



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΑΛΛΑΡΟΥ ΧΡΥΣΟΥΛΑΣ

**Εργαστηριακή διερεύνηση της επίδρασης της διαβρεξιμότητας του πετρώματος επί των
καμπυλών σχετικών διαπερατοτήτων νερού-πετρελαίου σε πυρήνες υπόγειων
ταμειωτήρων υδρογονανθράκων.**

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ανδρέας Γιώτης, Επίκουρος καθηγητής, *Επιβλέπων*

Καλογεράκης Νικόλαος, Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος

Δημήτριος Μαρινάκης ΕΔΙΠ Δρ. Χημικός Μηχανικός,

Χανιά, Ιανουάριος 2021

Η προπτυχιακή φοιτήτρια που εκπόνησε την παρούσα διπλωματική εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στη βάση των εξής παραγόντων : του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (μη-εμπορικός, μη-κερδοσκοπικός, αλλά εκπαιδευτικός και ερευνητικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες κλπ.), του ποσοστού και της σημαντικότητας του τμήματος που χρησιμοποιεί σε σχέση με το όλο κείμενο υπό copyright, και των πιθανών συνεπειών της χρήσης αυτής στην αγορά ή τη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Γιώτη Ανδρέα ο οποίος ήταν πάντα πρόθυμος να βοηθήσει στην αποπεράτωση της παρούσας εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον Καθηγητή Βαρότση Νικόλαο που με εμπιστεύθηκε για την εκπόνηση του συγκεκριμένου θέματος καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Δρ. Μαρινάκη Δημήτριο χωρίς την συμβολή του οποίου δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί η παρούσα διπλωματική, ο οποίος μοιράστηκε τόσο τις γνώσεις όσο και την εμπειρία του. Σημαντική ήταν η βοήθεια της Δρ. Κρητικάκης Άννας στον προσδιορισμό της κατανομής μεγέθους πόρων που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Κεραμικών και Υάλου, καθώς και του Δρ. Στρατάκη Αντώνιου για την ορυκτολογική ανάλυση (XRD) που έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Καλογεράκη Νικόλαο που αποτέλεσε μέρος της εξεταστικής επιτροπής.

Θα ήθελα να ευχαριστώ την οικογένεια μου και ιδιαιτέρως την αδερφή μου Ζωή για την αμέριστη συμπαράσταση, βοήθεια, κατανόηση και ενθάρρυνση όλων αυτών τον καιρό.....

What we know is a drop...

What we don't know is an ocean...

Isaac Newton

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εκπονήθηκε κατά το 10^ο εξάμηνο των προπτυχιακών σπουδών με θέμα την εργαστηριακή διερεύνηση της επίδρασης της διαβρεχτότητας ή διαβρεξιμότητας του πετρώματος επί των καμπυλών σχετικών διαπερατοτήτων νερού-πετρελαίου σε υπόγειους ταμιευτήρες υδρογονανθράκων. Ο βασικός άξονας της διπλωματικής στηρίζεται σε εργαστηριακές μελέτες και μέσω αναζήτησης συγγραμμάτων, άρθρων και διπλωματικών εργασιών έγινε η συγγραφή του κειμένου που στόχο είχε μια ενημερωμένη προσέγγιση του θέματος.

Η διαβροχή μπορεί να είναι είτε ομοιογενής είτε ετερογενής αν και τις περισσότερες φορές ισχύει η δεύτερη περίπτωση σε πραγματικές συνθήκες. Καθορίζεται από την τάση που έχει μια επιφάνεια του πετρώματος να έλκει συστατικά που περιέχονται είτε στην υδατική είτε στην ελαιώδη φάση. Ομοιογενής καλείται όταν σε όλο το εύρος του ταμιευτήρα επικρατεί περίπου ίδια τάση διαβροχής από νερό ή πετρέλαιο ενώ ετερογενής όταν παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις σε διάφορα σημεία του πετρώματος (Rezaei, Mohammadzadeh, Parsaei, Chatzis, SPE 2010). Η δυσκολία προσδιορισμού της διαβρεχτότητας αποτελεί μείζον θέμα στην εκμετάλλευση ταμιευτήρων. Η διαβροχή έχει την τάση να διαφοροποιείται από σημείο σε σημείο κάτι που καθιστά ακόμη πιο δύσκολο τον προσδιορισμό της. Για να γίνει βέλτιστη ανάκτηση του πετρελαίου που υπάρχει σε έναν ταμιευτήρα πρέπει να υπάρχουν ευνοϊκές συνθήκες ροής, κάτι που συσχετίζεται άμεσα με την ανάγκη μελέτης των διαπερατοτήτων και συγκεκριμένα των σχετικών διαπερατοτήτων του σχηματισμού, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα την τάση διαβροχής του σχηματισμού.

Η δομή της διπλωματική εργασίας είναι η εξής: στο 1^ο Κεφάλαιο αναλύονται εισαγωγικές έννοιες όπως η πετρελαιογένεση και η μετανάστευση. Στο 2^ο Κεφάλαιο αναλύεται η έννοια της διαβροχής του πετρώματος και στο 3^ο Κεφάλαιο αναφέρεται η έννοια των σχετικών διαπερατοτήτων. Στη συνέχεια στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι προσδιορισμού τόσο της διαβρεχτότητας όσο και των σχετικών διαπερατοτήτων. Στο 5^ο Κεφάλαιο περιγράφονται θεωρητικές έννοιες που σχετίζονται με το εργαστήριο αλλά και οι εργαστηριακές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μετρήσεις για πετρελαιοδιαβρεχτό δοκίμιο. Τέλος αναφέρονται τα συμπεράσματα της μελέτης και μια πρόταση για περαιτέρω έρευνα του τρόπου προσδιορισμού της διαβροχής αλλά και των μεθόδων μεταβολής της.

Λέξεις-κλειδιά: Διαβροχή, Υδατοδιαβρεχτός, Πετρελαιοδιαβρεχτός, Ανάκτηση Πετρελαίου, Σχετικές Διαπερατότητες.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι ο προσδιορισμός της διαβροχής ψαμμιτικού πετρώματος τύπου Berea αλλά και η επίδραση της στις καμπύλες σχετικών διαπερατοτήτων του συστήματος των ρευστών πετρελαίου-νερού.

Αρχικά προσδιορίστηκε η διαπερατότητα κατά Klinkenberg, ο μη περαιτέρω απομακρύνσιμος βαθμός κορεσμού σε νερό του πετρώματος, η ορυκτολογική του σύσταση και το πορώδες του. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της διαβρεχτότητας του πετρώματος είναι η μέθοδος Amott, μια απλή σχετικά μέθοδος αλλά χρονοβόρα. Προσδιορίστηκαν επίσης και οι διαπερατότητες του σχηματισμού με στόχο την κατασκευή διαγραμμάτων σχετικών διαπερατότητα συναρτήσει βαθμών κορεσμού. Από τις καμπύλες μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη διαβροχή του πετρώματος.

Ακολούθησε η δεύτερη φάση μετρήσεων που στόχο είχε τη μεταβολή της διαβροχής και την επανάληψη βημάτων που ήδη είχαν εκτελεσθεί την πρώτη φορά. Έγινε χρήση πετρελαϊκού δείγματος περιεκτικότητας 8-9% σε ασφαλένια προκειμένου να μεταβληθεί η διαβροχή του πετρώματος. Τελικό βήμα και εδώ η κατασκευή διαγραμμάτων σχετικών διαπερατοτήτων συναρτήσει βαθμών κορεσμού και η παρατήρηση των αλλαγών των καμπυλών σε σχέση με την υδατοδιαβρεχτή περίπτωση.

Τέλος έγινε επεξεργασία μετρήσεων και μελέτη του συντελεστή κινητικότητας. Κάτι τέτοιο έχει άμεση εξάρτηση με την αποδοτικότητα της διαδικασίας εισπίεσης ενός ρευστού για εκτόπισης ενός άλλου.

Λέξεις-Κλειδιά: Διαβροχή, Ψαμμίτης, Διαπερατότητα Klinkenberg, Σχετικές διαπερατότητες, Μέθοδος Amott, Ασφαλένια, Συντελεστής κινητικότητας

Abstract

The objective of this thesis is the determination of wettability of a Berea sandstone core and the effect that it bears on the relative permeability curves of the oil-water system of fluids.

Klinkenberg permeability, the irreducible water saturation (s_{wc}), mineral composition and porosity were initially determined. The method used to measure wettability is the Amott method, a simple but time consuming method. Water and oil permeabilities of the formation were also determined in order to construct diagrams of relative permeabilities as a function of water saturation. From the curves conclusions can be drawn concerning rock wettability.

A second phase of measurements followed aiming at altering wettability and repeating all the steps that had already been performed during the first phase. An oil sample containing 8-9% asphaltene was used for altering wettability. Finally, diagrams of relative permeability as functions of water saturation were drawn and the changes in the curves were observed.

Finally, the mobility ratio was measured. This is directly related to the efficiency of the displacement process of oil by the injected water.

Key-Words: Wettability, Sandstone, Klinkenberg permeability, Relative permeabilities, Amott method, Asphaltenes, Mobility ratio

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
Abstract.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	10
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1 ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΓΕΝΕΣΗ	10
1.2 ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	15
ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΡΕΥΣΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ	15
2.1 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΝΕΡΟΥ-ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΜΕΣΟΥ	15
2.2 ΔΙΑΒΡΟΧΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	15
2.3 ΔΥΝΑΜΕΙΣ VANDERWAALS ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΜΕΣΟΥ	19
2.4 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΟΥΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ	21
2.5 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΑΣΗ ΚΑΙ ΓΩΝΙΑ ΕΠΑΦΗΣ	22
2.6 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΧΟΕΙΔΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΣΤΗ ΡΟΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ	24
2.7 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΡΙΧΟΕΙΔΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ	27
2.8 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΥΧΟΝ ΚΑΘΙΣΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΕΝΙΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	29
2.9 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΣΕ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	32
ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ.....	32
3.1 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ	32
3.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΚΑΙ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ	36
3.2.1 ΠΟΡΩΔΕΣ	36
3.2.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΚΑΙ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΣΧΕΣΗΣΚΟΖΕΝΥ	37
3.3 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΩΝ	39
3.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΕΧΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕΣΩ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΩΝ.....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο	44
ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΙΑΒΡΕΧΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΩΝ	44

4.1	ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΕΧΤΟΤΗΤΑΣ.....	44
4.2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΩΝ	47
4.2.1	ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	47
4.2.2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο		51
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....		51
5.1	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΨΑΜΜΙΤΩΝ	51
5.1.2	ΚΟΠΗ ΚΑΙ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	52
5.2	ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕ ΑΚΤΙΝΕΣ-Χ.....	53
5.2.1	ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ XRD (X-Ray Diffraction)	54
5.3	ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΠΟΡΩΝ (Mercury Intrusion Porosimetry)	58
5.3.1	ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	60
5.4	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΚΑΙ ΜΗ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΙΜΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΕ ΝΕΡΟ (s_{wc})	63
5.4.1	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ	63
5.4.2	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΙΜΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΕ ΝΕΡΟ (s_{wc}).....	65
5.4.3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΕ ΕΞΑΝΙΟ	68
5.5	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΕΧΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ Amott ..	69
5.5.1	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ ΑΜΟΤΤ ΓΙΑ ΥΔΑΤΟΔΙΑΒΡΕΧΤΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ	71
5.6	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΚΛΙΝΚΕΝΒΕΡΓ	74
5.6.1	ΘΕΩΡΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΚΛΙΝΚΕΝΒΕΡΓ.....	74
5.7	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΩΝ	86
5.7.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	87
5.8	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΥΣ ΒΑΘΜΟΥΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΘΕΝΤΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΩΝ	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο		93
ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΟ ΠΟΥ ΜΕΤΕΤΡΑΠΕΙ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΔΙΑΒΡΕΧΤΟ		93
6.1	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	93
6.2	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ.....	94
6.3	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ , ΜΗ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΙΜΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΕ ΝΕΡΟ ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΕ ΕΞΑΝΙΟ	98
6.4	ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ OIL-WET	99

6.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (MOBILITYRATIO).....	101
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	105
ΠΡΟΤΑΣΗ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	106
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	107
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	114
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ2: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΟΡΟΣΙΜΕΤΡΙΑΣ-KLINKENBERG ΓΙΑ OIL-WET.....	117
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3:ΕΙΚΟΝΕΣ.....	122

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΓΕΝΕΣΗ

Ο σχηματισμός του πετρελαίου προκύπτει από την συσσώρευση οργανικής ύλης σε ρηχά θαλάσσια περιβάλλοντα είτε και χερσαία, με τη συμβολή ιζημάτων τα οποία μεταφέρονται διαμέσου νερού και αέρα. Στα υδάτινα περιβάλλοντα η οργανική ύλη δημιουργείται από τη φωτοσύνθεση του φυτοπλαγκτόν (συντελείται από φυτικούς οργανισμούς που επιπλέουν στη στήλη του νερού), αφού αποτελεί βάση της τροφικής αλυσίδας. Τα ορυκτά αλλά και η οργανική ύλη που βρίσκονται στα ιζήματα είναι ένα σύνολο το οποίο μετασχηματίζεται από διάφορες φυσικοχημικές διεργασίες. Τα στάδια μετασχηματισμού της οργανικής ύλης είναι τέσσερα: διαγένεση, καταγένεση, μεταγένεση και μεταμόρφωση. Σαν αρχικό στάδιο μετασχηματισμού της οργανικής ύλης στα ιζήματα είναι η διαγένεση η οποία περιλαμβάνει την απονέκρωση των επιμέρους οργανισμών και την αποδόμηση των ιστών τους. Αρχικά η οργανική ύλη αποτίθεται σε μη συνεκτική ύλη, που αποτελείται κυρίως από νερό. Καθώς αυξάνονται τόσο το βάθος ταφής όσο και τα υπερκείμενα στρώματα, τα ιζήματα συμπιέζονται όλο και περισσότερο και στα πρώτα 500m αρκετά γρήγορα. Αυτό λοιπόν έχει σαν αποτέλεσμα να προκύπτουν πετρώματα ιλυολίθων ή σχίστων. Όσο εναποτίθενται ιζήματα στα ήδη υπάρχοντα στρώματα ιζημάτων, τα τελευταία θάβονται ακόμη πιο βαθειά με αποτέλεσμα να μειώνονται οι ποσότητες οξυγόνου. Το βάθος ταφής στο οποίο τελικά θα συναντηθούν τα ιζήματα μπορεί να είναι από μερικές εκατοντάδες μέτρα έως μερικά χιλιόμετρα. Έτσι λοιπόν προκύπτει και ο όρος του μητρικού σχηματισμού (source rock). Με πιο απλά λόγια, ο σχηματισμός εκείνος που περιέχει το κηρογόνο δηλαδή την οργανική ύλη που τελικά θα μετατραπεί σε πετρέλαιο καλείται μητρικό πέτρωμα.¹ Η έννοια του μητρικού πετρώματος καθιερώθηκε τον 20^ο αιώνα.

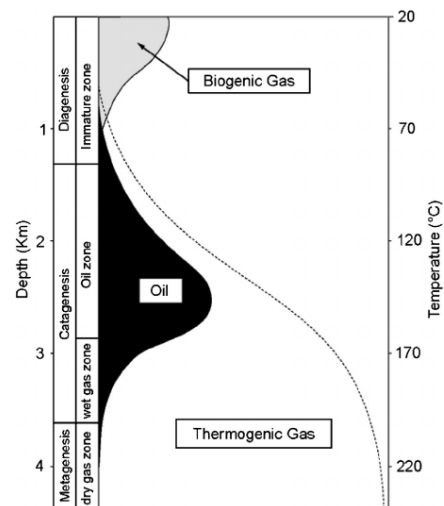
Η οργανική ύλη περνάει μέσα από διάφορες μεταβολές στο στάδιο της διαγένεσης. Αρχικά τα βιοπολυμερή διασπώνται μέσω της διαδικασίας της υδρόλυσης σε μονομερή. Οι πρωτεΐνες μετασχηματίζονται σε αμινοξέα ενώ η αποδόμηση των λιπιδίων αλλά και της λιγνίνης (η λιγνίνη στα ιζήματα μπορεί δημιουργείται και από αέριους υδρογονάνθρακες) γίνονται με πιο αργούς ρυθμούς. Ποσότητα των μονομερών διαλύεται στο νερό με αποτέλεσμα τα βακτήρια που βρίσκονται στο περιβάλλον να εισάγουν τα συγκεκριμένα μονομερή στο μεταβολισμό τους. Η διάσπαση των βιοπολυμερών γίνεται σε στάδια. Έτσι η

σειρά με την οποία θα γίνουν οι αντιδράσεις στηρίζεται στο πόσο εύκολα ή δύσκολα θα διασπαστούν οι δεσμοί των βιοπολυμερών από τους μικροοργανισμούς. Τα υπολείμματα των βιολογικών μορίων που δεν είναι υδατοδιαλυτά καλούνται γεωμονομερή. Πρακτικά πέρα από τη διεργασία της αποδόμησης της οργανικής ύλης λαμβάνει χώρα και η διαδικασία σύνθεσης γεωπολυμερών που αποτελούν μια πρόδρομη μορφή του κηρογόνου και δημιουργούνται από συνένωση μικρών γεωμονομερών. Κατά τα πρώτα στάδια της διαγένεσης στην διεπιφάνεια ιζηματος-νερού, το οξυγόνο που είναι διαλυμένο χρησιμοποιείται από αερόβια βακτήρια με αποτέλεσμα η οργανική ύλη να αποδομείται αρκετά γρήγορα. Το οξυγόνο σε αυτή τη φάση μπορεί να εκλείψει με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ανοξικού περιβάλλοντος. Σε μικρότερα βάθη τα αναερόβια βακτήρια καθορίζουν την περιεκτικότητα σε θείο που θα έχουν τόσο το κηρογόνο όσο και το πετρέλαιο και δημιουργείται το βιογενές μεθάνιο. Σε μεγαλύτερα βάθη οργανική ύλη αποδομείται από αναερόβια βακτήρια. Το μίγμα των ιζημάτων και της οργανικής ύλης, που έχει θαφτεί στο σημείο όπου επιτυγχάνεται συσσώρευση των ιζημάτων και η αύξηση της θερμοκρασίας, έχει σαν αποτέλεσμα τη μετατροπή της οργανικής ύλης σε κηρογόνο. Τα γεωμονομερή ενώνονται τυχαία και δημιουργούν τα γεωπολυμερή, τα οποία διατηρούνται λόγω της δομής τους (που τους προσδίδει μια μεγάλη χημική σταθερότητα αλλά και αντοχή κατά τη δράση βακτηρίων) περισσότερο σε περιβάλλοντα ιζημάτων-πετρωμάτων. Γίνεται επίσης ενσωμάτωση επιμέρους συστατικών των μικροοργανισμών στο κηρογόνο, οι οποίοι με τη σειρά τους λαμβάνουν μέρος στην διαδικασία της αποδόμησης της οργανικής ύλης, μετά την αποσύνθεσή τους. Το τελικό προϊόν της διαγένεσης είναι το κηρογόνο (που είναι αδιάλυτο σε οργανικούς διαλύτες), επίσης ποσότητα υδρογονανθράκων έχει παραχθεί και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε επόμενα στάδια δημιουργίας πετρελαίου. Ως ανώτατο θερμοκρασιακό όριο του πρώτου σταδίου (διαγένεσης) είναι οι 50-60°C.

Έπειτα ακολουθεί το στάδιο της καταγένεσης κατά το οποίο σχηματίζεται το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο. Στα αρχικά στάδια της καταγένεσης παράγονται υψηλής πυκνότητας πετρέλαια με ετεροσυστατικά, συστατικά που έχουν ως βάση το άζωτο, το θείο και το οξυγόνο (NSO). Αρχικά δημιουργούνται υγροί υδρογονάνθρακες και στην πορεία περισσότερο αέριοι αφού γίνεται πυρόλυση των ήδη υπαρχόντων υδρογονανθράκων. Μειώνεται η ποσότητα του κηρογόνου και αλλάζει χρώμα καθώς γίνεται πιο σκούρο. Κατά τη μεταγένεση γίνεται παραγωγή κυρίως ξηρού αερίου καθώς σπάνε οι δεσμοί των ανθράκων στους υδρογονάνθρακες που ήδη έχουν σχηματιστεί. Άνω όριο της μεταγένεσης είναι η θερμοκρασία των 300°C. Το στάδιο της μεταγένεσης εμφανίζεται σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες και σε βάθη της τάξης των 4000 m. Η παραγωγή υδροθείου στο αέριο είναι πιθανή. Αξίζει να αναφερθεί πως ο ρυθμός με τον οποίο μετατρέπεται το κηρογόνο σε πετρέλαιο εξαρτάται άμεσα από την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος κατά τη διεργασία της ταφής των ιζημάτων. Από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι το πετρέλαιο αρχίζει να σχηματίζεται στους 95°C και στα 3.500 m. Η αμέσως επόμενη διαδικασία (μετανάστευση) είναι αφού δημιουργηθεί το πετρέλαιο, ο τρόπος με τον οποίο θα μετακινηθεί έτσι ώστε να καταλήξει να αποθηκευτεί σε ταμιευτήρες.

Το πετρέλαιο για να δημιουργηθεί πρέπει να υπάρχει ικανοποιητική ποσότητα οργανικής ύλης και να μπορούν να δημιουργηθούν υδρογονάνθρακες. Οι παράγοντες λοιπόν που συμβάλλουν στη δημιουργία του πετρελαίου είναι το βάθος ταφής της αρχικής οργανικής ύλης, η θερμοκρασία αλλά και η ηλικία του σχηματισμού στον οποίο φιλοξενήθηκε.

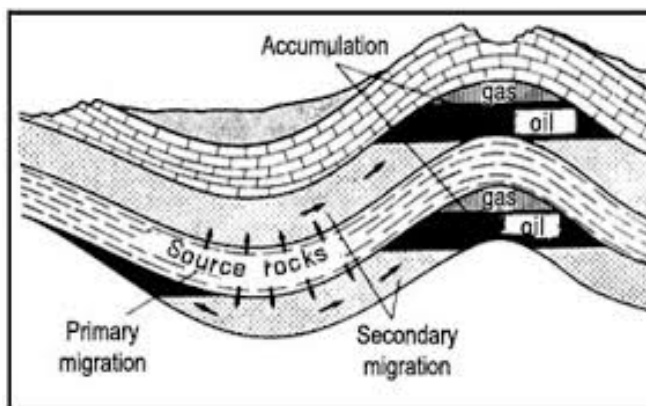
Σύμφωνα λοιπόν και με τους Tissot και Welte (Εικόνα 1.1) σε μικρές θερμοκρασίες αλλά και βάθη ο μητρικός σχηματισμός παράγει αποκλειστικά βιογενές μεθάνιο μέσω της επίδρασης βακτηρίων. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 60°C αλλά και βάθη περίπου του 1,5 km ξεκινάει το στάδιο της καταγένεσης που μπορεί να συνεχιστεί και σε βάθη των 3 km. Σε αυτό λοιπόν το στάδιο οι μητρικοί σχηματισμοί εμφανίζονται να βρίσκονται μέσα στο παράθυρο γένεσης (oil window) και παράγουν υγρούς υδρογονάνθρακες ως επί το πλείστον. Το παράθυρο γέννησης εμφανίζεται σε θερμοκρασίες μέχρι 175°C.²



Εικόνα 1.1: Η μεταβολή του οργανικού υλικού μέσα από όλες τις επιμέρους διεργασίες μέχρι τον σχηματισμό του πετρελαίουⁱ

1.2 ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

Η διεργασία της μεταφοράς των συστατικών που υπάρχουν στο πετρέλαιο από το μητρικό πέτρωμα στον ταμιευτήρα, όπου και συσσωρεύονται και μπορούν να παραχθούν, καλείται μετανάστευση του πετρελαίου. Αποτελείται από δύο επιμέρους στάδια, την πρωτογενή και τη δευτερογενή μετανάστευση (Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2 Σχηματική απεικόνιση της μετανάστευσης του πετρελαίουⁱⁱ

Κατά την πρωτογενή μετανάστευση λόγω διαστολής των παραγόμενων ρευστών αναπτύσσονται μικρορωγμές για τη ροή υδρογονανθράκων μέσα στο μητρικό πέτρωμα. Σε αυτό το στάδιο είναι πιο δύσκολο να μεταφερθούν οι υδρογονάνθρακες εκτός του μητρικού πετρώματος καθώς έχουν μικρή διαλυτότητα στο νερό, με αποτέλεσμα να μην γίνεται εύκολα η μετακίνησή τους διαμέσω του νερού που υπάρχει στους πόρους. Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις της διαδικασίας της πρωτογενούς μετανάστευσης κάποιες από τις οποίες θα αναλυθούν παρακάτω. Για να απομακρυνθούν οι υδρογονάνθρακες θα πρέπει να γίνει εξώθηση ποσοτήτων νερού το οποίο όμως δεν υπάρχει στα μητρικά πετρώματα καθώς έχουν συμπιεστεί σε τέτοιο βαθμό με αποτέλεσμα το πορώδες τους να είναι μικρό. Το πρόβλημα της έλλειψης νερού, η ύπαρξη του οποίου θα βοηθούσε στη μεταφορά υδρογονανθράκων έξω από τον μητρικό σχηματισμό με συνθήκες που στηρίζονται στην κίνηση των υδρογονανθράκων μέσω νερού στους πόρους, αντιμετωπίζεται αν απομακρυνθεί ποσότητα νερού από ορυκτά (μοντοριλονίτης) που συναντώνται κατά τη διαδικασία της μετανάστευσης στους σχηματισμούς. Με την απομάκρυνση λοιπόν νερού από τέτοιους σχηματισμούς ευνοείται η μεταφορά υδρογονανθράκων. Κάτι τέτοιο όμως έχει περιορισμούς καθώς τα ορυκτά από τα οποία μπορούν ποσότητες νερού να απομακρυνθούν δεν υπάρχουν σε όλους τους σχηματισμούς μητρικών πετρωμάτων. Κάποιες άλλες θεωρίες αναφέρουν ότι μετακινούνται όχι ακριβώς πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες αλλά ετεροενώσεις καθώς έχουν αυξημένη διαλυτότητα στο νερό. Η συγκεκριμένη θεωρία εξώθησης υδρογονανθράκων εμφανίζεται ελλιπής καθώς οι συγκεντρώσεις των ετεροσυστατικών είναι χαμηλές με αποτέλεσμα να μην μπορούν να συσχετιστούν με την ολική μετακίνηση των υδρογονανθράκων εκτός του μητρικού σχηματισμού.³

Άλλες θεωρίες αποδίδουν το μηχανισμό της πρωτογενούς μετανάστευσης στη δημιουργία μυκηλίων (κολλοειδείς δομές, με σχετικά μεγάλο μέγεθος και χαμηλή συγκέντρωση στο πετρέλαιο). Επίσης, η απελευθέρωση των υδρογονανθράκων ευνοείται κατά την πρωτογενή μετανάστευση από την εκτόνωση της υπερπίεσης, με αποτέλεσμα υδρογονάνθρακες να διαφεύγουν από το μητρικό σχηματισμό. Η υπερπίεση μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες όπως διαστολή των ρευστών σε υψηλές θερμοκρασίες, δημιουργία πετρελαίου και αερίων αλλά και από τυχόν συμπύκνωση του μητρικού σχηματισμού. Όπως λοιπόν αυξάνεται η πίεση η δημιουργία μικρορωγμών είναι πιθανή. Αυτά τα ραγίσματα συμβάλλουν στη πρωτογενή μετανάστευση του πετρελαίου.⁴ Παρ' όλο που έχουν αναπτυχθεί διάφορες θεωρίες η πρωτογενής μετανάστευση δεν μπορεί να ερμηνευθεί πλήρως από τις εν λόγω θεωρίες, κάτι που ίσως θα μπορούσε να επιτύχει είναι ένας συνδυασμός διαφορετικών υποθέσεων του τρόπου μετακίνησης των υδρογονανθράκων, εξαρτώμενος πάντα από τις φυσικοχημικές συνθήκες αλλά και το στάδιο που δημιουργούνται οι υδρογονάνθρακες.

Η δευτερογενής μετανάστευση στηρίζεται στην μετακίνηση σταγονιδίων διαμέσου του δικτύου των πόρων και κυρίως των ρωγμών που βρίσκεται στους περατούς σχηματισμούς εν μέσω υδατικής φάσης. Η ροή αυτή μπορεί να φτάσει και σε ακτίνα 100 km.⁵ Η μετακίνηση των σταγονιδίων εξαρτάται από, τις τριχοειδείς πιέσεις, την άνωση και τη δυναμική ροή του νερού. Η δεύτερη συνιστώσα στηρίζεται στη διαφορά πυκνότητας μεταξύ πετρελαίου και νερού. Η διαφορά των σχηματισμών αυτών σε σχέση με τους μητρικούς βρίσκεται στις υψηλότερες τιμές πορώδους αλλά και διαπερατότητας. Η πορεία των σταγόνων αυτών λοιπόν καθορίζεται και από τις τριχοειδείς πιέσεις που εμποδίζουν στη μετακίνηση διαμέσω πόρων μικρότερης διαμέτρου που ήδη περιέχουν νερό. ⁶. Έτσι δημιουργούνται συνθήκες παγίδευσης του πετρελαίου. Κατά τη διαδικασία της μετανάστευσης οι σχηματισμοί είναι εξ' αντικειμένου υδατοδιαβρεχτοί. Όταν λοιπόν υδρογονάνθρακες παραχθούν από μητρικά πετρώματα και συσσωρευτούν σε μία περιοχή παγίδευσης, τότε μόνο μπορεί να σχηματιστεί ένας ταμιευτήρας.⁷

Για να σχηματιστεί λοιπόν το πετρέλαιο πρέπει να υπάρχουν τα εξής:

- μητρικό πέτρωμα (source rock)
- ρήγματα και διακλάσεις που συμβάλλουν στη μετανάστευση των υδρογονανθράκων (migration)
- πετρώματα ταμιευτήρες (reservoir rock)
- υπερκείμενο αδιαπέρατο πέτρωμα (cap rock)
- συνθήκες παγίδευσης (traps)⁸

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΡΕΥΣΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

2.1 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΝΕΡΟΥ-ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΜΕΣΟΥ

Στους ταμιευτήρες υδρογονανθράκων συνυπάρχουν πάντα δύο φάσεις, ενώ αρκετές φορές μπορεί να υπάρξουν τρεις ή και περισσότερες. Η μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ ρευστών, αλλά και ρευστών και πετρώματος είναι σημαντική για την εκμετάλλευση του ταμιευτήρα. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές παίζουν σημαντικό ρόλο στην πρωτογενή-δευτερογενή αλλά και τριτογενή παραγωγή. Για να μελετήσει κάποιος την συνύπαρξη των φάσεων σε έναν ταμιευτήρα υδρογονανθράκων πρέπει να αναλυθούν τα παρακάτω :

- η διαβροχή του πετρώματος
- η τάση μεταξύ των ρευστών που συνυπάρχουν στον ταμιευτήρα
- η σχετική διαπερατότητα

2.2 ΔΙΑΒΡΟΧΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

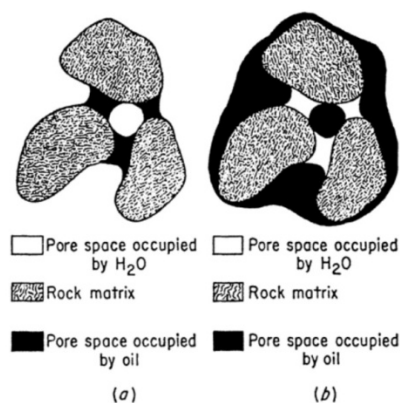
Διαβροχή καλείται η τάση μιας επιφάνειας να διαβρέχεται κατά προτίμηση είτε από νερό, είτε από πετρέλαιο, τα οποία συνυπάρχουν στους πόρους του σχηματισμού. Κατά τη συνύπαρξη των δύο φάσεων στον πόρο του σχηματισμού, εκείνη η οποία βρίσκεται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια του πετρώματος ονομάζεται διαβρέχουσα φάση, σε αντίθεση με τη φάση που βρίσκεται στο κέντρο του πόρου που καλείται μη διαβρέχουσα. Ωστόσο σε ένα ταμιευτήρα συνυπάρχουν συνήθως οι εξής φάσεις:

- του νερού,
- του πετρελαίου
- του αερίου.

Οι φάσεις αυτές βρίσκονται σε επαφή με έναν πορώδη σχηματισμό ο οποίος αποτελείται από διάφορα ορυκτά με τα οποία οι πολικές ομάδες τους αναπτύσσουν δεσμούς. Ανάλογα λοιπόν με ποιες πολικές ομάδες αναπτύσσονται οι πιο ισχυροί δεσμοί (με τα εν λόγω ορυκτά) τότε ο σχηματισμός μπορεί να χαρακτηριστεί υδατοδιαβρεχτός ή πετρελαιοδιαβρεχτός.⁹ Ως επί το πλείστον παλαιότερα εν γένει οι περισσότερες επιφάνειες των πετρωμάτων χαρακτηρίζονταν υδατοδιαβρεχτές, δηλαδή ότι το πέτρωμα έχει την τάση να διαβρέχεται από νερό. Πρέπει να σημειωθεί ότι το φυσικό αέριο, δεν διαβρέχει την επιφάνεια των πόρων που βρίσκονται στον ταμιευτήρα και θεωρείται a priori¹⁰ σαν μη διαβρέχουσα φάση. Η διαβροχή αποτελεί ένα από τους κυριότερους παράγοντες που

επηρεάζουν στην ανάκτηση πετρελαίου. Μπορεί να μεταβληθεί κατά τη διάρκεια της γεωτρητικής είτε της παραγωγικής διαδικασίας.

Ανάλογα την προτίμηση του σχηματισμού σε πετρέλαιο ή νερό υπάρχουν δύο επιμέρους κατηγορίες όπως φαίνεται και παρακάτω. Στην Εικόνα 2.1 λοιπόν μπορεί να παρατηρηθεί, η υδατοδιαβρεχτή προτίμηση στην περίπτωση b και η πετρελαιοδιαβρεχτή στην περίπτωση a.



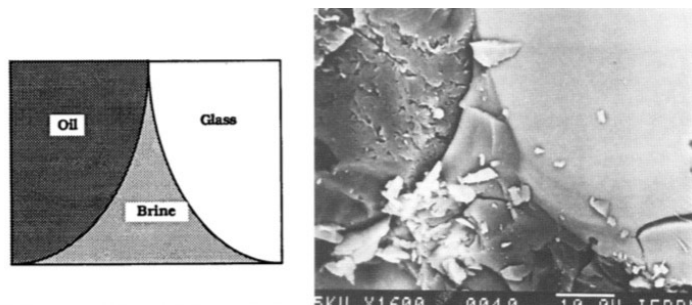
Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση των 2 τύπων διαβρεχτότητας σε ταμιευτήρα υδρογονανθράκωνⁱⁱⁱ

Αναλυτικότερη αποσαφήνιση των εννοιών υδατοδιαβρεχτός- πετρελαιοδιαβρεχτός – ενδιάμεσης διαβροχής σχηματισμός, γίνεται παρακάτω:

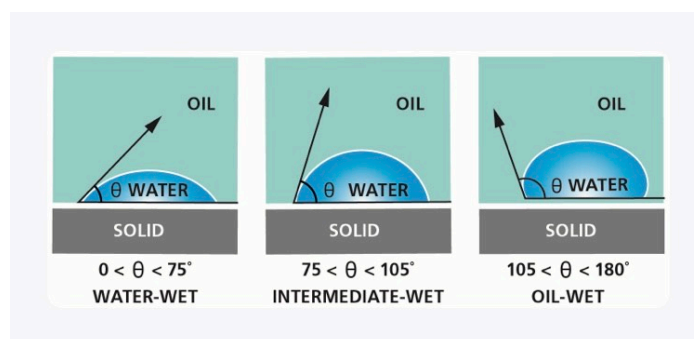
Υδατοδιαβρεχτός σχηματισμός(water-wet) : περίπτωση στην οποία το νερό βρίσκεται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια του σχηματισμού και χαρακτηρίζεται στο σημείο επαφής των μη αναμειγμένων ρευστών από γωνία επαφής 0-75° (Εικόνα 2.3). Έτσι το νερό αποτελεί τη διαβρέχουσα φάση και το πετρέλαιο τη μη διαβρέχουσα. Οι μικροί πόροι πληρούνται από νερό και το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του πετρώματος είναι σε επαφή με το νερό. Από την άλλη πλευρά το πετρέλαιο βρίσκεται στους μεγάλους πόρους. Στην περίπτωση πλήρους διαβροχής από νερό η γωνία επαφής είναι μηδέν.

Στο σημείο επαφής των δύο μη αναμειγμένων φάσεων με την επιφάνεια του πετρώματος σχηματίζεται μια γωνία (θ) (Εικόνες 2.3) που προσδιορίζεται ως προς την βαρύτερη φάση ρευστού. Η γωνία επαφής αποτελεί ένα ποσοτικό δείκτη της διαβροχής μιας στερεάς επιφάνειας σε σχέση με τις φάσεις που την διαβρέχουν. Είναι μια μέθοδος προσδιορισμού της διαβρεχτότητας που ενδέχεται να μην είναι απόλυτα αντιπροσωπευτική ενός σχηματισμού, καθώς υπάρχει ετερογένεια αλλά και μεταβολή της τραχύτητας της επιφάνειας του μέσου. Η γωνία αυτή περιγράφεται σύμφωνα με την τάση πρόσφυσης και την εξίσωση, από τον νόμο του Young. Η τελευταία είναι μια εξίσωση που αρχικά μελετήθηκε από τον Young και στην πορεία από τον Gibbs (Υποκεφ. 2.5). Η γωνία επαφής αποτελεί μια μικροσκοπική ιδιότητα και πολλές φορές ο προσδιορισμός της στην επιφάνεια του σχηματισμού αλλά και σε μικρο-κλίμακα περιέχει σφάλματα. Τα σφάλματα της γωνίας επαφής στηρίζονται στη δύο διαστάσεων μελέτη για τις τρεις φάσεις σε μια περιοχή που δεν είναι σαφώς ορισμένη αλλά και στην επίδραση που έχει η κλίμακα της παρατήρησης στον τελικό προσδιορισμό της τιμής της γωνίας επαφής. Η έννοια θα αναλυθεί εκτενέστερα σε ξεχωριστό υποκεφάλαιο (2.5).

Στις Εικόνες 2.2 και 2.4 έχουν επιλεγθεί περιοχές όπου η δομή προσφέρεται για τον προσδιορισμό της γωνίας επαφής μεταξύ των φάσεων, στο σημείο επαφής (τριπλό σημείο) άλμης/πετρελαίου/νερού. Στην πρώτη εικόνα φαίνεται η περίπτωση υδατοδιαβρεχτού σχηματισμού και στη δεύτερη πετρελαιοδιαβρεχτού.¹¹

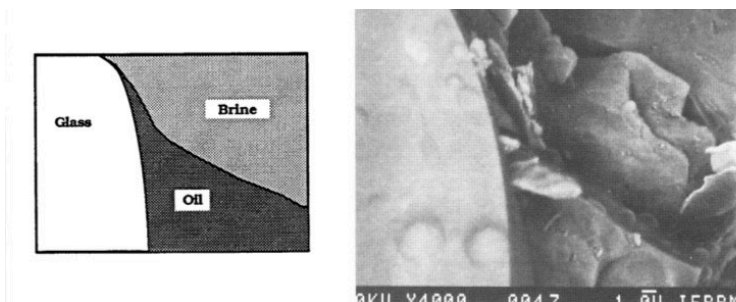


Εικόνα 2.2 Σημείο επαφής μεταξύ άλμης/πετρελαίου σε ένα υδατοδιαβρεχτό σχηματισμό, σε σημείο s_{or}^{iv}



Εικόνα 2.3 Σχηματική απεικόνιση των τριών περιπτώσεων διαβροχής ανάλογα τη γωνία επαφής^v

Πετρελαιοδιαβρεχτός σχηματισμός (oil-wet) : περίπτωση στην οποία η διαβρέχουσα φάση είναι το πετρέλαιο, ενώ η μη διαβρέχουσα φάση είναι το νερό. Το πετρέλαιο βρίσκεται στους πιο μικρούς πόρους σε αντίθεση με το νερό που πληροί τους μεγαλύτερους πόρους. Αν η σταγόνα νερού δημιουργεί γωνία επαφής 180° εφάπτεται σε ένα μόνο σημείο στην επιφάνεια τότε πρόκειται για 100% πετρελαιοδιαβρεχτή περίπτωση. Η Εικόνα 2.3 απεικονίζει τη γωνία επαφής στις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις διαβροχής. Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν παραπάνω για τα ορυκτά και τις πολικές ομάδες, στα συστήματα νερού-πετρελαίου-πετρώματος, όταν γίνεται αναφορά στην διαβρεχτότητα, εκείνη σχετίζεται με μια μέση σχετική προτίμηση διαβροχής των επιφανειών του σχηματισμού ως προς το ρευστό που επιλέγει να διαβρέχεται.



Εικόνα 2.4 Σημείο επαφής του συστήματος άλμης/πετρελαίου σε πετρελαιοδιαβρεχτό σχηματισμό, σε σημείο S_{wc}^{vi}

Όταν η επιφάνεια του σχηματισμού δεν δείχνει κάποια ιδιαίτερη προτίμηση ούτε στο νερό ούτε στο πετρέλαιο, ο σχηματισμός αναφέρεται ως **ενδιάμεσα διαβρεχτός**, με γωνίες επαφής 75-105 μοίρες.

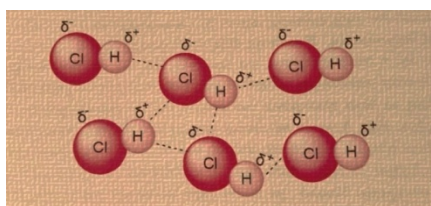
Στην περίπτωση της μεικτής διαβρεχτότητας, για την οποία έγινε αναφορά από τον Salathiel¹² (1973), η διαβρεχτότητα μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή και οι πιο μικροί πόροι είναι υδατοδιαβρεχτοί, ενώ οι μεγαλύτεροι πόροι είναι πετρελαιοδιαβρεχτοί δημιουργώντας ένα κανάλι ροής,¹³ κάτι τέτοιο μπορεί να προκληθεί κατά την πρωταρχική συσσώρευση του πετρελαίου στον ταμιευτήρα. Το πετρέλαιο που αποτελείται από ενεργά συστατικά, εκτοπίζει από τους μεγάλους πόρους το εγκλωβισμένο νερό, καθώς τα ενεργά συστατικά όπως τα ασφαλτένια που βρίσκονται στην επιφάνεια μπορούν να εκτοπίσουν τα φιλμ νερού που βρίσκονταν μέχρι πρότινος στην επιφάνεια. Έτσι το πετρέλαιο δεν έχει την δυνατότητα να εισέλθει στους μικρούς πόρους όπου τα τριχοειδή φαινόμενα για να μετακινηθεί το νερό είναι έντονα με αποτέλεσμα να μην υπερνικούνται εύκολα.^{14,15}

Η συμπεριφορά πετρώματος με τα ρευστά κατά την παραγωγή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο διαβροχής και από την διεπιφανειακή τάση μεταξύ των φάσεων.

- Στην περίπτωση όπου πραγματοποιείται εκτόπιση όπου η διαβρέχουσα φάση εκτοπίζει τη μη διαβρέχουσα, η διαδικασία εκτόπισης καλείται απορρόφησης-εμποτισμός (imbibition).
- Στην περίπτωση όπου η διαβρέχουσα φάση εκτοπίζεται από τη μη διαβρέχουσα, η διεργασία εκτόπισης καλείται απομάκρυνσης-αποστράγγιση (drainage).^{16,17}

2.3 ΔΥΝΑΜΕΙΣ VAN DER WAALS ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΜΕΣΟΥ

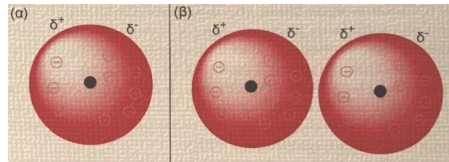
Το πορώδες μέσο εν γένει διαβρέχεται από μία φάση που είναι σε μορφή φιλμ γύρω από την επιφάνεια του σχηματισμού και διαχωρίζεται σε δύο στρώματα. Το στρώμα που βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια του σχηματισμού σχηματίζει ένα διπλό ηλεκτρικό στρώμα που εξουδετερώνει τα πλεονάζοντα φορτία του σχηματισμού με ιόντα αντίθετου φορτίου, ενώ η μάζα της φάσης ανταλλάσσει με το δεύτερο στρώμα ιόντα. Οι δυνάμεις που δημιουργούνται μεταξύ διαβρέχοντος ρευστού και σχηματισμού είναι δυνάμεις τύπου van der Waals και για αυτό θα πρέπει να γίνει μια σύντομη αναφορά στις συγκεκριμένες δυνάμεις που είναι ηλεκτροστατικού τύπου και δυνάμεις διάχυσης. Οι δυνάμεις van der Waals συμπεριλαμβάνουν τις δυνάμεις London καθώς και τις δυνάμεις διπόλου-διπόλου-Εικόνα 2.5.¹⁸ Αρχικά οι δυνάμεις διπόλου-διπόλου αναπτύσσονται μεταξύ πολικών μορίων λόγω της ύπαρξης ενός θετικού άκρου απέναντι από ένα αρνητικό άκρο ενός άλλου μορίου όπως γίνεται στην περίπτωση του HCl. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι οι δυνάμεις διπόλου – διπόλου αναπτύσσουν διπολικές ροπές μεταξύ των μορίων.



Εικόνα 2.5 Δυνάμεις διπόλου-διπόλου^{vii}

Οι δυνάμεις London αναπτύσσονται μεταξύ μη πολικών μορίων όπως το H₂, τα οποία σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες συμπυκνώνονται σε υγρά με αποτέλεσμα, μεταξύ των μορίων να αναπτύσσονται ασθενείς ελκτικές δυνάμεις. Οι δυνάμεις αυτές οφείλονται στην πλευρά που κάθε φορά συσσωρεύονται τα ηλεκτρόνια. Κάτι τέτοιο έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα στιγμιαίο δίπολο με το ένα άκρο να είναι θετικά φορτισμένο και το άλλο αρνητικά φορτισμένο. Εάν λοιπόν πλησιάσει ένα άλλο άτομο την περιοχή που έχουν συσσωρευτεί τα περισσότερα ηλεκτρόνια, τα ηλεκτρόνια του στιγμιαίου διπόλου απωθούν τα ηλεκτρόνια του γειτονικού ατόμου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια ανακατανομή των ηλεκτρονίων στο γειτονικό άτομο και τη δημιουργία ακόμη ενός διπόλου. Μεταξύ αυτών των δύο στιγμιαίων διπόλων αναπτύσσονται οι δυνάμεις διασποράς ή London. Στην Εικόνα 2.6 αριστερά παρατηρείται η κατάσταση στην οποία τα περισσότερα ηλεκτρόνια βρίσκονται επιλεκτικά στη μία πλευρά του μορίου με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα στιγμιαίο δίπολο, ενώ στην δεξιά περίπτωση υπάρχει ένα γειτονικό μόριο το οποίο μετατρέπεται και

αυτό σε στιγμιαίο δίπολο με δημιουργία ενός διπόλου εξ επαγωγής¹⁹. Τα μόρια του ρευστού με εξαίρεση εκείνα που βρίσκονται στην διεπιφάνεια του ρευστού με ένα δεύτερο ρευστό, η κάποιο στερεό υφίστανται συμμετρικές δυνάμεις van der Waals από τα ομοειδή τους μόρια.



Εικόνα 2.6 Δυνάμεις London μεταξύ των ατόμων Ne : ^{viii}

2.4 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΟΥΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

Σύμφωνα με την ορυκτολογική σύνθεση των ταμιευτήρων αλλά και τη σύσταση των ρευστών τους, καθορίζεται και η προτίμηση των πρώτων στη διαβροχή. Βασικές κατηγορίες ταμιευτήρων είναι *ανθρακικοί σχηματισμοί* οι οποίοι πιστεύεται πως εμφανίζουν από ουδέτερη έως πετρελαιοδιαβρεχτή προτίμηση και οι *ψαμμιτικοί* που συνήθως εμφανίζουν από ουδέτερη έως υδατοδιαβρεχτή προτίμηση.²⁰ Οι περισσότερες διαφορές στη ροή ρευστών, μεταξύ ψαμμιτών και ανθρακικών σχηματισμών βρίσκονται στην ετερογένεια, στη διαπερατότητα αλλά και στην τάση που έχουν οι ανθρακικοί σχηματισμοί να διαβρέχονται από πετρέλαιο.²¹ Τελευταία κατηγορία αποτελούν και οι *δολομιτικοί σχηματισμοί* που εμφανίζουν από ουδέτερη έως πετρελαιοδιαβρεχτή συμπεριφορά.²²

Οι Chilingar και Yen(1983)²³ εξέτασαν 161 ανθρακικά πετρώματα και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μόλις το 8% ήταν υδατοδιαβρεχτά, ενδιάμεσης διαβροχής προέκυψε για το 12% του συνόλου των δειγμάτων, το 15% εμφάνιζαν ισχυρή πετρελαιοδιαβρεχτή συμπεριφορά και το 65% πετρελαιοδιαβρεχτή. Οι ανθρακικοί σχηματισμοί:

- είναι ρωγματοωμένοι και η διαβρεχτότητα τους μπορεί να είναι από τη φύση τους ετερογενής.
- έχουν μεγάλο εύρος κατανομής μεγέθους πόρων.
- έχουν υψηλή ετερογένεια με αποτέλεσμα η ανάκτηση του πετρελαίου να καθορίζεται κυρίως από τις μεταβολές των διαπερατοτήτων.
- έχουν 2 τύπους πορώδους, το πρωτογενές και το δευτερογενές. Το πρωτογενές εμφανίζεται στην έναρξη της απόθεσης και μεταβάλλεται λόγω διαγενετικών επιδράσεων, που λαμβάνουν χώρα μετά το πέρας της απόθεσης και όταν αρχίζει να δημιουργείται το δευτερογενές πορώδες.²⁴ Η ύπαρξη λοιπόν ρωγμών και κενών έχουν μεγάλη επιρροή στην διασύνδεση και στην χωρητικότητα του ανθρακικού ταμιευτήρα με αποτέλεσμα η ετερογένεια να αυξάνεται όλο και περισσότερο. Αυτές λοιπόν οι συνθήκες δημιουργούν προβλήματα στην μοντελοποίηση τέτοιων ταμιευτήρων.

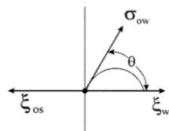
Οι δύο πιο πιθανοί σχηματισμοί που αποτελούν ταμιευτήρες είναι οι ψαμμιτικοί και οι ανθρακικοί, με τους δεύτερους να είναι χημικά πιο ενεργοί από τους πρώτους, κάτι που αιτιολογεί τις διακυμάνσεις της διαβρεχτότητας καθώς και την αλλαγή αυτής.

2.5 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΑΣΗ ΚΑΙ ΓΩΝΙΑ ΕΠΑΦΗΣ

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί εκτενέστερα η γωνία επαφής αλλά και η συσχέτιση αυτής με την επιφανειακή τάση.

Τα μόρια ενός ρευστού που βρίσκονται στην διεπιφάνεια με ένα άλλο ρευστό, είτε αέριο είτε υγρό, περιβάλλονται μερικώς από ομοειδή μόρια και έτσι επιδρούν σε αυτά ασύμμετρες ελκτικές δυνάμεις. Τα μόρια της φάσης λοιπόν που έχουν υψηλότερη συνοχή δημιουργούν στη διεπιφάνεια μία κυρτή επιφάνεια η οποία μοιάζει σαν μια μεμβράνη που τα περικλείει, με στόχο να περικλείσει τα μόρια της από εξωτερικές επιδράσεις. Όταν λαμβάνει χώρα αυτόματη συστολή συμμετέχει και ελεύθερη ενέργεια. Με τον όρο ελεύθερη ενέργεια καλείται το γινόμενο της επιφανειακής τάσης επί την σχετική επιφάνεια, δηλαδή: $\Delta E = \sigma * \Delta A$.

Για να μπορέσει να απλωθεί μια επιφάνεια όπως αυτή που αναφέρθηκε προηγουμένως πρέπει να δαπανηθεί ένα έργο. Η ποσότητα λοιπόν αυτού του έργου για 'μία μονάδα μήκους ονομάζεται επιφανειακή τάση και συμβολίζεται με 'σ' (surface tension) και μετριέται σε Joule/m² ή N/m. (Εικόνα 2.7)



Εικόνα 2.7 Απεικόνιση των τάσεων που ασκούνται σε μία σταγόνα και της γωνίας επαφής θ (2D)^{ix}

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο κρίσιμο σημείο στο οποίο οι 2 φάσεις μετατρέπονται σε μία, εξαφανίζεται η διεπιφάνεια και επικρατεί μηδενική επιφανειακή τάση. Σε κατάσταση ισορροπίας οι 3 διαφορετικές επιφανειακές τάσεις πρέπει να εξισορροπούνται σε όλο το μήκος της γραμμής επαφής, κάτι που εκφράζεται στην παρακάτω εξίσωση του Young²⁵ (1855)- Εικόνα 2.8:

$$\sigma_{so} = \sigma_{sw} + \sigma_{ow} * \cos \theta \quad (2.1)$$

σ_{so} = επιφανειακή τάση μεταξύ της φάσης του πετρελαίου και της στερεής επιφάνειας

σ_{ow} =επιφανειακή τάση μεταξύ της φάσης του πετρελαίου και του νερού

σ_{sw} =επιφανειακή τάση μεταξύ της φάσης του νερού και της στερεής επιφάνειας

$0 < \theta < 180$, είναι γνωστό ότι $A_\tau = \sigma_{so} - \sigma_{sw}$ και A_τ καλείται τάση πρόσφυσης.

Το νερό είναι βαρύτερη φάση σε ένα σύστημα πετρελαίου/νερού. Συνεπώς αν η τάση πρόσφυσης, όπως ορίστηκε παραπάνω, είναι θετική τότε η στερεή επιφάνεια διαβρέχεται από την βαρύτερη φάση και είναι υδατοδιαβρεχτός σχηματισμός. Σε αντίθετη περίπτωση όταν η τάση πρόσφυσης είναι μικρότερη του μηδενός ($A_\tau < 0$) τότε η στερεή επιφάνεια διαβρέχεται από την ελαφρύτερη φάση, δηλαδή το πετρέλαιο και είναι

πετρελαιοδιαβρεχτός σχηματισμός. Τέλος, στην περίπτωση όπου η τάση πρόσφυσης είναι κοντά στο μηδέν δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερη προτίμηση.²⁶ Όταν λοιπόν δύο υγρά, νερό και πετρέλαιο έρχονται σε επαφή με μία στερεή επιφάνεια η γωνία επαφής ορίζεται ως εξής²⁷:

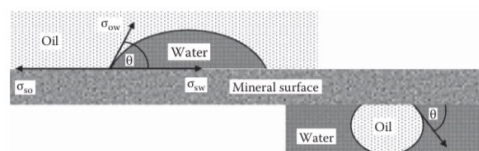
$$\cos \theta = \frac{\sigma_{so} - \sigma_{sw}}{\sigma_{wo}} \quad (2.2)$$

(θ)=γωνία επαφής

σ_{so} =επιφανειακή τάση πετρελαίου/στερεής επιφάνειας

σ_{sw} =επιφανειακή τάση νερού/στερεής επιφάνειας

σ_{wo} =επιφανειακή τάση νερού/πετρελαίου



Εικόνα 2.8 Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου της εξίσωσης του Young^x

Ο Gibbs²⁸ γενίκευσε τη σχέση του Young (1928) :

$$\cos \theta = \frac{E_{fws} - E_{fos}}{\sigma_{ow}} \quad (2.3) \quad , \text{ όπου}$$

$$E_{fos} = \sigma_{s, \kappa \epsilon \nu} - \sigma_{so} \quad (2.4)$$

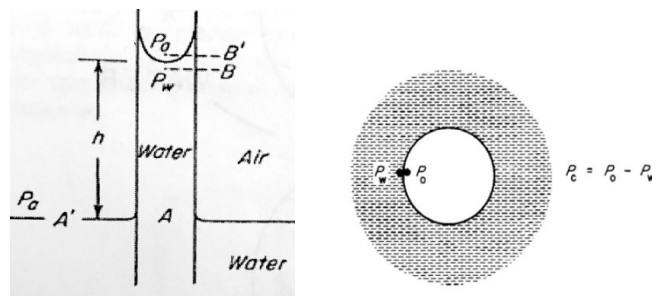
$$E_{fws} = \sigma_{s, \kappa \epsilon \nu} - \sigma_{ow} \quad (2.5)$$

Αν γίνει αντικατάσταση των εξισώσεων 2.4 και 2.5 στην εξίσωση 2.1 θα προκύψει η εξίσωση του Gibbs-Young 2.3 που δηλώνει το κατά πόσο διευρύνεται ή όχι η σταγόνα του νερού πάνω στην στερεή επιφάνεια. Οι ελεύθερες ενέργειες (E_{fws} , E_{fos}) προκύπτουν από την επαφή μεταξύ υγρών και στερεών και $\sigma_{s, \kappa \epsilon \nu}$ είναι η ελεύθερη ενέργεια της στερεής επιφάνειας σε κατάσταση κενού.

Ένας σχηματισμός είναι υδατοδιαβρεχτός όταν η γωνία επαφής είναι μικρότερη των 90° και η τριχοειδής πίεση μεταξύ των δύο επιφανειών είναι θετική. Στην πετρελαιοδιαβρεχτή περίπτωση, η τριχοειδής πίεση είναι αρνητική και η γωνία επαφής είναι μεγαλύτερη από 90° . Τέλος στην ενδιάμεση διαβροχή που περιέχεται και η μεικτή διαβροχή παρουσιάζει γωνίες επαφής να πλησιάζουν τις 90° και τριχοειδείς πιέσεις να προσεγγίζουν το μηδέν.²⁹

2.6 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΧΟΕΙΔΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΣΤΗ ΡΟΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

Μεταξύ δύο μη αναμειγμένων ρευστών όπως είναι το πετρέλαιο και το νερό, τα οποία βρίσκονται σε τριχοειδή πόρο, δημιουργείται μια διεπιφάνεια και η πίεση που ασκείται στις δύο πλευρές δεν είναι ίδια λόγω της διεπιφανειακής τάσης. Στην Εικόνα 2.9 φαίνεται μια σταγόνα πετρελαίου σε νερό, με εμφανή την καμπυλότητα μεταξύ των δύο ρευστών. Η πίεση της φάσης που κοιτάει τα κοίλα είναι μεγαλύτερη της πίεσης της εξωτερικής φάσης, δηλαδή $P_o > P_w$. Η διαφορά μεταξύ των πιέσεων των δύο φάσεων ονομάζεται τριχοειδής πίεση $P_{cap} = P_o - P_w$.



Εικόνα 2.9 Πιέσεις που ασκούνται σε τριχοειδείς σωλήνες^{xi}

Η εκτόπιση ενός ρευστού, που βρίσκεται στους πόρους του πορώδους μέσου, από ένα άλλο ρευστό κάποιες φορές είναι εύκολη, ενώ άλλες όχι, λόγω του μεγέθους των τριχοειδών δυνάμεων. Έτσι λοιπόν για να εισέλθει η μη διαβρέχουσα φάση στους πόρους του μέσου μερικώς, ενώ το μέσο πληρούται 100% από τη διαβρέχουσα φάση θα πρέπει η τιμή της πίεσης στην περιοχή της μη διαβρέχουσας φάσης να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή της πίεσης στη διαβρέχουσα φάση. Η πίεση στη μη διαβρέχουσα συμβολίζεται με p_{nw} , ενώ για τη διαβρέχουσα φάση p_{well} . Συνεπώς, αν αφαιρεθεί η πίεση της διαβρέχουσας φάσης από την πίεση της μη διαβρέχουσας φάσης θα προκύψει η τριχοειδής πίεση:

$$p_c = p_{nw} - p_{well} \quad (2.6)$$

Και ανάλογα το σύστημα των ρευστών που υπάρχει, προκύπτουν οι εξής σχέσεις τριχοειδών πιέσεων:

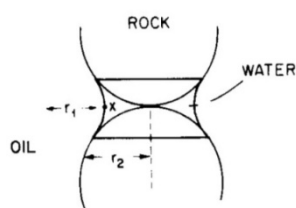
- water-oil : $p_{cwo} = p_o - p_w$ (2.7)
- gas-oil : $p_{cgo} = p_g - p_o$ (2.8)
- gas-water: $p_{cgw} = p_g - p_w$ (2.9)

Ισχυρές τριχοειδείς πιέσεις εμφανίζονται μόνο σε μικρούς πόρους, στην περίπτωση των μεγάλων πόρων θα υπάρχει οριζόντια ελεύθερη επιφάνεια και δεν θα εμφανίζονται τριχοειδή φαινόμενα. Υποθέτοντας ότι υπάρχουν στο σύστημα ομοιόμορφοι πόροι σε

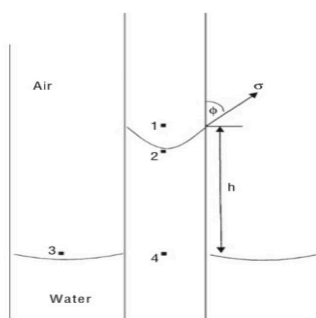
σφαιρικό σχήμα (Εικόνα 2.10), η συσχέτιση μεταξύ τριχοειδών και επιφανειακής τάσης

$$\text{εκφράζεται από τη σχέση του Laplace}^{30}: P_c = \sigma * \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right] \quad (2.10),$$

όπου οι ακτίνες R_1 και R_2 αποτελούν τις ακτίνες καμπυλότητας στα σημεία όπου η διαφορά των πιέσεων είναι ίση με την τριχοειδή πίεση του συστήματος και σ η επιφανειακή τάση μεταξύ των δύο ρευστών.³¹



Εικόνα 2.10 Εγκλωβισμός νερού μεταξύ σφαιρικών κόκκων υδατοδιαβρεχτού σχηματισμού^{xii}



Εικόνα 2.11 Πιέσεις σε τριχοειδείς σωλήνες^{xiii}

Εάν οι τριχοειδείς σωλήνες (Εικόνα 2.11) τοποθετηθούν μέσα σε νερό, το νερό θα ανυψωθεί στους σωλήνες μέχρι το σημείο όπου το βάρος της στήλης θα εξισορροπηθεί με την τάση πρόσφυσης που έχει ο σωλήνας να έλκει το υγρό. Έτσι λοιπόν όταν ένας τριχοειδής σωλήνας εμβαπτιστεί σε νερό το οποίο περιβάλλεται από πετρέλαιο ισχύει ότι :

$$p_2 = p_4 - \rho_w * g * h \quad (2.11) \text{ και}$$

$$p_1 = p_3 - \rho_{air} * g * h \quad (2.12)$$

$p_c = p_1 - p_2$, από τις προηγούμενες σχέσεις ισχύει ότι

$$p_3 - \rho_{air} * g * h - p_4 + \rho_w * g * h = g * h * (\rho_w - \rho_{air}) \quad (2.13)$$

1^η Περίπτωση water-gas:

$$\text{ανύψωση επί των τοιχωμάτων του τριχοειδούς} : h = \frac{2 * \sigma_{gw} * (\cos \theta)}{r * g * (\rho_w - \rho_{gas})} \quad (2.14)$$

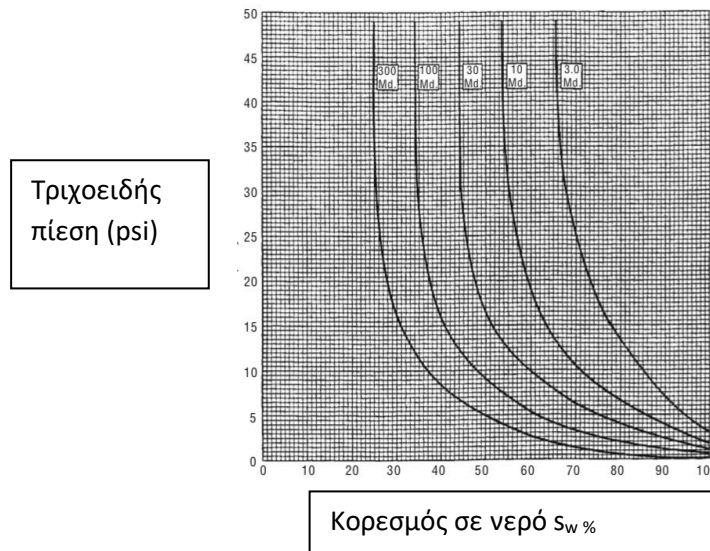
2^η Περίπτωση water-oil :

$$\text{ανύψωση επί των τοιχωμάτων του τριχοειδούς} : h = \frac{2 * \sigma_{ow} * (\cos \theta)}{r * g * (\rho_w - \rho_o)} \quad (2.15)$$

Αν η σχέση 2.15 αντικατασταθεί στη σχέση 2.13 θα προκύψει η σχέση που συσχετίζει τις τριχοειδείς πιέσεις με τη γωνία επαφής (Leverett-1941) ως εξής³²:

$$P_c = \frac{2 * \sigma_{wo} * \cos \theta}{r_c} \quad (2.16)$$

Από τη σχέση 2.16 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η συνάρτηση της πίεσης είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ακτίνα των τριχοειδών.



Εικόνα 2.12 Συσχέτιση βαθμού κορεσμού, τριχοειδών πιέσεων και διαπερατοτήτων^{xiv}

Σύμφωνα με την Εικόνα 2.12, υπάρχει μια εξάρτηση μεταξύ των διαπερατοτήτων νερού-πετρελαίου και των τριχοειδών πιέσεων, όπου όσο αυξάνονται οι τριχοειδείς πιέσεις, τόσο μειώνονται οι διαπερατότητες για μια συγκεκριμένη τιμή κορεσμού νερού.

2.7 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΡΙΧΟΕΙΔΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ

Αναφορά θα γίνει σε αυτή την υποενότητα στις εργαστηριακές μεθόδους προσδιορισμού των τριχοειδών πιέσεων καθώς οι τιμές τους επηρεάζουν αρκετές παραμέτρους όπως οι σχετικές διαπερατότητες. Οι βασικές μέθοδοι είναι οι εξής:

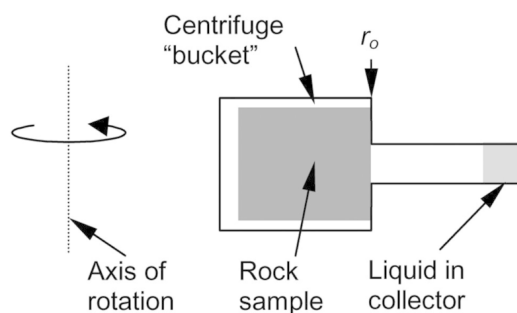
- μέθοδος κελίου επαναποκατεστημένης κατάστασης- restored state cell technique
- μέθοδος φυγοκέντρωσης- centrifugal technique
- μέθοδος έγχυσης υδραργύρου-mercury injection

Στην μέθοδο του κελίου επαναποκατεστημένης κατάστασης, η οποία υπερτερεί έναντι των άλλων μεθόδων καθώς χρησιμοποιούνται τα ίδια τα ρευστά του ταμειευτήρα, γίνεται η προετοιμασία των δοκιμίων, ο καθαρισμός, η ξήρανση και η ζύγιση και αφού ολοκληρωθούν αυτές οι διεργασίες, πληρούνται με νερό οι πόροι του δοκιμίου (κατ' αρχάς είναι υδατοδιαβρεχτό). Ζυγίζεται πάλι το δοκίμιο και στη συνέχεια προστίθεται η μη διαβρέχουσα φάση με ολοένα αυξανόμενη πίεση. Όσο η πίεση θα αυξάνεται τόσο μεγαλύτερη ποσότητα μη διαβρέχουσας φάσης θα εισέρχεται μέσα στους πόρους. Η επιπλέον πίεση έγχυσης εφαρμόζεται προκειμένου να εκτοπισθεί ποσότητα νερού και ισοδυναμεί με την τριχοειδή πίεση. Κάποια στιγμή όπου το νερό δεν θα απομακρύνεται άλλο, τότε θα ζυγιστεί ξανά το δοκίμιο και τώρα θα προσδιορισθεί και ο μη περαιτέρω απομακρύνσιμος βαθμός κορεσμού σε νερό s_{wc} .

Η μέθοδος της φυγοκέντρωσης στηρίζεται στη συνεχώς αυξανόμενη ταχύτητα του φυγοκεντρητή και ταυτόχρονα στην καταγραφή της ποσότητας του ρευστού που εκτοπίζεται. Είναι μια διεργασία που γίνεται σε στάδια και ο κορεσμός προσδιορίζεται από την ποσότητα του υγρού που απομακρύνεται. Για κάθε ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται ο φυγοκεντρητής (Εικόνα 2.13), προσδιορίζεται με την ακόλουθη σχέση η τριχοειδής πίεση:

$$P_c = \frac{1}{2} * \Delta\rho * \omega^2 * (r_2^2 - r_1^2) \quad (2.17)^{33}$$

Όπου P_c είναι οι τριχοειδείς πιέσεις, $\Delta\rho$ είναι η διαφορά πυκνοτήτων μεταξύ νερού και πετρελαίου, ω είναι η γωνιακή ταχύτητα, $\omega = \frac{2 * \pi * N}{60}$, N είναι ο αριθμός των περιστροφών το λεπτό, r_1 είναι η εσωτερική ακτίνα του φυγοκεντρητή και r_2 η εξωτερική ακτίνα του φυγοκεντρητή.



Εικόνα 2.13 Όργανο μέτρησης τριχοειδών πιέσεων με χρήση φυγοκεντρήτη^{xv}

Η μέθοδος αυτή θεωρείται ακριβής και φτάνει σε ισορροπία γρήγορα, μπορεί επίσης να παράγει υψηλές διαφορές πιέσεων μεταξύ των φάσεων.

Η μέθοδος έκχυσης υδραργύρου η οποία αναφέρθηκε πρώτη φορά από τον Purcell το 1949³⁴, χρησιμοποιεί σαν μη διαβρέχουσα φάση τον υδράργυρο, ο οποίος έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο και καταγράφεται ο όγκος που έχει απορροφηθεί από τους πόρους. Η μη διαβρέχουσα φάση λοιπόν εισάγεται στους πόρους του δοκιμίου με πίεση και ο όγκος του υδραργύρου που εισέρχεται σε κάθε πίεση που ασκείται καταγράφεται. Αυτή η μέθοδος όμως είναι μια γρήγορη, απλή αλλά καταστρεπτική μέθοδος, της οποίας τα ρευστά διαφέρουν από τα ρευστά που υπάρχουν στην πραγματικότητα στον ταμιευτήρα.³⁵

2.8 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΥΧΟΝ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΕΝΙΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Τα ασφαλτένια είναι πολυαρωματικές στερεές σκουρόχρωμες ενώσεις με μεγάλο εύρος μοριακών βαρών. Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές έχουν δοθεί διάφορες τιμές μοριακών βαρών τους, με τη νεότερη μελέτη από τον Mullins³⁶ (2012) να αναφέρεται σε $750 \frac{g}{mol}$. Ορίζονται σύμφωνα με τη διαλυτότητα και όχι με τη χημική δομή τους καθώς

είναι αρκετά πολύπλοκη και πολλές φορές διαφέρει. Είναι αδιάλυτα σε χαμηλού σημείου ζέσεως κανονικά αλκάνια όπως το πεντάνιο και το επτάνιο, ενώ διαλύονται σε αρωματικούς υδρογονάνθρακες όπως το βενζόλιο. Διαφορετικές ποσότητες κανονικού αλκανίου οδηγούν σε διαφορετικές ποσότητες μετρούμενων ασφαλτενίων. Μεταβολές στην πίεση και τη θερμοκρασία αλλά και τη σύνθεση των πετρελαίων έχουν σαν αποτέλεσμα σε ορισμένα πετρέλαια την καθίζηση των ασφαλτενίων. Τα ασφαλτένια περιέχουν ετεροάτομα όπως το οξυγόνο, το θείο και το άζωτο καθώς επίσης περιέχουν ποσότητες Ni, Fe, V. Όσο περισσότερα ασφαλτένια έχει το πετρέλαιο τόσο χαμηλότερη είναι η οικονομική αξία του.³⁷

Τα ασφαλτένια επίσης:

- είναι το βαρύτερο και πολικότερο κλάσμα του πετρελαίου
- μπορούν να δημιουργήσουν στερεές επικαθίσεις στις εγκαταστάσεις με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τη μελέτη της δομής τους.
- μπορούν να χαρακτηριστούν με τις έως τώρα μελέτες ως 'φύλλα' πολυαρωματικών δομών που ενώνονται από μακριές αλυσίδες υδρογονανθράκων αλλά και με άλλες δομές που χαρακτηρίζονται ως 'γέφυρες'. Παράδειγμα τέτοιων δομών οι ναφθενικοί δακτύλιοι. Δομές των ασφαλτενίων που έχουν μελετηθεί αποτελούνται από 6-20 συζυγείς βενζολικούς δακτυλίους και αλυσίδες υδρογονανθράκων από 4-20 άτομα άνθρακα. Ανάλογα με τη σύσταση της ελαϊκής φάσης τα ασφαλτένια μπορούν να συσσωματώνονται και να δημιουργούν δομές κολλοειδών μηκυλίων.³⁸
- μπορούν να βρεθούν σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις, είτε εν διαλύσει, είτε σε στερεή μορφή, είτε σε μορφή μηκυλίων και μπορούν να επιπλέουν λόγω των δυνάμεων που αναπτύσσουν με το περιβάλλον τους. Ο τρόπος με τον οποίο διατηρούνται εν διαλύσει στο πετρέλαιο έγκειται στην ανάπτυξη απωστικών δυνάμεων μεταξύ των μορίων που προσροφώνται στην επιφάνεια τους και των μορίων που βρίσκονται στο διάλυμα της πετρελαϊκής φάσης.³⁹

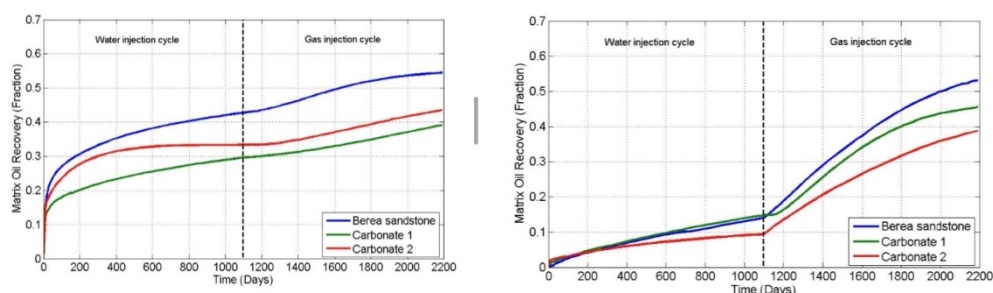
Η μέθοδος με την οποία μπορούν να διαχωριστούν εργαστηριακά τα ασφαλτένια είναι η μέθοδος SARA από την οποία μπορούν να προσδιοριστούν οι κορεσμένες ενώσεις, τα αρωματικά στοιχεία, ρητίνες και ασφαλτένια. Ο διαχωρισμός γίνεται με βάση την

πολικότητα των ενώσεων.⁴⁰ Ο προσδιορισμός της ποσότητας των ασφατενίων χρησιμοποιεί μια διαδικασία δύο σταδίων. Η πρώτη φάση σχετίζεται με την καταβύθιση των ασφατενίων που πραγματοποιείται με την προσθήκη πεντανίου στο οποίο είναι αδιάλυτα τα ασφατένια για αυτό και καθιζάνουν. Στη δεύτερη φάση διαχωρισμού γίνεται διαλυτοποίηση ξανά τώρα με την προσθήκη βενζολίου είτε τολουολίου. Όσο αυξάνεται το μοριακό βάρος του διαλύτη καταβύθισης τόσο ελαττώνεται το ποσοστό των ασφατενίων που καθιζάνουν. Ένα πρόβλημα το οποίο μπορεί να εκδηλωθεί είναι η πιθανή καταβύθιση και άλλων δυσδιάλυτων ενώσεων κατά τη διάρκεια της χρήσης του διαλύτη που βρίσκονται στο πετρέλαιο όπως για παράδειγμα οι ρητίνες.

Η εναπόθεση των ασφατενίων μπορεί να μεταβάλλει τις τιμές της γωνίας επαφής και επομένως τοπικά και τη διαβρεχτότητα. Τα ασφατένια έχουν την δυνατότητα να απορροφώνται σε επιφάνειες υψηλής ενέργειας των ορυκτών για αυτό και επηρεάζεται η τάση διαβροχής του σχηματισμού. Μέσα από μελέτες αποδείχθηκε ότι η διαβροχή μπορεί να μεταβληθεί π.χ από γωνία επαφής 30° δηλαδή υδατοδιαβρεχτή περίπτωση σε γωνία επαφής 150° δηλαδή πετρελαιοδιαβρεχτή περίπτωση.⁴¹

2.9 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΣΕ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

Βασικός παράγοντας όπως προαναφέρθηκε για την αποδοτική εκμετάλλευση ταμειωτήρων είναι το ποσοστό της ανακτησιμότητας που θα επιτευχθεί, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται και από την διαβροχή του σχηματισμού. Όταν ένας σχηματισμός είναι υδατοδιαβρεχτός μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη ανακτησιμότητα σε δευτερογενή εκτόπιση του πετρελαίου με τη μέθοδος έκχυσης νερού.



Εικόνα 2.14 Γραφική σχεδίαση της συμπεριφοράς τριών διαφορετικών τύπων πετρωμάτων συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές εκχύσεις, αρχικά νερού και έπειτα αερίου. Αριστερά για υδατοδιαβρεχτή και δεξιά για πετρελαιοδιαβρεχτή συμπεριφορά.^{xvi}

Στην Εικόνα 2.14, απεικονίζεται η ανακτησιμότητα για τρεις διαφορετικούς σχηματισμούς μέσω της διαδικασίας εισπίεσης νερού και ακολούθως της εισπίεσης αερίου με στόχο τη βελτιστοποίηση της ανάκτησης σε υδατοδιαβρεχτό και πετρελαιοδιαβρεχτό πέτρωμα. Από τους υψηλούς ρυθμούς ανάκτησης στο αριστερό γράφημα συμπεραίνεται ότι είναι πιο αποδοτική η εισπίεση νερού στην υδατοδιαβρεχτή περίπτωση. Σε αυτή την περίπτωση οι τριχοειδείς δυνάμεις αλλά και οι δυνάμεις βαρύτητας εκτοπίζουν το πετρέλαιο και όσο υψηλότερες οι τριχοειδείς δυνάμεις τόσο υψηλότερη η εκτόπιση. Από την άλλη στο δεξιό γράφημα που παρουσιάζεται η πετρελαιοδιαβρεχτή συμπεριφορά, οι τριχοειδείς δυνάμεις λειτουργούν ανασταλτικά στην ανάκτηση. Συμπερασματικά υψηλότερη ανάκτηση εμφανίζεται στην υδατοδιαβρεχτή περίπτωση.⁴²

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

3.1 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ

Το πετρέλαιο λοιπόν που βρίσκεται εντός του σχηματισμού πρέπει να ρέει για να μπορέσει να ανακτηθεί. Για αυτό το λόγο πρέπει να μελετηθεί η διαπερατότητα του σχηματισμού εκτενώς, συνεπώς και η σχέση ροής που παρουσιάζεται από τον νόμο του Darcy. Ιδιαίτερα σημαντική είναι τόσο η έννοια των διαπερατοτήτων όσο και η επίδραση της διαβροχής, που έχει ένας σχηματισμός στις καμπύλες των σχετικών διαπερατοτήτων.

Η απόλυτη διαπερατότητα είναι ιδιότητα του πορώδους μέσου, το οποίο είναι κορεσμένο 100% από ένα ρευστό και μετράει την ικανότητα του πρώτου να άγει το ρευστό. Όπως προαναφέρθηκε η διαβρεχτότητα έτσι και η διαπερατότητα είναι από τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά ενός ταμειυτήρα. Συγκεκριμένα η διαπερατότητα καθορίζει τον ρυθμό ροής των ρευστών σε ένα ταμειυτήρα. Το εύρος των τιμών που λαμβάνει η διαπερατότητα ποικίλλει και διαφέρει ανάλογα την κατεύθυνση σε ένα ταμειυτήρα.

Ο πρώτος που αναφέρθηκε στην έννοια της διαπερατότητας ήταν το 1856 ο Henry P. Darcy⁴³, από τον οποίο δόθηκε και το όνομα στη μονάδα μέτρησης της διαπερατότητας. Ο νόμος του Darcy σύμφωνα με την εξίσωση (3.1), ισχύει στην περίπτωση που υπάρχει μόνο μια φάση από την οποία είναι πλήρως κορεσμένο το πορώδες μέσο, όταν υπάρχει έρπουσα ροή (δηλαδή υπάρχει μόνο μια συνιστώσα της ταχύτητας και ο αριθμός Reynolds που δηλώνει τον λόγο των αδρανειακών δυνάμεων ως προς τις δυνάμεις ιξώδους πρέπει να είναι $\ll 1$) και όταν δεν πραγματοποιείται χημική αντίδραση μεταξύ ρευστού και πορώδους μέσου.

Η σχέση από την οποία προκύπτει η παροχή ρευστού (cm^3/sec) είναι η εξής (Εικόνα 3.1):

$$Q = \frac{k * A * \Delta p}{\mu * L} \quad (3.1) \text{ όπου,}$$

k: απόλυτη διαπερατότητα του πορώδους μέσου (D)

A: διατομή της ροής (cm^2)

Δp : διαφορά πίεσης στο μήκος ροής (atm/cm διανυθείσας απόστασης)

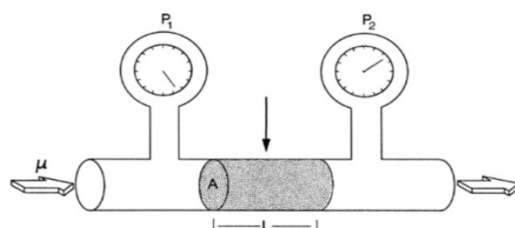
μ : ιξώδες του ρευστού (cP)

L: απόσταση των σημείων μεταξύ των δύο μετρηθέντων πιέσεων (cm)

Για να συσχετιστεί η παροχή με ισοδύναμους όγκους στην επιφάνεια η σχέση θα γίνει :

$$Q_{\tan k} = \frac{k * A * (P_1 - P_2)}{Bo * \mu * L} \quad (3.2)$$

Όπου Bo καλείται ο ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού του υγρού και ορίζεται ως ο όγκος του υγρού που βρίσκεται σε συνθήκες ταμειυτήρα προς τον όγκο του υγρού που απομένει στην επιφάνεια όταν το πετρέλαιο τελικά φτάσει σε συνθήκες tank- επιφάνειας.



Εικόνα 3.1 :Εργαστηριακή συσκευή για τη μέτρηση πορώδους, όπου φαίνονται και τα μεγέθη της εξίσωσης Darcy^{xvii}

Η εξίσωση ροής των ρευστών από τον νόμο του Darcy εκφραζόμενη ως προς την ταχύτητα, τροποποιείται ως εξής:

$$U_L = -\frac{k}{\mu} * \frac{dp}{dL} \quad (3.3),$$

όπου U_L καλείται η ταχύτητα ροής του ρευστού ανά μονάδα διατομής ενός πορώδους μέσου. Το ρευστό ρέει προς την κατεύθυνση όπου μειώνεται η πίεση για αυτό και το αρνητικό πρόσημο. Προκειμένου λοιπόν το αποτέλεσμα να είναι θετικό πρέπει η βαθμίδα μεταβολής της πίεσης (dp/dL) να είναι αρνητική.

Η σχέση μετασχηματίζεται στην περίπτωση που η ροή γίνεται υπό κλίση γωνίας (θ), ως εξής:

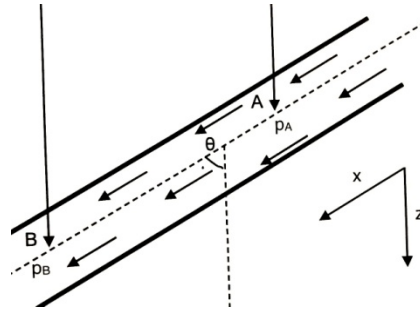
$$U_L = -\frac{k}{\mu} * \left(\frac{dp}{dL} - \rho * g * \cos(\theta) \right) = -\frac{k}{\mu} * \frac{d}{dL} * (p - \rho * g * L * \cos(\theta)) \Rightarrow$$

$$-\frac{k * \rho}{\mu} * \frac{d}{dL} * \left(\frac{p}{\rho} - g * L * \cos(\theta) \right) = -\frac{k * \rho}{\mu} * \frac{d}{dL} * \left(\frac{p}{\rho} - g * z \right) \quad (3.4) \quad , \text{ όπου}$$

θ = γωνία που σχηματίζει η ροή με την συνιστώσα της κατακόρυφου

g =επιτάχυνση της ταχύτητας

$z=L*\cos(\theta)$ =υψομετρική διαφορά μεταξύ του υψηλότερου σημείου A προς το χαμηλότερο σημείο B στη διεύθυνση της οποίας λαμβάνει χώρα η ροή



Εικόνα 3.2 Ροή ρευστού υπό κλίση^{xviii}

Για να εξετασθεί η αποδοτικότητα της ροής, πρέπει να βρεθεί ο λόγος $\frac{k}{\mu}$ που καλείται συντελεστής κινητικότητας (mobility ratio) όταν γίνεται αναφορά για ένα ρευστό. Από την άλλη όταν υπάρχουν δύο ρευστά ο συντελεστής κινητικότητας προκύπτει από το λόγο των κινητικότητων των δύο ρευστών. Όσο μεγαλύτερος είναι τόσο πιο εύκολα ρέει το ρευστό, αν όμως είναι μικρός απαιτείται μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για να μπορέσει να μετακινηθεί το ρευστό. Αποτελεί ένα δείκτη προκειμένου να μελετηθεί η απόδοση της διαδικασίας εκτόπισης σε ένα πορώδες μέσο.

$$M = \frac{k_{rw}(s_{or}) / \mu_w}{k_{ro}(s_{wc}) / \mu_o} \quad (3.5) \text{ όπου:}$$

$k_{rw}(s_{or})$ = σχετική διαπερατότητα του νερού στο σημείο υπολειμματικού βαθμού κορεσμού σε πετρέλαιο (η έννοια της σχετικής διαπερατότητας θα αναλυθεί εκτενώς στο κεφάλαιο 3.3)

$k_{ro}(s_{wc})$ =σχετική διαπερατότητα πετρελαίου στο σημείο του μη περαιτέρω απομακρύνσιμου βαθμού κορεσμού σε νερό

μ_o = ιξώδες πετρελαίου

μ_w =ιξώδες νερού

Εάν $M > 1$ η εκτόπιση δεν θεωρείται ευνοϊκή ενώ αν $M < 1$ η εκτόπιση θεωρείται ευνοϊκή.

Κατωτέρω γίνεται μια σύντομη αναφορά στις έννοιες του μη περαιτέρω απομακρύνσιμου βαθμού κορεσμού σε νερό και του υπολειμματικού βαθμού κορεσμού σε πετρέλαιο:

- Μη περαιτέρω απομακρύνσιμος βαθμός κορεσμού σε νερό (s_{wc}) ορίζεται ως η μικρότερη ποσότητα όγκου νερού που μπορεί να υπάρξει στους πόρους του πορώδους μέσου αφού έχει πραγματοποιηθεί διαδικασία εκτόπισης της φάσης του νερού από το πετρέλαιο.
- Υπολειμματικός βαθμός κορεσμού σε πετρέλαιο (s_{or}) ορίζεται ως η μικρότερη ποσότητα όγκου πετρελαίου που μπορεί να υπάρξει στους πόρους του πορώδους μέσου αφού έχει πραγματοποιηθεί διαδικασία εκτόπισης της φάσης πετρελαίου από το νερό.

Για να προσδιοριστεί το μέγεθος της διαπερατότητας πρέπει να επιλυθεί η εξίσωση 3.1 ως προς k :

$$k = \frac{Q^* \mu^* L}{A^* \Delta P} \quad (3.6)$$

Έχει ως μονάδα μέτρησης το L^2 και εκφραζόμενη σε μονάδες Darcy φανερώνει:

‘ότι ένα πορώδες μέσο έχει διαπερατότητα 1 Darcy, όταν ένα μονοφασικό υγρό ιξώδους 1 cP, ρέει διαμέσου πόρων διατομής 1 cm^2 , με παροχή $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$ και υφίσταται πτώση πίεσης ισοδύναμη με 1 atm ανά cm διανυθείσης απόστασης’.

Συνήθως οι διαπερατότητες σε ένα ταμιευτήρα είναι μικρότερες του 1 Darcy για αυτό χρησιμοποιείται μια υποδιαίρεση του Darcy, το mD και κυμαίνονται μεταξύ 5-500 mDarcy.⁴⁴

Μια κατανομή της ποιότητας ενός ταμιευτήρα σύμφωνα με τα mD είναι⁴⁵:

$k=1-10(\text{mD})$	Φτωχό (poor)
$k=10-100(\text{mD})$	Μέτριο (fair)
$k=100-1000 (\text{mD})$	Καλό (good)
$k>1000 (\text{mD})$	Πολύ καλό (excellent)

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1 Κατηγοριοποίηση ποιότητας ταμιευτήρα ανάλογα τη διαπερατότητα⁴⁶

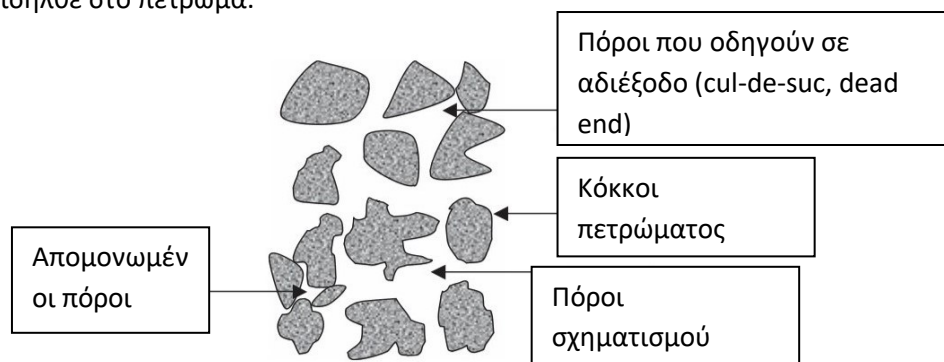
Στην περίπτωση λοιπόν που η διαπερατότητα εκφράζεται από την εξίσωση (3.6) γίνεται αναφορά στην απόλυτη διαπερατότητα καθώς το πορώδες μέσο είναι 100% κορεσμένο από ένα και μόνο ρευστό.

3.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΚΑΙ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

3.2.1 ΠΟΡΩΔΕΣ

Σημαντική είναι η έννοια του πορώδους καθώς αποτελεί βασική παράμετρο για έναν ταμιευτήρα. Το πορώδες λοιπόν είναι παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται άμεσα η ικανότητα πλήρωσης ενός ταμιευτήρα από υδρογονάνθρακες. Όσο περισσότεροι και μεγαλύτεροι οι πόροι ενός σχηματισμού τόσο περισσότερος κενός χώρος δημιουργείται, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη δυνατότητα αποθήκευσης πετρελαίου στους πόρους του.

Για να μελετηθεί το πορώδες πρέπει να μελετηθεί ο τρόπος δημιουργίας των πόρων, αν δηλαδή οι πόροι που έχουν δημιουργηθεί και περιέχουν πετρέλαιο και αέριο δημιουργήθηκαν κατά τον καθορισμό των στρωμάτων της άμμου, είτε από διαγένεση που έλαβε χώρα σε μεταγενέστερο χρόνο, είτε ακόμη και από διάλυση με τη συμβολή του νερού που εισήλθε στο πέτρωμα.



Εικόνα 3.3: Παρουσίαση των πόρων του πετρώματος μεταξύ κόκκων^{xix}

Οι κόκκοι των πετρωμάτων δεν εφάπτονται απόλυτα, λόγω του ακανόνιστου σχήματος τους. Αυτός λοιπόν ο κενός χώρος μεταξύ των κόκκων πληρούται με ρευστά⁴⁷.

Σε ένα πέτρωμα υπάρχει ο όγκος των κόκκων που εκφράζεται ως (GV), ο όγκος των κενών ή πόρων (PV) και ο συνολικός όγκος. Η σχέση που ισχύει είναι η εξής:

$$BV = GV + PV \quad (3.2.7)$$

Γενικά το πορώδες ορίζεται ως εξής :

$$\text{Πορώδες (\%)} \phi = \frac{\text{όγκος των πόρων του ταμιευτήρα}}{\text{συνολικό όγκο ταμιευτήρα}} * 100 \quad (3.2.8)^{48}$$

$$\text{έτσι προκύπτει ότι } \phi = \frac{PV}{BV} \quad (3.2.9)$$

Η κατάταξη του πορώδους που ακολουθεί είναι σύμφωνα με τους Fraser και Gratton⁴⁹. Μελέτησαν το πορώδες σχηματισμών από τη διάταξη ομοιόμορφων σφαιρών τις οποίες κατηγοριοποίησαν ανάλογα με το ποσοστό του πορώδους που προκύπτει, -αντιστοίχως κατηγοριοποιούνται και οι ταμιευτήρες. Συνεπώς :

- 0-5% θεωρείται μη εκμεταλλεύσιμος
- 5-10% θεωρείται φτωχός
- 10-15% θεωρείται ικανοποιητικός
- 15-20% θεωρείται καλός
- >20% θεωρείται πολύ καλός

Σε ταμιευτήρες πετρελαίου το πορώδες κυμαίνεται από 5-30%, με τις τιμές να βρίσκονται πιο συχνά μεταξύ 10-20%.⁵⁰ Η διαφορά μεταξύ ολικού και ενεργού αποτελεί το απομονωμένο πορώδες.⁵¹ Το ενεργό πορώδες (το ποσοστό των πόρων που συνδέονται μεταξύ τους) εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το περιεχόμενο, την ετερογένεια του μεγέθους των κόκκων αλλά και οποιεσδήποτε διαβρώσεις που λαμβάνουν χώρα στο πέτρωμα. Στην περίπτωση που το πορώδες συμβάλλει στην παραγωγή πετρελαίου, καλείται ενεργό πορώδες και ορίζεται ως εξής :

V_1 =όγκος αλληλοσυνδεόμενου πορώδους, V_2 =όγκος dead end ή cul de sac, V_{tot} =ολικός όγκος ταμιευτήρα

$$\phi = \frac{V_1 + V_2}{V_{tot}} * 100, (3.2.10)$$

3.2.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΚΑΙ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΣΧΕΣΗΣ KOZENY

Η εμπειρική μαθηματική σχέση του Kozeny συσχετίζει την διαπερατότητα με το πορώδες χρησιμοποιώντας τον νόμο του Darcy για ροή σε πορώδες μέσο και τον νόμο του Poiseuille για ροή μέσα σε η αριθμό τριχοειδών σωλήνων. Αν υποτεθεί λοιπόν μια συγκεκριμένη αντιπροσωπευτική περιοχή ροής του πορώδους μέσου A_c (cm²), μήκους L (cm), η ο αριθμός των τριχοειδών σωλήνων που βρίσκονται παράλληλα με ίδια ακτίνα r (cm) και μ το ιξώδες του ρευστού, η παροχή (cm³/s) δίνεται από τον εξής τύπο (Poiseuille)⁵²:

$$q = \left(\frac{n * \pi * r^4}{8 * \mu} \right) * \frac{\Delta p}{L} \quad (3.2.11)$$

Όμως από τον νόμο του Darcy ισχύει ότι $q = \left(\frac{k * A_c}{\mu} \right) * \frac{\Delta p}{L}$ (3.2.12), έτσι εξισώνοντας τις σχέσεις (3.2.10) και (3.2.11) θα προκύψει:

$$\left(\frac{n * \pi * r^4}{8 * \mu} \right) * \frac{\Delta P}{L} = \left(\frac{k * A_c}{\mu} \right) * \frac{\Delta P}{L} \Rightarrow$$

$$\left(\frac{n * \pi * r^4}{8 * \mu} \right) = \left(\frac{k * A_c}{\mu} \right) \Rightarrow$$

Λύνοντας ως προς τη διαπερατότητα k (cm^2 , $1 \text{ cm}^2 = 1,013 * 10^8 \text{ Darcy}$) προκύπτει :

$$k = \frac{n * \pi * r^4}{8 * A_c} \quad (3.2.13)$$

Όμως το πορώδες ορίζεται :

$$\phi = \frac{\text{όγκος πόρων}}{\text{ολικό όγκο}} = \frac{n * \pi * r^2 * L}{A_c * L} \quad (3.2.14) \text{ συνεπώς η διαπερατότητα μπορεί να γραφεί}$$

$$: k = \frac{\phi * r^2}{8} \quad (3.2.15)_{53}$$

Οι παραπάνω σχέσεις στηρίζονται στην υπόθεση ότι το πορώδες μέσο θεωρείται σαν μια δέσμη τριχοειδών σωλήνων.

3.3 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΩΝ

Η σχετική διαπερατότητα εκφράζεται ως ο λόγος που έχει ως αριθμητή την ενεργό διαπερατότητα (k_e), (k_{ew} : ενεργός διαπερατότητα νερού και k_{eo} : ενεργός διαπερατότητα πετρελαίου) σε ένα συγκεκριμένο βαθμό κορεσμού και παρονομαστή μια διαπερατότητα αναφοράς- διαπερατότητα του πετρώματος (k_r).

$$\bullet \quad k_{rw} = \frac{k_{ew}}{k_r} \quad (3.16)$$

$$\bullet \quad k_{ro} = \frac{k_{eo}}{k_r} \quad (3.17)$$

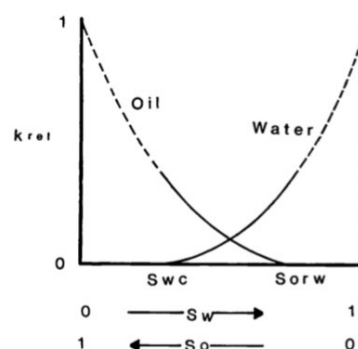
$$\bullet \quad k_{rg} = \frac{k_{eg}}{k_r} \quad (3.18)$$

Ός ενεργός διαπερατότητα, καλείται η διαπερατότητα ενός πετρώματος σε μια συγκεκριμένη φάση ρευστού, όταν το πορώδες μέσο είναι κορεσμένο με περισσότερα του ενός ρευστά.⁵⁴ και είναι άμεσα εξαρτώμενη από τον βαθμό κορεσμού.

Ως διαπερατότητα αναφοράς μπορεί να θεωρηθεί:

- είτε η απόλυτη διαπερατότητα, όταν δηλαδή είναι κορεσμένο το πορώδες μέσο από ένα μόνο ρευστό
- είτε η διαπερατότητα του πετρελαίου σε μη περαιτέρω απομακρύνσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό s_{wc} .
- είτε η διαπερατότητα Klinkenberg.

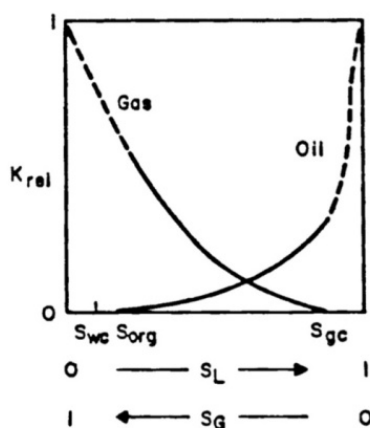
Η σχετική διαπερατότητα αποτυπώνεται γραφικά συναρτήσει του βαθμού κορεσμού του νερού (Εικόνα 3.4). Η σχετική διαπερατότητα εξαρτάται από το κορεσμό σε ρευστά.⁵⁵



Εικόνα 3.4: Καμπύλες σχετικών διαπερατοτήτων για νερό-πετρέλαιο^{xx}

Από το γράφημα 3.4 όπου εμφανίζονται οι καμπύλες των σχετικών διαπερατοτήτων, αριστερά για το πετρέλαιο και δεξιά για το νερό, φαίνεται ότι στο σημείο του μη περαιτέρω απομακρύνσιμου βαθμού κορεσμού σε νερό (s_{wc}) η σχετική διαπερατότητα του νερού μηδενίζεται, ενώ η σχετική διαπερατότητα σε πετρέλαιο είναι λίγο μικρότερη της μονάδας. Εάν χρησιμοποιηθεί ως διαπερατότητα αναφοράς η διαπερατότητα του πετρελαίου στο σημείο του μη περαιτέρω απομακρύνσιμου βαθμού κορεσμού σε νερό τότε η σχετική διαπερατότητα του πετρελαίου στο ίδιο σημείο θα ισούται με τη μονάδα. Έτσι παρατηρείται ότι στο σημείο s_{wc} μόνο το πετρέλαιο ρέει. Οι διακεκομμένες γραμμές φανερώνουν μετρήσεις οι οποίες δεν συναντώνται στην πραγματικότητα κατά την εκμετάλλευση αφού το σημείο έναρξης των διακεκομμένων γραμμών αποτελεί ταυτόχρονα τερματισμό των ορίων μέσα στα οποία μπορεί να πάρει τιμές ο βαθμός κορεσμού σε συνθήκες πεδίου. Αντίστοιχα στο σημείο του υπολειμματικού βαθμού κορεσμού σε πετρέλαιο s_{orw} η σχετική διαπερατότητα σε πετρέλαιο μηδενίζεται ενώ η τιμή της σχετικής διαπερατότητας του νερού στο ίδιο σημείο είναι σημαντικά μεγαλύτερη.

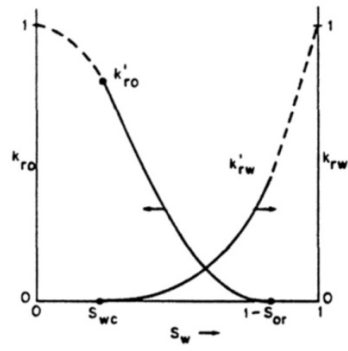
Όσο μειώνεται ο κορεσμός σε νερό τόσο μειώνεται και η σχετική διαπερατότητα του νερού ενώ η σχετική διαπερατότητα για το πετρέλαιο αυξάνεται. Οι μέγιστες τιμές των σχετικών διαπερατοτήτων όπως φαίνονται στο παραπάνω γράφημα (πριν ξεκινήσουν οι διακεκομμένες γραμμές) ονομάζονται σχετικές διαπερατότητες τελικών σημείων (end points relative permeabilities).



Εικόνα 3.5: Καμπύλες σχετικών διαπερατοτήτων αέριο-πετρέλαιο^{xxi}

Στο γράφημα 3.5 αποτυπώνεται η σχέση βαθμών κορεσμού με τις σχετικές διαπερατότητες με την παρουσία όμως αερίου ως προς το βαθμό κορεσμού του συνόλου των υγρών. Και από το γράφημα φαίνεται ότι όσο ο κορεσμός σε αέριο αυξάνεται, η σχετική διαπερατότητα των υγρών μειώνεται και η σχετική διαπερατότητα του αερίου αυξάνεται. Μετά το τέλος της συνεχόμενης γραμμής, οι βαθμοί κορεσμοί μικρότεροι από το s_{wc} δεν λαμβάνονται υπ' όψιν. Το σημείο τομής των καμπυλών των σχετικών διαπερατοτήτων αποτελεί δείκτη της διαβροχής όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Στο σημείο αυτό οι σχετικές διαπερατότητες του συνόλου των υγρών και του πετρελαίου ταυτίζονται.

Επίσης όπως φαίνεται στην γράφημα 3.6 η καμπύλη της σχετικής διαπερατότητας της διαβρέχουσας φάσης φέρει τα κοίλα προς τα κάτω, ενώ η καμπύλη της σχετικής διαπερατότητας για τη διαβρέχουσα φάση έχει μία σιγμοειδής μορφή.



Εικόνα 3.6: Καμπύλες σχετικών διαπερατοτήτων νερού- πετρελαίου^{xii}

3.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΕΧΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕΣΩ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΩΝ

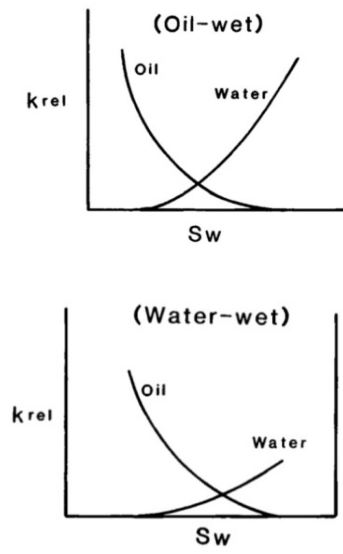
Η διαβροχή επηρεάζει την κατανομή των φάσεων τόσο του νερού όσο και του πετρελαίου που υπάρχουν στον σχηματισμό, τα χαρακτηριστικά των τριχοειδών πιέσεων, το ποσοστό του πετρελαίου που μπορεί να παραχθεί καθώς και τον υπολειμματικό βαθμό κορεσμού σε πετρέλαιο. Σε ένα σύστημα υδατοδιαβρεχτό, η απόλυτη διαπερατότητα του νερού είναι χαμηλότερη σε σχέση με ένα σύστημα πετρελαιοδιαβρεχτό για τον ίδιο βαθμό κορεσμού. Οι Owens και Archer⁵⁶ έδειξαν ότι όταν αυξάνεται η τάση διαβροχής ενός συστήματος από πετρέλαιο, οδηγεί σε αύξηση της σχετικής διαπερατότητας του νερού για σταθερό βαθμό κορεσμού και μείωση αντίστοιχα της σχετικής διαπερατότητας του πετρελαίου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη δευτερογενή εκτόπιση πετρελαίου, εισπιέζοντας νερό σε ένα πετρελαιοδιαβρεχτό σχηματισμό εμφανίζεται αρκετά νωρίς η πρώτη σταγόνα από τις παραγωγικές γεωτρήσεις, δηλαδή το σημείο water breakthrough ή water-cut. Αυτό συμβαίνει καθώς σε έναν πετρελαιοδιαβρεχτό σχηματισμό το νερό περνάει από τα μεγάλα κανάλια ροής, με αποτέλεσμα να μην εμποδίζεται η κίνηση του και έτσι το σημείο που αναφέρθηκε προηγουμένως να εμφανίζεται νωρίτερα. Από την άλλη, στην υδατοδιαβρεχτή περίπτωση, οι σταγόνες πετρελαίου βρίσκονται σε μεγάλα κανάλια ροής τα οποία εμποδίζουν την κίνηση του νερού και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η σχετική διαπερατότητα του νερού να μειώνεται και άρα το σημείο water breakthrough να καθυστερεί. Έτσι λοιπόν ο Craig⁵⁷ δημιούργησε κάποιους κανόνες :

	Πετρελαιοδιαβρεχτό	Υδατοδιαβρεχτό
S_{wc}	<15% συχνά 10%	>20-25%
$k_{rw}=k_{row}$ (Σημείο τομής)	$S_w<50\%$	$S_w>50\%$
k_{rw} σε S_{or}	>0.5 κοντά στο 1	<0.3

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2 Χαρακτηριστικά για τους δύο τύπους διαβροχής⁵⁸

Ένας τρόπος από τον οποίο μπορεί να χαρακτηριστεί η διαβρεχτότητα σχετίζεται με το σημείο τομής των δύο καμπυλών νερού-πετρελαίου, στο οποίο οι σχετικές διαπερατότητες των δύο φάσεων εξισώνονται. Αν το σημείο τομής των σχετικών διαπερατοτήτων νερού-πετρελαίου, όπως φαίνεται στο γράφημα 3.7, βρίσκεται χαμηλότερα (αριστερά) του 50% βαθμού κορεσμού σε νερό τότε, το σύστημα αναφέρεται σαν πετρελαιοδιαβρεχτό. Ενώ αν το σημείο τομής (Γράφημα 3.7) βρίσκεται δεξιά του 50% του βαθμού κορεσμού τότε, καλείται υδατοδιαβρεχτό το σύστημα.



Εικόνα 3.7: Σχηματική αναπαράσταση, διάκρισης της διαβροχής ανάλογα το σημείο τομής των σχετικών διαπερατοτήτων των δύο φάσεων^{xxiii}

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΙΑΒΡΕΧΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΩΝ

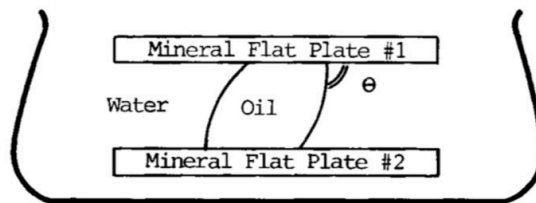
4.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΕΧΤΟΤΗΤΑΣ

Οι μέθοδοι προσδιορισμού της διαβροχής του πετρώματος, παρουσιάστηκαν εκτενώς από τον Anderson⁵⁹ (1986). Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι αυτές της γωνίας επαφής, η Amott και η USBM. Η Amott και η USBM ενώ έχουν ευρεία εφαρμογή, έχουν κάποιους περιορισμούς καθώς είναι σχετικά χρονοβόρες και κάποιες από αυτές πολύ ακριβές. Παρ' όλα αυτά μπορούν να αποδώσουν μια ποσοτική εκτίμηση της διαβροχής και είναι αρκετά καλά τεκμηριωμένες οι μεθοδολογίες διεξαγωγής τους.

Στην παρούσα διπλωματική θα περιγραφούν οι ποσοτικές μέθοδοι προσδιορισμού της διαβροχής αλλά και η πιο σημαντική ποιοτική.

Ποσοτικές μέθοδοι:

1. Γωνία επαφής: Προκειμένου να υπολογιστεί η γωνία επαφής πρέπει να χρησιμοποιηθούν δύο λείες παράλληλες πλάκες οι οποίες είναι κατασκευασμένες από το ορυκτό που είναι αντιπροσωπευτικό με το δείγμα που εξετάζεται. Στη συνέχεια οι δύο πλάκες εμβαπτίζονται σε άλμη και μια σταγόνα πετρελαίου εισπιέζεται ανάμεσα τους. Κρατώντας την μία πλάκα σταθερή και μετακινώντας τη δεύτερη, παράλληλα πάντα, παρατηρούνται οι γωνίες που σχηματίζει η σταγόνα πετρελαίου με την πλάκα⁶⁰. Η γωνία θ της Εικόνας 4.1 καλείται προπορευόμενη γωνία επαφής.



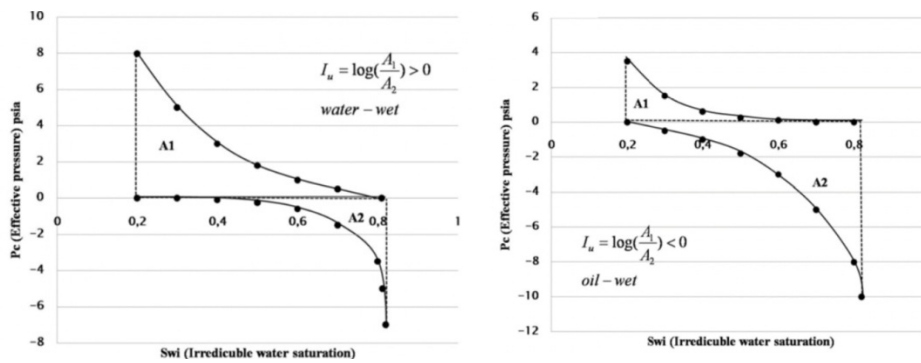
Εικόνα 4.1: Μέτρηση γωνίας επαφής^{xiv}

2. Μέθοδος Amott: Για την συγκεκριμένη μέθοδο σε αυτό το σημείο θα αναφερθούν επιγραμματικά οι αρχές της καθώς αναλύεται εκτενώς στο κεφάλαιο 5.5. Η Amott είναι μια συνδυαστική μέθοδος απορρόφησης και εξαναγκασμένης εκτόπισης με στόχο να προσδιορισθεί μια μέση διαβρεχτότητα. Στόχος είναι το υγρό που διαβρέχει την επιφάνεια των πόρων ενός πετρώματος να απορροφηθεί και με αυτό τον τρόπο να εκτοπισθεί η φάση του μη διαβρέχοντος υγρού. Στο δοκίμιο που προηγουμένως ήταν κορεσμένο σε νερό εισπιέζεται πετρέλαιο με χρήση αντλίας μέχρι το σημείο s_{wc} και τοποθετείται εντός της

συσκευής Amott που είναι πληρωμένη με νερό. Εκεί αφήνεται το δοκίμιο για μέρες και παρατηρείται η συμπεριφορά του, αν δηλαδή εκτοπίζεται πετρέλαιο με αυθόρμητη απορρόφηση νερού. Εάν είναι υδατοδιαβρεχτό το δοκίμιο θα απορροφήσει μεγάλη ποσότητα νερού σε αντίθεση με την περίπτωση του πετρελαιοδιαβρεχτού σχηματισμού. Στη συνέχεια εξέρχεται της συσκευής Amott και εισέρχεται στον ειδικό δειγματοφορέα όπου εισπιέζεται με αντλία νερό προκειμένου να προσδιορισθεί τώρα η ποσότητα του πετρελαίου που εκτοπίζεται εξαναγκασμένα. Στη δεύτερη φάση του πειράματος το δοκίμιο βρίσκεται στο σημείο του υπολειμματικού βαθμού κορεσμού σε πετρέλαιο και εισέρχεται στη συσκευή Amott που τώρα είναι πληρωμένη με πετρέλαιο. Εάν το δοκίμιο είναι πετρελαιοδιαβρεχτό θα απορροφήσει σημαντική ποσότητα πετρελαίου σε αντίθεση με την περίπτωση της υδατοδιαβρεχτής συμπεριφοράς. Αφού παρατηρηθεί η αυθόρμητη εκτόπιση νερού για μέρες στη συνέχεια το δοκίμιο εισάγεται στο δειγματοφορέα και εισπιέζεται πετρέλαιο παρατηρώντας τώρα την εξαναγκασμένη εκτόπιση νερού. Από τα δύο στάδια του πειράματος προσδιορίζονται οι δείκτες εκτόπισης σε νερό (δ_w) και πετρέλαιο (δ_o), των οποίων η διαφορά δίνει το δείκτη Amott ($I = \delta_w - \delta_o$). Μπορεί να πάρει τιμές από +1 (ισχυρή υδατοδιαβρεχτή συμπεριφορά) μέχρι -1 (ισχυρή πετρελαιοδιαβρεχτή συμπεριφορά).⁶¹ Η παραπάνω διεργασία ακολουθείται για όλους τους τύπους διαβροχής.

3.Μέθοδος USBM-Donaldson⁶² 1969 (U.S. Bureau of Mines): Μελετάται η εξαναγκασμένη απορρόφηση ενός ρευστού από ένα πυρήνα, κάτι που επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός φυγοκεντρητή ο οποίος περιστρέφει το δοκίμιο με σταδιακή αύξηση της ταχύτητας. Αρχικά ο κορεσμός σε νερό του δοκιμίου βρίσκεται στο σημείο s_{wc} και τοποθετείται σε ένα κύλινδρο που πληρούται με νερό. Έπειτα από πολλές περιστροφές με χρήση του φυγοκεντρητή φτάνει στο σημείο του υπολειμματικού βαθμού κορεσμού σε πετρέλαιο. Έπειτα τοποθετείται σε έναν κύλινδρο που πληρούται με πετρέλαιο και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία με τον φυγοκεντρητή. Τελικά δημιουργούνται γραφήματα (τριχοειδών πιέσεων-βαθμού κορεσμού) από τα οποία υπολογίζεται το εμβαδόν της περιοχής που βρίσκεται κάτω από κάθε καμπύλη τριχοειδών πιέσεων προκειμένου να προσδιορισθεί το απαιτούμενο έργο (Εικόνα 4.2). Ισχύει ότι $W = \log \frac{A_1}{A_2}$ όπου A_1 χαρακτηρίζει το εμβαδόν της καμπύλης της δεύτερης απομάκρυνσης και A_2 η περιοχή κάτω από την αρνητική καμπύλη απομάκρυνσης.

Αν $W > 0$ τότε ο σχηματισμός είναι υδατοδιαβρεχτός, ενώ αν $W < 0$ είναι πετρελαιοδιαβρεχτός. Η βασική διαφορά μεταξύ αυτής της μεθόδου και της Amott είναι ότι εδώ χρησιμοποιούνται οι τριχοειδείς πιέσεις προκειμένου να προσδιορισθεί η διαβρεχτότητα. Μοιάζει με την Amott αλλά εμπεριέχει το απαιτούμενο έργο για να επιτευχθεί εξαναγκασμένη εκτόπιση του ρευστού. Προσδιορίζει μία μέση διαβρεχτότητα του σχηματισμού και αυτή η ποσοτική μέθοδος είναι γρήγορη και απλή.⁶³



Εικόνα4.2: Υδατοδιαβρεχτό και πετρελαιοδιαβρεχτό σύστημα^{xxxv}

Ποιοτικές μέθοδοι:

4.Μέθοδος απορρόφησης (imbibition)⁶⁴:Είναι από τις πιο γνωστές ποιοτικές μεθόδους προσδιορισμού της διαβροχής καθώς είναι γρήγορη και δεν χρειάζεται απαιτητικό εξοπλισμό. Αρχικά ο πυρήνας βρίσκεται στο σημείο του μη περαιτέρω απομακρύνσιμου βαθμού κορεσμού σε νερό και εμβαπτίζεται σε άλμη. Παρατηρείται ο όγκος αλλά και ο ρυθμός με τον οποίο εκτοπίζεται το πετρέλαιο. Αν η ποσότητα της άλμης που απορροφάται είναι υψηλή τότε ο σχηματισμός κρίνεται σαν υδατοδιαβρεχτός, στην περίπτωση όπου η ποσότητα που απορροφάει ο πυρήνας σε άλμη είναι μικρή υποδηλώνεται ασθενής υδατοδιαβρεχτή συμπεριφορά. Τέλος εάν δεν απορροφηθεί καθόλου άλμη γίνεται λόγος για πετρελαιοδιαβρεχτό ή ενδιάμεσης διαβροχής δοκίμιο. Σε αυτή την περίπτωση στον πυρήνα εισπνέζεται νερό μέχρι τον υπολειμματικό βαθμό κορεσμού σε πετρέλαιο και εμβαπτίζεται σε πετρέλαιο. Αντίστοιχα παρατηρείται ο όγκος και ο ρυθμός με τον οποίο απορροφάται το πετρέλαιο. Εάν απορροφηθεί υψηλή ποσότητα πετρελαίου τότε είναι πετρελαιοδιαβρεχτός ο σχηματισμός. Εάν απορροφηθεί ποσότητα και από τις δύο φάσεις τότε είναι μεικτής διαβροχής. Θεωρείται γρήγορη αυτή η ποιοτική μέθοδος προσδιορισμού της διαβροχής καθώς δεν χρειάζεται απαιτητικό εξοπλισμό και έχει άμεσα αποτελέσματα. Εκτός από την μέθοδο της απορρόφησης υπάρχουν και άλλες ποιοτικές μέθοδοι όπως ο Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός (NMR), η μέθοδος της μικροσκοπικής παρατήρησης, η μέθοδος της επίπλευσης, οι οποίες αναφέρονται επιγραμματικά στον ακόλουθο πίνακα

Μικροσκοπικής παρατήρησης (microscopic examination)	Μελετώνται τα ρευστά που περιβάλλουν τους κόκκους.
Επίπλευσης (flotation)	Μελετάται η κατανομή των κόκκων στη διεπιφάνεια νερού/πετρελαίου ή αέρα/νερού.
Μαγνητικός πυρηνικός συντονισμός (NMR)	Μελετώνται οι αλλαγές στους χρόνους χαλάρωσης.
Σχετικές διαπερατότητες (Relative permeability curves)	Μελετώνται το σχήμα και το μέγεθος των καμπυλών των σχετικών διαπερατοτήτων πετρελαίου- νερού.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 ΠΟΙΟΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ⁶⁵

4.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΩΝ

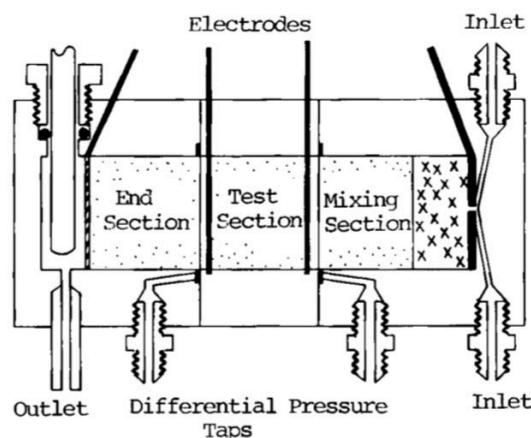
Οι μέθοδοι για τον προσδιορισμό της σχετικής διαπερατότητας χωρίζονται σε σταθερής και μη σταθερής κατάστασης. Η μέθοδος της σταθερής κατάστασης αναφέρεται σε χρήση δοκιμίου που κορέννεται σε διαβρέχον υγρό κατά 100%, ενώ τα μείγματα πετρελαίου-νερού εισέρχονται στο δοκίμιο ταυτόχρονα από ειδικές σωληνώσεις με συγκεκριμένες διατομές. Για τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ο νόμος του Darcy με στόχο τον προσδιορισμό των διαπερατοτήτων για τις επιμέρους φάσεις και σε συνδυασμό στους επιμέρους βαθμούς κορεσμού και δημιουργούνται τα τελικά διαγράμματα σχετικών διαπερατοτήτων. Οι μέθοδοι μη σταθερής κατάστασης απαιτούν δυσκολότερη μαθηματική ερμηνεία. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν εκτενώς κάποιες από τις μεθόδους σταθερής κατάστασης και στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στις μεθόδους μη σταθερής κατάστασης.

Οι μετρήσεις της μη σταθερής ροής είναι περισσότερο χρονοβόρες και απαιτούν περισσότερο εξοπλισμό. Είναι μέθοδοι που η βασική τους διαφορά έναντι των μεθόδων σταθερής κατάστασης έγκειται στη διαφορετική διαχείριση των φαινομένων (end effect) αλλά και στο διαφορετικό τρόπο εισαγωγής των ρευστών στο δοκίμιο. Στην περίπτωση της μη σταθερής κατάστασης εισέρχεται στο δείγμα μόνο η μη διαβρέχουσα φάση και απορρέουν και οι δύο φάσεις (διαβρέχουσα-μη διαβρέχουσα). Για την αντιμετώπιση των φαινομένων εξόδου (end effect) χρησιμοποιούνται υψηλές βαθμίδες πίεσης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκτόπισης. Το φαινόμενο των end effect μπορεί να παρουσιάσει σημαντικά προβλήματα τόσο στον προσδιορισμό των κορεσμών αλλά και των διαπερατοτήτων, τα οποία μπορούν να διαπιστωθούν από την πτώση πίεσης αλλά και από τα υπολογιζόμενα αποτελέσματα της ροής. Τα φαινόμενα αυτά είναι επικρατέστερα στην περίπτωση που πετρέλαιο εκτοπίζει νερό σε υδατοδιαβρεχτό σχηματισμό αλλά και στην περίπτωση που υπάρχει αέριο και πετρέλαιο, το φαινόμενο είναι έντονο όταν αέριο εκτοπίζει πετρέλαιο. Το βασικό πρόβλημα στην παρουσία του φαινομένου αυτού έγκειται στο σφάλμα που θα προκύψει στον προσδιορισμό του τελικού σημείου της διαπερατότητας του πετρελαίου στο σημείο δηλαδή όπου επιτυγχάνεται ο μη περαιτέρω απομακρύνσιμος βαθμός κορεσμού σε νερό.

4.2.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

1. **Penn-State-Multiple core**(από τον Morse et al.⁶⁶ 1947): η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στην τοποθέτηση του δείγματος του πυρήνα μεταξύ δύο τεμαχίων πετρώματος εκατέρωθεν που μοιάζουν με το υπό εξέταση δείγμα (Εικόνα 4.3). Αυτό γίνεται ώστε οι μετρήσεις που γίνονται στα άκρα του δείγματος να μην επηρεάζονται από τριχοειδή φαινόμενα και για να επιτευχθεί πλήρης αναμειξιμότητα των δύο φάσεων πριν εισέλθουν στο δείγμα. Γίνεται έκχυση της μίας φάσης στο δείγμα μέχρι να επιτευχθούν συγκεκριμένες

βαθμίδες πιέσεων και να επιτευχθεί κορεσμός. Στην πορεία προστίθεται και η δεύτερη φάση η οποία με τη σειρά της εκτοπίζει την πρώτη με σχετικά χαμηλούς ρυθμούς ροής. Μόλις επιτευχθεί ισορροπία καταγράφονται οι διαφορετικοί ρυθμοί ροής αλλά και το ποσοστό κορεσμού της κάθε φάσης. Έπειτα απομακρύνεται το δείγμα και προσδιορίζεται το βάρος του. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρόδια τα οποία εξετάζουν τον κορεσμό σε νερό στο δοκίμιο αλλά και το πότε επέρχεται ισορροπία. Η θερμοκρασία θα πρέπει να παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια του πειράματος, ενώ μπορεί να χρειαστούν 1-3 ημέρες για απόλυτη σταθεροποίηση.



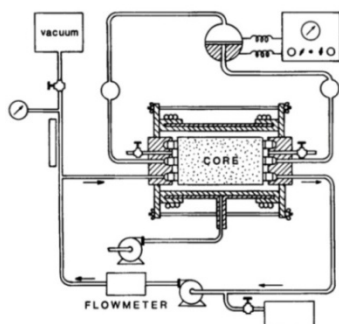
Εικόνα4.3: ΔιάταξηPenn-State^{xvii}

2.Δυναμική μέθοδος –Dynamic method (High rate- method): Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο δύο φάσεις των ρευστών εισέρχονται σε ένα πυρήνα με σταθερό και υψηλό ρυθμό ροής. Το μέγεθος του ρυθμού ροής εξαρτάται άμεσα από το μήκος του δοκιμίου αλλά και από τις τιμές των τριχοειδών πιέσεων. Από τις μεθόδους σταθερής κατάστασης η δυναμική είναι εκείνη που χρησιμοποιείται πιο συχνά.

3.Ακίνητου ρευστού (Stationary method): Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο μετράται η σχετική διαπερατότητα της κινητής φάσης με την παρουσία μιας πρακτικά ακίνητης φάσης. Το υγρό θεωρείται ως ακίνητη φάση, ενώ η κινητή είναι το αέριο. Καθώς λοιπόν το αέριο έχει μεγάλη κινητικότητα η υγρή φάση είναι ακίνητη στους χαμηλούς ρυθμούς ροής.

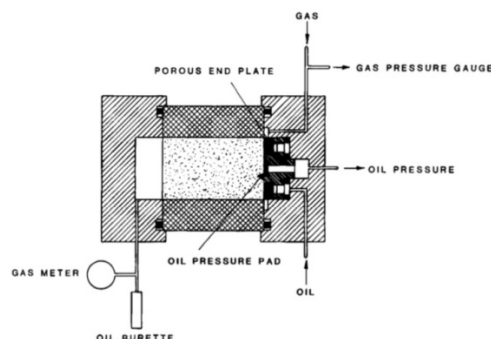
4.Hassler- (uniform capillary pressure method):μελετήθηκε αρχικά από τον Hassler⁶⁷ το 1944 και στη συνέχεια τροποποιήθηκε από τους Gates, Lietz, Brownscombe, Josendal και Osoba⁶⁸ Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται δύο ημιπερατές μεμβράνες που τοποθετούνται στα άκρα της συσκευής (Εικόνα 4.4). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο τα ρευστά είναι σε διαχωρισμό, τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του πυρήνα. Οι πιέσεις μετρούνται ξεχωριστά η καθεμιά με χρήση ημιπερατής μεμβράνης. Η μέθοδος αυτή χρησιμεύει έτσι ώστε να επικρατεί ομοιόμορφος κορεσμός σε όλο το μήκος του πυρήνα, ακόμη και σε χαμηλούς ρυθμούς ροής. Είναι αποτελεσματική σε πορώδες μέσο που διαβρέχεται ισχυρά από ένα από τα δύο ρευστά, όμως εμφανίζει σφάλματα σε περίπτωση ενδιάμεσης διαβροχής. Τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου δεν εξάγονται πιο γρήγορα

από άλλες μεθόδους, αυτός είναι και ένας βασικός λόγος για τον οποίο δεν χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία.



Εικόνα 4.4 : Διάταξη μεθόδου Hassler^{xxvii}

5. **Hafford**: (με σταθερές συνθήκες) που μελετήθηκε από τον Richardson⁶⁹ και σε αυτή την περίπτωση η μη διαβρέχουσα φάση εισέρχεται απευθείας στο δείγμα, ενώ η διαβρέχουσα έρχεται μέσω ενός δίσκου από τον οποίο δεν μπορεί να διέλθει η μη διαβρέχουσα φάση. Το κεντρικό τμήμα της συσκευής είναι απομονωμένο και χρησιμεύει για τη μέτρηση της πίεσης της διαβρέχουσας φάσης. Η μη διαβρέχουσα φάση εισέρχεται στο δείγμα και η πίεση μετριέται με ειδικό μανόμετρο (Εικόνα 4.5) Η διαφορά των πιέσεων μεταξύ διαβρέχουσας και μη διαβρέχουσας φάσης φανερώνει την τριχοειδή πίεση στο άκρο της εισροής. Κατά την εκροή όπου και εκεί υπάρχουν τριχοειδή φαινόμενα, αυτά ελαχιστοποιούνται με χρήση υψηλών παροχών.⁷⁰



Εικόνα 4.5: Διάταξη μεθόδου Hafford^{xxviii}

4.2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Στην περίπτωση λοιπόν των μεθόδων μη σταθερής κατάστασης, μόνο η μη διαβρέχουσα φάση εισάγεται στον πυρήνα και με αυτό τον τρόπο απομακρύνεται η διαβρέχουσα φάση και τη θέση της καταλαμβάνει η μη διαβρέχουσα. Έτσι, ο κορεσμός και των δύο φάσεων των ρευστών μεταβάλλεται, ενώ αν χρησιμοποιηθούν υψηλές βαθμίδες πιέσεων τότε

μπορούν να απαλειφθούν τα φαινόμενα εξόδου (end effect). Με τις μεθόδους αυτές ασχολήθηκαν οι Buckley, Leverett και Welge⁷¹ με στόχο την εύρεση των σχετικών διαπερατοτήτων κάτω από μη σταθερές συνθήκες.

Ο Leverett χρησιμοποίησε τον νόμο του Darcy καθώς και την έννοια των τριχοειδών πιέσεων για να προσδιορίσει την ροή του νερού κατά την έξοδο. Για την περίπτωση της οριζόντιας ροής και της αμελητέας επίδρασης των τριχοειδών πιέσεων ο Welge χρησιμοποίησε επιπλέον σχέσεις με τους μέσους βαθμούς κορεσμού. Σε αυτές τις περιπτώσεις υπάρχουν κάποιες απαραίτητες προϋποθέσεις που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και είναι οι εξής :

1. Η βαθμίδα της πίεσης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται τα φαινόμενα από τις τριχοειδείς πιέσεις.
2. Να υπάρχει ομοιογένεια στον πυρήνα
3. Οι συνθήκες που επικρατούν στον πυρήνα αλλά και η πίεση εισόδου πρέπει να είναι σταθερές σε όλη τη διάρκεια του πειράματος.
4. Τα φαινόμενα συμπίεσης πρέπει να είναι αμελητέα⁷²

Μέθοδος υψηλού ρυθμού-(High-rate method):Στη συγκεκριμένη μέθοδο τα φαινόμενα εξόδου πρέπει να απαλείφονται μέσω του ρυθμού έκχυσης, ενώ τα δεδομένα παραγωγής, έκχυσης και διαφορικών πιέσεων πρέπει να διαφοροποιούνται, για να προσδιορισθούν οι σχετικές διαπερατότητες. Οι βιομηχανίες πετρελαίου και αερίου χρησιμοποιούν ευρέως τη συγκεκριμένη μέθοδο καθώς είναι φθηνή και γρήγορη. Αυτό που αμφισβητείται είναι η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων αν και έχει αποδειχθεί από τη βιβλιογραφία ότι ταυτίζονται με αποτελέσματα άλλων μεθόδων.

Μέθοδος χαμηλού ρυθμού-(Low-rate): Με την ευρεία χρήση των υπολογιστών η παρούσα μέθοδος αναπτύχθηκε αρκετά με στόχο τον προσδιορισμό των σχετικών διαπερατοτήτων σε χαμηλούς ρυθμούς με μεθόδους μη σταθερής κατάστασης. Ο εξοπλισμός είναι ίδιος με εκείνον της μεθόδου υψηλού ρυθμού και με χρήση μαθηματικών μοντέλων μελετώνται τα δεδομένα παραγωγής και πτώσης πίεσης. Σαν μέθοδος όμως δεν χρησιμοποιείται πολύ.

Μέθοδος φυγοκέντρησης- (Centrifuge method):Με τη χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου μπορούν να προσδιοριστούν οι σχετικές διαπερατότητες όπως και οι τριχοειδείς πιέσεις(Εικόνα 2.14). Η αρχή της στηρίζεται στον προσδιορισμό των σχετικών διαπερατοτήτων της φάσης με τη χαμηλότερη κινητικότητα. Με τη χρήση πειραματικών δεδομένων μπορούν να προσδιοριστούν οι σχετικές διαπερατότητες.⁷³

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

5.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΨΑΜΜΙΤΩΝ

Οι ψαμμίτες είναι ιζηματογενή πετρώματα τα οποία έχουν σχηματιστεί από την απόθεση υλικών και την μετέπειτα ενοποίηση τους. Τα ιζηματογενή πετρώματα εμφανίστηκαν στην επιφάνεια της Γης και παρουσιάζουν μια χαρακτηριστική στρώση που δημιουργείται κατά την διαβάθμιση υλικών της διαδικασίας της αποσάθρωσης στην απόθεση, ωστόσο κάποια πετρώματα δεν εμφανίζουν το συγκεκριμένο αυτό χαρακτηριστικό

Τα βασικά στάδια που ακολουθούνται για τον σχηματισμό τους είναι:

- η αποσάθρωση (οδηγεί σε μεταβολή του χαρακτήρα του μητρικού πετρώματος μετά από φυσικοχημικές αλλά και βιολογικές διεργασίες)
- η μεταφορά (από τη διαδικασία της διάβρωσης επιτυγχάνεται η μεταφορά των υλικών)
- η απόθεση (αποτελεί την συσσώρευση υλικών σε διάφορα στρώματα)
- η διαγένεση (η μετατροπή των υλικών των ιζημάτων που δεν συνδέονται μεταξύ τους σε τελικώς συμπαγή πετρώματα).

Οι ψαμμίτες είναι κλαστικά ιζήματα που αποτελούνται από υλικό πλήρωσης (matrix), (δηλαδή μικροί κόκκοι που πληρώνουν τα διάκενα των θραυσμάτων αλλά και των μεγαλύτερων κόκκων του ιζήματος), συγκολλητικό υλικό (είναι το υλικό που συμβάλλει στη μετατροπή σε συμπαγές ιζημα) αλλά και θραύσματα ορυκτών. Έχουν μέγεθος κλαστικών κόκκων μεταξύ 2 mm και 1/16 mm. Εμφανίζονται είτε ως χαλαζιακοί, είτε ασβεστιτικοί, αργιλώδεις και ιλυώδεις. Αυτός ο χαρακτηρισμός δίνεται είτε από το ορυκτό που έχει τη μεγαλύτερη σύσταση, είτε από τη συγκολλητική ύλη είτε από το υλικό πλήρωσης. Τα συστατικά των ψαμμιτών είναι :

- κόκκοι χαλαζία
- κόκκοι αστρίων
- θραύσματα πετρωμάτων
- υλικό πλήρωσης
- συγκολλητικό υλικό.⁷⁴

Στο εργαστήριο έγιναν μετρήσεις σε ψαμμίτη τύπου Berea, σε πρώτη φάση για την ορυκτολογική ανάλυση, την κατανομή μεγέθους πόρων, το πορώδες, τον μη περαιτέρω απομακρύνσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό, τη διαβροχή, τη διαπερατότητα Klinkenberg, και σε δεύτερη φάση για τις σχετικές διαπερατότητες και το συντελεστή κινητικότητας τα οποία

θα αναφερθούν στις υποενότητες (3.1-3.4). Κάποιες από τις παραπάνω διεργασίες πραγματοποιήθηκαν δύο φορές, μια φορά όταν το δοκίμιο ήταν υδατοδιαβρεχτό και άλλη μια φορά όταν το δοκίμιο με αλλαγή της διαβροχής έγινε πετρελαιοδιαβρεχτό. Ψαμμίτες τύπου Berea εμφανίζονται συχνά στις Ηνωμένες Πολιτείες και έχουν πάρει το όνομα τους από μια πόλη στο Οχάιο. Έχουν συνήθως υψηλό πορώδες και διαπερατότητα αποτελώντας έτσι αρκετά καλή προσομοίωση πετρώματος ταμιευτήρα. Τέλος αποτελούνται από χαλαζία που συνδέεται με πυριτική κόλλα. Οι ιδιότητες των ψαμμιτών τύπου Berea, εμφανίζουν ομοιομορφία και μια μέση σύσταση τους είναι η εξής :

SiO ₂	93,13%
Al ₂ O ₃	3,86%
Fe ₂ O ₃	0,11%
FeO	0,54%
MgO	0,25
CaO	0,10%

Πίνακας 5.1: Μέση σύσταση ψαμμιτών τύπο Berea⁷⁵

Έχουν γίνει έρευνες-μελέτες, χρησιμοποιώντας ψαμμίτες τύπου Berea για τον προσδιορισμό της παραγωγής πετρελαίου τόσο σε πρωτογενές, δευτερογενές αλλά και τριτογενές επίπεδο. Βιβλιογραφικά τέτοιου τύπου ψαμμίτες έχουν πορώδες 10-25% και διαπερατότητα 50-400 mD κάτι που συμβάλλει στο να θεωρηθούν πέτρωμα ταμιευτήρα.⁷⁶

5.1.2 ΚΟΠΗ ΚΑΙ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Από μια μεγάλη μάζα ενός πετρώματος με τη βοήθεια μηχανήματος κόπηκε πυρήνας διαμέτρου 2,5 cm και μήκους 5,4 cm. Το μηχάνημα κοπής ψύχεται με κυκλοφορία νερού για να αποφευχθούν οι υψηλές θερμοκρασίες κατά την κοπή (Εικόνα 5.1)^{77, 78}



Εικόνα 5.1 Μηχάνημα κοπής πυρήνα συγκεκριμένης διαμέτρου και δεξιά το μηχάνημα κοπής πυρήνα συγκεκριμένου μήκους

Στη συνέχεια το δοκίμιο τοποθετήθηκε στο φούρνο όπου έμεινε τουλάχιστον για μια ημέρα. Μετά την ξήρανση του, το δοκίμιο ήταν έτοιμο για επεξεργασία. Αρχικά το δοκίμιο μόλις απομακρύνθηκε από το φούρνο ζυγίστηκε και καταγράφηκε η μάζα του, ως μάζα ξηρού δοκιμίου ($m_1=58,955\text{gr}$). Στη συνέχεια μετρήθηκαν το μήκος ($h=2,543\text{cm}$) αλλά και η

διάμετρος του ($d=5,420\text{cm}$) καθώς θα χρησιμοποιηθούν σε μεταγενέστερους υπολογισμούς. Οι μετρήσεις αυτές πάρθηκαν τρεις φορές προκειμένου να μειωθεί το σφάλμα και προσδιορίστηκε ο μέσος όρος τους.

5.2 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕ ΑΚΤΙΝΕΣ-Χ

Ο πρώτος που ανακάλυψε τις ακτίνες -Χ ήταν ο Roentgen⁷⁹ το 1895, ενώ στη συνέχεια το 1913 ο von Laue διατύπωσε τη θεωρία της περίθλασης των ακτινών-Χ και την ίδια χρονιά ο Moseley αναφέρθηκε στη συσχέτιση των γραμμών εκπομπής με τον ατομικό αριθμό. Λίγο αργότερα το 1916 ο Barkla εισήγαγε το φάσμα της εκπομπής των ακτινών -Χ και τέλος το 1967 ο Siegbahn παρουσίασε τη φωτοηλεκτρική φασματοσκοπία ακτινών -Χ.

ΘΕΩΡΙΑ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

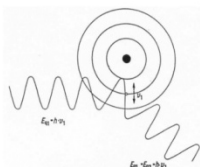
Οι ακτίνες Χ είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μικρό μήκος κύματος (από 0,1-100 Å) και στηρίζονται στην αλληλεπίδραση τους με τα ηλεκτρόνια των ατόμων των κρυστάλλων (περίθλαση των ακτινών-Χ), η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την σκέδαση των ακτινών -Χ (Εικόνα 5.2).⁸⁰ Με τον όρο σκέδαση αναφέρεται ο διασκορπισμός ακτινών, όταν εκείνες προσπέσουν σε μικροσκοπικά σωματίδια, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα τη διάχυση τους στον χώρο χωρίς όμως να είναι ορατές. Η απόδειξη της κυματικής μορφής τους έγινε από τον Μ.Β.ΛΑΥΕ με την ερμηνεία της περίθλασης των ακτινών πάνω στους κρυστάλλους. Κάποια βασικά χαρακτηριστικά των ακτινών-Χ είναι η υψηλή ικανότητα διείσδυσης στην ύλη και η ολική ανάκληση που συμβαίνει όταν οι ακτίνες-Χ προσπίπτουν πάνω σε ένα σώμα με αρκετά μεγάλη κλίση ως προς την επιφάνεια του.

Οι ακτίνες - Χ έχουν ένα περιεχόμενο ενέργειας το οποίο δίνεται από την εξίσωση $E = h * \nu$ (5.1.1), όπου

h καλείται σταθερά του Planck και ν συχνότητα,

όμως η ταχύτητα c δίνεται από τον εξής τύπο $c = \nu * \lambda$ (5.1.2)

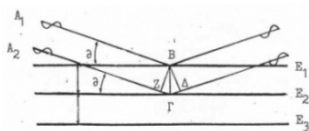
,όπου λ το μήκος κύματος



Εικόνα 5.2 Φαινόμενο σκέδασης ακτινών -Χ πάνω στο άτομο^{xxix}

Η θεωρία της περίθλασης των ακτίνων-Χ που μελέτησε ο M.V.LAUE αναλύθηκε με έναν απλούστερο τρόπο από τον W.L.BRAGG.⁸¹ Ο τελευταίος αναφέρθηκε στο ότι το φαινόμενο της περίθλασης των ακτίνων-Χ, είναι μια ανάκλαση ακτίνων καθώς εκείνες προσπίπτουν υπό συγκεκριμένη γωνία σε πλεγματικά επίπεδα του κρυστάλλου που απέχουν ίσες αποστάσεις (Εικόνα 5.3).

Το φαινόμενο της ανάκλασης ακτίνων-Χ παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.3 και αποδεικνύεται έτσι ο νόμος του Bragg⁸²:



Εικόνα 5.3 Ανάκλαση ακτίνων-Χ σύμφωνα με τον Bragg^{xxx}

Οι ακτίνες A_1 και A_2 προσπίπτουν υπό γωνία θ σε ισαπέχοντα και παράλληλα πλεγματικά επίπεδα E_1, E_2, E_3 . Όμως διαγράφουν μια διαφορά πορείας ίση με $Z\Gamma$ ΚΑΙ $\Gamma\Delta$, τα οποία είναι ίσα μεταξύ τους. Επειδή όμως το τρίγωνο ΓZB είναι ορθογώνιο ισχύει ο νόμος ημιτόνων και $Z\Gamma = B\Gamma * \sin \theta = d * \sin \theta$, όμως

$Z\Gamma + \Gamma\Delta = 2 * Z\Gamma \Rightarrow 2 * d * \sin \theta$, για να είναι σε φάση τα $Z\Gamma$ και $\Gamma\Delta$ πρέπει να είναι ίσο ή πολλαπλάσιο του μήκους κύματος ($n * \lambda$), έτσι αν μετρηθεί η διαφορά πορείας με μονάδα το λ τότε προκύπτει:

$$n * \lambda = 2 * d * \sin \theta \quad (5.1.3)$$

Η ορυκτολογική ανάλυση με χρήση ακτίνων-Χ έχει εφαρμογές σε μέταλλα και κράματα, πετρώματα, μέταλλα σε υγρά δείγματα και ρυπαντές στην ατμόσφαιρα. Σαν μέθοδος έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα πλεονεκτήματα είναι το γεγονός ότι αποτελεί μια μη καταστρεπτική μέθοδο, γρήγορη και δεν χρειάζεται μεγάλη κατεργασία το δείγμα. Τα μειονεκτήματα σχετίζονται κυρίως στη μικρή ευαισθησία της μεθόδου αλλά και στο υψηλό κόστος της μεθόδου.

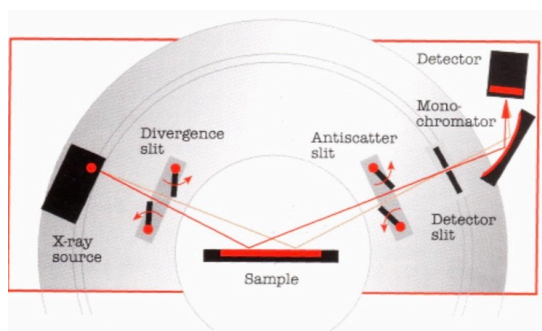
5.2.1 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ XRD (X-Ray Diffraction)

Τα βασικά μέρη του περιθλασιμέτρου είναι:

- η μονάδα παραγωγής υψηλής τάσης (μια γεννήτρια)
- η λυχνία ακτίνων-Χ (οι ακτίνες-Χ παράγονται σε σωλήνες υψηλού κενού)
- το γωνιόμετρο (βρίσκεται πάντα στο κέντρο ενός κύκλου που διαγράφει ακτίνες-Χ)
- ο απαριθμητής ακτίνων-Χ με τη μονάδα επεξεργασίας και καταγραφής κρούσεων

- η μονάδα μικροϋπολογιστή (αξιολογεί τα δεδομένα από την εξέταση του δείγματος).

Η ακτινοβολία που ανακλάται από το δείγμα, αφού έχει περάσει από διαφράγματα, καταλήγει στον ανιχνευτή όπου καταγράφεται από το ειδικό υπολογιστικό σύστημα. Το διάγραμμα περίθλασης ακτίνων-Χ δημιουργείται από την καταγραφή της γωνίας καθώς και του αριθμού των ακτίνων-Χ που ανιχνεύτηκαν στην συγκεκριμένη γωνία περίθλασης (Εικόνα 5.4).



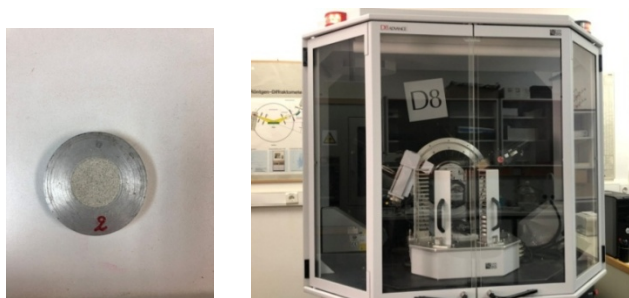
Εικόνα 5.4 Γεωμετρία περίθλασης ακτίνων-Χ^{xxxi}

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε 1 gr από το πέτρωμα σε μορφή σκόνης που εισάγεται σε ειδικό τμήμα του δειγματοφορέα. Η μετατροπή του δείγματος σε σκόνη γίνεται σε γουδί κατασκευασμένο από αχάτη όπως παρατίθεται στην Εικόνα 5.5:



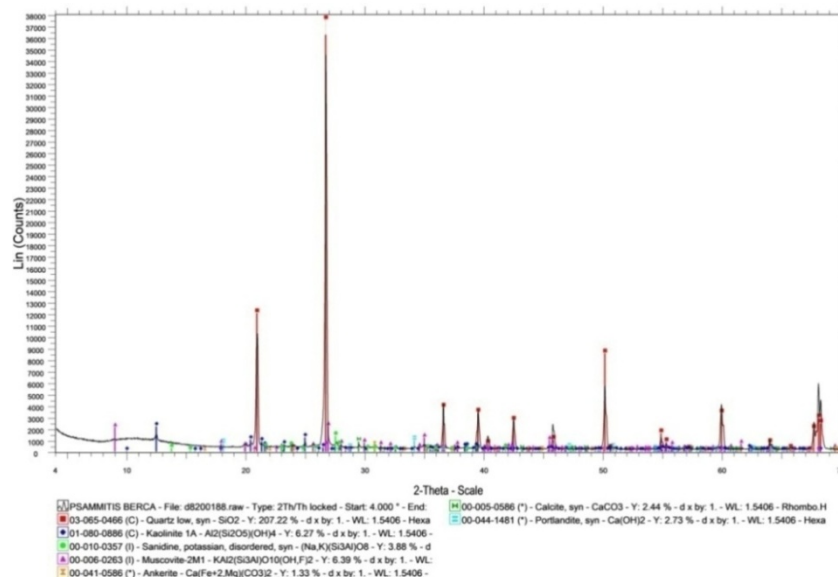
Εικόνα 5.5 Γουδί για κονιοποίηση του πετρώματος

Στη συνέχεια το λειοτριβημένο δείγμα τοποθετείται στο δειγματοφορέα του γωνιομέτρου όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.6 και έπειτα τοποθετείται στο περιθλασίμετρο ακτίνων -Χ για να αποδοθεί η ορυκτολογική καμπύλη από την οποία με βάση τα επιμέρους σήματα θα γίνει η ορυκτολογική ανάλυση του ψαμμίτη τύπου Berea.



Εικόνα 5.6 Εισαγωγή του λειοτριβημένου δείγματος στο δειγματοφορέα, δεξιά το μηχάνημα περιθλασιμετρίας ακτίνων -Χ (XRD)

Τα αποτελέσματα της μεθόδου XRD για το δείγμα παρουσιάζονται στο παρακάτω χρωματογράφημα:



Πίνακας 5.7 Ορυκτολογική ανάλυση του δείγματος με την μέθοδο XRD

Χαλαζίας	SiO ₂
Καολινίτης	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄
Άστριο-Σανιδίνο	(Na,K)(Si ₃ Al)O ₈
Μοσχοβίτης	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂
Ασβεστίτης	CaCO ₃
Ανκερίτης	Ca(Fe+2,Mg)(CO ₃) ₂
Πορτλανδίτης	Ca(OH) ₂

Πίνακας 5.2.1 Ορυκτολογική ανάλυση του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε

Τα συστατικά του ψαμμίτη τύπου Berea όπως προέκυψαν από την ορυκτολογική ανάλυση είναι τα εξής :

Χαλαζίας: Αποτελείται από πυρίτιο και οξυγόνο με συστάσεις 46,7% Si και 53,3% O₂ και ο χαλαζίας είναι το δεύτερο σε αφθονία ορυκτό στον πλανήτη. Το όνομα του το έχει πάρει από τη λέξη 'χάλαζα' καθώς το χρώμα του μοιάζει με το χαλάζι. Είναι μια καθαρή χημική ένωση με σταθερές φυσικές ιδιότητες και πολλές φορές μπορεί να βρίσκεται μαζί με ίχνη άλλων στοιχείων Mg, Fe, Al, Li, Ca, Na, K, Ti. Η πυκνότητα του είναι 2,65gr/cm³ και σκληρότητα 7 σύμφωνα με την κλίμακα Mohs. Γενικά έχει αρκετές χρήσεις καθώς βρίσκεται σαν πολύτιμος λίθος, στη βιομηχανία πορσελάνης, ως λειαντικό αλλά και για οικοδομικούς σκοπούς.

Ομάδα καολινίτη: Συναντάται με τη μορφή ντικίτη, νακρίτη και αλλοϋσίτη, έχει σκληρότητα 2-2,5 στην κλίμακα Mohs και πυκνότητα 2,68gr/cm³. Έχει εφαρμογές τόσο σε θέματα που σχετίζονται με την εδαφομηχανική, τη βιομηχανία αλλά και την κεραμική. Οι άργιλοι που αποτελούνται από καολινίτη δεν μπορούν να διογκωθούν καθώς δεν είναι δυνατή η διείσδυση είτε μεγάλων κατιόντων είτε νερού μεταξύ των κενών. Εμφανίζεται σε ιζηματογενείς αποθέσεις.

Άστριος-Σανίδινο: Αποτελούν την ομάδα ορυκτών που βρίσκονται σε μεγαλύτερη αφθονία στον στερεό φλοιό της Γης και συναντώνται σε ποσοστό 58%. Για να αναλυθεί η σύσταση των αστρίων χρησιμοποιείται ένα τρίγωνο όπου στις κορυφές του βρίσκονται το ορθόκλαστο, ο αλβίτης και ο ανορθίτης. Ένας άστριος χαρακτηρίζεται τόσο από την κρυσταλλική δομή αλλά και από τη χημική του σύσταση. Έτσι λοιπόν όταν η κρυστάλλωση γίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες εμφανίζεται μια μορφή αστρίων υψηλών θερμοκρασιών αυτή του σανιδίνου (KAlSi_3O_8). Το σανίδινο έχει σκληρότητα 6 στην κλίμακα Mohs και πυκνότητα $2,56\text{-}2,62\text{gr/cm}^3$. Το όνομα σανίδινο επιλέχθηκε από την αρχαία λέξη 'σανίδα', εμφανίζεται σε σχηματισμούς ρεολίθων.

Μοσχοβίτης: Είναι ορυκτό που ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των μαρμαρυγιών, με σκληρότητα 2,5-3 της κλίμακας Mohs και πυκνότητα $2,77\text{-}2,88\text{gr/cm}^3$. Το κατά πόσο αλλάζει η χημική του σύσταση εξαρτάται και από το γεωλογικό περιβάλλον από το οποίο προέρχεται. Χρησιμοποιείται για θερμικές και για ηλεκτρικές μονώσεις. Βρίσκεται σε όξινα πετρώματα.

Ασβεστίτης: Αποτελεί μια ευρύτερη ομάδα ορυκτών με κοινό παράγοντα την ανθρακική ρίζα (CO_3)²⁻. Έχει σκληρότητα 3 και πυκνότητα $2,715\text{gr/cm}^3$. Ο καθαρός ασβεστίτης αποτελείται από 44% CO_2 και 56% CaO . Εμφανίζεται σε ιζηματογενή πετρώματα κυρίως.

Ανκερίτης: Αποτελεί ορυκτό της ομάδας του δολομίτη μαζί με τον δολομίτη και τον κουτναχορίτη. Έχει πυκνότητα $2,93\text{-}3,10\text{gr/cm}^3$ και σκληρότητα σύμφωνα με την κλίμακα Mohs 3,5-4. Είναι προϊόν υδροθερμικών διαλυμάτων που βρίσκονται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ονομάστηκε έτσι από τον Αυστραλό M. Anker.

Πορτλανδίτης: είναι υδροξείδιο του ασβεστίου και αποτελεί κύριο συστατικό της υδραυλικής κονίας μαζί με τον λαρνίτη. Σχηματίζεται από ανθρακικό ασβέστιο, το οποίο έχει έξι διαφορετικές μορφές, μια άμορφη, δύο ένυδρες και τρεις άνυδρες.⁸³

Είναι γνωστό ότι τόσο ο μοσχοβίτης όσο και η ομάδα του καολινίτη ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των αργιλικών ορυκτών. Η ύπαρξη αργιλικών ορυκτών αποτελεί λοιπόν αιτία περιορισμού της διαπερατότητας των πετρωμάτων. Η άργιλλος μπορεί να συγκρατήσει μεγάλες ποσότητες νερού και να διογκωθεί. Γενικά δίνουν χαμηλή διαπερατότητα.⁸⁴

5.3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΠΟΡΩΝ (Mercury Intrusion Porosimetry)

Η ποροσιμετρία υδραργύρου είναι μια από τις σημαντικότερες τεχνικές ανάλυσης της μικροδομής, του προσδιορισμού της κατανομής μεγέθους πόρων και του πορώδους των υλικών. Ο υδράργυρος δεν διαβρέχει τα περισσότερα στερεά, με αποτέλεσμα να χρειάζεται υψηλή πίεση έτσι ώστε να επιτευχθεί η εισαγωγή του στους πόρους των πετρωμάτων. Υψηλότερη πίεση καταγράφεται κατά την εισπίεση του σε μικρότερης διαμέτρου πόρους.⁸⁵ Η συσχέτιση των τριχοειδών πιέσεων και των ακτινών των πόρων διατυπώθηκε από την ακόλουθη εξίσωση⁸⁶

$$P_c = \frac{2 * \sigma_{HgAir} * \cos(\theta)}{r} \Rightarrow$$
$$r = \frac{2 * \sigma_{HgAir} * \cos(\theta)}{P_c}, \quad (5.3.1)$$

P_c =πίεση που ασκείται κάθετα στη διατομή του σωλήνα

σ_{HgAir} =επιφανειακή τάση Hg-αέρα

θ = γωνία επαφής υδραργύρου-στερεού-αέρα

Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας τήξης του (-38,87 °C), ο Hg εμφανίζει πτητικότητα η οποία θεωρείται επιβλαβής για την ανθρώπινη υγεία. Λόγω λοιπόν των προβλημάτων που προκαλεί, έχουν θεσπιστεί από διάφορους οργανισμούς όρια ανωτάτης συγκέντρωσης του υδραργύρου στον χώρο, όπως είναι το Εθνικό Ινστιτούτο για την Επαγγελματική Ασφάλεια και Υγεία (NIOSH) αλλά και η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA). Έτσι λοιπόν έχει θεσπιστεί από την Αμερικανική Εταιρεία Κυβερνητικών Υγιειονολόγων Βιομηχανίας (HΠΑ) το κατώτατο όριο των 0,05 mgHg/m³ αέρα. Συνεπώς, τιμές σε οποιονδήποτε χώρο μεγαλύτερες του προηγούμενου ορίου δεν είναι αποδεκτές και μπορεί να προκαλέσουν πρόβλημα. Για να προστατευτεί ένας χώρος σωστά πρέπει να γίνεται σωστός εξαερισμός, σωστή διαχείριση των ρύπων, της σκόνης αλλά και των υδρατμών. Αυτό φροντίζεται με τακτικούς ελέγχους κάθε έξι μήνες προκειμένου να τηρούνται τα όρια που έχουν θεσπιστεί. Μπορεί ο υδράργυρος λοιπόν να έχει αρκετά αρνητικά όμως αποτελεί το κατάλληλο υγρό για το ποροσίμετρο για να ασκείται πίεση αφού δεν αντιδράει με τα περισσότερα υλικά. Με τη μέτρηση της ποσότητας υδραργύρου που εισέρχεται στους πόρους προσδιορίζονται αρκετές παράμετροι όπως το μέγεθος των πόρων, η επιφάνεια που καλύπτουν οι πόροι αλλά και η φαινόμενη πυκνότητα.

Με τη μέθοδο της κατανομής μεγέθους πόρων με χρήση ποροσιμετρίας υδραργύρου πραγματοποιείται μελέτη για το μέγεθος των πόρων, δηλαδή μελέτη της πορώδους δομής του σχηματισμού. Η ποροσιμετρία υδραργύρου στηρίζεται στην εισαγωγή υδραργύρου στους πόρους του δείγματος το οποίο είναι σε μικρά τεμάχια υπό καθορισμένες πιέσεις. Ο όγκος του υδραργύρου στο στέλεχος του πενετομέτρου μειώνεται καθώς αυξάνεται η

ποσότητα του υδραργύρου που εισέρχεται στους πόρους του δείγματος, αφού το άθροισμα των δύο όγκων παραμένει σταθερό. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι η μέθοδος είναι καταστροφική καθώς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά το δείγμα.

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο, ήταν τύπου Autopore IV 9500 από τη MICROMERITICS (Εικόνα 5.8). Στις Εικόνες 5.9 και 5.10 φαίνονται, το πενετόμετρο που είναι ο υποδοχέας του δείγματος και τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για τη στεγανοποίηση του.



Εικόνα 5.8 Ποροσίμετρο Autopore IV 9500 από τη MICROMERITICS



Εικόνα 5.9 Πενετόμετρο



Εικόνα 5.10 Ειδικό εξάρτημα για το σφράγισμα του πενετομέτρου.

Τα βήματα για τη χρήση του οργάνου όπως διατυπώνονται στο εγχειρίδιο λειτουργίας είναι τα εξής:

- i. Το προς μέτρηση δείγμα τοποθετείται για ξήρανση στους 105°C και στη συνέχεια σε ξηραντήρα μέχρι τη μέτρηση του.
- ii. Έπειτα ζυγίζεται το δείγμα και τοποθετείται στο πενετόμετρο.
- iii. Στεγανοποιείται το πενετόμετρο και ζυγίζεται εκ νέου μαζί με το δείγμα
- iiii. Πριν ξεκινήσει η διαδικασία της μέτρησης πραγματοποιείται εξαέρωση του δείγματος με αντλία κενού μέχρι $50\text{ }\mu\text{mHg}$.
- iv. Χρησιμοποιείται η περιοχή χαμηλής πίεσης (33rsia) όπου εισάγεται το πενετόμετρο με το δείγμα.
- v. Διεξάγεται ανάλυση χαμηλής πίεσης (0 Hg εισέρχεται στους πόρους του δοκιμίου).
- vi. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία εξέρχεται και ζυγίζεται ξανά το δείγμα μαζί με τον υδράργυρο.
- vii. Τοποθετείται το δείγμα στη περιοχή υψηλής πίεσης (33.000rsia), όπου επαναλαμβάνεται η μέτρηση.
- viii. Τέλος απομακρύνεται το πενετόμετρο από την περιοχή υψηλής πίεσης.⁸⁷

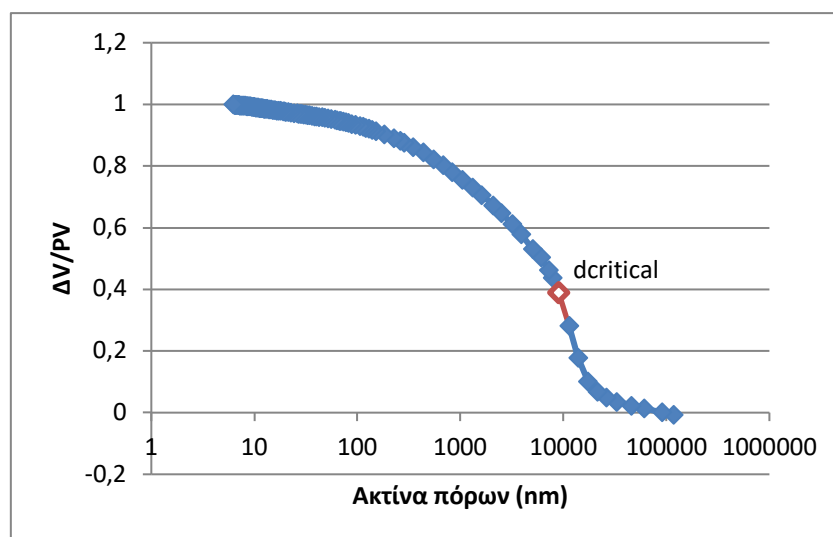
Μέσα από την ποροσιμετρία υδραργύρου μπορεί να προσδιορισθεί και η απόλυτη διαπερατότητα του δείγματος με τη μέθοδο Katz-Thomson⁸⁸.

5.3.1 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το τεμαχισμένο δείγμα ψαμμίτη τύπου Berea χρησιμοποιήθηκε για να προκύψει το τελικό γράφημα το οποίο στον x άξονα έχει τη διάμετρο των πόρων και στον y άξονα την αθροιστική μεταβολή του όγκου των πόρων που έχουν πληρωθεί από Hg ως προς τον ολικό όγκο των πόρων (PV) σε ποσοστά επί τοις εκατό.

Συνεπώς σύμφωνα με τα αποτελέσματα που έδωσε το όργανο δημιουργήθηκαν τα εξής διαγράμματα:

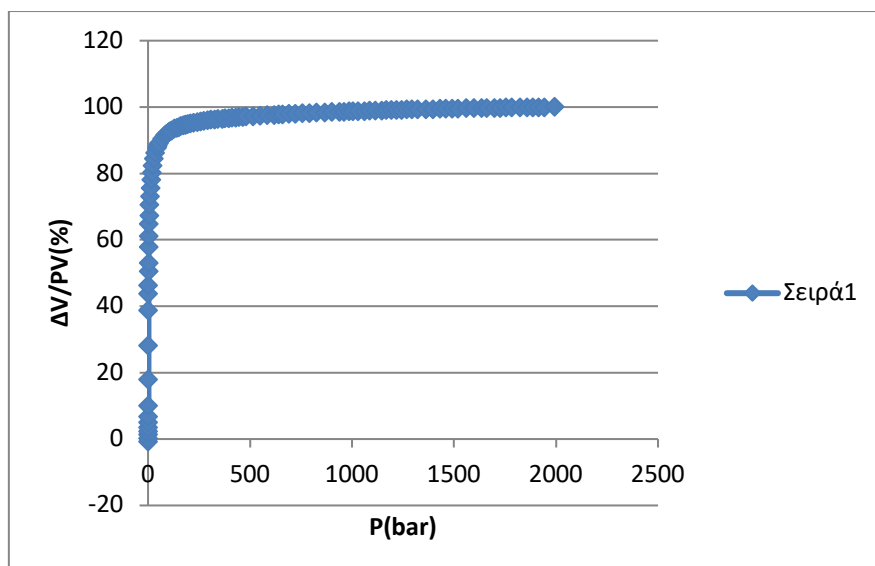
Συμπερασματικά : Από το γράφημα 5.11 προκύπτει ότι ακτίνα $>10\mu\text{m}$ έχει το 30% των πόρων ενώ πόροι $<10\mu\text{m}$ αποτελούν το 70% ($1\mu\text{m}=10^3\text{nm}$). Προκύπτει το εξής γράφημα:



Εικόνα 5.11 Γράφημα από το οποίο φαίνεται ότι ο Hg θα εισέλθει πρώτα στους μεγαλύτερους πόρους και έπειτα στους μικρότερους για το κονιοποιημένο δείγμα ψαμμίτη τύπου Berea.

Η κρίσιμη λοιπόν ακτίνα αποτελεί την ακτίνα εκείνη όπου η κλίση της καμπύλης γίνεται απότομη. Ο υδράργυρος, όσο αυξάνεται η πίεση εισέρχεται σε όλο και μικρότερους πόρους, μέχρι να φτάσει μια κρίσιμη πίεση όπου ο υδράργυρος εισχωρεί σε όλο το δείγμα. Το χώρο μέσα στον οποίο εκτείνεται ο υδράργυρος τον καλύπτουν πόροι με διάμετρο (L_c) ίση ή και μεγαλύτερη από εκείνη που προσδιορίζεται από την εξίσωση (5.3.1). Έτσι λοιπόν το L_c αποτελεί χαρακτηριστική παράμετρο για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας. Το σημείο αυτό καθορίζεται από την πίεση όπου εμφανίζεται απότομη αύξηση της κλίσης της αθροιστικής καμπύλης. Από τους Katz-Thomson⁸⁹ λοιπόν προσδιορίζεται το σημείο της κλίσης όπου ο υδράργυρος επεκτείνεται στο δείγμα και ξεκινάει η διαδικασία της απορρόφησης. Η πίεση σε αυτό το σημείο καλείται $P_{\text{threshold}}$. Έτσι λοιπόν η διάμετρος L_c αποτελεί τη διάμετρο που προκύπτει από την εξίσωση Washburn για τη $P_{\text{threshold}}$.

Το όργανο μπορεί να προσδιορίσει διάφορες παραμέτρους όπως τον ολικό όγκο των πόρων $=0,089\text{ml/gr}$, το πορώδες $=18,3154\%$, την συνολική πυκνότητα στην πίεση που χρειάζεται για να πληρούνται οι πόροι $=2,0374\text{g/ml}$, τη μέση διάμετρο των πόρων $=262,5\text{nm}$, αλλά και τη διαπερατότητα $=16,1858\text{mD}$. Είναι γνωστό για το σύστημα υδράργυρος-αέρα-πέτρωμα ισχύει ότι ο σ (επιφανειακή τάση) $=485\text{dynes/cm}$, αλλά και η γωνία επαφής $=135^\circ$ - 145°C .



Εικόνα 5.12 Συσχέτιση αθροιστικής κατανομής εισερχόμενων όγκων με πιέσεις

5.4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΚΑΙ ΜΗ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΙΜΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΕ ΝΕΡΟ (s_{wc})

5.4.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ

Για τη μέτρηση του πορώδους δεν χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του ποροσιμέτρου τύπου Boyle που έχει ως βάση της τη χρήση αερίου, αλλά το ισοζύγιο μάζας, που στηρίζεται σε κορεσμό του δείγματος σε νερό.

Αναλυτικότερα για να προσδιοριστεί το πορώδες εφαρμόστηκαν τα εξής βήματα:

ΒΗΜΑ 1 : Προσδιορίστηκαν οι διαστάσεις του δοκιμίου (διάμετρος μια ίντσα, μήκος 5 cm) και η μάζα ξηρού δείγματος m_1

ΒΗΜΑ 2: Εισήχθη το δοκίμιο στον δειγματοφορέα-υποδοχέα Hassler (Εικόνα 5.13)

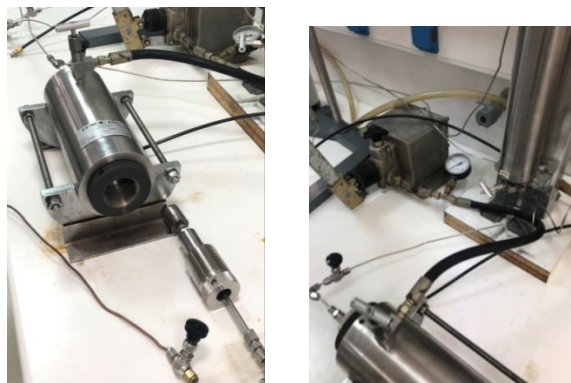
ΒΗΜΑ 3: Εφαρμόστηκε πίεση υπερκειμένων εισπιέζοντας υδραυλικό λάδι με ειδική συσκευή όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.13. Στον υποδοχέα Hassler μπορεί να ασκηθεί εξωτερική εγκάρσια ακτινωτή πίεση (πίεση υπερκειμένων), προκειμένου οι συνθήκες εντός του να μοιάζουν με συνθήκες ροής σε έναν υπόγειο ταμιευτήρα. Ρυπ.=100 bar

ΒΗΜΑ 4: Εφαρμόστηκε κενό

ΒΗΜΑ 5 : Εισπιάστηκε νερό από την αντλία μέχρι κορεσμού του δοκιμίου

ΒΗΜΑ 6 : Ζυγίστηκε η μεμβράνη, η οποία περιέβαλλε τον πυρήνα, η χρήση της μεμβράνης είναι απαραίτητη όταν το δοκίμιο οδηγείται προς ζύγιση, έτσι ώστε να μην εξατμίζονται ποσότητες από το ρευστό και να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια ζύγισης.

ΒΗΜΑ 7 : Απομακρύνθηκε το δοκίμιο και ζυγίστηκε μαζί με τη μεμβράνη (m_2)



Εικόνα 5.13 Αριστερά βρίσκεται ο δειγματοφορέας και δεξιά η συσκευή πίεσης υπερκειμένων

Από τα αποτελέσματα του πειράματος προσδιορίστηκε το πορώδες από τους εξής τύπους⁹⁰:

$$\text{Συνολικός όγκος δοκιμίου} : BV = \frac{\pi * d^2 * h}{4} \quad (5.4.1)$$

$$\text{Όγκος πόρων δοκιμίου: } PV = \frac{m_2 - m_1}{\rho_w} \quad (5.4.2)$$

$$\text{Πορώδες: } \varphi = \frac{PV}{BV} \quad (5.4.3)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η πυκνότητα του νερού προφανώς αναφέρεται στη θερμοκρασία που επικρατούσε στο εργαστήριο την ώρα των μετρήσεων (30-32°C). Έτσι λοιπόν για να είναι πιο ακριβείς οι μετρήσεις, παρακάτω παρουσιάζεται ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε και συσχετίζει την πυκνότητα και τη θερμοκρασία ⁹¹

$$\left\{ \rho_{(\theta)} = 1,0000600 + 3,152 * 10^{-5} * (\theta) - 6,734 * 10^{-6} * (\theta)^2 + 2,616 * 10^{-8} * (\theta)^3 \Rightarrow \right. \\ \left. \rho_{(\theta)} = 0,9956 \frac{gr}{cm^3} \text{ για το νερό } \right\}$$

1^η ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Για τον ψαμμίτη τύπου Berea στον οποίο έχουν εφαρμοστεί τα παραπάνω βήματα, μετρήθηκαν οι διαστάσεις του τρεις φορές για να αποφευχθούν σφάλματα όπως φαίνεται στον πίνακα 5.4.1.

ΜΗΚΟΣ h (mm)	(cm)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ d (mm)	(cm)
54,19	5,419	25,45	2,545
54,26	5,426	25,42	2,542
54,16	5,416	25,41	2,541
Μ.Ο	5,420	Μ.Ο	2,543

Πίνακας 5.4.1 Διαστάσεις δοκιμίου

- Σύμφωνα με τη σχέση 5.4.1 υπολογίστηκε ο ολικός όγκος του δοκιμίου:

$$BV = 27,528 \text{ cm}^3$$

Στη συνέχεια από την ζύγιση του δοκιμίου το οποίο είχε προηγουμένως κοπεί και ξηρανθεί προέκυψαν οι εξής τιμές :

Μάζα ξηρού δοκιμίου m ₁ (gr)	59,022
Μάζα δοκιμίου +μεμβράνη (gr)	64,969
Μάζα μεμβράνης (gr)	0,748
Μάζα δοκιμίου πληρωμένου 100% με νερό m ₂ (gr)	64,220

Πίνακας 5.4.2 Αποτελέσματα ζύγισης δοκιμίου

Από τον πίνακα 5.4.2 και σύμφωνα με τις σχέσεις (5.4.2) και (5.4.3) προσδιορίσθηκε:

- ο όγκος των πόρων PV = 5,198 cm³
- το πορώδες φ = 18,9% ± 0,1

2^η ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΙΔΙΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ

Επαναλήφθηκε η ίδια διαδικασία μετρήσεων για μήκος=5,430cm και διάμετρο=2,544cm, για να αποφευχθούν τυχόν σφάλματα.

- Επιπλέον προσδιορίστηκε και ο συνολικός όγκος των πόρων από τη σχέση (5.4.1):

$$BV=27,60\text{cm}^3$$

Μετά την ξήρανση το δοκίμιο ζυγίστηκε εκ νέου:

Μάζα ξηρού δοκιμίου m_1 (gr)	58,955
Μάζα μεμβράνης (gr)	0,325
Μάζα δοκιμίου πληρωμένου 100% με νερό (gr)	64,426
Τελική μάζα δοκιμίου m_2 (gr)	$64,426-0,325=64,101$

Πίνακας 5.4.3 Αποτελέσματα ζύγισης δοκιμίου

- Προσδιορίστηκε ο όγκος των πόρων από τη σχέση (5.4.2):

$$PV=5,1979\text{cm}^3$$

- Το πορώδες σύμφωνα με τη σχέση (5.4.3) προκύπτει ότι:

$\phi=18,8\%\pm 0,1$, τα αποτελέσματα των δύο μετρήσεων αποδεικνύουν επαναληψιμότητα με αποτέλεσμα η μέτρηση να θεωρείται αξιόπιστη.

Εάν θεωρηθεί ως πραγματική τιμή η μέτρηση του πορώδους σύμφωνα με την ποροσιμετρία υδραργύρου (καθώς θεωρείται πιο αξιόπιστη) (18,3%) και μετρούμενη η τιμή του δεύτερου προσδιορισμού με τη μέθοδο του κορεσμού με νερό (18,8%) το % σφάλμα είναι :

$$\left[\frac{18,8-18,3}{18,3} \right] * 100 = 2,73\%.$$

5.4.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΙΜΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΕ ΝΕΡΟ (s_{wc})

Αφού πραγματοποιήθηκαν τα βήματα 1-7 (υποκεφάλαιο 5.4.1), έγιναν τα βήματα (8-12) που αναλύονται κατωτέρω. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εκτόπισης νερού με εξάνιο στο δοκίμιο που ήταν κορεσμένο 100% σε νερό μέχρι τον μη περαιτέρω απομακρύνσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό (s_{wc}).

Αναλυτικότερα:

ΒΗΜΑ 8: Επανατοποθετήθηκε το δοκίμιο στο δειγματοφόρο

ΒΗΜΑ 9: Εφαρμόστηκε πίεση υπερκειμένων Ρυπ.=100 bar

ΒΗΜΑ 10: Εισπιάστηκε εξάνιο στο δοκίμιο με αντλία

ΒΗΜΑ 11: Ζυγίστηκε η μεμβράνη η οποία περιβάλλει τον πυρήνα

ΒΗΜΑ 12: Απομακρύνθηκε το δοκίμιο και ζυγίστηκε μαζί με τη μεμβράνη (m_3)

Όταν κατά την εκτόπιση νερού από εξάνιο η ποσότητα που εξέρχεται από τον δειγματοφορέα περιέχει μόνο εξάνιο, τότε έχει επιτευχθεί το σημείο του μη περαιτέρω απομακρύνσιμου βαθμού κορεσμού σε νερό. Παρακάτω δίνονται οι τύποι⁹² μέσω των οποίων προσδιορίζεται ο βαθμός κορεσμού σε εξάνιο κατά την εκτόπιση νερού και ο μη περαιτέρω απομακρύνσιμος βαθμός κορεσμού σε νερό. (Όπου ο όρος s_{oil} αναφέρεται στον βαθμό κορεσμού σε εξάνιο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις στο εργαστήριο.)

$$s_{oil} = \frac{m_2 - m_3}{PV * (\rho_w - \rho_o)} \quad (5.4.4)$$

$$s_{wc} = 1 - s_{oil} \quad (5.4.5)$$

Για να βρεθεί ο εκάστοτε βαθμός κορεσμού χρησιμοποιήθηκε και το ισοζύγιο μάζας και σύμφωνα με αυτό προσδιορίστηκε πάλι ο μη περαιτέρω απομακρύνσιμος βαθμός κορεσμού σε νερό.

Ισοζύγιο μάζας⁹³:

$$\begin{aligned} m_3 &= m_{\xi\eta\rho\acute{o}\upsilon} + m_w + m_o \Rightarrow \\ m_3 &= m_{\xi\eta\rho\acute{o}\upsilon} + \rho_w * V_w + \rho_o * V_o \Rightarrow \\ m_3 &= m_{\xi\eta\rho\acute{o}\upsilon} + \rho_w * PV * s_{wc} + \rho_o * PV * s_o \Rightarrow \\ m_3 &= m_{\xi\eta\rho\acute{o}\upsilon} + \rho_w * PV * s_{wc} + \rho_o * PV * (1 - s_{wc}) \Rightarrow \\ m_3 &= m_{\xi\eta\rho\acute{o}\upsilon} + \rho_w * PV * s_{wc} + \rho_o * PV - \rho_o * PV * s_{wc} \Rightarrow \\ m_3 &= m_{\xi\eta\rho\acute{o}\upsilon} + s_{wc} * (\rho_w * PV - \rho_o * PV) + \rho_o * PV \Rightarrow \\ s_{wc} &= \frac{m_3 - m_{\xi\eta\rho\acute{o}\upsilon} - \rho_o * PV}{PV * (\rho_w - \rho_o)} \quad (5.4.6) \end{aligned}$$

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω προέκυψε η πυκνότητα του εξανίου για $\theta=30-32^\circ\text{C}$:

$$\left\{ \rho_{(\theta)} = 0,6769 - 8,486 * 10^{-4} * (\theta) - 1,084 * 10^{-6} * (\theta)^2 + 1,64 * 10^{-10} * (\theta)^3 \Rightarrow \right.$$

$$\left. \rho_{(\theta)} = 0,6504 \frac{gr}{cm^3} \text{ για το εξάνιο } \right\}$$

Γενικά είναι γνωστό ότι στους 25°C η $\rho_o = 0,672 \frac{gr}{cm^3}$

1^η ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ s_{wc}

Στην πρώτη ακολουθία μετρήσεων καταγράφηκαν και οι παροχές των δύο ρευστών που εισπιάστηκαν. Κατά την εισαγωγή του δοκιμίου στο δειγματολήπτη έγινε κορεσμός με νερό εισπιάζοντας νερό με παροχή 5 ml/min και εξάνιο 10 ml/min μέχρι την επίτευξη του σημείου μη περαιτέρω απομακρύνσιμου βαθμού κορεσμού σε νερό. Τέλος το δοκίμιο με τη μεμβράνη ζυγίστηκε ξανά.

Μάζα ξηρού δοκιμίου m_1 (gr)	59,022
Μάζα δοκιμίου πληρωμένου 100% σε νερό= m_2 (gr)	64,220
Μάζα μεμβράνης (gr)	0,751
Μάζα (δοκιμίου + μεμβράνη)(gr)	63,800
Μάζα@ $s_{wc}=m_3$ (gr)	63,800-0,751=63,049

Πίνακας 5.4.4 Αποτελέσματα ζύγισης δοκιμίου για την εύρεση του σημείου s_{wc}

Σύμφωνα λοιπόν με τις εξισώσεις (5.4.4) και (5.4.5) προκύπτουν τα εξής:

$$s_{oil} = \frac{64,220 - 63,049}{5,1983 * (0,99 - 0,65)} = \frac{1,171}{1,7674} = 0,662 = 66,2 \pm 0,1\%$$

$$s_{wc1} = 1 - s_{oil},$$

$$= 1 - 0,662 = 0,338 = 33,8 \pm 0,1\%$$

Επίσης γνωρίζοντας ότι ο όγκος των πόρων είναι 5,1983 cm³ και σύμφωνα με τη σχέση (5.4.6) προέκυψε ότι :

$$s_{wc2} = \frac{63,049 - 59,022 - (5,1983 * 0,65)}{5,1983 * (0,99 - 0,65)} = \frac{0,648}{1,7674} = 0,366 = 36,6 \pm 0,1\%$$

Τα αποτελεσμάτων των δύο τύπων θα έπρεπε να ταυτίζονται, συνεπώς η διαφορά οφείλεται σε πειραματικό σφάλμα καθώς ο χρόνος αναμονής για επίτευξη του σημείου s_{wc} δεν ήταν αρκετός.

2^η ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΙΔΙΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ s_{wc}

Επαναλήφθηκε η ίδια διαδικασία μετρήσεων για τον έλεγχο των μετρήσεων.

Στη δεύτερη ακολουθία μετρήσεων εισπιάστηκε πάλι εξάνιο στο δειγματοφορέα (m_3) προκειμένου να φτάσει ο κορεσμός σε νερό στο σημείο s_{wc} με παροχή εξανίου 10 ml/min. Χρησιμοποιήθηκε και εδώ μεμβράνη για να μην υπάρχουν απώλειες ρευστού. Προσδιορίστηκε για το ίδιο δοκίμιο τρεις φορές το σημείο s_{wc} όπως φαίνεται στον πίνακα 5.4.5.

	s_{wc1}	s_{wc2}	s_{wc3}
Μάζα μεμβράνης (gr)	0,325	0,325	0,311
Μάζα δοκιμίου+μεμβράνη (gr)	62,961	63,101	63,071
Μάζα@ $s_{wc}=m_3$ (gr)	62,962-0,325=62,637	63,101-0,325=62,776	63,071-0,311=62,759
Μάζα ξηρού δείγματος (gr)	58,955	58,955	58,955

Μάζα δοκιμίου	100%	64,101	64,101	64,101
κορεσμένου σε νερό m_2				

Πίνακας 5.4.5 Αποτελέσματα ζύγισης δοκιμίου για την εύρεση του σημείου s_{wc}

Σύμφωνα με πίνακα 5.4.5 και τις σχέσεις (5.4.4) και (5.4.5) με όγκο πόρων= 5,1979 cm^3 προσδιορίσθηκε πρώτη φορά το σημείο s_{wc} :

- $s_{oil(1)} = 0,828, s_{wc1} = 0,171$
- $s_{oil(2)} = 0,7496, s_{wc2} = 0,250$
- $s_{oil(3)} = 0,7592, s_{wc3} = 0,240$

Με χρήση του τύπου 5.4.6 προσδιορίστηκε δεύτερη φορά το σημείο s_{wc} :

$$s_{wc1} = \frac{62,637 - 58,955 - (5,1979 * 0,65)}{(5,1979 * (0,99 - 0,65))} = \frac{0,303}{1,7673} = 0,171$$

$$s_{wc2} = \frac{62,776 - 58,955 - (5,1979 * 0,65)}{(5,1979 * (0,99 - 0,65))} = \frac{0,442}{1,7673} = 0,250$$

$$s_{wc3} = \frac{62,759 - 58,955 - (5,1979 * 0,65)}{(5,1979 * (0,99 - 0,65))} = \frac{0,425}{1,7673} = 0,240$$

Για το υποκεφάλαιο 5.7.1 θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα (ένας μέσος όρος των τριών μετρήσεων s_{wc}) της δεύτερης μέτρησης καθώς ο χρόνος αναμονής των μετρήσεων ήταν μεγαλύτερος και η διαδικασία επαναλήφθηκε αρκετές φορές για αποφυγή σφαλμάτων στο ίδιο δοκίμιο. Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν πιο αξιόπιστα από ότι στην πρώτη μέτρηση. Έτσι ο μέσος όρος από τις μετρήσεις του σημείου s_{wc} υπολογίστηκε:

$$s_{wc} = 22,1 \pm 0,1\%$$

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι από τον μη περαιτέρω απομακρύνσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό, μπορεί να αποδοθεί ένας χαρακτηρισμός διαβροχής του δοκιμίου. Η τιμή που προκύπτει από τη σχέση 5.4.6 δείχνει ότι το δοκίμιο είναι μάλλον ενδιάμεσης διαβροχής.⁹⁴

5.4.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΕ ΕΞΑΝΙΟ

Κατόπιν ακολούθησε ο προσδιορισμός (στο δοκίμιο με $s_{wc} = 22,1\%$), του υπολειμματικού βαθμού κορεσμού σε εξάνιο. Το δοκίμιο τοποθετήθηκε στον δειγματοφορέα και εισπιάστηκε εξάνιο μέχρι 100% κορεσμού του πυρήνα. Η παροχή εξανίου ήταν 5ml/min, (εμπειρικά είναι γνωστό ότι εάν περαστούν 10*PV ο κορεσμός έχει επιτευχθεί) και έπειτα έγινε εισπίαση νερού με παροχή 10 ml/min μέχρι τον υπολειμματικό βαθμό κορεσμού σε εξάνιο (s_{orw}). Στη συνέχεια το δοκίμιο απομακρύνθηκε και ζυγίστηκε μαζί με τη μεμβράνη.

Προσδιορίστηκαν τα εξής:

Μάζα μεμβράνης(gr)	0,3250
Μάζα (δοκιμίου+μεμβράνη)(gr)	63,730
Μάζα@s _{or} (gr)	63,405

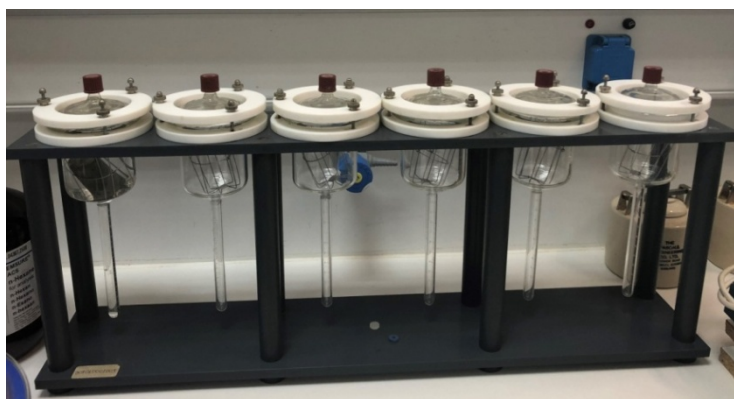
Πίνακας 5.4.6 Αποτελέσματα ζύγισης δοκιμίου για εύρεση του σημείου s_{or}

$$s_{orw} = \frac{m_{τελική} - m_{ξηρού} - (PV * \rho_o)}{PV * (\rho_w - \rho_o)}, \quad (5.4.7)$$

$$= \frac{63,405 - 58,955 - (5,1979 * 0,65)}{5,1979 * (0,99 - 0,65)} = \frac{1,071}{1,7673} = 0,606 = 60,6 \pm 0,1\%$$

5.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΕΧΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ Amott

Η μελέτη της διαβροχής έγινε από τον Amott⁹⁵ το 1959. Η αρχή της μεθόδου στηρίζεται στην απορρόφηση της διαβρέχουσας φάσης ενώ εκτοπίζεται η μη διαβρέχουσα. Για τον προσδιορισμό της διαβροχής χρησιμοποιούνται, ο δειγματοφορέας (Εικόνα 5.13) και η συσκευή Amott (Εικόνα 5.14). Η συσκευή Amott που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από έξι κελιά αυθόρμητης απορρόφησης ωστόσο στη συγκεκριμένη μελέτη το δοκίμιο θα εμβαπτιστεί σε δύο από αυτά, το ένα κελί θα πληρωθεί με νερό και το δεύτερο με εξάνιο.



Εικόνα 5.14 Συσκευή προσδιορισμού της διαβροχής του πετρώματος (Amott-Harvey Method)

Μια τροποποίηση της μεθόδου Amott είναι η Amott-Harvey⁹⁶ η οποία αναλύθηκε το 1989 από τους Moreno και Moreno και διαφέρει με την Amott στον τρόπο που γίνεται η εξαναγκασμένη εκτόπιση. Στην τροποποιημένη μορφή χρησιμοποιείται ο υποδοχέας-Hassler ενώ στην Amott είναι φυγοκεντρικής.

Τα βήματα για το χαρακτηρισμό της διαβροχής όπως έχουν παρουσιασθεί από τη βιβλιογραφία αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω^{97, 98}. Κάθε βήμα αναφέρεται σε αντίστοιχη καμπύλη της Εικόνας 5.16:

ΒΗΜΑ 1 : Ξήρανση του δοκιμίου σε φούρνο για τουλάχιστον 24 ώρες.

ΒΗΜΑ2:Εισαγωγή του δοκιμίου στο δειγματοφορέα -υποδοχέα Hassler που χρησιμοποιήθηκε και για τον προσδιορισμό του πορώδους και για επίτευξη 100% κορεσμού σε νερό. (Σημείο 1)

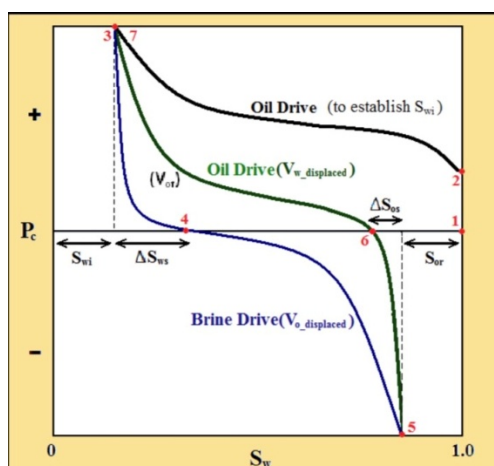
ΒΗΜΑ 3:Εισπίεση εξανίου στο δειγματοφορέα μέχρι τον μη περαιτέρω απομακρύνσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό (s_{wc}). (Καμπύλες 1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 3)

ΒΗΜΑ 4: Το δοκίμιο εξέρχεται του δειγματοφορέα και εισάγεται στο κελί αυθόρμητης απορρόφησης όπου είναι πληρωμένο με νερό και ουσιαστικά γίνεται εκτόπιση εξανίου από νερό V_{wsp} . Εδώ καταγράφονται ο όγκος του εξανίου που έχει εκτοπισθεί αυθόρμητα και η μάζα του δοκιμίου μετά την έξοδο από τη συσκευή Amott. (Σημείο 3 \rightarrow 4)

ΒΗΜΑ 5 : Το δοκίμιο εξέρχεται της συσκευής Amott και εισέρχεται στο δειγματοφορέα. Γίνεται εισπίεση νερού μέχρι τον υπολειμματικό βαθμό κορεσμού σε εξάνιο (s_{or}). Μετράται ο όγκος εξανίου που απομακρύνεται εξαναγκασμένα V_{wfd} . (Σημείο 4 \rightarrow 5)

ΒΗΜΑ 6: Έπειτα το δοκίμιο εισάγεται εντός του κελιού αυθόρμητης απορρόφησης που είναι πληρωμένο με εξάνιο με στόχο να εισέλθει όσο περισσότερο εξάνιο είναι εφικτό χωρίς κάποιον εξαναγκασμό V_{osp} , μετράται ο όγκος νερού που εξέρχεται αυθόρμητα. (Σημείο 6)

ΒΗΜΑ 7 : Έπειτα το δοκίμιο εισέρχεται ξανά στο δειγματοφορέα και τώρα γίνεται εξαναγκασμένη εισπίεση εξανίου και καταγράφεται ο όγκος νερού που τώρα εξέρχεται εξαναγκασμένα V_{ofd} . (Καμπύλη από το σημείο 6 \rightarrow 7)



Εικόνα 5.16 Διάγραμμα πειραματικής διαδικασίας για το περιεχόμενο Amott^{xxii}

Έτσι προσδιορίζεται ο δείκτης εκτόπισης εξανίου: $\delta_o = \frac{V_{wsp}}{V_{wsp} + V_{wfd}}$, (5.5.1) και

ο δείκτης εκτόπισης νερού: $\delta_w = \frac{V_{osp}}{V_{osp} + V_{ofd}}$ (5.5.2)

Τέλος προκύπτει ο δείκτης Amott: $I = \delta_w - \delta_o$ (5.5.3)

- Το αποτέλεσμα μπορεί να ποικίλει από (+1 έως -1).

Γενικά όμως για ένα υδατοδιαβρεχτό δοκίμιο μπορεί να πάρει τιμές από $0.3 \leq I \leq 1$, ενδιάμεση διαβροχή $-0.3 < I < 0.3$ και τέλος πετρελαιοδιαβρεχτό $-1 \leq I \leq -0.3$.⁹⁹

5.5.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ ΑΜΟΤΤ ΓΙΑ ΥΔΑΤΟΔΙΑΒΡΕΧΤΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ

Ο προσδιορισμός της διαβροχής πραγματοποιήθηκε δύο φορές για τον υδατοδιαβρεχτό και μια για τον πετρελαιοδιαβρεχτό σχηματισμό. Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα μόνο για την υδατοδιαβρεχτή περίπτωση. Το δοκίμιο πριν χρησιμοποιηθεί έχει φτάσει στους επιθυμητούς βαθμούς κορεσμού όπως προσδιορίστηκε στις παραγράφους 5.4.2 και 5.4.3

1^{ος} ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΑΜΟΤΤ

Να αναφερθεί ότι για τον πρώτο προσδιορισμό της διαβροχής, στο δοκίμιο που μελετήθηκε είχε πραγματοποιηθεί η μέτρηση των σχετικών διαπερατοτήτων προηγουμένως.

Σύμφωνα λοιπόν με τα βήματα που αναλύθηκαν στο υποκεφάλαιο (5.5.1), προέκυψαν τα εξής :



Εικόνα 5.17 Αριστερά η πρώτη φάση του πειράματος Amott για τον προσδιορισμό του περιεχομένου σε εξάνιο και δεξιά η δεύτερη φάση του πειράματος για τον προσδιορισμό του περιεχομένου σε νερό

$V_{wsp}=0,1$ ml $V_{wfd}=3$ ml, (V_{wsp} =όγκος νερού που απορροφάται αυθόρμητα, V_{wfd} =όγκος νερού που απορροφάται εξαναγκασμένα)

$$\delta_o = \frac{V_{wsp}}{V_{wsp} + V_{wfd}},$$

$$= \frac{0,1}{3,1} = 0,032$$

Έπειτα προέκυψαν:

$V_{osp}=0,9$ ml, $V_{ofd}=0,25$ ml, (V_{osp} =όγκος εξανίου που απορροφάται αυθόρμητα, V_{ofd} =όγκος εξανίου που απορροφάται εξαναγκασμένα)

$$\delta_w = \frac{V_{osp}}{V_{osp} + V_{ofd}},$$

$$= \frac{0,9}{1,15} = 0,783$$

Έτσι λοιπόν ο δείκτης Amott προκύπτει ως εξής :

$$I = \delta_w - \delta_o,$$

$$= 0,783 - 0,032 = 0,75$$

Συνεπώς ο ψαμμίτης τύπου Berea θεωρείται υδατοδιαβρεχτός αφού ο δείκτης $I=0,75$ βρίσκεται εντός του ορίου της υδατοδιαβρεχτής περίπτωσης.

ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΑΜΟΤΤΓΙΑ ΝΕΟ ΔΟΚΙΜΙΟ

Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε για λόγους ακρίβειας των μετρήσεων και σε δεύτερο δοκίμιο(ψαμμίτης τύπου Berea) στο οποίο δεν είχαν μετρηθεί προηγουμένως οι σχετικές διαπερατότητες.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

$V_{wfd}=1,5$ ml, $V_{wsp}=0,1$ ml

$$\delta_o = \frac{V_{wsp}}{V_{wsp} + V_{wfd}}, \quad (5.5.4)$$

$$= \frac{0,1}{1,6} = 0,062$$

Έπειτα $V_{osp}=0,5$ ml, $V_{ofd}=0,1$ ml

$$\delta_w = \frac{V_{osp}}{V_{osp} + V_{ofd}}, \quad (5.5.5)$$

$$= \frac{0,5}{0,60} = 0,833$$

$$I = \delta_w - \delta_o, \quad (5.5.6)$$

$$= 0,833 - 0,062 = 0,77$$

Συμπερασματικά λοιπόν παρατηρείται ότι για τα δύο δοκίμια, οι δείκτες Αμottδίνουν παραπλήσιες τιμές.

5.6 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ KLINKENBERG

5.6.1 ΘΕΩΡΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ KLINKENBERG

Ο Klinkenberg¹⁰⁰ (1941) μελέτησε την επίδραση τόσο της πίεσης όσο και των διαφορετικών αερίων που χρησιμοποιούνται, στον προσδιορισμό της διαπερατότητας. Όταν η πίεση δεν είναι αρκετά υψηλότερη από την ατμοσφαιρική, μεταξύ των μορίων του ρευστού οι αποστάσεις είναι μεγάλες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα μόρια να γλιστρούν εύκολα μεταξύ των πόρων χωρίς ιδιαίτερα υψηλές απώλειες ενέργειας λόγω τριβής και να εμφανίζεται υψηλότερη διαπερατότητα απ' ό,τι εάν εφαρμόζοταν υψηλότερη πίεση. Από την άλλη σε υψηλές πιέσεις, τα μόρια των αερίων πλησιάζουν αρκετά το ένα το άλλο και προσομοιάζουν συμπεριφορά υγρού. Η διαπερατότητα τους σε αυτή την περίπτωση πλησιάζει την οριακή τιμή της διαπερατότητας Klinkenberg. Για αυτό και η διαπερατότητα Klinkenberg μπορεί να συγκριθεί με τη διαπερατότητα του πετρώματος εάν στους πόρους του έρρει υγρό. Στα πετρώματα ταμιευτήρων η ροή των ρευστών βρίσκεται κάτω από υψηλές πιέσεις, για αυτό και η οριακή διαπερατότητα Klinkenberg βρίσκει περισσότερες πρακτικές εφαρμογές από ότι η διαπερατότητα σε αέρα.¹⁰¹

Πιο αναλυτικά η σχέση που μετατρέπει την διαπερατότητα του αέρα που μετράται στο εργαστήριο, σε διαπερατότητα Klinkenberg είναι η εξής:

$$k_L = \frac{k_a}{1 + \frac{2 * b}{p_1 + p_2}} \quad (5.6.1), \text{ όπου}$$

b: αποτελεί σταθερά για το αέριο αναλόγως τον τύπο του πετρώματος και εξαρτάται από τη γεωμετρία των πόρων¹⁰², k_a : διαπερατότητα του αέρα, p_2 : ατμοσφαιρική πίεση, p_1 : πίεση στην έξοδο.

Καθώς ο αέρας είναι ένα συμπιέσιμο ρευστό η σχέση που ισχύει για την παροχή στη μέση πίεση ροής και για την παροχή μετρημένη σε πίεση περιβάλλοντος εισόδου και την εξόδου είναι:

$$\frac{p_1 + p_2}{2} * Q = p_o * Q_o \quad (5.6.2), \text{ όπου } p_o: \text{ ατμοσφαιρική πίεση και } Q_o: \text{ παροχή μετρημένη}$$

σε πίεση περιβάλλοντος και Q η παροχή στη μέση πίεση ροής.

Η ροή οποιουδήποτε ρευστού διαμέσου ενός πορώδους μέσου εκφράζεται από τη σχέση:

$$Q = \frac{k_a * A}{\mu} * \frac{(p_1 - p_2)}{L} \quad (5.6.3).$$

Αν αντικατασταθεί η σχέση (5.6.2) στη (5.6.3) θα προκύψει

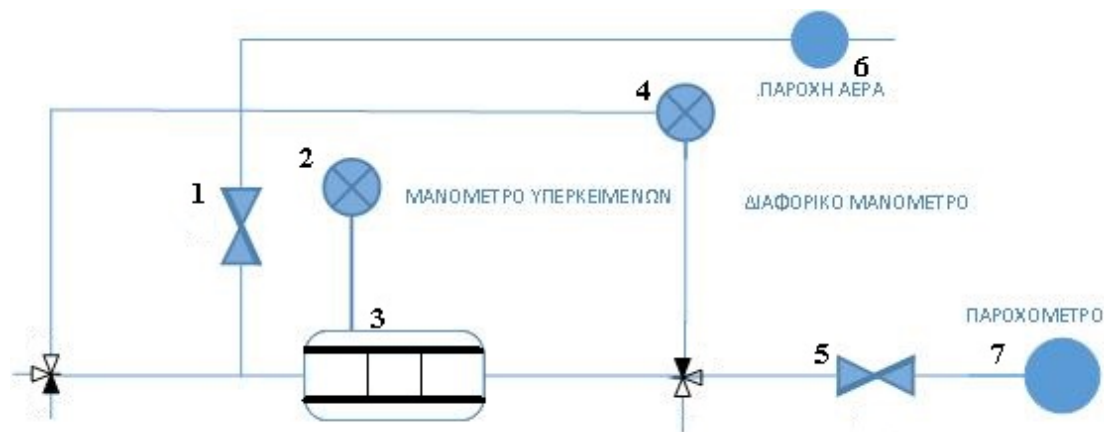
η τελική εξίσωση από την οποία θα βρεθεί και η διαπερατότητα του σχηματισμού

$$\frac{p_o * Q_o * 2}{p_1 + p_2} = \frac{k_a * A}{\mu} \frac{(p_1 - p_2)}{L} \Rightarrow \frac{Q_o}{A} = \frac{k_a}{\mu} * \frac{(p_1 - p_2) * (p_1 + p_2)}{L * p_o} \Rightarrow \frac{Q_o}{A} = \frac{k_a}{\mu} * \frac{(p_1^2 - p_2^2)}{L * p_o} \quad (5.6.4)$$

Επιλύοντας τη σχέση 5.6.4 ως προς το μέγεθος της διαπερατότητας του αέρα θα προκύψει:

$$k_a = \frac{Q * \mu * L * p_o * 2}{A * (p_1^2 - p_2^2)} \quad (5.6.5).$$

Παρακάτω φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε:



Εικόνα 5.18 Πειραματική διάταξη διαπερατότητας Klinkenberg

Στο γράφημα 5.18 φαίνεται η διάταξη για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας Klinkenberg που αποτελείται από ένα δειγματοφορέα (3), ένα διαφορικό μανόμετρο (4), μια βαλβίδα παροχής αέρα (6) και ένα παροχόμετρο (7). Η διαπερατότητα Klinkenberg έχει τα εξής χαρακτηριστικά: είναι ανεξάρτητη από το αέριο που χρησιμοποιήθηκε για μέτρηση, αποτελεί μια εκτίμηση της διαπερατότητας του πετρώματος σε υγρό και τέλος αποτελεί χαρακτηριστικό του πετρώματος.¹⁰³ Δεν ταυτίζεται με τη διαπερατότητα σε υγρό.¹⁰⁴

Τα βήματα της διαδικασίας αναλύονται παρακάτω:

1. Προσδιορίζονται οι διαστάσεις του δοκιμίου (ύψος, διάμετρος).
2. Καθαρίζεται σωστά η διάταξη έτσι ώστε οι ποσότητες ρευστού που υπάρχουν εσωτερικά να απομακρυνθούν, καθώς μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα στα όργανα μέτρησης.
3. Συνδέονται κατάλληλα τα όργανα με το δειγματοφορέα.
4. Εισάγεται το δοκίμιο στο δειγματοφορέα με στόχο να εφάπτεται στα άκρα του.

5. Προστίθεται πίεση υπερκειμένων με εισπίεση υδραυλικού λαδιού περιμετρικά του ελαστικού σωλήνα που περιβάλλει το δοκίμιο.
6. Ανοίγεται η βάννα 1 για παροχή αέρα στο σύστημα
7. Ανοίγεται η βάννα 5 για την καταγραφή της παροχής διαμέσου του πυρήνα από το παροχόμετρο
8. Αναμονή μέχρι σταθεροποίηση, περίπου 1 min.
9. Καταγράφονται ΔP και Q και υπολογίζεται η διαπερατότητα από τη σχέση

5.6.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστεί η επεξεργασία των μετρήσεων που στόχο είχε τη δημιουργία των τελικών γραφημάτων όπου απεικονίζεται η διαπερατότητα του αέρα συναρτήσει του αντιστρόφου της μέσης πίεσης.

Εύρος παροχής του παροχομέτρου : 0-500 ml/min

Εύρος πίεσης διαφορικού μανομέτρου: 0-100 psi

Αρχικά αλλάζοντας συνεχώς την τιμή της παροχής του αέρα (εφαρμόζοντας σταθερή πίεση υπερκειμένων) που εισέρχεται στο δοκίμιο καταγράφηκαν από το παροχόμετρο η τελική παροχή(ml/min) και από το διαφορικό μανόμετρο η πτώση πίεσης (psi). Η μέτρηση επαναλήφθηκε τρεις φορές για τις τρεις πιέσεις υπερκειμένων που εφαρμόστηκαν 100, 150, 200 bar και για κάθε πίεση υπερκειμένων τουλάχιστον δύο φορές για μείωση σφαλμάτων. H_{r2} είναι ατμοσφαιρική πίεση και μέσω της πτώσης πίεσης μπορεί να προσδιορισθεί η_{r1} , καθώς ισχύει ότι $\Delta p = p_1 - p_2$ (5.6.7). Είναι γνωστό ότι το $\mu_a = 0,018 \text{ cP}$, $p_2 = p_o = 1 \text{ atm}$ και υπολογίστηκαν το μήκος δοκιμίου=5,43cm, διάμετρος=2,54cm και η επιφάνεια πετρώματος=5,083cm². Παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.6.1 η επεξεργασία των μετρήσεων για πίεση υπερκειμένων 100 bar:

$\Delta P(\text{psi})$	$\Delta P(\text{atm})$	$Q(\text{ml/min})$	Q (ml/sec)
6,1	0,415081	65	1,083355
7,1	0,483127	77	1,283359
7,9	0,537563	88	1,466696
8,8	0,598805	99	1,650033
9,6	0,653242	111	1,850037
10,5	0,714483	124	2,066708
11,3	0,76892	136	2,266712
12	0,816552	146	2,433382
12,6	0,85738	154	2,566718
13,3	0,905012	166	2,766722
13,9	0,945839	176	2,933392
14,6	0,993472	186	3,100062
15,4	1,047908	200	3,3334
16,4	1,115954	216	3,600072

17,4	1,184	234	3,900078
18,2	1,238437	248	4,133416
18,7	1,27246	257	4,283419
19,9	1,354115	278	4,633426
20,8	1,415357	295	4,916765
21,5	1,462989	307	5,116769
22,5	1,531035	328	5,466776
23,3	1,585472	343	5,716781
24,2	1,646713	362	6,033454
25,1	1,707955	380	6,33346
25,7	1,748782	390	6,50013
26,1	1,776001	400	6,6668
26,7	1,816828	412	6,866804
27,4	1,86446	426	7,100142
28,1	1,912093	440	7,33348
28,7	1,95292	454	7,566818
29,4	2,000552	467	7,783489
30	2,04138	480	8,00016
30,4	2,068598	489	8,150163
30,8	2,095817	499	8,316833

p₁(atm)	p₁+p₂	2/(p₁+p₂)	Q*μ*L*2*p₀	A(p₁² - p₂²)	k (Darcy)	k(mDarcy)
1,415081	2,415081	0,82813	0,211774235	5,09546913	0,041561	41,5
1,483127	2,483127	0,805436	0,250871017	6,097894713	0,041141	41,1
1,537563	2,537563	0,788158	0,286709734	6,933726445	0,04135	41,3
1,598805	2,598805	0,769585	0,322548451	7,910046616	0,040777	40,8
1,653242	2,653242	0,753795	0,361645233	8,809895186	0,04105	41
1,714483	2,714483	0,736789	0,40400008	9,858234299	0,040981	40,9
1,76892	2,76892	0,722303	0,443096862	10,82209971	0,040944	40,9
1,816552	2,816552	0,710088	0,475677513	11,69019432	0,04069	40,7
1,85738	2,85738	0,699942	0,501742035	12,45263319	0,040292	40,3
1,905012	2,905012	0,688465	0,540838817	13,3635626	0,040471	40,5
1,945839	2,945839	0,678924	0,573419468	14,162717	0,040488	40,5
1,993472	2,993472	0,668121	0,60600012	15,11648121	0,040089	40,1
2,047908	3,047908	0,656188	0,651613032	16,23474017	0,040137	40,1
2,115954	3,115954	0,641858	0,703742075	17,67492795	0,039816	39,8
2,184	3,184	0,628141	0,762387247	19,16218693	0,039786	39,8
2,238437	3,238437	0,617582	0,80800016	20,38588538	0,039635	39,6
2,27246	3,27246	0,611161	0,837322746	21,16599506	0,03956	39,5
2,354115	3,354115	0,596282	0,905742114	23,08627091	0,039233	39,2
2,415357	3,415357	0,58559	0,961129222	24,57096008	0,039116	39,1
2,462989	3,462989	0,577536	1,000226004	25,7520782	0,038841	38,8
2,531035	3,531035	0,566406	1,068645372	27,47940032	0,038889	38,9
2,585472	3,585472	0,557807	1,11751635	28,89514929	0,038675	38,7
2,646713	3,646713	0,548439	1,179419588	30,52387635	0,038639	38,6

2,707955	3,707955	0,539381	1,238064761	32,19073108	0,03846	38,5
2,748782	3,748782	0,533507	1,270645412	33,32314961	0,038131	38,1
2,776001	3,776001	0,529661	1,303226064	34,08750954	0,038232	38,2
2,816828	3,816828	0,523995	1,342322846	35,24817079	0,038082	38,1
2,86446	3,86446	0,517537	1,387935758	36,62369299	0,037897	37,9
2,912093	3,912093	0,511235	1,43354867	38,02228007	0,037703	37,7
2,95292	3,95292	0,505955	1,479161583	39,23942677	0,037696	37,7
3,000552	4,000552	0,499931	1,52151643	40,68084865	0,037401	37,4
3,04138	4,04138	0,49488	1,563871277	41,93471088	0,037293	37,3
3,068598	4,068598	0,49157	1,593193863	42,78003328	0,037242	37,2
3,095817	4,095817	0,488303	1,625774515	43,63288707	0,03726	37,3

Πίνακας 5.6.1 Επεξεργασία μετρήσεων για πίεση υπερκειμένων 100 bar

Για πίεση υπερκειμένων 150 bar και $A=5,067\text{cm}^2$, $L=5,42\text{cm}$, $d=2,54\text{cm}$ προσδιορίστηκαν τα εξής:

ΔP (psi)	ΔP (atm)	Q(ml/min)	Q(ml/sec)	P1=ΔP+P2	P1+P2	2/(P1+P2)
20,4	1,388138	225	3,750075	2,388138	3,388138	0,590295
21,5	1,462988	243	4,050081	2,462988	3,462988	0,577536
22	1,497011	250	4,16675	2,497011	3,497011	0,571917
22,7	1,544643	260	4,33342	2,544643	3,544643	0,564232
23,4	1,592276	271	4,516757	2,592276	3,592276	0,55675
24,3	1,653517	285	4,750095	2,653517	3,653517	0,547418
25,1	1,707954	298	4,966766	2,707954	3,707954	0,539381
25,7	1,748781	308	5,133436	2,748781	3,748781	0,533507
26,4	1,796413	320	5,33344	2,796413	3,796413	0,526813
26,8	1,823632	326	5,433442	2,823632	3,823632	0,523063
27,7	1,884873	344	5,733448	2,884873	3,884873	0,514817
28,4	1,932505	355	5,916785	2,932505	3,932505	0,508582
29,3	1,993747	370	6,16679	2,993747	3,993747	0,500783
30,2	2,054988	387	6,450129	3,054988	4,054988	0,49322
30,5	2,075402	393	6,550131	3,075402	4,075402	0,490749
30,9	2,10262	400	6,6668	3,10262	4,10262	0,487493
31,2	2,123034	406	6,766802	3,123034	4,123034	0,48508
32	2,177471	420	7,00014	3,177471	4,177471	0,478759
32,6	2,218298	430	7,16681	3,218298	4,218298	0,474125
33	2,245517	438	7,300146	3,245517	4,245517	0,471085
33,6	2,286344	450	7,50015	3,286344	4,286344	0,466598
34,2	2,327172	461	7,683487	3,327172	4,327172	0,462196
34,5	2,347586	471	7,850157	3,347586	4,347586	0,460025
35,4	2,408827	484	8,066828	3,408827	4,408827	0,453635
35,5	2,415632	486	8,100162	3,415632	4,415632	0,452936
35,7	2,429241	490	8,16683	3,429241	4,429241	0,451545
36,1	2,456459	497	8,283499	3,456459	4,456459	0,448787

$Q^*\mu^2Po^*L$ $A^*(P1^2-$ $k(\text{Darcy})$ $k(\text{mDarcy})$

P2^2)			
0,731715	23,83147	0,030704	30,7
0,790252	25,67138	0,030783	30,8
0,813016	26,52647	0,030649	30,6
0,845537	27,7433	0,030477	30,5
0,88131	28,98312	0,030408	30,4
0,926839	30,61097	0,030278	30,3
0,969115	32,08985	0,0302	30,2
1,001636	33,21872	0,030153	30,1
1,040661	34,55709	0,030114	30,1
1,060173	35,33219	0,030006	30
1,11871	37,10362	0,030151	30,1
1,154483	38,50768	0,029981	29,9
1,203264	40,34668	0,029823	29,8
1,258549	42,22369	0,029807	29,8
1,278062	42,85781	0,029821	29,8
1,300826	43,70987	0,02976	29,8
1,320338	44,35384	0,029768	29,8
1,365867	46,09174	0,029634	29,6
1,398388	47,41487	0,029493	29,5
1,424404	48,30635	0,029487	29,5
1,463429	49,65763	0,02947	29,5
1,499202	51,02581	0,029381	29,4
1,531723	51,71624	0,029618	29,6
1,573999	53,81285	0,02925	29,2
1,580504	54,04816	0,029243	29,2
1,593512	54,52017	0,029228	29,2
1,616276	55,46983	0,029138	29,1

Πίνακας 5.6.2 Επεξεργασία μετρήσεων για πίεση υπερκειμένων 150 bar

Για πίεση υπερκειμένων 200 bar προέκυψαν τα εξής μήκος=5,42cm, διάμετρος=2,54cm, επιφάνεια (A)=5,087cm²:

ΔP(psi)	ΔP(atm)	Q(ml/min)	Q(ml/sec)
4,7	0,319816	21	0,35
6,2	0,421885	29	0,483333
7,4	0,50354	37	0,616667
8,5	0,578391	43	0,716667
9,3	0,632828	47	0,783333
10,3	0,700874	54	0,9
11,6	0,789334	61	1,016667
12,6	0,85738	69	1,15
13,6	0,925426	75	1,25
15,5	1,054713	90	1,5
17,4	1,184	101	1,683334
18,9	1,286069	112	1,866667
20,1	1,367725	122	2,033334

22,3	1,517426	139	2,316667
23,9	1,626299	152	2,533334
25,5	1,735173	166	2,766667
26,6	1,810024	176	2,933334
27,8	1,891679	186	3,100001
28,9	1,966529	197	3,283334
30,5	2,075403	212	3,533334
31,8	2,163863	224	3,733334
33,6	2,286346	243	4,050001
35,5	2,415633	262	4,366668
38,1	2,592553	290	4,833334
39,6	2,694622	306	5,100001
41,5	2,823909	326	5,433334
42,4	2,88515	336	5,600001
43,7	2,97361	348	5,800001
44,6	3,034852	361	6,016668
45,8	3,116507	375	6,250001
46,8	3,184553	387	6,450001
47,6	3,23899	395	6,583335
48,2	3,279817	404	6,733335
49,5	3,368277	419	6,983335
50,5	3,436323	431	7,183335
51,1	3,477151	439	7,316668
51,9	3,531587	450	7,500002
52,4	3,56561	456	7,600002
53,5	3,640461	470	7,833335
54,8	3,728921	485	8,083335
55,7	3,790162	497	8,283335
56,3	3,83099	503	8,383335

ΔP (psi)	ΔP (atm)	Q(ml/min)	Q(ml/sec)
4,3	0,292597644	32	0,533344
6,3	0,428689572	54	0,900018
7,6	0,517149325	64	1,066688
9,7	0,660045849	86	1,433362
10,8	0,734896409	97	1,616699
12,6	0,857379144	119	1,983373
14,1	0,959448089	138	2,300046
15,6	1,061517035	156	2,600052
16,8	1,143172192	173	2,883391
17,7	1,204413559	185	3,083395
19,1	1,299677908	205	3,416735
20,4	1,388137661	225	3,750075
21,5	1,462988221	243	4,050081
22	1,497011203	250	4,16675

22,7	1,544643378	260	4,33342
23,4	1,592275553	271	4,516757
24,3	1,65351692	285	4,750095
25,1	1,707953691	298	4,966766
25,7	1,748781269	308	5,133436
26,4	1,796413444	320	5,33344
26,8	1,82363183	326	5,433442
27,7	1,884873197	344	5,733448
28,4	1,932505372	355	5,916785
29,3	1,993746739	370	6,16679
30,2	2,054988106	387	6,450129
30,5	2,075401896	393	6,550131
30,9	2,102620281	400	6,6668
31,2	2,12303407	406	6,766802
32	2,177470841	420	7,00014
32,6	2,21829842	430	7,16681
33	2,245516805	438	7,300146
33,6	2,286344383	450	7,50015
34,2	2,327171962	461	7,683487
34,5	2,347585751	471	7,850157
35,4	2,408827118	484	8,066828
35,5	2,415631715	486	8,100162
35,7	2,429240907	490	8,16683
36,1	2,456459293	497	8,283499

P1 (atm)	P1+P2	2/P1+P2	Q*L*2*Po*μ	A*(P1^2-P2^2)	k(Darcy)	k(mDarcy)
1,31986	2,31986	0,862137268	0,06831721	3,774152899	0,018101	18,1
1,4215	2,42185	0,825802974	0,09434282	5,197725001	0,018151	18,1
1,50354	2,50354	0,798868674	0,12036842	6,412898694	0,01877	18,8
1,57831	2,57831	0,775677545	0,13988763	7,586400354	0,018439	18,4
1,63288	2,63288	0,759639502	0,15290043	8,475658681	0,01804	18
1,70084	2,70084	0,740501093	0,17567284	9,629629373	0,018243	18,2
1,78934	2,78934	0,71701714	0,19844524	11,2002187	0,017718	17,7
1,85738	2,85738	0,699942003	0,22447084	12,46253929	0,018012	18
1,92546	2,92546	0,683661208	0,24399005	13,77196852	0,017716	17,7
2,05473	3,05473	0,654725992	0,29278806	16,3896684	0,017864	17,9
2,184	3,184	0,628140625	0,32857327	19,1774305	0,017133	17,1
2,28609	3,28609	0,608629873	0,36435847	21,49842237	0,016948	16,9
2,36775	3,36775	0,593872789	0,39689048	23,43153188	0,016938	16,9
2,51746	3,51746	0,568597638	0,45219489	27,15175232	0,016654	16,6
2,62629	3,62629	0,55152644	0,4944865	30,00057749	0,016483	16,5
2,73513	3,73513	0,535450433	0,54003131	32,97000079	0,016379	16,4
2,81004	3,81024	0,524931132	0,57256331	35,08143566	0,016321	16,3

2,89169	3,89169	0,513917027	0,60509532	37,44982909	0,016157	16,1
2,96659	3,96659	0,504219129	0,64088053	39,68044884	0,016151	16,1
3,07543	4,07543	0,490749013	0,68967854	43,02674134	0,016029	16
3,16383	4,16363	0,480323223	0,72871695	45,8344038	0,015899	15,9
3,28636	4,28636	0,466597934	0,79052776	49,85336957	0,015857	15,8
3,41563	4,41563	0,452936193	0,85233857	54,26119811	0,015708	15,7
3,59253	4,59253	0,435487663	0,94342819	60,56854909	0,015576	15,6
3,69462	4,69462	0,426019426	0,9954794	64,35226452	0,015469	15,5
3,82399	4,82399	0,414601519	1,06054341	69,29713167	0,015304	15,3
3,88515	4,88515	0,409403977	1,09307542	71,69879406	0,015245	15,2
3,97361	4,97361	0,402122386	1,13211383	75,23522732	0,015048	15
4,03482	5,03482	0,397231172	1,17440543	77,73016484	0,015109	15,1
4,11657	5,11657	0,390891692	1,21995024	81,11610509	0,01504	15
4,18453	5,18453	0,385761333	1,25898865	83,98954148	0,01499	14,9
4,23899	5,23899	0,381753001	1,28501426	86,32220882	0,014886	14,9
4,27987	5,27987	0,378800993	1,31429306	88,09149496	0,01492	14,9
4,36827	5,36827	0,372559017	1,36309107	91,98312744	0,014819	14,8
4,43633	5,43633	0,367895727	1,40212948	95,03086583	0,014754	14,7
4,47711	5,47711	0,36515337	1,42815509	96,88212102	0,014741	14,7
4,53157	5,53157	0,361559866	1,46394029	99,37684211	0,014731	14,7
4,56561	5,56561	0,359349623	1,4834595	100,9513531	0,014695	14,7
4,64041	5,64041	0,354580946	1,52900431	104,4567329	0,014638	14,6
4,72891	5,72891	0,349105891	1,57780232	108,672944	0,014519	14,5
4,79012	5,79012	0,345413467	1,61684072	111,6384969	0,014483	14,5
4,83099	5,83099	0,342994941	1,63635993	113,6367311	0,0144	14,4

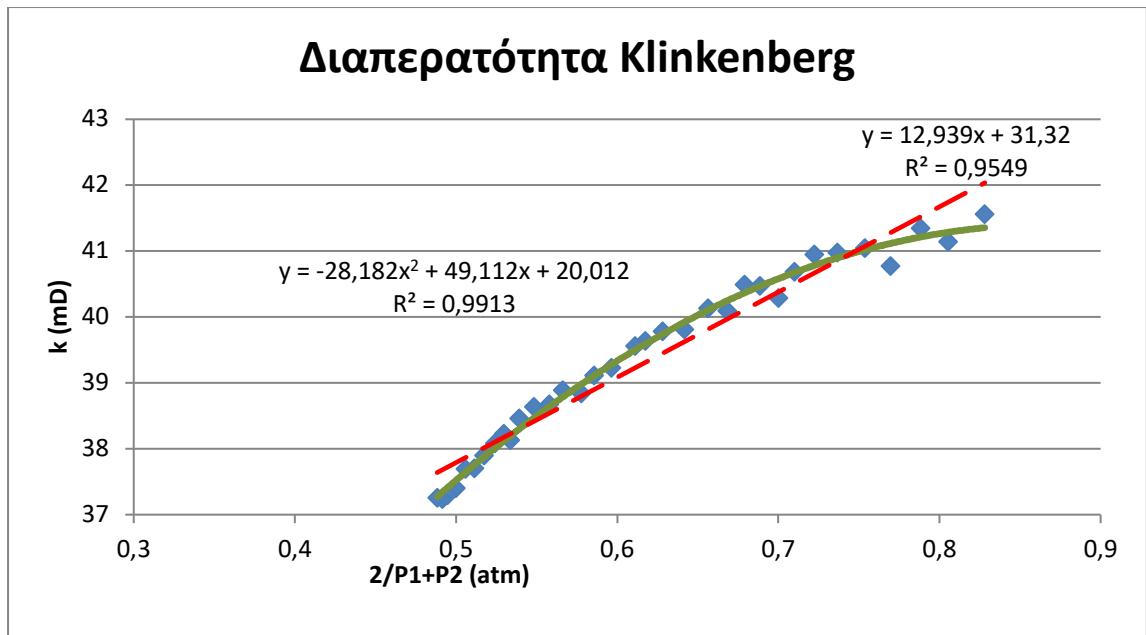
Πίνακας 5.6.3 Επεξεργασία μετρήσεων για πίεση υπερκειμένων 200 bar

Αφού λοιπόν ολοκληρώθηκε η επεξεργασία των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν τα εξής γραφήματα: έγινε απεικόνιση των διαπερατοτήτων του αέρα σε γράφημα συναρτήσεως του $2/(P_1+P_2)$. Από τον σταθερό όρο της εξίσωσης που σχηματίστηκε στο γράφημα βρέθηκε η διαπερατότητα Klinkenberg.

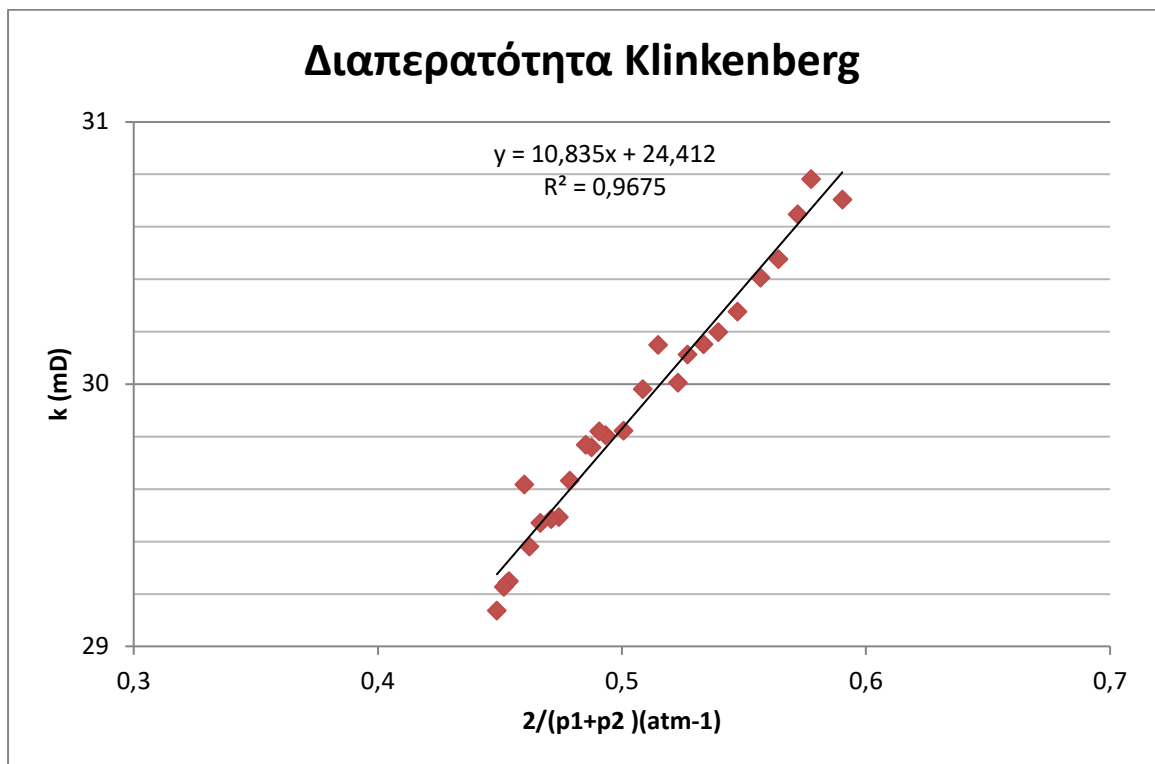
Επιλύοντας τη σχέση (5.6.1) ως προς k_a προέκυψε μια ευθεία της μορφής $y=ax+b$:

$$k_a = k_l + \frac{k_l * 2 * b}{p_1 + p_2} \quad (5.6.6) \text{ για } \gamma=k_a \text{ και } \chi=2/(p_1+p_2)=0 \text{ τότε το σημείο τομής της ευθείας με}$$

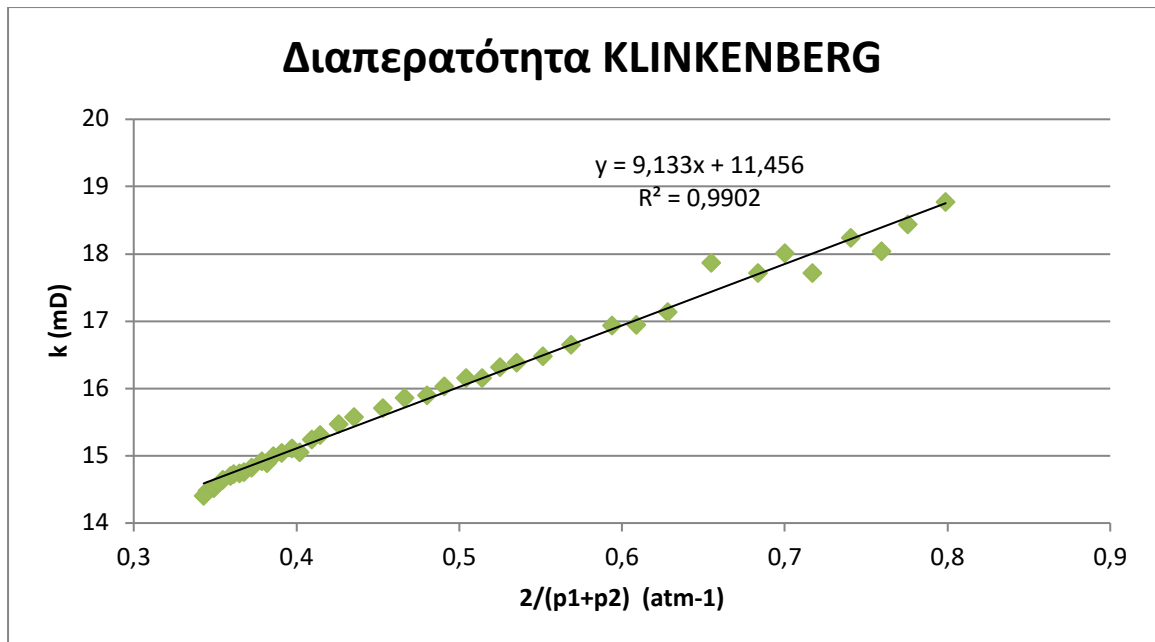
τον γάξονα είναι η τιμή της διαπερατότητας Klinkenberg¹⁰⁵



Εικόνα 5.19 Γράφημα διαπερατότητας Klinkenberg για 100bar

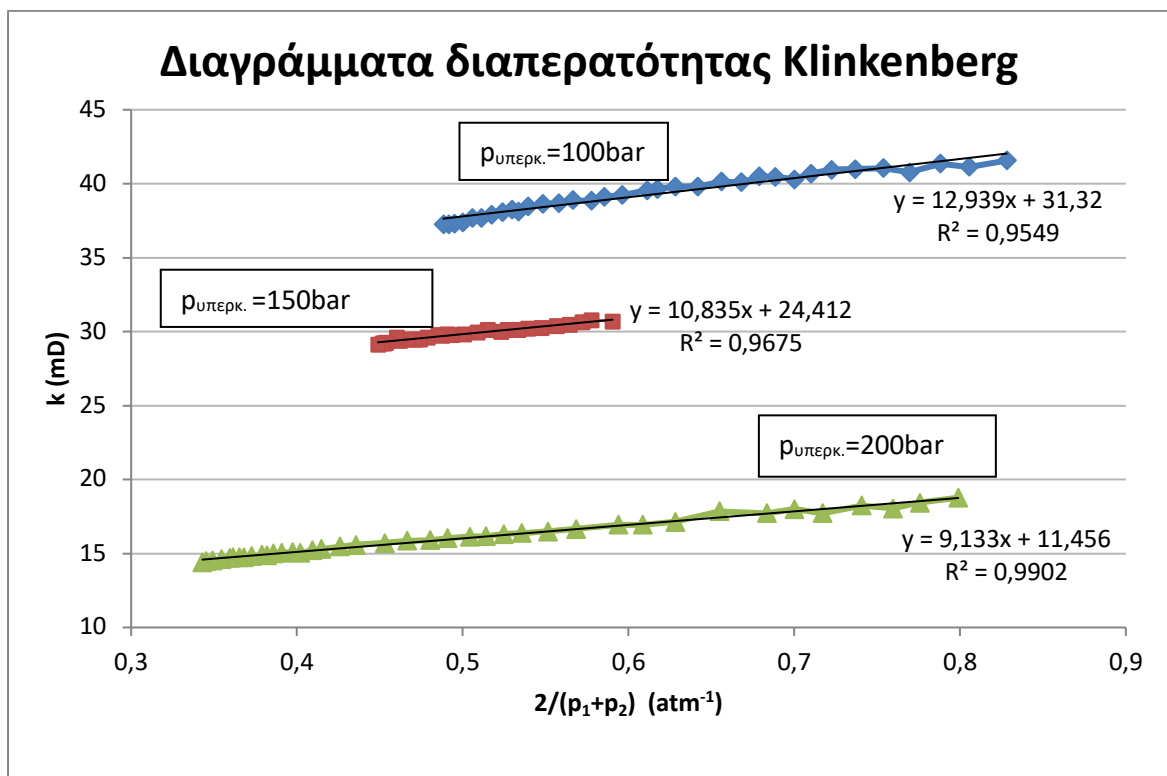


Εικόνα 5.20 Γράφημα διαπερατότητας Klinkenberg για 150 bar



Εικόνα 5.21 Γράφημα διαπερατότητας Klinkenberg για 200 bar

Στο γράφημα 5.22 εμφανίζονται συγκεντρωτικά όλα τα διαγράμματα για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις υπερκειμένων:



Πίνακας 5.22 Συγκεντρωτικό γράφημα διαπερατοτήτων για 100, 150 και 200 bar πίεση υπερκειμένων

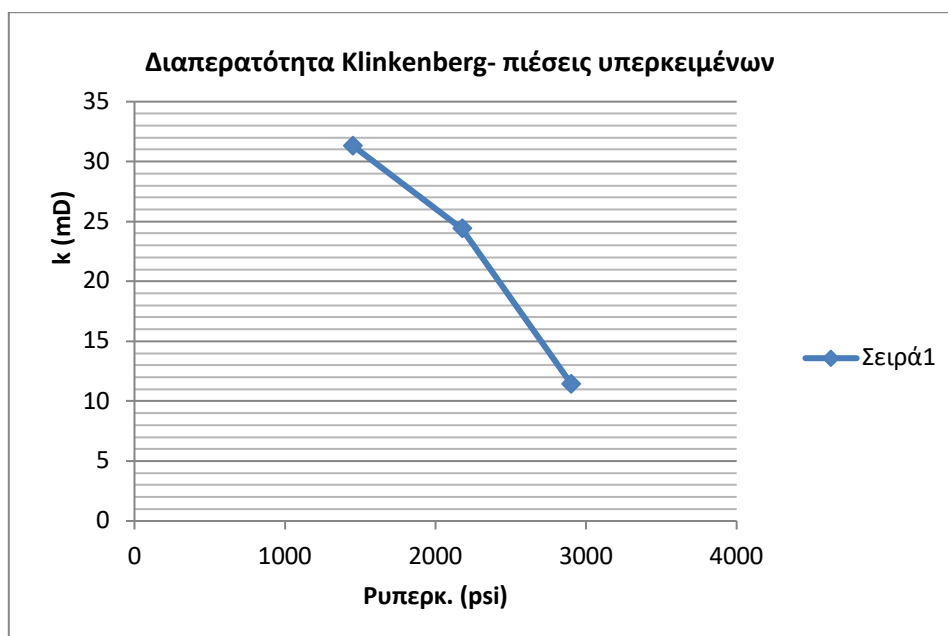
Αν λοιπόν βρεθούν τα σημεία τομής των ευθειών που έχουν προσαρμοστεί στα πειραματικά δεδομένα με τον γάξονα (άξονα των διαπερατοτήτων) από τα γραφήματα

5.19, 5.20, 5.21 και χρησιμοποιώντας τις πιέσεις υπερκειμένων σε μονάδες psi προκύπτει ότι:

Ρυπερ.(psi)	k (mD)
1450,37	31,3
2175,56	24,4
2900,75	11,4

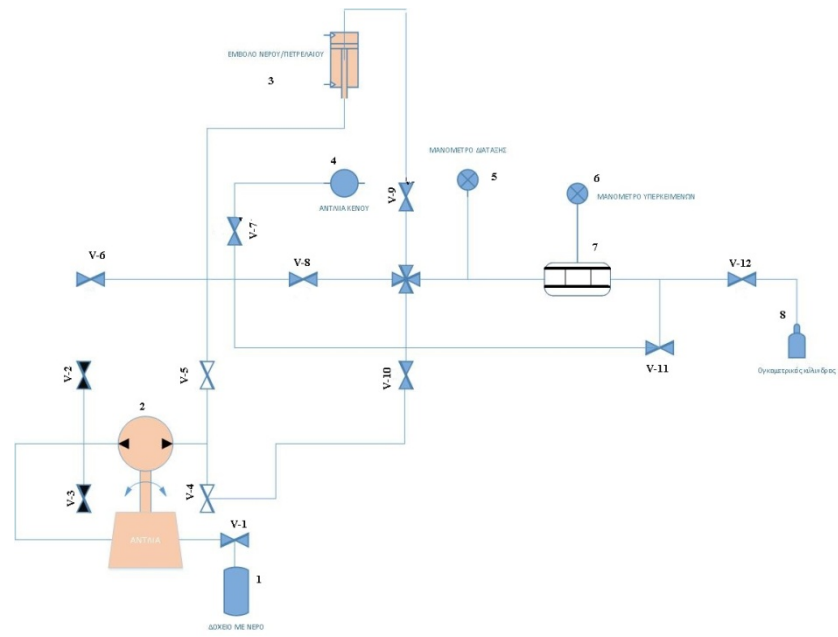
Όπως φαίνεται στο γράφημα 5.22 στον χ άξονα παρίστανται οι πιέσεις υπερκειμένων και στον γ άξονα οι τιμές των διαπερατοτήτων Klinkenberg που βρίσκονται σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν προηγουμένως. Αυτό γίνεται για να παρατηρηθεί η μεταβολή της διαπερατότητας του αέρα, με την αλλαγή της πίεσης υπερκειμένων καθώς αποτελεί τη μόνη παράμετρο που μεταβάλλεται σε κάθε πείραμα. Η πίεση υπερκειμένων είναι αντιστρόφως ανάλογη της διαπερατότητας Klinkenberg, πράγμα που επαληθεύεται από τη βιβλιογραφία, δηλαδή όσο αυξάνεται η πίεση υπερκειμένων η διαπερατότητα κατά Klinkenberg μειώνεται. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο καθώς όσο αυξάνεται η πίεση υπερκειμένων αυξάνεται η πίεση που δέχονται οι πόροι με αποτέλεσμα να συρρικνώνονται και να εμποδίζεται η ροή.

Η μέτρηση της διαπερατότητας Klinkenberg πραγματοποιείται γιατί χαρακτηρίζει τα πετρώματα. Η διαπερατότητα λοιπόν στη μεγαλύτερη πίεση υπερκειμένων είναι 11,45 mD. Πρακτικά θεωρείται σαν μια διαπερατότητα αναφοράς.



Εικόνα 5.22 Γράφημα διαπερατότητας Klinkenberg συναρτήσεως των πιέσεων υπερκειμένων

5.7 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΩΝ



Εικόνα 5.23 Πειραματική διάταξη μετρήσεων σχετικών διαπερατοτήτων

Η μεθοδολογία μέτρησης των σχετικών διαπερατοτήτων αναλύεται στα παρακάτω βήματα.

1. Ζυγίζεται το δοκίμιο και τοποθετείται στον δειγματοφόρο (7)
2. Αρχικά όλες οι βάννες (V) πρέπει να είναι κλειστές
3. Έπειτα ανοίγουν οι V-7, V-8, V-11 για τη δημιουργία κενού
4. Κλείνει η V-8 και ανοίγει η V-10 αλλά και η V-4 (η βάννα μέσω της οποίας διοχετεύεται νερό στο σύστημα)
5. Μόλις εμφανισθεί σταγόνα νερού στο σωλήνα που συνδέεται με την V-7 κλείνει η V-11
6. Ανοίγει η V-12 για έξοδο του νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο (8), η διαδικασία συνεχίζει μέχρι κορεσμού σε νερό
7. Κλείνουν οι V-4 και V-10 ανοίγουν οι V-5 και η V-9 προκειμένου να εισπιαστεί εξάνιο στο δειγματοφόρο
8. Ανοίγει η V-12 προκειμένου να απομακρυνθούν οι ποσότητες εξανίου και νερού και να παρατηρηθεί εάν έχει επιτευχθεί το σημείο μη περαιτέρω απομακρύνσιμου βαθμού κορεσμού σε νερό (πρώτο τελικό σημείο-διαπερατότητα βάσης), εάν δηλαδή απομακρύνεται μόνο ποσότητα εξανίου
9. Μόλις σταθεροποιηθεί η πίεση στο μανόμετρο καταγράφεται για να προσδιοριστεί η διαπερατότητα και κλείνουν όλες οι βάννες.

10. Το δοκίμιο απομακρύνεται και περιβάλλεται από μια μεμβράνη, ζυγίζεται για να προσδιορισθεί ο βαθμός κορεσμού σε νερό
11. Επανατοποθέτηση του δοκιμίου στον δειγματοφορέα (7)
12. Εισαγωγή ποσοτήτων νερού και εξάνιου με ταυτόχρονη εισπίεση, έχοντας ανοιχτές τις βάννες V-4, V-10 και V-5, V-9. Η διαδικασία θεωρείται ότι έχει έρθει σε ισορροπία όταν η αναλογία των παροχών στην είσοδο είναι ίση με την αναλογία στην έξοδο.
13. Μεταβάλλονται οι αναλογίες παροχών, μειώνοντας την παροχή σε εξάνιο και κάθε φορά όταν σταθεροποιηθεί η πίεση καταγράφεται και προσδιορίζονται οι δύο διαπερατότητες (5.7.1) και (5.7.2) και τέλος ο βαθμός κορεσμού σε νερό σύμφωνα με το ισοζύγιο μάζας (5.4.6).
14. Η διαδικασία συνεχίζει μέχρι να εισπνέζεται μόνο νερό με μόνες ανοιχτές τις βάννες V-5, V-9, V-12 για επίτευξη του σημείου υπολειμματικού βαθμού κορεσμού σε εξάνιο (δεύτερο τελικό σημείο).

Συνηθίζεται για τον προσδιορισμό των σχετικών διαπερατοτήτων να χρησιμοποιούνται δύο αντλίες νερού. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε μία λόγω βλάβης της δεύτερης αντλίας που υπήρχε στο Εργαστήριο. Η μια αντλία διοχετεύει κατευθείαν νερό στο δειγματοφορέα (7) ενώ η άλλη προσθέτει νερό στον εμβολοφόρο κύλινδρο (3) και το έμβολο κατεβαίνει εισπνέζοντας εξάνιο στο κύκλωμα. Οι μετρήσεις διαπερατότητας γίνονται με την εισαγωγή ενός μόνο ρευστού εντός του δοκιμίου.

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε στο εργαστήριο ήταν εκείνη της σταθερής κατάστασης που αναλύθηκε το 1939 από τον Leverett¹⁰⁶. Αρχικά εισπνέζεται νερό μέχρι 100% κορεσμού και έπειτα εξάνιο μέχρι τον μη περαιτέρω απομακρύνσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό. Το πείραμα γίνεται με στόχο να γίνει στο εργαστήριο προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών που επικρατούν σε έναν ταμιευτήρα. Για αυτό και η διαδικασία προσδιορισμού των σχετικών διαπερατοτήτων ξεκινάει από το σημείο του μη περαιτέρω απομακρύνσιμου βαθμού κορεσμού σε νερό. Στη συνέχεια μειώνοντας την παροχή σε εξάνιο αυξάνεται η παροχή σε νερό, μέχρι να επιτευχθεί ο υπολειμματικός βαθμός κορεσμού σε εξάνιο, δηλαδή το σημείο όπου μόνο νερό εισπνέζεται στο σύστημα.¹⁰⁷

5.7.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Όλες οι διαπερατότητες έχουν προκύψει από τους εξής τύπους ($p_1=1 \text{ atm}$):

$$k_o = \frac{Q_o * L * \mu_o}{A * (p_1 - p_2)}, \quad (5.7.1)$$

$$k_w = \frac{Q_w * L * \mu_w}{A * (p_1 - p_2)}, \quad (5.7.2)$$

και οι βαθμοί κορεσμού προκύπτουν σύμφωνα με τη σχέση (5.4.6).

Είναι γνωστό ότι τα ιξώδη νερού και εξανίου είναι τα εξής: $\mu_w=0,79$ cP, $\mu_o=0,28$ cP.

	Σημείο (s_{wc})	Αναλογία- εξάνιο/νερό (4/1)	Αναλογία (2,8/1)	Σημείο (s_{orw})
Q_w (ml/sec)	-	0,002	0,002	0,010
Q_o (ml/sec)	0,042	0,008	0,005	-
$p_{eq.}$ (atm)	21,7	29,6	26,6	55,2
k_{ew} (mD)	-	0,061	0,068	0,162
k_{eo} (mD)	0,600	0,087	0,068	-
Αναμονή (min)	105	150	120	90
s_w (%)	22,1	51,9	53,7	60,6

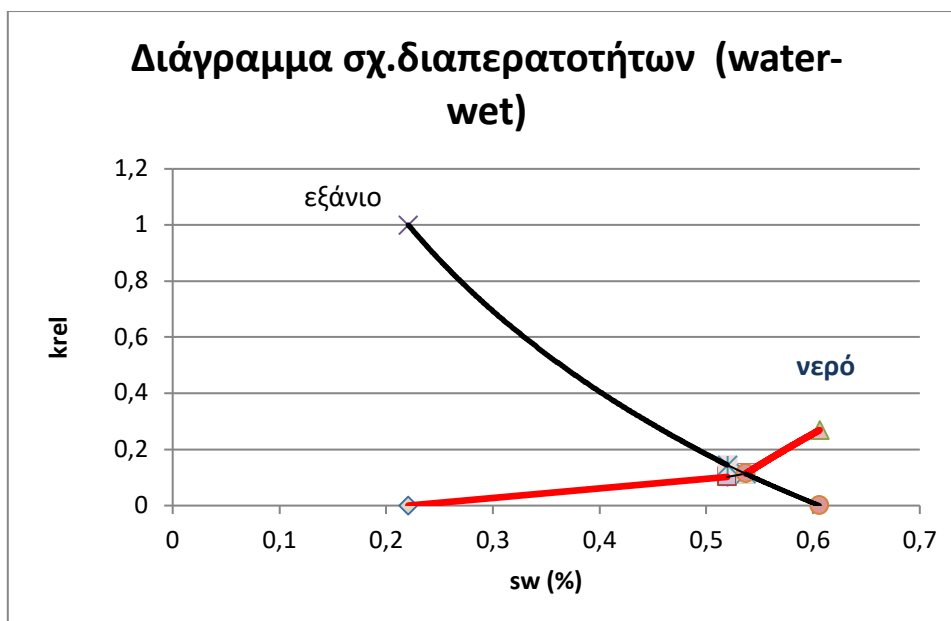
Πίνακας 5.7.1 Αποτελέσματα μετρήσεων για τον προσδιορισμό των ενεργών διαπερατοτήτων

Χρησιμοποιήθηκε η ενεργός διαπερατότητα του εξανίου στο s_{wc} ($k_{eo}@s_{wc}=0,600$ mD) ως διαπερατότητα αναφοράς, με την οποία διαιρέθηκαν όλες οι τιμές των ενεργών διαπερατοτήτων για να προκύψουν οι σχετικές διαπερατότητες (Πίνακας 5.7.2).¹⁰⁸

$k_{rw}@s_{wc}$ (mD)	0
$k_{ro}@s_{wc}$ (mD)	1
$k_{rw}@s_{(4/1)}$ (mD)	0,10
$k_{ro}@s_{(4/1)}$ (mD)	0,14
$k_{ro}@s_{(2,8/1)}=k_{rw}@s_{(2,8/1)}$ (mD)	0,11
$k_{rw}@s_{orw}$ (mD)	0,27
$k_{ro}@s_{orw}$ (mD)	0

Πίνακας 5.7.2 Σχετικές διαπερατότητες

Το πρώτο τελικό σημείο δίνεται από τη σχετική διαπερατότητα του εξανίου στο μη περαιτέρω απομακρύνσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό ενώ στο ίδιο σημείο η φάση του νερού είναι ακίνητη. Το δεύτερο τελικό σημείο δίνεται από τη σχετική διαπερατότητα του νερού στον υπολειμματικό βαθμό κορεσμού σε εξάνιο και στο ίδιο σημείο η φάση του εξανίου είναι ακίνητη.



Εικόνα 5.24 Γραφική απεικόνιση σχετικών διαπερατοτήτων του πετρώματος

Συμπερασματικά όπως διακρίνεται από το γράφημα 5.24 το σημείο τομής για τις δύο καμπύλες πέφτει λίγο μετά το 50% και το σημείο του μη περαιτέρω απομακρύνσιμου βαθμού κορεσμού σε νερό είναι στο 22,1%. Επομένως αυτά τα δυο στοιχεία αποτελούν σημεία ένδειξης υδατοδιαβρεχτής συμπεριφοράς.¹⁰⁹

Προσδιορίστηκαν επίσης οι απόλυτες διαπερατότητες του ψαμμίτη τύπου Berea που εξετάζεται όταν εισπνέζεται μόνο εξάνιο και αντιστοίχως μόνο νερό (Πίνακας 5.7.3) και προέκυψε ότι η απόλυτη διαπερατότητα σε εξάνιο πειραματικά είναι υψηλότερη αυτής του νερού στην υδατοδιαβρεχτή περίπτωση.¹¹⁰

Πίνακας 5.7.3 Μετρήσεις για τον προσδιορισμό απόλυτων διαπερατοτήτων νερού-εξανίου

	100% νερό	100% εξάνιο
Q_o (ml/sec)	-	0,016
Q_w (ml/sec)	0,083	-
p_{eq} (atm)	28,62	1,97
k_{abs} (mD)	2,5	5,1
Αναμονή (min)	110	100

5.8 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΥΣ ΒΑΘΜΟΥΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΘΕΝΤΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΩΝ

Η σχέση του συντελεστή κινητικότητας κατά την ταυτόχρονη ροή δύο ρευστών σε πορώδες

$$\text{μέσο, διατυπώνεται ως εξής}^{111}: M = \frac{k_{rw}(s_{or})/\mu_w}{k_{ro}(s_{wc})/\mu_o}, \quad (5.8.1)$$

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή κινητικότητας των φάσεων νερού-εξανίου χρησιμοποιήθηκε η εξής τεχνική:

- Σύμφωνα με το γράφημα 5.24 προέκυψαν οι δύο καμπύλες, του νερού και του εξανίου σύμφωνα με τα τέσσερα πειραματικά σημεία των σχετικών διαπερατοτήτων – βαθμών κορεσμού που μετρήθηκαν (Πίνακες 5.7.1- 5.7.2). Σε αυτή την παράγραφο βρέθηκαν οι εξισώσεις (Εικόνες 5.25 και 5.26) που επαληθεύουν τις δύο καμπύλες και σύμφωνα με αυτές και τα νέα σημεία βαθμών κορεσμού που βρίσκονται εντός του εύρους των ήδη υπολογισμένων από το εργαστήριο σημείων. Προσδιορίστηκαν τιμές σχετικών διαπερατοτήτων, για να βρεθεί ο συντελεστής κινητικότητας για όλους τους βαθμούς κορεσμού (μέθοδος παρεμβολής-interpolation).

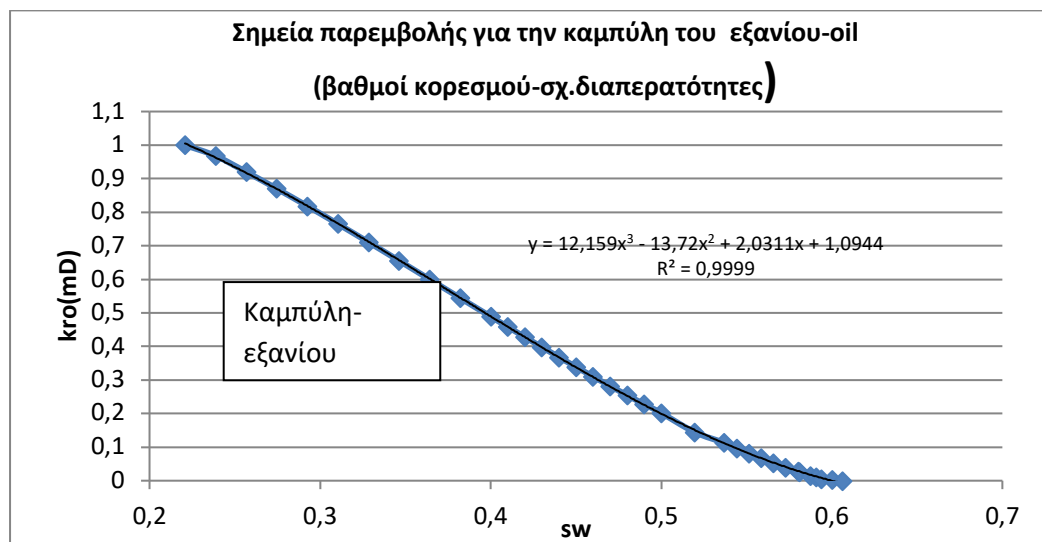
Στον πίνακα 5.8.1 φαίνονται τα σημεία(s_w)προέκυψαν από παρεμβολή (τα τέσσερα κόκκινα σημεία είναι τα πειραματικά αποτελέσματα των βαθμών κορεσμού-σχετικών διαπερατοτήτων) από τα οποία σύμφωνα με την εξίσωση 5.8.1 θα προκύψει ο συντελεστής κινητικότητας:

sw	kro	krw	M	χαρακτηρισμός
0,221	1	0	0	favorable
0,239	0,96795	0,000655	0,00024	favorable
0,257	0,92023	0,001310	0,00050	favorable
0,274	0,87031	0,001965	0,0008	favorable
0,292	0,81856	0,005544	0,0024	favorable
0,310	0,76531	0,009909	0,00459	favorable
0,328	0,71093	0,014668	0,00731	favorable
0,346	0,65577	0,019543	0,01056	favorable
0,364	0,60019	0,024382	0,01431	favorable
0,382	0,54453	0,029153	0,01897	favorable
0,421	0,48915	0,033945	0,02451	favorable
0,414	0,45851	0,036700	0,02837	favorable
0,427	0,42812	0,039580	0,03277	favorable
0,435	0,39806	0,042647	0,03797	favorable
0,442	0,36838	0,045979	0,04424	favorable
0,451	0,33914	0,049663	0,05190	favorable
0,460	0,31041	0,053799	0,06143	favorable

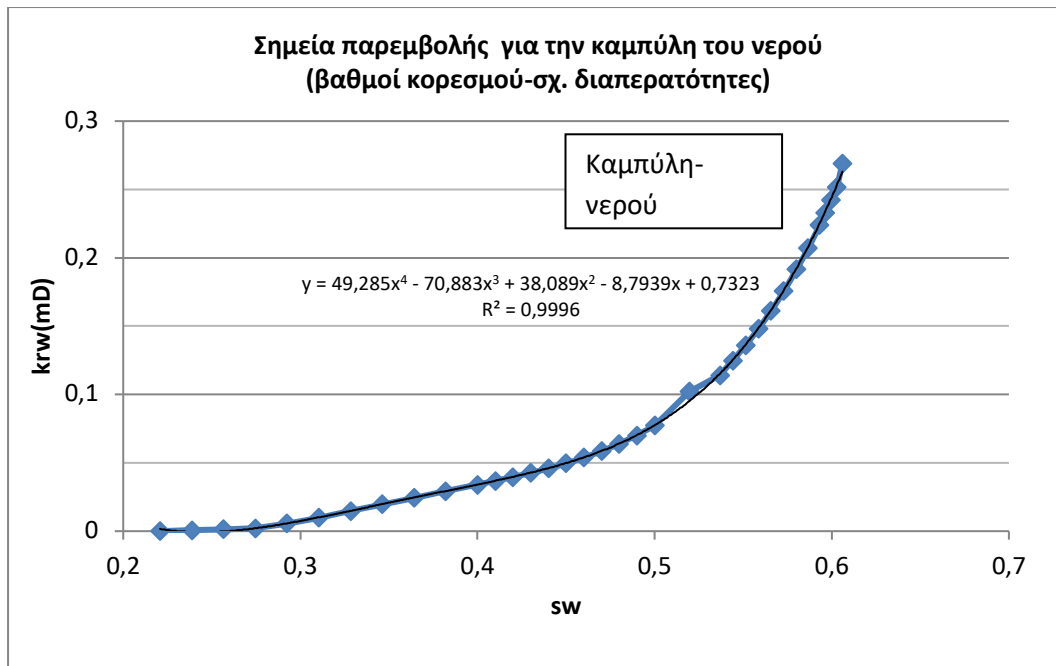
0,470	0,28225	0,058501	0,07346	favorable
0,480	0,25471	0,063890	0,08890	favorable
0,490	0,22787	0,070104	0,10904	favorable
0,500	0,20178	0,077287	0,13576	favorable
0,519	0,14478	0,102	0,25968	favorable
0,537	0,11304	0,113	0,35714	favorable
0,544	0,09718	0,124889	0,45547	favorable
0,551	0,08198	0,135838	0,58729	favorable
0,558	0,06736	0,147891	0,77819	favorable
0,566	0,05335	0,161135	1,07059	unfavorable
0,573	0,03997	0,175658	1,55782	unfavorable
0,580	0,02724	0,191552	2,49240	unfavorable
0,581	0,02576	0,207109	2,84933	unfavorable
0,587	0,01496	0,223926	5,30462	unfavorable
0,591	0,00977	0,232829	8,44366	unfavorable
0,594	0,00473	0,242076	18,1438	unfavorable
0,600	0,00315	0,251674	28,2948	unfavorable
0,606	0	0,269	-	-

Πίνακας 5.8.1 Προσδιορισμός συντελεστή κινητικότητας

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία¹¹² αν $M > 1$ προκύπτει ότι ένα ρευστό με χαμηλή κινητικότητα εκτοπίζεται από ένα ρευστό υψηλής κινητικότητας και δεν ενδείκνυται η εκτόπιση (unfavorable). Σε αντίθετη περίπτωση όπου το $M < 1$ προκύπτει ότι το ρευστό που εκτοπίζεται είναι υψηλότερης κινητικότητας από εκείνο που το εκτοπίζει. Από τα στοιχεία του πίνακα 5.8.1 προκύπτουν τα εξής γραφήματα (τα οποία δημιουργήθηκαν σύμφωνα με τα τέσσερα πειραματικά σημεία του γραφήματος 5.24 μέσω παρεμβολής):

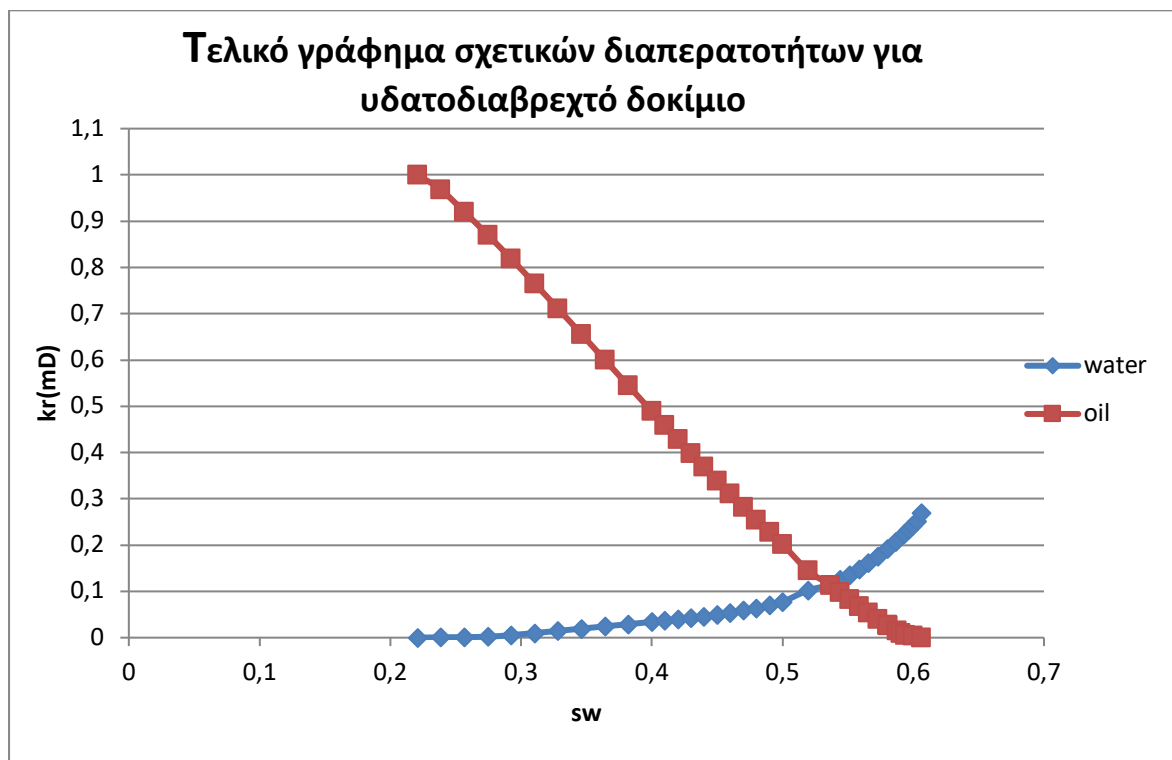


Εικόνα 5.25 Καμπύλη σχετικών διαπερατοτήτων για το εξάνιο



Εικόνα 5.26 Καμπύλη σχετικών διαπερατοτήτων για το νερό

Συνδυάζοντας τα γραφήματα 5.25 και 5.26 προκύπτει το νέο τελικό διάγραμμα σχετικών διαπερατοτήτων το οποίο ως βάση του έχει τα τέσσερα πειραματικά σημεία:



Εικόνα 5.27 Συνολικό διάγραμμα σχετικών διαπερατοτήτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΟ ΠΟΥ ΜΕΤΕΤΡΑΠΕΙ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΔΙΑΒΡΕΧΤΟ

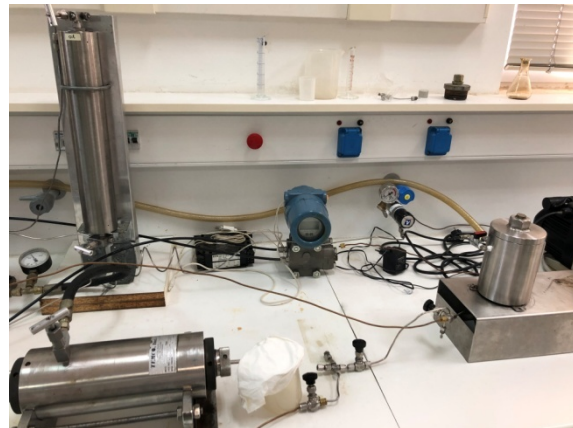
6.1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Ακολούθως επαναλήφθηκαν μετρήσεις με νέο δοκίμιο-ψαμμίτη τύπου Berea, του οποίου η διαβροχή μεταβλήθηκε από υδατοδιαβρεχτή σε πετρελαιοδιαβρεχτή. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο *πετρελαϊκά* δείγματα από την περιοχή του Πρίνου περιεκτικότητας για το ένα 3-4% και για το δεύτερο 8-9% σε ασφαλτένια. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία¹¹³ η συγκέντρωση των ασφαλτενίων μπορεί να βοηθήσει στην αλλαγή της διαβροχής ενός πετρώματος. Τα βήματα παρατίθενται κατωτέρω και είναι τα εξής :

ΒΗΜΑ 1: Χρησιμοποιήθηκαν 20 ml από το πετρελαϊκό δείγμα και 80 ml διαλύτη τολουολίου.

ΒΗΜΑ 2: Χρησιμοποιήθηκε φίλτρο για μεγέθη κόκκων 20-25 μm με στόχο να διαχωριστούν τυχόν διαλυμένα στερεά που υπήρχαν στο πετρελαϊκό δείγμα.

ΒΗΜΑ 3: Ξεκίνησε η διήθηση του διαλύματος με στόχο την απομάκρυνση των διαλυμένων στερεών, όπου προέκυψε τελικό διάλυμα όγκου 90ml.



Εικόνα 6.1 Αριστερά φαίνεται οι μέθοδοι ογκομέτρησης και διήθησης πετρελαϊκού δείγματος Πρίνου και δεξιά η συνδεσμολογία για την εισπίεση πετρελαϊκού δείγματος στο δειγματοφορέα

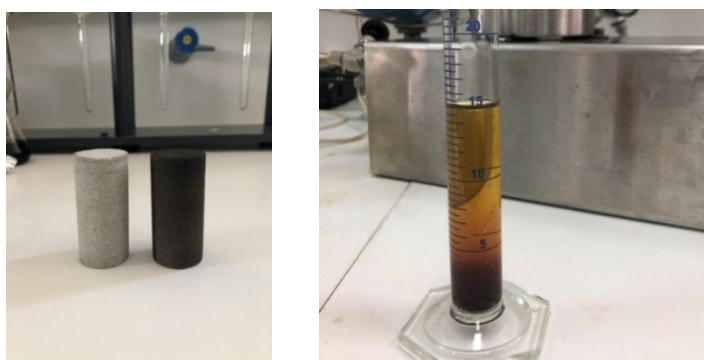
ΒΗΜΑ 4: Εισπιάστηκε η ποσότητα του διαλύματος στον δειγματοφορέα μέσω ειδικού κυλίνδρου με εισπίεση αέρα (ο αέρας εισέρχεται από την κόκκινη βαλβίδα του κυλίνδρου που βρίσκεται στα αριστερά του, πιέζει το πετρελαϊκό διάλυμα το οποίο με τη σειρά του υποχωρεί προς τα κάτω και εισέρχεται στον δειγματοφορέα) (Εικόνα 6.1).

ΒΗΜΑ 5: Αφέθηκε το δοκίμιο για φυσική ξήρανση για 24 ώρες στον πάγκο εργασίας

ΒΗΜΑ 6: Τοποθετήθηκε έπειτα στον φούρνο για 2 ώρες με στόχο την εξάτμιση του διαλύτη

ΒΗΜΑ 7: Τοποθετήθηκε ξανά το δείγμα στο δειγματοφορέα και καθαρίστηκε με ποσότητα περίπου 530mlεξανίου με παροχή $q_0=5\text{ml/min}$ (έχει επιτευχθεί ο ζητούμενος καθαρισμός του δοκιμίου όταν το χρώμα του ρευστού που εξέρχεται από το δειγματοφορέα είναι όμοιο με αυτό του καθαρού εξανίου)

ΒΗΜΑ 8: Ακολούθησε η διαδικασία για προσδιορισμό της διαβροχής με τη μέθοδο Amott και μετέπειτα αφού ο δείκτης Amottήταν εντός των ορίων της πετρελαιοδιαβρεχτής συμπεριφοράς, προσδιορίστηκαν το πορώδες και ο μη περαιτέρω απομακρύνσιμος βαθμός κορεσμού.



Εικόνα 6.2 Στην αριστερή εικόνα φαίνεται η χρωματική διαφορά μεταξύ υδατοδιαβρεχτού και πετρελαιοδιαβρεχτού δοκιμίου και στην εικόνα δεξιά εμφανίζεται το ρευστό που εξέρχεται του δειγματοφορέα κατά τον καθαρισμό του πυρήνα με εισπίεση εξανίου.

6.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΠΡΩΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ 3-4% ΣΕ ΑΣΦΑΛΤΕΝΙΑ

Αφού το δοκίμιο βρίσκεται σε κατάσταση μη περαιτέρω απομακρύνσιμου βαθμού κορεσμού σε νερό, τοποθετείται εντός της συσκευής Amott που είναι πληρωμένη με νερό. Αναποδογυρίζοντας τη συσκευή παρατηρείται η ποσότητα του εξανίου που εκτοπίστηκε αυθόρμητα. Η διαδικασία της αυθόρμητης απορρόφησης νερού διήρκεσε 3 μέρες και η ποσότητα του εξανίου που απομακρύνθηκε ήταν 0,4 ml. ($V_{osp}=0,4\text{ ml}$).



Εικόνα 6.3 Πρώτη φάση πειράματος Amott για προσδιορισμό του περιεχομένου σε νερό, αριστερά αυθόρμητη εκτόπιση εξανίου από νερό και δεξιά η ποσότητα εξανίου μετά από εξαναγκασμένη εκτόπιση από νερό.

Στη συνέχεια το δοκίμιο εισήχθηκε στοδειγματοφορέα και εισπιέστηκε νερό με αντλία, με στόχο να προσδιοριστεί η ποσότητα του εξανίου που εκτοπίστηκε εξαναγκασμένα. ($V_{ofd} = 0,25\text{ml}$).

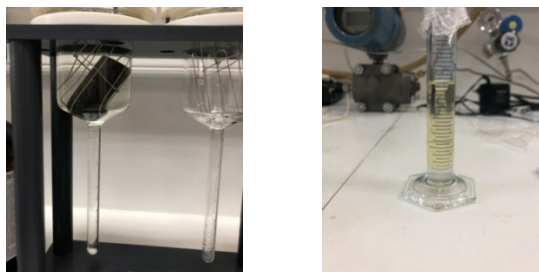
Έτσι λοιπόν προσδιορίζεται το περιεχόμενο σε νερό ως εξής :

$$\delta_w = \frac{V_{osp}}{V_{osp} + V_{ofd}}, \quad (6.2.1)$$

$$= \frac{0,4}{0,4 + 0,25} = \frac{0,4}{0,65} = 0,615$$

$$\delta_w = \frac{\text{αυθόρμητη απορρόφηση εξανίου} = \text{αυθόρμητη εκτόπιση νερού}}{\text{συνολική απορρόφηση εξανίου}(\text{spontaneous} + \text{forced})}, \quad (6.2.2)$$

Μετά τη διαδικασία εισπίεσης νερού μέχρι το σημείου μη περαιτέρω απομακρύνσιμου βαθμού κορεσμού του δοκιμίου σε εξάνιο τοποθετήθηκε στη συσκευή Amottπου ήταν πληρωμένη με εξάνιο για δύο μέρες και προσδιορίστηκε η αυθόρμητη απορρόφηση εξανίου. Από εκεί προέκυψε ότι το $V_{wsp} = 0,2 \text{ ml}$



Εικόνα 6.4 Πρώτη φάση πειράματος για τον προσδιορισμό του περιεχομένου σε εξάνιο, αριστερά αυθόρμητη εκτόπιση νερού και ταυτόχρονη απορρόφηση εξανίου και δεξιά ποσότητα νερού που εξαναγκασμένα εξέρχεται του δειγματοφορέα μετά από εισπίεση εξανίου.

Στην συνέχεια εισήχθηκε το δοκίμιο στο δειγματοφορέα και εξαναγκασμένα εισπιέστηκε εξάνιο μέχρι τον μη περαιτέρω απομακρύνσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό. Έτσι

προσδιορίστηκε η ποσότητα του νερού που εκτοπίστηκε με εξαναγκασμό και βρέθηκε ότι ήταν $V_{wfd}=1,5\text{ml}$.

$$\delta_o = \frac{V_{wsp}}{V_{wsp} + V_{wfd}}, \quad (6.2.3)$$

Έτσι το περιεχόμενο σε εξάνιο να είναι :

$$= \frac{0,2}{0,2 + 1,5} = \frac{0,2}{1,7} = 0,118$$

$$\delta_o = \frac{\text{αυθόρμητη απορρόφηση εξανίου} = \text{αυθόρμητη εκτόπιση νερού}}{\text{συνολική απορρόφηση εξανίου (spontaneous + forced)}}, \quad (6.2.4)$$

$$I = \delta_w - \delta_o, \quad (6.2.5)$$

$$= 0,615 - 0,118 = 0,49$$

Αφού ο δείκτης Amott ισούται με 0,49 σημαίνει ότι η αλλαγή της διαβροχής δεν επιτεύχθει όπως υπολογιζόταν με αποτέλεσμα να πρέπει να επαναληφθεί η μέτρηση με υψηλότερης περιεκτικότητας σε ασφαλτένια πετρελαϊκού δείγματος.

ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ 8,5-9% ΣΕ ΑΣΦΑΛΤΕΝΙΑ

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν σύμφωνα με τα βήματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, τοποθετώντας το δοκίμιο μέσα στη συσκευή Amott που ήταν πληρωμένη με απιονισμένο νερό και παρέμεινε εκεί για 2 ημέρες.



Εικόνα 6.5 Αριστερά εμφανίζεται η αυθόρμητη εκτόπιση εξανίου και ταυτόχρονη απορρόφηση νερού, ενώ δεξιά η εξαναγκασμένη εκτόπιση εξανίου από νερό.

Προσδιορίστηκε ο όγκος του εξανίου που εκτοπίστηκε αυθόρμητα από το νερό.

$$V_{osp} = 0 \text{ ml}$$

Και στο τελικό μέρος του πειράματος προσδιορίστηκε η ποσότητα του εξανίου που εκτοπίστηκε εξαναγκασμένα:

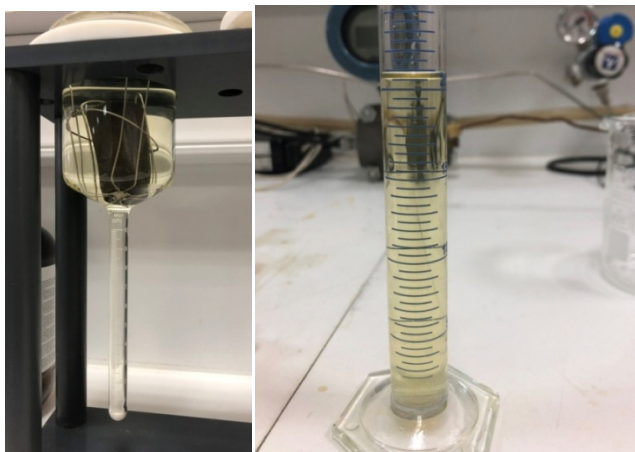
$$V_{ofd} = 1 \text{ ml}$$

$$\delta_w = \frac{V_{osp}}{V_{osp} + V_{ofd}} = \frac{0}{0 + 1} = 0 \text{ ml}$$

Στην δεύτερη φάση του πειράματος το δοκίμιο εμβαπτίστηκε στη συσκευή Amott που ήταν κορεσμένη με εξάνιο και παρέμεινε εκεί για 4 ημέρες.

Η ποσότητα νερού που εκτοπίσθηκε αυθόρμητα από τη φάση του εξανίου ήταν:

$$V_{wsp} = 0,3 \text{ ml}$$



Εικόνα 6.6 Αριστερά εμφανίζεται η αυθόρμητη εκτόπιση νερού και ταυτόχρονη απορρόφηση εξανίου, δεξιά εμφανίζεται η εξαναγκασμένη εκτόπιση νερού από εξάνιο.

Στη συνέχεια προσδιορίστηκε η ποσότητα νερού που εκτοπίστηκε εξαναγκασμένα:

$$V_{wfd} = 0,24 \text{ ml}$$

$$\delta_0 = \frac{V_{wsp}}{V_{wsp} + V_{wfd}} = \frac{0,3}{0,3 + 0,24} = \frac{0,3}{0,54} = 0,555$$

$$I = \delta_w - \delta_0 = 0 - 0,555 = -0,55 \text{ ml}$$

Παρατηρείται λοιπόν ότι η διαβροχή έχει μεταβληθεί^{114, 115} καθώς το τελικό αποτέλεσμα του δείκτη Amott βρίσκεται εντός της περιοχής της πετρελαιοδιαβρεχτής περίπτωσης. - $0,3 < I < -1$

6.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ , ΜΗ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΙΜΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΕ ΝΕΡΟ ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΕ ΕΞΑΝΙΟ

Μετά την αλλαγή της διαβροχής προσδιορίστηκε εκ νέου ο μη περαιτέρω απομακρύνσιμος βαθμός κορεσμού και το πορώδες του πετρώματος.

Οι διαστάσεις του νέου δοκιμίου όπως μετρήθηκαν από τον ηλεκτρονικό βερνιέρο με ακρίβεια 0,001 cm:

μήκος : 5,234cm, διάμετρος:2,540cm

$$BV = \frac{\pi * d^2 * L}{4} = 27,478cm^3, \quad (6.3.1)$$

Μάζα μεμβράνης (gr)	0,391
Μάζα δοκιμίου + μεμβράνης(gr)	64,274
Μάζα τελική (m ₂)(gr) κορεσμένο σε νερό	64,274-0,391=63,883
Μάζα ξηρού δοκιμίου(gr)	58,869

Πίνακας 6.3.1 Αποτελέσματα ζύγισης δοκιμίου

Συνεπώς με παροχή q=1ml/minέγινε κορεσμός με νερό και προσδιορίσθηκε ο όγκος των πόρων σύμφωνα με ότι ειπώθηκε παραπάνω :

$$PV = \frac{63,883 - 58,869}{0,99} = 5,065cm^3 \quad (6.3.2)$$

Αφού έχει βρεθεί ο συνολικός όγκος αλλά και ο όγκος των πόρων, μπορεί να βρεθεί και το πορώδες :

$$\phi = \frac{PV}{BV} = 18,4\% \pm 0,1 \quad (6.3.3)$$

Στη συνέχεια επανατοποθετήθηκε ο πυρήνας στον δειγματοφορέα και εισπιάστηκε εξάνιο μέχρι το σημείο του μη περεταίρω απομακρύνσιμου βαθμού κορεσμού σε νερό και ζυγίστηκε.

Μάζα μεμβράνης (gr)	0,408
Μάζα δοκιμίου+ μεμβράνη(gr)	62,8234
Μάζα@s _{wc} (m ₃) (gr)	62,8234-0,408=62,4149

Πίνακας 6.3.2 Αποτελέσματα ζύγισης δοκιμίου για τον προσδιορισμό του s_{wc}

Για να βρεθεί ο μη περαιτέρω απομακρύνσιμος βαθμός κορεσμού σε νερό:

$$s_{oil} = \frac{m_2 - m_3}{(\rho_w - \rho_o) * PV}, \quad (6.3.4)$$

$$= \frac{63,8833 - 62,4149}{(0,99 - 0,65) * 5,065} = 0,8527 \quad \text{ή} \quad 85,3 \pm 0,1\%$$

$$s_{rw} = 1 - s_{oil}, \quad (6.2.5)$$

$$= 1 - 0,8527 = 0,1473 \quad \text{ή} \quad 14,7 \pm 0,1\%$$

Από το ισοζύγιο μάζας προέκυψε:

$$s_{wc} = \frac{62,4149 - 58,8692 - (5,065 * 0,65)}{(5,065 * (0,99 - 0,65))} = \frac{0,2534}{1,7221} = 0,147 = 14,7 \pm 0,1$$

Συμπερασματικά για τους βαθμούς κορεσμού υπάρχουν αισθητές αλλαγές με τη μεταβολή της διαβροχής, ενώ το πορώδες παραμένει ουσιαστικά το ίδιο.

Υπολειμματικός βαθμός κορεσμού σε εξάνιο :

Προσδιορίστηκαν τα εξής:

m μεμβράνης(gr)	0,3896
m δοκιμίου+μεμβράνη(gr)	63,5653
m @s_{or}(gr)	63,1757

Πίνακας 6.3.3 Αποτελέσματα ζύγισης δοκιμίου για εύρεση του σημείου s_{or}

$$s_{orw} = \frac{m_{τελική} - m_{ξηρού} - (PV * \rho_o)}{PV * (\rho_w - \rho_o)}, \quad (5.4.7)$$

$$= \frac{63,1757 - 58,8692 - (5,0647 * 0,65)}{5,0647 * (0,99 - 0,65)} = \frac{1,014}{1,7219} = 0,589 = 58,9 \pm 0,1\%$$

6.4 ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ OIL-WET

Η διαδικασία που πραγματοποιείται είναι ίδια με εκείνη που ακολουθήθηκε στην υδατοδιαβρεχτή περίπτωση. Προσδιορίζονται οι σχετικές διαπερατότητες και οι αντίστοιχοι βαθμοί κορεσμού σε νερό για κάθε περίπτωση.

	Σημείο (s _{wc})	Αναλογία- εξάνιο/νερό (4/1)	Αναλογία (2,8/1)	Σημείο (s _{orw})
Q_w (ml/sec)	-	0,001	0,001	0,0042
Q_o(ml/sec)	0,042	0,004	0,003	-
p_{eq}.(atm)	15,7	38	40,5	29,6
k_{ew} (mD)	-	0,016	0,022	0,121

$k_{eo} \text{ (mD)}$	0,841	0,023	0,022	
Αναμονή (min)	120	120	100	135
$s_w \text{ (%)}$	14,7	42,3	43,9	58,9

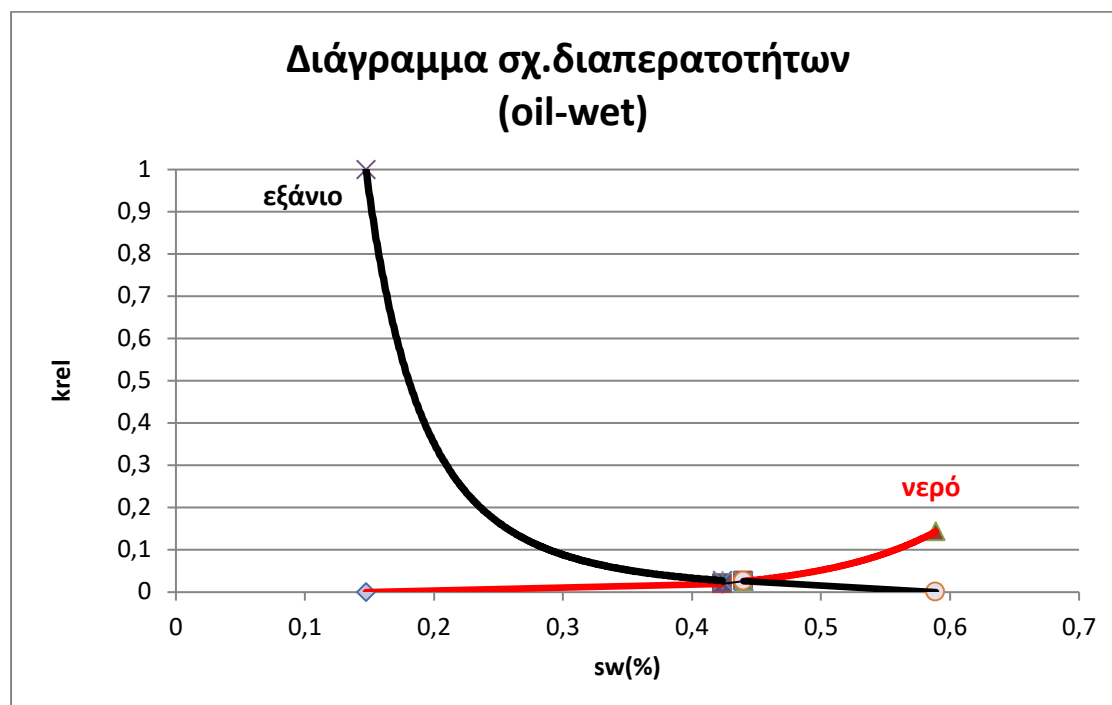
Πίνακας 6.4.1 Αποτελέσματα μετρήσεων για τον προσδιορισμό των ενεργών διαπερατοτήτων

- Χρησιμοποιήθηκε η ενεργός διαπερατότητα του εξανίου στο s_{wc} ($k_{eo}@s_{wc}=0,841\text{mD}$) ως διαπερατότητα αναφοράς, με την οποία διαιρέθηκαν όλες οι τιμές των ενεργών διαπερατοτήτων για να προκύψουν οι σχετικές διαπερατότητες.¹¹⁶.
- Έπειτα προσδιορίστηκαν οι σχετικές διαπερατότητες.

$k_{rw}@s_{wc}(\text{mD})$	0
$k_{ro}@s_{wc} \text{ (mD)}$	1
$k_{rw}@s_{(4/1)}(\text{mD})$	0,019
$k_{ro}@s_{(4/1)}(\text{mD})$	0,028
$k_{ro}@s_{(2,8/1)}=k_{rw}@s_{(2,8/1)}(\text{mD})$	0,026
$k_{rw}@s_{or}(\text{mD})$	0,144
$k_{ro}@s_{or}(\text{mD})$	0

Πίνακας 6.4.2 Σχετικές διαπερατότητες

Τα παραπάνω αποτελέσματα διατυπώνονται στο ακόλουθο γράφημα:



Εικόνα 6.11 Διάγραμμα σχετικών διαπερατοτήτων για πετρελαιοδιαβρεχτή περίπτωση

Όπως παρατηρείται λοιπόν από το γράφημα 6.11 το σημείο μη περαιτέρω απομακρύνσιμου βαθμού κορεσμού σε νερό έχει βαθμό κορεσμού 14,7% και το σημείο τομής των δύο καμπυλών βρίσκεται λίγο πριν το 50% . Αυτά τα δύο στοιχεία υποδηλώνουν πετρελαιοδιαβρεχτό σχηματισμό.

Στον πίνακα 6.4.3 προσδιορίστηκαν οι απόλυτες διαπερατότητες νερού-εξανίου:

	100% νερό	100% εξάνιο
Q_o (ml/sec)	-	0,41
Q_w (mlsec)	0,042	-
p_{eq} (atm)	35,3	5,9
k_{abs} (mD)	1	2,5
Αναμονή (min)	180	100

Πίνακας 6.4.3 Μετρήσεις για τον προσδιορισμό απόλυτων διαπερατοτήτων νερού-εξανίου

Η διαπερατότητα σε νερό σε έναν πετρελαιοδιαβρεχτό σχηματισμό θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερη από ότι η διαπερατότητα σε εξάνιο καθώς το νερό περνάει μέσα από τους μεγάλους πόρους σε αντίθεση με το εξάνιο που περνάει μέσα από τους μικρότερους.

6.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (MOBILITYRATIO)

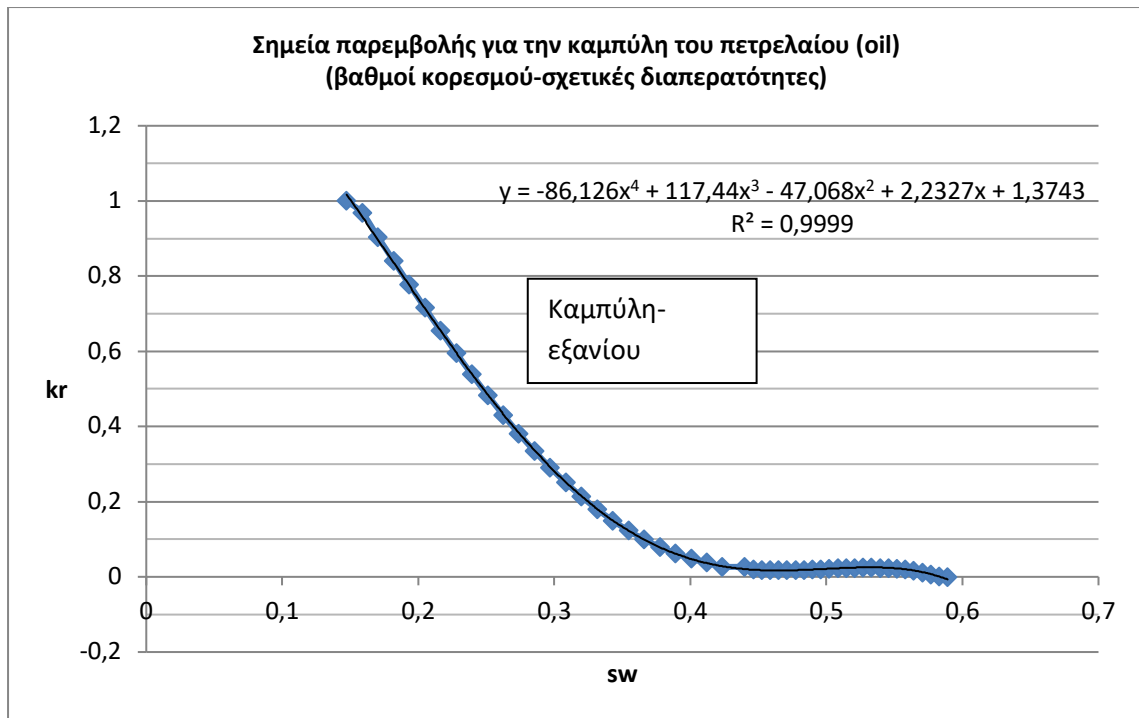
Χρησιμοποιήθηκαν τα σημεία του πίνακα 6.4.2 και με βάση αυτά βρέθηκαν νέα δεδομένα που βρίσκονται εντός του ορίου των τεσσάρων πειραματικών τιμών σύμφωνα με την εξίσωση που τα επαληθεύει (μέθοδος παρεμβολής). Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο (5.8) η διαδικασία είναι ίδια και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

sw	krw	kro	M	χαρακτηρισμός
0,147	0	1	0	favorable
0,159	0,000801	0,967742518	0,00029	favorable
0,170	0,001797	0,904251362	0,00069	favorable
0,182	0,002905	0,840761754	0,00121	favorable
0,193	0,00408	0,777735448	0,00184	favorable
0,205	0,005279	0,715600746	0,00259	favorable
0,216	0,006469	0,654752498	0,00347	favorable
0,228	0,007619	0,595552103	0,00449	favorable
0,239	0,008707	0,538327508	0,00568	favorable
0,250	0,009714	0,483373212	0,00705	favorable
0,262	0,010629	0,430950259	0,00866	favorable
0,274	0,011447	0,381286243	0,01054	favorable
0,285	0,012167	0,334575308	0,01276	favorable
0,297	0,012797	0,290978145	0,01543	favorable
0,308	0,013346	0,250621995	0,01869	favorable

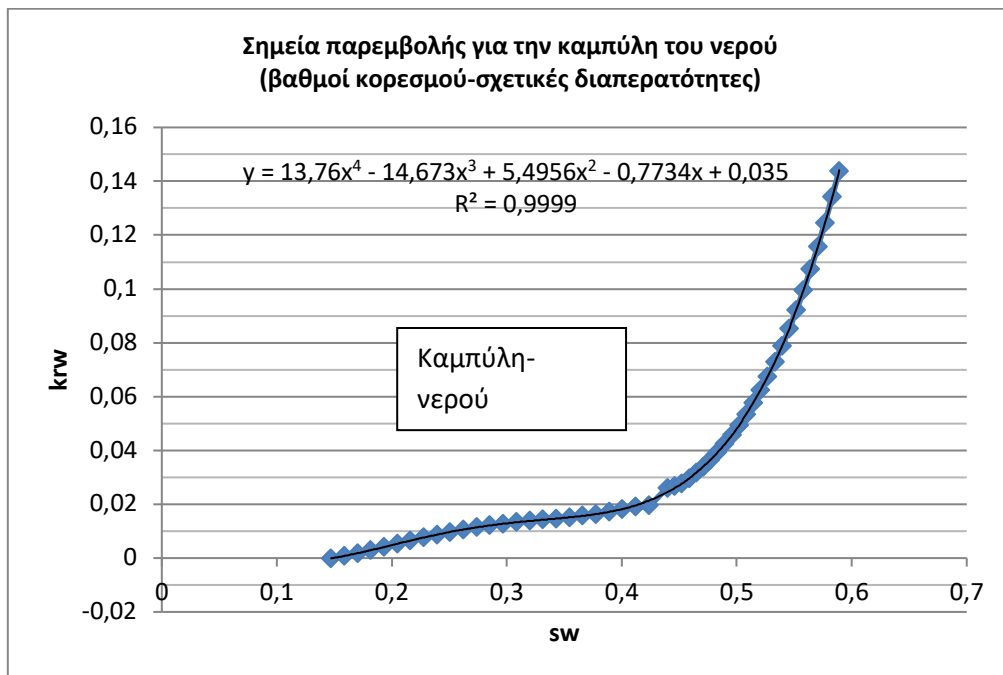
0,319	0,013834	0,213600646	0,02273	favorable
0,331	0,014285	0,179974438	0,02786	favorable
0,343	0,014726	0,149770256	0,03451	favorable
0,354	0,015195	0,122981537	0,04336	favorable
0,366	0,015733	0,099568264	0,05546	favorable
0,377	0,016386	0,07945697	0,07238	favorable
0,389	0,017209	0,062540738	0,09657	favorable
0,400	0,018259	0,048679198	0,13164	favorable
0,412	0,0191	0,037698529	0,17782	favorable
0,423	0,019571	0,027330521	0,25132	favorable
0,439	0,026142	0,026142238	0,35096	favorable
0,446	0,0267	0,019891311	0,47109	favorable
0,452	0,027708	0,018644946	0,52156	favorable
0,458	0,029578	0,017889383	0,58028	favorable
0,465	0,031655	0,017569505	0,63234	favorable
0,471	0,033955	0,01762735	0,67605	favorable
0,477	0,036493	0,018002119	0,71145	favorable
0,483	0,039286	0,01863017	0,74009	favorable
0,489	0,042352	0,01944502	0,76441	favorable
0,496	0,045707	0,020377344	0,78722	favorable
0,502	0,04937	0,02135498	0,81139	favorable
0,508	0,05336	0,02230292	0,83969	favorable
0,514	0,057696	0,023143318	0,87495	favorable
0,520	0,062397	0,023795488	0,92030	favorable
0,527	0,067483	0,024175899	0,97966	favorable
0,533	0,072975	0,024198184	1,05841	unfavorable
0,539	0,078894	0,02377313	1,16472	unfavorable
0,545	0,085262	0,022808687	1,31195	unfavorable
0,552	0,0921	0,021209963	1,52399	unfavorable
0,558	0,099432	0,018879224	1,84844	unfavorable
0,564	0,10728	0,015715895	2,39577	unfavorable
0,570	0,115669	0,011616562	3,49463	unfavorable
0,577	0,124621	0,006474967	6,75488	unfavorable
0,583	0,134162	0,000182015	258,694	unfavorable
0,589	0,143782	0	-	-

Πίνακας 6.5.1 Προσδιορισμός συντελεστή κινητικότητας

Από τα στοιχεία του πίνακα 6.5.1 προκύπτουν τα εξής:

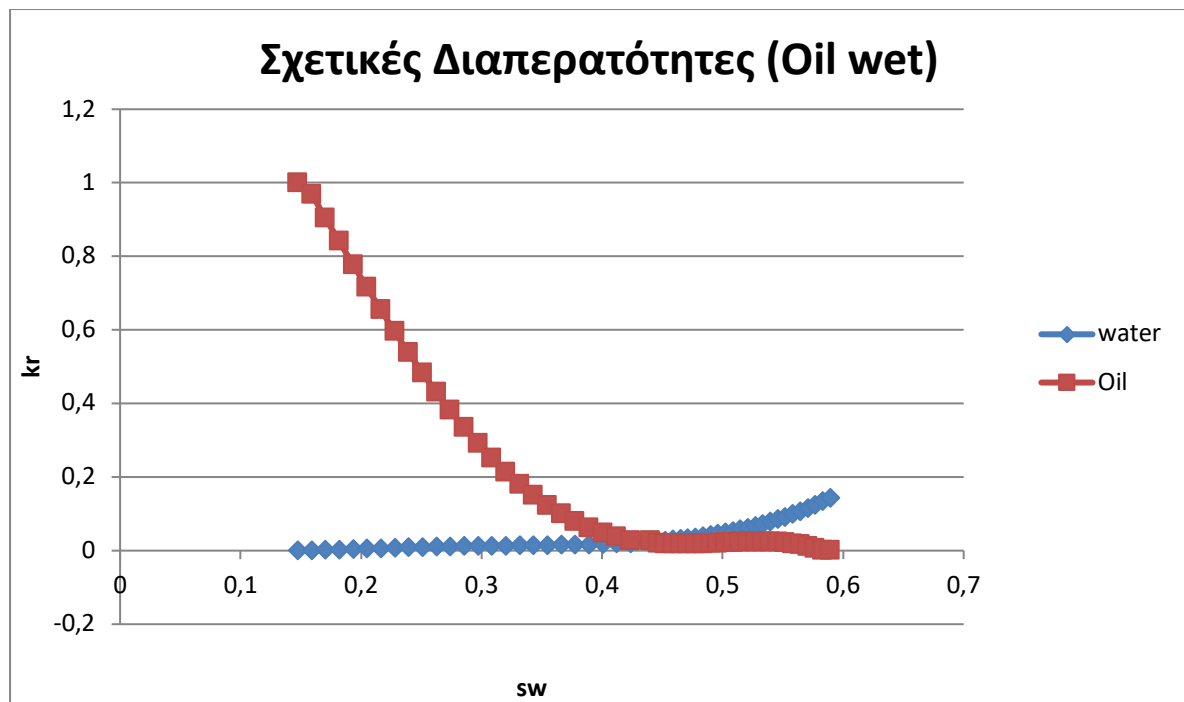


Εικόνα 6.12 Διάγραμμα σχετικών διαπερατοτήτων για εξάνιο



Εικόνα 6.13 Διάγραμμα σχετικών διαπερατοτήτων για νερό

Συνδυάζοντας τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει το συνολικό διάγραμμα σχετικών διαπερατοτήτων.



Εικόνα 6.14 Συνολικό διάγραμμα σχετικών διαπερατοτήτων

Συμπερασματικά λοιπόν, συγκριτικά με την υδατοδιαβρεχτή περίπτωση είναι μεγαλύτερο το εύρος στο οποίο εμφανίζονται τιμές του συντελεστή κινητικότητας μεγαλύτερες της μονάδας με αποτέλεσμα να θεωρείται η διαδικασία 'unfavorable' πράγμα που αποδεικνύει ότι το ρευστό που εκτοπίζει είναι περισσότερο ευκίνητο από το ρευστό που εκτοπίζεται.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- i. Το επικρατέστερο ορυκτό του ψαμμιτικού πετρώματος τύπου Berea, σύμφωνα με την ορυκτολογική ανάλυση ήταν ο χαλαζίας, με σημαντική ποσότητα αργιλικών ορυκτών τα οποία υποβιβάζουν τη διαπερατότητα του σχηματισμού. Το πέτρωμα αποτελείται ως επί το πλείστον από κόκκους διαμέτρου $<10\mu\text{m}$.
- ii. Η διαπερατότητα Klinkenberg ακολουθεί φθίνουσα πορεία καθώς αυξάνεται η πίεση υπερκειμένων παίρνοντας την ελάχιστη τιμή της (11,4mD) στην μέγιστη πίεση υπερκειμένων που ασκήθηκε στο πέτρωμα (200bar).
- iii. Η μέθοδος Amott αποτελεί μια αποτελεσματική και άμεση μέθοδο προσδιορισμού της διαβροχής σε κλίμακα εργαστηριακών πειραμάτων.
- iv. Για να μεταβληθεί η διαβροχή του πετρώματος ήταν αποτελεσματική η χρήση πετρελαϊκού δείγματος περιεκτικότητας 8,5-9% σε ασφαλτένια, καθώς ο δείκτης Amott (I) για την υδατοδιαβρεχτή περίπτωση μετρήθηκε ίσος με 0,75 ενώ μετά την αλλαγή της διαβροχής προέκυψε ότι $I=-0,55$ που αποτελεί ένδειξη πετρελαιοδιαβρεχτού δοκιμίου.
- v. Μεταβάλλοντας τη διαβροχή του πετρώματος παρατηρήθηκαν οι εξής διαφορές στις καμπύλες σχετικών διαπερατοτήτων:
 - Το σημείο s_{wc} (μη περαιτέρω απομακρύνσιμος βαθμός κορεσμού σε νερό) από 22,1% για την υδατοδιαβρεχτή περίπτωση μειώθηκε σε 14,7% για την πετρελαιοδιαβρεχτή.
 - Το σημείο τομής των καμπυλών των σχετικών διαπερατοτήτων νερού-πετρελαίου μπορεί να αποτελέσει ένδειξη διαβροχής για ένα δοκίμιο. Κάτι τέτοιο επιβεβαιώθηκε στην παρούσα μελέτη καθώς, για το υδατοδιαβρεχτό δοκίμιο βρέθηκε στο 53,9% μετά του 50% των βαθμών κορεσμού σε νερό, ενώ στην πετρελαιοδιαβρεχτή περίπτωση το σημείο τομής βρέθηκε στο 43,9% πριν του 50% των βαθμών κορεσμού σε νερό.
 - Οι καμπύλες των σχετικών διαπερατοτήτων νερού-πετρελαίου εμφάνισαν μετατόπιση προς τη δεξιά πλευρά του γραφήματος για την υδατοδιαβρεχτή περίπτωση ενώ προς την αριστερή για την πετρελαιοδιαβρεχτή περίπτωση
 - Επίσης μειώνοντας την τάση διαβροχής σε νερό παρατηρήθηκε ότι μειώνεται και η σχετική διαπερατότητα σε εξάνιο για ένα δεδομένο βαθμό κορεσμού σε νερό σύμφωνα με τους Πίνακες 5.7.2- 6.4.2.
- vi. Τέλος ο συντελεστής κινητικότητας στην υδατοδιαβρεχτή περίπτωση εμφανίζει περισσότερες τιμές (M) στις οποίες ενδείκνυται η μέθοδος της εκτόπισης ($M < 1$ favorable).
- vii. Συνεπώς όταν ένας σχηματισμός είναι υδατοδιαβρεχτός ευνοείται περισσότερο η εκτόπιση εξανίου από εισπιεζόμενο νερό.

ΠΡΟΤΑΣΗ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Καθώς η μεταβολή της διαβροχής πραγματοποιήθηκε μόνο με έναν τρόπο αυτόν της εισπίεσης πετρελαϊκού δείγματος υψηλής συγκέντρωσης σε ασφαλτένια, σε μετέπειτα μελέτες θα μπορούσαν να εξεταστούν περαιτέρω τρόποι μεταβολής της διαβροχής. Επίσης ο προσδιορισμός της διαβροχής έγινε μόνο με τη μέθοδο Amott. Μελλοντικά θα μπορούσε να μετρηθεί η διαβροχή με διάφορες μεθόδους και να συγκριθούν μεταξύ τους οι τεχνικές προκειμένου να αποδοθεί εκείνη που είναι πιο γρήγορη, αξιόπιστη και οικονομική.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties. Abhijit Y. Dandekar, second edition, σελ.1-3.
2. Γεωχημεία πετρελαίου, Πασαδάκης Νίκος σελ.78-79
3. Γεωχημεία Πετρελαίου, Πασαδάκης Νικόλαος 2015, σελ.84
4. Γεωλογία πετρελαίου, Πανεπιστήμιο Πατρών, σελ.21
5. Γεωχημεία Πετρελαίου, Πασαδάκης Νικόλαος 2015, σελ.85
6. Γεωχημεία του Πετρελαίου, Πασαδάκης Νικόλαος, 2015, 66-77, 82-85
7. Experiments of primary migration of oil from source rock, JIN Ming, XIA Yanqing, LEI Tianzhu, MA Suping, Introduction
8. Γεωλογία πετρελαίου, Πανεπιστήμιο Πατρών

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

9. Βαρότσης Νικόλαος, Εκμετάλλευση Ταμιευτήρων, Πολυτεχνείο Κρήτης Χανιά σελ.57
10. Χριστόπουλος Διονύσης Στατιστική και Πιθανότητες για Μηχανικούς, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά Επεξήγηση *a priori* : Ο κλασικός ορισμός που χρησιμοποιείται όταν οι καταστάσεις του δειγματικού χώρου είναι μετρήσιμες
11. Wettability studies at the pore level: A new approach by use of Cryo-SEM, Michel robin, SPE E.Rosenberg, Inst.Francais du Petrole and Omar Fassi-Fihri σελ.13-14
12. Salathiel, R.A., Oil recovery by surface film drainage in mixed-wettability rocks, Journal of Petroleum Technology, 25, 1216–1224, 1973
13. Fractional wettability effects on two and three fluid capillary pressure-saturation relation, Scott A. Bradford, Feike J. Leij
14. Wettability Erle C. Donaldson and Waqi Alam Gulf σελ.3
15. Fundamentals of Wettability, Wael Abdallah Edmonton, Alberta, Canada Jill S. Buckley New Mexico Petroleum Recovery Research Center Socorro, New Mexico, USA Andrew Carnegie Kuala Lumpur, Malaysia John Edwards Bernd Herold Muscat, Oman Edmund Fordham Cambridge, England Arne Graue University of Bergen Bergen, Norway Tarek Habashy Nikita Seleznev Claude Signer Boston, Massachusetts, USA Hassan Hussain Petroleum Development Oman Muscat, Oman Bernard Montaron Dubai, UAE Murtaza Ziauddin Abu Dhabi, UAE
16. Προσδιορισμός Διαβρεχτότητας Δοκιμίων Του Ταμιευτήρα Πρίνος, Χανιά, Νοέμβριος 1996 σελ.7
17. Εκμετάλλευση Ταμιευτήρων, Καθηγητής Νικόλαος Βαρότσης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2017, Χανιά σελ.74
18. Γενική Χημεία, Μιχαήλ Ι. Κονσολάκης σελ.246
19. Γενική Χημεία Θεωρία και Εφαρμογές Μιχαήλ Ι. Κονσολάκης, Χανια σελ.247/9

20. Wettability Erle Donaldson and Waqi Alam σελ.129
21. Wettability Erle Donaldson and Waqi Alam σελ.122
22. Wettability Erle Donaldson and Waqi Alam(Janhunandon and Morrow 1995) σελ. 138
23. Waterflooding of carbonate reservoirs EOR by wettability alteration Doctorial Thesis by Tina Puntervold σελ.2
24. Wettability Erle C. Donaldson and WaqiAlamGulf σελ.13-14,129, 175, 227
25. Wettability , Erle Donaldson and WaqiAlamσελ.8
26. Εκμετάλλευση Ταμιευτήρων Καθηγητής Νικόλαος Βαρότσης σελ. 59
27. Petrophysics Theory and Practice of Measuring reservoir rock and fluid transport properties Djebbar Tiab , Erle C. Donaldson σελ. 320
28. Wettability Erle Donaldson σελ.10
29. Wettability Erle Donaldson σελ.8
30. Μηχανική Πετρελαίων Κεφάλαιο 6
31. Εκμετάλλευση Ταμιευτήρων Σημειώσεις Καθηγητής Βαρότσης Νικόλαος σελ.64
32. Petrophysics Theory and Practice of Measuring reservoir rock and fluid transport properties Djebbar Tiab , Erle C. Donaldson σελ. 40
33. Experimental investigation of wettability alteration on residual oil saturation using nonionic surfactants : Capillary Pressure Measurement, Masoud Amirpour, Seyed Reza Shadizadeh, Hamid Esfandiyari, Saeid Ahmadi, KeAi σελ.293
34. Purcell, W.R. 1949. Capillary pressures—Their Measurement Using Mercury and the Calculation of Permeability Therefrom. JPet Technol 1 (2): 39-48. SPE-949039-G.
35. Εκμετάλλευση ταμιευτήρων Σημειώσεις Βαρότσης Νικόλαος σελ.83-84
36. Advances in Asphaltene Science and the Yen-Mullins Model
37. Review of the Molecular Structure and Aggregation of Asphaltenes and Petroleomics σελ.1
38. Γεωχημεία Πετρελαίου, Πασαδάκης Νικόλαος
39. Γεωχημεία Πετρελαίου, Πασαδάκης Νικόλαος
40. A review on methods of determining onset of asphaltene precipitation, Soleymanzadeh, Yousefi, Kord, Mohammadzadeh, 2018, production engineering Wettability alteration due to asphaltene deposition in oil reservoirs ,Hamed Arabi, Kami Sepehrnoury, and Mohamand Hosein Kalaei, SPE σελ.1
41. Διπλωματική εργασία Δημήτριος Ευαγ. Πέππας, Προσδιορισμός ιδιοτήτων διαβροχής μεταλλικών επιφανειών σελ.30, Wettability Erle C. Donaldson and Waqi Alam Gulf, σελ.138 σελ.232
42. ΠΗΓΗ: Effect of rock and wettability heterogeneity on the efficiency of WAG flooding in carbonate reservoir, M.O Ahmed Eifeel, SPE, A.Al-Dhahli, SPE, Z.Jiang, SPE, S.Geiger, M.I van Dijke, Heriot-Watt, University, 2013 SPE σελ.10

43. Working guide to reservoir rock properties and fluid flow Tarek Ahmed
σελ.65
44. Εκμετάλλευση ταμειυτήρων Σημειώσεις Καθηγητής Βαρότσης Νικόλαος σελ.7-8,
WORKING GUIDE TO RESERVOIR ROCK PROPERTIES AND FLUID FLOW σελ.65
Κεφάλαιο 1
45. Διπλωματική Εργασία με Θέμα: “Πετρελαϊκά Συστήματα και Έρευνες
Υδρογονανθράκων – Το Παράδειγμα της Δυτικής Ελλάδας ” TZANABAPH
ΙΩANNA , ΜΑΚΡΗ ΒΑΓΙΑ – ΙΩANNA, Αθήνα 2017 Σελ.23
46. Διπλωματική Εργασία ” TZANABAPH ΙΩANNA , ΜΑΚΡΗ ΒΑΓΙΑ – ΙΩANNA
47. Petrophysics Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid
Transport Properties, Fourth Edition ,Djebbar Tiab and Erle C. Donaldson σελ
67-71
48. Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties Abhijit y. Dandekar second
edition σελ.19
49. Petrophysics Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid
Transport Properties Fourth Edition Djebbar Tiab Erle C. Donaldson, σελ.68
50. Petrophysics Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid
Transport Properties, Fourth Edition ,Djebbar Tiab and Erle C. Donaldson σελ.
69
51. Petrophysics Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid
Transport Properties, Fourth Edition ,Djebbar Tiab and Erle C. Donaldson σελ.
70
52. Petrophysics Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid
Transport Properties Fourth Edition Djebbar Tiab Erle C. Donaldson σελ.86
53. Petrophysics, Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid
Transportation Properties , Fourth Edition, Djebbar Tiab, Erle C. Donaldson
σελ.82/87
54. Εκμετάλλευση ταμειυτήρων Καθηγητής Βαρότσης Νικόλαος σελ.67
55. Relative permeability of petroleum reservoirs, Mehdi Honarpour, Leonard
Koederitz, A. Herbert Harvey σελ.45-49
56. Relative permeability of petroleum reservoirs, Mehdi Honarpour, Leonard
Koederitz, A. Herbert Harvey, σελ.67
57. Εκμετάλλευση ταμειυτήρων, Καθ. Βαρότσης Νικόλαος, Πολυτεχνείο Κρήτης
σελ.72
58. Εκμετάλλευση Ταμειυτήρων, Καθηγητής Βαρότσης Νικόλαος, σελ. 72

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

59. Science Based Solutions LLC A Review of the Measurement of Wettability
Based on a report for Sandia National Laboratory Geoffrey Thyne PhD σελ.5
60. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/sessile-drop-method>
61. Fundamentals of Wettability, Wael Abdallah ,Jill S. Buckley Andrew Carnegie,
John Edwards Bernd Herold , Edmund Fordham, Arne Graue, Tarek Habashy
Nikita Seleznev, Claude Singer , Hassan Hussain, Bernard Montaron , Murtaza
Ziauddin

62. Bioein Scientific Enhanced oil recovery, How to measure the wettability of carbonate reservoir core
63. Formation Evaluation MSc Course Notes Wettability Dr. Paul Glover Page 76 Chapter 7: Wettability
64. Wettability Literature SurveyPart 2: Wettability Measurement William G. Anderson, SPE, Conoco Inc.σελ. 1251
65. https://wiki.aapg.org/Wettability/Contact_angle_measurements
66. Morse, R. A., Terwilliger,P. L, and Yuster, S.T., Relative permeability measurements on small samples,Oil Gas J., 46,109,,1947
67. Hassler,G.L., U.S Patent 2,345,935, 1955
68. Gates, J. I. and Leitz, W. T., Relative permeabilities of California cores by the capillary-pressure method, Drilling and Production Practices, American Petroleum Institute, Washington, D.C. 1950, 285
69. Richardson, J.G., Kerver, J.K, Hafford, J.A., and Osoba, J.S, Laboratory determination of relative permeability,Trans, 195,187, 1952
70. Relative permeability of petroleum reservoirs, Mehdi Honarpour, Leonard Koederitz, A.Herbert Harvey σελ.1-7
71. Relative permeability of petroleum reservoirs Mehdi Honarpour, Leonard Koederitz, A. Herbert Harvey σελ.6
72. Relative permeability of petroleum reservoirs Mehdi Honarpour, Leonard Koederitz, A. Herbertσελ.7
73. https://petrowiki.spe.org/Measurement_of_capillary_pressure_and_relative_permeability

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

72. ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑ, ΘΕΟΔΩΡΙΚΑΣσελ.745,754,758,762,785
73. **Berea Sandstone™ Petroleum Cores**
74. Vinci technologies, laboratory instruments and sensors
75. ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣΜΗΧΑΝΙΚΗΣΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ , ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ-ΛΙΟΛΙΟΣ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΧΑΝΙΑ
76. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ,ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ,ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΤΡΟΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΑΜΜΙΤΩΝ ΤΟΥ ΝΕΟΓΕΝΟΥΣ (ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ, ΜΕΣΣΑΡΑ, ΚΡΗΤΗ)ΣΠΑΝΤΙΔΑΚΗΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ, ΣΕΛ.57-59, ΧΑΝΙΑ, 2017
77. ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΑΚΤΙΝΩΝΧ, X - RAY DIFFRACTION: INSTRUMENTATION AND APPLICATIONS ANDREI A. BUNACIUA , ELENA GABRIELA UDRIȘTIOIU & HASSAN Y. ABOUL-ENEIN
78. Γενική Ορυκτολογία, Γ.ΚΩΣΤΑΚΗ, Πολυτεχνείο Κρήτης σελ.268
79. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ (XRD) ΚΑΙ ΣΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ - ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM), ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΜΑΖΩΝ ΑΠΟ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ ΤΟΥ ΑΗΣ ΛΙΠΤΟΛ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΙΛΤΡΩΝ. ΜΑΡΑΚΗΣ Θ. ΙΩΑΝΝΗΣ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΧΑΝΙΑ, 2012, ΣΕΛ.36

80. ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ « ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ - ΟΡΥΚΤΟΧΗΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΠΑΛΥΓΚΟΡΣΚΙΤΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΒΕΝΤΖΙΩΝ ΓΡΕΒΕΝΩΝ» ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Δ. ΒΛΑΜΙΔΗΣ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2009, ΧΑΝΙΑ, ΣΕΛ.19-20,39
81. ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΙ ΜΝΗΜΕΙΩΝ σελ.36
82. ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ « ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ - ΟΡΥΚΤΟΧΗΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΠΑΛΥΓΚΟΡΣΚΙΤΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΒΕΝΤΖΙΩΝ ΓΡΕΒΕΝΩΝ» ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Δ. ΒΛΑΜΙΔΗΣ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2009, ΧΑΝΙΑ, ΣΕΛ.19-20,39
83. ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ, ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΜΑΖΩΝ ΑΠΟ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ ΤΟΥ ΑΗΣ ΛΙΠΤΟΛ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΙΛΤΡΩΝ. ΜΑΡΑΚΗΣΘ. ΙΩΑΝΝΗΣ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΚΡΗΤΗΣ,2012
84. PREDICTION OF ROCK ELECTRICAL CONDUCTIVITY FROM MERCURY INJECTION MEASUREMENTS A. J. KATZ AND A. H. THOMPSON EXXON PRODUCTION RESEARCH COMPANY, HOUSTON, TEXAS
85. ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ MICROMERTICS, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΧΑΝΙΑ
86. PREDICTION OF ROCK ELECTRICAL CONDUCTIVITY FROM MERCURY INJECTION MEASUREMENTS A. J. KATZ AND A. H. THOMPSON
87. ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΒΑΡΟΤΣΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΧΑΝΙΑ
88. ΠΗΓΗ:ΕΚΠΑΤΜΗΜΑΧΗΜΕΙΑΣ (Jupiter.chem.uoc)
89. An Introduction To The Physical Characterization of Materials by Mercury Intrusion Porosimetry with Emphasis On Reduction And Presentation of Experimental Data
90. ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ, Δρ ΜΑΡΙΝΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
91. Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties second edition Abhijit Y. Dandekar sel.221
92. ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ, Δρ ΜΑΡΙΝΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
93. WETTABILITY ERLE C. DONALDSON AND WAQI ALAM, ΣΕΛ.25
94. PETROLEUM RESERVOIR ROCK AND FLUID PROPERTIES SECOND EDITION ABHIJIT Y. DANDEKAR, ΣΕΛ.143-147
95. EFFECT OF SHAPE FACTOR, IFT AND AMOTT METHOD DERIVED WETTABILITY ON THE IMBIBITION PROCESS SHAWKET GHEDAN, SPE, C. HAKAN CANBAZ, SPE, AND BECHIR MTAWAA, SPE, THE PETROLEUM INSTITUTE COPYRIGHT 2009, INTERNATIONAL PETROLEUM TECHNOLOGY CONFERENCE
96. THE EFFECT OF FORMATION WATER COMPOSITION ON THE WETTABILITY ESTABLISHED BETWEEN CARBONATE ROCKS AND CRUDE OIL” SMARAGDA-MARIA ARGYRI TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE, GREECE (IN SYNERGY

- WITH THE UNIVERSITY OF STAVANGER, NORWAY) ΣΕΛ.44,
ΛΙΑΚΟΠΟΥΛΟΣΧΡΗΣΤΟΣ, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΕΡΓΑΣΙΑ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΚΡΗΤΗΣ,
ΧΑΝΙΑ, ΣΕΛ.46
97. EXPERIMENTAL COMPARISON FOR THE CALCULATION OF ROCK WETTABILITY USING THE AMOTT-HARVEY METHOD AND A NEW VISUAL METHOD σελ.9
 98. WORKING GUIDE TO RESERVOIR ROCK PROPERTIES AND FLUID FLOW TAREK AHMED, ΣΕΛ.71, L. J. KLINKENBERG, THE PERMEABILITY OF POROUS MEDIA TO LIQUIDS AND GASES
 99. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΛΑΣΣΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΥΡΗΝΩΝ Καθ. Νικόλαος Βαρότσης σελ.15
 100. KLINKENBERG EFFECT FOR GAS PERMEABILITY AND ITS COMPARISON TO WATER PERMEABILITY FOR POROUS SEDIMENTARY ROCKS W. TANIKAWA¹ AND T. SHIMAMOTO, 2006
 101. ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΒΑΡΟΤΣΗΣ, ΜΑΡΙΝΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΧΑΝΙΑ
 102. WATARU TANIKAWA, TOSHIHIKO SHIMAMOTO, COMPARISON OF KLINKENBERG-CORRECTED GAS PERMEABILITY AND WATER PERMEABILITY IN SEDIMENTARY ROCKS, 2009.
 103. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΛΑΣΣΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΥΡΗΝΩΝ Καθ. Νικόλαος Βαρότσης σελ.15
 104. Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties second edition Abhijit Y. Dandekar σελ. 220
 105. Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties second edition Abhijit Y. Dandekar Σελ. 222
 106. Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties second edition Abhijit Y. Dandekar Σελ. 222
 107. RELATIVE PERMEABILITY OF PETROLEUM RESERVOIRS AUTHORS MEHDI HONARPOUR ASSOCIATE PROFESSOR OF PETROLEUM ENGINEERING DEPARTMENT OF PETROLEUM ENGINEERING MONTANA COLLEGE OF MINERAL SCIENCE AND TECHNOLOGY BUTTE, MONTANA LEONARD KOEDERITZ A. HERBERT HARVEY σελ.45
 108. WETTABILITY LITERATURE SURVEYPART 5: THE EFFECTS OF WETTABILITY ON RELATIVE PERMEABILITY WILLIAM G. ANDERSON, * SPE, CONOCO INC
 109. Introduction to petroleum engineering John r. Fanchi and Richard I. Christiansen,σελ.90-95
 110. Introduction to petroleum engineering John r. Fanchi and Richard I. Christiansen,σελ.90-95

111. Wettability Alteration at Elevated Temperatures: The Consequences of Asphaltene Precipitation M. Escrochi, SPE, M. Nabipour, SPE, Sh. Ayatollahi, SPE, and N. Mehranbod, Shiraz University.
112. WETTABILITY ALTERATION AT ELEVATED TEMPERATURES: THE CONSEQUENCES OF ASPHALTENE PRECIPITATION M. ESCROCHI, SPE, M. NABIPOUR, SPE, SH. AYATOLLAHI, SPE, AND N. MEHRANBOD, SHIRAZ UNIVERSITY. WETTABILITY CHANGES INDUCED BY ADSORPTION OF ASPHALTENES, JIENIAN JAN, HENRY PLANCER, N.R MORROW, SPE, OF WYOMING. EXPERIMENTAL STUDY OF WETTABILITY ALTERATION TO PREFERENTIAL GAS-WETTING IN POROUS MEDIA AND ITS EFFECTS KEWEN LI,* SPE, AND ABBAS FIROOZABADI, SPE, RESERVOIR ENGINEERING RESEARCH INST.
113. WETTABILITY ALTERATION AT ELEVATED TEMPERATURES: THE CONSEQUENCES OF ASPHALTENE PRECIPITATION M. ESCROCHI, SPE, M. NABIPOUR, SPE, SH. AYATOLLAHI, SPE, AND N. MEHRANBOD, SHIRAZ UNIVERSITY. WETTABILITY CHANGES INDUCED BY ADSORPTION OF ASPHALTENES, JIENIAN JAN, HENRY PLANCER, N.R MORROW, SPE, OF WYOMING. EXPERIMENTAL STUDY OF WETTABILITY ALTERATION TO PREFERENTIAL GAS-WETTING IN POROUS MEDIA AND ITS EFFECTS KEWEN LI,* SPE, AND ABBAS FIROOZABADI, SPE, RESERVOIR ENGINEERING RESEARCH INST.
114. The Effect of Formation Water Composition on the Wettability Established Between Carbonate Rocks and Crude Oil” Smaragda-Maria Argyri Technical University of Crete, Greece (in synergy with the University of Stavanger, Norway

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΡΑΦΟ 5.1-5.2: ΤΜΗΜΑ ΜΕΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΓΕΩΧΗΜΕΙΑΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ (XRD) ΚΑΙ ΣΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ - ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM) ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

Ι.Α. ΣΤΡΑΤΗ, Δ.Γ. ΘΕΜΕΛΗ, Γ.Α. ΖΑΧΑΡΙΑΔΗ, Α.Ν. ΑΝΘΕΜΙΔΗ, Α.Σ. ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ, «ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΙΙ», ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2004, ΚΕΦ. 4

INTRODUCTION TO X-RAY POWDER DIFFRACTION DATA ANALYSIS SCOTT A SPEAKMAN, PH.D. CENTER FOR MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING AT MIT

D.A. SKOOG, F.J. HOLLER, T.A. NIEMAN «ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΕΝΟΡΓΑΝΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ», ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΩΣΤΑΡΑΚΗ, ΑΘΗΝΑ, 2002, ΚΕΦ. 12 ΚΑΙ 21

ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΡΑΦΟ 5.3: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΙΚΗ ΥΛΙΚΩΝ 7Ο ΕΞΑΜΗΝΟ Χ-Μ ΕΜΠ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΟΔΗΓΟΣ ΕΜΠ, 2017

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΜΑΖΩΝ ΑΠΟ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ ΤΟΥ ΑΗΣ ΛΙΠΤΟΛ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΙΛΤΡΩΝ. ΜΑΡΑΚΗΣ Θ. ΙΩΑΝΝΗΣ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΧΑΝΙΑ 2012, ΣΕΛ. 48

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΠΟΣΟΣΤΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΣΕ ΠΑΣΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΙΣΤΟΥ, ΜΑΡΓΑΡΙΤΑ ΜΠΕΑΖΗ ΚΑΤΣΙΩΤΗ ΠΙΚ.

ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΣΧΟΛΗΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΜΠ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ ΠΙΠΛΙΚΑΚΗ ΧΗΜΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ, ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΜΠ ΜΙΧΑΛΗΣ ΦΑΡΔΗΣ ΔΡ. ΦΥΣΙΚΟΣ. ΕΚΕΦΕ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΥΛΙΚΩΝ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΑΠΑΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΥΛΙΚΩΝ ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΔΡ. ΧΗΜΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ, Α.Ε. ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΤΙΤΑΝ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΧΑΝΙΩΤΑΚΗΣ ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ Α.Ε. ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΤΙΤΑΝ

AN INTRODUCTION TO THE PHYSICAL CHARACTERIZATION OF MATERIALS BY MERCURY INTRUSION POROSIMETRY WITH EMPHASIS ON REDUCTION AND PRESENTATION OF EXPERIMENTAL DATA, PAUL A. WEBB MICROMERITICS INSTRUMENT CORP. NORCROSS, GEORGIA JANUARY 2001

A NEW GENERALIZED EQUATION FOR ESTIMATION OF SANDSTONE AND CARBONATE PERMEABILITY FROM MERCURY INTRUSION POROSIMETRY DATA

STATISTICAL SYNTHESIS OF IMAGING AND POROSIMETRY DATA FOR THE CHARACTERIZATION OF MICROSTRUCTURE AND TRANSPORT PROPERTIES OF SANDSTONES E. S. AMIRTHARAJ · M. A. IOANNIDIS · B. PARKER · C. D. TSAKIROGLOU

INTERPRETATION OF MERCURY POROSIMETRY DATA USING A PORE-THROAT NETWORK MODEL G.R. LAPIDUS A, A.M. LANE A, K.M. NG A & W.C. CONNER A A CHEMICAL

ENGINEERING DEPARTMENT , UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS , AMHERST, MA, 01003
PUBLISHED ONLINE: 24 OCT 2007.

ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΡΑΦΟ 5.4: ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ
ΠΟΡΩΝ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ,ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ,ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΤΡΟΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΑΜΜΙΤΩΝ ΤΟΥ
ΝΕΟΓΕΝΟΥΣ(ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ,ΜΕΣΣΑΡΑ,ΚΡΗΤΗ), ΣΠΑΝΤΙΔΑΛΗΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ, ΣΕΛ. 60,
ΧΑΝΙΑ 2017

PETROPHYSICS THEORY AND PRACTICE OF MEASURING RESERVOIR ROCK AND FLUID
TRANSPORT PROPERTIES FOURTH EDITION DJEBBAR TIAB ERLE C. DONALDSON , ΣΕΛ.67-76

WORKING GUIDE TO RESERVOIR ROCK PROPERTIES AND FLUID FLOW TAREK AHMED,
ΣΕΛ.32-38

ΓΕΝΙΚΑΓΙΑΤΗΝΠΑΡΑΓΡΑΦΟ 5.5: CHARACTERIZATION OF WETTABILITY FROM SPONTANEOUS
IMBIBITION MEASUREMENTS, S.M. MA EXXON PRODUCTION RESEARCH COMPANY X. ZHANG TEXACO
E AND P, N.R. MORROW University of Wyoming X. ZHOU Westport Technology Centre International

AMOTT, E., "OBSERVATIONS RELATING TO THE WETTABILITY OF POROUS ROCK", TRANS. AIME 219,
PP. 156–162, 1959

EFFECT OF SHAPE FACTOR, IFT AND AMOTT METHOD DERIVED WETTABILITY ON THE IMBIBITION
PROCESS SHAWKET GHEDAN, SPE, C. HAKAN CANBAZ, SPE, AND BECHIR MTAWAA, SPE, THE
PETROLEUM INSTITUTE COPYRIGHT 2009, INTERNATIONAL PETROLEUM TECHNOLOGY CONFERENCE

A COMPARATIVE STUDY OF WETTABILITY TEST METHODS BASED ON EXPERIMENTAL RESULTS FROM
NORTH SEA RESERVOIR ·ROCKS BY O. TORSÆTER, RESERVOIR LABORATORIES A/S SPE MEMBER

FUNDAMENTALS OF FLUID FLOW IN POROUS MEDIA CHAPTER 2 MULTI-PHASE SATURATED ROCK
PROPERTIES: WETTABILITY: LABORATORY DETERMINATION

EXPERIMENTAL COMPARISON FOR THE CALCULATION OF ROCK WETTABILITY USING THE AMOTT-
HARVEY METHOD AND A NEW VISUAL METHOD JOHN-ALEXANDER LEÓN-PABÓN1*, TITO-JAVIER
MEJÍA-PILONIETA1 , LUIS-FELIPE CARRILLO-MORENO1 , HERNANDO BUENDÍA-LOMBANA1 , JOSÉ-
FRANCISCO ZAPATA2 AND CARLOS-ANDRÉS DÍAZ-PRADA

WETTABILITY LITERATURE SURVEYPART 2: WETTABILITY MEASUREMENT WILLIAM G. ANDERSON, SPE,
CONOCO INC.

ΓΕΝΙΚΑΓΙΑΤΗΝΠΑΡΑΓΡΑΦΟ 5.7: FORMATION EVALUATION MSC COURSE NOTES RELATIVE
PERMEABILITY DR. PAUL GLOVER PAGE 104

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FACTORS AFFECTING LABORATORY RELATIVE PERMEABILITY
MEASUREMENTS T. M. GEFFEN, JUNIOR MEMBER AI ME, W. W. OWENS, D. R. PARRISH, AND R. A.
MORSE, JUNIOR MEMBER AIME, STANOLIND OIL AND GAS CO., TULSA, OKLA.

COMPARISON OF KLINKENBERG-CORRECTED GAS PERMEABILITY AND WATER PERMEABILITY IN
SEDIMENTARY ROCKS,WATARU TANIKAWA, TOSHIHIKO SHIMAMOTO

WETTABILTYERLEC. DONALDSONANDWAQIALAM, ΣΕΛ.139

.CHAPTER 10: RELATIVE PERMEABILITY

Darcy, H., Les Fontaines Publiques de la Ville de Dyon, Victor Dalmont, 1856.

ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΡΑΦΟ 5.8 :<https://perminc.com/resources/fundamentals-of-fluid-flow-in-porous-media/chapter-4-immiscible-displacement/water-injection-oil-recovery-calculations/mobility-ratio-effect/>

Effect of Fractional Flow Curves on the Recovery of Different Types of Oil in Petroleum Reservoirs by Abdul Jamil NAZARI*1 , Ahmad Fahim NASIRY*1 and Shigeo HONMA*2
(Received on Mar. 31, 2016 and accepted on May 12, 2016)

ENDPOINT MOBILITY RATIOS FOR VERTICAL AND HORIZONTAL WELLS WITH INCIDENCE OF SCALE DEPOSITION A. OLUFEMI BAMIDELE*,1, A.S. FADAIRO 2 AND O.A. FALODE

Γενικά

NUMERICAL SIMULATION STUDY ON PARAMETERS RELATED TO ATHABASCA BITUMEN RECOVERY WITH SAGD KRISTIN REKA MARIANAYAGAM,page6

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/average-water-saturation>

http://www.fekete.com/san/webhelp/feketeharmony/harmony_webhelp/content/html_file/s/reference_material/calculations_and_correlations/relative_permeability_correlations.htm

A New Analytical Model for Developing Fractional Flow Curve Using Production DataArticle · December 2014, ADESINA ADEBAYO S.FADAIRO , OLUGBENGA FALODE

ΓΕΝΙΚΑΓΙΑΤΗΝΠΑΡΑΓΡΑΦΟ 6.1: MODELING OF WETTABILITY ALTERATION DUE TO ASPHALTENES DEPOSITION IN OIL RESERVOIRS, HAMED DARABI, KAMI SEPEHRNOORI, MOHAMAD HOSEIN KALAEI,SPE, THE UNIVERSITY OF TEXAS

RESEARCH ARTICLE WETTABILITY ALTERATION OF SANDSTONE BY CHEMICAL TREATMENTS YAN-LING WANG,1 LI MA,1 BAO-JUN BAI,2 GUAN-CHENG JIANG,3 JIA-FENG JIN,1 AND ZENG-BAO WANG1 1 PETROLEUM ENGINEERING COLLEGE, PETROLEUM UNIVERSITY OF CHINA

FORMATION DAMAGE DUE TO MINERAL ALTERATION AND WETTABILITY CHANGES DURING HOT WATER AND STEAM INJECTION IN CLAY-BEARING SANDSTONE RESERVOIRS D.B. BENNION AND F.B. THOMAS, HYCAL ENERGY RESEARCH LABORATORIES LTD., AND D.A. SHEPPARD, SCEPTRE RESOURCES LTD.

WETTABILITY ALTERATION OF SANDSTONE CORES BY ALUMINA-BASED NANOFLUIDS JULIANA GIRALDO, PEDRO BENJUMEA,* SERGIO LOPERA, FARID B. CORTES, AND MARCO A. RUIZ

WETTABILITY ALTERATION: A COMPREHENSIVE REVIEW OF MATERIALS/METHODS AND TESTING THE SELECTED ONES ON HEAVY-OIL CONTAINING OIL-WET SYSTEMS MOHAMMEDALMOJTABA MOHAMMED , TAYFUN BABADAGLI UNIVERSITY OF ALBERTA, CANADA

WETTABILITY ALTERATION IN CHALK 2. MECHANISM FOR WETTABILITY ALTERATION FROM OIL-WET TO WATER-WET USING SURFACTANTS DAG C. STANDNES, TOR AUSTAD

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ2: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΟΡΟΣΙΜΕΤΡΙΑΣ-KLINKENBERG ΓΙΑ OIL-WET

Πίνακας μετά από χρήση του ποροσιμέτρου Hg:

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν δίνονται στον ακόλουθο πίνακα, βαθμονόμηση δεν χρειάζεται να κάνω γιατί έχει κάνει ήδη το όργανο:

PV	dv/PV	dV/pv(%)	Pore diameter	P(bar)	Pore diameter (μm)
0,089779	-0,00702	-0,70184	117886,8125	0,10578404	117,8868125
	0,001257	0,125749	90848,1625	0,13726797	90,8481625
	0,014194	1,419352	60634,16875	0,20566858	60,63416875
	0,023395	2,339537	45528,4875	0,27390633	45,5284875
	0,035198	3,519817	33090,40625	0,37686271	33,09040625
	0,049704	4,970429	25982,44688	0,47996024	25,98244688
	0,067459	6,745943	21361,53125	0,58378497	21,36153125
	0,101074	10,10738	17289,43906	0,72128082	17,28943906
	0,178694	17,8694	13933,24688	0,89502043	13,93324688
	0,282516	28,25158	11330,42969	1,10062383	11,33042969
	0,387203	38,72031	9063,636719	1,37588718	9,063636719
	0,4379	43,79001	7876,497656	1,58325976	7,876497656
	0,462064	46,20638	7245,896875	1,72104875	7,245896875
	0,505532	50,55316	6037,526563	2,06550493	6,037526563
	0,530493	53,04926	5023,828125	2,48227864	5,023828125
	0,579508	57,9508	3880,239844	3,21385849	3,880239844
	0,612237	61,22372	3189,882031	3,90940503	3,189882031
	0,647739	64,77391	2504,082422	4,98008404	2,504082422
	0,673187	67,31868	2082,099609	5,98940683	2,082099609
	0,70556	70,55597	1609,142969	7,74980287	1,609142969
	0,730046	73,00456	1318,455469	9,45844689	1,318455469
	0,75604	75,60398	1051,00957	11,8652968	1,05100957
	0,781495	78,14949	832,9146484	14,9721719	0,832914648
	0,802739	80,27395	677,779834	18,3991031	0,677779834
	0,822777	82,27769	553,1261719	22,5455644	0,553126172
	0,8448	84,48004	434,0876465	28,7281647	0,434087646
	0,86171	86,17095	349,936499	35,6365827	0,349936499
	0,877104	87,71037	283,951001	43,9179348	0,283951001
	0,882921	88,29213	259,4397461	48,0671938	0,259439746
	0,891678	89,16781	227,0884521	54,9149081	0,227088452
	0,904182	90,41822	183,0926636	68,1105431	0,183092664
	0,914111	91,41111	151,0793457	82,5429898	0,151079346
	0,918343	91,83429	139,5780518	89,3445719	0,139578052

0,921837	92,18372	129,5612671	96,2520788	0,129561267
0,924854	92,48535	120,9465454	103,107878	0,120946545
0,9278	92,78002	113,3817017	109,987249	0,113381702
0,930396	93,03961	106,5274536	117,064105	0,106527454
0,934603	93,46026	95,64762573	130,380036	0,095647626
0,937468	93,74684	88,39850464	141,071859	0,088398505
0,939853	93,98533	82,40150757	151,338753	0,082401508
0,942204	94,22042	77,05948486	161,830064	0,077059485
0,944255	94,42549	72,53215942	171,931207	0,072532159
0,946534	94,65338	68,50130615	182,048217	0,068501306
0,947113	94,71131	67,25275879	185,427944	0,067252759
0,948786	94,87865	63,67177734	195,856647	0,063671777
0,950577	95,05768	60,44668579	206,306444	0,060446686
0,952875	95,28752	55,84458008	223,307993	0,05584458
0,954936	95,49356	51,8407959	240,554584	0,051840796
0,956653	95,6653	48,40444031	257,63218	0,04840444
0,95839	95,83903	45,39165344	274,732035	0,045391653
0,959996	95,99956	42,71311035	291,960499	0,04271311
0,961729	96,17291	40,32753906	309,231396	0,040327539
0,962159	96,21588	38,29567871	325,638329	0,038295679
0,963668	96,36679	36,28495483	343,683537	0,036284955
0,965066	96,50658	34,24034729	364,206021	0,034240347
0,966092	96,60922	32,98658447	378,048873	0,032986584
0,966752	96,67521	31,55278015	395,227961	0,03155278
0,967765	96,77653	30,24764709	412,281374	0,030247647
0,968752	96,87517	29,02666931	429,623573	0,029026669
0,96964	96,964	27,91437073	446,742702	0,027914371
0,970403	97,04035	26,88851929	463,786856	0,026888519
0,971269	97,12687	25,91642151	481,182968	0,025916422
0,97263	97,26302	24,1901062	515,522388	0,024190106
0,974111	97,41115	22,68319702	549,769997	0,022683197
0,975388	97,53882	21,34133911	584,337319	0,021341339
0,976703	97,67033	20,15668335	618,680206	0,020156683
0,977527	97,75268	19,50925446	639,211544	0,019509254
0,978269	97,8269	18,90211639	659,743093	0,018902116
0,97929	97,92898	18,05854492	690,561786	0,018058545
0,980076	98,00762	17,29790192	720,927932	0,017297902
0,98112	98,11199	16,51240234	755,222681	0,016512402
0,981965	98,19649	15,78571014	789,989233	0,01578571
0,98293	98,29299	15,12521362	824,486928	0,015125214
0,983916	98,39158	14,40259705	865,853635	0,014402597
0,984651	98,46509	13,85218964	900,257791	0,01385219
0,985564	98,55637	13,2973175	937,823829	0,013297318
0,986024	98,60243	12,96434326	961,910749	0,012964343
0,986573	98,65731	12,65383682	985,514608	0,012653837
0,986987	98,69866	12,43056183	1003,21628	0,012430562

0,987448	98,74478	12,09944458	1030,67055	0,012099445
0,988235	98,82353	11,74363403	1061,89794	0,011743634
0,988744	98,87439	11,48047714	1086,23896	0,011480477
0,98931	98,93102	11,1972374	1113,71585	0,011197237
0,989901	98,99008	10,89580002	1144,52731	0,0108958
0,990358	99,03578	10,67453842	1168,25103	0,010674538
0,990937	99,09371	10,45547867	1192,72799	0,010455479
0,991328	99,13277	10,25037003	1216,5942	0,01025037
0,991876	99,18756	10,02045288	1244,50876	0,010020453
0,992276	99,22763	9,830232239	1268,59075	0,009830232
0,992805	99,28049	9,646987915	1292,68758	0,009646988
0,993334	99,3334	9,445240784	1320,29896	0,009445241
0,993933	99,39334	9,156829071	1361,88424	0,009156829
0,993933	99,39334	8,930712128	1396,36589	0,008930712
0,994517	99,45167	8,710691833	1431,63618	0,008710692
0,995055	99,50552	8,544809723	1459,42888	0,00854481
0,995446	99,54455	8,364447784	1490,89839	0,008364448
0,995796	99,57961	8,212298584	1518,52019	0,008212299
0,996214	99,62141	7,994187164	1559,95106	0,007994187
0,996456	99,64563	7,804255676	1597,91557	0,007804256
0,996863	99,6863	7,622881317	1635,93542	0,007622881
0,997022	99,70222	7,512156677	1660,04801	0,007512157
0,997347	99,73469	7,344223785	1698,00676	0,007344224
0,997699	99,76991	7,226637268	1725,63546	0,007226637
0,998028	99,8028	7,112563324	1753,31174	0,007112563
0,998316	99,83157	6,988527679	1784,43044	0,006988528
0,998607	99,86068	6,843079376	1822,35816	0,006843079
0,998891	99,88908	6,716462708	1856,71268	0,006716463
0,999263	99,92631	6,60658493	1887,59252	0,006606585
0,999325	99,93246	6,512751007	1914,78864	0,006512751
0,999763	99,97635	6,415621948	1943,77735	0,006415622
1	100	6,253927231	1994,03356	0,006253927

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΩΝ ΚΛΙΚΕΝΒΕΡΓ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ WATER-WET

Επιλέχθηκαν συγκεκριμένα σημεία όμως καθώς το σφάλμα στις μετρήσεις ήταν αρκετά μεγάλο και δεν γινόταν καλή εφαρμογή της εξίσωσης.(150 bar)

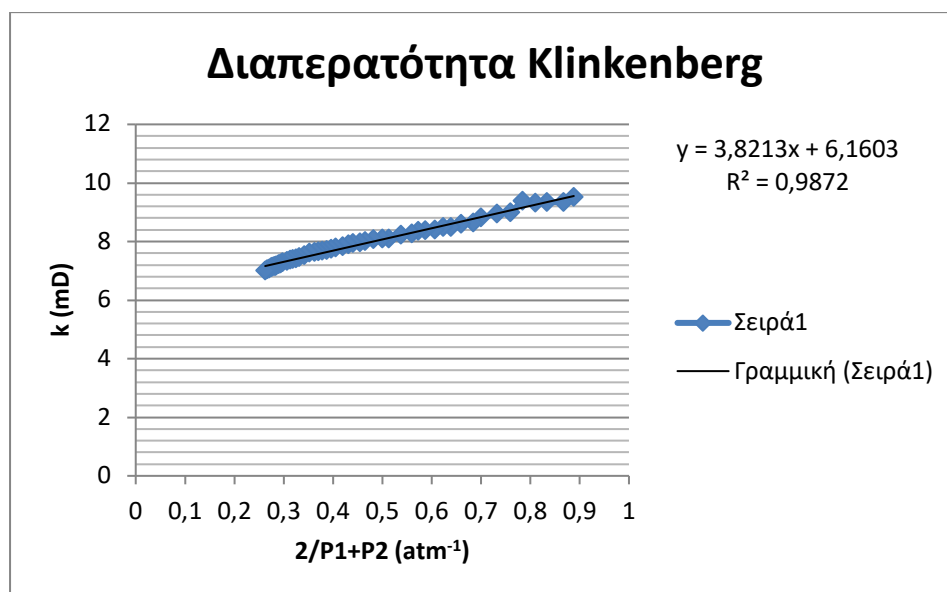
κ	άξονα	γ	άξονα
0,514817	30,15098		
0,508582	29,98059		
0,49322	29,80671		
0,490749	29,82097		

0,487493	29,76047
0,48508	29,7683
0,478759	29,63367
0,474125	29,4926
0,471085	29,4869
0,466598	29,47038
0,462196	29,38125
0,453635	29,24951
0,452936	29,24251
0,451545	29,22793
0,448787	29,13794

ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ KLINKENBERG ΓΙΑ OIL-WET

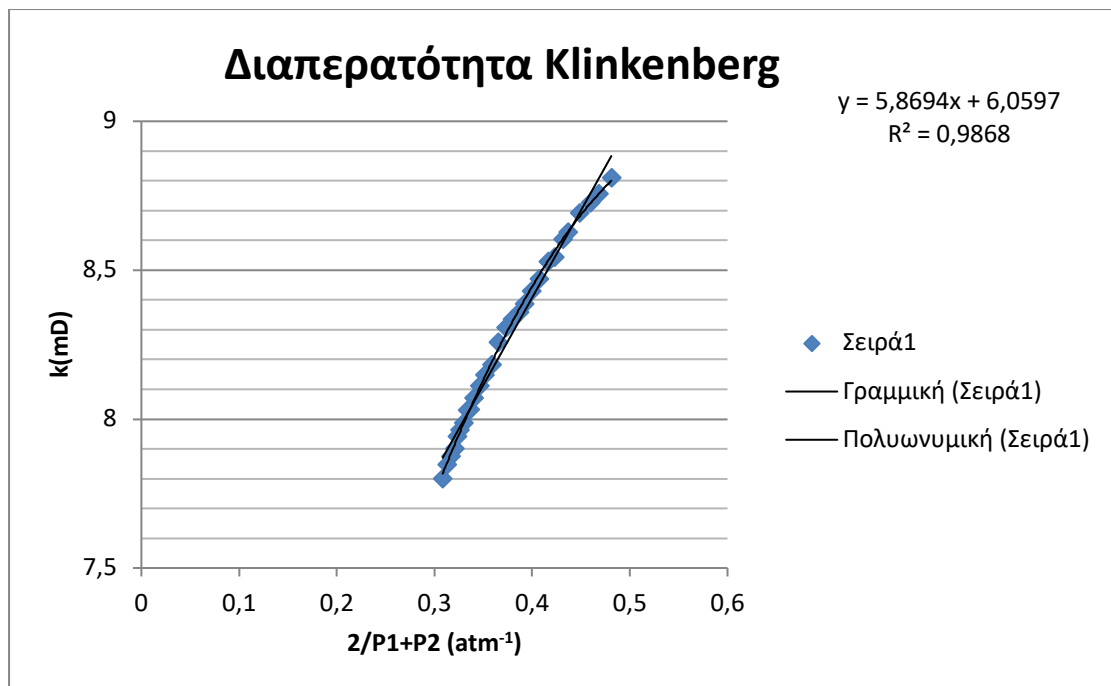
Αρχικά προσδιορίστηκε η διαπερατότητα Klinkenbergγια τρεις διαφορετικές πιέσεις υπερκειμένων, 100,150 και 200 bar. Ο τρόπος προσδιορισμού αλλά και η επεξεργασία είναι ίδια με την περίπτωση του υδατοδιαβρεχτού δοκιμίου.

Για πίεση υπερκειμένων 100 bar, η διαπερατότητα Klinkenbergείναι 6,160mD όπως φαίνεται και από το γράφημα 6.7:



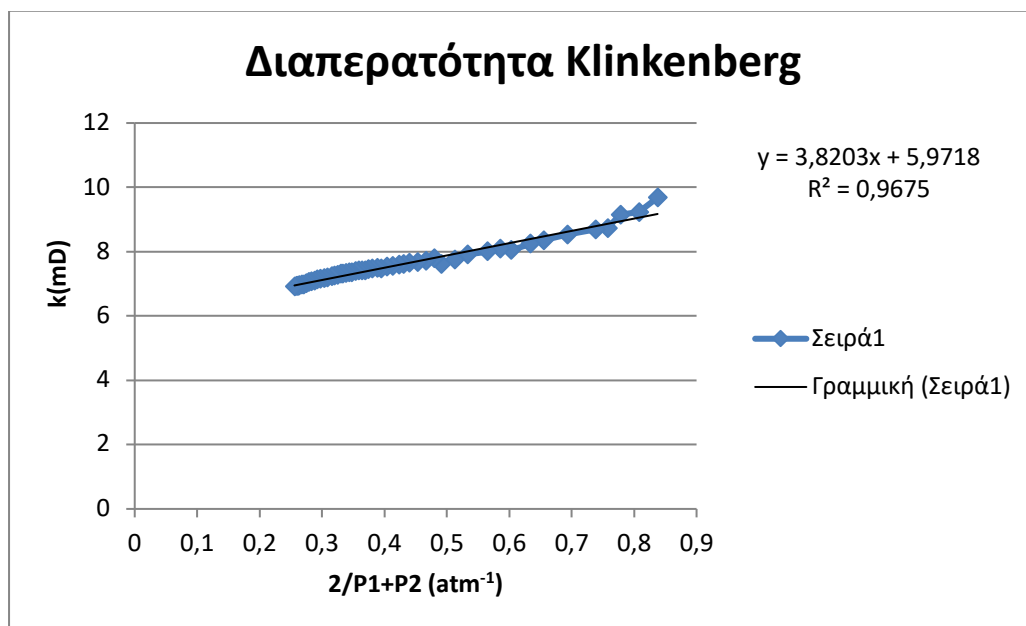
Εικόνα 3 Διαπερατότητα αέρα με πίεση υπερκειμένων 100 bar

Για πίεση υπερκειμένων 150barη διαπερατότητα είναι 6,059mD όπως φαίνεται και από το γράφημα 6.8:



Εικόνα 4 Διαπερατότητα αέρα με πίεση υπερκειμένων 150 bar

Για πίεση υπερκειμένων 200barη διαπερατότητα Klinkenbergείναι 5,786mD όπως φαίνεται και από το γράφημα 6.9:

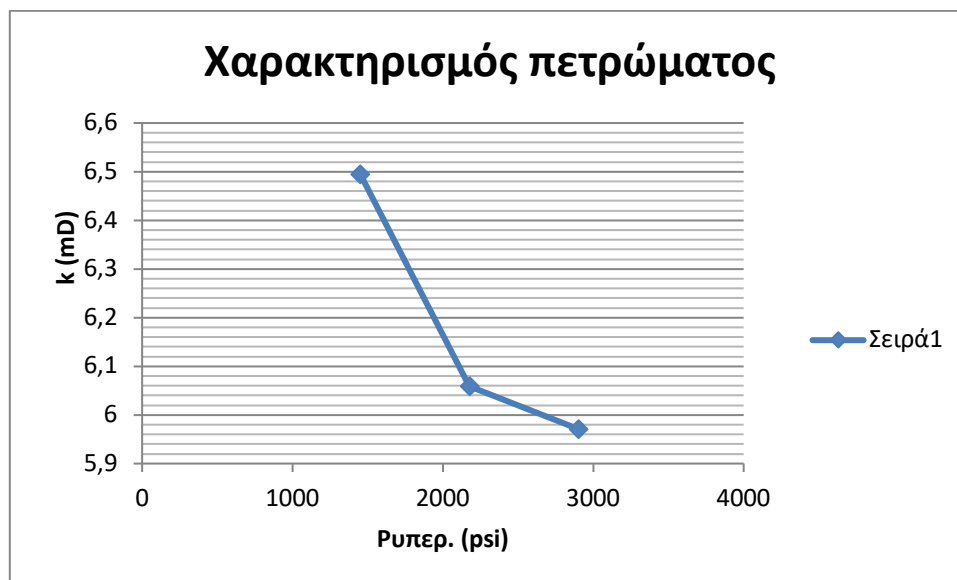


Εικόνα 5 Διαπερατότητα αέρα με πίεση υπερκειμένων 200 bar

Όπως παρατηρείται λοιπόν όσο αυξάνεται η πίεση υπερκειμένων τόσο μειώνεται η διαπερατότητα Klinkenberg.

Τέλος πρέπει να χαρακτηριστεί το πέτρωμα από τις τιμές που προέκυψαν παραπάνω. Έτσι από τις πρότυπες καμπύλες σύμφωνα με τη βιβλιογραφία¹ το δοκίμιο εμφανίζεται στην κατηγορία unconsolidated όπως φαίνεται στο γράφημα 6.10.

Ρυπερ. (bar)	klinkenberg
1450,4	6,5
2175,6	6
2900,7	5,9
χαρακτηρισμός	unconolidated



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3:ΕΙΚΟΝΕΣ

ⁱΠΗΓΗ:Tissot and Welte (1984)

ⁱⁱΠΗΓΗ:Tissot and Welte, 1984

ⁱⁱⁱΠΗΓΗ: Εκμετάλλευση ταμειευτήρων, σελ.58, Καθηγητής Νικόλαος Βαρότσης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χάνια,2017

^{iv}ΠΗΓΗ: Wettability Studies at the Pore Level: A New Approach by Use of Cryo-SEM Michel Robin, SPE, E. Rosenberg, Inst. Francais du Petrole, and Omar Fassi-Fihri

^vΠΗΓΗ: Biolin scientific Enhanced oil recovery: How to measure the wettability of carbonate reservoir core , Susanna Lauren

^{vi}ΠΗΓΗ: Wettability Studies at the Pore Level: A New Approach by Use of Cryo-SEM Michel Robin, SPE, E. Rosenberg, Inst. Francais du Petroleum, and Omar Fassi-Fihri

^{vii}ΠΗΓΗ: ΓενικήΧημείαΜιχαήλΚονσολάκης, παράγραφος 12.2, σελ. 247

^{viii}ΠΗΓΗ: Μιχαήλ Ι.Κονσολάκης, Γενική Χημεία Θεωρία και Εφαρμογές, Παράγραφος 12.3 σελ.249

^{ix}ΠΗΓΗ: Wettability , Erle C. Donaldson and Waqi Alam σελ.10

-
- ^xΠΗΓΗ: Petroleum Reservoir rock and fluid properties, chapter 7, Abhijit Y. Dandekar σελ.134
- ^{xi}Εκμετάλλευση ταμιευτήρων υδρογονανθράκων, Καθ. Βαρότσης Νικόλαος σελ. 63, Μηχανική Πετρελαίου Κεφάλαιο 6
- ^{xii}Εκμετάλλευση Ταμιευτήρων, Καθ. Βαρότσης Νικόλαος, Πολυτεχνείο Κρήτης, σελ.64
- ^{xiii}ΠΗΓΗ : Working guide to reservoir rock properties and fluid flow, Tarek Ahmed 2006, σελ.42
- ^{xiv}ΠΗΓΗ : Working guide to reservoir rock properties and fluid flow, Tarek Ahmed 2006, σελ.49
- ^{xv}https://petrowiki.spe.org/Measurement_of_capillary_pressure_and_relative_permeability
- ^{xvi}ΠΗΓΗ: Effect of rock and wettability heterogeneity on the efficiency of WAG flooding in carbonate reservoir, M.O Ahmed Eifeel,SPE,A.Al-Dhahli, SPE,Z. Jiang, SPE, S.Geiger,M.I van Dijke, Heriot-Watt, University, 2013 SPE σελ.7
- ^{xvii}ΠΗΓΗ: Εκμετάλλευση ταμιευτήρων, καθηγητής Νικόλαος Βαρότσης, σελ.7 Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2017
- ^{xviii}Εκμετάλλευση ταμιευτήρων Καθηγητής Βαρότσης Νικόλαος, Πολυτεχνείο Κρήτης, σελ 9
- ^{xix}ΠΗΓΗ: Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties, Abhijit Y. Dandekar, 2013, σελ. 20
- ^{xx}ΠΗΓΗ: Relative permeability of petroleum reservoirs, Mehdi Honarpour, Leonard Koederitz, A. Herbert Harvey, 1986, σελ.46
- ^{xxi}ΠΗΓΗ: Relative permeability of petroleum reservoirs, Mehdi Honarpour, Leonard Koederitz, A. Herbert Harvey σελ.47
- ^{xxii}ΠΗΓΗ: Εκμετάλλευση Ταμιευτήρων ,Καθηγητής Νικόλαος Βαρότσης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2017 σελ. 68
- ^{xxiii}ΠΗΓΗ: Relative permeability of petroleum reservoirs, Mehdi Honarpour, Leonard Koederitz, A.Herbert Harvey σελ. 66
- ^{xxiv}ΠΗΓΗ: Relative Permeability of petroleum reservoirs, Mehdi Honarpour, Leonard Koederitz, A. Herbert Harvey 1986 σελ.59
- ^{xxv}ΠΗΓΗ: Impact of wettability alteration on recovery factor (SPE),Abdulla Karimov Aziz/Azerbaijan State Oil Academy,2011, σελ.2
- ^{xxvi}ΠΗΓΗ : Relative permeability of petroleum reservoirs, Mehdi Honarpour, Leonard Koederitz, A.Herbert Harvey, σελ.2
- ^{xxvii}ΠΗΓΗ : Relative permeability of petroleum reservoirs, Mehdi Honarpour, Leonard Koederitz, A.Herbert Harvey, σελ.5

^{xxviii} ΠΗΓΗ : Relative permeability of petroleum reservoirs, Mehdi Honarpour, Leonard Koederitz, A.Herbert Harvey, σελ.6

^{xxix} ΠΗΓΗ: Γενική ορυκτολογία, Γ, Κωστάκη, Χανιά 2005 σελ.268

^{xxx} ΠΗΓΗ: Γενική ορυκτολογία, , Χανιά 2005,Γ Κωστάκη σελ.272

^{xxxi} ΠΗΓΗ: Μονάδα Περίθλασης Ακτίνων Χ (XRD) κόνεως, ΔΙΚΤΥΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΈΡΕΥΝΑΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

^{xxxii} ΠΗΓΗ: ΕΙΚΟΝΑΣ 5.15: FORMATION EVALUATION MSC COURSE NOTES, CHAPTER 7: WETTABILITY, DR. PAUL GLOVER, PAGE 83 ΠΗΓΗ : Effect of shape factor,IFT, and Amott derived wettability on the imbibitions process,