $(Jn/J^{z_d} < 0)$ ,  $(z_d \rightarrow L)$  ο εκθέτης κορεσμού τείνει στην ελάχιστη τιμή:

$$n = \frac{1 - \frac{A_f N_f}{A} (1 - S_{wf})}{1 - S_{wf}} \left( \frac{S_{wf}^{-n_f} - 1}{S_{wf}^{-n_f}} \right) \quad (5.37)$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6.1. Πειραματική Διαδικασία και Πειραματικά Αποτελέσματα.

#### 6.1.1. Προσδιορισμός Ιδιοτήτων Μεταφοράς Κλίνης Άμμου.



Σχήμα 6.1: Πειραματική οργάνωση των αναμίξιμων πειραμάτων μετατοπίσεων.

#### 6.1.2. Παράγοντας Σχηματισμού.

Για τον προσδιορισμό του παράγοντα σχηματισμού διαβιβάστηκαν μέσα από τη στήλη της άμμου με σκοπό τη μέτρηση της αντίστασης του κελιού μεταξύ των ενδιάμεσων ηλεκτροδίων, ( $R_{0i}$ ) υδατικά διαλύματα NaCl αυξανόμενης συγκέντρωσης (0.5-5% κ.ο). Ακλούθησε η μέτρηση της αντίστασης, ( $R_{wi}$ ), των υδατικών διαλυμάτων στο ίδιο τμήμα του κελιού χωρίς την παρουσία της άμμου. Ο παράγοντας σχηματισμού  $F$  (formation factor) προσδιορίστηκε με προσαρμογή των μετρήσεων στην ευθεία:

$$R_{0i} = FR_{wi} \quad (6.1)$$



## 6.2. Απόλυτη Διαπερατότητα.

Η απόλυτη διαπερατότητα, (k), οι μετρήσεις της παροχής, (q), σαν συνάρτηση της πτώσης πίεσης ( $\Delta P$ ), κατά μήκος της κλίνης δίνεται από την σχέση:

$$\frac{q}{A} = - \frac{k}{m} \left( \frac{\Delta P}{L} \right) \quad (6.2)$$

όπου (A) το εμβαδόν μιας εγκάρσιας διατομής της επιφάνειας και (L) το μήκος της κλίνης άμμου.

Οι καμπύλες είσδυσης - απομάκρυνσης υδραργύρου ενός δείγματος άμμου μετρήθηκαν με ένα ποροσίμετρο υδραργύρου. Σκοπός μας ήταν να τις χρησιμοποιήσουμε για τον προσδιορισμό των κατανομών ακτινών πόρων και λαιμών.

Συγκεκριμένα, θεωρώντας μοντέλο δέσμης παράλληλων σωλήνων, η κατανομή ακτινών πόρων προσδιορίστηκε από τη διαφορά της καμπύλης απομάκρυνσης ενώ η κατανομή ακτινών λαιμών προσδιορίστηκε από τη διαφορά της καμπύλης είσδυσης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Μήκος x Διάμετρος (L x D)	13.7 cm x 3 cm
Πορώδες ( $\phi$ )	0.4
Διαπερατότητα (k)	35.8 D
Παράγοντας σχηματισμού	3.97
Διακύμανση μεγέθους κόκκων	125-250 $\mu\text{m}$
<u>Κατανομή ακτινών λαιμών</u> Μέση τιμή Τυπική απόκλιση	40.0 $\mu\text{m}$ 15.0 $\mu\text{m}$
<u>Κατανομή ακτινών πόρων</u> Μέση τιμή Τυπική απόκλιση	73.0 $\mu\text{m}$ 12.0 $\mu\text{m}$

**Πίνακας 6.1.:** Ιδιότητες στήλης άμμου.

### 6.3. Πειράματα Τριχοειδούς Ισορροπίας.

Σε κάθετη θέση τοποθετείται η στήλη με το δωδεκάνιο που είναι το ελαφρύτερο ρευστό και εισέρχεται από το επάνω μέρος της στήλης και το υδατικό διάλυμα NaCl 0.5% κ.ο. οπου είναι και το βαρύτερο να εξέρχεται από το κάτω μέρος. Από ένα βαθμονομημένο γυάλινο σωλήνα μετράμε τον όγκο του εντοπιζόμενου υγρού και προσδιορίζουμε τον κορεσμό του ύδατος.



**Εικόνα 6.1.:** Λαστιχένιο μανίκι που περιέχει τη στήλη αδιατάραχτου χώματος (με ζευγάρια ράβδων ηλεκτροδίων).



**Εικόνα 6.2.:** Στατήρας που περιβάλλει και που υποστηρίζει το λαστιχένιο μανδύα με τα καλώδια σύνδεσης των ηλεκτροδίων με το μετρητή αγωγιμότητας.

Για να αποφυγή εξάτμισης του νερού τοποθετούμε πάνω στην επιφάνεια του μια σταγόνα λαδιού, το νερό βρίσκεται σε μια προχοΐδα. Με την βοήθεια ενός διαφορικού αισθητήρα πίεσης συνδεδεμένου με ενδεικτικό πίεσης και κάρτα συλλογής δεδομένων μετράμε την διάφορα πίεσης μεταξύ των δύο φάσεων. Ανάμεσα στο κόσκινο και την πλάκα εξόδου παρεμβάλλεται μια υδρόφιλη μικροπορώδης μεμβράνη με μέσο μέγεθος πόρων 0.1  $\mu\text{m}$  και πάχος 150  $\mu\text{m}$  με σκοπό να εμποδίσει το λάδι να αποδράσει από το πορώδες μέσο.

Ίση με την ατμοσφαιρική πίεση είναι η πίεση της εξόδου που επίσης διατηρείται σταθερή, σε αντίθεση με την πίεση της εισόδου που αυξάνεται σταδιακά με αποτέλεσμα την ανύψωση του λαδιού. Κάθε ένα βήμα του πειράματος μας θέλει συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ώστε το σύστημα να καταφέρει να έρθει σε ισορροπία κάτι που γίνεται αντιληπτό από την μέτρηση του κορεσμένου ύδατος που συλλέγεται στην προχοΐδα και παραμένει σταθερό.

Για να συμβεί αυτό πρακτικά μπορεί να χρειαστεί μεγάλο χρονικό διάστημα, λόγω της σημαντικής μείωσης της σχετικής διαπερατότητας της υδατικής φάσης στην περιοχή του πορώδους μέσου όπου έχει γίνει εκτόπιση, με αποτέλεσμα σημαντική αύξηση του χρόνου διεξαγωγής του πειράματος.

Για την ύπαρξη ή όχι τριχοειδούς ισορροπίας, καταγράφεται ο εξερχόμενος όγκος της υδατικής φάσης, δηλαδή το υδατικό διάλυμα του NaCl, ( $\Delta V$ ), σαν συνάρτηση του χρόνου, ( $\Delta t$ ), από την αρχή επιβολής της συγκεκριμένης πίεσης. Όταν η κλίση:

$$\frac{d(\Delta V)}{d(\Delta t)} \quad (6.3)$$

τείνει προς το μηδέν, γίνεται αμελητέος ο ρυθμός παραγωγής υδατικής φάσης, και θεωρείται ότι αποκαθίσταται η τριχοειδής ισορροπία και αυξάνεται η υδροστατική πίεση της ελαϊκής φάσης.

Η μετρούμενη τριχοειδής πίεση ορίζεται ως την διαφορά πίεσης μεταξύ ελαϊκής και υδατικής φάσης παίρνοντας ως επίπεδο αναφοράς την είσοδο της άμμου, ενώ λαμβάνεται το ύψος της ελευθέρως επιφάνειας του νερού που βρίσκεται στην προχοΐδα να είναι στο ίδιο επίπεδο με την είσοδο της στήλης. Τα πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι εκτός από το δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης προσδιορίζεται και η καμπύλη τριχοειδούς πίεσης.

Ο ρυθμός που χρειάζεται η υδατική φάση να διαπεράσει την μικροπορώδη μεμβράνη είναι πολύ αργός σε σχέση με αυτών που χρειάζεται ο συνολικός όγκος των πόρων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ότι το μικρότερο χρονικό διάστημα που διαρκεί ένα πείραμα ισορροπίας να είναι τρεις εβδομάδες. Ο σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει τόσο τον ρυθμό εκτόπισης όσο και την αποδοτική λειτουργία της μεμβράνης είναι ο τρόπος τοποθέτησής της στην έξοδο της στήλης.

## 6.4. Πειράματα Συνεχούς Έκχυσης.

Μικροπορώδης μεμβράνη και η ελαϊκή φάση (δωδεκάνιο) που διαβιβάζεται με σταθερή παροχή μέσω μιας αντλίας σύριγγας στην κλίνη άμμου δε χρησιμοποιείται στα πειράματα συνεχούς έκχυσης. Η χρήση της αντλίας μας δίνει τη δυνατότητα του υπολογισμών του όγκου που εισέρχεται με ακρίβεια. Η ηλεκτρική αντίσταση των ηλεκτρονίων τόσο μεταξύ των ακραίων όσο και μεταξύ των ενδιάμεσων, όσο και ο συνολικός κορεσμός ύδατος μετρώνται μέχρι τη στιγμή που η ελαϊκή φάση εξέρχεται από το κάτω μέρος της στήλης.

Με σκοπό να ποσοτικοποιήσουμε τις επιδράσεις της άνωσης στο ( $I_R$ ), ο δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να υπολογισθεί με πέντε διαφορετικούς προσανατολισμούς της διεύθυνσης της ροής σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο, δηλαδή όπου δεν έχουμε επίδραση της βαρύτητας:

$$(j = 0^\circ, j = \pm 45^\circ, j = \pm 90^\circ)$$

όπου οι θετικές τιμές του  $\phi$  είναι αριστερόστροφες, ενώ οι αρνητικές δεξιόστροφες.

## 6.5. Πειραματικά Αποτελέσματα Δείκτη Ηλεκτρικής Αντίστασης και Τριχοειδούς Πίεσης.

Η καμπύλη τριχοειδούς πίεσης που μετρήθηκε με τη μέθοδο της μικροπορώδους μεμβράνης φαίνεται στο διάγραμμα 6.1. Η τριχοειδής πίεση που χρειάζεται ώστε η ελαϊκή φάση να αρχίσει να εισέρχεται στους πόρους είναι σχεδόν 2000 Pa.

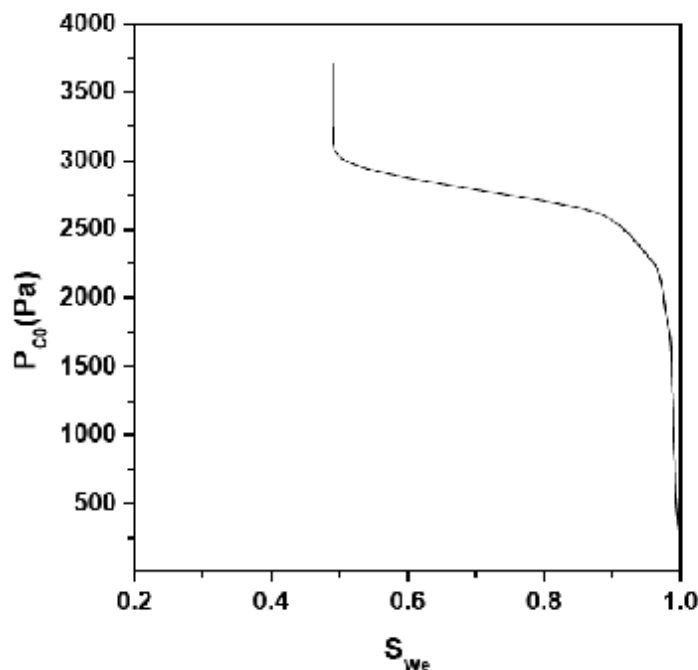
Σε ένα εύρη φάσμα τροχοειδών πιέσεων γίνεται η διαδικασία εκτόπισης της υδατικής από την ελαϊκή φάση, αυτό οφείλεται στο σημαντικό ύψος της στήλης και στη σταθεροποιητική δράση της άνωσης. Όσο το λάδι εισέρχεται σταδιακά στους πόρους στα χαμηλότερα στρώματα της κλίνης άμμου, έχουμε την αύξηση της τριχοειδούς πίεσης.

Το σχετικό μεγάλο εύρος της τριχοειδούς πίεσης οφείλεται στο σημαντικό μήκος της στήλης και όχι στο εύρος της κατανομής των μεγεθών πόρων και λαιμών. Οι πόροι και οι λαιμοί του δικτύου δεν παρουσιάζουν μεγάλο εύρος κατανομής μεγεθών.

Ένα λεπτό στρώμα έξω από την κλίνη της άμμου σχηματίζει η ελαϊκή φάση, αυτό δημιουργείται στον κενό χώρο που σχηματίζουν οι οπές της σήτας, με αυτόν τον τρόπο έχουμε την ολοκλήρωση της εκτοπίσεως και έχει ως αποτέλεσμα μεν την αύξηση της τριχοειδούς πίεσης αλλά δεν υπάρχει καμία μεταβολή στον κορεσμό της υδατικής φάσης και κατά συνέπεια καμιά αλλαγή στην ποσοτική κατανομή των δύο φάσεων μέσα στη στήλη.

Ο τελικός κορεσμός υδατικής φάσης, ( $S_{wef}$ ), είναι υψηλός γιατί το λάδι που απλώνεται κατά μήκος της μεταλλικής σήτας μετά το κατώφλι διείσδυσης διακόπτει την υδραυλική συνέχεια της υδατικής φάσης. Όμως επειδή υπάρχουν ισχυρές υδατοδιαβρεκτες συνθήκες ένα ποσοστό του ( $S_{wef}$ ), θα μπορούσε να είχε απομακρυνθεί εάν δεν είχε αποκοπεί η υδραυλική συνέχεια του διαβρέχοντος ρευστού.

Η μετρούμενη τιμή του ( $S_{wef}$ ) είναι κυμαίνεται σε υψηλότερη τιμή από την πραγματική του μη αναγώγιμου (irreducible) κορεσμού της υδατικής φάσης. Από τους κόκκους τις άμμου μπορεί να προκληθεί καταστροφή της μεμβράνης για αυτό και τοποθετούμε μια σήτα για την προστασία και διαφύλαξη της. Αν αλλάξουμε τον τύπο μεμβράνης και τοποθετήσουμε κεραμική μεγαλύτερου πάχους θα καταφέρουμε να αποφύγουμε την άμεση καταστροφή της αλλά αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αισθητή αύξηση των χρόνων ισορροπίας και της διάρκειας του πειράματος.



**Διάγραμμα 6.1.** Καμπύλη τριχοειδούς πίεσης που μετρήθηκε με την τεχνική της μικροπορώδους μεμβράνης.

Στο διάγραμμα 6.2, διαγράφονται οι καμπύλες του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης που υπολογίσαμε με την μέθοδο της μικροπορώδους μεμβράνης και της συνεχούς έκχυσης σε κάθετο προσανατολισμό ( $j = 90^\circ$ ). Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε (Aggelopoulos et al., 2005) με τη μέθοδο της συνεχούς έκχυσης υπό σταθερή παροχή, έχουμε την διακοπή της διαδικασίας τη στιγμή που το λάδι φτάνει στην έξοδο της στήλης και ο τελικός κορεσμός της υδατικής φάσης που μετράται ( $S_{wef}$ ), είναι πάλι μεγαλύτερος από τον μη αναγώγιμο κορεσμό της διαβρέχουσας φάσης.

Όπως έχουμε προαναφέρει ο εκθέτης κορεσμού είναι μια αύξουσα συνάρτηση του κορεσμού ύδατος, η μείωση του οφείλεται στην μη ομογενή κατανομή των ρευστών κατά μήκος της στήλης και τείνει να ομογενοποιηθεί μετά το κατώφλι διείσδυσης του λαδιού.

Ο δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης δίνεται με ένα μαθηματικό μοντέλο τριών παραμέτρων:

$$I_{Re} = [aS_{we}^m + (1+a)S_{we}^l]^{-1}, \quad m > l \quad (6.4)$$

όπου ο εκθέτης ( $m$ ) επικρατεί σε υψηλούς (μη ομογενείς) κορεσμούς ύδατος και ( $l$ ) επικρατεί σε χαμηλούς (ομογενείς) κορεσμούς ύδατος. Τότε, ο εκθέτης κορεσμού δίνεται από τον τύπο:

$$n = \frac{maS_{we}^m + l(1-a)S_{we}^l}{aS_{we}^m + (1-a)S_{we}^l} \quad (6.5)$$

και παίρνει τις οριακές τιμές:

$$n_1 = \lim_{S_{we} \rightarrow 1} n = ma + l(1-a) \quad (6.6)$$

$$n_2 = \lim_{S_{we} \rightarrow S_{wef}} n = \frac{maS_{wef}^m + l(1-a)S_{wef}^l}{aS_{wef}^m + (1-a)S_{wef}^l} \quad (6.7)$$

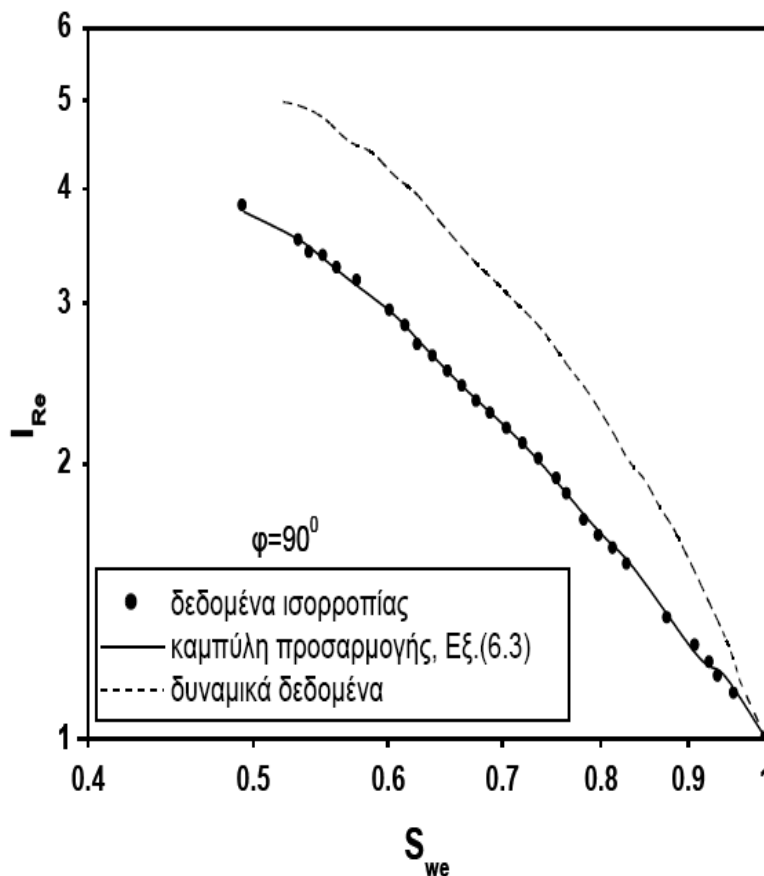
Για την προσαρμογή των πειραματικών καμπυλών ( $I_{Re}(S_{we})$ ), την εκτίμηση των παραμέτρων ( $a$ ), ( $m$ ), ( $l$ ) και τον υπολογισμό των οριακών εκθετών, ( $n_1$ ), ( $n_2$ ), χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ATHENA και στοχαστική μη γραμμική εκτίμηση παραμέτρων.

Όταν δύο ρευστά έχουν το ίδιο ιξώδες ( $m_o / m_w \approx 1$ ) κατά την διάρκεια της εκτοπίσεως αυξάνεται η παροχή. Το καθεστώς της εκτόπισης σταθεροποιείται δεδομένου ότι (α) ο κορεσμός της εκτοπιζόμενης φάσης στην συμπαγή ζώνη ( $S_{wd}$ ) μειώνεται, και (β) το πάχος της μετωπικής συστάδας διείσδυσης στη ζώνη (ii) (frontal fractal region) μειώνεται σύμφωνα με το νόμο κλιμάκωσης:

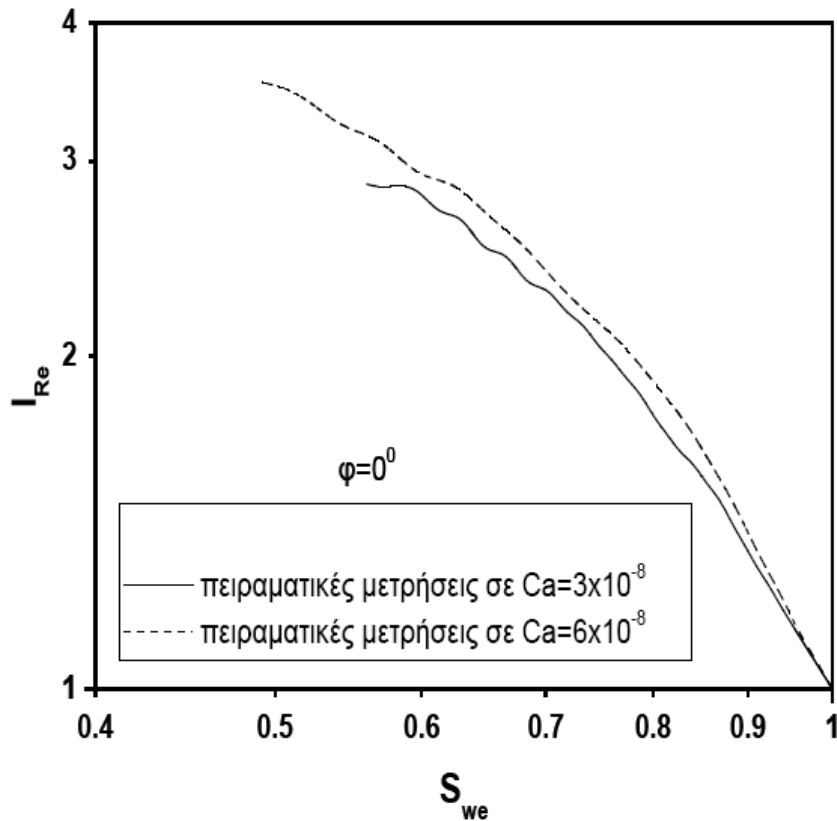
$$z_f \propto Ca^{-a}$$

Όπου ( $Ca = \frac{u_0 m_0}{g}$ ) είναι ο τριχοειδής αριθμός που χρησιμοποιείται ως μέτρο του λόγου των ιξωδών προς τις τριχοειδείς δυνάμεις. Οι τιμές που υπολογίσαμε με τη δυναμική μέθοδο είναι υψηλότερες σε σχέση με αυτές που υπολογίσαμε με την τεχνική της τριχοειδούς ισορροπίας.

Όσο έχουμε την αύξηση των τιμών του ( $S_{wd}$ ), ( $z_f$ ), έχουμε την μείωση του ( $I_{Re}(S_{we})$ ). Το ( $n(S_{we})$ )  $m^* > l^*$  είναι μια φθίνουσα συνάρτηση των ( $S_{wd}$ ) και ( $z_f$ ) σε συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις (Aggelopoulos et al., 2005).



**Διάγραμμα 6.2.:** Καμπύλες δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης μετρούμενες κάτω από δυναμικές συνθήκες και συνθήκες ισορροπίας.



**Διάγραμμα 6.3.:** Μεταβολή του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης με τον τριχοειδή αριθμό.

Με τη στήλη σε οριζόντια θέση πραγματοποιήθηκε για δύο διαφορετικούς ρυθμούς ροής πειράματα συνεχούς έκχυσης. Όσο αυξάνεται η τιμή του ( $Ca$ ), το ( $I_{Re}(S_{we})$ ) και ο εκθέτης ( $n_1$ ) αυξάνονται με την σταθεροποίηση που προκαλείται στο μεταβατικό πρότυπο ανάπτυξης της εκτόπισης, καθώς έχουμε την μείωση των ( $S_{wd}$ ) και ( $z_f$ ). Ο εκθέτης ( $n_2$ ) φαίνεται να μειώνεται με το ( $Ca$ ) διότι μετράται σε χαμηλότερη τιμή του ( $S_{wef}$ ).

Ο δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης μετρήθηκε με τη μέθοδο συνεχούς έκχυσης και για σταθερό ρυθμό ροής, περιστρέφοντας τη στήλη και μεταβάλλοντας τον αριθμό Bond :

$$(q = 0.05 \text{ ml/min}, Ca = 3 \times 10^{-8})$$

Για την περίπτωση σταθεροποιημένης αποστράγγισης ( $B < 0, f > 0$ ) έχουμε την αύξηση των ( $f$ ) και ( $|B|$ ) που προκαλεί ενίσχυση του σταθεροποιημένου προτύπου εκτόπισης, δηλαδή την μείωση των ( $S_{wd}$ ) και ( $z_f$ ). Οι συναρτήσεις ( $I_{Re}(S_{we})$ ) και ( $n(S_{we})$ ) έχουν την τάση να αυξάνονται σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις.



Για την περίπτωση του αποσταθεροποιημένου πρότυπου αποστράγγισης ( $B > 0, f < 0$ ) σταθεροποιείται σταδιακά όσο έχουμε την μείωση των ( $f$ ) και ( $B$ ). Οι τριχοειδείς δάκτυλοι διευρύνονται, δηλαδή ο όρος  $A_f N_f / A$  και ο κορεσμός του νερού στην συστάδα διείσδυσης (percolation cluster) αυξάνεται, το ( $S_{wf}$ ) μειώνεται.

Οι τριχοειδείς δάκτυλοι είναι δυνατόν να ενωθούν και να σχηματίσουν μια μετωπική συστάδα διείσδυσης για χαμηλές τιμές του ( $|B|$ ) και υψηλές τιμές του ( $Ca$ ), αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την σταθεροποίηση του αναπτυσσόμενου πρότυπο εκτόπισης.

Κάνοντας μετρήσεις και υπολογισμούς, μπορεί εύκολα ναδειχθεί ότι:

$$JI_{Re} / JS_{wf} < 0, JS_{we} / JS_{swf} > 0, JI_{Re} / J(A_f N_f) < 0, JS_{we} / J(A_f N_f) < 0$$

Σε μια αποσταθεροποιημένη εκτόπιση το ( $I_{Re}(S_{we})$ ) περιμένουμε να αυξηθεί καθώς τα ( $f$ ) και ( $|B|$ ) μειώνονται και το πρότυπο εκτόπισης τείνει να σταθεροποιηθεί. Επίσης προκύπτει:

$$Jn / J(A_f N_f) > 0 \quad \text{καθώς} \quad z_d / L \rightarrow 0$$

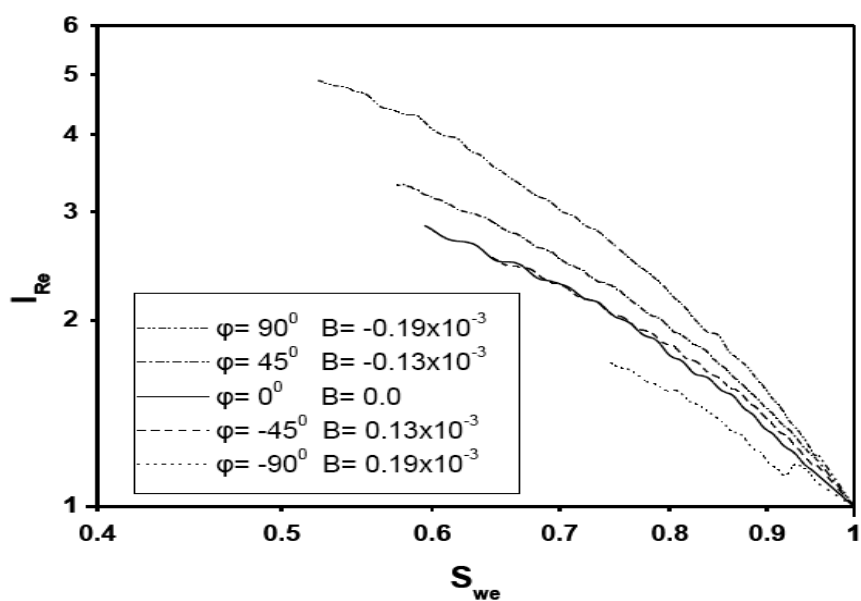
$$Jn / J(A_f N_f) < 0 \quad \text{καθώς} \quad z_d / L \rightarrow 1$$

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι εκθέτες κορεσμού ( $n_1$ ) και ( $n_2$ ) να αυξάνονται και να μειώνονται, αντίστοιχα. Το πρότυπο ανάπτυξης σταθεροποιείται καθώς οι τριχοειδείς δάκτυλοι διευρύνονται και μειώνονται.

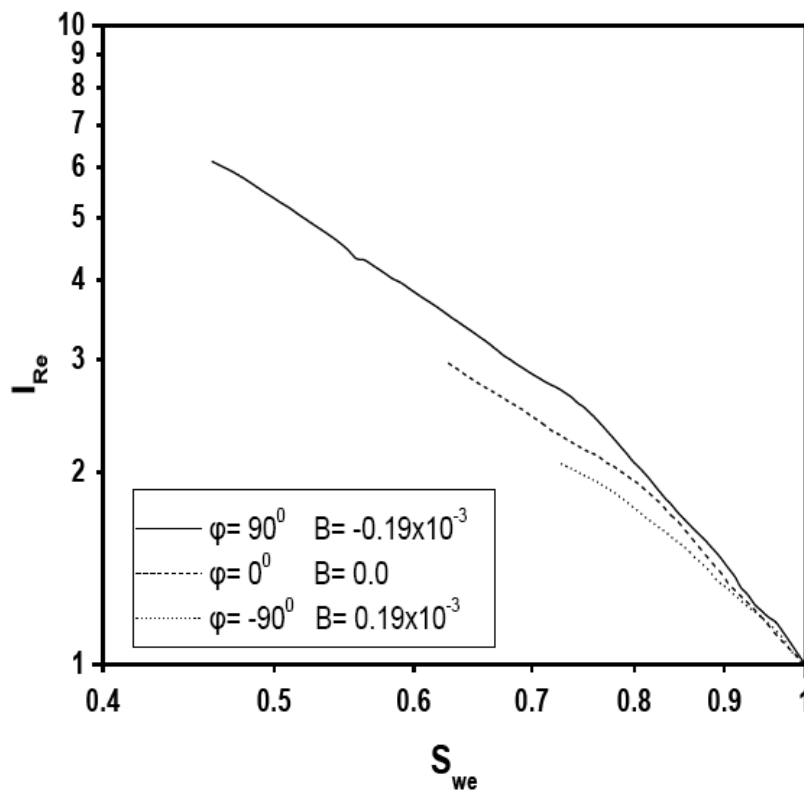
Από τα διαγράμματα 6.4 και 6.5 προβλέπεται η ποιοτική και ποσοτική συμφωνία των αποτελεσμάτων του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης ανεξάρτητα από το όργανο που χρησιμοποιούμε για τον προσδιορισμό του. Η συχνότητα που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις και για τις δύο περιπτώσεις ήταν σταθερή και ίση με 500Hz

$\phi$	$Ca$	$a$	$m$	$l$	$S_{weff}$	$n_1$	$n_2$
90°	ισορροπία	0.772	3.13	0.39	0.49	2.505	1.278
90°	$3 \times 10^{-8}$	0.571	7.18	1.26	0.46	4.639	1.340
45°	$3 \times 10^{-8}$	0.467	7.18	1.10	0.575	3.934	1.279
0°	$6 \times 10^{-8}$	0.723	4.22	0.0	0.56	3.05	0.776
0°	$3 \times 10^{-8}$	0.729	4.12	0.0	0.60	3.003	1.017
-45°	$3 \times 10^{-8}$	0.459	6.70	0.87	0.643	3.546	1.224
-90°	$3 \times 10^{-8}$	0.734	2.53	0.55	0.742	2.003	1.747

**Πίνακας 6.2.:** Εκτιμώμενες τιμές παραμέτρων του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης.



**Διάγραμμα 6.4.:** Μεταβολή του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης με τον αδιάστατο αριθμό Bond.



**Διάγραμμα 6.5.:** Μεταβολή του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης με τον αδιάστατο αριθμό Bond (οι μετρήσεις έγιναν με αναλυτή εμπέδησης).

Με τον αναλυτή εμπέδησης έχουμε την δυνατότητα να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις σε μεγάλη εμβέλεια συχνοτήτων που κυμαίνεται από 100Hz έως 100KHz. Οι καμπύλες του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης είναι ίδιες για αυτή την εμβέλεια των συχνοτήτων (100Hz-10KHz).

Σε αντίθεση με τις συχνότητες από τα 100KHz και άνω παρατηρούνται ασυνέχειες στα πειραματικά δεδομένα. Επομένως, η μέτρηση του δείκτη ηλεκτρικής αντίστασης σε αυτές τις συχνότητες δεν αποτελεί αξιόπιστο κριτήριο για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Σε ένα σχετικά ομογενές πορώδες μέσο ο εκθέτης κορεσμού και ο δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτώνται από τις μικροσκοπικές ιδιότητες της πορώδους δομής και τη διαβροχή, αλλά είναι και στενά συνδεδεμένοι με το μεταβατικό πρότυπο εκτόπισης που επικρατεί και ελέγχεται από την αλληλεπίδραση των τριχοειδών, των ιζωδών και των δυνάμεων άνωσης.

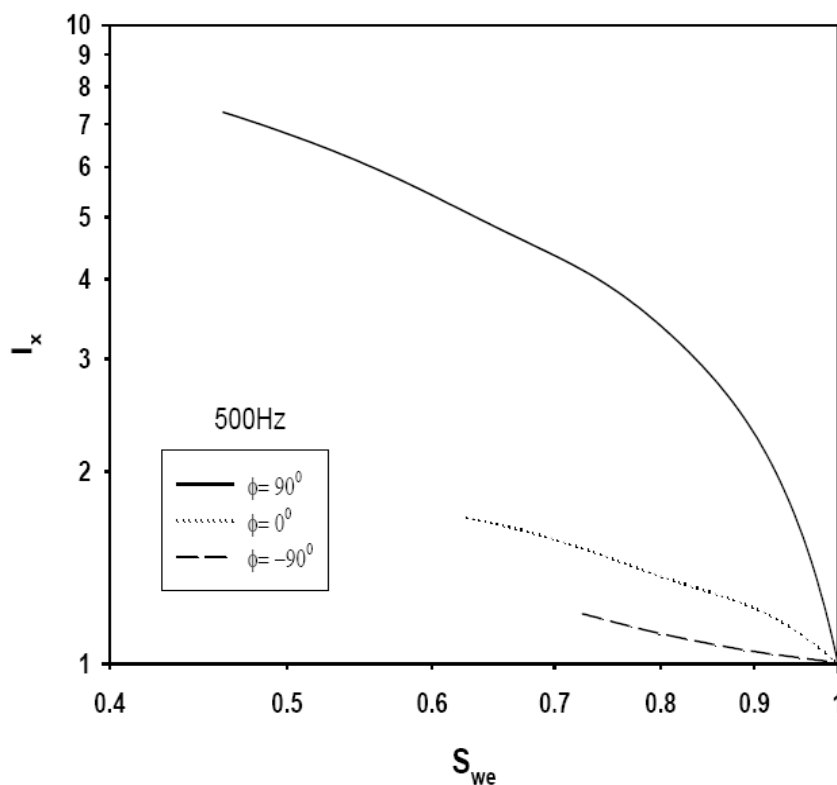
Το μεταβατικό πρότυπο της εκτόπισης στην κλίμακα του δείγματος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για να έχουμε μια σωστή ερμηνεία ηλεκτρικής συμπεριφοράς. Προσπαθώντας να λύσουμε το αντίστροφο πρόβλημα, ο μετρούμενος δείκτης ηλεκτρικής αντίστασης κατά μήκος του δείγματος ίσως μας δίνει τη δυνατότητα να πάρουμε πληροφορίες

όχι μόνο για τον συνολικό κορεσμό του νερού αλλά και για την κατανομή των ρευστών κατά μήκος ολόκληρου του δείγματος.

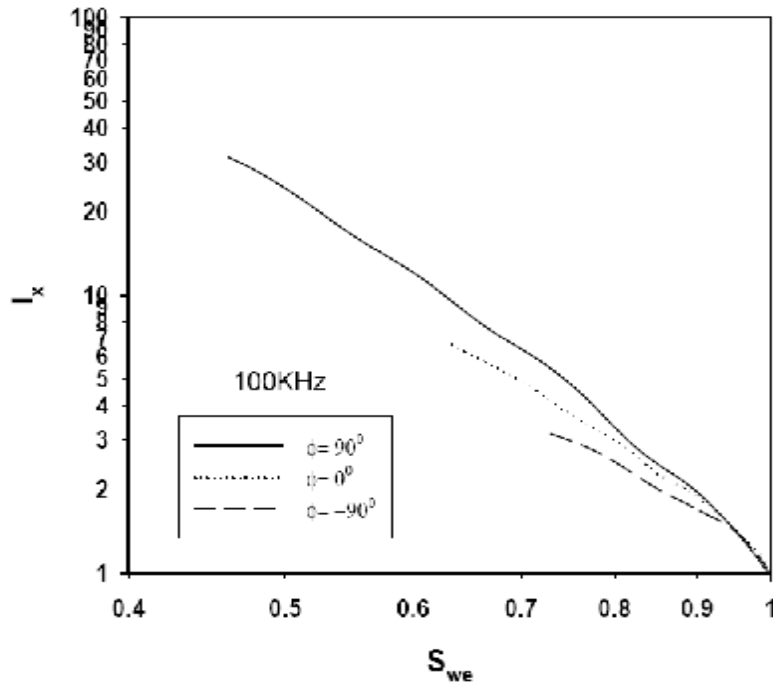
## 6.6. Πειραματικά Αποτελέσματα Δέκτη Χωρητικής Αντίστασης.

Η ομοιότητα στην ποιοτική συμπεριφορά των δεικτών ηλεκτρικής και χωρητικής αντίστασης καθώς μεταβάλλεται ο αριθμός Bond γίνεται αντιληπτή από τα Σχήματα 6.5 και 6.6. Την αύξηση του δείκτη χωρητικής αντίστασης παρατηρούμε κατά την διάρκεια της σταθεροποίησης της εκτόπισης ενώ παράλληλα μειώνεται η τιμή του ( $S_{wf}$ ).

Καθώς ομογενοποιείται ο κορεσμός της στήλης άμμου η κλίση της καμπύλης μειώνεται. Στην εμβέλεια των συχνοτήτων 500Hz έως 10KHz η διαφορά των δεικτών χωρητικής αντίστασης για διάφορα ( $|B|$ ) παραμένει σταθερή. Στα (100KHz) έχουμε ποσοτική μεταβολή του δείκτη χωρητικής αντίστασης.



Διάγραμμα 6.6.: Μεταβολή του δείκτη χωρητικής αντίστασης με τον αριθμό Bond σε συχνότητα 500 Hz.



**Διάγραμμα 6.7.:** Μεταβολή του δείκτη χωρητικής αντίστασης με τον αριθμό Bond σε συχνότητα 100 KHz.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα και την συμπεριφορά των καμπύλων δείκτη χωρητικής αντίστασης συμπεραίνουμε πως οι προσεγγιστικές σχέσεις που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι δυνατόν να επεκταθούν για τη χωρητική αντίσταση  $X$ . Θα πρέπει να χρησιμοποιείται ένα αντίστοιχο μαθηματικό μοντέλο για το  $X$  για να επιτευχθεί η προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων. Με βάση λοιπόν το φαινομενολογικό μοντέλο:

$$I_x = \left[ a S_{we}^{m^*} + (1-a) S_{we}^{l^*} \right] \quad m^* > l^* \quad (6.8)$$

προσδιορίζονται οι τιμές των παραμέτρων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### 7.1. Αναμίξιμη εκτόπιση.

Η έμφυτη πολυπλοκότητα των πολυφασικών συστημάτων και η ετερογένεια που μπορεί να υπάρξει στις πολλαπλές κλίμακες στα περισσότερα φυσικά περιβάλλοντα παράγουν ένα μεγάλο και δύσκολο σύνολο προβλημάτων που πρέπει να επιλυθούν, πριν η ακριβής προσομοίωση των πολυφασικών υπογείων φαινομένων μπορεί να αναμένεται. Ορυκτά χώματα, που αποτελούνται από την άμμο, άργιλο, και ο βούρκο, χαρακτηρίζονται από τις ετερογένειες πολυ-κλίμακας που απεικονίζονται στα προνομιακά σχέδια ροής.

Η μόλυνση του χώματος και των υπόγειων νερών από τους υγρούς ρύπους περιλαμβάνει μια ευρεία ποικιλία των πολυφασικών διαδικασιών μεταφορών (π.χ. βαρύτητα ροη, διάλυση, προσρόφηση, διασπορά, που συμβαίνουν σε ένα πολυ-κλίμακας ετερογενές διάστημα πόρων. Όσον αφορά τη διασπορά διαλυτής ουσίας στα χώματα, πολυάριθμες προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί και έχουν εξεταστεί για την ερμηνεία πειραμάτων σε ετερογενή μέσα και στήλες εδάφους.

Εντούτοις, υπάρχει έλλειψη απλών και γρήγορων μεθόδων ανάλυσης τα οποία θα επιτρέψουν:

- (α) να εκτιμήσει αποτελεσματικά τους συντελεστές μεταφοράς ως παραμέτρους εισαγωγής στους μακροσκοπικούς προσομοιωτές,
- (β) να προσδιοριστούν ποσοτικά την ετερογένεια πορώδους μέσου.

Η ετερογένεια διαμορφώνεται συχνά, ως ένας σχετικός τομέας των παραμέτρων της διαπερατότητας. Ποικιλία μεθόδων χρησιμοποιήθηκε να αναβαθμίσει στις πολυφασικές ιδιότητες ροής των ετερογενών πορώδων μέσων που κατέδειξαν ότι αυτές οι ιδιότητες εξαρτώνται από την κλίμακα, τις καταστάσεις ορίων που επιβάλλονται στην περιοχή και το σχέδιο του χρησιμοποιήθηκε με το αριθμητικό πρότυπο ροής.

Η διασπορά διαλυτής ουσίας είναι μια από της σημαντικότερες διαδικασίες μεταφοράς, που είναι υπεύθυνες για την διάδοση του μολυσματικού υγρού παράγοντα στην υπό επιφάνεια και τα υπόγεια νερά. Οι μακροσκοπικές παράμετροι που ποσολογούν τη διασπορά διαλυμένης ουσίας σε ένα πορώδες μέσο είναι ο διαμήκης και οι εγκάρσιοι συντελεστές διασποράς.

Στους μακροσκοπικούς αριθμητικούς κώδικες πρέπει να εισάγονται οι ακριβείς τιμές των συντελεστών διασποράς, της μεταφοράς μολυσματικών παραγόντων στα πορώδη μέσα προκειμένου να πάρουν αξιόπιστα αποτελέσματα για τις μελέτες αξιολόγησης του κινδύνου, και ερμηνεύουν σωστά τα σύνολα δεδομένων από τον έλεγχο των φρεατίων στα επιτόπου πειράματα.

Οι αλληλεπιδράσεις στις διαδικασίες μεταφοράς μάζας των πολλών συστατικών της φάσης και η πολύφασική ροή στα ετερογενή πορώδη μέσα περιγράφεται από ένα σύνθετο σύστημα με μη γραμμικές μερικές διαφορικές εξισώσεις, η αριθμητική λύση του οποίου επιτρέπει σε μας να παρακολουθήσουμε τη μετακίνηση του μολυσματικού παράγοντα με τρεις χωριστές μορφές:

- ως μη υγρή υδατική φάση υγρό (NAPL),
- ως διαλυτό συστατικό της υδάτινης φάσης,
- και ως κινητό μέρος της ρευστής φάσης.

Οι επιστήμονες ανέπτυξαν έναν αριθμητικό κώδικα για να λύσουν τις διαφορικού τύπου ροής εξισώσεις σε ένα δισδιάστατο ετερογενές υλικό. Από τα αποτελέσματα τις αναλύσεις ευαισθησίας οδηγούμαστε ότι η μεταφορά του ρευστού (NAPL) είναι εξαιρετικά μεγάλη σε μικρές αποκλίσεις από τις τριχοειδείς ιδιότητες του πορώδους μέσου και έχει επηρεασθεί έντονα από τις ιδιότητες του ρευστού συστήματος.

Εκτός από τη φυσική ετερογένεια, η υγρασία της επιφάνειας των πόρων μπορεί να ποικίλει στο χώρο σε έναν σχηματισμό λόγω παραλλαγών των χημικών ιδιοτήτων του ρευστού, της γήρανσης μολυσματικών παραγόντων και των στερεών ορυκτών της φάσης. Ένας 2-D πολυφασικό προσομοιωτή ροής που μιμείται τη φυσική και τη χημική ετερογένεια ενός συστήματος, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι χωρικές παραλλαγές της υγρασίας μπορεί να ασκήσει δραματική επίδραση στη κατανομή του DNAPL στο πορώδες υλικό. Τρισδιάστατες προσομοιώσεις δεξαμενών όπου μια μεγάλη μεταβλητότητα της διαπερατότητας συνδυάζεται με έναν μεγάλο χωρικό συσχετισμό της διαπερατότητας έδειξε ότι η αποδοτικότητα της μετατόπισης μειώνεται σημαντικά κατά τη διάρκεια της αποξήρανσης.

Από τις αριθμητικές προσομοιώσεις και τις διαδικασίες αναβάθμισης γίνεται εμφανές ότι η κατανομή κορεσμού και η συσχέτιση από την τριχοειδή πίεση και τη σχετική διαπερατότητα έχει έντονα επηρεασθεί από τη φύση, τη κατανομή, και το βαθμό της ετερογένειας, την κατανομή και μέγεθος των πόρων, και τη γεωμετρία τους. Οι επιστήμονες ανέπτυξαν ένα αριθμητικό πρότυπο της διαφορικής ροής σε ετερογενή πορώδη μέσα με ευδιάκριτες τριχοειδείς πιέσεις για να καταδείξουν την σημασία της τριχοειδούς ετερογένειας στη ροή και να περιγράψουν την ασυνέχεια στον κορεσμό λόγω των διαφορών στις τριχοειδείς πιέσεις.

Προσομοιώσεις πόρων και δικτύων αποκάλυψαν ότι η ετερογένεια κλίμακας πόρου έχει επιπτώσεις στις ιδιότητες ροής και στο κορεσμό ειδικά στα χαμηλότερα ποσοστά ροής. Συσχετισμένη ετερογένεια σε χαμηλότερο κορεσμό έχει μια ισχυρή επίδραση στην κατανομή των συστάδων του παγιδευμένου ρευστού. Ειδικότερα, διαπιστώθηκε ότι κατά τη διάρκεια αποξήρανσης σε ένα ετερογενές μέσο (όπου η διαπερατότητα αλλάζει στην κατεύθυνση της ροής), ο κορεσμός έχει έντονη συσχέτιση με τις ιδιότητες ροής.

Επίσης οι καταστάσεις μη αναμίξιμων μετατοπίσεων έδειξαν ότι ο κορεσμός ποικίλλει αρκετά ως λειτουργία του κλασματικού ποσοστού ροής, και της ετερογένειας σε αντίθεση με την διαπερατότητα.

Οι ιδιότητες διαφασικής ροής (τριχοειδής πίεση και σχετικές καμπύλες διαπερατότητας) σε χονδρόκοκκους και λεπτόκοκκους άμμοι καθορίστηκαν χωριστά ως εξής:

- στην αντίστροφη διαμόρφωση των πολλαπλών βημάτων πειραμάτων εκροής
- προσομοίωση πόρος-κλίμακας αυτής,
- διαφασική ροή χρησιμοποίηση των μεθόδων-Boltzman δικτυωτού πλέγματος

Οι προσομοιώσεις δικτύων πόρων καθίστανται απαραίτητοι καθώς αυξανόμενη της ετερογένεια των δομών πόρων, αυξάνεται ο διαμήκης συντελεστής DL διασποράς, και επίσης αυξάνεται και η εξάρτησή του από τον αριθμός (Pe) Peclet.

Εντούτοις, οι σημαντικές καμπύλες συγκέντρωσης διαλυτής ουσίας είναι ανίκανες να αναπαραχθούν από τη συμβατική εξίσωση διασποράς - μετατόπισης που χρησιμοποιεί μια μέση ταχύτητα πόρου και ένα συντελεστή διασποράς. Σε αυτήν την κατεύθυνση πρότυπα δύο περιοχών, που υποδιαιρούν το διάστημα πόρων σε κινητή και σε ακίνητη ζώνη έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για να ερμηνεύσουν τα πειραματικά αποτελέσματα και να υπολογίσουν όλες τις σχετικές παραμέτρους μεταφορών.

Μια ευρεία ποικιλία των εργαστηριακών τεχνικών έχουν χρησιμοποιηθεί για να μετρήσουν τους συντελεστές διασποράς των χωμάτων. Παροδικά πειράματα μεταφορών ροής του νερού και της διαλυτής ουσίας που διενεργήθηκαν σε εδαφολογικές στήλες χρησιμοποιήθηκαν να εκτιμήσουν, το υδραυλικό χώμα και τις παραμέτρους διασποράς μεταφοράς διαλυμένης ουσίας, χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα τεσσάρων ηλεκτροδίων για να μετρήσει την ηλεκτρική αγωγιμότητα.

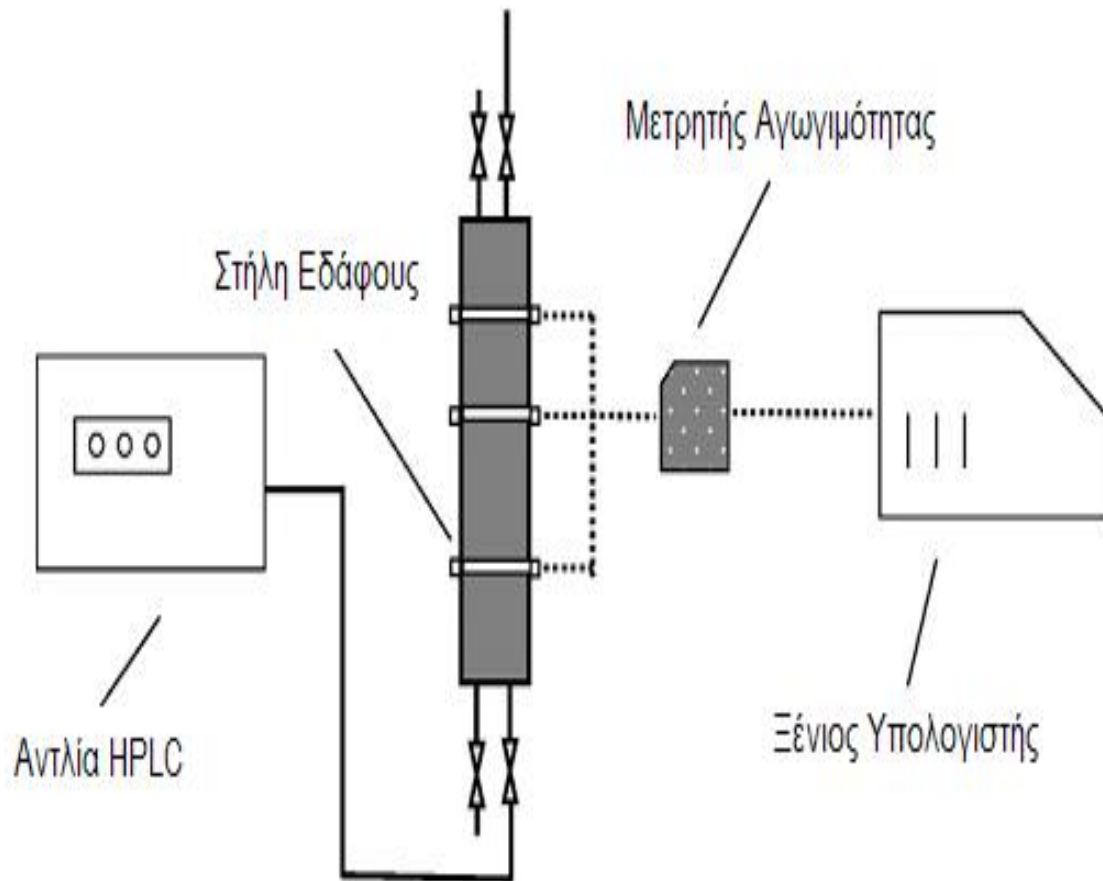
Η ηλεκτρική αγωγιμότητα που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μεταφορών διαλυμένης ουσίας που διενεργήθηκαν στις εδαφολογικές στήλες των χρησιμοποιήθηκε για να εξετάσει τα αποτελέσματα των διαφόρων συγκεντρώσεων του άλατος και της απόλυτης συγκέντρωσης άλατος σε συνθήκες υδροδυναμικής διασποράς. Μια κανονική μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για να μετρήσει τους διαμήκεις και εγκάρσιους συντελεστές διασποράς των ομοιογενών χωμάτων τροποποιώντας με διπλό δακτύλιο σε ένα σύστημα τριπλών-δακτυλιδίων.

Αυτή η μέθοδος ισχύει για ομοιογενή διατυπωμένα από υγρά χώματα, αλλά χρειάζεται κάποια βελτίωση για να ισχύσει για ετερογενή χώματα ή ακόρεστες καταστάσεις. Η μεταφορά διαλυτής ουσίας στο λεπτό αμμόδες χώμα έχει κάτω από διάφορες ροές με την εφαρμογή ανιχνευτή βρωμίδων (Br) στην επιφάνεια του χώματος, κατά τη διάρκεια σταθερής, ακόρεστης, διήθησης ύδατος.

Γνωστές συγκεντρώσεις διαλυμένης ουσίας χρησιμοποιήθηκαν (με συνθήκη ισορροπίας) για να εκτιμήσουν των συντελεστή ταχύτητας και διασποράς πόρου-ύδατος. Η μέθοδος TDR εφαρμόστηκε σε εργαστηριακά πειράματα χρησιμοποιώντας άθικτες, δομημένες εδαφολογικές στήλες. Με αυτήν την τεχνική, ένας ελεγκτής TDR εγκαθίσταται κάθετα και δένει με την βοήθεια του ανιχνευτή βρωμιδίων (Br) εφαρμόζεται για τις τιμές συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας. Η κάθετη μέθοδος ελέγχων TDR είναι απλή και γρήγορη με



ελάχιστη διαταραχή του χώματος, και αυτό είναι μια πολύ υποσχόμενη τεχνική για μελέτη μεταφορά διαλυτής ουσίας.



**Σχήμα 7.1.:** Πειραματική οργάνωση των αναμιξιμων πειραμάτων μετατοπίσεων.

Η εξάρτηση του συντελεστή διασποράς από τον αριθμό Peclet έχει ερευνηθεί εκτενώς με τη χρήση ποικίλων τεχνικών, (ακουστικούς, ραδιενεργούς ανιχνευτές), για να μετρηθούν οι περιοδικές αλλαγές από της συγκέντρωσης διαλυτής ουσίας στο πορώδες μέσο.

Για να υπολογισθούν οι διαμήκεις και εγκάρσιοι συντελεστές διασποράς ως λειτουργίες του αριθμού Peclet να προσδιοριστούν τα σχετικά με τη διασπορά διαλυτής ουσίας συστήματα έχουν χρησιμοποιηθεί πειράματα απεικόνισης της διασποράς διαλυμένης ουσίας που επάνω σε διαφανή πρότυπα πορώδη μέσα ποικίλης μορφολογίας

Για τον αριθμό Peclet από τις προσομοιώσεις σε κανονικά δίκτυα πόρων, είναι γνωστό ότι ο διαμήκης συντελεστής ( $D_L$ ) διασποράς συσχετίζεται με την κατανομή μήκους πόρων, και η σχέση  $D_L$  (Pe), για υψηλές τιμές pe, δίνει καλή εικόνα μακρό διασποράς.

Πρότυπα δύο-περιοχών, που υποδιαιρούν το χώρο του πόρου σε μια κινητή και μια ακίνητη ζώνη, έχουν ευρέως χρησιμοποιηθεί για να ερμηνεύσουν τα πειραματικά αποτελέσματα και να εκτιμήσουν τις υδροδυναμικές παραμέτρους μιας φοράς. Διαπιστώθηκε ότι το ποσοστό μεταφοράς από τη κινητή στην ακίνητη περιοχή είναι ανάλογο προς την ταχύτητα στους πόρους.

Μια συγκριτική ανάλυση των παραμέτρων που έχουν υπολογισθεί με τη χρησιμοποίηση τριών προτύπων μεταφοράς, μεταφοράς διασποράς (CD), κινητής –ακίνητης περιοχής (MIM), μεταφοράς λογαριθμικού κανονικού πρότυπου λειτουργίας μεταφοράς (CLT), μπορεί να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για να ερμηνευθούν οι πειραματικές καμπύλες από τα αδιατάρακτα χρώματα υπό διαποτισμένες και ακόρεστες συνθήκες.

Προκειμένου να ερμηνευθεί η υδροδυναμική διασπορά σε πορώδη μέσα μεγάλης ετερογένειας, αναπτύχθηκε η στατιστική μέθοδος συνεχούς χρόνου τυχαίας πορείας (CTRW). Ανάλογα με το βαθμό της ετερογενούς διαπερατότητας, μια ποικιλία διαλυτής ουσίας συστήματα διασποράς έχουν μελετηθεί. Σε πολλές πρακτικές περιπτώσεις, όπου η διαφορά της τοπικής διαπερατότητας είναι μέτρια, η εκτίμηση των κινητικών και ακίνητων ζωνών μπορούν να έχουν έλλειψη φυσικής έννοιας. Υπό αυτές της συνθήκες, το πορώδες μέσο θα μπορούσε να θεωρηθεί ως το σύνολο δύο κινητών περιοχών που διαφέρουν όσον αφορά τη μέση διαπερατότητα και τον συντελεστή διασποράς.

Εναλλακτικά, το πρότυπο δύο περιοχών έχει χρησιμοποιηθεί για να αναπαράγει τις σημαντικές καμπύλες διαλυτής ουσίας των ετερογενών πορωδών μέσων υπολογίζοντας όχι μόνο των συντελεστών διασποράς, αλλά επίσης την ταχύτητα πόρων σε κάθε περιοχή, την διαφορά η οποία είναι ανάλογη στο πάχος του μετώπου διασποράς.

Οι μεγάλες διαφορές της διαπερατότητας στα ετερογενή μέσα συνδέονται με τις μη ομοιότητες στις ταχύτητες του ρευστού. Το μεγαλύτερο μέρος της ροής επαναφέρεται κατά μήκος μερικών πολύπλοκων καναλιών έτσι ώστε τα μόρια διαλυτής ουσίας να κινούνται γρήγορα, ακλουθώντας την δομή αυτών των καναλιών. Αυτό το φαινόμενο ορίζεται κοινώς ως προνομιακή ροή.

Πολλή προσοχή έχει δοθεί στην ανάπτυξη των προτύπων προκειμένου να ερμηνευθεί η διασπορά διαλυτής ουσίας στα διπλά πορώδη μέσα όπου η προνομιακή ροή μέσου κλασμάτων και μακρο - πόρων είναι κυρίαρχη. Προσπαθώντας να ερμηνεύσουν τις δοκιμές ανιχνευτών εδαφολογικών στηλών, τομέων έχουν αναπτυχθεί διάφορα πρότυπα για να ποσοτικολογήσουν τα αποτελέσματα της ευρείας κατανομής των μεγεθών πόρων, και τις ταχύτητες στη διασπορά διαλυτής ουσίας.

Ένα πρότυπο που βασίζεται σε μια συνεχή διανομή της τοπικής ροής ταχυτήτων έδειξε ότι οι μακροσκοπικός συντελεστής διασποράς αυξάνεται με τη διαφορά μικροσκοπικής ταχύτητας ροής και αλλάζει γραμμικά με τη μέση ταχύτητα ροής.

Οι τεχνικές απεικόνισης έχουν χρησιμοποιηθεί για να εξετάσουν την προνομιακή ροή στα αδιατάραχτα χώματα χρησιμοποιώντας εικόνες τομογραφίας (CT) σε υπολογιστή. Αυτοί παρατήρησαν ότι η ροή στα κανάλια καταλήγει στην αύξηση του συντελεστή διασποράς και ενισχύεται όταν ενισχύεται η ετερογένεια. Τα πειράματα διασποράς που εκτελέστηκαν σε αδιατάραχτα υδρόβια ιζήματα αποκάλυψαν ότι η κατανομή του μεγέθους πόρων καταλήγει σε μη-ιδανικούς όρους ροής που χαρακτηρίζονται από καμπύλες συγκέντρωσης διαλυτής ουσίας.

Γενικά, υπάρχει μια ασάφεια σχετικά με την επίδραση μήκους και της κλίμακας του πορώδους μέσου στο συντελεστή διασποράς των ετερογενών εδάφων. Πειράματα σε εδαφολογικές στήλες έδειξαν ότι η σχέση μεταξύ του συντελεστή διασποράς και του μήκους του πορώδους μέσου ταιριάζει με αυτά των ομοιογενών χωμάτων. Ένας αριθμός πειραματικών και οι αριθμητικών μελετών που πραγματοποιήθηκαν για να διευκρινίσουν εάν οι εξισώσεις που περιγράφουν την μεταφορά ρευστού τη μεταφορά σε τοπικές κλίμακες απέδειξαν ότι η συμπεριφορά αυτού ισχύει επίσης και για μεγαλύτερες κλίμακες. Βρέθηκε ότι η προφανής διασπορά εμφανίστηκε να είναι υψηλότερη στις κατευθύνσεις υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Aggelopoulos et al., 2005. Large –scale effects on resistivity index of porous media.
2. Aggelopoulos, C.A., Tsakiroglou, C.D., 2007. The longitudinal dispersion coefficient of soils as related with the variability of local permeability. *Water Air Soil Pollut.* 185,223–237.
3. Bajracharya, K., Barry, D.A., 1997. Nonequilibrium solute transport parameters and their physical significance: numerical and experimental results. *J. Contam. Hydrol.* 24,185–204.
4. Bear, J., 1972. *Dynamics of fluids in porous media.* Elsevier, New York.
5. Bruggeman, G.A., 1999. *Analytical solutions of geohydrological problems.* Elsevier, New York.
6. 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.
7. Bruderer-Weng, C., Cowie, P., Bernabé, Y., Main, I., 2004. Relating flow channelling to tracer dispersion in heterogeneous networks. *Adv. Water. Resour.* 27, 843–855.
8. 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.
9. 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.
10. Durner, W., Flühler, H., 1996. Multi-domain model for pore-size dependent transport of solutes in soils. *Geoderma* 70, 281–297
11. Fernández-García, D., Sánchez-Vila, X., Illangasekare, T.H., 2002. Convergent-flow tracer tests in heterogeneous media: combined experimental-numerical analysis for determination of equivalent transport parameters. *J. Contam. Hydrol.* 57, 129–145.
12. Fried, J.J., Combarous, M., 1971. Dispersion in porous media. *Adv. Hydrosci.* 7, 169–282.
13. Gerke, H.H., 2006. Preferential flow descriptions for structured soils. *J.PlantNutr. Soil Sci.* 169,382–400.
14. Gwo, J.P., Jardine, P.M., Wilson, G.V., Yeh, G.T., 1995. A multiple-pore-region concept to modeling mass transfer in subsurface media. *J. Hydrol.* 164, 217–237.
15. Gwo, J.P., O'Brien, R., Jardine, P.M., 1998. Mass transfer in structured porous media: embedding mesoscale structure and microscale hydrodynamics in a two-region model. *J. Hydrol.* 208, 204–222.
16. Hangen, E., Gerke, H.H., Schaaf, W., Hüttl, R.F., 2004. Flow path visualization in a lignitic mine soil using iodine-starch staining. *Geoderma* 120, 121–135.
17. Heijs, A.W.J., Ritsema, C.J., Dekker, L.W., 1996. Three-dimensional visualization of preferential flow patterns in two soils. *Geoderma* 70, 101–116.
18. 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.
19. Huang, G., Huang, Q., Zhan, H., 2006. Evidence of one-dimensional scale-dependent fractional advection–dispersion. *J. Contam. Hydrol.* 85, 53–71.
20. Ioannidis, M.A., Chatzis, I., 1993. Network modeling of pore structure and transport properties of porous media. *Chem. Eng. Sci.* 48, 951–972.

21. Kim, Y.-J., Darnault, C.J.G., Bailey, N.O., Parlange, J.-Y., Steenhuis, T.S., 2005. Equation for describing solute transport in field soils with preferential flow paths. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 291–300.
22. Rosqvist, H., Destouni, G., 2000. Solute transport through preferential pathways in municipal solid waste. *J. Contam. Hydrol.* 46, 39–60.
23. Roychoudhury, A.N., 2001. Dispersion in unconsolidated aquatic sediments. *Estuar. Coast. Shelf. S.* 53, 745–757.
24. Skopp, J., Gardner, W.R., 1992. Miscible displacement — an interacting flow region model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56 (6), 1680–1686.
25. Spurr, A.R., 1969. A low-viscosity epoxy resin embedding medium for electron microscopy. *J. Ultrastructure Res.* 26, 31–43.
26. 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.
27. Tsakiroglou, C.D., Payatakes, A.C., 1991. Effects of pore-size correlations on mercury porosimetry curves. *J. Colloid Interface Sci.* 146, 479–494.
28. Tsakiroglou, C.D., Payatakes, A.C., 2000. Characterization of the pore structure of reservoir rocks with the aid of serial sectioning analysis, mercury porosimetry and network simulation. *Adv. Water Resour.* 23, 773–789.
29. Tsakiroglou, C.D., Ioannidis, M.A., in press. Dual-porosity modeling of the pore structure and transport properties of a contaminated soil. *Eur. J. Soil Sci.* doi:10.1111/j.1365-2389.2007.01019.x.
30. Vogel, T., Gerke, H.H., Zhang, R., Van Genuchten, M.Th., 2000. Modeling flow and transport in a two-dimensional dual-permeability system with spatially variable hydraulic properties. *J. Hydrol.* 238, 78–89.
31. Zinn, B., Meigs, L.C., Harvey, C.F., Haggerty, R., Peplinski, W.J., Von Schwerin, C.F., 2004. Experimental visualization of solute transport and mass transfer processes in two dimensional conductivity fields with connected regions of high conductivity. *Environ. Sci. Technol.* 38, 3916–3926
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. Aggelopoulos, C.A., Tsakiroglou, C.D., 2008b. Quantifying soil heterogeneity from solute dispersion experiments. *Geoderma* 146, 412–424.
36. 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.
37. 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.

38. 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.
39. Bartoli, F., Genevois-Gomendy, V., Royer, J.J., Niquet, S., Vivier, H., Grayson, R., 2005. A multiscale study of silty soil structure. *Eur. J. Soil Sci.* 56, 207–223.
40. Bird, N., Diaz, M.C., Saa, A., Tarquis, A.M., 2006. Fractal and multifractal analysis of pore-scale images of soil. *J. Hydrol.* 322, 211–219.
41. Bradford, S.A., Abriola, L.M., Rathfelder, K.M., 1998. Flow and entrapment of dense nonaqueous phase liquids in physically and chemically heterogeneous aquifer formations. *Adv. Water Resour.* 22, 117–132.
42. Braun, C., Helmig, R., Manthey, S., 2005. Macro-scale effective constitutive relationships for two-phase flow processes in heterogeneous porous media with emphasis on the relative permeability–saturation relationship. *J. Contam. Hydrol.* 76, 47–85.
43. Chang, Y.C., Mohanty, K.K., 1997. Scale-up of two-phase flow in heterogeneous porous media. *J. Pet. Sci. Eng.* 18, 21–34.
44. 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.
45. 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.
46. Crestana, S., Posadas, A.N.D., 1998. 2-D and 3-D fingering in unsaturated soils investigated by fractal analysis, invasion percolation modeling and nondestructive image processing. In: Baveye, P., Parlange, J.Y., Steward, B.A. (Eds.), *Advances in Soil Science. Fractals in Soil Science*. CRC Press, Boca Raton, FL., pp. 293–332.
47. 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.
48. Desparats, A.J., 1995. Upscaling capillary pressure-saturation curves in heterogeneous porous media. *Water Resour. Res.* 31, 281–288.
49. Durlinsky, L.J., 1991. Numerical calculation of equivalent grid block permeability tensors for heterogeneous porous media. *Water Resour. Res.* 27, 699–708.
50. Gerke, H.H., 2006. Preferential flow descriptions for structured soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169, 382–400.
51. Gharbi, R.B., Peters, E.J., Garrouch, A.A., 1997. Effect of heterogeneity on the performance of immiscible displacement with horizontal wells. *J. Pet. Sci. Eng.* 18, 35–47.
52. 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.
53. Huang, D.D., Honarpour, M.M., 1998. Capillary end effects in coreflood calculations. *J. Pet. Sci. Eng.* 19, 103–117.
54. Hwang, S.I., Powers, S.E., 2003. Estimating unique soil hydraulic parameters for sandy media from multi-step outflow experiments. *Adv. Water Resour.* 26, 445–456.
55. Inoue, M., Simunek, J., Shiozawa, S., Hopmans, J.W., 2000. Simultaneous estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient infiltration experiments. *Adv. Water Resour.* 23, 677–688.
56. King, P.R., 1989. The use of renormalization for calculating effective permeability. *Transp. Porous Media* 4, 37–58.

57. 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.
58. Kueper, B.H., Frind, E.O., 1991a. Two-phase flow in heterogeneous porous media. 1. Model development. *Water Resour. Res.* 27, 1049–1057.
59. Kueper, B.H., Frind, E.O., 1991b. Two-phase flow in heterogeneous porous media. 2. Model application. *Water Resour. Res.* 27, 1059–1070.
60. Kueper, B.H., Abbott, W., Farquhar, G., 1989. Experimental observations of multiphase flow in heterogeneous porous media. *J. Contam. Hydrol.* 5, 83–95.
61. Liu, Y.P., Hopmans, J.W., Grismer, M.E., Chen, J.Y., 1998. Direct estimation of air–oil and oil–water capillary pressure and permeability relations from multi-step outflow experiments. *J. Contam. Hydrol.* 32, 223–245.
62. Markicevic, B., Djilali, N., 2006. Two-scale modelling in porous media: relative permeability predictions. *Phys. Fluids* 18 Article number 033101.
63. Millán, H., González-Posada, M., 2005. Modelling soil water retention scaling. Comparison of a classical fractal model with a piecewise approach. *Geoderma* 125, 25–38.
64. 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.
65. 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.
66. Niessner, J., Helmig, R., 2007. Multi-scale modelling of three-phase–threecomponent processes in heterogeneous porous media. *Adv. Water Resour.* 30, 2309–2325.
67. Niessner, J., Helmig, R., Jakobs, H., Roberts, J.E., 2005. Interface condition and linearization schemes in the Newton iterations for two-phase flow in heterogeneous porous media. *Adv. Water Resour.* 28, 671–687.
68. Papafotiou, A., Helmig, R., Schaap, J., Lehmann, P., Kaestner, A., Flühler, H., Neuweiler, I., Hassanein, R., Ahrenholz, B., Tölke, J., Peters, A., Durner, W., 2008. From the pore scale to the lab scale: 3-D lab experiment and numerical simulation of drainage in heterogeneous porous media. *Adv. Water Resour.* 31, 1253–1268.
69. Pinder, G.E., Celia, M.A., 2006. *Subsurface hydrology*. Wiley, Hoboken, New Jersey.
70. 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.
71. Toth, J., Bodi, T., Szucs, P., Civan, F., 2002. Convenient formulae for determination of relative permeability from unsteady-state fluid displacements in core plugs. *J. Pet. Sci. Eng.* 36, 33–44.
72. 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.
73. Tsakiroglou, C.D., Theodoropoulou, M., Karoutsos, V., 2003. Non-equilibrium capillary pressure and relative permeability curves of porous media. *AIChE J.* 49, 2472–2486.
74. 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.
75. 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.



75. Yortsos, Y.C., Chang, J., 1990. Capillary effects in steady-state flow in heterogeneous cores. *Transp. Porous Media* 5 (4), 399–420.
76. Adler, P. M., & Thovert, J.-F. (1999). *Fractures and fracture networks: Theory and applications of transport in porous media*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer.
77. Bacri, J.-C., Rakotomalala, N., & Salin, D. (1987). Experimental evidence of disorder effects on hydrodynamic dispersion. *Physical Review Letters*, 58, 2035–2038.
78. Bajracharya, K., & Barry, D. A. (1997). Nonequilibrium solute transport parameters and their physical significance: Numerical and experimental results. *Journal of Contaminant Hydrology*, 24, 185–204.
79. Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. New York: Elsevier.
80. Berkowitz, B., Cortis, A., Dentz, M., & Scher, H. (2006). Modeling non-Fickian transport in geological formations as a continuous time random walk. *Reviews of Geophysics*, 44, RG2003, doi:10.1029/2005RG000178.
81. Bruderer, C., & Bernabe, Y. (2001). Network modelling of dispersion: Transition from Taylor dispersion in homogeneous networks to mechanical dispersion in very heterogeneous ones. *Water Resources Research*, 37, 897–908.
82. Bruggeman, G. A. (1999). *Analytical solutions of geohydrological problems*. New York: Elsevier.
83. Charlaix, E., Hulin, J.-P., Leroy, C., & Zarcone, C. (1988). Experimental study of tracer dispersion in flow through two-dimensional networks of etched capillaries. *Journal of Physics. D, Applied Physics*, 21, 1727–1732.
84. Comegna, V., Coppola, A., & Sommella, A. (2001). Effectiveness of equilibrium and physical non-equilibrium approaches for interpreting solute transport through undisturbed soil columns. *Journal of Contaminant Hydrology*, 50, 121–138.
85. Cortis, A., Chen, Y., Scher, H., & Berkowitz, B. (2004). Quantitative characterization of pore-scale disorder effects on transport in homogeneous granular media. *Physical Review E*, 70, 041108.
86. Costa, J. L., & Prunty, L. (2006). Solute transport in fine sandy loam soil under different flow rates. *Agricultural Water Management*, 83, 111–118.
87. Detwiler, R. L., Rajaram, H., & Glass, R. J. (2000). Solute transport in variable-aperture fractures: An investigation of the relative importance of Taylor dispersion and macrodispersion. *Water Resources Research*, 36, 1611–1625.
88. Ding, A., & Candela, D. (1996). Probing non-local tracer dispersion in flows through porous media. *Physical Review E*, 54, 656–660.
89. Drazer, G., Chertcoff, R., Bruno, L., Rosen, M., & Hulin, J. P. (1999). Tracer dispersion in packings of porous activated carbon grains. *Chemical Engineering Science*, 54, 4137–4144.
90. Dullien, F. A. L. (1979). *Porous media: Fluid transport and pore structure*. New York: Elsevier.
91. Fried, J. J., & Combarous, M. (1971). Dispersion in porous media. *Advances in Hydroscience*, 7, 169–282.
92. Gwo, J. P., O' Brien, R., & Jardine, P. M. (1998). Mass transfer in structured porous media: Embedding mesoscale structure and microscale hydrodynamics in a two-region model. *Journal of Hydrology*, 208, 204–222.
93. Inoue, M., Simunek, J., Shiozawa, S., & Hopmans, J. W. (2000). Simultaneous estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient infiltration experiments. *Advances in Water Resources*, 23, 677–688.



94. Lee, J., Horton, R., Noborio, K., & Jaynes, D. B. (2001). Characterization of preferential flow in undisturbed, structured soil columns using a vertical TDR probe. *Journal of Contaminant Hydrology*, 51, 131–144.
95. Lenormand, R. (1995). A stream tube model for miscible flow. *Transport in Porous Media*, 18, 245–261.
96. Maier, R. S., Kroll, D. M., Bernard, R. S., Howington, S. E., Peters, J. F., & Davis, H. T. (2000). Pore-scale simulation of dispersion. *Physics of Fluids*, 12, 2035–2079.
97. Manz, B., Alexander, P., & Gladen, L. F. (1999). Correlations between dispersion and structure in porous media probed by nuclear magnetic resonance. *Physics of Fluids*, 11, 259–267.
98. Peters, E. J., Gharbi, R., & Afzal, N. (1996). A look at dispersion in porous media through computed tomography imaging. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 15, 23–31.
99. Schotting, R. J., Moser, H., & Hassanizadeh, S. M. (1999). High-concentration-gradient dispersion in porous media: experiments, analysis and approximations. *Advances in Water Resources*, 22, 665–680.
100. Simmons, C. T., Fenstenmaker, T. R., & Sharp, J. M. (2001). Variable-density groundwater flow and solute transport in heterogeneous porous media: Approaches, resolutions and future challenges. *Journal of Contaminant Hydrology*, 52, 245–275.
101. Theodoropoulou, M., Karoutsos, V., Kaspiris, C., & Tsakiroglou, C. D. (2003). A new visualization technique for the study of solute dispersion in model porous media. *Journal of Hydrology*, 274, 176–197.
102. Tsakiroglou, C. D., Theodoropoulou, M. A., & Karoutsos, V. (2005b). Buoyancy-driven chaotic regimes during solute dispersion in pore networks. *Oil and Gas Science and Technology – Review IFP*, 60, 141–159.
103. 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.
104. Whitaker, S. (1999). *The method of volume averaging*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer.
105. Zhang, X., Qi, X., Zhou, X., & Pang, H. (2006). An in situ method to measure the longitudinal and transverse dispersion coefficients of solute transport in soil. *Journal of Hydrology*, 328, 614–619.
- Zinn, B., Meigs, L. C., Harvey, C. F., Haggerty, R., Peplinski, W. J., & Schwerin, C. F. V. (2004). Experimental visualization of solute transport and mass transfer processes in two-dimensional conductivity fields with connected regions of high conductivity. *Environmental Science & Technology*, 38, 3916–3926.
106. ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ:
- [http://www.google.gr/search?hl=el&site=img&tbn=isch&source=hp&biw=1440&bih=785&q=PORODES+MATERIAL&oq=PORODES+MATERIAL&gs\\_l=img.12...3696.3696.0.5581.1.1.0.0.0.124.124.0j1.1.0...0.0...1ac.2.2.img.ihuEXIhgFoM](http://www.google.gr/search?hl=el&site=img&tbn=isch&source=hp&biw=1440&bih=785&q=PORODES+MATERIAL&oq=PORODES+MATERIAL&gs_l=img.12...3696.3696.0.5581.1.1.0.0.0.124.124.0j1.1.0...0.0...1ac.2.2.img.ihuEXIhgFoM)
  - [http://www.google.gr/search?q=ELECTRICAL+PROPERTIES+OF+POROUS+MATERIALS&hl=el&tbo=d&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ei=ibsWUYysJMHQtAaTrIGYCA&sqi=2&ved=0CAcQ\\_AUoAA&biw=1440&bih=748](http://www.google.gr/search?q=ELECTRICAL+PROPERTIES+OF+POROUS+MATERIALS&hl=el&tbo=d&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ei=ibsWUYysJMHQtAaTrIGYCA&sqi=2&ved=0CAcQ_AUoAA&biw=1440&bih=748)

Στο τέλος αυτής της πτυχιακής εργασίας θα θέλαμε να ξανά ευχαριστήσουμε θερμά τον **Δρ. Αγγελόπουλο Χρήστο** για την συνεργασία του και την πολύτιμη βοήθεια του.



Εικόνα: πορώδες υλικό