



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

**Ανάπτυξη εργαστηριακής μεθοδολογίας και διενέργεια μετρήσεων
σχετικών διαπερατοτήτων νερού-πετρελαίου σε δοκίμια
πετρώματος ταμιευτήρων.**

Διπλωματική Εργασία

Νικολάου Γεώργιος

Εξεταστική επιτροπή:

Επ. Καθ. Γιώτης Ανδρέας (επιβλέπων)

Δρ. Μαρινάκης Δημήτριος

Δρ. Μπέλλας Σπυρίδων, Ερευνητής Β, ΙΤΕ

Χανιά

Φεβρουάριος, 2021

Πρόλογος

Η εργαστηριακή μεθοδολογία και διενέργεια μετρήσεων της κατανομής μεγέθους πόρων, της ποροσιμετρίας τύπου Boyle και των σχετικών διαπερατοτήτων νερού και πετρελαίου, της μεθόδου Single-Sample Dynamic σε δοκίμια πετρώματος ταμιευτήρα, πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ανάλυσης Ρευστών & Πυρήνων Υπόγειων Ταμιευτήρων υπό την επίβλεψη του κ. Μαρινάκη Δημητρίου. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα, τον κ. Γιώτη Ανδρέα για τη θεωρητική κατάρτιση της πτυχιακής μου εργασίας με επιστημονικό υλικό, καθώς και για τη καθοδήγηση του στην άρτια σύνταξη τεχνικών κειμένων. Σημαντική επίσης, ήταν η συμβολή από τη κα Κρητικάκη Άννα για την λήψη των δεδομένων της κατανομής μεγέθους πόρων απ' το Εργαστήριο Τεχνολογίας Κεραμικών και Υάλου, καθώς επίσης και από τον κ. Στρατάκη Αντώνιο για την εύρεση των ορυκτών φάσεων και τη συγκέντρωση τους στο πέτρωμα, με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτινών X στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας. Ευχαριστώ τον κ. Μπέλλα Σπυρίδωνα για τις παρατηρήσεις-διορθώσεις του. Να ευχαριστήσω ιδιαίτερα οφείλω, τη κα Χαμηλάκη Ελένη και τη κα Σελέκου Κωνσταντίνα, όσον αφορά τον εργαστηριακό εξοπλισμό, καθώς και για την επισήμανση της προσοχής σε θέματα υγιεινής και ασφάλειας που πρέπει να τηρούνται σε ένα εργαστηριακό περιβάλλον. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου, για την κατανόηση και τις συμβουλές τους.

Περίληψη

Οι σχετικές διαπερατότητες των ρευστών, αντανακλούν την ικανότητα τους να διέρχονται του πορώδους μέσου. Η μελέτη των παραμέτρων που τις επηρεάζει είναι το κριτήριο για το σχεδιασμό της παραγωγής των υδρογονανθράκων πετρώματος ταμιευτήρα. Στη παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε εργαστηριακή μεθοδολογία και διενέργεια μέτρησης των σχετικών διαπερατοτήτων νευτώνειων, μη αναμίξιμων και ασυμπίεστων ρευστών, νερού και πετρελαίου. Η μέθοδος μέτρησης των σχετικών διαπερατοτήτων σε πετρέλαιο και νερό που χρησιμοποιήθηκε, σε συνθήκες μόνιμης και στρωτής ροής, ήταν η Single-Sample Dynamic. Το πορώδες μέσο ήταν ένα κυλινδρικό τεμάχιο ψαμμίτη τύπου Berea. Ρυθμίστηκαν οι παροχές των ρευστών και μετρήθηκε η μανομετρική πίεση στην εισροή, μόλις επιτεύχθηκε ροή σε μόνιμες συνθήκες. Τα τριχοειδή φαινόμενα στην εκροή των δοκιμίων είναι μία παράμετρος μείωσης των σχετικών διαπερατοτήτων σε νερό και πετρέλαιο, που έχει τεχνητό χαρακτήρα. Δηλαδή, δεν είναι μία φυσική ιδιότητα, αλλά αναπτύσσεται μόνο σε εργαστηριακό περιβάλλον, λόγω της απότομης μείωσης της τριχοειδούς πίεσης από την εκροή στις σωληνώσεις που συλλέγουν τα ρευστά. Αν τα τριχοειδή φαινόμενα στην εκροή έχουν ελαχιστοποιηθεί, τότε η πτώση πίεσης ανάμεσα στην εισροή και την εκροή του δοκιμίου, ισούται προσεγγιστικά με τη πτώση πίεσης του νερού και του πετρελαίου.

Αρχικά μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά του δοκιμίου. Το πορώδες υπολογίστηκε με τη μέθοδο της ποροσιμετρίας τύπου Boyle. Στη συνέχεια μετρήθηκε η κατανομή μεγέθους των πόρων και επιβεβαιώθηκε το πορώδες του δοκιμίου με τη μέθοδο των τριχοειδών πιέσεων. Η διάταξη του Εργαστηρίου Ανάλυσης Ρευστών & Πυρήνων Υπογείων Ταμιευτήρων δε διέθετε αντλία κενού, οπότε η μέθοδος επαναλήφθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Κεραμικών & Υάλων. Τελικά, τόσο η έλλειψη της αντλίας κενού, όσο και η μεγάλη διακριτότητα του όγκου σε Hg που εξωθείται στο πυκνόμετρο του 1^{ου} πειράματος εισαγάγουν σημαντικά σφάλματα, ιδιαίτερα στους μικρότερους πόρους και αδυνατούν να ανιχνεύσουν τους πόρους των μεγαλύτερων αλλά και των μικρότερων διαμέτρων. Στο 2^ο πείραμα διαπιστώθηκε πως μεγάλος όγκος Hg εκπεφρασμένος σε όγκο κενών καταλαμβάνεται από μικρούς πόρους. Η περιθλασιμετρία ακτινών

Χ, είχε ως σκοπό την ανίχνευση των περιεχόμενων ορυκτών και τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης τους (W/W %). Ανιχνεύθηκαν αργιλικά ορυκτά, τα οποία ευθύνονται για την μείωση της απόλυτης διαπερατότητας τους, όταν εμβαπτιστούν σε πολικούς διαλύτες (π.χ. νερό). Τα περισσότερα ορυκτά, όπως και αυτά που συναντώνται σε πετρώματα Berea, δημιουργούν ένα διπλό στρώμα, όταν οι άργιλοι εμβαπτιστούν σε νερό. Τα μόνα αργιλικά ορυκτά που διαφέρουν είναι οι σμεκτίτες, όπου τα κρυσταλλικά πλέγματα των αργιλικών ορυκτών δεσμεύουν στο εσωτερικό τους το νερό. Κατά τη δημιουργία του διπλού στρώματος, λαμβάνει χώρα η ιοντοανταλλαγή μεταξύ του κρυσταλλικού πλέγματος των αργίλων και των ηλεκτρολυτών του νερού. Έτσι, δημιουργείται ένα ακίνητο στρώμα (εσωτερικό) σε επαφή με τα αργιλικά τοιχώματα των πόρων που επικοινωνεί μέσω μίας ημιδιαπερατής μεμβράνης με το εξωτερικό στρώμα (ηλεκτρωσμοτικό φαινόμενο). Κατά τη ροή της άλμης, η αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης των πόρων, προκαλεί τη μείωση του πάχους του εσωτερικού στρώματος και την αύξηση της διαπερατότητας του πετρώματος. Επιπλέον, η μείωση του ιοντικού σθένους (συγκέντρωση και αριθμό οξείδωσης) των κατιόντων των ηλεκτρολυτών της άλμης, προκαλεί την αύξηση του πάχους του εσωτερικού στρώματος. Άλλοι ερευνητές καταδεικνύουν το αντίστροφο αποτέλεσμα. Τα πετρώματα τύπου Berea βρίσκονται σε συμφωνία με τη θεωρία του διπλού στρώματος. Παρόλα αυτά, η αύξηση της υδραυλικής βαθμίδας, όταν το ιοντικό σθένος των κατιόντων είναι πολύ μικρό σε ψαμμίτες Berea, δε προκαλεί απότομη αύξηση της διαπερατότητας του, διότι όσο αυξάνεται το πάχος του εσωτερικού στρώματος, τα αργιλικά ορυκτά αποκολλώνται από το κρυσταλλικό τους πλέγμα ευκολότερα και φράζουν τους μικρότερους πόρους που θα συναντήσουν κατά μήκος της ροής. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος των πόρων τόσο πιο αμελητέο καθίσταται το ωσμωτικό φαινόμενο, ενώ ίχνη αργίλων αρκούν για μία κατανομή του μεγέθους των πόρων, που είναι μετατοπισμένη στις μικρότερες διαμέτρους, να προκαλέσει μη αναστρέψιμο φράξιμο των πόρων.

Οι ερευνητές παρατήρησαν πως όταν η ογκομετρική παροχή είναι μία γραμμική συνάρτηση της υδραυλικής βαθμίδας, με τη καμπύλη να τέμνει τον άξονα της υδραυλικής βαθμίδας, στην οριακή της τιμή, η ροή προκαλείται μόνο όταν ξεπεραστεί. Έχει παρατηρηθεί, πως μία απότομη καμπυλότητα υπό πολύ χαμηλές τιμές της υδραυλικής βαθμίδας μικρότερες της οριακής παρατηρείται, όταν υπάρχει σημαντικό ποσοστό

του όγκου κενών σε πόρους μεγάλης διαμέτρου. Στη παρούσα διπλωματική κατά τη μονοφασική ροή σε νερό, η καμπυλότητα αυτή δεν ανιχνεύθηκε ακόμα και σε παροχές που προσεγγίζουν τη διακριτότητα του παροχόμετρου. Οπότε, ο όγκος κενών των πόρων μεγαλύτερης διαμέτρου, στον οποίο προκαλείται ροή σε υδραυλική βαθμίδα μικρότερη της οριακής, θεωρείται αμελητέος. Σε αυτή τη περίπτωση, αν η ροή συνολικά θεωρηθεί ως πλαστική, προσομοιώνεται ικανοποιητικά από τη πραγματική. Με αυτό το τρόπο, υπολογίζεται η διαπερατότητα σε νερό συναρτήσει της πτώσης πίεσης ανάμεσα στην εισροή και την εκροή. Σε υψηλές τιμές της πτώσης πίεσης, η διαπερατότητα προσεγγίζει ασυμπτωτικά τη διαπερατότητα ενός νευτώνειου υγρού (εξάλειψη ωσμωτικού φαινομένου). Στη πράξη όμως, απαιτείται η πτώση πίεσης να είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη που μπορεί να μετρήσει το μανόμετρο.

Στη συνέχεια έπρεπε να επιλεγθεί μία διαπερατότητα βάσης ανάμεσα στην μέγιστη διαπερατότητα σε νερό, τη διορθωμένη διαπερατότητα σε αέρα και τη διαπερατότητα του πετρελαίου στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό. Υπολογίστηκαν επιπλέον, ώστε να υπάρξει η κατάλληλη σύγκριση μεταξύ τους και να επιβεβαιώνουν την εγκυρότητα των μετρήσεων. Η διαπερατότητα του πετρελαίου στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό, έπρεπε να υπολογιστεί υπό χαμηλές και υψηλές παροχές, ώστε να εξαλειφθούν τα τριχοειδή φαινόμενα και να διαπιστωθεί η ύπαρξη ιξωδών ή/και τριχοειδών δαχτύλων. Επιπλέον, διαπιστώθηκε πως αύξηση της πίεσης υπερκειμένων υποπενταπλασίασε τη διαπερατότητα του πετρώματος. Γι' αυτό το λόγο οι χαμηλές παροχές εφαρμόστηκαν σε πίεση υπερκειμένων 60 bar και οι υψηλές σε 150 bar, κατά τη μονοφασική ροή νερού, αέρα και πετρελαίου. Σε χαμηλές παροχές και πίεση υπερκειμένων χρησιμοποιήθηκε πόσιμο νερό, ενώ σε υψηλές παροχές και πίεση υπερκειμένων απιοντισμένο. Στη δεύτερη περίπτωση, η μέγιστη διαπερατότητα σε νερό ήταν μικρότερη των υπολοίπων διαπερατοτήτων, λόγω της ισχυροποίησης του ωσμωτικού φαινομένου. Πραγματοποιήθηκε επιπλέον, έμμεσος υπολογισμός της διαπερατότητας του πετρώματος από τα δεδομένα της κατανομής μεγέθους των πόρων. Η φόρτιση του πετρώματος λόγω της έγχυσης του Hg ήταν υδροστατική, παρόλα αυτά η διαπερατότητα του πετρώματος ήταν σε συμφωνία με τη διορθωμένη διαπερατότητα σε αέρα υπό 60 bar πίεσης υπερκειμένων. Αυτό σημαίνει, πως η κάθετη φόρτιση των 60 bar, κάθετα στη διεύθυνση της ροής (κατά μέσο όρο), μειώνει αμελητέα το πορώδες, σε αντίθεση με

τη πίεση των υπερκειμένων στα 150 bar. Η καταλληλότερη διαπερατότητα βάσης είναι διαπερατότητα του πετρελαίου στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό, διότι κατά τη δευτερογενή μετανάστευση του πετρελαίου από το μητρικό πέτρωμα, εκτοπίζει την άλμη του ταμιευτήρα, έως το μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού του.

Η διορθωμένη διαπερατότητα κατά Klinkenberg, υπό 60 bar της πίεσης υπερκειμένων, ήταν υπερεκτιμημένη σε σχέση με τις υπόλοιπες διαπερατότητες. Ο λόγος είναι επειδή ο Klinkenberg, είχε θεωρήσει τη βαθμίδα της ταχύτητας, της κάθετης απόστασης από το τοίχωμα των πόρων (dw/dz) σταθερό στο στρώμα ολίσθησης των μορίων του αερίου, διότι θεώρησε το πάχος του αμελητέο σε σχέση με τη διάμετρο των πόρων. Σε μικρή κατανομή του μεγέθους των πόρων, το στρώμα ολίσθησης, έχει σημαντικό πάχος και το dw/dz , έχει σημαντική επίδραση στη διαπερατότητα του αερίου. Σε αυτή τη περίπτωση, η διορθωμένη διαπερατότητα σε αέρα, υπολογίστηκε από την εξίσωση ολίσθησης δεύτερου βαθμού, η οποία βρισκόταν σε συμφωνία με τις υπόλοιπες διαπερατότητες. Όταν αυξήθηκε η πίεση των υπερκειμένων στα 150 bar, η διορθωμένη διαπερατότητα πρόκυπτε από το νόμο του Klinkenberg. Το αποτέλεσμα αυτό, δείχνει ότι υπάρχουν και άλλες παράμετροι που καθορίζουν τη διαπερατότητα εκτός από τη κατανομή μεγέθους πόρων. Έρχεται σε αντίθεση με την αναφερόμενη βιβλιογραφία που υποστηρίζει τα παραπάνω, αλλά η εγκυρότητα του αποτελέσματος επιβεβαιώνεται από τον υπολογισμό των υπολοίπων διαπερατοτήτων. Η μέγιστη διαπερατότητα σε νερό έχει μεγαλύτερο σχετικό σφάλμα ως προς τη διορθωμένη διαπερατότητα του αέρα σε υψηλές παροχές της πρώτης και πίεσης υπερκειμένων διότι εντείνεται το ωσμωτικό φαινόμενο.

Κατά τη μονοφασική ροή του πετρελαίου στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό, το πετρέλαιο θα είναι η μη διαβρέχουσα φάση, οπότε και θα εισχωρεί στους μεγαλύτερους πόρους. Το ωσμωτικό φαινόμενο θα καθίσταται αμελητέο και θα αφορά το νερό που διαβρέχει τα τοιχώματα των πόρων, σε χαμηλές παροχές. Ο ισχυρισμός αυτός επιβεβαιώθηκε, επειδή σε διάγραμμα της παροχής του πετρελαίου συναρτήσει της πτώσης πίεσης σε πίεση υπερκειμένων 60 bar, η γραμμική τους σχέση, ήταν καμπύλη που έτεμνε την αρχή των αξόνων. Η διαπερατότητα δηλαδή, παραμένει σταθερή (νόμος του Darcy). Υπό υψηλότερες παροχές όμως, σε πίεση υπερκειμένων 150 bar, η οριακή τιμή

της πτώσης πίεσης είναι διάφορη του μηδενός, διότι το πετρέλαιο εισχωρεί στους μικρότερους πόρους, όπου το ωσμωτικό φαινόμενο είναι εντονότερο. Η διαπερατότητα του πετρελαίου στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό ήταν εγγύτερα της μέγιστης διαπερατότητας σε νερό υπό χαμηλές παροχές και πίεση των υπερκειμένων, απ' ότι σε υψηλότερες τιμές, διότι το ωσμωτικό φαινόμενο ήταν λιγότερο έντονο. Παρατηρήθηκε επίσης, ότι η διαπερατότητα του πετρελαίου στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό ήταν μεγαλύτερη της διορθωμένης διαπερατότητας σε αέρα υπό υψηλές παροχές και πίεση υπερκειμένων, σε αντίθεση με μικρότερες παροχές και πίεση υπερκειμένων, που σημαίνει ότι διογκώθηκαν ελαφρώς οι πόροι διότι όπως αποδείχτηκε, οι πόροι παραμορφώνονται ευκολότερα άνωθεν τουλάχιστον των 60 bar της πίεσης υπερκειμένων.

Πριν εφαρμοστεί η διφασική ροή σε νερό και πετρέλαιο, ελέγχθηκε η επίδραση των τριχοειδών φαινομένων στην εκροή και ο βαθμός της απόδοσης του εκτοπισμού κατά την αποστράγγιση. Τα τριχοειδή φαινόμενα στην εκροή, ήταν εντονότερα υπό χαμηλές παροχές και πίεση υπερκειμένων. Με τη μέθοδο της ζύγισης, διαπιστώθηκε πως ο μη περαιτέρω μειώσιμος βαθμός κορεσμού σε νερό μειώθηκε σημαντικά υπό υψηλές παροχές και πίεση υπερκειμένων. Επιπλέον να σημειωθεί, πως λόγω της υδατοδιαβρεχτότητας του πετρώματος, ο αντίστοιχος βαθμός κορεσμού σε νερό υπό χαμηλές παροχές σε μεγαλύτερη πίεση υπερκειμένων, θα είναι μεγαλύτερος απ' ότι σε μικρότερη πίεση υπερκειμένων. Στη συνέχεια, έπρεπε να διαπιστωθεί ο βαθμός της απόδοσης του εκτοπισμού σε ένα μεγάλο εύρος παροχών, υπό υψηλή πίεση υπερκειμένων. Το αποτέλεσμα ήταν ότι σε ένα διάγραμμα του λογαρίθμου του τριχοειδούς αριθμού συναρτήσει του λόγου του δυναμικού ιξώδους του πετρελαίου προς το δυναμικό ιξώδες του νερού, η ροή (υπό υψηλή παροχή) βρισκόταν εντός της τριχοειδούς ζώνης, στα όρια με τη μεταβατική ζώνη. Το γεγονός αυτό σημαίνει ποιοτικά, πως τα τριχοειδή δάχτυλα ήταν περισσότερα από τα ιξώδη, αλλά η ροή βρισκόταν στα όρια της μεταβατικής ζώνης και άρα η επίδραση των τριχοειδών δαχτύλων ήταν μικρή. Η μείωση της παροχής σε πετρέλαιο προκαλούσε αμελητέα μετατόπιση της ροής προς τη μεταβατική ζώνη. Η χρήση υψηλών παροχών πετρελαίου ήταν αναπόφευκτη, για την εξάλειψη των τριχοειδών φαινομένων στην εκροή. Ερευνητές διαπίστωσαν πως η επίδραση των ιξωδών και τριχοειδών δαχτύλων είναι μικρή κατά τον

εμποτισμό σε ψαμμίτη Berea. Ο μη ανακτήσιμος όγκος νερού εκπεφρασμένος σε όγκο κενών (%), αυξάνεται με την αύξηση της παροχής σε άλμη, την αύξηση του δυναμικού ιξώδους του πετρελαίου και το αντίστροφο.

Στη συνέχεια, η διφασική ροή ακολουθεί τη καμπύλη εκτόπισης του εμποτισμού. Λαμβάνοντας υπόψιν το ωσμωτικό φαινόμενο, επιλέχθηκε μία τιμή της πτώσης πίεσης, για να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί των ενεργών διαπερατοτήτων κάθε φάσης, ώστε η διαπερατότητα βάσης να είναι σταθερή σε σχέση με τις ενεργές. Κάθε φορά αυξανόταν ο λόγος των παροχών του νερού προς το πετρέλαιο, ώστε να διατηρηθεί η διαδικασία εκτόπισης του εμποτισμού. Μετά το πέρας κάθε μέτρησης των σχετικών διαπερατοτήτων της κάθε φάσης, το δοκίμιο ζυγιζόταν για τον υπολογισμό του βαθμού κορεσμού σε νερό. Το πρώτο τελικό σημείο, είναι οι σχετικές διαπερατότητες κάθε φάσης, όταν το δοκίμιο ήταν κορεσμένο σε πετρέλαιο στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό. Τα τρία ενδιάμεσα σημεία υπολογίστηκαν αυξάνοντας διαδοχικά τον λόγο της παροχής σε νερό προς πετρέλαιο. Και στο δεύτερο τελικό σημείο, υπολογίστηκαν οι σχετικές διαπερατότητες των δύο φάσεων, κατά τη μονοφασική ροή νερού έως τον υπολειμματικό βαθμό κορεσμού σε πετρέλαιο. Τέλος, δημιουργήθηκε το διάγραμμα των σχετικών διαπερατοτήτων του νερού και του πετρελαίου συναρτήσει του βαθμού κορεσμού σε νερό.

Σύμφωνα με το κριτήριο των Forrest και Craig, όταν ο μη περαιτέρω μειώσιμος βαθμός κορεσμού σε νερό είναι υψηλότερος του 25%, το πέτρωμα είναι υδατοδιαβρεχτό και μικρότερος από 15%, ελαιοδιαβρεχτό. Σύμφωνα με το δεύτερο κριτήριο, όταν οι σχετικές διαπερατότητες του νερού και του πετρελαίου ισούνται άνωθεν του 50% του βαθμού κορεσμού σε νερό, τότε το πέτρωμα είναι υδατοδιαβρεχτό και κάτω του 50%, ελαιοδιαβρεχτό. Το τρίτο κριτήριο είναι, ότι όταν η σχετική διαπερατότητα σε νερό στον υπολειμματικό βαθμό κορεσμού σε πετρέλαιο είναι μικρότερη από 0,3 το πέτρωμα είναι υδατοδιαβρεχτό και μεγαλύτερη του 0,5 είναι ελαιοδιαβρεχτό. Το πρώτο και το τρίτο κριτήριο πληρείται. Όσον αφορά το δεύτερο, η δειγματική μέση τιμή του βαθμού κορεσμού σε νερό είναι μικρότερη από 50%, αλλά λόγω της αδυναμίας λήψης υψηλής ακρίβειας με τη μέθοδο της ζύγισης, η τυπική της απόκλιση εντός διαστήματος εμπιστοσύνης 99%, δίδει τη τιμή του βαθμού κορεσμού

εκατέρωθεν του 50%. Συνεπώς, το πέτρωμα παρουσιάζει προτίμηση διαβροχής από το νερό έναντι του πετρελαίου.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	2
Περίληψη	3
Περιεχόμενα.....	10
Κατάλογος Εικόνων.....	13
Κατάλογος Πινάκων	15
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	17
Κεφάλαιο 1: Θεωρία.....	20
1.1. Πορώδες.....	20
1.2. Βαθμός κορεσμού	22
1.3. Πολυφασική ροή.....	23
1.3.1. Τρόπος διαβροχής του πετρώματος	23
1.3.2. Διεπιφανειακή τάση μεταξύ των ρευστών	25
1.3.3. Διαβροχή στερεής επιφάνειας από ρευστό.	25
1.3.4. Τριχοειδής πίεση	27
1.4. Ροή στο πορώδες πέτρωμα σε μόνιμες συνθήκες	30
1.5. Στρωτή ροή.....	30
1.6. Απόλυτη διαπερατότητα.....	31
1.7. Σχετικές διαπερατότητες	32
1.8. Υστέρηση λόγω τριχοειδών δυνάμεων.....	33
1.9. Τριχοειδή φαινόμενα εκροής.....	34
1.10 Βαθμός απόδοσης εκτοπισμού κατά την αποστράγγιση.....	37
Κεφάλαιο 2: Μέθοδοι μέτρησης σχετικών διαπερατοτήτων.	41
2.1. Μέθοδοι Σταθερής Κατάστασης	41
2.1.1. Μέθοδος Penn-State	43
2.1.2. Μέθοδος Single-Sample Dynamic	45
2.1.3. Μέθοδος Stationary Fluid.....	45
2.1.4. Μέθοδος Hassler.....	46

2.1.5. Μέθοδος Hafford.....	47
2.1.6. Μέθοδος Dispersed Feed.....	48
2.2. Μέθοδοι μη μόνιμης κατάστασης	49
2.2.1. Μέθοδος Welge	52
2.2.2. Μέθοδος JBN	54
2.2.3. Μέθοδος JR	55
2.3. Σύγκριση μεθόδων.....	61
Κεφάλαιο 3: Χαρακτηριστικά του δοκιμίου	62
3.1. Ποροσιμετρία τύπου Boyle	62
3.2. Κατανομή μεγέθους πόρων	69
3.3 Περιθλασιμετρία ακτινών Χ.....	84
3.4. Φαινόμενο του διπλού στρώματος	91
Κεφάλαιο 4: Ανάπτυξη πειραματικής μεθοδολογίας μέτρησης σχετικών διαπερατοτήτων υπό σταθερή ροή	99
4.1. Σχεδιασμός της μεθόδου Single-sample Dynamic.....	99
4.2. Διαπερατότητα βάσης.....	104
4.2.1. Απόλυτη διαπερατότητα σε αέριο	105
4.2.2. Έμμεσος υπολογισμός της απόλυτης διαπερατότητας του πετρώματος από τα δεδομένα της κατανομής μεγέθους πόρων.	117
4.2.3. Διαπερατότητα του πετρώματος σε νερό	119
4.2.4. Διαπερατότητα πετρελαίου στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό.....	138
4.3. Σχετικές διαπερατότητες νερού και πετρελαίου συναρτήσει του βαθμού κορεσμού σε νερό.....	151
Κεφάλαιο 5: Διαβρεχτότητα	161
5.1. Επίδραση του τρόπου διαβροχής στις σχετικές διαπερατότητες των ρευστών	161
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα	163
Βιβλιογραφία	164
Παράρτημα Α	169

A.1 Πίνακας όγκου του πυκνομέτρου που καταλαμβάνει ο Hg σε κάθε πίεση (σχετική), χωρίς δοκίμιο.....	169
A.2 Πίνακας όγκου του πυκνομέτρου που καταλαμβάνει ο Hg σε κάθε πίεση (σχετική), με δοκίμιο.	170
A.3 Πίνακας του βαθμού κορεσμού σε Hg έως και τη μικρότερη τιμή της ακτίνας των πόρων που θα καταλάβει (1 ^ο πείραμα).	171
A.4 Πίνακας του βαθμού κορεσμού σε Hg έως και τη μικρότερη τιμή της ακτίνας των πόρων που θα καταλάβει (2 ^ο πείραμα).	172
A.5 Πίνακας δεδομένων ροής σε αέρα υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.	175
A.6 Πίνακας δεδομένων ροής σε αέρα υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	176
A.7 Πίνακας μονοφασικής ροής νερού υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.	177
A.8 Πίνακας μονοφασικής ροής νερού υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	181
A.9 Πίνακας ροής πετρελαίου στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.	184
A.10 Πίνακας ροής πετρελαίου στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	185
A.11 Διφασική ροή νερού και πετρελαίου για το πρώτο ενδιάμεσο σημείο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	188
A.12 Διφασική ροή νερού και πετρελαίου για το δεύτερο ενδιάμεσο σημείο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	188
A.13 Διφασική ροή νερού και πετρελαίου για το τρίτο ενδιάμεσο σημείο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	189
A.14 Διφασική ροή νερού και πετρελαίου για το δεύτερο τελικό σημείο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.....	190

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. 1: Αναπαράσταση των επιφανειακών τάσεων στην επιφάνεια επαφής των φάσεων με το πέτρωμα, ανάλογα με τη διαβρεχτότητα του πετρώματος.	26
Εικόνα 1.2: Αναρρίχηση της διαβρέχουσας φάσης μέχρις ότου το βάρος της στήλης να εξισορροπήσει τη δύναμη πρόσφυσης που τείνει να έλξει το υγρό μέσα στο σωλήνα.	27
Εικόνα 1. 3: Γεωμετρική απεικόνιση της γωνίας επαφής συναρτήσει της ακτίνας του τριχοειδούς και της ακτίνας της σφαίρας που ορίζει η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο ρευστών.	29
Εικόνα 1. 4: Διαφορές στις καμπύλες των σχετικών διαπερατοτήτων κατά την αποστράγγιση σε σύγκριση με τον εμποτισμό.	34
Εικόνα 1. 5: Βαθμός κορεσμού σε πετρέλαιο συναρτήσει της απόστασης από την εκροή του δοκιμίου σε χαμηλές παροχές αερίου και πετρελαίου.	35
Εικόνα 1. 6: Βαθμός κορεσμού σε πετρέλαιο συναρτήσει της απόστασης από την εκροή του δοκιμίου σε υψηλές παροχές πετρελαίου και αερίου.	37
Εικόνα 1. 7: Ζώνες εκτοπισμού αποστράγγισης σε διάγραμμα του λογαρίθμου του τριχοειδούς αριθμού συναρτήσει του λογαρίθμου του λόγου των ιξωδών των δύο φάσεων.	38
Εικόνα 2. 1: Σχηματική αναπαράσταση εκτοπισμού φάσεων νερού και πετρελαίου για τον προσδιορισμό σχετικών διαπερατοτήτων.	42
Εικόνα 2. 2: Τυπική καμπύλη των σχετικών διαπερατοτήτων νερού και πετρελαίου, συναρτήσει του βαθμού κορεσμού σε νερό.	43
Εικόνα 2. 3: Διάταξη της μεθόδου Penn-State.	44
Εικόνα 2. 4: Απεικονίζεται με C ο πυρήνας μελέτης και με B οι ημιδιαπερατές μεμβράνες, καθώς και η εισαγωγή της διαβρέχουσας και μη φάσης ξεχωριστά.	47
Εικόνα 2. 5: Διάταξη κατά Hafford.	48
Εικόνα 2. 6: Διάταξη Dispersed Feed Method.	49
Εικόνα 2. 7(a): Πείραμα εκτοπισμού του πετρελαίου από το νερό στο μη περεταίρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό, (b): διάγραμμα σχετικών	

διαπερατοτήτων νερού και πετρελαίου συναρτήσει του βαθμού κορεσμού σε νερό.51

Εικόνα 2. 8: Μέσος βαθμός κορεσμού της εκτοπίζουσας φάσης συναρτήσει του αθροιστικού εγγεόμενου όγκου κενών στη φάση αυτή. 56

Εικόνα 2. 9: Μέσο ενεργό ιξώδους της εκτοπίζουσας φάσης στην εκροή, συναρτήσει του αθροιστικού εγγεόμενου όγκου κενών στη φάση αυτή. 59

Εικόνα 3. 1: Συνδεσμολογία ποροσιμετρίας62

Εικόνα 3. 2: Διάγραμμα παροχής νευτώνειου και πλαστικού ρευστού συναρτήσει της υδραυλικής βαθμίδας.92

Εικόνα 4. 1: Πειραματικό σχεδιάγραμμα της Single-sample Dynamic. .99

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3. 1: Πίεση του αερίου πριν και μετά την εκτόνωση με βάση τον αριθμό των σφαιρών που τοποθετούνται στο ποροσίμετρο.	63
Πίνακας 3. 2: Οι τιμές των πιέσεων πριν και μετά την εκτόνωση παρουσία του δοκιμίου στο ποροσίμετρο.....	66
Πίνακας 3. 3: Τιμές όγκου των κόκκων και πορώδους, αν ληφθεί υπόψιν η μέση τιμή της ένδειξης του μανομέτρου υπό κενό.....	67
Πίνακας 3. 4: Τιμές όγκου των κόκκων και πορώδους, υπό πίεση απόλυτου κενού.	67
Πίνακας 3. 5: Ποιοτική αποτίμηση της κατανομής μεγέθους πόρων.	83
Πίνακας 4. 1: Προδιαγραφές σωληνώσεων	99
Πίνακας 4. 2: Προδιαγραφές βαλβίδων.....	100
Πίνακας 4. 3: Διαπερατότητα σε νερό όταν η πτώση πίεσης σταθεροποιηθεί, για παροχή 4 ml/min στο χρονικό διάστημα 500-604 min, σε πίεση υπερκειμένων 60 bar.....	121
Πίνακας 4. 4: Διαπερατότητα σε νερό όταν η πτώση πίεσης σταθεροποιηθεί, για παροχή 3,5 ml/min στο χρονικό διάστημα 768-858 min, σε πίεση υπερκειμένων 60 bar.....	123
Πίνακας 4. 5: Διαπερατότητα του δοκιμίου σε νερό κατά Buckingham-Reiner για κάθε τιμή της πτώσης πίεσης υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.	128
Πίνακας 4. 6: Σταθεροποιημένες τιμές πτώσης πίεσης και διαπερατότητας σε νερό για δεδομένες παροχές, κάθε χρονικό διάστημα, υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.....	133
Πίνακας 4. 7: Διαπερατότητα του δοκιμίου σε νερό κατά Buckingham-Reiner για κάθε τιμή της πτώσης πίεσης υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.....	136
Πίνακας 4. 8: Ζύγιση δοκιμίων πλήρως κορεσμένων σε νερό.....	137
Πίνακας 4. 9: Ζύγιση κορεσμένου δοκιμίου υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar σε πετρέλαιο στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό.	143

Πίνακας 4. 10: Πίνακας σταθεροποιημένων μανομετρικών πιέσεων συναρτήσει του αθροιστικού χρόνου υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	145
Πίνακας 4. 11: Παροχή συναρτήσει της σταθεροποιημένης πτώσης πίεσης και η ενεργή διαπερατότητα του πετρελαίου υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	146
Πίνακας 4. 12: Βάρος ζελατίνης, κορεσμένου δοκιμίου και μη περαιτέρω μειώσιμος βαθμός κορεσμού σε νερό με αέρα ή χωρίς υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	149
Πίνακας 4. 13: Βάρος ζελατίνης, κορεσμένου δοκιμίου και βαθμός κορεσμού σε νερό του πρώτου ενδιάμεσου σημείου με αέρα ή χωρίς υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	153
Πίνακας 4. 14: Βάρος ζελατίνης, κορεσμένου δοκιμίου και βαθμός κορεσμού σε νερό του δεύτερου ενδιάμεσου σημείου με αέρα ή χωρίς υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	155
Πίνακας 4. 15: Βάρος ζελατίνης, κορεσμένου δοκιμίου και βαθμός κορεσμού σε νερό του τρίτου ενδιάμεσου σημείου με αέρα ή χωρίς υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	157
Πίνακας 4. 16: Βάρος ζελατίνης, κορεσμένου δοκιμίου και βαθμός κορεσμού σε νερό του δεύτερου τελικού σημείου με αέρα ή χωρίς υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	159

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3. 1: Διάγραμμα βαθμονόμησης ποροσιμέτρου.	64
Διάγραμμα 3. 2: Όγκο που καταλαμβάνει ο Hg στο ποροσίμετρο παρουσία και μη του δοκίμιου.	72
Διάγραμμα 3. 3: Πρώτη πολυωνυμική προσαρμογή των δεδομένων του όγκου Hg, χωρίς δοκίμιο συναρτήσει της πίεσης.	73
Διάγραμμα 3. 4: Δεύτερη πολυωνυμική προσαρμογή των δεδομένων του όγκου Hg, χωρίς δοκίμιο συναρτήσει της πίεσης.	74
Διάγραμμα 3. 5: Τρίτη πολυωνυμική προσαρμογή των δεδομένων του όγκου Hg, χωρίς δοκίμιο συναρτήσει της πίεσης.	74
Διάγραμμα 3. 6: Κατανομή μεγέθους πόρων 1 ^{ου} πειράματος.	81
Διάγραμμα 3. 7: Κατανομή μεγέθους πόρων 2 ^{ου} πειράματος.	83
Διάγραμμα 3. 8: Σύγκριση των δύο πειραμάτων κατανομής μεγέθους πόρων.	84
Διάγραμμα 3. 9: Σύνθετο φάσμα ακτινών X σε διάγραμμα της έντασης της ακτινοβολίας συναρτήσει του μήκους κύματος	86
Διάγραμμα 3. 10: Γεωμετρική απεικόνιση των παραμέτρων του νόμου του Bragg	88
Διάγραμμα 3. 11: Ακτινοδιάγραμμα πετρώματος Berea	90
Διάγραμμα 4. 1: Διαπερατότητα αέρα συναρτήσει της αντίστροφης μέσης πίεσης σε δοκίμιο υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.	106
Διάγραμμα 4. 2: Γραμμική προσαρμογή δεδομένων διαπερατότητας του αέρα συναρτήσει της αντίστροφης μέσης πίεσης σε δοκίμιο, υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.	107
Διάγραμμα 4. 3: Πολυωνυμική προσαρμογή 2 ^{ου} βαθμού δεδομένων διαπερατότητας του αέρα συναρτήσει της αντίστροφης μέσης πίεσης σε δοκίμιο, υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.	111
Διάγραμμα 4. 4: Διαπερατότητα αέρα συναρτήσει της αντίστροφης μέσης πίεσης σε δοκίμιο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	114
Διάγραμμα 4. 5: Γραμμική προσαρμογή δεδομένων διαπερατότητας του αέρα συναρτήσει της αντίστροφης μέσης πίεσης σε δοκίμιο, υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	115

Διάγραμμα 4. 6: Μανομετρική πίεση συναρτήσει του αθροιστικού χρόνου για κάθε παροχή νερού υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.....	120
Διάγραμμα 4. 7: Προσαρμογή των πειραματικών σημείων της παροχής σε νερό συναρτήσει της πτώσης πίεσης στην $y = ax$ και $y = ax + \beta$ υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.....	125
Διάγραμμα 4. 8: Πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα της διαπερατότητας του δοκιμίου σε νερό συναρτήσει της πτώσης πίεσης υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.....	129
Διάγραμμα 4. 9: Μανομετρική πίεση συναρτήσει του αθροιστικού χρόνου για κάθε παροχή νερού υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.....	132
Διάγραμμα 4. 10: Παροχές νερού συναρτήσει της πτώσης πίεσης υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.....	133
Διάγραμμα 4. 11: Πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα της απόλυτης διαπερατότητας του δοκιμίου σε νερό συναρτήσει της πτώσης πίεσης υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.....	136
Διάγραμμα 4. 12: Μανομετρική πίεση συναρτήσει του αθροιστικού χρόνου για κάθε παροχή πετρελαίου υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar. .	139
Διάγραμμα 4. 13: Παροχή πετρελαίου συναρτήσει της πτώσης πίεσης υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.....	141
Διάγραμμα 4. 14: Μανομετρική πίεση συναρτήσει του αθροιστικού χρόνου για κάθε παροχή πετρελαίου υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	145
Διάγραμμα 4. 15: Παροχή πετρελαίου συναρτήσει της πτώση πίεσης υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.....	146
Διάγραμμα 4. 16: Μανομετρική πίεση συναρτήσει του αθροιστικού χρόνου για το πρώτο ενδιάμεσο σημείο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar	152
Διάγραμμα 4. 17: Μανομετρική πίεση συναρτήσει του αθροιστικού χρόνου για το δεύτερο ενδιάμεσο σημείο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.....	154
Διάγραμμα 4. 18: Μανομετρική πίεση συναρτήσει του αθροιστικού χρόνου για το τρίτο ενδιάμεσο σημείο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	156
Διάγραμμα 4. 19: Μανομετρική πίεση συναρτήσει του αθροιστικού χρόνου για το δεύτερο τελικό σημείο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.	158

Διάγραμμα 4. 20: Σχετικές διαπερατότητες σε νερό και πετρέλαιο συναρτήσει του βαθμού κορεσμού σε νερό υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.....	160
--	-----

Κεφάλαιο 1: Θεωρία

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί, στους οποίους παγιδεύονται υδρογονάνθρακες, αποτελούν πορώδη πετρώματα που φιλοξενούν τουλάχιστον δύο φάσεις στους πόρους τους. Το σύστημα ρευστού-πετρώματος, ονομάζονται ταμιευτήρες, οι ιδιότητες των οποίων, χρήζουν αξιολόγησης για τη βέλτιστη μέθοδο εκμετάλλευσης. Κάποιοι παράμετροι, αφορούν τις συνθήκες που επικρατούν στο χώρο του εργαστηρίου, που δεν είναι απαραίτητο να ταυτίζονται πάντα με αυτές του ταμιευτήρα. Οι ιδιότητες αυτές θα αναλυθούν παρακάτω.

1.1. Πορώδες

Σε ένα πέτρωμα, ο φαινόμενος (ολικός) όγκος του, $V_T(m^3)$ συνίσταται από τον όγκο που καταλαμβάνουν οι κόκκοι του πετρώματος και από τον όγκο των διάκενων (πόρων) του πετρώματος, $V_p(m^3)$. Το πορώδες (Φ) ορίζεται από τη σχέση:

$$\Phi = \frac{V_p}{V_T} (\%) \quad (1.1)$$

Το πορώδες, ανάλογα με τη διεργασία σχηματισμού του, χαρακτηρίζεται ως πρωτογενές ή δευτερογενές^[1]. Το πρωτογενές πορώδες δημιουργείται κατά τη διάρκεια της ιζηματογένεσης και αποτελείται, είτε από τα διάκενα μεταξύ των κόκκων (διακοκκικό-intergranular), είτε από διάκενα μέσα στη δομή των κόκκων (ενδοσωματιδιακό- intraparticle). Το δευτερογενές πορώδες μπορεί να δημιουργηθεί από διεργασίες διάλυσης, αφυδάτωσης ή ανακρυστάλλωσης, που προκαλούνται σε μεταγενέστερο χρόνο στον ταμιευτήρα ή από τεκτονικές δράσεις οι οποίες επιφέρουν ρωγματώσεις και πτυχώσεις. Οι ψαμμίτες χαρακτηρίζονται κυρίως από πρωτογενές πορώδες, ενώ οι ασβεστόλιθοι έχουν πολύ συχνά και δευτερογενές πορώδες.

Οι κενοί χώροι στο εσωτερικό του πετρώματος χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τα υδραυλικά τους χαρακτηριστικά^[2], ως εξής:

- Ενεργό πορώδες-effective porosity (Φ_e)
- Μη ενεργό πορώδες-ineffective porosity (Φ_i)

Το ενεργό πορώδες αναφέρεται στους πόρους που συνδέονται και επικοινωνούν μεταξύ τους, με αποτέλεσμα τα ρευστά να διέρχονται μέσω αυτών. Το ενεργό πορώδες περιλαμβάνει τον όγκο κενών, για τον οποίο τα ρευστά είναι πλήρως ανακτήσιμα (vol. of interconnected pores) και μη ανακτήσιμα, όταν παγιδεύονται στους κόκκους του πετρώματος, παρόλο που επικοινωνούν με τους συνδεδεμένους πόρους (vol. of dead end pores). Ο μόνος τρόπος ανάκτησης των ρευστών αυτών, είναι μέσω της διαστολής της αέριας φάσης, που προκαλεί η μείωση της πίεσης του ταμιευτήρα. Το μη ενεργό πορώδες ή απομονωμένο πορώδες, αναφέρεται στον όγκο των κενών που έχουν απομονωθεί πλήρως από το συνδεδεμένο και δεν συμμετέχουν στη ροή των ρευστών (vol. of isolated pores). Με την αύξηση της πίεσης των υπερκειμένων, το ολικό πορώδες βαίνει μειούμενο, λόγω της συμπίεστικότητας του πετρώματος. Στη συνέχεια, η αναφορά στο πορώδες, θα αφορά το ενεργό.

Για τον υπολογισμό του συνδεδεμένου πορώδους έχουν προταθεί δύο μοντέλα διάταξης κόκκων από τους Graton και Fraser^[3]. Σε ιδανικές συνθήκες, για σφαιρικούς κόκκους με ίδια διάμετρο, το πορώδες παίρνει την ελάχιστη τιμή του για τη μέγιστη συμπαγή διάταξη κόκκων και τη μέγιστη τιμή, για την ελάχιστη συμπαγή διάταξη κόκκων. Η ρομβοεδρική διάταξη κόκκων έχει θεωρητικά πορώδες 25,96% ενώ η κυβική διάταξη κόκκων έχει πορώδες 47,64% αντίστοιχα, με βάση την υπόθεση ιδανικών σφαιρικών κόκκων. Για ένα δεδομένο όγκο πετρώματος, με κοινή διάταξη κόκκων, το πορώδες είναι ίδιο, ανεξαρτήτως της διαμέτρου των κόκκων που το απαρτίζουν. Στη πραγματικότητα όμως, η κοκκομετρία σε ένα πέτρωμα ταμιευτήρα ακολουθεί μία αρκετά εκτεταμένη κατανομή μεγεθών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, κόκκοι μικρότερης διαμέτρου τυπικά να βρίσκονται στα διάκενα ανάμεσα σε κόκκους μεγαλύτερης διαμέτρου μειώνοντας έτσι σημαντικά το πορώδες σε σχέση με την απλούστερη περίπτωση της μόνο-διασπαρμένης κατανομής (όπου υπάρχει μόνο μία χαρακτηριστική διάσταση κόκκων). Σε μία τέτοια διαμόρφωση το πορώδες είναι, ως επί το πλείστον, μικρότερο από 25,96%.

Οι τιμές του πορώδους ενός ταμιευτήρα χαρακτηρίζονται ως εξής:

- Χαμηλό: $\phi < 5 \%$
- Μέτριο: $5\% < \phi < 10\%$
- Μέσο: $10\% < \phi < 20\%$
- Καλό: $20\% < \phi < 30\%$
- Πολύ καλό: $\phi > 30\%$

1.2. Βαθμός κορεσμού

Ενώ το πορώδες αντιπροσωπεύει τη χωρητικότητα ενός πετρώματος ταμιευτήρα για την αποθήκευση ρευστών, ο βαθμός κορεσμού (saturation), S_i ποσοτικοποιεί πώς κατανέμεται η χωρητικότητα αποθήκευσης μεταξύ των ρευστών φάσεων i , του ταμιευτήρα^[4]. Οι αρχικοί κορεσμοί των ρευστών που ορίζονται ως κλάσματα του όγκου των πόρων που καταλαμβάνουν αποτελούν βασικούς παράγοντες για τον προσδιορισμό των αποθεμάτων των υδρογονανθράκων. Ο κορεσμός ορίζεται ως εξής:

$$S_i = \frac{V_i}{V_t} \quad (1.2)$$

Όπου V_i ο όγκος που καταλαμβάνει η φάση i και V_t ο συνολικός όγκος των πόρων του πετρώματος. Παραδείγματος χάριν, παρουσία αερίου, πετρελαίου και άλμης (brine), το άθροισμα των βαθμών κορεσμού σε αέριο (S_g), πετρέλαιο (S_o) και άλμη (S_w) ισούται με τη μονάδα. Ωστόσο, ο κορεσμός αναφέρεται γενικά ως ένα κλάσμα του όγκου του ενεργού πορώδους και όχι του συνολικού όγκου των πόρων, διότι έχει μεγαλύτερη σημασία, καθώς τα ρευστά που υπάρχουν στο απομονωμένο χώρο των πόρων δεν μπορούν να ανακτηθούν.

1.3. Πολυφασική ροή

Σε πολυφασική ροή, τα ρευστά δεν αλληλοεπιδρούν μόνο με το πέτρωμα, αλλά και μεταξύ τους. Οι παράγοντες που καθορίζουν τη ροή πολυφασικού συστήματος σε πορώδες μέσο είναι:

- Ο βαθμός διαβροχής του πετρώματος από κάθε φάση (wettability).
- Η διεπιφανειακή τάση μεταξύ των ρευστών (interfacial tension).
- Η τριχοειδής πίεση που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια ρευστών στους πόρους, που είναι συνέπεια της διεπιφανειακής τάσης και του βαθμού διαβροχής του πετρώματος (capillary pressure).
- Τα ιξώδη των ρευστών (viscosity ratio).
- Η υδραυλική βαθμίδα (βαθμίδα πίεσης) κατά μήκος της ροής (pressure gradient).
- Οι βαθμοί κορεσμού (saturation).
- Η διαπερατότητα του σχηματισμού (intrinsic permeability).

1.3.1. Τρόπος διαβροχής του πετρώματος

Ο βαθμός διαβροχής^[5], αναφέρεται στη συνάφεια μεταξύ του πετρώματος με τα μόρια κάθε φάσης ξεχωριστά. Τα πετρώματα που παρουσιάζουν μεγαλύτερη συνάφεια με την υδατική φάση, ονομάζονται υδατοδιαβρεχτά (water-wet), ενώ αυτά που έχουν μεγαλύτερη συνάφεια με το πετρέλαιο, ονομάζονται ελαιοδιαβρεχτά (oil-wet). Υπάρχουν επίσης και πετρώματα, ενδιάμεσης διαβροχής.

Λόγω της μεγαλύτερης συνάφειας με το πέτρωμα η διαβρέχουσα φάση διεισδύει πρωτίστως στους μικρότερους πόρους, ενώ η μη διαβρέχουσα φάση διεισδύει αρχικά στους μεγαλύτερους^[6] που παρουσιάζουν μικρότερη τριχοειδή πίεση. Οι πόροι πληρούνται στα εσωτερικά τοιχώματά τους με τη διαβρέχουσα φάση, ενώ η μη διαβρέχουσα καταλαμβάνει το κέντρο τους^[5]. Γενικά, η αέρια φάση θεωρείται μη διαβρέχουσα (σε σχέση με τις άλλες δύο) γιατί αποτελείται από μόρια χαμηλού μοριακού βάρους που δεν δημιουργούν ισχυρές δυνάμεις

συνάφειας με την επιφάνεια του πετρώματος. Η φάση που διαβρέχει το πορώδες μέσο, δημιουργεί ένα φιλμ που καλύπτει την επιφάνειά του και διακρίνεται σε μικροσκοπικό επίπεδο σε δύο στρώματα. Το πρώτο στρώμα εξουδετερώνει τα πλεονάζοντα φορτία του πετρώματος με ιόντα αντίθετου φορτίου, ενώ το δεύτερο στρώμα ανταλλάσσει ιόντα με την υπόλοιπη μάζα της φάσης που διαβρέχει τα τοιχώματα των πόρων^[5]. Οι δυνάμεις συνάφειας που αναπτύσσονται μεταξύ του διαβρέχοντος ρευστού και της στερεής επιφάνειας είναι ηλεκτροστατικές δυνάμεις Coulomb, τύπου Van der Waals. Η συνισταμένη δύναμη που ασκείται στο σημείο επαφής ανά μονάδα μήκους (επιφάνεια επαφής), εκφράζει τη δύναμη διαβροχής^[5]. Όσο μεγαλύτερες αρνητικές τιμές λαμβάνει, το ρευστό και το πέτρωμα τείνουν να απομακρυνθούν, ενώ όσο υψηλότερες θετικές τιμές λαμβάνει, το ρευστό και το πέτρωμα τείνουν να έλκονται. Η δύναμη διαβροχής είναι συνάρτηση της ορυκτολογίας του πετρώματος, του PH και των συστάσεων του πετρελαίου και του νερού στους πόρους του πετρώματος. Ο βαθμός διαβροχής του πετρώματος μπορεί να διαφέρει κατά μήκος, πλάτος και βάθος σε ένα ταμιευτήρα. Εξαρτάται από τη σύσταση του πετρώματος και των περιεχομένων ρευστών. Ενδέχεται να μεταβληθεί, ως αποτέλεσμα της γεωτρητικής και παραγωγικής διαδικασίας. Για παράδειγμα, ο πολφός του γεωτρητικού υγρού, λόγω επιφανειακά ενεργών ουσιών (surfactants) που επικάθονται στο πέτρωμα, μπορεί να αντιστρέψει μερικές φορές τον τρόπο διαβροχής.

Σε παλαιότερες μελέτες όλοι οι ταμιευτήρες θεωρούνταν υδατοδιαβρεχτοί^[5]. Ο ισχυρισμός αυτός ενισχύθηκε από το γεγονός ότι στον ταμιευτήρα προϋπήρχε νερό πριν τη δευτερογενή μετανάστευση του πετρελαίου από το μητρικό πέτρωμα. Σύγχρονα εργαστηριακά δεδομένα καταδεικνύουν συχνά, συμπεριφορά ενδιάμεσης διαβροχής ή και ισχυρότερης διαβροχής από το πετρέλαιο. Η παλαιότερη αντίληψη περί υδατοδιαβρεχτότητας του πετρώματος, τροποποιήθηκε, διότι η οργανική ύλη που εισέβαλε στον ταμιευτήρα, περιείχε στα μόρια της ορισμένες επιφανειακά ενεργές χημικές ουσίες (ασφαλτένια, πολικές ενώσεις), οι οποίες αλλάζουν το βαθμό διαβροχής του πετρώματος^[5]. Τα ασφατικά και παραφινικά μόρια υψηλού μοριακού βάρους λειτουργούν ως διαλελυμένα μόρια και εκείνα μέσου ή χαμηλού μοριακού βάρους, ως διαλύτες. Τα πρώτα εναποτίθενται στην επιφάνεια των πόρων όταν διαταραχτεί η φυσικοχημική ισορροπία, με αποτέλεσμα να προκύπτει ένας ενδιάμεσος τρόπος διαβροχής ή και να αντιστραφεί.

1.3.2. Διεπιφανειακή τάση μεταξύ των ρευστών

Τα μόρια ενός ρευστού, με εξαίρεση εκείνα που βρίσκονται στη διεπιφάνεια του ρευστού με ένα δεύτερο, υφίστανται συμμετρικές διαμοριακές δυνάμεις Van der Waals από τα ομοειδή τους μόρια που τα περιβάλλουν^[7]. Τα μόρια όμως που βρίσκονται στη διεπιφάνεια και τα οποία είναι κοντά με τα μόρια ενός δεύτερου ρευστού, περιβάλλονται μερικώς από ομοειδή μόρια, όποτε και υφίστανται την επίδραση ασύμμετρων ελκτικών δυνάμεων. Η φάση, τα μόρια της οποίας έχουν ισχυρότερες δυνάμεις Van der Waals, δημιουργεί μία κυρτή επιφάνεια γύρω της με σκοπό να περικλείσει τα μόρια της από εξωτερικές επιδράσεις, μειώνοντας έτσι τη συνολική της έκταση. Η αυτόματη συστολή ή διαστολή της επιφάνειας ενός ρευστού, δείχνει ότι απαιτείται ενέργεια με τη μορφή έργου, $W(J)$ που προκαλεί η δύναμη που ασκείται σε αυτή. Η ποσότητα του έργου που απαιτείται για να δαπανηθεί ανά μονάδα επιφάνειας $A(m^2)$ ή η συνισταμένη δύναμη των αντιτιθέμενων δυνάμεων για ένα σύστημα δύο ρευστών n_i και n_j ανά μονάδα μήκους καλείται διεπιφανειακή τάση (N/m) . Για δεδομένη πίεση $P(Pa)$ και θερμοκρασία $T(K)$, η επιφανειακή τάση σ ορίζεται ως:

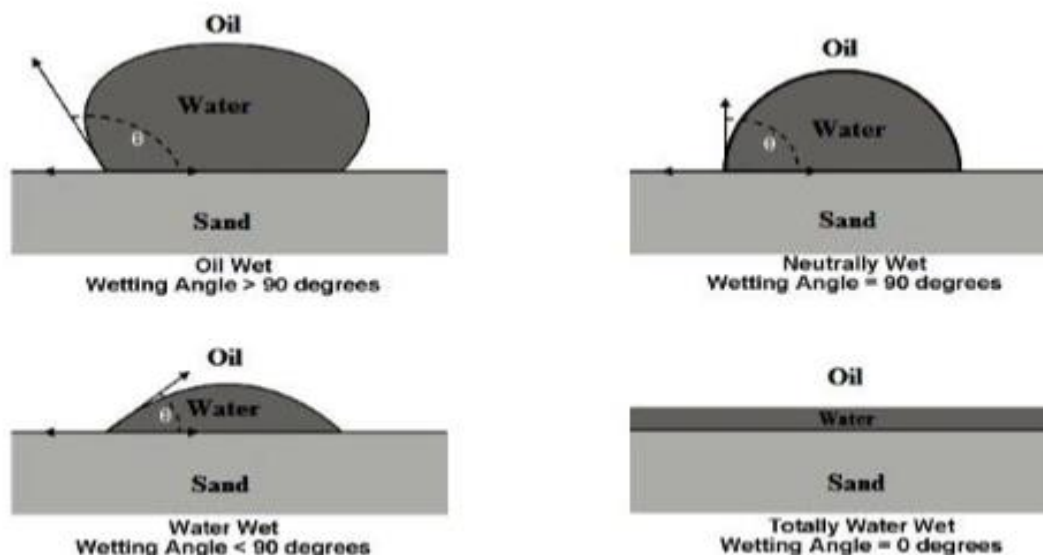
$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial A} \big|_{T,P,n_{ij}} \quad (1.3)$$

Συνηθίζεται η επιφανειακή τάση (surface tension) να αναφέρεται στη διεπιφάνεια του υγρού στον ατμοσφαιρικό αέρα, ενώ μεταξύ δύο υγρών ρευστών ονομάζεται διεπιφανειακή τάση (interfacial tension), αν και στη διεθνή βιβλιογραφία οι δύο όροι συχνά συγχέονται.

1.3.3. Διαβροχή στερεής επιφάνειας από ρευστό.

Για τη μελέτη πολυφασικών συστημάτων απαιτείται να ληφθούν υπόψιν όχι μόνο οι δυνάμεις στην διεπιφάνεια των ρευστών, αλλά και οι δυνάμεις που επενεργούν μεταξύ ρευστών και στερεής επιφάνειας. Κατά συνθήκη, η γωνία επαφής, θ της διεπιφάνειας των ρευστών με το στερεό τοίχωμα ορίζεται διαμέσου της βαρύτερης ρευστής φάσης και παίρνει τιμές 0° - 180°

(εικόνα 1.1 ^[8]). Όταν $\theta=0^\circ$, τότε το βαρύτερο υγρό καλύπτει πλήρως τη στερεή επιφάνεια και συμπεριφέρεται ως η διαβρέχουσα φάση, όταν $\theta < 90^\circ$ τότε το ρευστό συγκεντρώνεται σε σταγονίδια που δε διαβρέχουν πλήρως την επιφάνεια και όταν $\theta=180^\circ$, τότε υπάρχει πλήρης διαβροχή του πετρώματος από το ελαφρύτερο ρευστό



Εικόνα 1. 1: Αναπαράσταση των επιφανειακών τάσεων στην επιφάνεια επαφής των φάσεων με το πέτρωμα, ανάλογα με τη διαβρεχτότητα του πετρώματος.

Σε συνθήκες ισορροπίας ^[9], οι τρεις επιφανειακές τάσεις πρέπει να εξισορροπούνται κατά μήκος της γραμμής επαφής:

$$\sigma_{s,nw} = \sigma_{s,w} + \sigma_{w,nw} \cos(\theta) \quad (1.4)$$

Όπου $\sigma_{s,nw}$, $\sigma_{s,w}$, $\sigma_{w,nw}$ οι επιφανειακές τάσεις στερεού/μη διαβρέχουσας φάσης, στερεού/διαβρέχουσας φάσης και διαβρέχουσας/μη διαβρέχουσας φάσης αντίστοιχα.

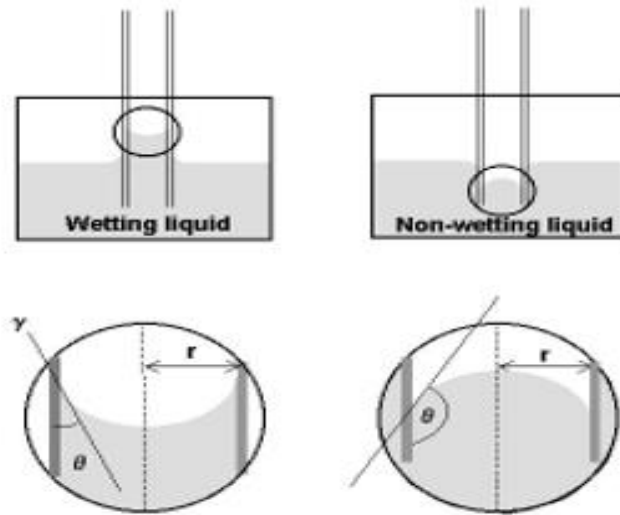
Η τάση διαβροχής A_T (N/m), ορίζεται ως:

$$A_T = \sigma_{s,nw} - \sigma_{s,w} = \sigma_{w,nw} \cos(\theta) \quad (1.5)$$

Αν η τάση διαβροχής είναι θετική, τότε η βαρύτερη φάση τείνει να διαβρέχει τη στερεή επιφάνεια, ενώ αν είναι αρνητική η διαβροχή γίνεται από την ελαφρότερη φάση.

1.3.4. Τριχοειδής πίεση

Αν θεωρήσουμε μία ομάδα τριχοειδών σωλήνων εμβαπτισμένων στη διαβρέχουσα φάση, τότε αυτή θα εισέλθει στους σωλήνες και θα ανέλθει πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της. Το ύψος της αναρρίχησης της διαβρέχουσας φάσης μέσα στο τριχοειδές αποτελεί μέτρο της διαβροχής με το σωλήνα, της διεπιφανειακής τάσης της διαβρέχουσας φάσης με το περιβάλλον ρευστό (μη διαβρέχουσα), καθώς και της διαμέτρου του τριχοειδούς. Η τριχοειδής πίεση είναι η διαφορά πίεσης εκατέρωθεν της διεπιφάνειας των δύο ρευστών στην εικόνα 1.2 ^[10].



Εικόνα 1.2: Αναρρίχηση της διαβρέχουσας φάσης μέχρις ότου το βάρος της στήλης να εξισορροπήσει τη δύναμη πρόσφυσης που τείνει να έλξει το υγρό μέσα στο σωλήνα.

Όπως αναφέρθηκε και πριν, η διαφορά πιέσεων εκατέρωθεν της διεπιφάνειας μεταξύ της διαβρέχουσας φάσης P_w (Pa) και μη διαβρέχουσας P_{nw} (Pa) ορίζεται ως τριχοειδής πίεση P_c (Pa), η οποία δίνεται από την σχέση:

$$P_c = P_{nw} - P_w = (\rho_{nw} - \rho_w)gh \quad (1.6)$$

Το ισοζύγιο δυνάμεων ^[10]:

$$\pi r^2 P_c = -A_T 2\pi r \quad (1.7)$$

Όπου r (m) η ακτίνα του τριχοειδούς, h (m) το ύψος ελεύθερης επιφάνειας της διαβρέχουσας φάσης, ρ_w (kg/m³) και ρ_{nw} (kg/m³) πυκνότητα της

διαβρέχουσας και μη φάσης αντίστοιχα και $g(m/s^2)$ η επιτάχυνση της βαρύτητας. Η επιφανειακή τάση $\gamma(N/m)$, είναι η επιφανειακή τάση μεταξύ διαβρέχουσας και μη φάσης.

Με βάση τις σχέσεις 1.5, 1.6 και 1.7 προκύπτει ότι:

$$h = \frac{-2\gamma \cos(\theta)}{rg(\rho_{nw} - \rho_w)} \quad (1.8)$$

$$P_c = \frac{-2\gamma \cos(\theta)}{r} \quad (1.9)$$

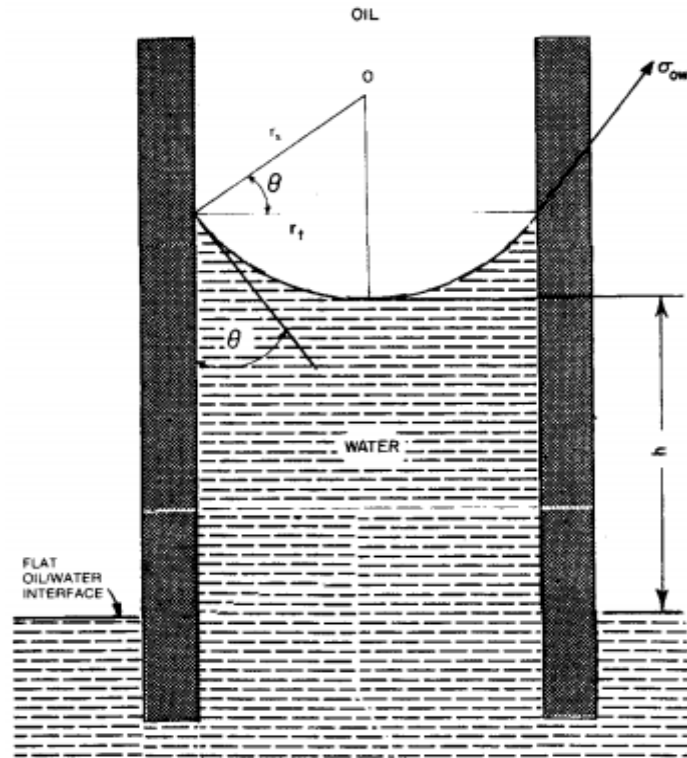
Επομένως, η τριχοειδής πίεση είναι συνάρτηση της φύσης των περιεχομένων ρευστών, του κορεσμού σε ρευστά, της γωνίας διαβροχής του πετρώματος και της κατανομής του μεγέθους των πόρων στον ταμιευτήρα. Άρα η τριχοειδής πίεση αυξάνει: ανάλογα με την τάση προσκόλλησης της διαβρέχουσας φάσης στην στερεή επιφάνεια, αντιστρόφως ανάλογα με την ακτίνα των πόρων και ανάλογα με την επιφανειακή τάση μεταξύ των ρευστών.

Σε πραγματικές συνθήκες, τα τριχοειδή δεν είναι κυλινδρικά, αλλά τα διάκενα, προκύπτουν από πυκνά κατανεμημένους κόκκους. Τη σχέση αυτή περιγράφει η εξίσωση Young-Laplace σε μία καμπύλη επιφάνεια, όπου η πίεση εξισορροπεί την επιφανειακή τάση μεταξύ των ρευστών ^[11]:

$$P_c = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.10)$$

$r_1, r_2(m)$: Κάθετες μεταξύ τους ακτίνες καμπυλότητας που ορίζουν μία επιφάνεια.

Η επιφάνεια αυτή, $dA(m^2)$, είναι το σημείο όπου η πίεση ισούται με την τριχοειδή.



Εικόνα 1. 3: Γεωμετρική απεικόνιση της γωνίας επαφής συναρτήσει της ακτίνας του τριχοειδούς και της ακτίνας της σφαίρας που ορίζει η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο ρευστών.

Αν εφαρμοστεί η εξίσωση 1.10 σε κυλινδρικό τριχοειδές τότε, η τριχοειδής πίεση μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση της επιφανειακής τάσης, της γωνίας επαφής και μίας σταθερής ακτίνας πόρων^[11]. Όταν το κυλινδρικό τριχοειδές, ακτίνας $r_t(m)$ είναι αρκετά μικρό, η διεπιφάνεια των δύο ρευστών προσεγγίζεται ως σφαίρα ακτίνας $r_s(m)$.

Αφού η διεπιφάνεια είναι σφαιρική, οι δύο ακτίνες καμπυλότητας ισούνται με τη σφαιρική ακτίνα:

$$P_c = \frac{2\gamma}{r_s} \quad (1.11)$$

Η γωνία του ορθογωνίου τριγώνου, που σχηματίζεται μεταξύ της ακτίνας του τριχοειδούς και της σφαιρικής ακτίνας, ισούται με τη γωνία επαφής, ως γωνίες που έχουν τις πλευρές τους κάθετες εικόνα 1.3^[11]:

$$\cos\theta = \frac{r_t}{r_s} \quad (1.12)$$

Η σχέση 1.11 μέσω της 1.12, ταυτίζεται με την 1.9:

$$P_c = \frac{-2\gamma \cos(\theta)}{r_t} \quad (1.13)$$

1.4. Ροή στο πορώδες πέτρωμα σε μόνιμες συνθήκες

Αν ο στοιχειώδης όγκος του ρευστού, που περνά από το τυχαίο σημείο του πεδίου ροής, διαγράφει πάντοτε τις ίδιες γραμμές ροής, ενώ η ταχύτητά του στο δεδομένο σημείο είναι ανεξάρτητη του χρόνου t (sec), η ροή ονομάζεται μόνιμη ^[12] (steady-state).

$$\left. \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right|_{x,y,z} = 0 \quad (1.14) \quad \text{και} \quad \left. \frac{\partial P}{\partial t} \right|_{x,y,z} = 0 \quad (1.15)$$

Όπου u (m/sec), είναι η ταχύτητα ροής και P (Pa), η πίεση αντίστοιχα.

Όταν η ταχύτητα ροής είναι συνάρτηση του χρόνου, τότε η ροή αυτή χαρακτηρίζεται ως μη μόνιμη (unsteady).

1.5. Στρωτή ροή

Όταν οι γραμμές ροής νευτώνειου ρευστού είναι ευθείες και πραγματοποιούνται κατά παράλληλα στρώματα, όπου η ταχύτητα, u (m/sec) κατά μήκος μίας γραμμής ροής, είναι ανάλογη της υδραυλικής βαθμίδας, dP/dL (Pa/m) που προκαλεί, η ροή αυτή ονομάζεται στρωτή ^[13] (laminar). Στη περίπτωση που η ροή σχηματίζει στροβίλους, τότε η ροή αυτή ονομάζεται τυρβώδης. Αν ξεπεραστεί ένα όριο στη ταχύτητα ροής, τότε η ροή από στρωτή γίνεται τυρβώδης. Η ταχύτητα της ροής παύει να είναι ανάλογη της υδραυλικής βαθμίδας και το αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση εσωτερικής τριβής, οπότε ένα μέρος από τη μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα. Όταν ο αριθμός Reynolds ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή η ροή από στρωτή μεταβαίνει προς τη τυρβώδη ^[14]. Ο

αριθμός Reynolds, R ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας (inertial forces) προς τις ιξώδεις δυνάμεις (viscous forces) που ασκούνται μεταξύ των στρωμάτων του ρευστού. Οι ιξώδεις δύναμη είναι το μέτρο της αντίστασης της ροής, λόγω του δυναμικού ιξώδους του παρεχόμενου ρευστού. Ο αριθμός Reynolds παρατηρείται ότι λαμβάνει πολύ μικρές τιμές σε πορώδη μέσα, λόγω του μικρής διαμέτρου των πόρων ($Re \ll 1$). Οπότε, θεωρείται πρακτικά βέβαιο ότι η ροή σε πορώδες μέσο θα είναι πάντα στρωτή. Υπάρχει μία διάμετρος, $d(m)$ παράλληλα διατεταγμένων, N αριθμού τριχοειδών, στα οποία το ρευστό, δυναμικού ιξώδους, $\mu(Pa \cdot sec)$ διέρχεται κάθετα στη διατομή τους με ταχύτητα ροής, $u(m/sec)$. Αν η διάμετρος αυτή θεωρηθεί αντιπροσωπευτική για τη ροή σε πορώδες μέσο, ο αριθμός Reynolds υπολογίζεται ως εξής:

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (1.16)$$

1.6. Απόλυτη διαπερατότητα

Η απόλυτη διαπερατότητα (Intrinsic Permeability), $k(m^2)$ υπολογίζεται μέσω του νόμου του Darcy^[15]. Σε ένα πορώδες μέσο μήκους $L(m)$, διατομής $A(m^2)$, εγχέεται ρευστό με δυναμικό ιξώδες $\mu(Pa \cdot s)$ και με ογκομετρική παροχή $Q(m^3/s)$. Η πτώση πίεσης $\Delta P(Pa)$, υπολογίζεται ως η διαφορά της αρχικής πίεσης στην εισροή του πετρώματος και την τελική πίεση στην εκροή του.

$$Q = \frac{k}{\mu} A \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (1.17)$$

Το μέγεθος $\Delta P/\Delta L(Pa/m)$, εκφράζει την υδραυλική βαθμίδα κατά τη ροή. Η ταχύτητα της ροής είναι ανάλογη της υδραυλικής βαθμίδας με το λόγο $k/\mu(m \cdot s/kg)$, να εκφράζει τη σταθερά αναλογικότητας.

Για να ισχύει ο νόμος του Darcy με την παραπάνω μορφή του, απαιτούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- Κορεσμός 100% σε μονοφασικό ρευστό.
- Το ρευστό να είναι ασυμπίεστο.

- Η ροή πρέπει να είναι σταθερή και στρωτή ή καλύτερα έρπουσα (creeping flow, $Re \ll 1$).
- Δεν πρέπει να γίνονται χημικές αντιδράσεις μεταξύ του ρευστού με το πέτρωμα.

1.7. Σχετικές διαπερατότητες

Τα πειράματα που διεξήγαγε ο Darcy περιλάμβαναν 100% κορεσμένα με νερό στρώματα άμμου και οι μεταγενέστερες εξελίξεις του νόμου του Darcy, που χρησιμοποιούνται συνήθως στη βιομηχανία πετρελαίου, το επέκτειναν ώστε να περιλαμβάνουν μια γενικευμένη περίπτωση ροής οποιασδήποτε φάσης ρευστού^[16]. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση της έννοιας της ενεργής διαπερατότητας (effective permeability) κάθε φάσης ξεχωριστά, αντί της απόλυτης διαπερατότητας. Η έννοια της ενεργής διαπερατότητας παίζει σημαντικό ρόλο στη ροή των ταμιευτήρων, όταν οι ταμιευτήρες υδρογονανθράκων παράγονται με πρωτογενή ανάκτηση (πτώση πίεσης που προκαλεί η γεώτρηση στα ρευστά του ταμιευτήρα) ή δευτερογενή (μεθόδους εκτόπισης των ρευστών, που περιλαμβάνουν την έγχυση αερίου ή νερού για την υποβοήθηση της άντλησης). Η ενεργή διαπερατότητα αναφέρεται στη διαπερατότητα κάθε φάσης ξεχωριστά, όταν σε πορώδες μέσον διέρχονται τουλάχιστον δύο ρευστά.

Έτσι, η ροή της μιας φάσης επηρεάζει τη ροή της άλλης. Η ενεργή διαπερατότητα κάθε φάσης έχει άμεση σχέση με το βαθμό κορεσμού της, τη διαβρεχτότητα και τη κατανομή μεγέθους των πόρων του πετρώματος, γιατί καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται στο πέτρωμα.

Η σχετική διαπερατότητα (relative permeability), k_r , εκφράζει την ενεργή διαπερατότητα $k_e(m^2)$, ως προς τη διαπερατότητα του πετρώματος $k_{base}(m^2)$. Η σχετική διαπερατότητα k_r των αερίου, άλμης και πετρελαίου αντιστοίχως ορίζεται ως:

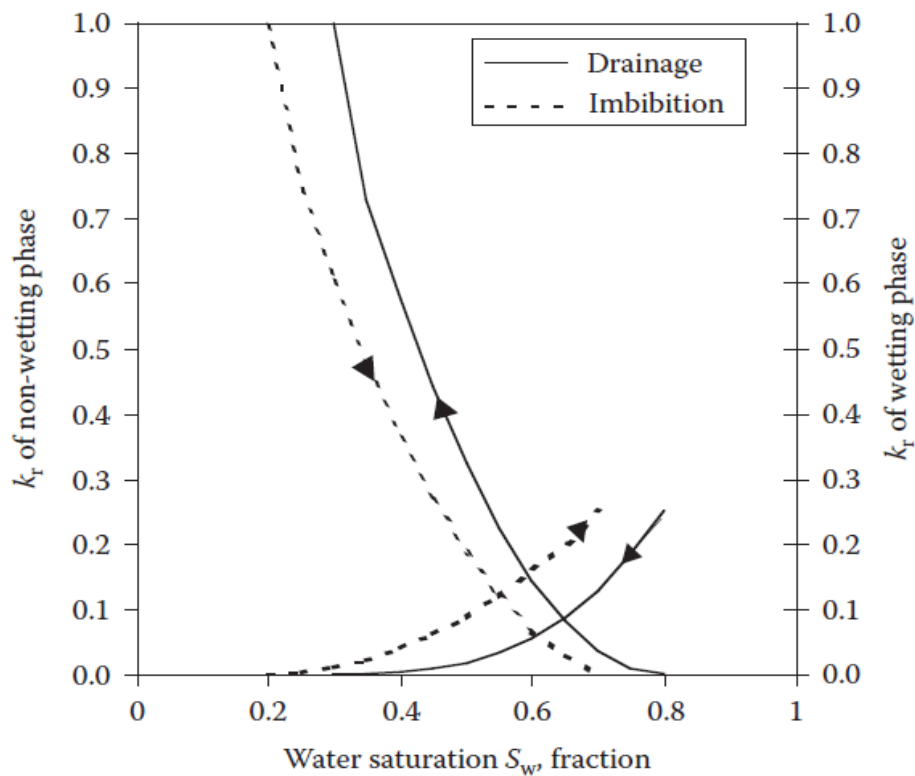
$$k_{rg} = \frac{k_{eg}}{k_{base}} \quad (1.18)$$

$$k_{rw} = \frac{k_{ew}}{k_{base}} \quad (1.19)$$

$$k_{ro} = \frac{k_{eo}}{k_{base}} \quad (1.20)$$

1.8. Υστέρηση λόγω τριχοειδών δυνάμεων

Οι σχετικές διαπερατότητες κάθε φάσης είναι συναρτήσεις των βαθμών κορεσμού των φάσεων και της διαδικασίας εκτόπισης της μίας φάσης από την άλλη άλλη ^[17]. Ως διαδικασία εκτόπισης, αναφέρεται μία ολοκληρωμένη εκτόπιση της μη διαβρέχουσας φάσης από τη διαβρέχουσα (εμποτισμός-imbibition) ή αντίστροφα η εκτόπιση της διαβρέχουσας φάσης από τη μη διαβρέχουσα (αποστράγγιση-drainage). Για δεδομένο βαθμό κορεσμού της διαβρέχουσας ή μη φάσης, οι σχετικές διαπερατότητες θα είναι διαφορετικές όταν μία ολοκληρωμένη διαδικασία εκτόπισης που ακολουθήθηκε ήταν απορρόφησης σε σύγκριση με την απομάκρυνσης. Το φαινόμενο κατά το οποίο, η διαδικασία της εκτόπισης μεταβάλλεται από εμποτισμό σε αποστράγγιση ή το αντίστροφο, πριν την ολοκλήρωση του κύκλου εκτόπισης, ονομάζεται υστέρηση (εικόνα 1.4 ^[17]). Το φαινόμενο οφείλεται στη διαφορετική διαδρομή πόρων που ακολουθούν τα ρευστά σε αυτές τις δύο διεργασίες. Στο εμποτισμό, η εισερχόμενη διαβρέχουσα φάση διέρχεται επιλεκτικά αρχικά από τους μοκρότερους πόρους. Αντίθετα στην αποστράγγισης, η εισερχόμενη μη-διαβρέχουσα φάση διέρχεται διαμέσου των μεγαλύτερων πόρων που παρουσιάζουν μικρότερη τριχοειδή πίεση.

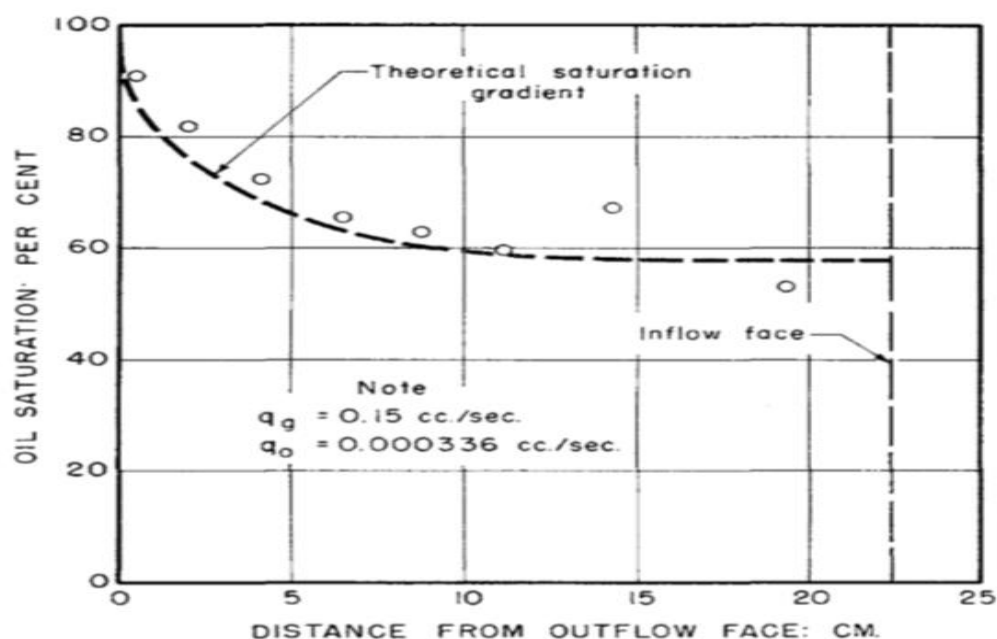


Εικόνα 1. 4: Διαφορές στις καμπύλες των σχετικών διαπερατοτήτων κατά την αποστράγγιση σε σύγκριση με τον εμποτισμό.

1.9. Τριχοειδή φαινόμενα εκροής

Για τη μελέτη των σχετικών διαπερατοτήτων των φάσεων που διέρχονται του πετρώματος του ταμιευτήρα, συλλέγεται δείγμα κυλινδρικού σχήματος από το πέτρωμα (δοκίμιο) για τη διενέργεια μετρήσεων στο εργαστήριο. Τα τριχοειδή φαινόμενα στην εκροή των δοκιμίων παρατηρούνται μόνο σε εργαστηριακές συνθήκες λόγω του πεπερασμένου μήκους του δοκιμίου και της διακοπής της συνέχειας της ροής στην εκροή τους (end-effects). Άρα, δεν είναι ένα τυπικό φαινόμενο που απαντάται σε συνθήκες ταμιευτήρα όπου οι διαστάσεις είναι πολύ μεγαλύτερες. Όταν δύο μη αναμίξιμα ρευστά διέρχονται του πορώδους μέσου, προκαλείται ασυνέχεια της τριχοειδούς πίεσης κατά την εκροή του ρευστού από το εξωτερικό τμήμα του δοκιμίου. Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο

βαθμός κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης να είναι μεγαλύτερος στην εκροή σε σχέση με άλλα σημεία κατά μήκος του πυρήνα (εικόνα 1.5 ^[18]).



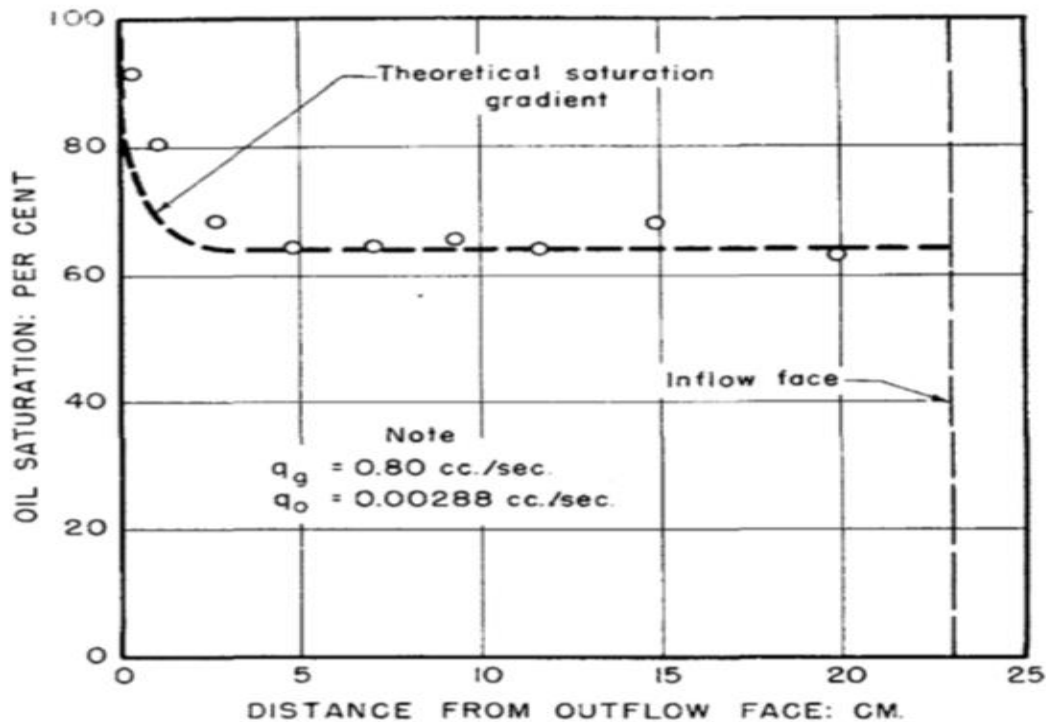
Εικόνα 1. 5: Βαθμός κορεσμού σε πετρέλαιο συναρτήσει της απόστασης από την εκροή του δοκιμίου σε χαμηλές παροχές αερίου και πετρελαίου.

Έχει διαπιστωθεί, πως αν δεν εξαλειφθούν τα τριχοειδή φαινόμενα στην εκροή, οι σχετικές διαπερατότητες των ρευστών που μετρούνται στους αντίστοιχους βαθμούς κορεσμού στη διαβρέχουσα φάση, θα υποεκτιμηθούν ^[19]. Ο λόγος είναι, επειδή ο βαθμός κορεσμού, της διαβρέχουσας φάσης από την εκροή του δοκιμίου είναι μεγαλύτερος στην εκροή απ' ότι είναι, κατά μήκος του πυρήνα. Μεγαλύτερο ποσοστό του όγκου κενών στη διαβρέχουσα φάση, που είναι ακίνητο και δε συμμετέχει στη ροή, θα καταλαμβάνει τους μικρούς πόρους στην εκροή, απ' ότι εάν τα τριχοειδή φαινόμενα στην εκροή είχαν εξαλειφθεί. Στην εικόνα 1.5 παρουσιάζονται ερευνητικά αποτελέσματα από μελέτες της βιβλιογραφίας υπό σταθερές παροχές σε πετρέλαιο και αέριο, το βαθμό κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης (πετρέλαιο), συναρτήσει της απόστασης από την εκροή του δοκιμίου.

Αν τα τριχοειδή φαινόμενα στην εκροή έχουν ελαχιστοποιηθεί, τότε η πτώση πίεσης ανάμεσα στην εισροή και την εκροή του δοκιμίου, ισούται προσεγγιστικά με τη πτώση πίεσης της διαβρέχουσας και μη φάσης. Τα

τριχοειδή φαινόμενα, μπορούν να εξαλειφθούν με υψηλές υδραυλικές βαθμίδες ή υψηλές παροχές των ρευστών. Η βαθμίδα κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης ως προς το μήκος του δοκιμίου, αυξάνεται απότομα από το 15% (εικόνα 1.5) του μήκους του δοκιμίου από την εκροή συγκριτικά με τη χρήση υψηλότερων παροχών για τις δύο φάσεις όπου παρατηρείται η αντίστοιχη αύξηση στο 3% (εικόνα 1.6^[18]). Σε υψηλές παροχές των δύο φάσεων, η βαθμίδα κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης ως προς το μήκος του δοκιμίου, είναι διάφορη του μηδενός σε μικρή απόσταση από την εκροή (εικόνα 1.6), σε σχέση με μικρότερες παροχές (εικόνα 1.5).

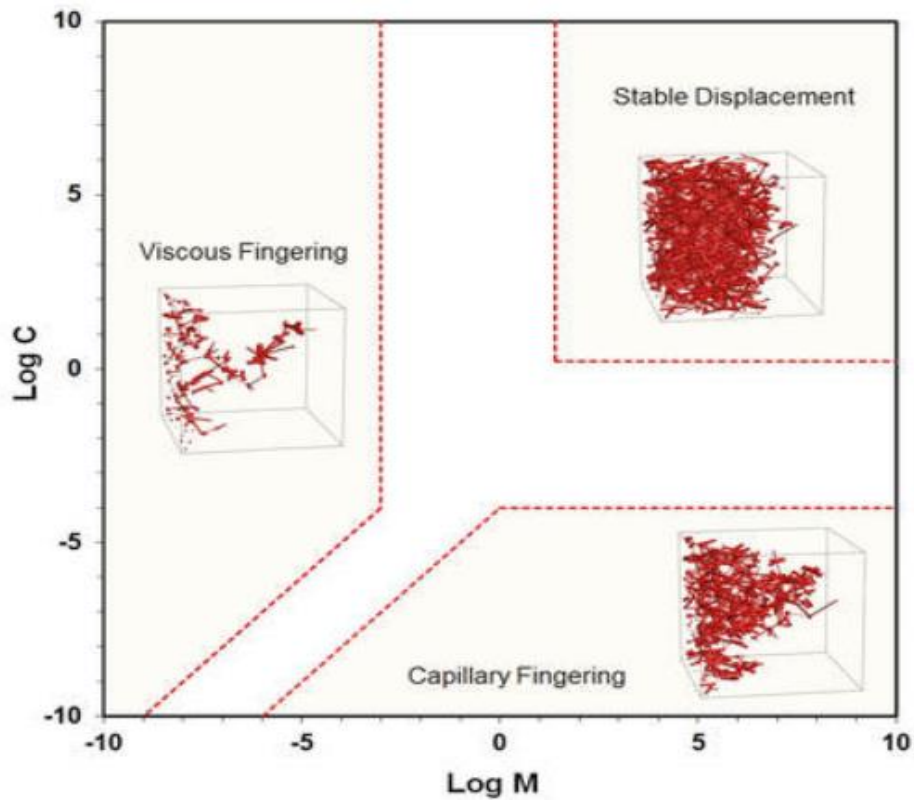
Άρα όσο μεγαλύτερος είναι ένας πυρήνας, τόσο πιο αμελητέα καθίστανται τα τριχοειδή φαινόμενα στην εκροή, δεδομένης της παροχής της κάθε φάσης, στον υπολογισμό των σχετικών τους διαπερατοτήτων. Η σχετική διαπερατότητα της μη διαβρέχουσας φάσης, επηρεάζεται ελάχιστα από τα τριχοειδή φαινόμενα στην εκροή του δοκιμίου, σε αντίθεση με της διαβρέχουσας. Κάποιες μέθοδοι σταθερής κατάστασης (Κεφάλαιο 2.1), χρησιμοποιούν τεμάχια του ίδιου πετρώματος, τα οποία βρίσκονται σε επαφή με τα τριχοειδή του προς μελέτη πετρώματος. Σε αυτή τη περίπτωση, τα τριχοειδή φαινόμενα στην εκροή του δοκιμίου εξαλείφονται ανεξαρτήτως της παροχής της κάθε φάσης. Σε όσες μεθόδους δεν πραγματοποιήθηκε καλή επαφή των τριχοειδών, για την εξάλειψη των τριχοειδών φαινομένων της εκροής στο σημείο όπου έγιναν οι μετρήσεις πίεσης, υπολογίστηκαν αποκλίσεις στις σχετικές διαπερατότητες της διαβρέχουσας φάσης και μικρές στις μη διαβρέχουσας. Τέλος, έχει διαπιστωθεί πειραματικά, πως η σχετική διαπερατότητα κάθε φάσης, είναι ανεξάρτητη των παροχών (με δεδομένο ότι ο λόγος των παροχών των δύο φάσεων παραμένει σταθερός), όταν εξαλειφθούν τα τριχοειδή φαινόμενα στην εκροή του δοκιμίου.



Εικόνα 1. 6: Βαθμός κορεσμού σε πετρέλαιο συναρτήσει της απόστασης από την εκροή του δοκιμίου σε υψηλές παροχές πετρελαίου και αερίου.

1.10 Βαθμός απόδοσης εκτοπισμού κατά την αποστράγγιση

Σε διεργασίες αποστράγγισης, η μη διαβρέχουσα φάση θα εκτοπίζει ανομοιόμορφα τη διαβρέχουσα φάση, δημιουργώντας δίκτυα ροής ροής^{[14][20]}. Η αποτελεσματικότητα της εκτόπισης (displacement efficiency), εξαρτάται από το λόγο του δυναμικού ιξώδους των ρευστών, τη διεπιφανειακή τους τάση, τη παροχή του εγγεόμενου ρευστού, τη διαβρεχτότητα του πετρώματος και τη γεωμετρία των πόρων του. Στο παρακάτω διάγραμμα της εικόνας 1.7^[21], του λογαρίθμου του τριχοειδούς αριθμού, $\log C$ (log of capillary number) συναρτήσει του λογαρίθμου του λόγου του ιξώδους της εκτοπίζουσας φάσης προς το ιξώδες της εκτοπιζόμενης φάσης, $\log M$ (log of viscosity ratio).



Εικόνα 1. 7: Ζώνες εκτοπισμού αποστράγγισης σε διάγραμμα του λογαρίθμου του τριχοειδούς αριθμού συναρτήσει του λογαρίθμου του λόγου των ιξωδών των δύο φάσεων.

Ο τριχοειδής αριθμός, C ορίζεται ως ο λόγος της ιξώδους δύναμης (viscous force) προς την τριχοειδή δύναμη (capillary force).

$$C = \frac{Q \mu_{nw}}{A \Phi \sigma \cos(\theta)} \quad (1.21)$$

$Q(m^3/sec)$: Παροχή εκτοπίζουσας φάσης

$\mu_{nw}(Pa \cdot s)$: Δυναμικό ιξώδες εκτοπίζουσας φάσης

$A(m^2)$: Εμβαδόν κάθετης διατομής του πορώδους μέσου στη ροή

Φ : Πορώδες του πετρώματος

$\sigma(N/m)$: Διεπιφανειακή τάση μεταξύ των δύο ρευστών

θ : Γωνία διαβροχής μεταξύ της διεπιφάνειας των δύο ρευστών με το τοίχωμα του πόρου.

$$M = \frac{\mu_{nw}}{\mu_w} \quad (1.22)$$

M : Λόγος των ιξωδών των δύο φάσεων

μ_w : Δυναμικό ιξώδες εκτοπιζόμενης φάσης.

Η αποτελεσματικότητα της εκτόπισης αποτιμάται από τέσσερις ζώνες στην εικόνα 1.7. Η ιξώδης ζώνη, αφορά την εκτόπιση μίας φάσης μεγαλύτερου ιξώδους από μία δεύτερη μικρότερου ιξώδους. Οι ιξώδεις δυνάμεις της εκτοπιζόμενης φάσης για να προκληθεί η εκτόπιση της στους μικρότερους πόρους, είναι υψηλότερη των ιξωδών δυνάμεων της εκτοπίζουσας φάσης και των τριχοειδών δυνάμεων. Η εκτόπιση χαρακτηρίζεται από δίκτυα ροής, μικρού τμήματος του πορώδους, προς όλες τις κατευθύνσεις αλλά αναπτύσσεται κατά τη διεύθυνση της εκροής και δε δημιουργεί κλειστούς βρόχους παγίδευσης της εκτοπιζόμενης φάσης (viscous fingering). Το αποτέλεσμα είναι η εκτοπίζουσα φάση να διέλθει της εκροής παρακάμπτοντας μεγάλο τμήμα των πόρων που καταλαμβάνει η εκτοπιζόμενη φάση. Η τριχοειδής ζώνη επικρατεί σε τιμές χαμηλού τριχοειδούς αριθμού, όπου οι ιξώδεις δυνάμεις των δύο ρευστών είναι μικρότερες από τις τριχοειδείς. Στη περίπτωση αυτή, τα δίκτυα ροής έχουν κατεύθυνση προς όλες τις διευθύνσεις, συμπεριλαμβανομένης και της εισροής, με τη δημιουργία κλειστών βρόχων παγίδευσης της εκτοπιζόμενης φάσης (capillary fingering). Η ζώνη σταθερής εκτόπισης (stable displacement), επικρατεί υπό υψηλές τιμές του τριχοειδούς αριθμού και του λόγου των ιξωδών των δύο φάσεων, όπου οι ιξώδεις δυνάμεις της εκτοπιζόμενης φάσης που ευθύνονται για την εκτόπιση της εκτοπίζουσας, είναι υψηλότερες από τις ιξώδεις δυνάμεις της εκτοπιζόμενης φάσης και από τις τριχοειδείς. Το μέτωπο της εκτόπισης, είναι κατά προσέγγιση κάθετο στη διεύθυνση της ροής της εκτοπίζουσας φάσης. Η αποτελεσματικότητα της εκτόπισης κρίνεται από το μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού της εκτοπιζόμενης φάσης. Οι βαθμοί κορεσμού της εικόνας 1.7, παραμένουν σταθεροί στις τρεις αυτές ζώνες. Οι μεγαλύτερες τιμές απαντώνται στην ιξώδη ζώνη, ακολουθεί η τριχοειδής ζώνη και οι μικρότεροι βαθμοί κορεσμού βρίσκονται στη ζώνη σταθερής εκτόπισης. Η τέταρτη ζώνη, είναι η μεταβατική (transition zone), συμπεριλαμβάνει την εμφάνιση των παραπάνω φαινομένων ταυτοχρόνως, με την επίδραση της κάθε μίας από αυτές να σχετίζεται με το κατά πόσο η

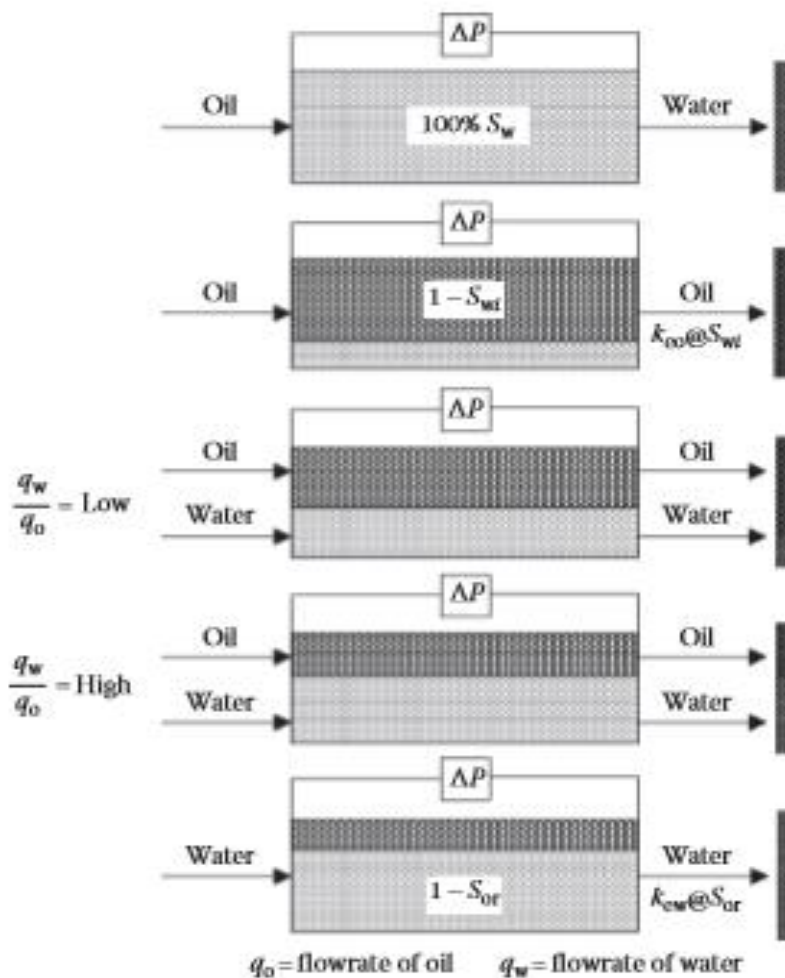
εκτόπιση βρίσκεται εγγύτερα της εκάστοτε ζώνης. Η γεωμετρία των πόρων διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη οριοθέτηση της μεταβατικής ζώνης^[20]. Η μείωση της κατανομής του μεγέθους των πόρων, προκαλεί τη μείωση του πεδίου της μεταβατικής ζώνης, με τα όρια των υπολοίπων ζωνών να καθίστανται ασαφή. Επιπλέον, τα όρια της ιξώδους ζώνης και της σταθερής εκτόπισης μετατοπίζονται σε τιμές μεγαλύτερες του λόγου των ιξωδών των δύο φάσεων. Τέλος, η μείωση του βαθμού συνδεσιμότητας των πόρων (coordination number), αυξάνει τη περιοχή της μεταβατικής ζώνης και τα όρια μεταξύ των ζωνών γίνονται πιο σαφή.

Κεφάλαιο 2: Μέθοδοι μέτρησης σχετικών διαπερατοτήτων.

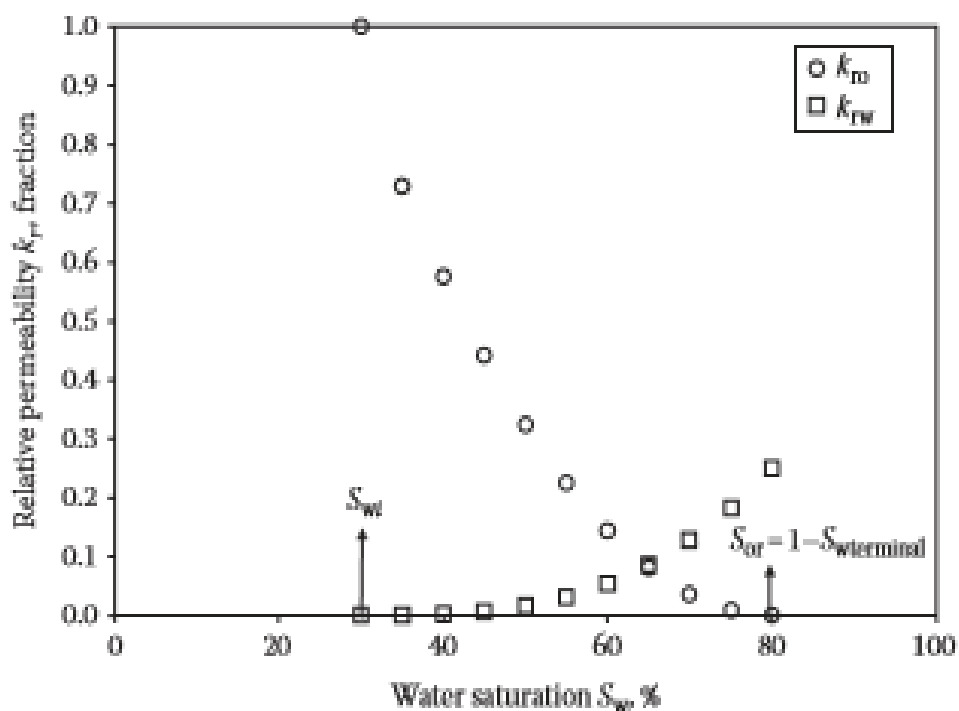
2.1. Μέθοδοι μόνιμης Κατάστασης

Η κατάσταση κατά την οποία, οι παροχές των ρευστών φάσεων στην εισροή ισούνται με τις παροχές στην εκροή ονομάζεται σταθερή (steady-state method). Οι μέθοδοι μόνιμης κατάστασης χρειάζονται συνήθως μεγάλο χρονικό διάστημα (από ώρες έως ημέρες), ώστε η ροή να σταθεροποιηθεί. Η πειραματική διαδικασία ξεκινάει με τον πλήρη κορεσμό του δοκιμίου με την πρώτη φάση. Η δεύτερη φάση εγχέεται μέχρι να μην μειώνεται πλέον ο βαθμός κορεσμού της αρχικής φάσης. Το δείγμα αφαιρείται από τη διάταξη για να ζυγιστεί, ώστε να εκτιμηθεί ο βαθμός κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης. Το δείγμα αφαιρείται από τη διάταξη για να ζυγιστεί, ώστε να εκτιμηθεί ο βαθμός κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης. Υπάρχουν και άλλες πιο ακριβείς μέθοδοι, αλλά η ζύγιση είναι ταχύτερη και λιγότερο δαπανηρή μέθοδος. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται στους επόμενους βαθμούς κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης, όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Στη συνέχεια, ρυθμίζεται η παροχή και των δύο ρευστών, ώστε του πετρελαίου ή του αερίου να είναι μικρότερη του αερίου ή του νερού. Στις μεθόδους αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και περισσότερες των δύο φάσεων, αλλά θα αναλυθεί μόνο το διφασικό σύστημα ροής. Έπειτα, ο λόγος των αντίστοιχων παροχών αυξάνεται ή μειώνεται προς την κατεύθυνση της εξάντλησης του πετρελαίου ή του αερίου (εικόνα 2.1 ^[22]), έως να ολοκληρωθούν οι καμπύλες των σχετικών διαπερατοτήτων των δύο φάσεων συναρτήσει του βαθμού κορεσμού στη διαβρέχουσα φάση (εικόνα 2.2 ^[23]). Είναι πολύ σημαντικό, να σταθεροποιηθεί η πτώση πίεσης, στην αντίστοιχη παροχή της κάθε φάσης που έχει επιλεχθεί να είναι σταθερή για κάθε βαθμό κορεσμού στη διαβρέχουσα φάση. Τέλος, κάθε καμπύλη απορρόφησης ή απομάκρυνσης, δύναται να σχεδιαστεί και με έναν διαφορετικό τρόπο. Δηλαδή, η αντλία προσφέρει τη δυνατότητα ρύθμισης της πτώσης πίεσης για κάθε φάση, έως τη σταθεροποίηση των αντίστοιχων παροχών τους. Για το αέριο, λόγω της συμπιεστότητας του, θα πρέπει η πτώση πίεσης κατά

μήκος της ροής να είναι μικρή, ώστε να συμπεριφέρεται κατά προσέγγιση ως ασυμπίεστο και η παροχή να διατηρείται επίσης σταθερή. Επιπλέον, όταν το δοκίμιο αφαιρεθεί από τη διάταξη για να ζυγιστεί, θα πρέπει να έχει διασφαλιστεί ότι το αέριο δεν εκτόπισε σημαντική ποσότητα πετρελαίου ή νερού σε ατμοσφαιρική πίεση. Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία.



Εικόνα 2. 1: Σχηματική αναπαράσταση εκτοπισμού φάσεων νερού και πετρελαίου για τον προσδιορισμό σχετικών διαπερατοτήτων.



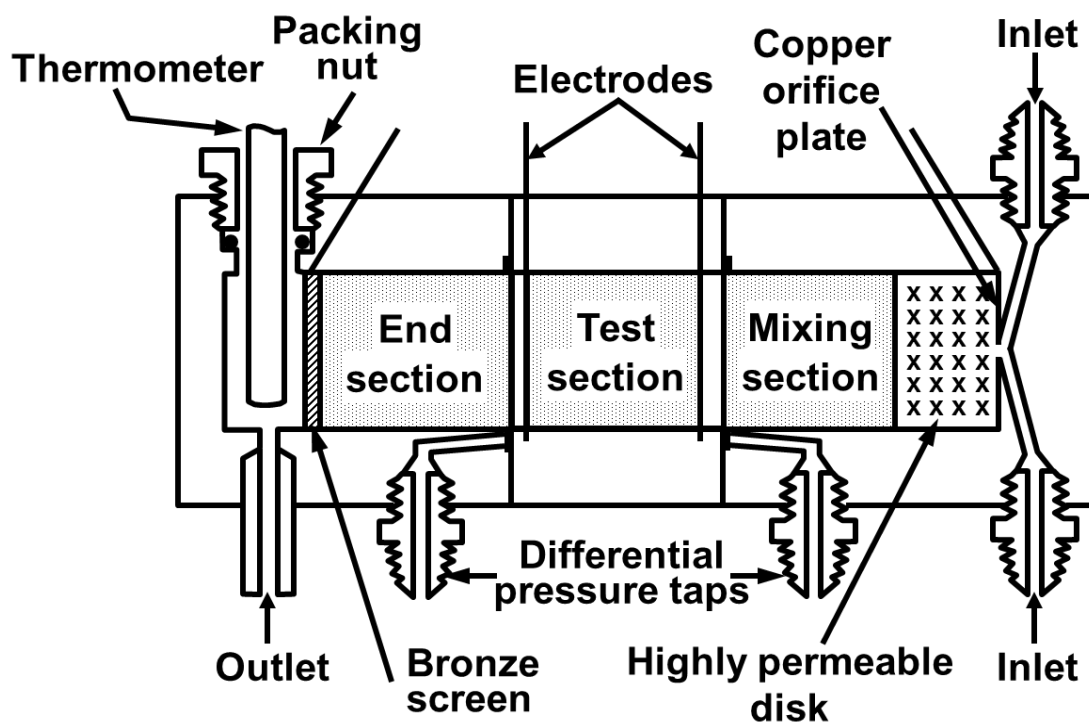
Εικόνα 2. 2: Τυπική καμπύλη των σχετικών διαπερατοτήτων νερού και πετρελαίου, συναρτήσει του βαθμού κορεσμού σε νερό.

2.1.1. Μέθοδος Penn-State

Προκειμένου να μην παρεμποδίζεται η ροή λόγω ισχυρών τριχοειδών δυνάμεων στην εκροή του δείγματος και να επιτυγχάνεται πλήρη αναμιξιμότητα των δύο φάσεων πριν εγχυθούν στο προς μελέτη δείγμα, τοποθετούνται δύο επιπλέον τεμάχια πετρώματος παρόμοια με το προηγούμενο εκατέρωθεν του αρχικού ή ένα επιπλέον πέτρωμα υψηλής διαπερατότητας πριν την εισροή του προς μελέτη δοκιμίου (εικόνα 2.3 ^[24]). Η Penn-State μέθοδος ^[24], μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υγρό-υγρό σύστημα αλλά και σε αέριο-υγρό. Απαιτείται καλή σύνδεση στα σημεία επαφής του πυρήνα με τα άλλα δύο πρόσθετα τεμάχια για να αποφευχθούν τριχοειδή φαινόμενα εκροής και για να υπάρξει ομοιογενής ανάμειξη των ρευστών στην εισροή. Σταθερή θερμοκρασία απαιτείται για να μετρηθούν σωστές τιμές σχετικών διαπερατοτήτων, όπως και στις υπόλοιπες μεθόδους. Τέσσερα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για να εξετάσουν τη κατανομή του κορεσμού στη διαβρέχουσα φάση και να

διαπιστωθεί αν έχουν ελαχιστοποιηθεί τα τριχοειδή φαινόμενα εκροής στα σημεία σύνδεσης των τεμαχίων σε σχέση με την εισροή και την εκροή τους. Τα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης^[25] (specific electrical resistance) των αγωγίμων ρευστών και του συστήματος ρευστών-πετρώματος. Η ειδική αντίσταση ενός υλικού εκφράζει την αντίσταση στην αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω αυτού και δεν είναι συνάρτηση μόνο του υλικού, αλλά της διατομής και του πάχους κατά μήκος της αγωγής του ηλεκτρικού ρεύματος. Το πετρέλαιο και το πέτρωμα είναι μονωτές (nonconductive). Εξαιρούνται ορισμένα αργιλικά ορυκτά (π.χ. ορυκτά των σχιστολιθικών πετρωμάτων). Ο βαθμός κορεσμού της άλμης είναι μία συνάρτηση της ειδικής αντίστασης της άλμης, της ειδικής αντίστασης του πλήρως κορεσμένου πετρώματος στην άλμη, της ειδικής αντίστασης του κορεσμένου πετρώματος σε άλμη και πετρέλαιο, της αλατότητας (salinity) του νερού, του πορώδους, της γεωμετρίας των πόρων, και της θερμοκρασίας. Η μέθοδος αυτή αποδίδει τις καμπύλες των σχετικών διαπερατοτήτων των δύο φάσεων με υψηλή ακρίβεια.

Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι υπολογισμού του βαθμού κορεσμού, όπως η μέθοδος της ζύγισης (θα αναλυθεί παρακάτω), χρήση ισοζυγίων μάζας εισερχόμενων και εξερχόμενων ρευστών κ.α.



Εικόνα 2. 3: Διάταξη της μεθόδου Penn-State.

2.1.2. Μέθοδος Single-Sample Dynamic

Η διάταξη και η πειραματική διεργασία^[19] διαφέρουν από την Penn-State κυρίως στη διευθέτηση των τριχοειδών δυνάμεων στις απολήξεις του δοκιμίου. Αντί στο δοκίμιο να συνδεθούν δύο όμοια τεμάχια πετρώματος, εγγέονται τα δύο ρευστά ταυτοχρόνως σε ένα δοκίμιο και επιπλέον εφαρμόζονται σχετικά υψηλές παροχές, ώστε η περιοχή υψηλού κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης στην εκροή του δοκιμίου να ελαχιστοποιηθεί. Εάν η παροχή ρυθμιστεί σχετικά υψηλή, τότε παρατηρείται ότι ο βαθμός κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης είναι σταθερός από την αρχή έως και κοντά πριν την εκροή του δοκιμίου. Στο υπόλοιπο τμήμα, έως την εκροή του δοκιμίου παρατηρείται ραγδαία αύξηση του βαθμού κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης. Όσο υψηλότερη είναι η παροχή τόσο στενεύει το διάστημα της έντονης αύξησης της βαθμίδας κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης και αντίστοιχα μικρότερες παροχές προκαλούν διεύρυνση της περιοχής. Παρόλο που απαιτούνται υψηλές παροχές, θα πρέπει να δοθεί η ιδιαίτερη προσοχή στην αποτροπή του ενδεχομένου της τυρβώδους ροής. Οι σχετικές διαπερατότητες της διαβρέχουσας φάσης αυξάνονται έως μία κρίσιμη τιμή της παροχής, της φάσης αυτής, αλλά οι σχετικές διαπερατότητες της μη διαβρέχουσας φάσης είναι ανεξάρτητη της παροχής της.

2.1.3. Μέθοδος Stationary Fluid

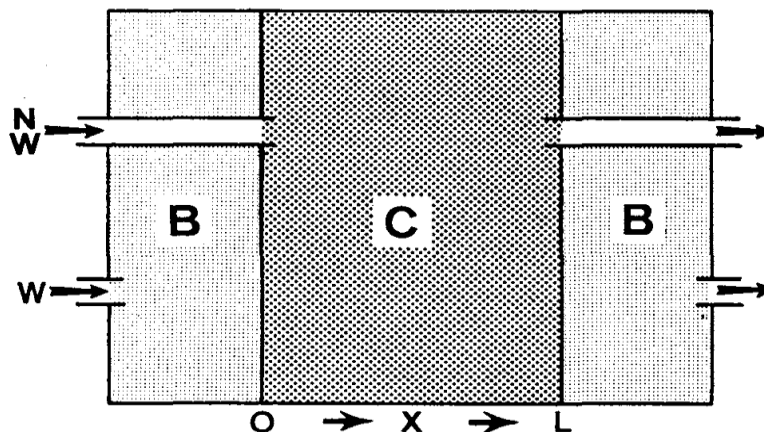
Η τεχνική^[19] αυτή σχεδιάστηκε ώστε η διαβρέχουσα φάση να παραμένει ακίνητη, όσο η μη διαβρέχουσα κινείται υπό χαμηλή υδραυλική βαθμίδα, που δεν εκτοπίζει τη διαβρέχουσα φάση. Η μέθοδος αυτή σχεδιάστηκε με σκοπό να αποφευχθούν τα τριχοειδή φαινόμενα στην εκροή. Τοποθετήθηκε απορροφητικό χαρτί στην εκροή του δοκιμίου, ώστε να απορροφήσει τη διαβρέχουσα φάση. Κάθε φορά που μειωνόταν ο βαθμός κορεσμού στη διαβρέχουσα φάση, το απορροφητικό χαρτί αφαιρούταν και αναμενόταν έως να κατανεμηθεί στους πόρους σύμφωνα με τη καμπύλη της απομάκρυνσης (τουλάχιστον 24 ώρες). Παραλλαγές αυτής της μεθόδου έγιναν με την αντικατάσταση του

απορροφητικού χαρτιού με τα τεμάχια ίδιου πετρώματος της Penn-State ή τοποθέτηση ημιδιαπερατής μεμβράνης που θα δεσμεύει τη διαβρέχουσα φάση, υπό τη σταθερή παροχή της, αλλά θα είναι αδιαπέρατη στη μη διαβρέχουσα φάση. Έπειτα υπό μικρή υδραυλική βαθμίδα προκαλείται ροή της μη διαβρέχουσας φάσης σε κάθε βαθμό κορεσμού της διαβρέχουσας. Η μέθοδος αυτή αποδίδει τη σχετική διαπερατότητα της μη διαβρέχουσας φάσης με υψηλή ακρίβεια, άλλα μόνο σε ένα τμήμα της καμπύλης. Ο λόγος είναι ότι ο τρόπος μείωσης της διαβρέχουσας φάσης είναι μη ρεαλιστικός. Εάν η μη διαβρέχουσα φάση δεν εκτοπιστεί από τη διαβρέχουσα, αλλά απορροφηθεί από το χαρτί, πειραματικά δεδομένα καταδεικνύουν πως η ροή της διαβρέχουσας φάσης θα διακοπεί για ένα βαθμό κορεσμού της μεγαλύτερο του μη περαιτέρω μειώσιμου βαθμού κορεσμού.

2.1.4. Μέθοδος Hassler

Η μέθοδος^[26] αυτή προτάθηκε πρώτη φορά από τον Hassler. Ημιδιαπερατές μεμβράνες τοποθετούνται στην εισροή και στην εκροή του δοκιμίου. Οι μεμβράνες αυτές χρησιμοποιούνται για να εισάγονται και να εξάγονται τα ρευστά ξεχωριστά (εικόνα 2.4^[26]), αλλά οι δύο φάσεις να ρέουν αναμεμιγμένες στο εσωτερικό του πυρήνα. Η διάταξη αυτή σχεδιάστηκε με αυτό τον τρόπο, με σκοπό να μετράται η πίεση της κάθε φάσης στην εισροή και την εκροή του δοκιμίου, ξεχωριστά. Ρυθμίζεται η παροχή της μη διαβρέχουσας φάσης, ενώ της διαβρέχουσας διατηρείται σταθερή, έτσι ώστε οι υδραυλικές βαθμίδες των δύο ρευστών να εξισώνονται και οι τριχοειδείς πιέσεις να αποκτούν σταθερή τιμή στην εισροή και στην εκροή του πυρήνα. Η τεχνική αυτή έχει σχεδιαστεί με σκοπό ο βαθμός κορεσμού να είναι ομοιόμορφος κατά μήκος του πυρήνα και συνεπώς να ελαχιστοποιούνται προβλήματα ροής λόγω τριχοειδών πιέσεων, παρόλο που η παροχή είναι μικρή. Στην πραγματικότητα όμως, η τριχοειδής πίεση δε μπορεί σταθεροποιηθεί κατά μήκος του δοκιμίου με αποτέλεσμα, ο βαθμός κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης στην εισροή να είναι μεγαλύτερος από την εκροή και ενδιάμεσος στο υπόλοιπο πέτρωμα. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι τα ρευστά εισέρχονται και εξέρχονται του πετρώματος ανομοιόμορφα σε σχέση με τη ροή

εκατέρωθεν τους. Παρατηρήθηκε πως η μέθοδος αυτή αποδίδει σωστά τη καμπύλη των σχετικών διαπερατοτήτων της μη διαβρέχουσας φάσης άλλα υπεισέρχονται σημαντικά σφάλματα στην καμπύλη των σχετικών διαπερατοτήτων της διαβρέχουσας φάσης ^[19].

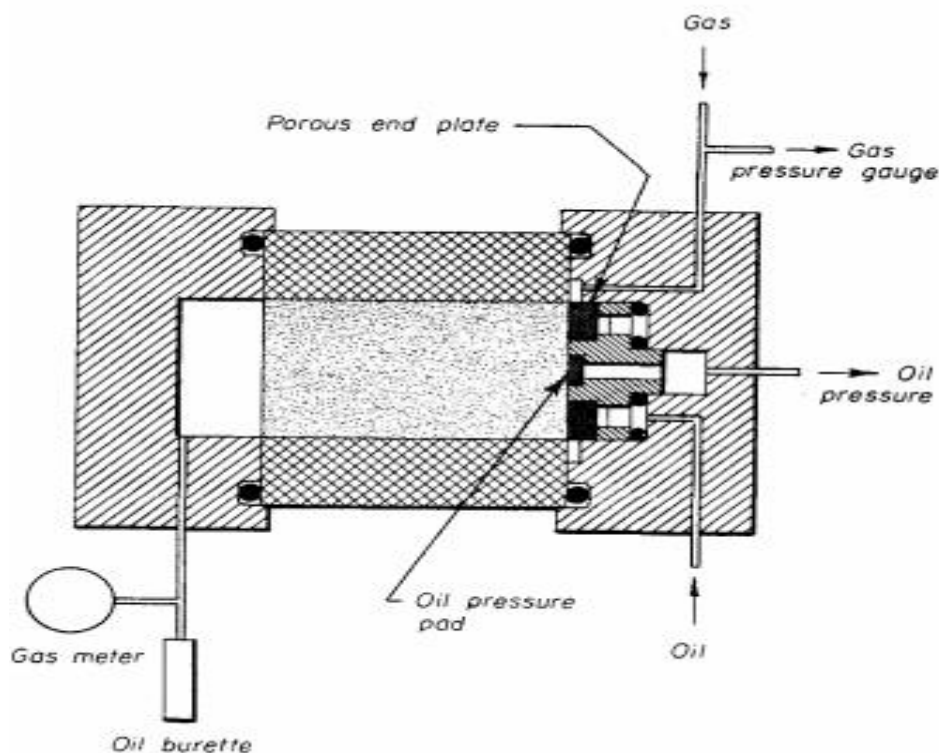


Εικόνα 2. 4: Απεικονίζεται με C ο πυρήνας μελέτης και με B οι ημιδιαπερατές μεμβράνες, καθώς και η εισαγωγή της διαβρέχουσας και μη φάσης ξεχωριστά.

2.1.5. Μέθοδος Hafford

Σε αυτή τη μέθοδο ^[18], η μη διαβρέχουσα φάση εγχέεται κατευθείαν μέσα στον πυρήνα ενώ η διαβρέχουσα φάση εγχέεται μέσω ενός δίσκου που είναι αδιαπέρατος στη μη διαβρέχουσα φάση. Το κεντρικό τμήμα του ημιδιαπερατού δίσκου είναι απομονωμένο από τον υπόλοιπο δίσκο με ένα μεταλλικό προστατευτικό περίβλημα, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5 ^[18]. Το κεντρικό τμήμα του δίσκου χρησιμοποιείται για να μετρήσει τη πίεση της διαβρέχουσας φάσης στην αρχή του δοκιμίου. Η μη διαβρέχουσα φάση εγχέεται κατευθείαν στον πυρήνα και η πίεση της μετريέται μέσω ενός μανομέτρου που είναι συνδεδεμένο περιμετρικά της διατομής του πυρήνα. Η διαφορά πίεσης μεταξύ διαβρέχουσας και μη φάσης εκφράζει τη τριχοειδή πίεση στο άκρο εισροής. Η πίεση στην εκροή μετράται και για τις δύο φάσεις μαζί. Οι τριχοειδείς πιέσεις στην εκροή του δοκιμίου ελαχιστοποιούνται με χρήση υψηλών παροχών. Σε υψηλές παροχές η μέθοδος είχε υψηλή ακρίβεια στον προσδιορισμό των σχετικών

διαπερατοτήτων. Σε χαμηλές παροχές διαπιστώθηκαν μικρότερες σχετικές διαπερατότητες της διαβρέχουσας φάσης, ενώ δεν επηρεάστηκαν της μη διαβρέχουσας.

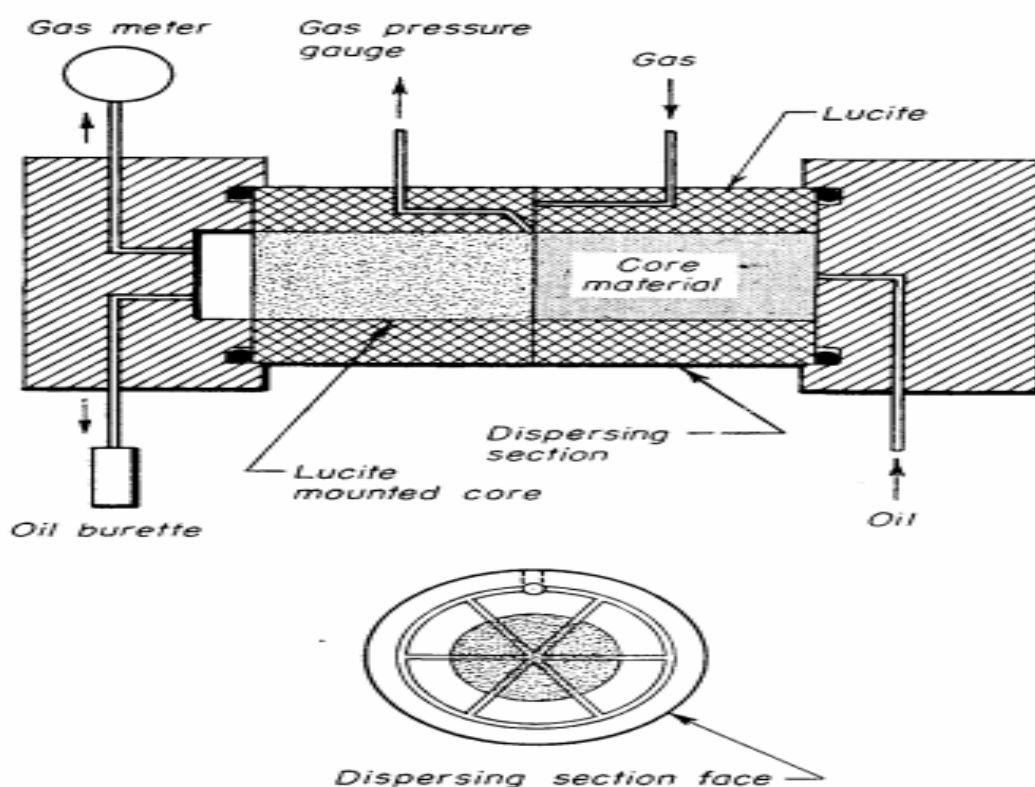


Εικόνα 2. 5: Διάταξη κατά Hafford.

2.1.6. Μέθοδος Dispersed Feed

Σε αυτή τη μέθοδο^[18] η διαβρέχουσα φάση διέρχεται του πυρήνα, αφού πρώτα διέλθει δια μέσου ενός τεμαχίου το οποίο αποτελείται από το ίδιο υλικό με τον πυρήνα (εικόνα 2.6^[18]). Το υλικό αυτό δε διαθέτει στην εισροή του μανόμετρο για να μετρά τη πίεση της διαβρέχουσας φάσης όπως η Hafford, αλλά ούτε και της μη διαβρέχουσας. Κατανέμει τη διαβρέχουσα φάση, ώστε να εισέρχεται περισσότερο ή λιγότερο ομοιόμορφα κατά τόπους, στην εισροή του πυρήνα. Η μη διαβρέχουσα φάση εισάγεται μέσω ακτινικού αυλακωτή (για να επιτυγχάνεται ανάμειξη των δύο φάσεων), ο οποίος έχει προσαρμοστεί μεταξύ της εισόδου του πυρήνα και της εξόδου του τεμαχίου. Περιμετρικά της εισροής

τοποθετείται ένα μανόμετρο για τη μη διαβρέχουσα φάση. Στην εκροή του δοκιμίου, η πίεση μετράται και για τις δύο φάσεις. Επιβάλλεται υψηλή υδραυλική βαθμίδα, ώστε οι τριχοειδείς πιέσεις στην εκροή του δοκιμίου να είναι αμελητέες. Η ίδια σχέση των τριχοειδών φαινομένων με τις σχετικές διαπερατότητες των δύο φάσεων, διαπιστώθηκε πειραματικά, όπως και με τη Single-Sample Dynamic και τη Hafford.



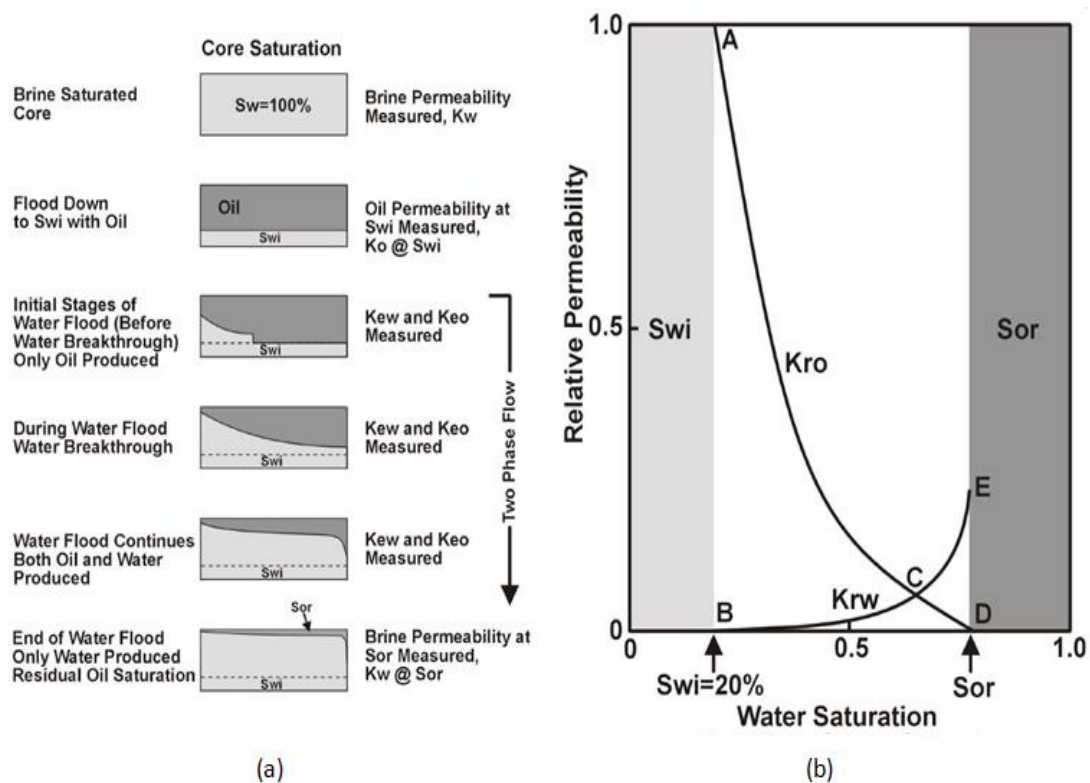
Εικόνα 2. 6: Διάταξη Dispersed Feed Method.

2.2. Μέθοδοι μη μόνιμης κατάστασης

Οι μέθοδοι μη μόνιμης κατάστασης^[27] (unsteady-state methods) διαφέρουν από της σταθερής, κατά το ότι εγχέεται στο δείγμα του πυρήνα μόνο η μία φάση ενώ παράγονται και οι δύο, έως τον υπολειμματικό βαθμό της δεύτερης. Έχει το πλεονέκτημα ότι μπορούν να εκτελεστούν γρήγορα χρησιμοποιώντας μικρά δοκίμια πυρήνων. Όπως και με τις μεθόδους σταθερής κατάστασης η φάση που θα επιλεγεί ως εκτοπίζουσα θα κορέσει αρχικά το πορώδες μέσο πλήρως. Στη συνέχεια, η εκτοπιζόμενη φάση θα

κορέσει το πορώδες μέσο έως το μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμού κορεσμού της εκτοπίζουσας φάσης. Από εκεί και πέρα, εγγέεται η εκτοπίζουσα φάση έως τον υπολειμματικό βαθμό κορεσμού της εκτοπιζόμενης φάσης. Στην αρχή, η παροχή της εκροής αποτελείται μόνο από την εκτοπιζόμενη φάση. Όταν το μέτωπο της εκτόπισης φτάσει στην εκροή και διέρχονται και τα δύο ρευστά, απεικονίζεται η καμπύλη των σχετικών διαπερατοτήτων της εκτοπίζουσας και εκτοπιζόμενης φάσης συναρτήσει του βαθμού κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης.

Τα ρευστά που χρησιμοποιούνται όπως και στις μεθόδους σταθερής κατάστασης, πρέπει να είναι μη αναμίξιμα και ασυμπίεστα. Όταν η παροχή της εκτοπίζουσας φάσης είναι μικρή, παρατηρούνται τριχοειδή φαινόμενα στην εκροή. Η μαθηματική περιγραφή της εκτόπισης, βασίζεται στο γεγονός πως ο βαθμός κορεσμού της εκτοπιζόμενης φάσης, βαίνει μειούμενος από το μέτωπο της εκτόπισης έως και την εισροή όπως φαίνεται στην (εικόνα 2.7(a) ^[28]). Στην πραγματικότητα όμως, στο διάστημα αυτό μπορεί να εμφανίζονται αυξομειώσεις, καθώς η εκτοπίζουσα φάση παρακάμπτει την εκτοπιζόμενη φάση. Παρόμοιο δίκτυο ροής της εκτοπίζουσας φάσης, παρακάμπτει την εκτοπιζόμενη φάση, στην περίπτωση ανομοιογενών πετρωμάτων που απαρτίζουν το πορώδες μέσο. Τα φαινόμενα αυτά ελαχιστοποιούνται, εάν η κινητικότητα (ενεργός διαπερατότητα προς ιξώδες) της εκτοπίζουσας φάσης, είναι υψηλή σε εργαστηριακές συνθήκες. Σε αυτή τη περίπτωση, η εκτόπιση της μίας φάσης από την άλλη θα είναι πολύ σύντομη και χρειάζεται ακριβή χρονομέτρηση των όγκων που συλλέγονται στην εκροή, εισαγάγοντας σφάλματα εκτίμησης. Τέλος, υπεισέρχονται σφάλματα που προέρχονται από απλουστεύσεις στη μαθηματική ερμηνεία στις μεθόδους μη σταθερής κατάστασης. Για τους προαναφερθέντες λόγους, εισαγάγονται σφάλματα μέτρησης, για την ακρίβεια των καμπυλών των σχετικών διαπερατοτήτων των ρευστών συναρτήσει του βαθμού κορεσμού στη διαβρέχουσα φάση. Οι μετρήσεις μη σταθερής ροής είναι ταχύτερες και ως επί το πλείστον προτιμώνται, αλλά υστερούν σε ακρίβεια. Η μέθοδος σταθερής κατάστασης έχει ακριβέστερα αποτελέσματα, αν και είναι χρονοβόρα και απαιτεί περισσότερο εξοπλισμό. Η πειραματική διαδικασία, τελειώνει με την εκροή μόνο της εκτοπίζουσας φάσης. Η μαθηματική περιγραφή της εκτόπισης (Παράρτημα Α.1) έγινε από τους Buckley και Leverett ^{[29] [30]}, στη θεωρία των οποίων στηρίχθηκαν οι πειραματικές μεθοδολογίες που θα αναπτυχθούν παρακάτω.



Εικόνα 2. 7(a): Πείραμα εκτοπισμού του πετρελαίου από το νερό στο μη περεταίρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό, **(b):** διάγραμμα σχετικών διαπερατοτήτων νερού και πετρελαίου συναρτήσει του βαθμού κορεσμού σε νερό.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.7(a), ο βαθμός κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου, τόσο πριν το μέτωπο της εκτόπισης φτάσει στην εκροή, όσο και μετά, σε αντίθεση με τις μεθόδους σταθερής κατάστασης όπου ο βαθμός κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης παραμένει σταθερός κατά μήκος του δοκιμίου (εικόνα 2.1). Οι σχετικές διαπερατότητες που απεικονίζονται στο διάγραμμα αφορούν την εκροή του δοκιμίου συναρτήσει του βαθμού κορεσμού στο σημείο αυτό της διαβρέχουσας φάσης (εικόνα 2.7(b) [28]). Υπάρχουν δύο παραλλαγές με τις οποίες μπορεί να πραγματοποιηθεί ένα πείραμα εκτοπισμού της μίας φάσης από μία άλλη. Κρατάται σταθερή η παροχή της εκτοπίζουσας φάσης και μετριέται η πτώση πίεσης της ροής, είτε η παροχή θα ρυθμίζεται πριν κάθε μέτρηση ώστε η πτώση πίεσης να παραμείνει σταθερή. Απαιτούνται ταχείς μετρήσεις, καθώς οι μέθοδοι αυτοί σε αντίθεση με της σταθερής κατάστασης γίνονται πολύ γρήγορα. Ένα μέσο πείραμα μπορεί να διαρκέσει έως μερικές ώρες.

2.2.1. Μέθοδος Welge

Στη μέθοδο Welge^{[31] [32]}, σε μικρά χρονικά διαστήματα, μετρίεται ο αθροιστικός όγκος της εκτοπίζουσας φάσης στην εισροή και ο αθροιστικός όγκος της εκτοπιζόμενης φάσης στην εκροή, για να υπολογιστεί ο λόγος σχετικών διαπερατοτήτων των δύο φάσεων συναρτήσει του βαθμού κορεσμού της εκτοπίζουσας φάσης στην εκροή.

Ο δείκτης w (διαβρέχουσα φάση) και nw (μη διαβρέχουσα φάση), παρακάτω θα αναφέρεται στην εκτοπίζουσα και την εκτοπιζόμενη φάση αντίστοιχα. Η διάκριση αυτή είναι αναγκαία καθώς δεν είναι απαραίτητο πως η αντιστοίχιση αυτή ισχύει πάντα. Παραδείγματος χάριν, η εκτόπιση του πετρελαίου από αέριο, σε πορώδες μέσο, το οποίο θα προτιμήσει να διαβρέχεται από το πετρέλαιο.

Οι κλασματικές ροές σε κάθε σημείο του πυρήνα ορίζονται ως εξής:

$$f_w = \frac{q_w}{q_t} \quad (2.1)$$

$$f_{nw} = \frac{q_{nw}}{q_t} \quad (2.2)$$

$$\text{Άρα } f_w + f_{nw} = 1 \quad (2.3)$$

f_w : κλασματική ροή της εκτοπίζουσας φάσης.

$q_w(m^3/sec)$: παροχή της εκτοπίζουσας φάσης.

$q_t(m^3/sec)$: παροχή της εκτοπίζουσας και της εκτοπιζόμενης φάσης.

f_{nw} : κλασματική ροή της εκτοπιζόμενης φάσης.

$q_{nw}(m^3/sec)$: παροχή της εκτοπιζόμενης φάσης.

Ο μέσος βαθμός κορεσμού της εκτοπίζουσας φάσης $\overline{S_w}(\%)$, όταν το μέτωπο της εκτόπισης φτάσει στην εκροή του δοκιμίου ορίζεται ως:

$$\overline{S_w} = \frac{\int_0^L S_w dx}{\int_0^L dx} \quad (2.4)$$

$L(m)$: πάχος του δοκιμίου, κατά μήκος της ροής.

Αρχικά υπολογίζεται ο βαθμός κορεσμού της εκτοπίζουσας φάσης στην εκροή του δοκιμίου:

$$S_{w,L} = \overline{S_w} - Q_{w,i} \cdot f_{nw,L} \quad (2.5)$$

$$f_{nw,L} = \frac{dQ_{nw,p}}{dQ_{w,i}} \quad \text{ή} \quad f_{nw,L} = \frac{d\overline{S_w}}{dQ_{w,i}} \quad (2.6)$$

$S_{w,L}(\%)$: βαθμός κορεσμού της εκτοπίζουσας φάσης στη εκροή.

$\overline{S_w}(\%)$: μέσος βαθμός κορεσμού της εκτοπίζουσας φάσης στον πυρήνα.

$f_{nw,L}$: κλασματική ροή της εκτοπιζόμενης φάσης στην εκροή.

$Q_{w,i}$: αθροιστικός όγκος εγχεόμενης εκτοπίζουσας φάσης στην εισροή, εκπεφρασμένος σε όγκο κενών.

$Q_{nw,p}$: αθροιστικός όγκος παραγόμενης εκτοπιζόμενης φάσης στην εκροή, εκπεφρασμένος σε όγκο κενών.

$$Q_{w,i} = \frac{q_{w,i}t}{LA\Phi} \quad (2.7)$$

$q_{wi}(m^3/sec)$: παροχή εκτοπίζουσας φάσης στην εισροή.

$t(sec)$: χρόνος έγχυσης της εκτοπιζόμενης φάσης.

$L(m)$: μήκος δοκιμίου.

$A(m^2)$: εμβαδόν διατομής δοκιμίου

$\Phi(\%)$: πορώδες δοκιμίου.

Η σχέση 2.7 αναφέρεται στον αθροιστικό όγκο κενών της εγχεόμενης εκτοπίζουσας φάσης στην εισροή, υπό σταθερή παροχή. Όταν η πτώση πίεσης διατηρείται σταθερή, υπολογίζεται ως τον αθροιστικό εγχεόμενο όγκο της εκτοπίζουσας φάσης στην εισροή προς τον όγκο των κενών.

$$Q_{nw,p} = \frac{V_{nw,p}}{LA\Phi} \quad (2.8)$$

$V_{nw,p}(m^3)$: αθροιστικός όγκος εκτοπιζόμενης φάσης στην εκροή.

$$\overline{S_w} = S_{wi} + Q_{nw,p} \quad (2.9)$$

$S_{wi}(\%)$: μη περαιτέρω μειώσιμος βαθμός κορεσμού στην εκτοπίζουσα φάση.

Ο λόγος των σχετικών διαπερατοτήτων στο βαθμό κορεσμού της εκτοπίζουσας φάσης στην εκροή του δοκιμίου ορίζεται ως:

$$\frac{K_{r,w}}{K_{r,nw}} = \frac{\mu_w}{\mu_{nw}} \frac{f_{w,L}}{f_{nw,L}} \quad (2.10)$$

$K_{r,w}$: σχετική διαπερατότητα εκτοπίζουσας φάσης στην εκροή.

$K_{r,nw}$: σχετική διαπερατότητα εκτοπιζόμενης φάσης στην εκροή.

$\mu_w (Pa \cdot sec)$: δυναμικό ιξώδες εκτοπίζουσας φάσης.

$\mu_{nw} (Pa \cdot sec)$: δυναμικό ιξώδες εκτοπιζόμενης φάσης.

$f_{w,L}$: κλασματική ροή εκτοπίζουσας φάσης στην εκροή.

Οι καμπύλες του λόγου των σχετικών διαπερατοτήτων συναρτήσει του βαθμού κορεσμού στα τελικά σημεία είναι:

$$\lim_{S \rightarrow S_{wi}} \frac{K_{r,w}}{K_{r,nw}} = 0 \quad (2.11)$$

$$\lim_{S \rightarrow 1 - S_{or}} \frac{K_{r,w}}{K_{r,nw}} = \infty \quad (2.12)$$

2.2.2. Μέθοδος JBN

Στη μέθοδο κατά Johnson – Bossler – Nauman^[33] μετρούνται τα παραπάνω μεγέθη, συν την πτώση πίεσης της συνολικής ροής. Η διαφορά αυτής της μεθόδου είναι ότι οι σχετικές διαπερατότητες υπολογίζονται ξεχωριστά.

Για κάθε χρονικό διάστημα t μετριέται ο βαθμός κορεσμού της εκτοπίζουσας φάσης στην εκροή του δοκιμίου ($S_{w,L}$) όπως περιεγράφηκε παραπάνω από τις σχέσεις 2.11-2.15.

Ο σχετικός δείκτης εγχυσιμότητας (relative injectivity) υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$I_r = \frac{\frac{q_w}{\Delta P}}{\left(\frac{q_w}{\Delta P}\right)_i} \quad (2.13)$$

$\Delta P, \Delta P_i$: η πτώση πίεσης σε χρόνο t και η πτώση πίεσης τη στιγμή της έγχυσης της εκτοπίζουσας φάσης, αντίστοιχα.

q_w, q_{wi} : η τρέχουσα τιμή και η τιμή εκκίνησης της παροχής έγχυσης, αντίστοιχα.

Οι σχετικές διαπερατότητες της εκτοπίζουσας και εκτοπιζόμενης φάσης στην εκροή του δοκιμίου είναι:

$$K_{r,nw} = f_{nw,L} \frac{d\left(\frac{1}{Q_{w,i}}\right)}{d\left(\frac{1}{I_r Q_{w,i}}\right)} \quad (2.14)$$

$$K_{r,w} = K_{r,nw} \frac{\mu_w}{\mu_{nw}} \frac{f_{w,L}}{f_{nw,L}} \quad (2.15)$$

2.2.3. Μέθοδος JR

Η μέθοδος Jones – Roszelle^[34], προτείνει μία διαφορετική προσέγγιση. Η μέθοδος J-R, διαφέρει από τη JBN, στο γεγονός πως οι σχετικές διαπερατότητες των πειραμάτων εκτόπισης υπολογίζονται γραφικά. Οι γραφικές επιλύσεις προσφέρουν τη δυνατότητα, να εξηγήσουν σε ποιες περιπτώσεις οι παράγωγοι εισαγάγουν σφάλματα. Η μέθοδος JR μπορεί να μειώσει τα σφάλματα, με μικρότερο αριθμό δειγμάτων, αλλά σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Γενικά όμως, πρέπει να σημειωθεί πως και οι δύο μέθοδοι για να προσφέρουν μέγιστη ακρίβεια απαιτούν ταχείες λήψεις μετρήσεων. Η επεξεργασία όπως και με τη προηγούμενη μέθοδο, μπορεί να πραγματοποιηθεί διατηρώντας σταθερή τη πτώση πίεσης ή τη παροχή και επιπλέον σε σύγκριση με τη

JBN, είναι δυνατόν να μεταβάλλονται ταυτόχρονα. Θα αναπτυχθεί αρχικά τεχνική εκτόπισης υπό σταθερή παροχή.

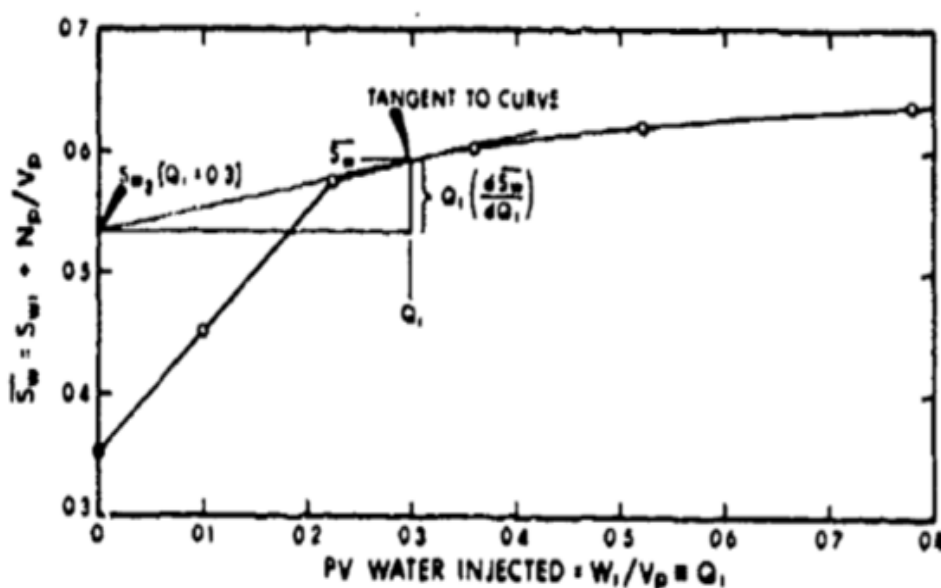
Σε μία καμπύλη μέσου βαθμού κορεσμού στην εκτοπίζουσα φάση συναρτήσει του αθροιστικού εγχεόμενου όγκου κενών στη φάση αυτή, όσο αυξάνεται ο αθροιστικός όγκος εγχεόμενου όγκου κενών σε νερό, το σφάλμα της κλίσης στην εφαπτομένης της καμπύλης προκαλεί σημαντικό σφάλμα στο σημείο τομής της εφαπτομένης με τον κάθετο άξονα, άρα και υψηλή απόκλιση από το πραγματικό βαθμό κορεσμού της εκτοπίζουσας φάσης στην εκροή του δοκιμίου (εικόνα 2.8 ^[34]).

$$S_{w2}(Q_i) = \overline{S}_w(Q_i) - Q_i \frac{d\overline{S}_w(Q_i)}{dQ_i} \quad (2.16)$$

Q_i : αθροιστικός όγκος εγχεόμενης εκτοπίζουσας φάσης στην εισροή, εκπεφρασμένος σε όγκο κενών.

$S_{w2}(Q_i)(\%)$: βαθμός κορεσμού της εκτοπίζουσας φάσης στη εκροή, συναρτήσει του αθροιστικού εγχεόμενου όγκου κενών στην εκτοπίζουσα φάση.

$\overline{S}_w(Q_i)(\%)$: μέσος βαθμός κορεσμού της εκτοπίζουσας φάσης στον πυρήνα, συναρτήσει του αθροιστικού εγχεόμενου όγκου κενών στην εκτοπίζουσα φάση.



Εικόνα 2. 8: Μέσος βαθμός κορεσμού της εκτοπίζουσας φάσης συναρτήσει του αθροιστικού εγχεόμενου όγκου κενών στη φάση αυτή.

Οι Jones και Roszelle πρότειναν τη κατασκευή διαγράμματος του μέσου βαθμού κορεσμού στην εκτοπίζουσα φάση, συναρτήσει του αντίστροφου, του αθροιστικού εγγεόμενου όγκου κενών της φάσης αυτής, όταν ο δεύτερος παίρνει μικρές τιμές. Ποιοι βαθμοί κορεσμού της εκτοπίζουσας φάσης θα εκφραστούν συναρτήσει του αθροιστικού εγγεόμενου όγκου κενών της φάσης αυτής ή του αντίστροφου του, δεν είναι ένα αντικειμενικό κριτήριο, αλλά παρόλα αυτά, με δοκιμές μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων αυτών. Αναπόφευκτα, τα ενδιάμεσα σημεία από την αρχή έως το τέλος της εκτόπισης, θα έχουν υψηλότερα σφάλματα από τα υπόλοιπα πειραματικά σημεία. Ένα δεύτερο πλεονέκτημα, είναι ότι μπορεί η τεχνική αυτή να υπολογίσει το βαθμό κορεσμού της εκτοπίζουσας φάσης στον υπολειμματικό βαθμό κορεσμού της εκτοπιζόμενης φάσης, όταν ο αντίστροφος αθροιστικός όγκος κενών στην εκτοπίζουσα φάση τείνει στο μηδέν. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, καθώς απαιτείται άπειρος χρόνος θεωρητικά ή πολύ μεγάλος πρακτικά υπό εργαστηριακές συνθήκες, για να μετρηθεί η τιμή αυτή με μεγάλη ακρίβεια.

Η σχετική κινητικότητα μίας φάσης ισούται με το πηλίκο της κινητικότητας της φάσης αυτής προς τη διαπερατότητα βάσης του πετρώματος (K_r/μ). Το ενεργό ιξώδες, $\lambda^{-1}(Pa \cdot sec)$ αντιπροσωπεύει το αντίστροφο της σχετικής κινητικότητας της εκτοπίζουσας και της εκτοπιζόμενης φάσης:

$$\lambda^{-1} = \frac{\mu_w}{K_{rw}} f_w = \frac{\mu_{nw}}{K_{rnw}} f_{nw} \quad (2.17)$$

Πριν το πείραμα της εκτόπισης, όταν ο πυρήνας έχει κορεστεί 100% με τη φάση που θα χρησιμοποιηθεί ως εκτοπιζόμενη, από το νόμο του Darcy:

$$K_{abs} = -\frac{q_b \mu_b L}{\Delta P_b A} \quad (2.18)$$

$q_b (m^3/sec)$: Παροχή της φάσης που θα χρησιμοποιηθεί ως εκτοπιζόμενη.

$\mu_b (Pa \cdot sec)$: Δυναμικό ιξώδες της φάσης που θα χρησιμοποιηθεί ως εκτοπιζόμενη.

$\Delta P_b (Pa)$: Πίεση εκροής μείον της πίεσης εισροής, της φάσης που θα χρησιμοποιηθεί ως εκτοπιζόμενη.

$L(m)$: πάχος του δοκιμίου κατά μήκος της ροής.

$A(m^2)$: Εμβαδόν διατομής του πετρώματος, κάθετη στη διεύθυνση κατά την οποία πραγματοποιείται η ροή.

$K_{abs}(m^2)$: Απόλυτη διαπερατότητα του πετρώματος.

Η απόλυτη διαπερατότητα του πετρώματος θα χρησιμοποιηθεί σε διαπερατότητα βάσης στη JR μέθοδο.

Το μέσο ενεργό ιξώδες, $\overline{\lambda^{-1}}(Pa \cdot sec)$, όταν το μέτωπο της εκτόπισης έχει φτάσει έως την εκροή του δοκιμίου, ορίζεται ως:

$$\overline{\lambda^{-1}} = \frac{\int_0^L \lambda^{-1} dx}{\int_0^L dx} \quad (2.19)$$

Το μέσο ενεργό ιξώδες, όταν αρχίσει να παράγεται η εκτοπίζουσα φάση στην εκροή, παρουσία της εκτοπιζόμενης φάσης, έως τον υπολειμματικό βαθμό της δεύτερης:

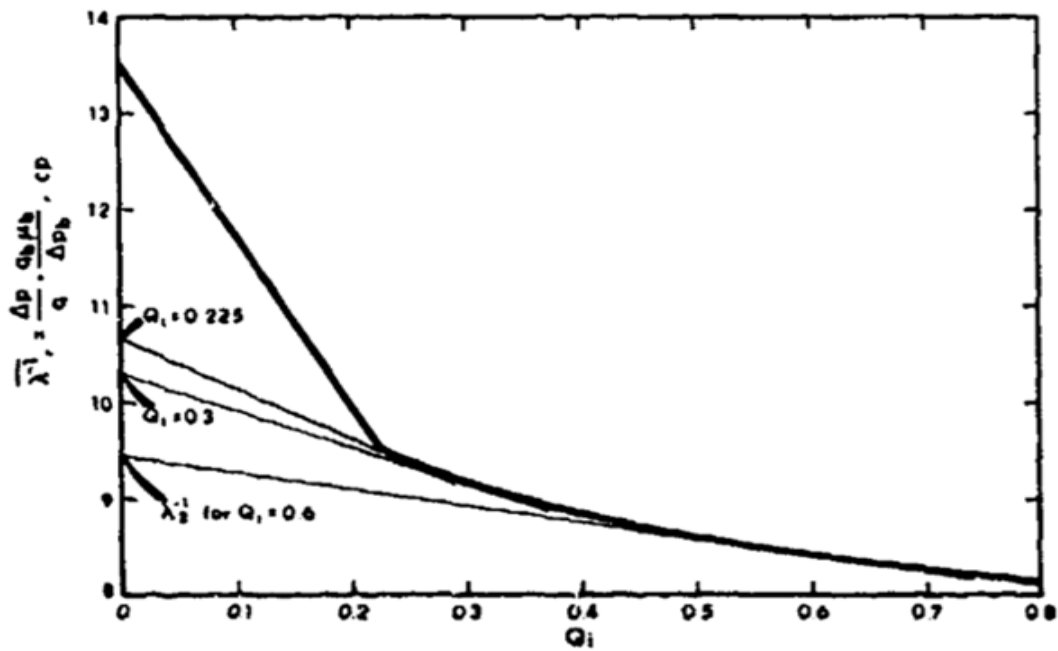
$$\overline{\lambda^{-1}} = \mu_b \frac{\left(\frac{\Delta P}{q_t}\right)}{\left(\frac{\Delta P_b}{q_b}\right)} \quad (2.20)$$

$\Delta P(Pa), q_w(m^3/sec)$: Οι τρέχουσες τιμές της πτώσης πίεσης και παροχής στην εισροή της εκτοπίζουσας φάσης αντίστοιχα.

$\Delta P_b(Pa), q_{wb}(m^3/sec)$: Η πτώση πίεσης και η παροχή της φάσης αντίστοιχα, που θα χρησιμοποιηθεί ως εκτοπιζόμενη, στην αρχή όταν το πορώδες μέσο είναι πλήρως κορεσμένο σε αυτή τη φάση.

Η σχέση 2.21 αποδεικνύεται γεωμετρικά, όπως και με το βαθμό κορεσμού στην εκτοπίζουσα φάση, ότι το ενεργό ιξώδες στην εκροή κατά τη δοκιμή εκτόπισης υπολογίζεται από το σημείο τομής (εικόνα 2.9^[34]), της εφαπτομένης του μέσου ενεργού ιξώδους για κάθε μικρό αθροιστικό εγχυόμενο όγκο κενών με τον κάθετο άξονα, στο σημείο $(\lambda_2^{-1}(Q_i), 0)$.

$$\lambda_2^{-1}(Q_i) = \overline{\lambda^{-1}}(Q_i) - Q_i \frac{d\overline{\lambda^{-1}}(Q_i)}{d(Q_i)} \quad (2.21)$$



Εικόνα 2. 9: Μέσο ενεργό ιξώδους της εκτοπίζουσας φάσης στην εκροή, συναρτήσει του αθροιστικού εγχεόμενου όγκου κενών στη φάση αυτή.

Για μεγάλες ποσότητες εγχεόμενων όγκων κενών στην εκτοπίζουσα φάση, το ενεργό ιξώδες στην εκροή εκφράζεται συναρτήσει του αντίστροφου, του αθροιστικού εγχεόμενου όγκου κενών της εκτοπίζουσας φάσης.

Έστω ότι η πτώση πίεσης, $-\Delta P(Pa)$ παραμένη σταθερή, αντί της παροχής της εκτοπίζουσας φάσης. Τότε είναι αναγκαίος ο υπολογισμός της στιγμιαίας παροχής της εκτοπίζουσας φάσης, $q_i(m^3/sec)$. Ο υπολογισμός της, κάθε χρονική στιγμή, γίνεται από τη κλίση της καμπύλης, του αθροιστικού όγκου της εγχεόμενης εκτοπίζουσας φάσης $W_i(m^3)$, συναρτήσει του χρόνου, $\Delta t(sec)$ που μεσολαβεί από την αρχή της εκτόπισης. Η παροχή μεταβάλλεται απότομα με βάση το χρόνο, έως το μέτωπο της εκτόπισης να φτάσει στην εκροή του δοκιμίου, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η ακριβής εκτίμηση της παροχής. Η γραμμική σχέση της συνάρτησης $\frac{-\Delta P}{q_i}(\Delta t)$, επιτρέπει μία εναλλακτική μέθοδο προσδιορισμού:

$$q_{BT} = \frac{1}{\frac{2\Delta t_{BT}}{W_{BT}} - \frac{1}{q_{nw}}} \quad (2.22)$$

$q_{BT}(m^3/sec)$: Παροχή της εκτοπίζουσας φάσης στην εισροή του δοκιμίου, έως το μέτωπο της εκτόπισης να φτάσει στην εκροή.

$\Delta t_{BT}(sec)$: Χρόνος που μεσολαβεί, έως το μέτωπο της εκτόπισης να φτάσει στην εκροή.

$W_{BT}(m^3)$: Αθροιστικός όγκος εγχέομενης εκτοπίζουσας φάσης, έως το μέτωπο της εκτόπισης να φτάσει στην εκροή.

$q_{nw}(m^3/sec)$: Παροχή της φάσης που θα χρησιμοποιηθεί ως εκτοπιζόμενη, πριν την έναρξη της εκτόπισης στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού του δοκιμίου στην εκτοπίζουσα, υπό πτώση πίεσης $-\Delta P$.

Η κλασματική ροή της εκτοπιζόμενης φάσης στην εκροή, f_{nw2} για μικρές τιμές του αθροιστικού εγχυόμενου όγκου κενών της εκτοπίζουσας φάσης στην εκροή:

$$f_{nw2} = \frac{dQ_p(Q_i)}{dQ_i} \quad (2.23)$$

Q_p : Αθροιστικός όγκος παραγόμενης εκτοπιζόμενης φάσης στην εκροή, επεκφρασμένος σε όγκο κενών.

Η κλασματική ροή της εκτοπίζουσας φάσης στην εκροή:

$$f_{w2} = 1 - f_{nw2} \quad (2.24)$$

Οι σχετικές διαπερατότητες της εκτοπίζουσας και εκτοπιζόμενης φάσης με βάση τη σχέση 2.26:

$$K_{rw} = \frac{\mu_w}{\lambda_2^{-1}} f_{w2} \quad (2.25)$$

$$K_{rnw} = \frac{\mu_{nw}}{\lambda_2^{-1}} f_{nw2} \quad (2.26)$$

Άλλες μέθοδοι μη σταθερής κατάστασης που έχουν περιοριστικό χαρακτήρα, λόγω εξειδικευμένων συνθηκών που απαιτούν είναι οι παρακάτω:

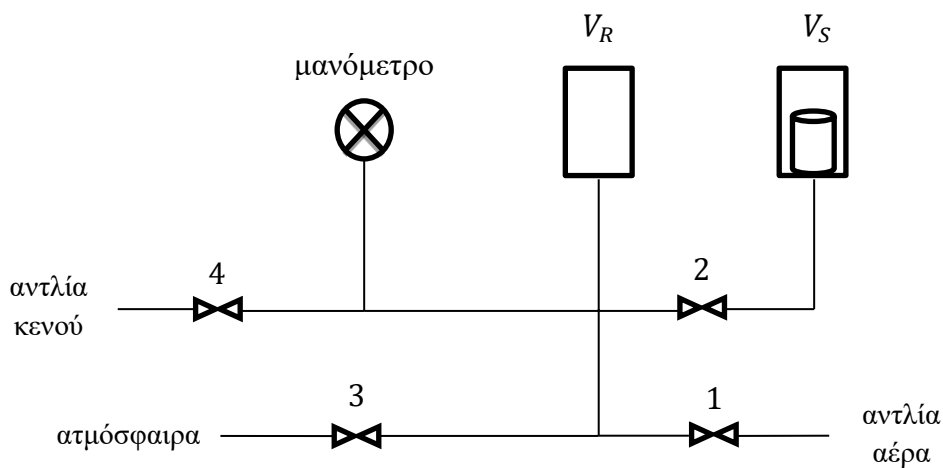
2.3. Σύγκριση μεθόδων

Με τις μεθόδους σταθερής κατάστασης προσομοιώνεται η πρωτογενής ανάληψη, ενώ με τις μη σταθερής η δευτερογενής. Οι βαθμοί κορεσμού στις μεθόδους μη σταθερής κατάστασης, μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου σε κάθε σημείο του δοκιμίου, που σημαίνει ότι στις μεθόδους σταθερής κατάστασης επικρατεί σταθερή ροή, ενώ στις μη σταθερής κατάστασης επικρατεί μη σταθερή ροή. Και στις δύο μεθόδους η ροή είναι στρωτή. Ανάμεσα στις μεθόδους Welge, JBN και JR, η JR έχει την υψηλότερη ακρίβεια από τις υπόλοιπες. Η Penn-State, Single-Sample dynamic, Gas/water drive (Welge, JBN, JR), Hassler, Hafford και Dispersed feed απέδωσαν τις ίδιες τιμές σχετικών διαπερατοτήτων για τη μη διαβρέχουσα φάση ^[18]^[19]. Η Stationary liquid απέδωσε ένα τμήμα της καμπύλης αυτής, αλλά με υψηλή ακρίβεια. Η Single Core, Penn-State, Hafford και dispersed feed απέδωσαν ίδιες τιμές σχετικών διαπερατοτήτων για τη διαβρέχουσα φάση. Η Hassler απέδωσε τις μικρότερες τιμές απ' όλες τις μεθόδους. Η gas/water drive, σε υψηλούς κορεσμούς της διαβρέχουσας φάσης απέδωσε κάποιες φορές υψηλές τιμές σχετικών διαπερατοτήτων στη διαβρέχουσα φάση. Η τελευταία χρειάζεται βελτίωση για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέθοδος ρουτίνας.

Κεφάλαιο 3: Χαρακτηριστικά του δοκιμίου

3.1. Ποροσιμετρία τύπου Boyle

Η ποροσιμετρία^[35] είναι η μέθοδος υπολογισμού του πορώδους σε ένα πέτρωμα. Βασίζεται στην εφαρμογή του νόμου του Boyle, όπου σε μία ισόθερμη εκτόνωση το γινόμενο του όγκου επί τη πίεση παραμένει σταθερό. Η διάταξη αποτελείται από το δοχείο $V_R(\text{cm}^3)$, στο οποίο τροφοδοτείται αέρας από την αντλία, το $V_S(\text{cm}^3)$ είναι το δοχείο που τοποθετείται το δοκίμιο, ένα μανόμετρο για να μετρά τη πίεση, στην αρχή και μετά την εκτόνωση του αέρα, μία αντλία κενού για να απομακρύνει τον αέρα από το δοχείο V_S και 4 βαλβίδες για να ρυθμίζουν τις συνθήκες πίεσης στο σύστημα (εικόνα 3.1).



Εικόνα 3. 1: Συνδεσμολογία ποροσιμετρίας

Αρχικά θα γίνει βαθμονόμηση του ποροσιμέτρου για να προσδιοριστούν οι όγκοι V_R και V_S . Σφαίρες διαμέτρου $d=0,5''$ θα τοποθετηθούν στο V_S .

Διαδικασία μετρήσεων:

1. Ανοίγει η βαλβίδα 3 και 2.
2. Τοποθετούνται οι σφαίρες στο V_S .
3. Κλείνει η βαλβίδα 3.
4. Ανοίγει η βαλβίδα 4 μέχρι να επιτευχθεί κενό.
5. Κλείνουν οι βαλβίδες 2 και 4.
6. Ανοίγει η βαλβίδα 1 και αναμένεται μέχρι να σταθεροποιηθεί η πίεση P_i .
7. Κλείνει η βαλβίδα 1
8. Ανοίγει η βαλβίδα 2, μέχρι να σταθεροποιηθεί η πίεση P_f στα V_R και V_S .

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται κάθε φορά προσθέτοντας 2 σφαίρες από 0 έως τις 14, δηλαδή 8 τιμές. Το μανόμετρο έχει απόκλιση -0,06 barg. Άρα αφού το μανόμετρο έδειχνε την ένδειξή του -1 barg, θα πρέπει να ελεγχθεί, αν όντως επιτεύχθηκε κενό στο V_S .

$$P_i V_R + P_0(V_S - kV_b) = P_f(V_R + V_S - kV_b) \quad (3.1)$$

Με V_b τον όγκο σφαίρας:

$$V_b = \frac{1}{6} \pi d^3 \quad (3.2)$$

$$V_b = 1,07 \text{ cm}^3$$

Αφού οι σχετικές πιέσεις μετατραπούν σε απόλυτες και αφαιρεθεί η απόκλιση του μανομέτρου:

k	$P_i(\text{barg})$	$P_i(\text{bar})$	$P_f(\text{barg})$	$P_f(\text{bar})$	P_i/P_f
0	6,00	7,07	2,56	3,63	1,95
2	5,99	7,06	2,64	3,71	1,90
4	5,98	7,05	2,72	3,79	1,86
6	5,99	7,06	2,84	3,91	1,80
8	5,99	7,06	2,94	4,01	1,76
10	5,99	7,06	3,06	4,13	1,71
12	5,99	7,06	3,18	4,25	1,66
14	5,99	7,06	3,32	4,39	1,61

Πίνακας 3. 1: Πίεση του αερίου πριν και μετά την εκτόνωση με βάση τον αριθμό των σφαιρών που τοποθετούνται στο ποροσίμετρο.

Η σχέση 3.1 μετά από πράξεις:

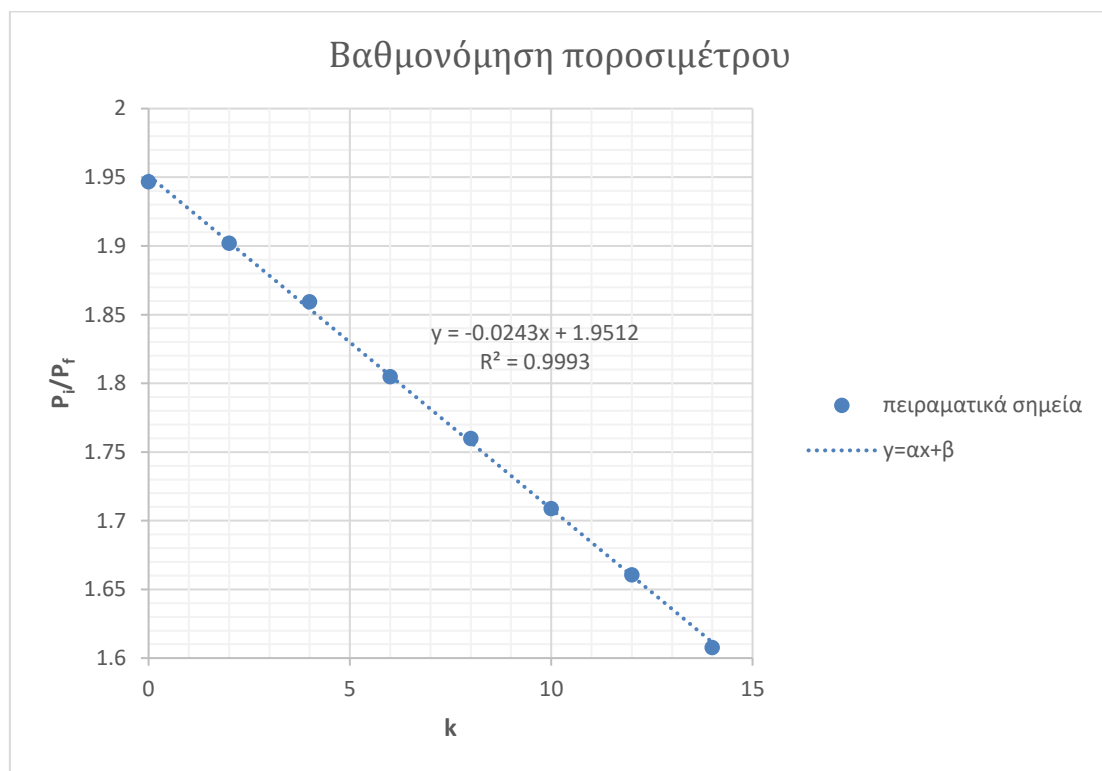
$$\frac{P_i}{P_f} = -\frac{V_b}{V_R}k + 1 + \frac{V_S}{V_R} + P_0 \frac{kV_b - V_S}{P_f V_R} \quad (3.3)$$

Έστω ότι ο αέρας στο V_R ήταν αμελητέος ($P_0 = 0 \text{ bar}$) μετά τη χρήση της αντλίας κενού. Η σχέση 3.10 γίνεται γραμμική με $f(x) = \frac{P_i}{P_f}$ και $x = k$.

$$\frac{P_i}{P_f} = -\frac{V_b}{V_R}k + \frac{V_S}{V_R} + 1 \quad (3.4)$$

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων στη σχέση 3.4 παίρνει τη μορφή:

$$y = ax + \beta \quad (3.5)$$



Διάγραμμα 3. 1: Διάγραμμα βαθμονόμησης ποροσιμέτρου.

Οι τιμές των παραμέτρων:

$$\alpha = -0,0243 \text{ και } \beta = 1,95$$

Οι τυπικές αποκλίσεις των παραμέτρων:

$$\sigma_{\alpha} = 0,000265 \text{ και } \sigma_{\beta} = 0,00222$$

Το σφάλμα μέτρησης του λόγου P_i/P_f :

$$\sigma = 0,00343$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού της παλινδρόμησης:

$$R^2 = 0,999$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού ισοδυναμεί πρακτικά με τη μονάδα και τα πειραματικά σημεία ταυτίζονται με τα πραγματικά. Άρα $P_0 = 0 \text{ bar}$.

$$V_R = -\frac{1,07}{(-0,0243 \pm 0,000265)}$$

$$V_R = 44,2 \pm 0,5 \text{ cm}^3$$

$$V_S = (1,95 \pm 0,00222 - 1)(44,2 \pm 0,482)$$

$$V_S = 42,0 \pm 0,6 \text{ cm}^3$$

Επαναλαμβάνεται η διαδικασία των μετρήσεων, αλλά στο δοχείο V_S , τοποθετείται το δοκίμιο.

Ο νόμος του Boyle σε αυτή τη περίπτωση:

$$P_i V_R + P_0 (V_S - GV) = P_f (V_R + V_S - GV) \quad (3.6)$$

$GV(\text{cm}^3)$: Όγκος των κόκκων.

Οι τιμές των πιέσεων πριν και μετά την εκτόνωση:

P_i(barg)	P_i(bar)	P_f(barg)	P_f(bar)
5,99	7,06	3,60	4,67
5,99	7,06	3,60	4,67
5,98	7,05	3,59	4,66
5,98	7,05	3,60	4,67
5,99	7,06	3,60	4,67
5,98	7,05	3,60	4,67
5,98	7,05	3,60	4,67
5,98	7,05	3,59	4,66

Πίνακας 3. 2: Οι τιμές των πιέσεων πριν και μετά την εκτόνωση παρουσία του δοκιμίου στο ποροσίμετρο.

Η απόκλιση του μανομέτρου σε συνδυασμό χρήσης πορώδους μέσου αντί σφαιρών εισαγάγει μεγαλύτερο βαθμό αβεβαιότητας για την επίτευξη κενού στο δοχείο V_s. Αέρας μπορεί να έχει αιχμαλωτιστεί στους πόρους.

Επιλέγεται ως πίεση κενού η μέση πίεση απόκλισης του μανομέτρου, διότι η ένδειξη υπό κενό ήταν -1 barg.

$$P_0 = \frac{1}{2} P_{offset} \quad (3.7)$$

$$P_0 = \frac{(-1 + 1,01 + 0.06)}{2} = 0,0366 \text{ bar}$$

Η υπόθεση αυτή μπορεί να ελεγχθεί από τη μέτρηση του πορώδους μέσου από τη μέθοδο της κατανομής μεγέθους πόρων.

Ο όγκος των κόκκων GV εκτιμάται από τη σχέση 3.6. Στη συνέχεια υπολογίζεται το πορώδες Φ του πετρώματος:

$$\Phi = \frac{BV - GV}{BV} \quad (3.8)$$

Το ψηφιακό παχύμετρο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των διαστάσεων του δοκιμίου είχε διακριτότητα 0,01 mm. Το BV(cm³) αντιπροσωπεύει τον όγκο κυλίνδρου, λόγω του σχήματος του δοκιμίου μήκους L=4,751 cm και διαμέτρου d=2,543 cm:

$$BV = \pi \frac{d^2}{4} L \quad (3.9)$$

$$BV = 24,1 \text{ cm}^3$$

Ο όγκος των κόκκων, GV και το πορώδες είναι:

GV(cm³)	Φ(%)
19,3	20,2
19,3	20,2
19,2	20,4
19,4	19,8
19,3	20,2
19,4	19,8
19,4	19,8
19,2	20,4

Πίνακας 3. 3: Τιμές όγκου των κόκκων και πορώδους, αν ληφθεί υπόψιν η μέση τιμή της ένδειξης του μανομέτρου υπό κενό.

Το πορώδες που υπολογίστηκε από τη μέθοδο των τριχοειδών πιέσεων ή της κατανομής μεγέθους πόρων είναι χαμηλότερο των παραπάνω τιμών (υψηλή ακρίβεια προσδιορισμού, όπως θα αναλυθεί στο 2^ο πείραμα Κεφάλαιο 3.2):

$$\Phi_{CP} = 18,3154 \%$$

Αν θεωρηθεί ο αέρας που παρέμεινε στο δοκίμιο αμελητέος ($P_0=0$ bar), θα ελεγχθεί η τιμή που προκύπτει με τη μέθοδο των τριχοειδών πιέσεων.

Η σχέση 3.6 γίνεται:

$$P_i V_R = P_f (V_R + V_S - GV) \quad (3. 10)$$

Ο όγκος των κόκκων και το πορώδες:

GV(cm³)	Φ(%)
19,4	19,4
19,4	19,4
19,4	19,6
19,5	19,1
19,4	19,4
19,5	19,1
19,5	19,1
19,4	19,6

Πίνακας 3. 4: Τιμές όγκου των κόκκων και πορώδους, υπό πίεση απόλυτου κενού.

Οι τιμές αυτές του πορώδους δεν έχουν ακραίες τιμές, αλλά τα σφάλματα είναι τυχαίως κατανομημένα. Άρα αφού ακολουθούν τη κανονική κατανομή ένας μικρός αριθμός δείγματος $n < 30$, ακολουθεί ικανοποιητικά τη κατανομή Student.

Η μέση τιμή μ_ϕ και τυπική απόκλιση σ_ϕ , θα προσεγγιστούν μέσω της δειγματικής μέσης τιμής $\bar{\Phi}$, της δειγματικής τυπικής απόκλισης S_ϕ και τη κρίσιμη τιμή από τον πίνακα αθροιστικής πιθανότητας της κατανομής $t^{[36]}$, την $t_{d, \frac{a}{2}}$ όπου αποκόπτει εμβαδόν ίσο με $\frac{a}{2}$ στη δεξιά ουρά της, με βαθμούς ελευθερίας $d = n - 1$ και διάστημα εμπιστοσύνης ίσο με $1 - a$.

$$\mu_\phi = \bar{\Phi} \pm t_{d, \frac{a}{2}} \frac{S_\phi}{\sqrt{n}} \quad (3.11)$$

Η δειγματική μέση τιμή και διασπορά του πορώδους είναι:

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \phi_i \quad (3.12)$$

$$S_\phi^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\phi_i - \bar{\Phi})^2 \quad (3.13)$$

Σε διάστημα εμπιστοσύνης 99%, με 8 δείγματα:

$$t_{7,0.5\%} = 3,499$$

$$\bar{\Phi} = 19,3 \%$$

$$S_\phi = 0,258 \%$$

Η τυπική απόκλιση του πορώδους μέσου:

$$\sigma_\phi = t_{7,0.5\%} \frac{S_\phi}{\sqrt{8}}$$

$$\sigma_\phi = 0,319 \%$$

$$\mu_\phi = 19,3 \pm 0,3 \%$$

Η μέση τιμή του πορώδους της ποροσιμετρίας και της κατανομής μεγέθους πόρων έχουν διαφορά 1%. Η τιμή αυτή δε δικαιολογείται από τις

τυπικές αποκλίσεις τους. Αυτό σημαίνει πως παρόλο που ο συντελεστής προσδιορισμού προσεγγίζει τη μονάδα οι τυπικές αποκλίσεις των V_R και V_S , οι σ_{V_R} και σ_{V_S} αντίστοιχα, επηρεάζουν τη τιμή του πορώδους, καθώς είναι οι μοναδικές τιμές που εισαγάγουν σφάλματα στη σχέση 3.10. Έστω ότι $P_0=0$ bar:

$$GV = (V_{R-}^{+}\sigma_{V_R}) + (V_{S-}^{+}\sigma_{V_S}) - \frac{P_i(V_{R-}^{+}\sigma_{V_R})}{P_f} \quad (3.14)$$

Η δειγματική τιμή της μέσης τιμής του πορώδους θα θεωρηθεί πως προσεγγίζει ικανοποιητικά την τυπική απόκλιση του πορώδους της κατανομής Student. Από τις σχέσεις 3.8 και 3.13:

$$\Phi = 19,4 \pm 3,4 \%$$

Το πορώδες της κατανομής μεγέθους πόρων εμπεριέχεται στις επιτρεπόμενες τιμές του πορώδους με βάση τα δεδομένα της ποροσιμετρίας. Οι τιμές του πορώδους του πίνακα 3.3, εμπεριέχονται επίσης στις επιτρεπόμενες τιμές του πορώδους. Άρα υπάρχει η πιθανότητα να μην έχει επιτευχθεί κενό, αλλά τα σ_{V_R} και σ_{V_S} , εισαγάγουν επίσης σημαντικά σφάλματα.

3.2. Κατανομή μεγέθους πόρων

Η διαπερατότητα των πετρωμάτων, δεν είναι συνάρτηση μόνο του ενεργού πορώδους, αλλά και της κατανομής του μεγέθους των πόρων. Χρησιμοποιήθηκε γι' αυτό το σκοπό η μέθοδος τριχοειδούς πίεσης^[37], για να συσχετιστούν οι δύο παραπάνω παράγοντες με τις διαπερατότητες που μετρήθηκαν πειραματικά. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη μέτρηση του όγκου του Hg, ο οποίος εισέρχεται σε ένα δοκίμιο σε διαφορετικές πιέσεις και εκτοπίζει τον αέρα. Το δοκίμιο ήταν αρχικά κορεσμένο με αέρα. Ο αέρας έχει το ρόλο της διαβρέχουσας φάσης (γωνία διαβροχής μικρότερη των 90°). Το ρόλο της μη διαβρέχουσας έχει ο Hg. Η επιφανειακή τάση των αέρα-Hg, αποτρέπει στον Hg να εισχωρήσει στους πόρους, γιατί η γωνία διαβροχής με το πέτρωμα είναι μεγαλύτερη από 90°. Η αντίσταση αυτή μπορεί να ξεπεραστεί με την εφαρμογή εξωτερικής πίεσης. Η

επιφανειακή τάση αέρα-Hg είναι 480 dyn/cm και η γωνία διαβροχής με το πέτρωμα είναι 140°.

$$r = \frac{-20\sigma_{Hg-αέρα} \cos(\theta)}{P_C} \quad (3.15)$$

$r(\mu m)$: Ακτίνα του μικρότερου πόρου, στον οποίο θα έχει εισχωρήσει ο Hg, σε κάθε πίεση.

$\sigma_{Hg-αέρα} (N/m)$: Επιφανειακή τάση μεταξύ υδραργύρου και αέρα.

$\Theta(^{\circ})$: γωνία διαβροχής του υδραργύρου με το πέτρωμα.

$P_C(\text{bar})$: Τριχοειδής πίεση των πόρων, λόγω εξωτερικής πίεσης.

Η διάταξη της Ruska Instrument Corporation διαθέτει εμβολοφόρο αντλία^[38], η οποία λειτουργεί χειροκίνητα με τη βοήθεια τροχού. Η μέγιστη πίεση λειτουργίας της αντλίας είναι 10.000 psia. Ο κύλινδρος (πυκνόμετρο) της έχει όγκο 500 ml. Η πίεση που εφαρμόζεται στο εσωτερικό μετράται με ψηφιακό μανόμετρο, με διακριτική ικανότητα 0,1 bar. Ο όγκος του Hg που εξωθεί η αντλία, μετριέται με τη βοήθεια βαθμολογημένης κλίμακας, με βήμα 2 ml κατά μήκος του εμβόλου της. Ο βαθμονομημένος δακτύλιος στη βάση του τροχού, προσφέρει όριο διακριτότητας 0,02 ml. Η ελάχιστη παροχή Hg που μπορεί να δεχτεί το πυκνόμετρο είναι 60 ml/hr και η μέγιστη 900 ml/hr. Η μέγιστη πίεση λειτουργίας του πυκνομέτρου είναι 5.000 psia. Για τη σωστή λήψη μετρήσεων απαιτείται η απουσία αέρα από το εσωτερικό του κυλίνδρου και των σωλήνων με τους οποίους είναι συνδεδεμένη αντλία. Ο Hg εισάγεται στον υποδοχέα του δοκιμίου, μέχρι την ένδειξη της στάθμης στο πλαστικό σωλήνα του πυκνομέτρου.

Μεθοδολογία βαθμονόμησης πυκνομέτρου

Το πυκνόμετρο^[39] τοποθετείται κενό και καθαρισμένο στην επάνω έξοδο της αντλίας. Το καπάκι του πυκνομέτρου βιδώνεται χαλαρά στη κορυφή με τον μεταλλικό κύλινδρο που κλείνει στην έξοδο. Εισάγεται προσεκτικά ο Hg, μέχρι να εμφανιστεί η πρώτη σταγόνα του στην άνω έξοδο. Η έξοδος κλείνει στεγανά. Η πίεση αυξάνεται σταδιακά. Οι

ενδείξεις του μανομέτρου πρέπει να λαμβάνονται μετά τη παρέλευση χρόνου, ώστε να δίνεται η δυνατότητα στα επιμέρους τμήματα του συστήματος να προσαρμοστούν στην ασκούμενη πίεση.

Μεθοδολογία μέτρησης τριχοειδών πιέσεων

Στο πυκνόμετρο τοποθετείται το δοκίμιο ^[38]. Περιστρέφοντας τον τροχό της αντλίας, εισάγεται μικρή ποσότητα Hg στο πυκνόμετρο. Τοποθετείται το καπάκι. Εισάγεται Hg με αργό ρυθμό, έως να φτάσει στην έξοδο του πυκνομέτρου. Το δοχείο κλείνει ερμητικά με τη βοήθεια του μεταλλικού κυλίνδρου. Συμπιέζεται Hg και καταγράφονται οι ογκομετρικές ενδείξεις της αντλίας συναρτήσει της πίεσης εξώθησης, έως και τον πλήρη κορεσμό του δοκιμίου. Αποσύρεται ο Hg στο δοχείο της αντλίας. Απομακρύνεται στα απόβλητα το δοκίμιο καθώς δε μπορεί να καθαριστεί. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή καθώς ο Hg, είναι ένα χημικό στοιχείο τοξικό για τον ανθρώπινο οργανισμό. Να σημειωθεί ότι λόγω υψομετρικής διαφοράς ανάμεσα στην ένδειξη του μανομέτρου και το πυκνόμετρο αφαιρείται 0,4 bar πίεσης.

Στη συνέχεια μετρήθηκε ο όγκος του Hg που μετρήθηκε στο πυκνόμετρο συναρτήσει της μανομετρικής πίεσης χωρίς δοκίμιο (Παράρτημα A.1), καθώς και παρουσία του δοκιμίου (Παράρτημα A.2).

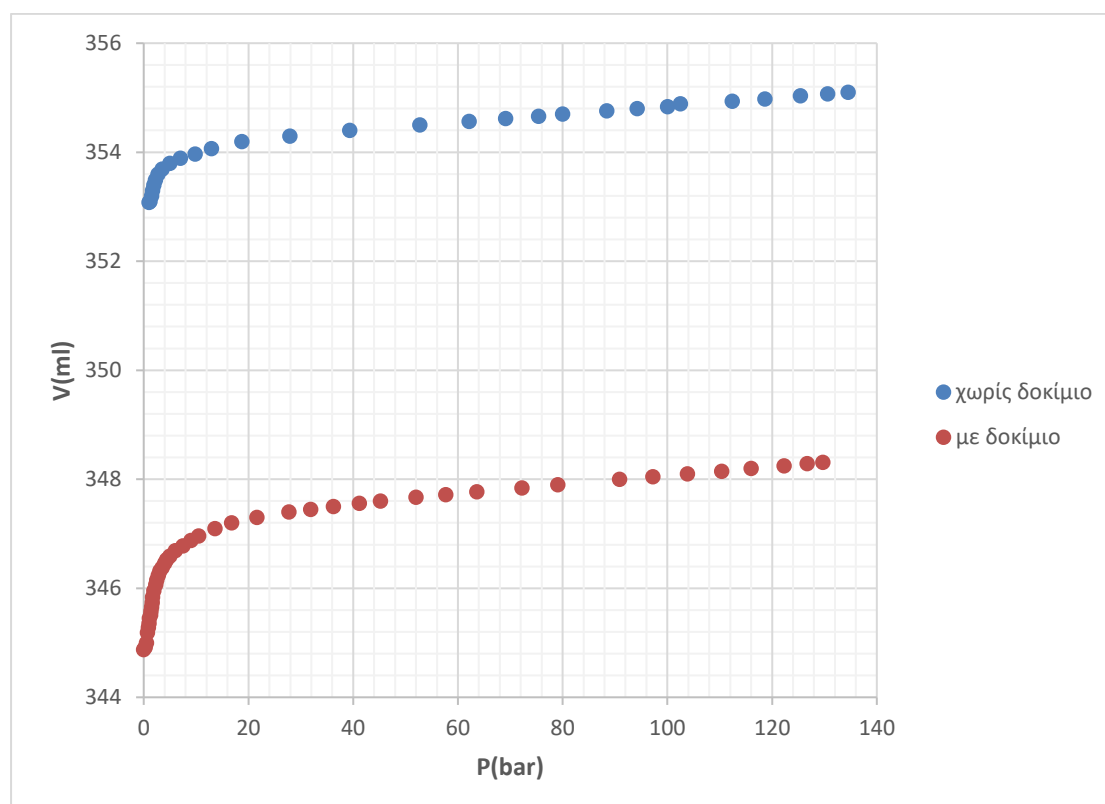
Για να υπολογιστεί ο φαινόμενος όγκος του δοκιμίου, ο όγκος των κόκκων και η ποσότητα του Hg που έχει εισχωρήσει στο πέτρωμα απαιτείται οι όγκοι του Hg, να προσδιορίζονται στην ίδια πίεση παρουσία και μη του δοκιμίου στο πυκνόμετρο, λόγω της συμπιεστότητας του ^[40]. Σε ατμοσφαιρική πίεση, η διαφορά του όγκου που καταλαμβάνει ο Hg στο πυκνόμετρο χωρίς δοκίμιο, με τον όγκο που καταλαμβάνει με δοκίμιο ισούται με τον φαινόμενο όγκο του δοκιμίου, BV(ml). Όταν η μέγιστη πίεση που ασκείται στο δοκίμιο είναι 130,7 bar, το δοκίμιο έχει κορεστεί πλήρως. Άρα, η διαφορά των όγκων Hg σε αυτή τη πίεση για πυκνόμετρο με και χωρίς δοκίμιο, ισούται με τον όγκο των κόκκων, GV(ml). Για τους υπόλοιπους βαθμούς κορεσμού σε Hg, η διαφορά του όγκου που καταλαμβάνει ο Hg στο πυκνόμετρο με δοκίμιο, $V_{\mu\delta}$ (ml), από τον όγκο του απουσία του δοκιμίου για δεδομένη πίεση, $V_{\chi\delta}$ (ml), ισούται με τον όγκο του Hg που δε θα είχε εισχωρήσει στο πέτρωμα εάν στο πυκνόμετρο είχε τοποθετηθεί το δοκίμιο. Η διαφορά του όγκου που δεν έχει εισχωρήσει

στο δοκίμιο, από τον φαινόμενο όγκο του πετρώματος, BV , ισούται με τον όγκο του Hg, $V_{Hg}(ml)$ που έχει εισχωρήσει στο δοκίμιο:

$$V_{Hg} = BV - (V_{\chi\delta} - V_{\mu\delta}) \quad (3.16)$$

Τα δεδομένα πιέσεων-όγκων με και χωρίς δοκίμιο, δεν πραγματοποιήθηκαν για όμοιες πιέσεις οπότε και είναι αναγκαίο να προσδιοριστούν με μεθόδους παλινδρόμησης, προσφέροντας της απαιτούμενη ακρίβεια. Τα δεδομένα που ελήφθησαν με δοκίμιο είναι περισσότερα των χωρίς δοκίμιο, άρα επιλέγεται ο προσδιορισμός των όγκων Hg χωρίς δοκίμιο για πιέσεις που μετρήθηκαν στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με δοκίμιο.

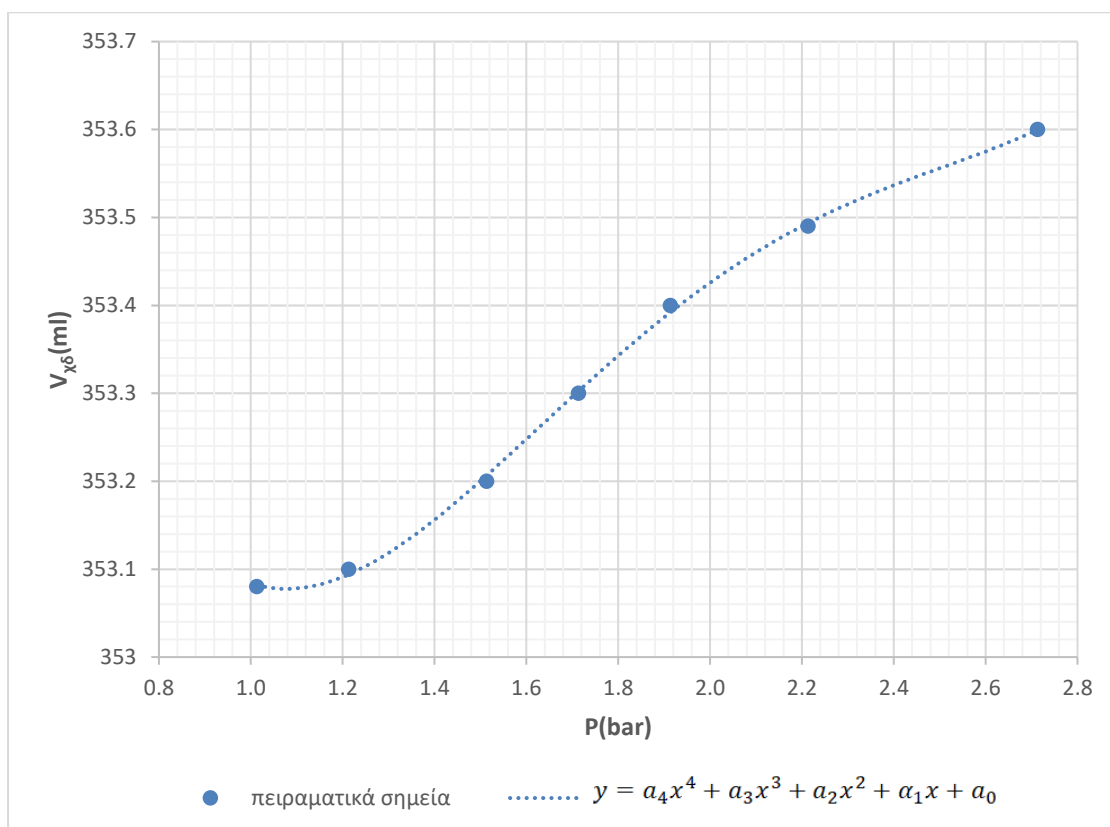
Τα δεδομένα όγκων Hg-πίεση πυκνομέτρου με και χωρίς δοκίμιο:



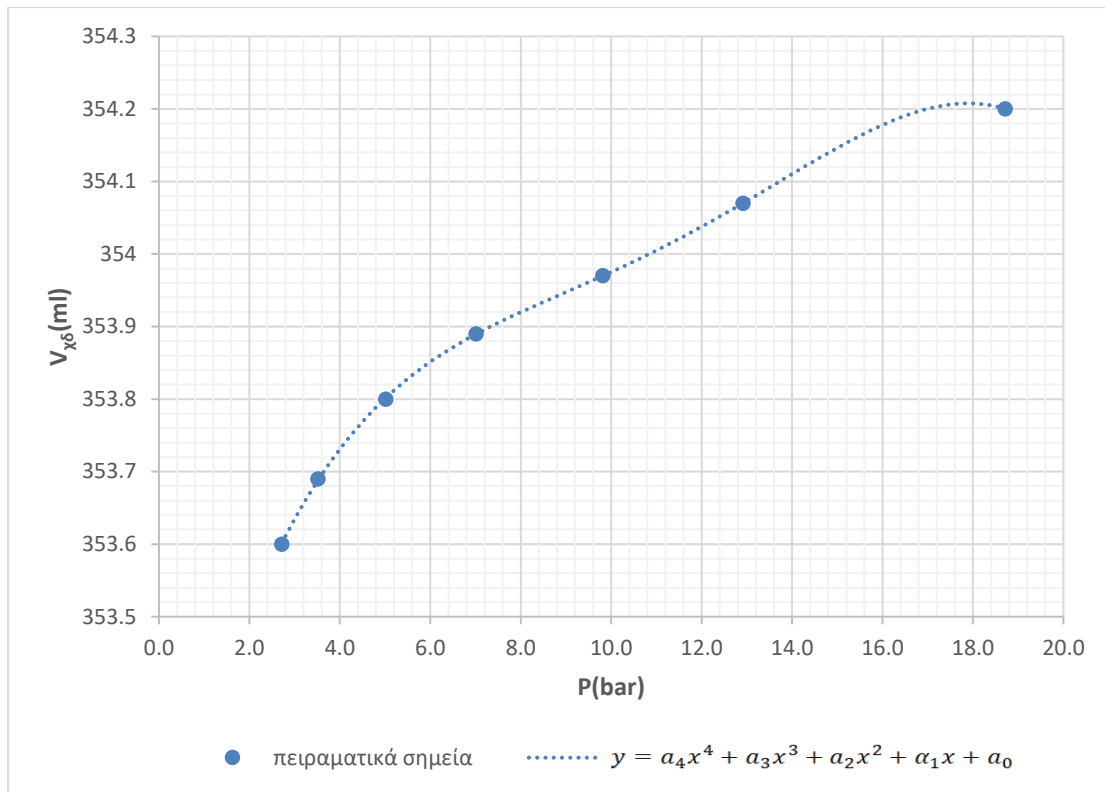
Διάγραμμα 3. 2: Όγκο που καταλαμβάνει ο Hg στο ποροσίμετρο παρουσία και μη του δοκιμίου.

Στα δεδομένα $V(P)$, χωρίς δοκίμιο δοκιμάστηκε παλινδρόμηση γραμμικής, πολυωνυμικής, λογαριθμικής, εκθετικής και συνάρτηση δύναμης. Η καλύτερη προσαρμογή με βάση το συντελεστή προσδιορισμού επιτεύχθηκε με πολυωνυμική συνάρτηση.

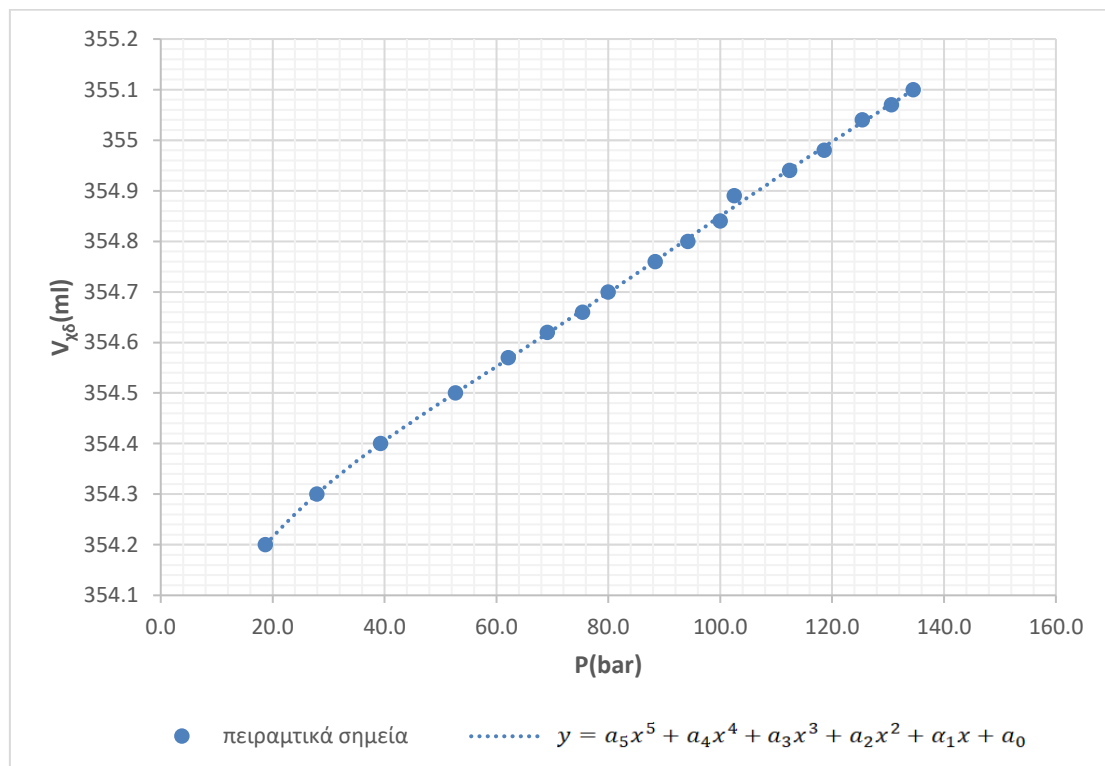
Εάν τα δεδομένα $V(P)$ μελετηθούν σε μικρές περιοχές πιέσεων (χωρίς δοκίμιο), φαίνεται ότι η καμπυλότητα μεταβάλλεται εντονότερα απ' ό τι γίνεται αντιληπτό στο παραπάνω διάγραμμα. Οπότε όπως θα δειχθεί και παρακάτω ήταν αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί βαθμός πολυωνύμου υψηλότερος του δεύτερου βαθμού. Παρόλο που πολυωνυμικές συναρτήσεις μέχρι και έκτου βαθμού, είχαν υψηλότερο βαθμό προσδιορισμού από συναρτήσεις χαμηλότερου βαθμού, προτιμήθηκαν χαμηλότεροι βαθμοί, καθώς παρουσιάζονταν έντονες εξάρσεις και υφέσεις. Η $V_{\chi\delta}(P)$, πρέπει να είναι γνησίως αύξουσα στο πεδίο ορισμού της, καθώς σε ρεαλιστικές συνθήκες αναμένεται διαστολή του πυκνομέτρου με την αύξηση της πίεσης. Μία μικρή μείωση του όγκου παρατηρείται στο διάγραμμα 3.4 σε πίεση 18,7 bar, λόγω της αδυναμίας της γραμμής τάσης να περιγράψει τα πραγματικά σημεία στη γειτονιά του πειραματικού σημείου στη πίεση αυτή.



Διάγραμμα 3. 3: Πρώτη πολυωνυμική προσαρμογή των δεδομένων του όγκου Hg, χωρίς δοκίμιο συναρτήσει της πίεσης.



Διάγραμμα 3. 4: Δεύτερη πολωνυμική προσαρμογή των δεδομένων του όγκου Hg, χωρίς δοκίμιο συναρτήσει της πίεσης.



Διάγραμμα 3. 5: Τρίτη πολωνυμική προσαρμογή των δεδομένων του όγκου Hg, χωρίς δοκίμιο συναρτήσει της πίεσης.

Έστω ότι η συνάρτηση $y(x)$, είναι η καμπύλη παλινδρόμησης. Η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων, απαιτεί την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγωνικών σφαλμάτων.

Οι παράμετροι που θα υπολογιστούν είναι ιδιαιτέρως μικροί σε σχέση με τη τέταρτη και πέμπτη δύναμη της πίεσης, όπως φαίνεται παρακάτω. Στη δεύτερη και στη τρίτη καμπύλη παλινδρόμησης το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο. Η επίλυση των κανονικών εξισώσεων επιλέχθηκε να γίνει με ακρίβεια 15 σημαντικών ψηφίων.

Η πολυωνυμική τέταρτου βαθμού:

$$y = a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad (3.17)$$

Η $y(x)$ στο διάστημα 1,0 bar έως 2,7 bar, επιλύοντας το σύστημα των παραμέτρων πολυωνυμικής 4^{ου} βαθμού προκύπτει:

$$a_4 = 0,213714859182385 \text{ ml/bar}^4$$

$$a_3 = -1,76877910003948 \text{ ml/bar}^3$$

$$a_2 = 5,23950007107592 \text{ ml/bar}^2$$

$$a_1 = -6,2011945702452 \text{ ml/bar}$$

$$a_0 = 355,600954387121 \text{ ml}$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού:

$$R^2 = 99.93\%$$

Οι τυπικές αποκλίσεις των παραμέτρων:

$$\sigma_{a_4} = 0,0823499891449082 \text{ ml/bar}^4$$

$$\sigma_{a_3} = 0,607177892007759 \text{ ml/bar}^3$$

$$\sigma_{a_2} = 1,62109503671245 \text{ ml/bar}^2$$

$$\sigma_{a_1} = 1,85375348126301 \text{ ml/bar}$$

$$\sigma_{a_0} = 0,763872899416589 \text{ ml}$$

Η τυπική απόκλιση της εκτίμησης του όγκου που καταλαμβάνει ο Hg:

$$\sigma = 0,00913493813786231 \text{ ml}$$

Αποτελεί μία εκτίμηση με βάση τη προσαρμογή του δείγματος ή της $y(x)$, σε σχέση με τους πραγματικούς όγκους που καταλαμβάνει ο Hg στο πυκνόμετρο.

Η $y(x)$ στο διάστημα 2,7 bar έως 18,7 bar, έχει τη καλύτερη προσαρμογή των δεδομένων της σε πολωνυμική τετάρτου βαθμού. Άρα, όπως και προηγουμένως η επίλυση του συστήματος των κανονικών εξισώσεων δίδει:

$$\alpha_4 = -0,0000463266338982203 \text{ ml/bar}^4$$

$$\alpha_3 = 0,00209594569099423 \text{ ml/bar}^3$$

$$\alpha_2 = -0,0339898269726824 \text{ ml/bar}^2$$

$$\alpha_1 = 0,264810852580211 \text{ ml/bar}$$

$$\alpha_0 = 353,093340487359 \text{ ml}$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού:

$$R^2 = 99,997\%$$

Οι τυπικές αποκλίσεις των παραμέτρων:

$$\sigma_{\alpha_4} = 2,85896618957614 \cdot 10^{-6} \text{ ml/bar}^4$$

$$\sigma_{\alpha_3} = 0,000116567360172872 \text{ ml/bar}^3$$

$$\sigma_{\alpha_2} = 0,00159862165319576 \text{ ml/bar}^2$$

$$\sigma_{\alpha_1} = 0,00859474108052967 \text{ ml/bar}$$

$$\sigma_{\alpha_0} = 0,0149228377736064 \text{ ml}$$

Η τυπική απόκλιση της εκτίμησης του όγκου που καταλαμβάνει ο Hg:

$$\sigma = 0,00191268880502783 \text{ ml}$$

Η πολυωνυμική συνάρτηση πέμπτου βαθμού:

$$y = a_5x^5 + a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad (3.18)$$

Η $y(x)$ στο διάστημα 18,7 bar έως 134,5 bar, έχει τη καλύτερη προσαρμογή των δεδομένων της σε πολυωνυμική πέμπτου βαθμού. Άρα, η επίλυση του συστήματος των κανονικών εξισώσεων δίδει:

$$a_5 = 5,47343017468537 \cdot 10^{-11} \text{ ml/bar}^5$$

$$a_4 = -2,58769521238977 \cdot 10^{-8} \text{ ml/bar}^4$$

$$a_3 = 4,64030918252317 \cdot 10^{-6} \text{ ml/bar}^3$$

$$a_2 = -0,000391950555732754 \text{ ml/bar}^2$$

$$a_1 = 0,022876238579597 \text{ ml/bar}$$

$$a_0 = 353,881398482005 \text{ ml}$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού:

$$R^2 = 99,94\%$$

Οι τυπικές αποκλίσεις των παραμέτρων:

$$\sigma_{a_5} = 6,44303780366944 \cdot 10^{-6} \text{ ml/bar}^5$$

$$\sigma_{a_4} = 2,48752531649243 \cdot 10^{-8} \text{ ml/bar}^4$$

$$\sigma_{a_3} = 3,60729879625832 \cdot 10^{-6} \text{ ml/bar}^3$$

$$\sigma_{a_2} = 0,000242108093068711 \text{ ml/bar}^2$$

$$\sigma_{a_1} = 0,00736858595734502 \text{ ml/bar}$$

$$\sigma_0 = 0,0787933027785428 \text{ ml}$$

Η τυπική απόκλιση της εκτίμησης του όγκου που καταλαμβάνει ο Hg:

$$\sigma = 0,0079877107425368 \text{ ml}$$

Οι τυπικές αποκλίσεις των εγγεόμενων όγκων Hg της παλινδρόμησης είναι μικρότερες από το όριο διακριτότητας του οργάνου (0,02 ml).

Στα 130,7 bar, που το δοκίμιο είναι πλήρως κορεσμένο με Hg, η διαφορά από τον όγκο που καταλαμβάνει χωρίς το δοκίμιο ισούται με τον όγκο των κόκκων:

$$V_{x\delta}(130,7) = 355,1 \text{ ml}$$

Τα σημαντικά ψηφία του $V_{x\delta}(130,7)$ δεν είναι επαρκή (λόγω της διακριτότητας του μανομέτρου), γιατί η τυπική απόκλιση της εκτίμησης του εγγεόμενου όγκου Hg (0,008 ml) έχει υψηλότερη ακρίβεια από τον $V_{x\delta}(130,71)$. Οπότε η τυπική απόκλιση, σ δε θα ληφθεί υπόψιν στον υπολογισμό του πορώδους.

$$V_{\mu\delta}(130,7) = 348,31 \text{ ml}$$

$$GV = 6,763 \text{ cm}^3$$

Ο όγκος κενών:

$$PV = BV - GV \quad (3.19)$$

$$V_{x\delta}(1,01) = 353,08 \text{ ml}$$

$$V_{\mu\delta}(1,01) = 344,88 \text{ ml}$$

Οι τυπικές αποκλίσεις των $V_{x\delta}(1,01)$ και $V_{\mu\delta}(1,01)$ είναι η διακριτότητα του εξωθητή (0,02 ml), αλλά δε θα ληφθεί υπόψιν για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.

$$BV = 8,2000 \text{ cm}^3$$

$$PV = 1,437 \text{ cm}^3$$

Το πορώδες:

$$\Phi = \frac{PV}{BV} \quad (3.20)$$

$$\Phi = 17,53 \%$$

Πριν την εξώθηση του Hg στο πυκνόμετρο δεν αφαιρέθηκε ο αέρας οπότε, πρέπει να υπολογιστεί η πίεση του στους πόρους, και να διαπιστωθεί αν η τελική πίεση από τον εξωθητή επαρκούσε για να καταλάβει ο Hg, προσεγγιστικά το σύνολο του πορώδους. Ο έλεγχος αυτός γίνεται διότι η διάταξη που διαθέτει το εργαστήριο ανάλυσης ρευστών και

πυρήνων υπογείων ταμιευτήρων δε διαθέτει αντλία κενού, ώστε η τριχοειδής πίεση να ισούται πρακτικά με τη πίεση του εξωθητή και ο κορεσμός σε Hg να αποδώσει το πλήρες διάγραμμα κατανομής μεγέθους πόρων.

Η πίεση του αέρα στο εσωτερικό των πόρων, P_{air} (bar), για κάθε τιμή της πίεσης του Hg παρουσία του δοκιμίου υπολογίζεται με βάση το νόμο του Boyle:

$$P_{air}(PV - V_{Hg}) = P_{atm}PV \quad (3.21)$$

P_{atm} : Ατμοσφαιρική πίεση (1,01 bar).

Λόγω της παρουσίας σημαντικής ποσότητας αέρα ο όγκος κενών επιλέχθηκε να υπολογιστεί, μέσω του πορώδους που υπολογίστηκε με τη μέθοδο της ποροσιμετρίας.

Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι κυλινδρικού σχήματος, διαμέτρου 2,543 cm:

$$PV = LA\Phi_{CP} \quad (3.22)$$

L (cm): μήκος του δοκιμίου.

A (cm²): Εμβαδόν διατομής δείγματος.

Φ_{CP} : Πορώδες δοκιμίου.

$$BV = AL \quad (3.23)$$

$$A = \pi \frac{d^2}{4} \quad (3.24)$$

Από τις σχέσεις 3.22 έως 3.24:

$$L = 1,614 \text{ cm}$$

$$PV = 1,502 \text{ ml}$$

Ο βαθμός κορεσμού του Hg στο δοκίμιο:

$$S_{Hg}(\%) = \frac{V_{Hg}}{PV} 100 \quad (3.25)$$

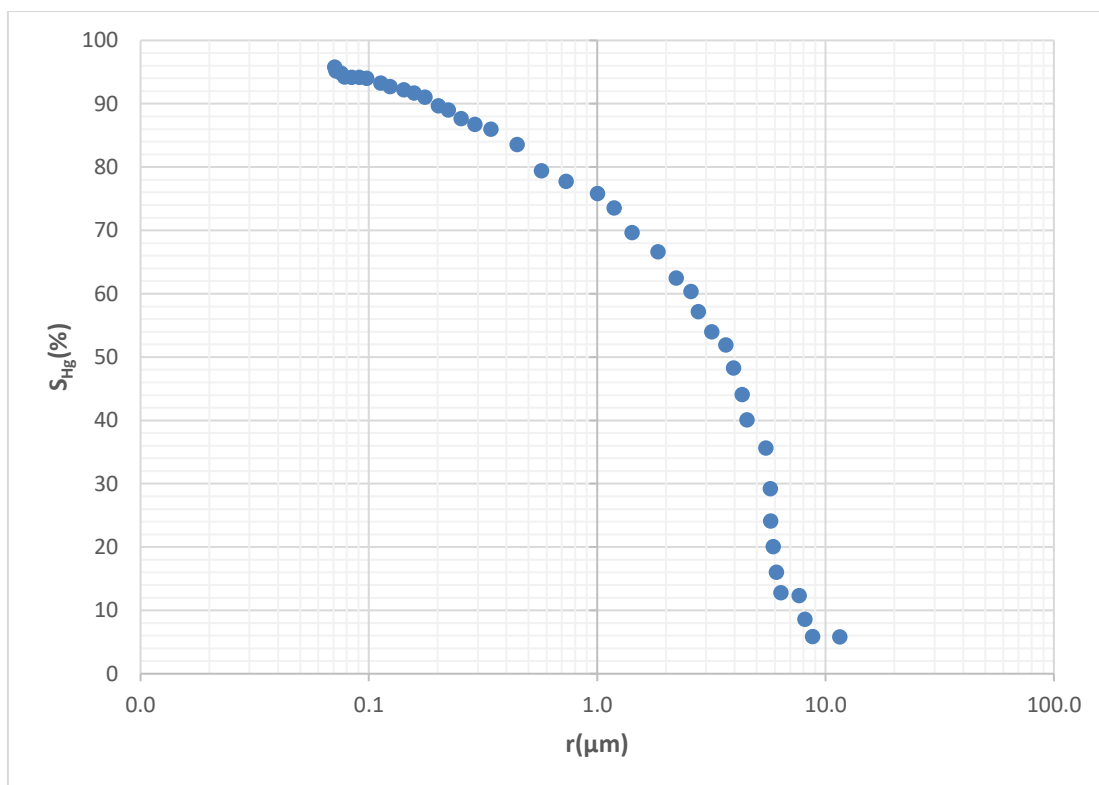
Από το νόμο των τριχοειδών πιέσεων (σχέση 3.15), υπολογίζεται η μικρότερη δυνατή ακτίνα που θα έχει καταλάβει ο Hg σε κάθε βαθμό κορεσμού. Η τριχοειδής πίεση $P_C(bar)$ θα ισούται:

$$P_C = P_{Hg} - P_{air} \quad (3.26)$$

$P_{Hg}(bar)$: Πίεση του Hg ($P_{\mu\delta}$).

$P_{air}(bar)$: Πίεση του αέρα.

Οι όγκοι κενών σε Hg με αρνητικές τιμές, οφείλονται σε ανεπιτυχή προσαρμογή της γραμμής τάσης στα πραγματικά σημεία (Παράρτημα A.3). Οι τρεις πρώτοι όγκοι Hg που έχουν εισχωρήσει στο δοκίμιο, δηλαδή έως $P_{\mu\delta}=1,51 \text{ bar}$, είναι μικρότεροι, κατά απόλυτη τιμή, από το τυπικό σφάλμα της εκτίμησης του όγκου Hg χωρίς δοκίμιο ($\sigma = 0,009 \text{ ml}$) που μετρήθηκε σε αυτές τις πιέσεις, οπότε τα ποσοστά σε όγκο κενών μπορούν να λάβουν αρνητικές τιμές. Για τη πρώτη και τη τρίτη τιμή, οι όγκοι του Hg ελήφθησαν σε ίδιες πιέσεις κατά τη παρουσία και την απουσία του δοκιμίου, οπότε αν ληφθούν υπόψιν οι όγκοι Hg που μετρήθηκαν χωρίς δοκίμιο, προκύπτουν μηδενικοί όγκοι ως ποσοστό του όγκου κενών σε Hg. Οι τιμές αυτές στο Παράρτημα A.3 είναι αρνητικές γιατί προέκυψαν από την προσαρμογή του όγκου του Hg χωρίς δοκίμιο, στις πιέσεις του Hg παρουσία του δοκιμίου. Η πρώτη αξιόπιστη τιμή όγκου αφορά στο βαθμό κορεσμού να είναι 5,8%. Άρα, το μανόμετρο δε διαθέτει τη κατάλληλη ακρίβεια για να συσχετιστούν οι βαθμοί κορεσμού, που απαντώνται σε πόρους ακτίνας υψηλότερης των 11,5 μm . Η τελευταία τιμή του όγκου Hg, υπό πίεση $P_{\mu\delta}=130,7 \text{ bar}$, είναι μικρότερη της προηγούμενης. Η διαφορά τους (-0,001 ml), κατά απόλυτη τιμή, είναι μικρότερη της τυπικής απόκλισης της παλινδρόμησης στις πιέσεις αυτές ($\sigma = 0,008 \text{ ml}$), οπότε και ο βαθμός κορεσμού της τελευταίας μέτρησης εσφαλμένα υπολογίστηκε μικρότερος της προηγούμενης. Να σημειωθεί πως ο τελικός κορεσμός που υπολογίζεται είναι 95,96%, αφού χρησιμοποιήθηκε το πραγματικό πορώδες κατά τον υπολογισμό. Εάν χρησιμοποιηθεί το πορώδες της μεθόδου των τριχοειδών πιέσεων θα πρόκυπτε ο κορεσμός πλήρης. Συνεπώς, η ύπαρξη του αέρα σε υψηλό βαθμό, δεν επιτρέπει τη συσχέτιση των βαθμών κορεσμού σε Hg για ακτίνα των πόρων μικρότερη των 0,07 μm . Το διάγραμμα κατανομής μεγέθους πόρων:



Διάγραμμα 3. 6: Κατανομή μεγέθους πόρων 1^{ου} πειράματος.

Στη συνέχεια ελήφθησαν μετρήσεις με την ίδια μέθοδο από το Εργαστήριο Τεχνολογίας Κεραμικών και Υάλου σε νέο δείγμα. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το AutoPore IV 9500. Η μέγιστη πίεση εξώθησης ανέρχεται στα 33.000 psia και διακριτική ικανότητα των 0,05 psia. Η διακριτική ικανότητα εξώθησης του Hg ανέρχεται σε 0,1 μL. Η ακρίβεια αυτή προσφέρει τη δυνατότητα εκτίμησης της κατανομής μεγέθους πόρων στο εύρος της διαμέτρου των πόρων, να ανέρχεται από 0,003 μm σε 360 μm.

Ο φαινόμενος όγκος (BV) και το πορώδες (Φ_{CP}), του προς μελέτη πετρώματος υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο. Η μεθοδολογία^[10] αυτή διαφέρει στα περιεχόμενα ρευστά που χρησιμοποιούνται αλλά και στον υπολογισμό του όγκου του Hg, που εισχωρεί στους πόρους. Τίθεται σε λειτουργία η αντλία κενού, παράλληλα με την παροχή του Hg στον υποδοχέα, παρουσία του δοκιμίου. Έτσι, δημιουργούνται οι συνθήκες κατά τις οποίες, στον υποδοχέα περιέχονται: το πέτρωμα, ο υγρός Hg (μη διαβρέχουσα φάση) και ατμοί Hg (διαβρέχουσα φάση). Ο υποδοχέας συνδέεται με ένα κυλινδρικό σωλήνα, μέσω του οποίου εξωθείται ο Hg. Η

πίεση ασκείται με κάποιο αέριο ή υγρό υδρογονάνθρακα. Ο σωλήνας είναι κατασκευασμένος από γυαλί (ηλεκτρικός μονωτής) και η εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα είναι σε επαφή με ένα μέταλλο (αγωγός του ηλεκτρισμού). Ο Hg που θα βρίσκεται στο εσωτερικό του σωλήνα, είναι επίσης αγωγός. Ο συνδυασμός δύο ομόκεντρων αγωγών, που διαχωρίζονται από ένα μονωτή, δημιουργεί έναν πυκνωτή. Η μόνη μεταβλητή στη συνάρτηση της χωρητικότητας που δεν είναι σταθερή, είναι το εμβαδόν που καλύπτει ο Hg στα τοιχώματα του σωλήνα, υπό σταθερή πίεση. Μετρώντας τη χωρητικότητα του πυκνωτή, με δεδομένο ότι η διάμετρος του σωλήνα είναι γνωστή, υπολογίζεται ο όγκος του Hg που εισχωρεί στους πόρους με κάθε διαδοχική αύξηση της πίεσης, αντίστοιχα. Οι ανιχνευτές χωρητικότητας, λειτουργούν σαν τους μορφοτροπείς της πίεσης. Ένα ηλεκτρικό σήμα αντιστοιχίζεται στη τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή.

Η μάζα του δείγματος είναι:

$$m = 1.9952 \text{ gr}$$

Η πυκνότητα του δοκιμίου όταν καταλαμβάνει τον υποδοχέα, αλλά ο Hg δεν έχει εισχωρήσει στο πέτρωμα:

$$\rho = 2,0374 \text{ gr/ml}$$

Ο συνολικός όγκος Hg ανά μονάδα μάζας του 1 gr δείγματος:

$$V_t = 0.0898 \text{ ml}$$

Το πορώδες υπολογίστηκε:

$$\Phi_{CP} = 18,315 \%$$

Ο όγκος κενών έχει ως εξής:

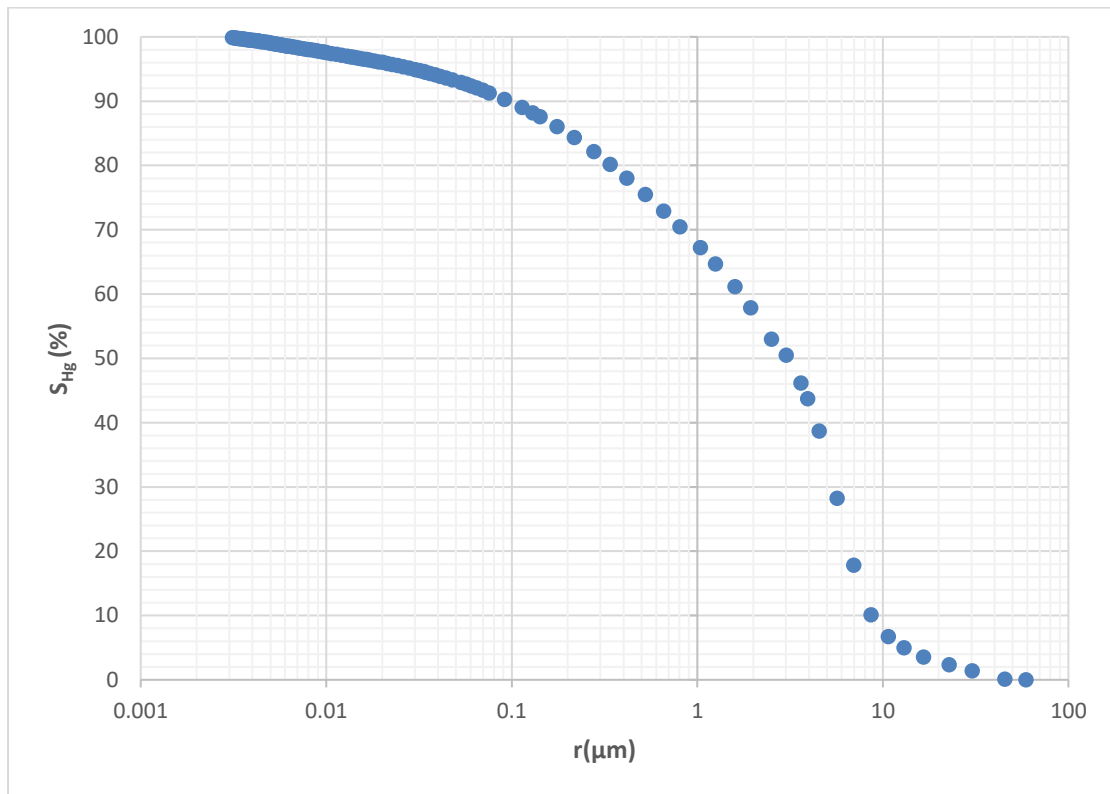
$$PV = \Phi \cdot BV \quad (3.27)$$

Ο αθροιστικός εγγεόμενος Hg, $Q(\text{ml/gr})$ που καταλαμβάνει τους πόρους με την ελάχιστη δυνατή διάμετρο, $D(\text{nm})$, σε κάθε πίεση, $P_{Hg}(\text{psia})$, θα υπολογιστούν ως βαθμός κορεσμού σε Hg, $S_{Hg}(\%)$, που πληροί τους πόρους με την ελάχιστη δυνατή ακτίνα, $r(\mu\text{m})$.

Ο βαθμός κορεσμού του Hg, σε κάθε πίεση (Παράρτημα Α.4):

$$S_{Hg} = \frac{Q \cdot m}{PV} \quad (3.28)$$

Η κατανομή μεγέθους πόρων προκύπτει:



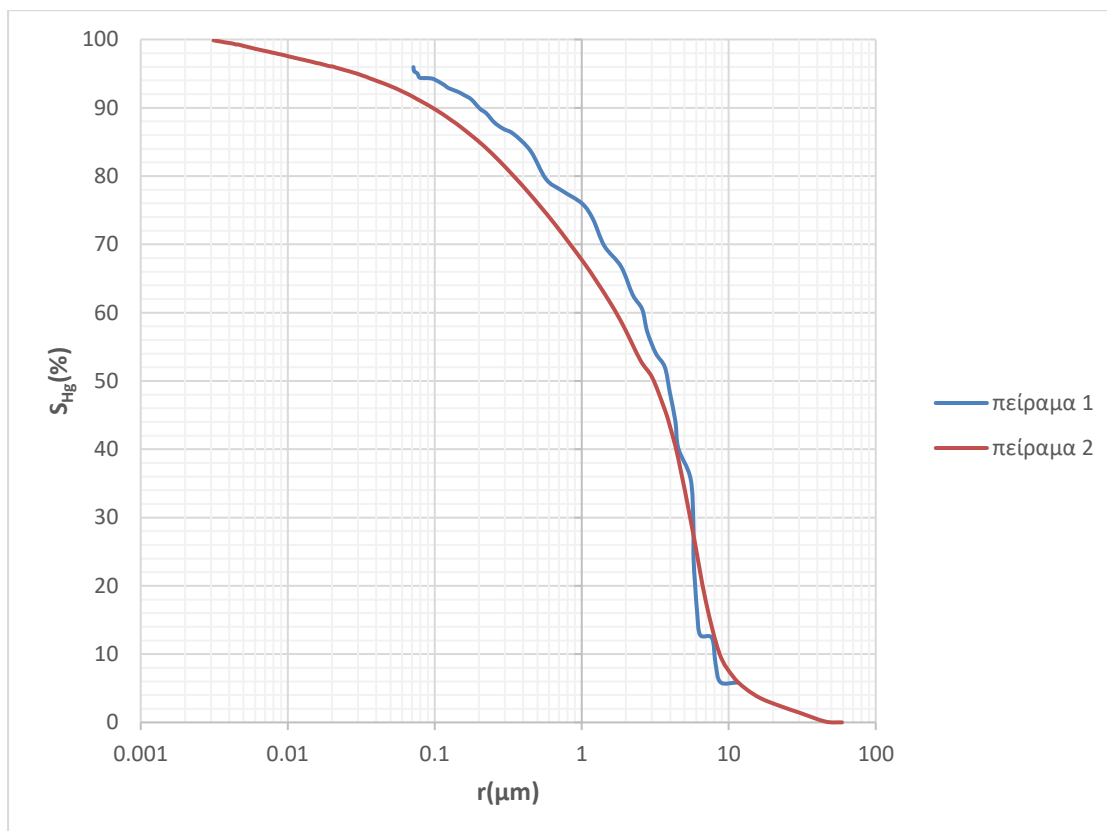
Διάγραμμα 3. 7: Κατανομή μεγέθους πόρων 2^{ου} πειράματος.

Συνοψίζοντας ποιοτικά, ο βαθμός κορεσμού σε Hg που αντιστοιχεί στη μικρότερη δυνατή ακτίνα για δεδομένη πίεση είναι:

S _{Hg} (%)	r(μm)
0	59
7	10
67	1
89	0,1
97	0,01
100	0,003

Πίνακας 3. 5: Ποιοτική αποτίμηση της κατανομής μεγέθους πόρων.

Τέλος παρατηρείται πως η κατανομή μεγέθους πόρων μεγαλύτερων των 4 μm , οι καμπύλες των δύο πειραμάτων συνήθως βρίσκονται εγγύτερα σε σχέση με όταν είναι μικρότεροι (το σφάλμα του 1^{ου} πειράματος ανέρχεται έως και 10% του όγκου κενών σε Hg), όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.8. Το 2^ο πείραμα έχει τη δυνατότητα εύρεσης πόρων ακτίνας μεγαλύτερης των 11,5 μm και μεγαλύτερης των 0,07 μm (πίνακας 3.5).



Διάγραμμα 3. 8: Σύγκριση των δύο πειραμάτων κατανομής μεγέθους πόρων.

3.3 Περιθλασιμετρία ακτινών X

Η μέθοδος ^[41] στηρίζεται στη περίθλαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας (ηλεκτρομαγνητικά κύματα μίας μόνο συχνότητας) ακτινών X, πάνω στα πλεγματικά επίπεδα των ορυκτών. Έτσι, προσδιορίζεται η απόσταση των πλεγματικών επιπέδων, που είναι μοναδικά για κάθε ένα προσδιοριζόμενο ορυκτό.

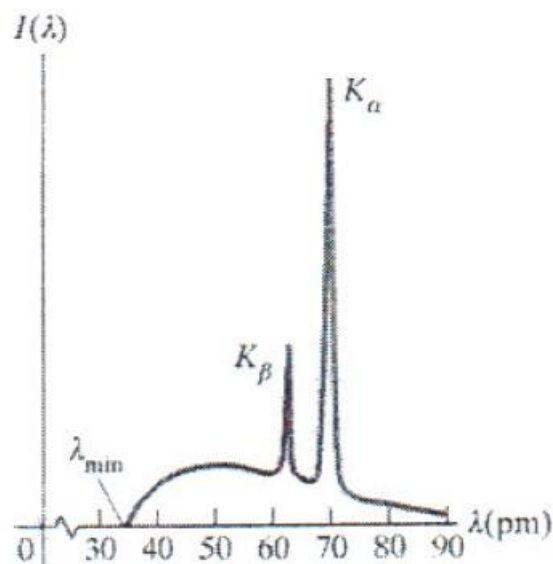
Η παραγωγή ακτινών X επιτυγχάνεται με ανάπτυξη τάσης ηλεκτρικού ρεύματος (35-50 kV) ανάμεσα σε μία άνοδο και μία κάθοδο. Η κάθοδος είναι ένα μεταλλικό νήμα βολφραμίου, το οποίο όταν θερμανθεί απελευθερώνει ηλεκτρόνια, τα οποία κατευθύνονται προς την άνοδο, λόγω της διαφοράς δυναμικού. Αποτέλεσμα της πρόσκρουσης, είναι η παραγωγή ακτινών X. Το 98% της ενέργειας των ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε θερμότητα και γι' αυτό το μέταλλο-στόχος (υλικό μεγάλου ατομικού αριθμού, όπως Mo, Cu, Co, Fe κ.α.), πρέπει να ψύχεται εύκολα (υψηλή θερμική αγωγιμότητα). Η πρόσκρουση των ηλεκτρονίων στην άνοδο, προκαλεί την απότομη επιβράδυνση τους και συνοδεύεται από εκπομπή ακτινών X. Η εναπομένουσα ενέργεια που αποδίδουν στα άτομα του στόχου είναι αρκετή για να προκαλέσει τη διέγερση των ηλεκτρονίων των εσωτερικών στοιβάδων. Τα ηλεκτρόνια υψηλότερων στοιβάδων υποκαθιστούν το κενό για να συμπληρώσουν τις εσωτερικές στοιβάδες. Η ενεργειακή διαφορά ανάμεσα στις δύο στοιβάδες μεταπήδησης κάθε ηλεκτρονίου, ελευθερώνεται με την εκπομπή ακτινών X.

Οι ακτίνες X που παράγονται λόγω της επιβράδυνσης των ηλεκτρονίων με την πρόσκρουσή τους στην άνοδο ονομάζεται ακτινοβολία πέδησης (Bremsstrahlung radiation) και εκπέμπει συνεχές φάσμα (continuous spectrum). Η φυσική του ερμηνεία βασίζεται στο γεγονός πως η επιβράδυνση της ταχύτητας των ηλεκτρονίων (απότομη μείωση της έντασης του ρεύματος), προκαλεί τη παραγωγή ενός μη περιοδικού κύματος. Η ανάλυση κατά Fourier, δίνει ένα συνεχές φάσμα, δηλαδή την υπέρθεση κυμάτων (σταθερής συχνότητας το καθένα), για το οποίο η συχνότητα των κυμάτων λαμβάνει συνεχείς τιμές. Η μορφή του φάσματος (οι οριακές τιμές της συχνότητας και του μήκους κύματος), εξαρτάται από τον αριθμό και την ταχύτητα των ηλεκτρονίων (διαφορά δυναμικού του ηλεκτρικού ρεύματος) και από το υλικό της ανόδου. Η αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας (αριθμός φωτονίων ανά μονάδα χρόνου), προκαλεί μετατόπιση των οριακών τιμών του μήκους κύματος προς τις μικρότερες τιμές και αντιστρόφως μείωση της έντασης αυξάνει τις οριακές τιμές του μήκους κύματος.

Η δεύτερη ακτινοβολία προκαλείται από τη διέγερση των ηλεκτρονίων των εσωτερικών στοιβάδων της ανόδου. Ονομάζεται χαρακτηριστική ακτινοβολία (characteristic radiation) και εκπέμπει γραμμικό φάσμα

(discrete spectrum), δηλαδή ένα σύνολο από ακτινοβολίες με διακριτές τιμές του μήκους κύματος. Η ονομασία της φασματικής γραμμής υποδεικνύεται από τη στοιβάδα από την οποία απομακρύνθηκε το ηλεκτρόνιο (π.χ. K, L, M), τη στοιβάδα από την οποία προέρχεται το αντικατεστημένο ηλεκτρόνιο με α , την επόμενη β , τη μεθεπόμενη γ κ.ο.κ. Επιπρόσθετα αριθμούνται τα ηλεκτρόνια που μεταπήδησαν από μία στοιβάδα (1,2,3 κ.λπ.), κατά αύξοντα αριθμό σε σχέση με την αύξηση της απόστασης από τη στοιβάδα πλήρωσης. Η προτεραιότητα πλήρωσης βασίζεται επίσης στην απόσταση αυτή, καθώς η ενεργειακή διαφορά ανάμεσα σε δύο στοιβάδες αυξάνεται αυξανόμενης της απόστασης. Στην περιθλασιμετρία ακτίνων X (XRD), χρησιμοποιούνται μετά από φιλτράρισμα οι $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$ και $K_{\beta 2}$. Αύξηση της διαφοράς δυναμικού του ηλεκτρικού ρεύματος επιφέρει μεγαλύτερη αύξηση της έντασης του γραμμικού φάσματος σε σχέση με του συνεχούς, αλλά δε μεταβάλλεται το μήκος κύματος του γραμμικού φάσματος.

Σε ένα διάγραμμα (διάγραμμα 3.9^[42]) της έντασης της ακτινοβολίας συναρτήσει του μήκους κύματος απεικονίζεται το σύνθετο φάσμα (συνεχές και γραμμικό) που παράγεται για δεδομένη διαφορά δυναμικού, από την πρόσπτωση των ηλεκτρονίων στην άνοδο.



Διάγραμμα 3. 9: Σύνθετο φάσμα ακτίνων X σε διάγραμμα της έντασης της ακτινοβολίας συναρτήσει του μήκους κύματος

Οι ακτίνες $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$ έχουν περίπου ίσες ενέργειες και γι' αυτό υπολογίζεται η μέση τιμή τους, K_{α} .

Οι θέσεις των κορυφών (peaks) του γραμμικού φάσματος προτιμήθηκαν έναντι του συνεχούς. Ο λόγος είναι επειδή κατά τη περίθλαση ακτινών X σε ένα πολυκρυσταλλικό σύστημα πετρώματος, η υπέρθεση ακτινών X συνεχούς φάσματος, θα προκαλούν εντονότερη αλληλοεπικάλυψη στο διάγραμμα $I(\lambda)$, σε σχέση με τις ακτίνες X του γραμμικού φάσματος, με αποτέλεσμα να μη μπορεί να γίνει η διάκριση μεταξύ των ορυκτών φάσεων του πετρώματος. Το μήκος κύματος υπολογίζεται, μέσω της ενέργειας που απέκτησαν τα ηλεκτρόνια από το νόμο του Planck^[43], λόγω της επιτάχυνσης που προκάλεσε η διαφορά δυναμικού του ηλεκτρικού ρεύματος:

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda} \quad (3.29)$$

$E(J)$: Ενέργεια ακτινοβολίας

$h(J \cdot s)$: Σταθερά του Planck

$f(Hz)$: Συχνότητα

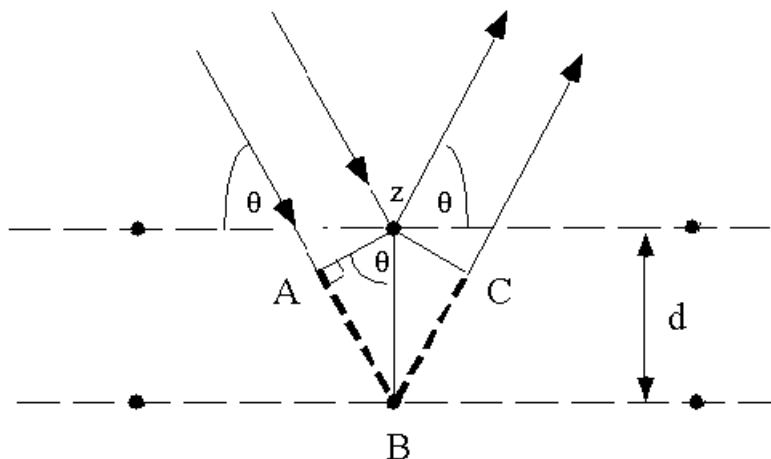
$\lambda(m)$: μήκος κύματος

$c(m/s)$: ταχύτητα του φωτός

Η μέγιστη ενέργεια (E_{\max}) της ακτινοβολίας πέδησης είναι αντιστρόφως ανάλογη του ελάχιστου μήκους κύματος (λ_{\min}) και η ενέργεια της χαρακτηριστικής ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος της μονοχρωματικής ακτινοβολίας.

Η μέθοδος^[41] αυτή βασίζεται στην ανάλυση των ακτινών X που έχουν περιθλαστεί από τα πλεγματικά επίπεδα των ορυκτών φάσεων του δείγματος. Η περίθλαση (diffraction) είναι το φαινόμενο της κάμψης και διάδοσης ενός κύματος σε νέα διεύθυνση κατά το συνδυασμό των κυματικών φαινομένων Χόιγκενς (Huygens principle) και της συμβολής (wave superposition). Η αρχή Χόιγκενς προβλέπει τη μεταβολή της διεύθυνσης των κυμάτων, όταν προσπίπτουν σε μία σχισμή (περίπου ίση με το μήκος κύματος) ή σε άτομα ενός στερεού πλέγματος και η συμβολή την υπέρθεση αυτών. Κάθε κρύσταλλος αποτελείται από παράλληλα πλεγματικά επίπεδα που ισαπέχουν μεταξύ τους, απόσταση $d(m)$. Οι

περιθλούμενες ακτίνες συμβάλουν ενισχυτικά (constructive), με γωνία πρόσπτωσης $\theta(^{\circ})$, όταν η διαφορά του οπτικού δρόμου ακτινών X σε παράλληλα πλεγματικά επίπεδα, είναι ακέραιο πολλαπλάσιο (n) του μήκους κύματος.



Διάγραμμα 3. 10: Γεωμετρική απεικόνιση των παραμέτρων του νόμου του Bragg

Στο διάγραμμα 3.10^[44], δύο ακτίνες X προσπίπτουν υπό γωνία θ στα άτομα του πλεγματικού επιπέδου (σημεία Z και B απόστασης d) και περιθλώνται ενισχυτικά με διαφορά οπτικού δρόμου $AB+BC=n\lambda$ (συνθήκη για συμφωνία φάσης κυμάτων). Από τη γεωμετρία των περιθλώμενων ακτινών προκύπτει ο νόμος του Bragg:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(\theta) \quad (3.30)$$

Έτσι κατασκευάζεται το ακτινοδιάγραμμα^[41], όπου οι κορυφές (peaks) των περιθλώμενων ακτινών X είναι η ένταση της ακτινοβολίας (ακτίνες X ανά δευτερόλεπτο) συναρτήσει της γωνίας (2θ) που σχηματίζει η προέκταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από τη πηγή (X-Ray source) με τη περιθλώμενη που συλλέγεται από τον ανιχνευτή (X-Ray detector). Μετράται η διπλάσια τιμή γωνίας πρόσπτωσης, γιατί το γωνιόμετρο που είναι ενσωματωμένο στο περιθλασίμετρο, μετρά αυτή τη γωνία. Κατά την αποτίμηση του ακτινοδιαγράμματος ο ερευνητής καλείται να ταυτίσει τις κορυφές με αυτές των πρότυπων ορυκτών φάσεων της βιβλιογραφίας (International Center of Diffraction Data). Βάση της θέσης 2θ , εντοπίζονται οι ορυκτές φάσεις του πετρώματος. Με βάση την ένταση της

ακτινοβολίας, $I(2\theta)$ διεξάγονται συμπεράσματα για την ποσότητα συμμετοχής κάθε ορυκτής φάσης. Η περιθλασιμετρία δίνει επίσης, τη δυνατότητα υπολογισμού των διαστάσεων της κυψελίδας των κρυσταλλικών πλεγμάτων, ανάλογα το κρυσταλλικό σύστημα ταξινόμησης στο οποίο ανήκει (κυβικό, εξαγωνικό, ρομβοεδρικό κ.α). Τέλος, δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού του μεγέθους των κόκκων. Υπάρχουν 3 μέθοδοι περιθλασιμετρίας ακτινών X:

Μέθοδος Laue

- Υπολογίζει τον προσανατολισμό των κρυσταλλικών επιπέδων (Miller indexes: h, k, l).
- Το δείγμα είναι μονοκρυσταλλικό.
- Χρησιμοποιείται πολυχρωματική ακτινοβολία (συνεχές φάσμα).
- Γωνία περίθλασης διατηρείται σταθερή.

Μέθοδος περιστρεφόμενου κρυστάλλου

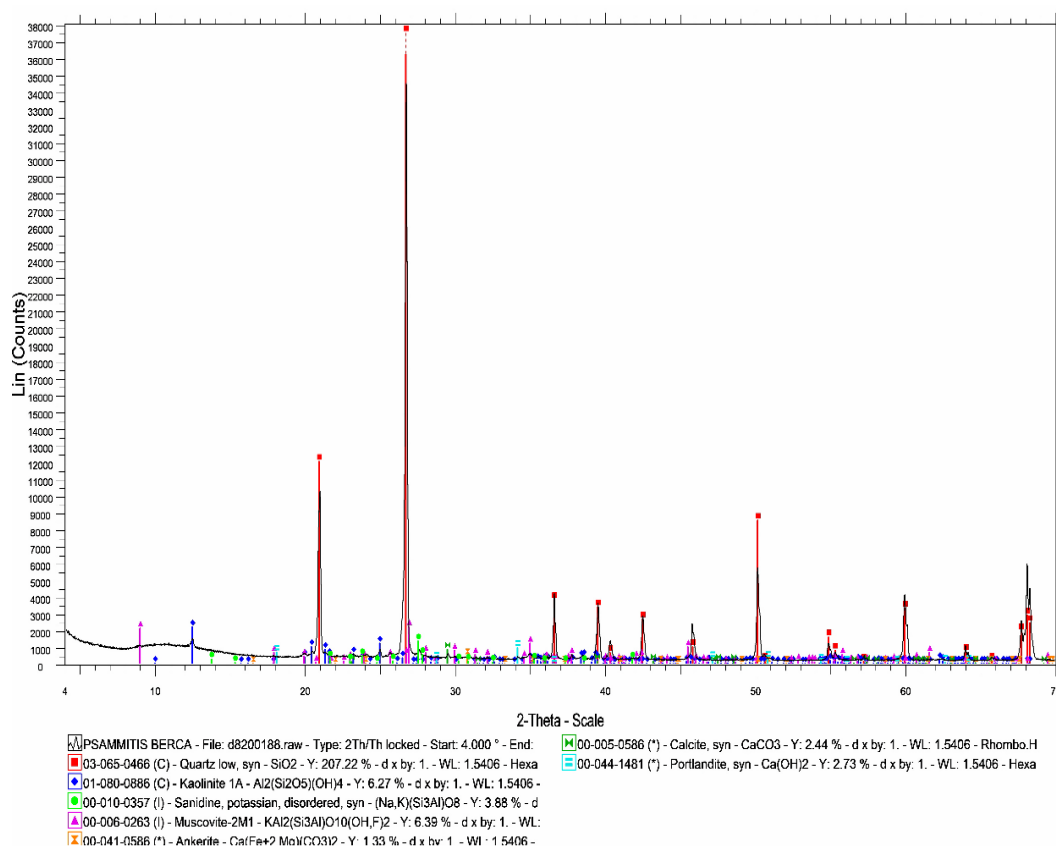
- Υπολογίζει τις σταθερές του πλέγματος, δηλαδή τα μήκη των ακμών της κυψελίδας (length of vectors).
- Το δείγμα είναι μονοκρυσταλλικό.
- Χρησιμοποιείται πολυχρωματική ακτινοβολία (συνεχές φάσμα).
- Οι περιθλώμενες γωνίες μεταβάλλονται με το χρόνο.

Μέθοδος κόνεως ή σκόνης

- Υπολογίζει όλες τις παραμέτρους του πλέγματος (δείκτες Miller και σταθερές πλέγματος).
- Το δείγμα είναι πολυκρυσταλλικό (σε σκόνη).
- Χρησιμοποιείται μονοχρωματική ακτινοβολία (γραμμικό φάσμα).
- Οι περιθλώμενες γωνίες μεταβάλλονται με το χρόνο.

Ο ψαμμίτης Berea είναι ένα πολυκρυσταλλικό πέτρωμα, οπότε χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος κόνεως, αλλά μόνο για την εύρεση των περιεχόμενων ορυκτών φάσεων και του ποσοστού συμμετοχής τους

στο πέτρωμα. Αρχικά, λειοτριβήθηκε τμήμα του πετρώματος, πάχους 1 mm. Το μοντέλο ήταν το D8 Advance της εταιρίας BrukerAXS. Η λυχνία (πομπός) ήταν από Cu και ο καταμετρητής γωνιών ήταν το μοντέλο LynxEye, εύρους μέτρησης 4-70°, βήμα μετρήσεων 0,02° και 0,2 s/βήμα. Το ακτινοδιάγραμμα (διάγραμμα 3.11) δείγματος από πέτρωμα Berea είναι:



Διάγραμμα 3. 11: Ακτινοδιάγραμμα πετρώματος Berea

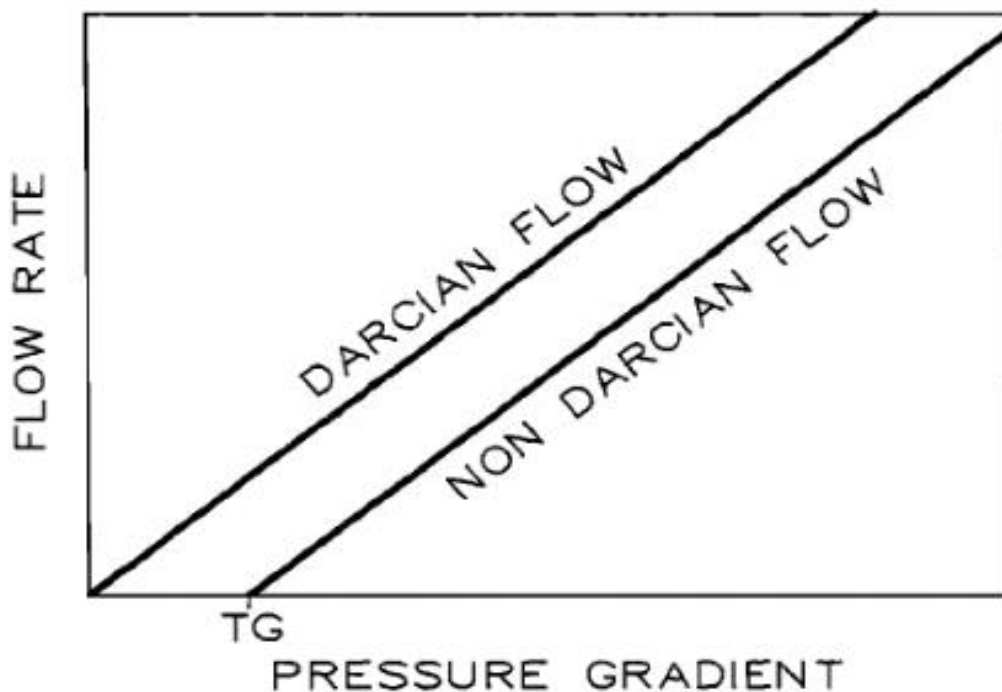
Από τις πρότυπες τιμές των ορυκτών του ακτινοδιαγράμματος στη βιβλιογραφία προκύπτει:

Το πέτρωμα αποτελείται κυρίως από χαλαζία συγκέντρωσης 95% W/W και δευτερευόντως από ορυκτά της ομάδας του καολινίτη, ανορθόκλαστο, μοσχοβίτη, ασβεστίτης, ανκερίτης και πορτλανδίτη σε ποσοστό 5% W/W.

3.4. Φαινόμενο του διπλού στρώματος

Τα ορυκτά της ομάδας του καολινίτη, το ανορθόκλαστο και ο μοσχοβίτης, είναι αργιλικά ορυκτά. Πληθώρα ερευνητών διαπίστωσε υποβιβασμό της διαπερατότητας των πετρωμάτων, έπειτα από την εμφάνιση των αργιλικών ορυκτών σε πολικά ρευστά.

Ο Byerlee^[45], παρατήρησε πως η ροή ύδατος σε πετρώματα του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα, προκάλεσε διόγκωση σε αργιλικά ορυκτά μοντοριλλονίτη και η κοκκομετρική διάταξη έγινε πολύ πυκνή κατά τη κοιτασματογένεση του ρήγματος. Σαν αποτέλεσμα το νερό συμπεριφερόταν σα μη νευτώνειο, πλαστικό. Δηλαδή αν και το νερό των πόρων βρισκόταν σε υδραυλική επικοινωνία με τα ύδατα των υπερκείμενων στρωμάτων, η ροή είχε διακοπεί επειδή η υδροστατική πίεση δε μπορούσε να υπερβεί την οριακή πίεση που απαιτείται για να προκληθεί ροή. Τα πειραματικά δεδομένα σε διάγραμμα παροχής συναρτήσει της υδραυλικής βαθμίδας, έδειξαν πως το νερό όταν συμπεριφέρεται σα πλαστικό ρευστό, η καμπύλη είναι μετατοπισμένη παράλληλα σε σχέση με το νευτώνειο και τέμνει τον άξονα της υδραυλικής βαθμίδας για μηδενική παροχή στην οριακή υδραυλική βαθμίδα, TG(threshold gradient). Άρα για μικρότερες υδραυλικές βαθμίδες η διαπερατότητα είναι μηδέν. Το πλαστικό ρευστό που βρίσκεται σε επαφή με τους πόρους, όταν ασκηθεί πίεση σε αυτό, οι διατμητικές τάσεις, λόγω τριβής, προκαλούν μείωση της παροχής και κατά συνέπεια της διαπερατότητας σε σύγκριση με τη ροή νευτώνειου ρευστού.



Εικόνα 3. 2: Διάγραμμα παροχής νευτώνειου και πλαστικού ρευστού συναρτήσει της υδραυλικής βαθμίδας.

Οι Tanikawa και Shimamoto ^[46], παρατήρησαν το παραπάνω φαινόμενο και σε πετρώματα με κατανομή μεγέθους πόρων 0,01-10 μm , όπου ο περισσότερος όγκος κενών κατανέμεται στους μεγαλύτερους πόρους, όπως και στο δοκίμιο της παρούσας διπλωματικής, αν και στο μεγαλύτερο τμήμα του πορώδους το νερό συμπεριφέρεται σαν νευτώνειο ρευστό. Οι ερευνητές δεν αναφέρουν την ύπαρξη αργιλικών ορυκτών. Παρόλα αυτά, εάν θεωρηθεί ιδανικό πορώδες μέσο ροής πλαστικού υγρού στο 100% του πορώδους του, υπάρχει ένα ζεύγος τιμών, η ακτίνα κυλινδρικών ομοιόμορφων τριχοειδών με τη διεύθυνση της ροής να πραγματοποιείται κάθετα της διατομής τους και η οριακή διατμητική τάση που ασκείται στην επιφάνεια επαφής των στρωμάτων που αποτελούν το ρευστό, ώστε να προκληθεί ροή, για τα οποία η ροή πλαστικού ρευστού προκαλεί την ίδια υδραυλική βαθμίδα σε πραγματικό πορώδες μέσο ίσης απόλυτης διαπερατότητας με αυτό. Οι διαπερατότητες του πλαστικού υγρού δεν είχαν τέλεια προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα, αλλά τα προσέγγιζαν ικανοποιητικά.

Το νερό σε στενούς πόρους αργιλικών ορυκτών (πετρώματος μπεντονίτη) παρουσιάζει ημικρυσταλλικές ιδιότητες ^[47], παρομοιάζοντας την ιδιότητα

των στερεών να απαιτούν ένα ελάχιστο φορτίο για να παραμορφωθούν, σε αντίθεση με τα νευτώνεια υγρά. Οι Miller και Low παρατήρησαν, πως όσο λιγότερη συγκέντρωση αργιλικών ορυκτών είχε το πέτρωμα, τόσο εγγύτερα ήταν η ροή στην νευτώνεια. Η οριακή υδραυλική βαθμίδα παρατηρήθηκε πως μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η οριακή υδραυλική βαθμίδα, επιβεβαιώνεται πειραματικά σε πόρους διαμέτρου 25-60 Å. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε ένα στρώμα νερού που λόγω της επαφής του με το αργιλικό τοίχωμα, παρουσιάζει πλαστική συμπεριφορά. Δηλαδή, απαιτείται μία οριακή τιμή της διατμητικής τάσης μεταξύ των γειτονικών στρωμάτων για να προκληθεί η ροή. Η διατμητική τάση μειώνεται με την αύξηση της απόστασης από το τοίχωμα του τριχοειδούς. Υπό σταθερή κατανομή μεγέθους των πόρων, όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση των περιεχόμενων αργιλικών ορυκτών τόσο πιο μικρό είναι το πάχος του στρώματος νερού και η οριακή υδραυλική βαθμίδα βαίνει αυξανόμενη. Σε χαμηλότερη πτώση πίεσης από την οριακή, απαιτούνται από ώρες έως ημέρες για να μηδενιστεί η ταχύτητα της ροής, σε αντίθεση με τη μείωση της πτώσης πίεσης, άνωθεν της οριακής της τιμής. Δε δίνεται τεκμηρίωση για αυτή τη συμπεριφορά της ροής. Να σημειωθεί ότι υπήρχαν δοκίμια για τα οποία η γραφική παράσταση της παροχής συναρτήσεως της υδραυλικής βαθμίδας, παρουσιάζει καμπυλότητα (απόκλιση από τη γραμμικότητα των πειραματικών σημείων). Αυτό σημαίνει πως η ροή σε αυτή την περίπτωση δε μπορεί να προσεγγιστεί ως ροή πλαστικού υγρού.

Αναλύθηκαν τα δεδομένα του Stearn^[48] για πετρώματα ψαμμίτη με διαφορετικές περιεκτικότητες βάρους (W/W %) σε αργιλικά πετρώματα (κοκκομετρικής κατανομής $< 5 \mu\text{m}$ μεγέθους πόρων), οι υδραυλικές βαθμίδες που προκύπτουν όταν η παροχή μάζας είναι μηδέν, $TG(\dot{m}=0)$ ή i' . Από τα 58 δεδομένα μόνο 4 σημεία είχαν σημαντική απόκλιση από το νόμο του Darcy και τα 3 εξ αυτών διέθεταν περιεκτικότητα μεγαλύτερη των 4% W/W σε αργιλικά ορυκτά. Τα σφάλματα των μετρήσεων εντός του $i' = \pm 0,06$, είναι τυχαία κατανομημένα και εκτός αυτού του διαστήματος παρατηρήθηκαν μόνο θετικές τιμές του i' . Εκ πρώτης όψεως, υποδεικνύεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα σε αργιλικά ορυκτά και η κατανομή μεγέθους πόρων δείχνει ύπαρξη στενών πόρων, το νερό παρουσιάζει πλαστική συμπεριφορά. Ο ερευνητής καταλήγει ότι ακόμα και αν δεν υπάρχει τέλεια προσαρμογή των δεδομένων αυτών στη ροή Buckingham-Reiner, τα πειραματικά σημεία προσεγγίζουν

ικανοποιητικά στις περισσότερες των περιπτώσεων τη ροή πλαστικού υγρού. Παρόλα αυτά, η χρήση της παραπάνω εξίσωσης πρέπει να γίνεται προσεχτικά. Έκτος από τη παρουσία αργιλικών ορυκτών, η συγκέντρωση των ηλεκτρολυτών στο νερό διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο για τη διαπερατότητα των πετρωμάτων (χρησιμοποιήθηκε μπεντονίτης). Αύξηση της περιεκτικότητας των αλάτων στο νερό, προκαλεί αύξηση της διαπερατότητας και αντίστροφα, η χρήση απιοντισμένου νερού προκαλεί απότομη πτώση της διαπερατότητας. Αυτό σημαίνει, πως κατά τη ροή λαμβάνει χώρα, ηλεκτροστατικού τύπου αλληλεπίδραση των μορίων της άλμης με τα τοιχώματα των αργίλων.

Η πιο γνωστή αιτία μείωσης της διαπερατότητας ευθύνεται στην ύπαρξη σμεκτιτών^[49] (π.χ μοντοριλλονίτης, νοντρονίτης, σαπονίτης) ανάμεσα στα αργιλικά πετρώματα. Οι άργιλοι αυτού του τύπου διογκώνονται όσο η συγκέντρωση των ηλεκτρολυτών βαίνει μειούμενη. Ο λόγος είναι ότι από την εσωτερική διεπιφάνεια προς το τοίχωμα των σμεκτιτών η συγκέντρωση των κατιόντων στο ιοντικό πλέγμα είναι μεγαλύτερο απ' ότι στην εξωτερική και η ενυδάτωση των κατιόντων στο πλέγμα προκαλεί τη διόγκωση των αργίλων. Οι πόροι μπορεί έως και να φράξουν εντελώς σε κάποιες περιπτώσεις. Η ύπαρξη διπλού στρώματος εκατέρωθεν του οποίου πραγματοποιείται ιοντοανταλλαγή, συναντάται και στα υπόλοιπα αργιλικά ορυκτά, αλλά δεν επιδρούν με τον ίδιο τρόπο και στις δύο περιπτώσεις. Στους σμεκτίτες τα ενυδατωμένα κατιόντα συμμετέχουν στο εσωτερικό του πλέγματος, ενώ στα υπόλοιπα αργιλικά ορυκτά βρίσκονται στα τοιχώματα των αργιλικών σωματιδίων. Και στις δύο περιπτώσεις προκαλείται πτώση της διαπερατότητας, οπότε πρέπει να μελετηθούν ξεχωριστά. Η διαφορά στην έλλειψη σμεκτιτών έγκειται στη μετανάστευση αργιλικών σωματιδίων και φράξιμο των στενότερων πόρων κατά μήκος της ροής.

Η θεωρία του διπλού στρώματος^[50] υποστηρίζει την ύπαρξη μίας διεπιφάνειας που διαχωρίζει τα δύο στρώματα με βάση την ηλεκτροστατική ισορροπία που προκαλεί η εμβάπτιση των αργιλικών ορυκτών σε πολικό διάλυμα, λόγω της ιοντοανταλλαγής με τα ιόντα των αργιλικών σωματιδίων. Το ιοντικό πλέγμα των ξηρών αργιλικών ορυκτών παρουσιάζουν μία ασθενή έλξη τύπου Van der Waals, μεταξύ των αργιλικών σωματιδίων με αρνητικό φορτίο (ανιόντα) και των κατιόντων τους. Όταν βυθίζονται στο νερό ή σε άλλους πολικούς διαλύτες, τα

κατιόντα αποδεσμεύονται από τους κρυστάλλους, για να σχηματίσουν ένα διπλό στρώμα σε επαφή με το τοίχωμα. Επίσης, πραγματοποιείται ανταλλαγή κατιόντων και εισροή ανιόντων στο εσωτερικό στρώμα, αλλά ποτέ δεν εκρέουν στο εξωτερικό. Το εσωτερικό στρώμα αποτελείται από κατιόντα και ανιόντα του πολικού διαλύματος και το επίπεδο Stern, που απέχει από το τοίχωμα περίπου όσο η ακτίνα των ενυδατωμένων κατιόντων. Ακολουθεί το εξωτερικό στρώμα, όπου τα ιόντα είναι διάχυτα και η συγκέντρωση των κατιόντων μειώνεται όσο η απόσταση από το τοίχωμα αυξάνεται. Το πάχος του εσωτερικού στρώματος είναι αντιστρόφως ανάλογο του αριθμού οξείδωσης και της συγκέντρωσης των κατιόντων στην επιφάνεια των αργιλικών σωματιδίων (ιοντικό σθένος).

Οι Lever και Dawe^[49] για κατανομή μεγέθους πόρων $\leq 100 \mu\text{m}$, η διαπερατότητα ήταν υψηλή και η σύσταση της άλμης δε την επηρέαζε. Όμως για κατανομή μεγέθους πόρων $\leq 5 \mu\text{m}$, παρατηρήθηκε μετανάστευση και θρόμβωση των πόρων από αργιλικά σωματίδια. Υπό υψηλή πίεση, το φράξιμο μπορεί να αναστραφεί, αλλά ελάχιστα. Η διαπερατότητα μπορεί να λάβει τη μέγιστη δυνατή τιμή, αλλά θα έχει μειωθεί δραματικά από την αρχή του πειράματος. Για τεχνητά δοκίμια ($10\text{--}50 \mu\text{m}$), μικροσκόπια μπορούν να καταγράψουν τη μετανάστευση των αργιλικών σωματιδίων. Σε πραγματικούς αργιλικούς ψαμμίτες ($\leq 5 \mu\text{m}$), διαπιστώθηκε με ορυκτολογική ανάλυση. Η εξήγηση του φαινομένου αυτού έχει σχέση με το ιοντικό σθένος των ηλεκτρολυτών του νερού. Υψηλότερο ιοντικό σθένος, σημαίνει ότι το εσωτερικό στρώμα θα είναι σχετικά συμπιεσμένο και εγγύτερα του τοιχώματος. Υπό αυτές τις συνθήκες, οι ελκυστικές δυνάμεις van der Waals υπερσχύουν των απωστικών ανάμεσα στα κατιόντα και τα αργιλικά σωματίδια βρίσκονται κολλημένα σε κοντινή απόσταση. Όταν το ιοντικό σθένος είναι μικρό, το εσωτερικό στρώμα διαστέλλεται και οι απωστικές δυνάμεις μεταξύ των κατιόντων υπερσχύουν των ελκτικών. Η διαστολή του στρώματος προκαλεί την αποκόλληση και μετανάστευση των αργιλικών σωματιδίων μέχρι να φράξουν στη συνέχεια πόρους που θα συναντήσουν στην εκροή. Το αποτέλεσμα είναι να μειωθεί δραματικά η διαπερατότητα του πετρώματος. Σε προγενέστερες δοκιμές τους^[51], σε πετρώματα που περιείχαν ίχνη αργιλικών ορυκτών, παρατηρήθηκε μετανάστευση σωματιδίων, που δεν ήταν μόνο αργιλικά (μικρή ποσότητα). Αυτό υποδεικνύει ότι είναι πιθανό να συμμετέχουν και άλλα ορυκτά στην αλληλεπίδραση με τα πολικά μόρια (άλμη). Επιπλέον, η χρήση δισθενών

κατιόντων στα διαλελυμένα ιόντα του νερού, παραδόξως δεν οδήγησε στην αύξηση της διαπερατότητας, ενώ τα μονοσθενή κατιόντα το επιτύγγαναν. Πολλοί ερευνητές έχουν τα αντίστροφα αποτελέσματα. Αυτό σημαίνει πως υπάρχουν κενά στη θεωρία του διπλού στρώματος.

Η θεωρία του διπλού στρώματος, ελέγχθηκε μέσω της σύγκρισης της διαπερατότητας ρωγματομένου, πλούσιο σε αργιλικά ορυκτά, πετρώματος^[52] σε νερό και ιδανικό αέριο (Ar). Η διαπερατότητα σε αέριο για διαφορετικές πιέσεις υπερκειμένων, ήταν τουλάχιστον 1 τάξη μεγέθους μεγαλύτερη απ' ότι σε νερό. Το Ar είναι ένα αδρανές αέριο, ενώ το νερό είναι ένα πολικό μόριο και τα ιόντα που εμπεριέχει έχουν επίσης ηλεκτρικό φορτίο. Ελέγχθηκε η συγκέντρωση των κατιόντων του νερού πριν και μετά την ηλεκτροστατική αλληλεπίδραση των αργιλικών μορίων με την άλμη, με τη μέθοδο της φασματομετρίας ατομικής απορρόφησης. Η γραμμομοριακή συγκέντρωση των κατιόντων στο νερό των πόρων, ήταν περίπου κατά 5 M μεγαλύτερη, σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε πριν την τροφοδοσία. Διαπίστωσε επίσης πως απαιτείται υψηλότερη πτώση πίεσης, ώστε να υπάρξει ροή στους μικρότερους πόρους. Σε αντίθεση με τους μεγάλους πόρους που το διπλό στρώμα διαμορφώνεται με βάση τις ελκτικές και απωστικές δυνάμεις, όπως προαναφέρθηκε, όσο μικρότερη είναι η διάμετρος των πόρων, οι απωστικές δυνάμεις μεταξύ των κατιόντων των εσωτερικών στρωμάτων υπερσχύουν και το εξωτερικό στρώμα νερού ακινητοποιείται. Πειραματικά επιβεβαιώθηκε πως ένα στρώμα ενυδατωμένων κατιόντων (πάχους της διαμέτρου του μορίου του νερού), απαιτεί να δαπανηθεί υψηλότερη ενέργεια για να απομακρυνθεί, όσο η διάμετρος των τριχοειδών βαίνει μειούμενη. Με βάση την κατανομή μεγέθους πόρων στα δείγματα, όσο στενότεροι πόροι συναντά η ροή, το νερό αποκτά ημικρυσταλλικές ιδιότητες, λόγω της δημιουργίας του διπλού στρώματος, όπως είχαν προτείνει οι Miller και Low. Το φαινόμενο γίνεται εντονότερο με τη μείωση της συγκέντρωσης των ηλεκτρολυτών. Ο συγκεκριμένος ερευνητής αν και υπολόγισε την ιοντοανταλλαγή και διαπίστωσε την ύπαρξη διπλού στρώματος, υποστηρίζει πως ο νόμος του Darcy έχει ισχύ για ροή δια μέσου πολύ στενών πόρων. Πιστεύει πως ευθύνεται το μικρό πορώδες και μέγεθος των κόκκων, που τα φυλλοπυρητικά ορυκτά είναι τόσο καλά κατανεμημένα στο πέτρωμα που η διόγκωση του εσωτερικού στρώματος μειώνει αμελητέα τη διαπερατότητα του πετρώματος. Δεν τεκμηριώνει περεταίρω την υπόθεση

αυτή. Δεν εξέτασε την ύπαρξη των ρωγμών, ως μέσο διέλευσης του νερού σε μεγάλα διάκενα.

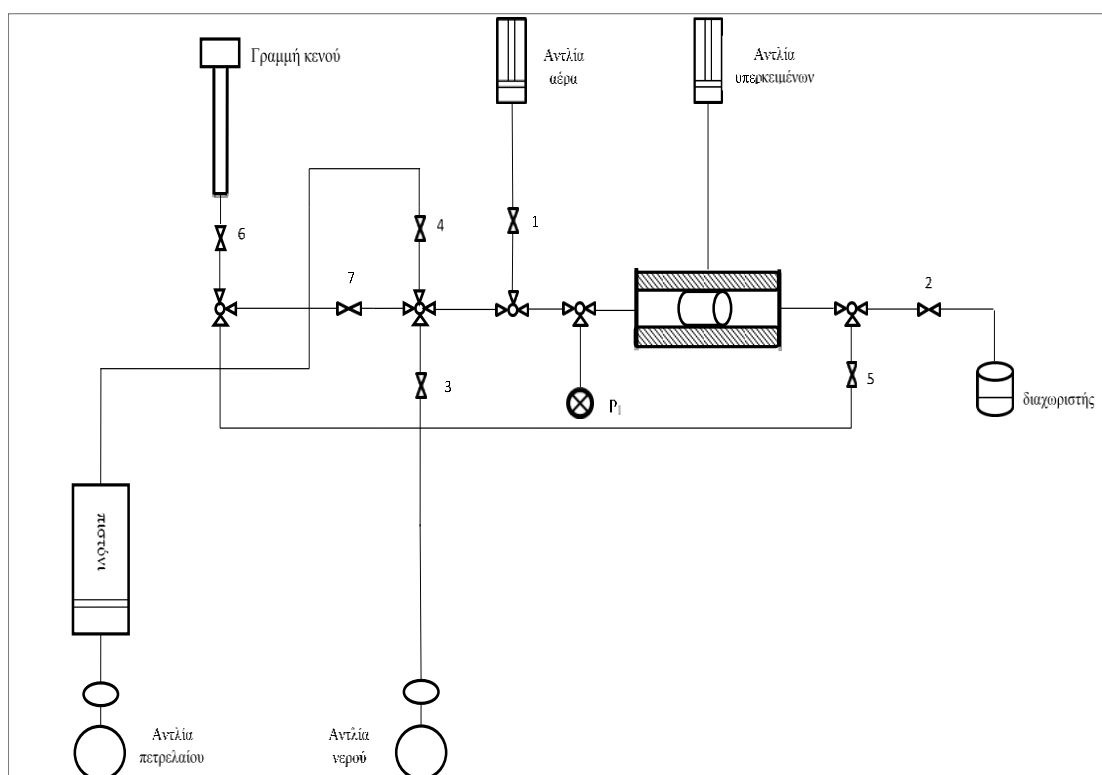
Μεγάλη σημασία έχει επίσης, η διερεύνηση του βαθμού πολικότητας του ρευστού που διαρρέει, το πορώδες μέσο και η μακροσκοπική ανάλυση του φαινομένου του διπλού στρώματος^[53]. Τα μη πολικά μόρια, είχαν παρόμοια διαπερατότητα με τα αέρια, εκτός της βενζίνης. Μικρής πολικότητας μόρια όπως οι αλκοόλες και μεγαλύτερης, όπως το νερό, μείωναν τη διαπερατότητα των δοκιμίων, με βάση το βαθμό πολικότητας των μορίων. Ακόμα και ίχνη αργίλων μπορούσαν να προκαλέσουν ραγδαία πτώση της διαπερατότητας. Οι ερευνητές παρατήρησαν επίσης, ότι το εσωτερικό στρώμα των νατριούχων αργιλικών ορυκτών ήταν μεγαλύτερο από των ασβεστούχων. Ο μεγαλύτερος αριθμός οξείδωσης των αλκαλικών γαιών από των αλκαλίων επιβεβαίωσε τη θεωρία του διπλού στρώματος, σε αντίθεση με την παραδοξότητα που κατέληξαν οι Lever και Dawe, για τα κατιόντα των ηλεκτρολυτών του νερού. Η μακροσκοπική περιγραφή της ανάπτυξης διεπιφάνειας ανάμεσα στα δύο στρώματα περιγράφεται μέσω του ωσμωτικού φαινομένου. Η εμβάπτιση των αργιλικών ορυκτών στο νερό προκαλεί τη μεταξύ τους ιοντοανταλλαγή. Η διάχυση των ανιόντων, πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή, σε σχέση με των κατιόντων, ώστε η διαπερατότητα να είναι η μέγιστη δυνατή. Τα αργιλικά σωματίδια περιβάλλονται από μία ημιδιαπερατή μεμβράνη, η οποία είναι αδιαπέρατη για τα ανιόντα του εσωτερικού στρώματος προς το εξωτερικό αλλά διαπερατή για τα κατιόντα. Η μεμβράνη είναι διαπερατή για τα κατιόντα και τα ανιόντα από το εξωτερικό προς το εσωτερικό στρώμα. Η ωσμωτική ισορροπία της ημιδιαπερατής μεμβράνης, ονομάζεται ισορροπία Donnan^[54]. Η συγκέντρωση των κατιόντων στο εσωτερικό της μεμβράνης πρέπει να είναι ίσο με το εξωτερικό. Η συγκέντρωση των κατιόντων στο εσωτερικό της μεμβράνης, καθορίζεται από το ιοντικό σθένος των ανιόντων. Εάν η συγκέντρωση των κατιόντων στο εξωτερικό τμήμα της μεμβράνης, είναι χαμηλότερο από αυτή των γειτονικών κατιόντων, των αργιλικών σωματιδίων, τότε τα ανιόντα του εσωτερικού τμήματος, πρέπει αντίστοιχα να έχουν χαμηλότερη συγκέντρωση από του εξωτερικού. Άρα χαμηλή συγκέντρωση ηλεκτρολυτών στο νερό προκαλεί διαστολή του εσωτερικού στρώματος και αντίθετα υψηλή συγκέντρωση προκαλεί τη συστολή του. Η προσρόφηση του νερού στην αργιλική επιφάνεια συνδέεται με την ηλεκτραρνητικότητα των σωματιδίων αυτών και το

βαθμό απομάκρυνσης και δέσμευσης των κατιόντων από την επιφάνειά της.

Μείωση της απόλυτης διαπερατότητας διαπιστώθηκε σε ψαμμίτη τύπου Berea ^[55] (όπως και στη παρούσα διπλωματική), λόγω της μετανάστευσης αργιλικών σωματιδίων που προκαλεί η ροή της άλμης στους μικρούς πόρους. Η αύξηση του ιοντικού σθένους των ηλεκτρολυτών της άλμης μπορεί έως και να εξαλείψει το φαινόμενο του διπλού στρώματος.

Κεφάλαιο 4: Ανάπτυξη πειραματικής μεθοδολογίας μέτρησης σχετικών διαπερατοτήτων υπό σταθερή ροή

4.1. Σχεδιασμός της μεθόδου Single-sample Dynamic



Εικόνα 4. 1: Πειραματικό σχεδιάγραμμα της Single-sample Dynamic.

Χρησιμοποιήθηκαν σύνδεσμοι-σωληνώσεις μεταξύ των οργάνων για την υδραυλική επικοινωνία των ρευστών. Παρακάτω αναγράφονται οι κατηγορίες συνδέσμων που χρησιμοποιήθηκαν με βάση τις μέγιστες τιμές αντοχής σε πίεση (P_{\max}) και θερμοκρασία (T_{\max}):

	Nova Swiss	Autoclave	Swagelok
P_{\max} (bar)	1.000	1.035	720
T_{\max} (°C)	200	-	204

Πίνακας 4. 1: Προδιαγραφές σωληνώσεων

Οι βαλβίδες έχουν ως σκοπό την απομόνωση τμημάτων της συνδεσμολογίας ή τη μείωση της παροχής των ρευστών. Στη συνέχεια θα αναφερθούν οι κατηγορίες βαλβίδων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι μέγιστες τιμές αντοχής σε πίεση (P_{\max}) και θερμοκρασία (T_{\max}):

	Autoclave engineers				Nova Swiss	
Μοντέλο	10V2075		BTV2F2P4		SN989	SN4793
P_{\max} (psia)	15.000	14.385	10.000	9.600	1.000	1.000
T_{\max} (°C)	65	149	65	149	-	-

Πίνακας 4. 2: Προδιαγραφές βαλβίδων

Το δοκίμιο ζυγίζεται πριν τοποθετηθεί στη διάταξη. Όλες οι βαλβίδες είναι κλειστές. Ανοίγει η βαλβίδα 1 και 2 (σχήμα 4.1). Στην αντλία του αέρα, υπάρχει ρυθμιστής πίεσης. Ένα παροχόμετρο αέρα τοποθετείται αντί του διαχωριστή. Δεδομένης της υδραυλικής βαθμίδας του πυρήνα, μετράτε η παροχή στο κλάδο μετά τη βαλβίδα 2, για να υπολογιστεί η διαπερατότητα του δοκιμίου σε αέρα. Κλείνει η βαλβίδα 1 και 2 και επιστρέφει ο διαχωριστής στη θέση του παραπάνω σχήματος, διότι το παροχόμετρο του αέρα δε πρέπει να έρθει σε επαφή με υγρά.

Ανοίγονται οι άνω και κάτω βαλβίδες του πιστονιού του νερού, ενώ η αντλία με μικρές παροχές νερού, εξαναγκάζει να απομακρυνθεί ο αέρας από το πιστόνι. Κλείνουν οι άνω βαλβίδες των πιστονιών.

Ανοίγουν οι βαλβίδες 4,7 και 6. Όταν στη γραμμή κενού φανεί πετρέλαιο, έχει φτάσει έως τη βαλβίδα 4. Κλείνει η βαλβίδα 4 και ανοίγει η 3. Η παροχή πόσιμου νερού (παρουσία ηλεκτρολυτών), έγινε μέσω πιστονιού, που βρισκόταν ανάμεσα στην αντλία νερού και τη βαλβίδα 3. Ο αέρας του πιστονιού αυτού απομακρύνεται με τον τρόπο που αναφέρθηκε προηγουμένως. Η παροχή απιοντισμένου νερού έγινε απουσία του πιστονιού. Η γραμμή κενού απορροφά πετρέλαιο και νερό. Όταν απορροφά μόνο νερό κλείνει η βαλβίδα 3 και μέχρι εκεί έχει φθάσει το νερό. Συνεχίζει η γραμμή κενού μέχρι να απορροφήσει το εναπομένον νερό. Κλείνει η βαλβίδα 6 και 7.

Ανοίγουν οι βαλβίδες 3,5 και 6. Ρυθμίζεται η παροχή της αντλίας. Το πιστόνι μετατοπίζει το νερό προς το δοκίμιο και ταυτόχρονα η γραμμή κενού, λόγω υποπίεσης, υποβοηθά το κορεσμό του πυρήνα. Παρατηρείται στη γραμμή κενού ότι απομακρύνεται και ατμός μαζί με το νερό. Επιδιώκεται να εκτοπίσει ο ατμός τον αέρα στο φραγμένο πορώδες του

δοκιμίου, ώστε να διαλυθεί στο ακόρεστο νερό και έπειτα να απομακρυνθεί μέσω της γραμμής του κενού. Κλείνει η 5, όταν η γραμμή νερού απομακρύνει νερό και ατμό για αρκετό χρονικό διάστημα, κλείνει επίσης και η βαλβίδα 6.

Η βαλβίδα 2 μπορεί πλέον να ανοίξει, ειδικά εάν είχε ανοίξει μαζί με τη 3 προηγουμένως θα είχε περάσει αέρας στο δοκίμιο. Όταν η μανομετρική πίεση έχει σταθεροποιηθεί, η διαπερατότητα σε νερό έχει επίσης σταθεροποιηθεί και ο πυρήνας έχει κορεστεί πλήρως. Κλείνει η βαλβίδα 3 και 2.

Ο πυρήνας ζυγίζεται, τοποθετείται στο φούρνο για τουλάχιστον 1 hr, μέχρι να επιστραφεί στη διάταξη. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1-6.

Ανοίγει η βαλβίδα 4 και 2, η αντλία πετρελαίου ρυθμίζει τη παροχή του πιστονιού. Μόλις στο διαχωριστή συλλεχθεί μόνο πετρέλαιο και το νερό είναι στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού, καταχωρείται η πίεση του μανομέτρου, αφού σταθεροποιηθεί. Το δοκίμιο ζυγίζεται. Συγκρίνονται οι τρεις διαπερατότητες και επιλέγεται μία εξ αυτών ως διαπερατότητα βάσης, για τις σχετικές διαπερατότητες νερού και πετρελαίου σε διφασική ροή που ακολουθεί.

Αφού επαναληφθούν τα βήματα 1-6, το δοκίμιο ξηραίνεται. Στη συνέχεια, ανοίγουν οι βαλβίδες 3,4 και 2 για διαφορετικό λόγο παροχών, τρεις φορές. Καταχωρούνται οι σταθεροποιημένες μανομετρικές πιέσεις και ζυγίζεται το δοκίμιο. Ανάμεσα σε κάθε μέτρηση μεσολαβεί επανάληψη των βημάτων 1-6 και ξήρανση του δοκιμίου. Κλείνει η βαλβίδα 4.

Ανοίγει η βαλβίδα 3. Ρυθμίζεται η παροχή του νερού. Όταν η πίεση σταθεροποιηθεί στο διαχωριστή συλλέγεται μόνο νερό και το πετρέλαιο βρίσκεται στον υπολειμματικό βαθμό κορεσμού. Τέλος, ο πυρήνας ζυγίζεται.

Οι πειραματικές μετρήσεις δεν έγιναν, μόνο παρουσία των διατάξεων που απεικονίζονται στο σχήμα 4.1. Προτιμήθηκε, για λόγους απλούστευσης, το σχήμα να περιέχει τη τελική μορφή της συνδεσμολογίας προς διενέργεια μετρήσεων των σχετικών διαπερατοτήτων νερού-πετρελαίου.

Όταν το δείγμα είναι κορεσμένο σε νερό:

$$PV = \frac{m_{rf} - m_r}{\rho_w} \quad (4.1)$$

$$BV = \pi r^2 L \quad (4.2)$$

$$\Phi = \frac{PV}{BV} \quad (4.3)$$

PV : όγκος κενών (m^3).

BV : φαινόμενος όγκος δοκιμίου (m^3).

Φ : πορώδες (%).

ρ_w : πυκνότητα νερού (kg/m^3).

m_{rf} : μάζα πετρώματος και νερό (kg).

m_r : μάζα πετρώματος (kg).

r : ακτίνα διατομής (m).

L : πάχος δοκιμίου (m).

Αρχικά υπολογίζεται ο μη περαιτέρω μειώσιμος βαθμός κορεσμού σε νερό:

$$m_{rf} = m_r + S_{wi}PV\rho_w + (1 - S_{wi})PV\rho_o \quad (4.4)$$

$$S_{wi} = \frac{m_{rf} - m_r - PV\rho_o}{PV(\rho_w - \rho_o)} \quad (4.5)$$

ρ_o : πυκνότητα πετρελαίου (kg/m^3).

S_{wi} : μη περαιτέρω μειώσιμος βαθμός κορεσμού σε νερό.

Παρομοίως $S_{w1...wn}$, αντιστοιχούν στους βαθμούς κορεσμού σε νερό που είναι υψηλότεροι του S_{wi} και μικρότεροι του $1 - S_{or}$. Οι βαθμοί κορεσμού υπολογίζονται με τον παραπάνω τρόπο.

S_{or} : υπολειμματικός βαθμός κορεσμού σε πετρέλαιο.

Πρώτο τελικό σημείο των σχετικών διαπερατοτήτων:

$$K_r = \frac{K_e}{K_b} \quad (4.6)$$

K_b : διαπερατότητα βάσης (m^2)

K_e : ενεργή διαπερατότητα ρευστής φάσης (m^2)

$$K_{eo@S_{wi}} = \frac{q_o \mu_o L}{A \Delta P} \quad (4.7)$$

$$K_{ew@S_{wi}} = 0 \quad m^2 \quad (4.8)$$

$$K_{ro@S_{wi}} = \frac{K_{eo@S_{wi}}}{K_b} = 1 \quad (4.9)$$

$$K_{rw@S_{wi}} = \frac{K_{ew@S_{wi}}}{K_b} = 0 \quad (4.10)$$

K_{eo} : ενεργή διαπερατότητα πετρελαίου (m^2)

K_{ew} : ενεργή διαπερατότητα νερού (m^2)

K_{ro} : σχετική διαπερατότητα πετρελαίου

K_{rw} : σχετική διαπερατότητα νερού

q_o : παροχή πετρελαίου (m^3/sec)

μ_o : δυναμικό ιξώδες πετρελαίου (Pa·sec)

A : εμβαδόν διατομής (m^2)

ΔP : πτώση πίεσης της ροής (Pa)

Ενδιάμεσα σημεία σχετικών διαπερατοτήτων:

$$K_{eo@S_{wn}} = \frac{q_o \mu_o L}{A \Delta P} \quad (4.11)$$

$$K_{ew@S_{wn}} = \frac{q_w \mu_w L}{A \Delta P} \quad (4.12)$$

$$K_{ro@S_{wn}} = \frac{K_{eo@S_{wn}}}{K_b} \quad (4.13)$$

$$K_{rw@S_{wn}} = \frac{K_{ew@S_{wn}}}{K_b} \quad (4.14)$$

q_w : παροχή νερού (m^3/sec)

μ_w : δυναμικό ιξώδες νερού ($Pa \cdot sec$)

Δεύτερο τελικό σημείο σχετικών διαπερατοτήτων:

$$K_{eo@1-S_{or}} = 0 \text{ } m^2 \quad (4.15)$$

$$K_{ew@1-S_{or}} = \frac{q_w \mu_w L}{A \Delta P} \quad (4.16)$$

$$K_{ro@1-S_{or}} = \frac{K_{eo@1-S_{or}}}{K_b} = 0 \quad (4.17)$$

$$K_{rw@1-S_{or}} = \frac{K_{ew@1-S_{or}}}{K_b} \quad (4.18)$$

Η πτώση πίεσης για κάθε φάση μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ίσες αν οι τριχοειδείς πιέσεις στην εκροή είναι αμελητέες. Τέλος, σχεδιάζεται η καμπύλη σχετικών διαπερατοτήτων των δύο ρευστών συναρτήσει του βαθμού κορεσμού σε νερό.

4.2. Διαπερατότητα βάσης

Όσον αφορά την απόλυτη διαπερατότητα του νερού και του αερίου, θα έπρεπε να ταυτίζονται, γιατί εξαρτώνται μόνο από τη γεωμετρία των πόρων. Στην πραγματικότητα όμως λόγω ηλεκτροστατικών αλληλεπιδράσεων του νερού με τα αργιλικά σωματίδια, η απόλυτη διαπερατότητα του νερού θα είναι μικρότερη από του αερίου, που δεν αλληλοεπιδρά ηλεκτροστατικά με τα τοιχώματα των πόρων. Η θεωρητική διαπερατότητα βάσης, είναι η απόλυτη διαπερατότητα του πετρώματος, καθώς η φάση με την οποία διενεργείται η μέτρηση, καταλαμβάνει πλήρως το πορώδες. Η διαπερατότητα βάσης που θα χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό των σχετικών διαπερατοτήτων είναι η ενεργός διαπερατότητα της μη διαβρέχουσας φάσης στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού της διαβρέχουσας. Αποτελεί πρακτικά τη καλύτερη επιλογή για

διαπερατότητα βάσης, καθώς η μέγιστη ενεργή διαπερατότητα της μη διαβρέχουσας φάσης δε καταλαμβάνει το σύνολο των πόρων. Δηλαδή, η ενεργός διαπερατότητα του πετρελαίου στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό είναι η καλύτερη επιλογή για διαπερατότητα βάσης, επειδή σε ένα υδατοδιαβρεχτό πέτρωμα, θα είναι και η μέγιστη ενεργός διαπερατότητα.

4.2.1. Απόλυτη διαπερατότητα σε αέριο

Η πτώση πίεσης κατά τη μονοφασική ροή αερίου μετρήθηκε με διαφορικό μανόμετρο (3051CD differential pressure transmitter) της Rosemount Inc. Το όργανο έχει ανώτατο όριο πίεσης τα 2.000 psi και διακριτική ικανότητα $\pm 0,1$ psi. Το διαφορικό μανόμετρο υπολογίζει πτώση πίεσης, άρα χρειάζεται να συνδεθεί με δύο σημεία. Το δεύτερο αφέθηκε ασύνδετο αφενός γιατί η πίεση στην εκροή ισοδυναμεί με 1 atm και αφετέρου γιατί το παροχόμετρο συνδέθηκε στην εκροή της διάταξης. Το παροχόμετρο, ADM 1000 Universal Gas Flowmeter από την Agilent technologies, έχει μέγιστο όριο 1000 ml/min. Μέχρι τα 100 ml/min, η διακριτότητα είναι 0.1 ml/min και για τις υπόλοιπες παροχές 1 ml/min. Η πίεση των υπερκειμένων ασκήθηκε με υδραυλική αντλία λαδιού, PMS 25 της Casappa. Το ανώτατο όριο λειτουργίας της είναι 300 bar. Η πίεση υπερκειμένων ρυθμίζεται στα 60 bar. Το δοκίμιο έχει μήκος 4,751 cm και διάμετρο 2.543 cm.

Από τη σχέση 4.20, υπολογίζεται η διαπερατότητα του αέρα $K_{air}(mD)$. Το δυναμικό ιξώδες του ξηρού αέρα στους 25°C είναι $\mu_{air} = 0,01844$ cP. Από τη γραμμική σχέση της διαπερατότητας του αέρα με την αντίστροφη μέση πίεση, $1/P_{avg}$ (1/atm) (Παράρτημα A.5), με τη χρήση των ελαχίστων τετραγώνων θα υπολογιστεί η διαπερατότητα σε νευτώνεια υγρά^[56] (διορθωμένη διαπερατότητα κατά Klinkenberg), $K_l(mD)$ από τη σχέση 4.19, υπό τη μέγιστη πίεση, $\lim_{P_{avg} \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{P_{avg}} \right) = 0$ και η σταθερά ολίσθησης του αέρα, $b(atm)$.

$$K_{air} = K_l \left(1 + \frac{b}{P_{avg}} \right) \quad (4.19)$$

$$Q_2 = \frac{K_{air} A}{2000 \mu_{air} l} \frac{(P_1^2 - P_2^2)}{P_2} \quad (4.20)$$

$$P_{avg} = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (4.21)$$

$Q_2 (ml/s)$: Παροχή αέρα στην εκροή.

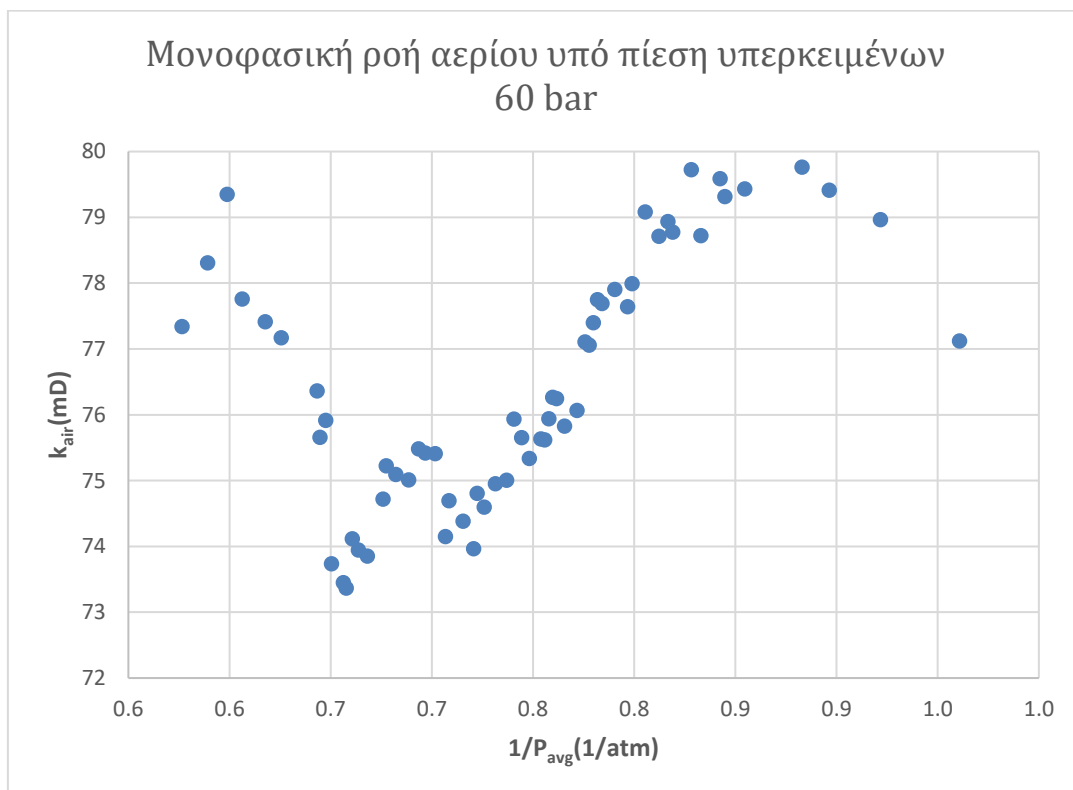
$P_1 (atm)$: Πίεσης εισροής.

$P_2 (atm)$: Πίεση εκροής.

$P_{avg} (atm)$: Μέση πίεση ανάμεσα στην εισροή και την εκροή.

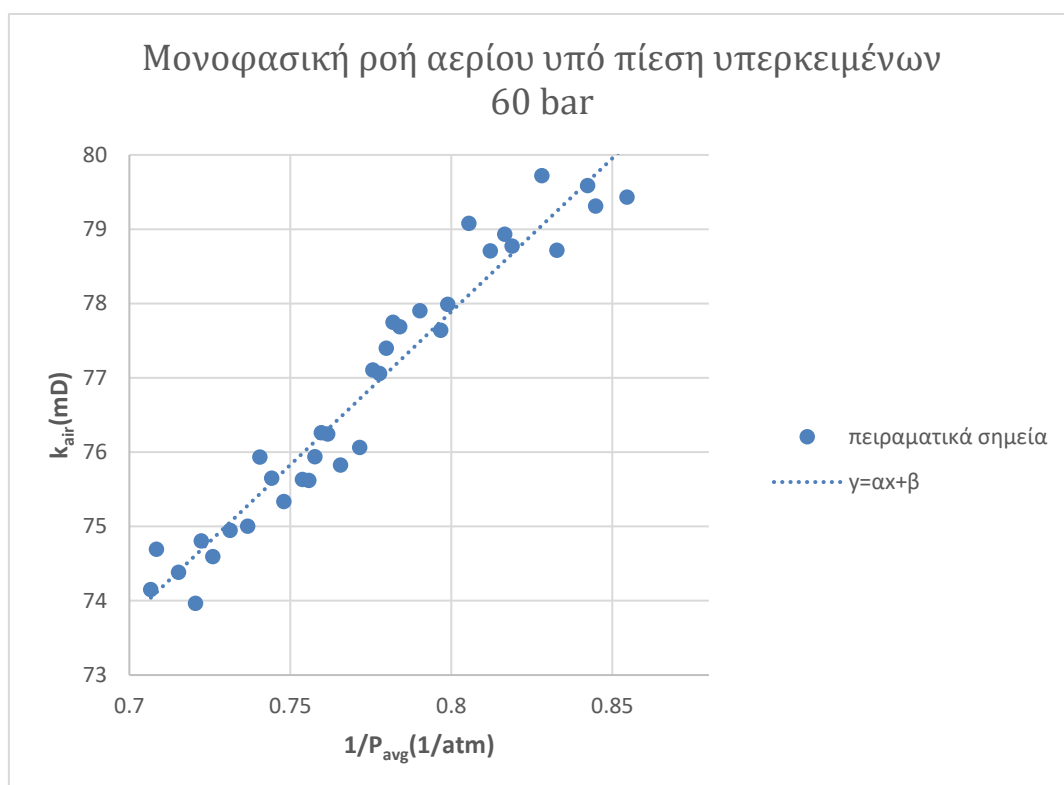
$A (cm^2)$: Εμβαδόν κάθετης διατομής στη διεύθυνση της ροής.

$l (cm)$: μήκος του δοκιμίου κατά τη διεύθυνση της ροής.



Διάγραμμα 4. 1: Διαπερατότητα αέρα συναρτήσει της αντίστροφης μέσης πίεσης σε δοκίμιο υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.

Από το διάγραμμα 4.1, φαίνεται πως όσο αυξάνεται η αντίστροφη μέση πίεση, τα δεδομένα έχουν υψηλότερες διακυμάνσεις από τη μέση τιμή των πειραματικών σημείων, δηλαδή δεν έχουν γραμμική σχέση. Τα σημεία αυτά αντιστοιχούν σε παροχές 22,8-83,4 ml/min. Έχει παρατηρηθεί και σε άλλα πειράματα ότι όσο μικρότερη είναι η παροχή, τόσο μεγαλύτερο χρόνο χρειάζεται το σύστημα για να ισορροπήσει [46]. Στη συνέχεια αυξανόμενης της παροχής παρατηρήθηκε πως τα πειραματικά σημεία είχαν γραμμική σχέση (83,4-318 ml/min). Παροχές στην περιοχή των 318-424 ml/min, παρατηρήθηκε, ότι είχαν γραμμική σχέση αλλά είχαν μετατοπιστεί από τα προηγούμενα. Η διαπερατότητα του αέρα προκύπτει από το νόμο του Darcy, άρα όσο η παροχή αυξάνεται πάνω από τα 318 ml/min, τα πειραματικά σημεία θα αρχίσουν να αποκλίνουν από τη γραμμικότητα με αυξανόμενο ρυθμό, διότι η πίεση στην εισροή δε θα είναι όσο μικρή απαιτείται ώστε να προσεγγιστεί η ροή του αερίου ως ασυμπίεστη. Λαμβάνοντας υπόψιν τα σημεία (n=36), που περιγράφουν την εξίσωση 4.19:



Διάγραμμα 4. 2: Γραμμική προσαρμογή δεδομένων διαπερατότητας του αέρα συναρτήσει της αντίστροφης μέσης πίεσης σε δοκίμιο, υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.

Έστω η συνάρτηση y , η εξίσωση της γραμμικής παλινδρόμησης, που περιγράφει τα πειραματικά σημεία:

$$y = \alpha x + \beta \quad (4.22)$$

Οι τιμές των παραμέτρων:

$$\alpha = 41,2 \text{ atm} \cdot \text{mD} \quad \beta = 44,9 \text{ mD}$$

Οι τυπικές αποκλίσεις των παραμέτρων:

$$\sigma_{\alpha} = 1,65 \text{ atm} \cdot \text{mD} \quad \text{και} \quad \sigma_{\beta} = 1,28 \text{ mD}$$

Η τυπική απόκλιση του σφάλματος εκτίμησης της διαπερατότητας σε αέρα:

$$\sigma = 0,426 \text{ mD}$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού:

$$R^2 = 0,949$$

$$K_{air} = 41,2 \frac{1}{P_{avg}} + 44,9 \quad (4.23)$$

Από τις σχέσεις 4.19 και 4.23 υπολογίζεται η διαπερατότητα σε νευτώνεια υγρά και η σταθερά ολίσθησης του αέρα:

$$K_l = 44,9 \pm 1,28 \text{ mD}$$

$$b = \frac{41,2 \pm 1,7}{44,9 \pm 1,3} \text{ atm}$$

$$b_{max} = \frac{41,2 + 1,7}{44,9 - 1,3} = 0,984 \text{ atm}$$

$$b_{min} = \frac{41,2 - 1,7}{44,9 + 1,3} = 0,858 \text{ atm}$$

Έστω $\bar{b}(\text{atm})$ η μέση τιμή της μέγιστης και ελάχιστης τιμής της σταθεράς ολίσθησης του αέρα:

$$\bar{b} = \frac{0,984 + 0,858}{2} = 0,921 \text{ atm}$$

$$b = \bar{b} \pm (\bar{b} - b_{min}) \quad \text{ή} \quad b = \bar{b} \pm (b_{max} - \bar{b}) \quad (4.24)$$

$$b = 0.921 \pm 0.063 \text{ atm}$$

Η διορθωμένη διαπερατότητα κατά Klinkenberg είναι υπερεκτιμημένη σε σχέση με τη μέγιστη διαπερατότητα του δοκιμίου σε νερό. Ο Klinkenberg^[56] θεώρησε πως η βαθμίδα της ταχύτητας της κάθετης απόστασης από το τοίχωμα (dw/dz), είναι σταθερή στο στρώμα εκείνο που παρατηρείται το φαινόμενο ολίσθησης των μορίων με το τοίχωμα. Όπως αναφέρει και ο ίδιος για τους Kundt και Warburg είχαν δείξει πως η βαθμίδα της ταχύτητας δεν είναι σταθερή, αλλά είναι μεγαλύτερη κοντά στο τοίχωμα απ' ότι σε μεγαλύτερη απόσταση από αυτό. Ο Klinkenberg θεώρησε ότι η βαθμίδα της ταχύτητας θα μεταβάλλεται αμελητέα σε ένα στρώμα που είναι μικρότερο της μέσης ελεύθερης διαδρομής (mean free path) των μορίων του αερίου και με την τελευταία να είναι αμελητέα σε σχέση με την ακτίνα τους τριχοειδούς. Ως μέση ελεύθερη διαδρομή ορίζεται η μέση ανεμπόδιστη τροχιά των σωματιδίων μεταξύ διαδοχικών κρούσεων. Μεταγενέστεροι ερευνητές^{[57] [58] [59]} διαπίστωσαν πως οι ισχυρισμοί του Klinkenberg, ισχύουν για υψηλές διαπερατότητες, καθώς η μέση ανεμπόδιστη τροχιά δεν είναι αμελητέα, όταν η διαπερατότητα μειώνεται. Άρα και η βαθμίδα της ταχύτητας δε μπορεί να θεωρηθεί σταθερή στο στρώμα ολίσθησης των μορίων με το τοίχωμα.

Το φαινόμενο ολίσθησης δε συσχετίζεται μόνο με το πορώδες αλλά κυρίως με τη κατανομή μεγέθους πόρων. Οι διαπερατότητες σε αέριο που μέτρησαν επίσης, οι Schimamoto και Tanikawa^[46], δεν ικανοποιούσαν την εξίσωση του Klinkenberg^[56], αν και ο τελευταίος είχε υπολογίσει για μικρότερες διαπερατότητες, τη διορθωμένη διαπερατότητα σε αέριο να βρίσκεται σε συμφωνία με την απόλυτη διαπερατότητα σε οκτάνιο. Δηλαδή, σημαντικό ποσοστό του όγκου κενών, μικρής ακτίνας πόρων, εντείνει το συνολικό φαινόμενο ολίσθησης των μορίων με το τοίχωμα στο πορώδες μέσο. Η διαπερατότητα του πετρώματος σε νευτώνειο υγρό, K_l υπολογίζεται από την εξίσωση ολίσθησης 2^{ου} βαθμού (second-order slip equation):

$$K_{air} = K_l \left(1 + A \frac{1}{P_{avg}} + B \frac{1}{P_{avg}^2} \right) \quad (4.25)$$

Οι $A(atm)$ και $B(atm^2)$ είναι οι σταθεροί όροι της σχέσης 4.25. Όταν το B τείνει στο μηδέν, τότε η 4.25 προσεγγίζει τη σχέση του Klinkenberg. Οι Gao, Yu και Lu^[57], παρατήρησαν πως σε χαμηλής διαπερατότητας

πετρώματα, όπως ταμιευτήρα σχιστολιθικού αερίου, η διόρθωση κατά Klinkenberg αποδίδει αρνητικές διαπερατότητες.

Με βάση τον αριθμό Kn ^[60], η ροή του ρευστού διαχωρίζεται σε 4 υποπεριοχές. Ο αριθμός Kn , όσον αφορά κυλινδρικά τριχοειδή:

$$Kn = \frac{\lambda}{D} \quad (4.26)$$

$\lambda(\mu m)$: μέση ελεύθερη διαδρομή.

$D(\mu m)$: διάμετρος πόρων.

Ροή Poiseuille ($Kn < 0,001$): Τα μόρια είναι πυκνά κατανεμημένα και οι μοριακές κρούσεις υπερτερούν έναντι των κρούσεων με το τοίχωμα, όπου η ταχύτητα ροής είναι μηδενική. Ονομάζεται και συνεχής ροή (continuum flow) ή ιξώδης ροή (viscous flow).

Ροή ολίσθησης ($0,001 < Kn < 0,1$): Η μέση ανεμπόδιστη τροχιά των μορίων κατά τη ροή ολίσθησης (slip flow) είναι μικρή σε σχέση με τη διάμετρο των τριχοειδών, αλλά όχι αμελητέα. Οι κρούσεις των μορίων με το τοίχωμα προκαλεί το φαινόμενο ολίσθησης για αριθμό $Kn > 0.001$.

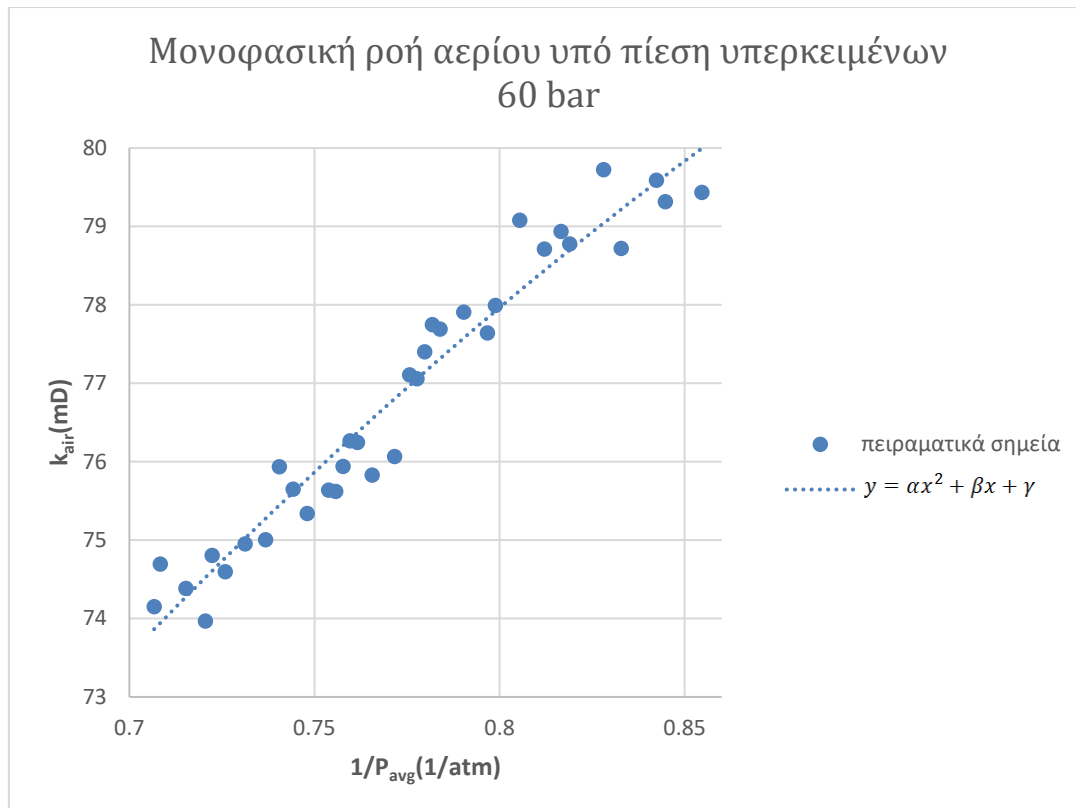
Ροή Kundt and Warburg ($0.1 < Kn < 10$): Η συχνότητα των κρούσεων μεταξύ των μορίων και μεταξύ αερίου-τοιχώματος είναι ίση. Καλείται επίσης και ενδιάμεση ροή (transition flow).

Ροή Knudsen ($Kn > 10$): Οι διαμοριακές κρούσεις είναι αμελητέες συγκριτικά με τις κρούσεις των μορίων με το τοίχωμα. Ονομάζεται και ελεύθερη μοριακή ροή (free-molecular flow).

Η σχέση 4.25 έχει ισχύ για αριθμό $Kn < 0,1$ επειδή για μεγαλύτερες τιμές παύει να ισχύει ο νόμος του Darcy και απαιτούνται άλλες εξισώσεις για να ερμηνεύουν τη ροή αυτή.

Έστω η συνάρτηση $y(x)$, η εξίσωση της πολυωνυμικής παλινδρόμησης δεύτερου βαθμού:

$$y = \alpha x^2 + \beta x + \gamma \quad (4.27)$$



Διάγραμμα 4. 3: Πολυωνυμική προσαρμογή 2^{ου} βαθμού δεδομένων διαπερατότητας του αέρα συναρτήσει της αντίστροφης μέσης πίεσης σε δοκίμιο, υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.

Οι τιμές των παραμέτρων:

$$\alpha = -45,8 \text{ mD} \cdot \text{atm}^2$$

$$\beta = 113,0 \text{ atm} \cdot \text{mD}$$

$$\gamma = 16,9 \text{ mD}$$

Οι τυπικές αποκλίσεις των παραμέτρων:

$$\sigma_{\alpha} = 35,7 \text{ mD} \cdot \text{atm}^2$$

$$\sigma_{\beta} = 56,0 \text{ atm} \cdot \text{mD}$$

$$\sigma_{\gamma} = 21,9 \text{ mD}$$

Η τυπική απόκλιση της εκτίμησης της διαπερατότητας σε αέρα:

$$\sigma_y = 0,42 \text{ mD}$$

Ο συντελεστής προσαρμογής:

$$R^2 = 0,951$$

Η 4.27 μέσω της 4.25:

$$K_{air} = 16,9 \left(1 + 6,68 \frac{1}{P_{avg}} - 2,71 \frac{1}{P_{avg}^2} \right) \quad (4.28)$$

$$A = 6,68 \text{ atm}$$

$$B = -2,71 \text{ atm}^2$$

$$K_l = 16,9 \text{ mD}$$

Οι τυπικές αποκλίσεις των παραμέτρων είναι μεγάλες σε σχέση με τις παραμέτρους. Παρόλα αυτά οι τυπικές αποκλίσεις της εκτίμησης της διαπερατότητας σε αέρα είναι ίση με αυτή που υπολογίστηκε από την εξίσωση του Klinkenberg (έως και το δεύτερο δεκαδικό ψηφίο) με το συντελεστή προσδιορισμού της πολυωνυμικής παλινδρόμησης να είναι ελάχιστα υψηλότερος αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό, οφείλεται στο μικρό εύρος τιμών που έχει η αντίστροφη μέση πίεση της σχέσης 4.28, που η γραμμική παλινδρόμηση και η πολυωνυμική έχουν παραπλήσια τάση προσαρμογής, στα πειραματικά σημεία. Οι τυπικές αποκλίσεις στις παραμέτρους που καθορίζουν τη καμπυλότητα της $y(x)$, των α και β , είναι τόσο υψηλές που το σφάλμα της μέτρησης της διαπερατότητας σε αέρα για μηδενική αντίστροφη μέση πίεση ή υπό άπειρη πίεση είναι εξίσου μεγάλη, δηλαδή η τυπική απόκλιση της παραμέτρου γ . Αναμένεται λόγω του μεγέθους του δείγματος ($n > 30$), τα σφάλματα κατανέμονται τυχαίως, με τη διορθωμένη διαπερατότητα να ακολουθεί τη κανονική κατανομή και η μέση τιμή της να προσεγγίζει ικανοποιητικά την αναμενόμενη τιμή. Στη συνέχεια, θα συγκριθεί η απόλυτη διαπερατότητα σε νερό με τη μέση διορθωμένη διαπερατότητα σε αέρα. Ο μόνος τρόπος να μελετηθεί η διαπερατότητα σε μεγαλύτερο εύρος της αντίστροφης μέσης πίεσης (για να μειωθούν οι τυπικές αποκλίσεις των παραμέτρων) είναι, να αυξάνεται και η πίεση της εκροής μαζί με τη πίεση της εισροής, υπό μικρή πτώση πίεσης ώστε το αέριο να συμπεριφέρεται κατά προσέγγιση ως ασυμπίεστο.

Η ειδική σταθερά του ξηρού αέρα:

$$R_s = \frac{R}{MW_{air}} \quad (4.29)$$

R : Η παγκόσμια σταθερά των αερίων ($8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$).

MW_{air} : Το μοριακό βάρος του ξηρού αέρα ($28,9645 \text{ gr/mol}$).

$$R_s = 287,058 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

Από τη σχέση 4.30 για τα πειραματικά σημεία με μέση πίεση $P_{avg}(\text{atm}) \in (1,18, 1,42)$ σε θερμοκρασία $294,15 \text{ K}$:

$$\lambda = \frac{\mu}{P_{avg}} \sqrt{\frac{\pi R_s T}{2}} \quad (4.30)$$

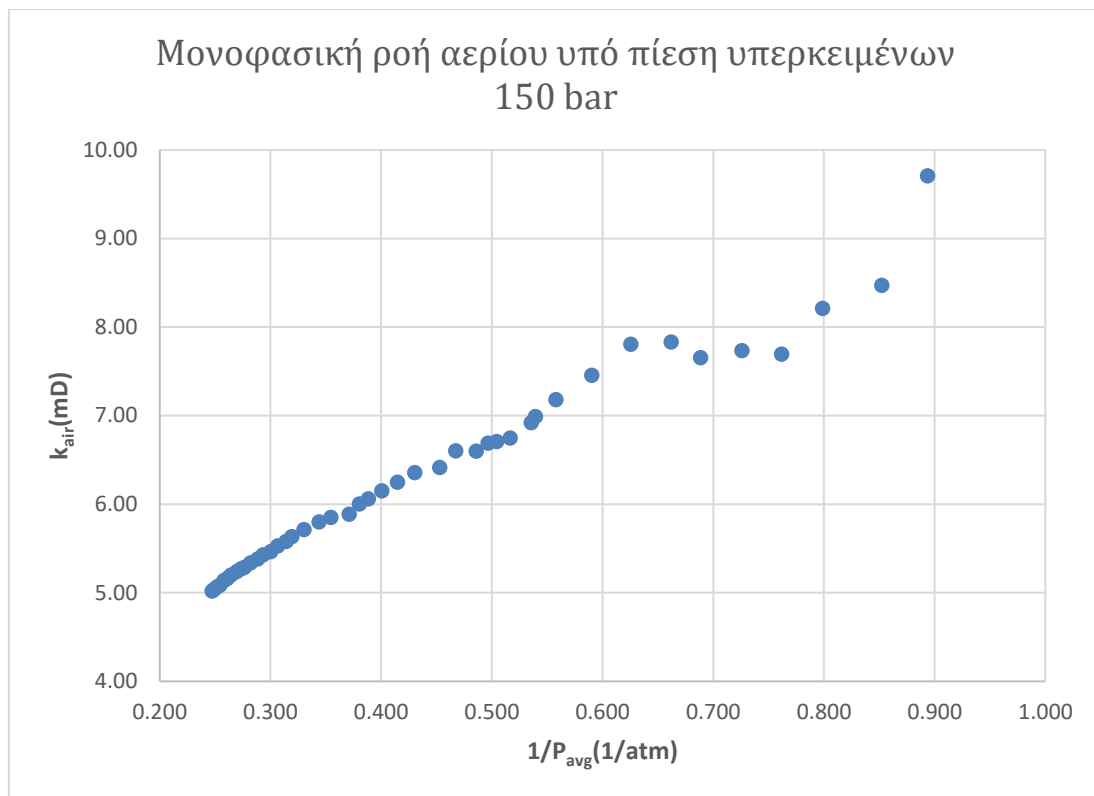
$$\lambda(\mu\text{m}) \in (0,0468, 0,0560)$$

Ο αριθμός του Knudsen με βάση τη σχέση 4.26:

$$Kn \in (0,0274, 0,0328)$$

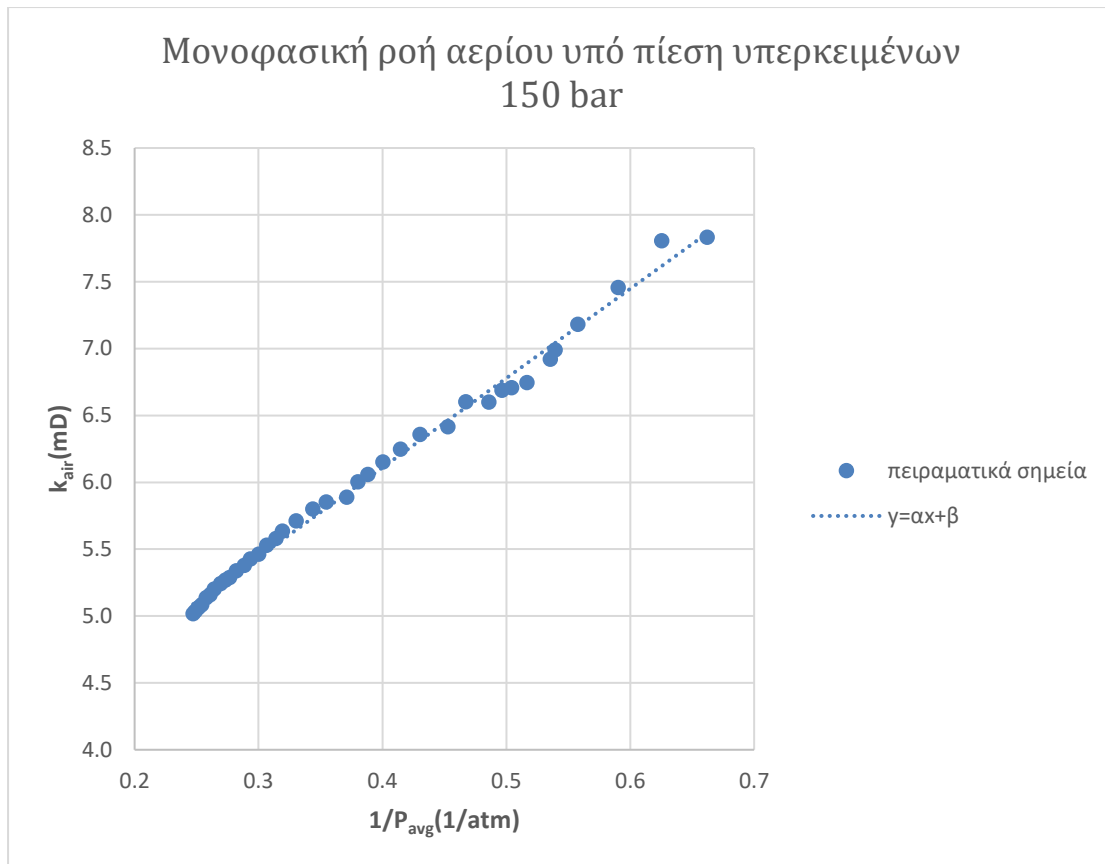
Ο αριθμός Knudsen φανερώνει πως το φαινόμενο της ολίσθησης είναι σημαντικό και η εξίσωση 4.25 μπορεί να εφαρμοστεί.

Τα πειραματικά δεδομένα (Παράρτημα A.6), συλλέχθηκαν για τη διαπερατότητα του αέρα συναρτήσει της αντίστροφης μέσης πίεσης, σε πίεση υπερκειμένων 150 bar . Το παροχόμετρο παρουσίασε απόκλιση $Q_{\text{offset}} = -1 \text{ ml/min}$. Το Top-Trak™ Mass Flow Meter (μοντέλο 821-51-L-11-MP-PE) της Sierra Instruments, Inc συνδέθηκε στην εκροή του δοκιμίου και έχει ανώτερο όριο παροχής 500 ml/min , με διακριτότητα $\pm 1 \text{ ml/min}$.



Διάγραμμα 4. 4: Διαπερατότητα αέρα συναρτήσει της αντίστροφης μέσης πίεσης σε δοκίμιο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Υπό παροχή υψηλότερη των 41 ml/min, τα πειραματικά σημεία παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά έως και τη μέγιστη τιμή της παροχής.



Διάγραμμα 4. 5: Γραμμική προσαρμογή δεδομένων διαπερατότητας του αέρα συναρτήσει της αντίστροφης μέσης πίεσης σε δοκίμιο, υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Έστω η συνάρτηση $y(x)$, η εξίσωση της γραμμικής παλινδρόμησης, που περιγράφει τα πειραματικά σημεία:

$$y = \alpha x + \beta \quad (4.31)$$

Οι τιμές των παραμέτρων:

$$\alpha = 6,69 \text{ atm} \cdot mD \quad \beta = 3,43 \text{ mD}$$

Οι τυπικές αποκλίσεις των παραμέτρων:

$$\sigma_{\alpha} = 0,0867 \text{ atm} \cdot mD \quad \text{και} \quad \sigma_{\beta} = 0,0348 \text{ mD}$$

Η τυπική απόκλιση του σφάλματος εκτίμησης της διαπερατότητας σε αέρα:

$$\sigma = 0,0634 \text{ mD}$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού εκφράζει την αναλογία της μεταβλητότητας που εξηγείται από το μοντέλο:

$$R^2 = 0,994$$

$$K_{air} = 6,69 \frac{1}{P_{avg}} + 3,43 \quad (4.32)$$

Από τις σχέσεις 4.19-4.21 και 4.32 υπολογίζεται η διαπερατότητα σε υγρά και η σταθερά ολίσθησης του αέρα:

$$K_l = 3,43 \pm 0,03 \text{ mD}$$

$$b = \frac{6,69 \pm 0,09}{3,43 \pm 0,03} \text{ atm}$$

$$b_{max} = \frac{6,69 + 0,09}{3,43 - 0,03} = 1,99 \text{ atm}$$

$$b_{min} = \frac{6,69 - 0,09}{3,43 + 0,03} = 1,90 \text{ atm}$$

Έστω $\bar{b}(\text{atm})$ η μέση τιμή της μέγιστης και ελάχιστης τιμής της σταθεράς ολίσθησης του αέρα:

$$\bar{b} = \frac{1,99 + 1,90}{2} = 1,95 \text{ atm}$$

Από τη σχέση 4.24:

$$b = 1,95 \pm 0,04 \text{ atm}$$

Η διορθωμένη διαπερατότητα του αέρα, που αντιπροσωπεύει την απόλυτη διαπερατότητα του πετρώματος σε νευτώνειο υγρό, διαπιστώθηκε πως σε πίεση υπερκειμένων 60 bar είναι περίπου 5 φορές μεγαλύτερη απ' ότι στα 150 bar. Άρα ο όγκος κενών έχει μικρύνει στη δεύτερη περίπτωση. Αλλά η πιο σημαντική μεταβολή ως προς τη διαπερατότητα είναι η κατανομή μεγέθους πόρων. Οι μεγαλύτεροι πόροι συρρικνώνονται σε μεγαλύτερο βαθμό από τους μικρότερους.

4.2.2. Έμμεσος υπολογισμός της απόλυτης διαπερατότητας του πετρώματος από τα δεδομένα της κατανομής μεγέθους πόρων.

Οι Katz και Thompson^{[10] [61]}, ανέπτυξαν μία θεωρία υπολογισμού της απόλυτης διαπερατότητας των πετρωμάτων που βασίζεται στην υδραυλική και ηλεκτρική αγωγιμότητα του Hg και εξάγεται εμμέσως, από τα δεδομένα της κατανομής μεγέθους πόρων.

Η απόλυτη διαπερατότητα του πετρώματος, $K(m^2)$, είναι μία συνάρτηση του χαρακτηριστικού μήκους (Characteristic length), $l_c(m)$ και της σταθεράς της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (conductance ratio) του πετρώματος, σ/σ_0 .

$$K = \frac{1}{226} l_c^2 \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (4.33)$$

Η ελάχιστη διάμετρος των πόρων, που απαιτείται για ένα δίκτυο ροής Hg, να εκτείνεται από το ένα άκρο του δείγματος στο άλλο, ονομάζεται χαρακτηριστικό μήκος. Η σταθερά της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ορίζεται, ως το πηλίκο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του πλήρως κορεσμένου δοκιμίου σε άλμη (rock conductivity), $\sigma(S/m)$ προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα της άλμης (conductance of brine), $\sigma_0(S/m)$. Η σταθερά της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, είναι ανεξάρτητη της ηλεκτρικής αντίστασης της άλμης και είναι μία συνάρτηση μόνο της γεωμετρίας των πόρων, όταν τα ορυκτά που απαρτίζουν το πέτρωμα είναι μονωτές. Η εξίσωση 4.33 χρησιμοποιείται από το λογισμικό της micromeritics, για να εκτιμήσει τη διαπερατότητα βάσης, όταν η σταθερά της ηλεκτρικής αγωγιμότητας έχει υπολογιστεί από πριν ανεξάρτητα και εισαγάγεται στην αρχή του πειράματος.

Όταν δεν υπάρχει γνώση, της σταθεράς της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (όπως στη παρούσα διπλωματική), τόσο η τιμή αυτή όσο και η απόλυτη διαπερατότητα του πετρώματος μπορούν να εκτιμηθούν από τη παρακάτω σχέση:

$$K = \frac{1}{89} (l_{max}^h)^2 \frac{l_{max}^h}{l_c} \Phi S(l_{max}^h) \quad (4.34)$$

Η εξίσωση αυτή εκτός από το χαρακτηριστικό μήκος, προϋποθέτει τη γνώση της ελάχιστης διαμέτρου των πόρων, στους οποίους, το δίκτυο της ροής σε Hg, λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας,

$l_{max}^h(m)$. Το ποσοστό των πόρων, που καταλαμβάνουν αυτούς τους πόρους ως προς το συνολικό πορώδες, Φ είναι το $S(l_{max}^h)$.

Αρχικά, στο διάγραμμα του αθροιστικού εγγεόμενου όγκου Hg συναρτήσει της πίεσης, υπολογίζεται το σημείο, όπου η καμπύλη μεταβαίνει από ένα μειούμενο ρυθμό μεταβολής του αθροιστικού όγκου Hg ως προς τη πίεση, στη ραγδαία αύξηση του. Στο σημείο αυτό, η δεύτερη παράγωγος της καμπύλης μηδενίζεται. Δηλαδή, είναι ένα σημείο καμπής. Από το διάγραμμα αυτό εκτιμάται η οριακή πίεση, $P_t(Pa)$, κατά την οποία, σχηματίζεται ένα δίκτυο ροής, που καταλαμβάνει πόρους διαμέτρου μεγαλύτερης ή ίσης του χαρακτηριστικού μήκους. Έπειτα, το χαρακτηριστικό μήκος υπολογίζεται από την εξίσωση του Young-Laplace (σχέση 1.9). Ο αθροιστικός όγκος, $V_t(m^3)$, κατά την οριακή πίεση αφαιρείται από τους αθροιστικούς όγκους Hg, $V_C(m^3)$, για κάθε πίεση, άνωθεν της οριακής. Τα υπόλοιπα δεδομένα αφαιρούνται. Ο αθροιστικός όγκος Hg, $(V_C - V_t)$ άνωθεν της οριακής πίεσης, επί την ελάχιστη διάμετρο των πόρων που καταλαμβάνουν, υψωμένη στη δύναμη του τρία, $l^3(m^3)$, συναρτήσει της διαμέτρου των πόρων, $l(m)$, αποτελούν μία συνάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας. Το τοπικό μέγιστο της καμπύλης αυτής, αντιπροσωπεύει τη μέγιστη τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας, να αντιστοιχεί σε ένα δίκτυο ροής, που καταλαμβάνει πόρους μεγαλύτερης ή ίσης διαμέτρου, με l_{max}^h . Ο αθροιστικός αυτός όγκος Hg, ισούται με $V(l_{max}^h)(m^3)$. Το ποσοστό του όγκου, $S(l_{max}^h)$, που καταλαμβάνει σε σχέση με τον όγκο των κενών, $PV(m^3)$ είναι:

$$S(l_{max}^h) = \frac{V(l_{max}^h)}{PV} \quad (4.35)$$

Τα πειραματικά δεδομένα, είναι αδύνατον να μετρήσουν την οριακή πίεση. Άρα τόσο από τη σχέση 4.33 όσο και τη 4.34, απαιτείται η εκτίμηση της τιμής του χαρακτηριστικού μήκους, από 2.500 δεδομένα όγκου εγγεόμενου υδραργύρου συναρτήσει της πίεσης του υποδοχέα. Το λογισμικό της Micromeritics, δίδει στο χρήστη 111 δεδομένα, από όλο το εύρος των μετρήσεων. Υπάρχουν περιπτώσεις, όπου τα σημεία καμπής είναι περισσότερα από δύο. Μία μέθοδος μείωσης των δεδομένων, με βάση την εύρεση μορφοκλασμάτων-fractals (επανάληψη αυτούσιων γεωμετρικών μοτίβων που περιέχονται από τα ίδια σχήματα, καθώς η κλίμακα του μεγέθους τους βαίνει μειούμενη ή αυξανόμενη), αποσκοπεί

στον προσδιορισμό του χαρακτηριστικού μήκους. Παρόλα αυτά, δεν είναι απαραίτητο ότι η παραπάνω μέθοδος, αφαιρεί πάντα όλα τα σημεία καμπής που δεν αντιστοιχούν στο χαρακτηριστικό μήκος. Στη προκειμένη περίπτωση ήταν εφικτό. Η απόλυτη διαπερατότητα του πετρώματος, με βάση τη σχέση 4.34 και 4.35 υπολογίστηκε:

$$K_{abs} = 16,1958 \text{ mD}$$

4.2.3. Διαπερατότητα του πετρώματος σε νερό

Δύο αντλίες νερού της Teledyne Isco χρησιμοποιήθηκαν για την εκτόπιση του νερού και του πετρελαίου από τα αντίστοιχα πιστόνια τους. Το μοντέλο 260D Syringe Pump έχει χωρητικότητα 266 ml, η ανώτατη παροχή ανέρχεται στα 107 ml/min και διακριτική ικανότητα $\pm 0,001$ ml/min. Το μοντέλο 500D Syringe Pump, έχει χωρητικότητα 507 ml, ανώτατο όριο παροχής 204 ml/min και διακριτική ικανότητα $\pm 0,001$ ml/min. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε η αντλία 500D Syringe Pump για την εκτόπιση του νερού από το πιστόνι με το οποίο ήταν συνδεδεμένο. Το μανόμετρο που χρησιμοποιήθηκε είχε εύρος πίεσης 0-10 barg της Wika, μοντέλο DG-10-5 και διακριτικής ικανότητας 0,01 barg.

Παροχή, Q σε νερό εύρους 1-10 ml/min, υποβλήθηκε στο δοκίμιο με σκοπό τον προσδιορισμό της απόλυτης διαπερατότητας του (Παράρτημα A.7). Σε κάθε παροχή η σχετική πίεση του μανομέτρου, $P_{gauge}(\text{barg})$, χρειάζεται μεγάλο χρονικό διάστημα για να σταθεροποιηθεί. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν με 10 ml/min, αλλά μειώθηκε στη συνέχεια, διότι η πίεση του μανομέτρου υπερέβαινε το ανώτατο όριο λειτουργίας του. Με τη πάροδο του χρόνου η διαπερατότητα σε νερό μειώθηκε σημαντικά. Στην αρχή των μετρήσεων διαπιστώθηκε αρνητική απόκλιση στο μανόμετρο $P_{offset} = -0.04$ barg. Το πιστόνι του νερού και του πετρελαίου (επωνυμίας Proserv) έχουν χωρητικότητα 500 ml, οπότε χρειάζονται γέμισμα τις περισσότερες φορές, πριν ολοκληρωθεί η σταθεροποίηση της πίεσης. Το δοκίμιο υποβλήθηκε σε πίεση υπερκειμένων 60 bar. Η διαπερατότητα σε νερό $K_w(\text{mD})$ υπολογίστηκε μέσω του νόμου του Darcy:

$$K_w = 1000 \frac{Q \mu_w L}{A \Delta P} \quad (4.36)$$

Q (ml/sec): Παροχή σε νερό

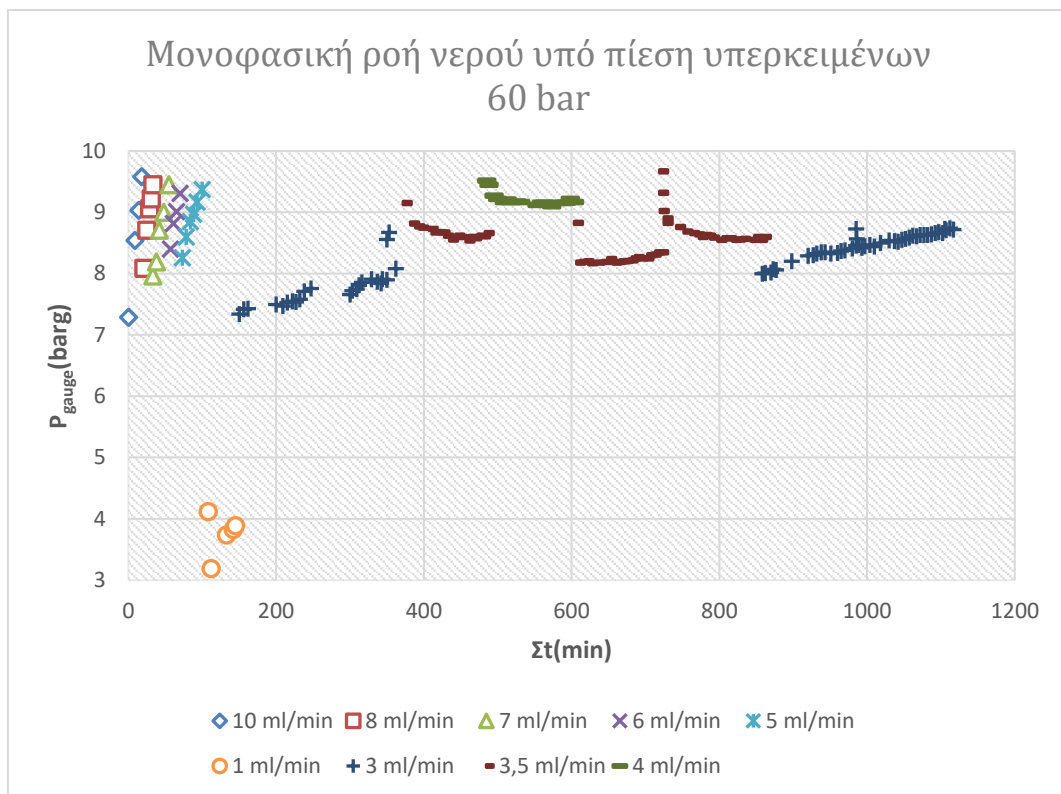
μ_w (cP): Δυναμικό ιξώδες νερού.

L (cm): Μήκος δοκιμίου

A (cm²): Εμβαδόν διατομής δοκιμίου.

ΔP (atm): Πτώση της πίεσης εισροής σε 1 atm στην εκροή, κατά μήκος του δοκιμίου.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.6 σε κάθε παροχή απαιτείται πολύ μεγάλος χρόνος για να σταθεροποιηθεί η πίεση στην εισροή, οπότε υπολογίστηκαν δύο σημεία $Q(\Delta P)$, ως οι μέσες τιμές των σταθεροποιημένων τιμών των εκάστοτε παροχών συναρτήσει των μέσων τιμών της πτώσης πίεσης. Ο χρόνος Σt (min), είναι ο αθροιστικός χρόνος από την έναρξη του πειράματος, χωρίς να συμπεριλαμβάνει την τροφοδοσία της αντλίας και του πιστονιού με νερό, κάθε φορά που διακόπτεται το πείραμα.



Διάγραμμα 4. 6: Μανομετρική πίεση συναρτήσει του αθροιστικού χρόνου για κάθε παροχή νερού υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.

Έως και τα 145 min, ανεξαρτήτως παροχής οι διακυμάνσεις της μανομετρικής πίεσης ήταν πολύ μεγαλύτερες εντός ενός μικρού χρονικού διαστήματος, σε σύγκριση με όταν είχαν παρέλθει, όπου παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η παροχή, μειώνεται ο χρόνος σταθεροποίησης. Μετά από προσεχτική ανάλυση των παραπάνω δεδομένων προκύπτει πως στα 4 ml/min σε χρονικό διάστημα από τα 500 min έως τα 604 min, η πίεση σταθεροποιείται. Στα 3,5 ml /min στο χρονικό διάστημα των 411-483, αν και η διακύμανση παίρνει την ελάχιστη τιμή της παρατηρείται πως τα πειραματικά σημεία στρέφουν τα κοίλα προς τα κάτω και άρα οι διακυμάνσεις δε βρίσκονται εκατέρωθεν της μέσης τιμής τους. Αργότερα επιτυγχάνεται σταθεροποίηση στο χρονικό διάστημα 768-853 min. Στα 604 min παρατηρείται απότομη αύξηση της πίεσης, χωρίς να αλλάξει η παροχή, επειδή το πείραμα είχε διακοπεί για να γεμίσει το πιστόνι ξανά με νερό. Υψηλότερες ή χαμηλότερες αρχικές τιμές της πίεσης εντοπίζονται πριν σταθεροποιηθεί, λόγω της διακοπής αυτής. Ο λόγος που η διαπερατότητα σε νερό υπολογίστηκε από μόνο δύο σημεία είναι ότι απαιτήθηκαν 1117 min, για να ληφθούν.

Οι σταθεροποιημένες τιμές της πίεσης και της διαπερατότητας σε νερό για παροχή $Q=4$ ml/min, στο χρονικό διάστημα 500-604 min:

$\Delta P(\text{atm})$	$K_w(\text{mD})$
9,14	6,82
9,09	6,86
9,13	6,83
9,09	6,86
9,10	6,85
9,09	6,86
9,04	6,90
9,08	6,87
9,08	6,87
9,05	6,89
9,02	6,91
9,08	6,87
9,07	6,88
9,08	6,87
9,14	6,82
9,09	6,86

Πίνακας 4. 3: Διαπερατότητα σε νερό όταν η πτώση πίεσης σταθεροποιηθεί, για παροχή 4 ml/min στο χρονικό διάστημα 500-604 min, σε πίεση υπερκειμένων 60 bar.

Οι τιμές των πιέσεων και των διαπερατοτήτων ακολουθούν τη κανονική κατανομή επειδή τα σφάλματα μέτρησης είναι τυχαία, οπότε για n=16 δείγματα, θα προσεγγιστούν οι τιμές τους με τη κατανομή Student:

$$\Delta P = \overline{\Delta P} \pm t_{d,a/2} \frac{S_{\Delta P}}{\sqrt{n}} \quad (4.37)$$

$\overline{\Delta P} (atm)$: Δειγματική μέση τιμή της πτώσης πίεσης.

$S_{\Delta P}^2 (atm^2)$: Δειγματική διασπορά της πτώσης πίεσης.

Από το στατιστικό πίνακα αθροιστικής πιθανότητας των κρίσιμων τιμών, η τυχαία μεταβλητή $t^{[36]}$ της κατανομής Student, για n=16 δείγματα, βαθμούς ελευθερίας d=n-1=15 και στάθμη εμπιστοσύνης 1-α=99%:

$$t_{15,0.5\%} = 2,947$$

Η δειγματική μέση τιμή της πτώσης πίεσης:

$$\overline{\Delta P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (4.38)$$

$$\overline{\Delta P} = 9,09 \text{ atm}$$

Η δειγματική διασπορά της πτώσης πίεσης:

$$S_{\Delta P}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta P_i - \overline{\Delta P})^2 \quad (4.39)$$

$$S_{\Delta P} = 0,03 \text{ atm}$$

Η τυπική απόκλιση της πτώσης πίεσης, $\sigma_{\Delta P} (atm)$ είναι:

$$\sigma_{\Delta P} = t_{15,0.5\%} \frac{S_{\Delta P}}{\sqrt{16}} \quad (4.40)$$

$$\sigma_{\Delta P} = 0,02 \text{ atm}$$

$$\Delta P = 9,09 \pm 0,02 \text{ atm}$$

Η δειγματική μέση τιμή της διαπερατότητας σε νερό:

$$\overline{K_w} = 6,86 \text{ mD}$$

Η δειγματική τυπική απόκλιση της διαπερατότητας σε νερό:

$$S_{K_w} = 0,02 \text{ mD}$$

Η τυπική απόκλιση της διαπερατότητας σε νερό:

$$\sigma_{K_w} = 0,02 \text{ mD}$$

$$K_w = 6,86 \pm 0,02 \text{ mD}$$

Οι σταθεροποιημένες τιμές της πίεσης και της διαπερατότητας σε νερό για παροχή $Q=3,5 \text{ ml/min}$, στο χρονικό διάστημα 768-858 min:

$\Delta P(\text{atm})$	$K_w(\text{mD})$
8,57	6,37
8,53	6,40
8,56	6,38
8,55	6,38
8,52	6,41
8,48	6,44
8,51	6,41
8,51	6,41
8,48	6,44
8,49	6,43
8,50	6,42
8,48	6,44
8,53	6,40
8,48	6,44
8,53	6,40

Πίνακας 4. 4: Διαπερατότητα σε νερό όταν η πτώση πίεσης σταθεροποιηθεί, για παροχή 3,5 ml/min στο χρονικό διάστημα 768-858 min, σε πίεση υπερκειμένων 60 bar.

Από το στατιστικό πίνακα αθροιστικής πιθανότητας των κρίσιμων τιμών, η τυχαία μεταβλητή $t^{[36]}$ της κατανομής Student, για $n=15$ δείγματα, βαθμούς ελευθερίας $d=n-1=14$ και στάθμη εμπιστοσύνης $1-\alpha=99\%$:

$$t_{14,0.5\%} = 2,977$$

Η δειγματική μέση τιμή της πτώσης πίεσης:

$$\overline{\Delta P} = 8,51 \text{ atm}$$

Η δειγματική τυπική απόκλιση της πτώσης πίεσης:

$$S_{\Delta P} = 0,03 \text{ atm}$$

Η τυπική απόκλιση της πτώσης πίεσης, $\sigma_{\Delta P}(\text{atm})$ είναι:

$$\sigma_{\Delta P} = 0,02 \text{ atm}$$

$$\Delta P = 8,51 \pm 0,02 \text{ atm}$$

Η δειγματική μέση τιμή της διαπερατότητας σε νερό:

$$\overline{K_w} = 6,41 \text{ mD}$$

Η δειγματική τυπική απόκλιση της διαπερατότητας σε νερό:

$$S_{K_w} = 0,02 \text{ mD}$$

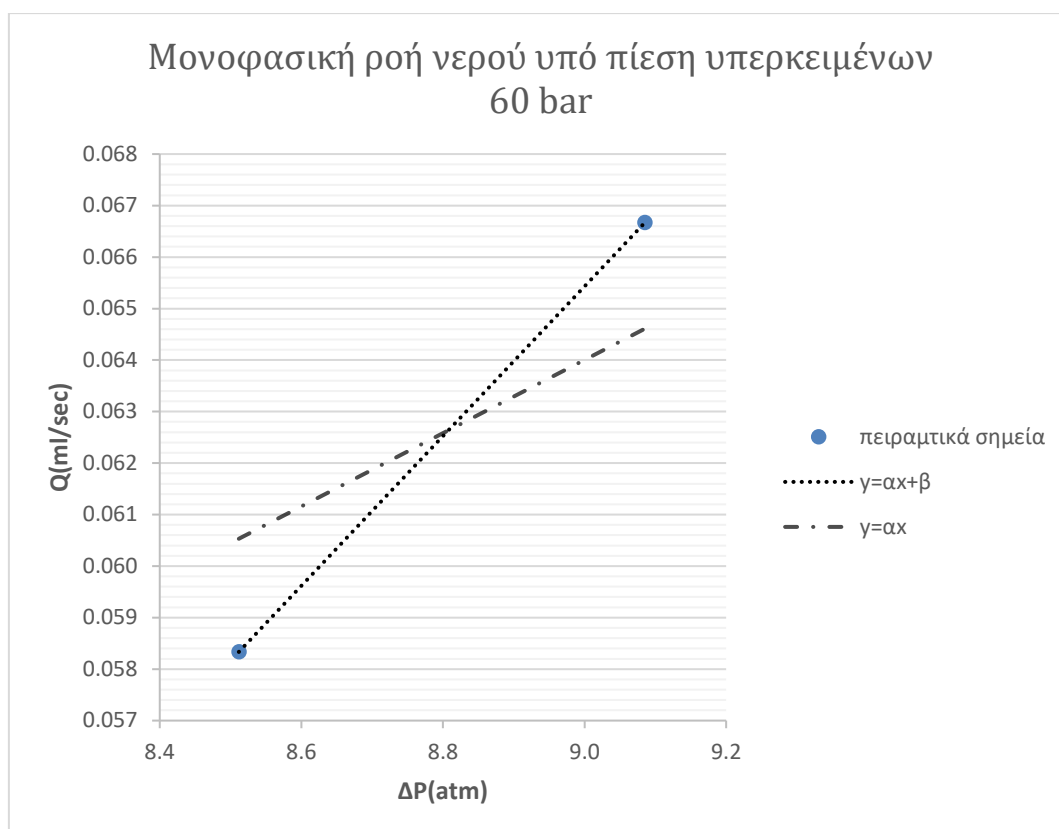
Η τυπική απόκλιση της διαπερατότητας σε νερό:

$$\sigma_{K_w} = t_{14,0.5\%} \frac{S_{K_w}}{\sqrt{15}}$$

$$\sigma_{K_w} = 0,02 \text{ mD}$$

$$K_w = 6,41 \pm 0,02 \text{ mD}$$

Το διάγραμμα παροχής συναρτήσει της πτώσης πίεσης των δύο σημείων:



Διάγραμμα 4. 7: Προσαρμογή των πειραματικών σημείων της παροχής σε νερό συναρτήσει της πτώσης πίεσης στην $y = ax$ και $y = ax + \beta$ υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.

Έπειτα από προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων στις καμπύλες $y = ax$ και $y = ax + \beta$, με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, γίνεται αντιληπτό πως η δεύτερη καμπύλη ικανοποιεί τα σημεία αυτά (διάγραμμα 4.7). Τα δύο σημεία θα θεωρηθούν ικανοποιητικά για την περιγραφή της γραμμής τάσης, καθώς έχουν προκύψει από τη μέση τιμή των δεδομένων που ελήφθησαν κατά τη σταθερή ροή. Ο συντελεστής προσδιορισμού όμως δε μπορεί να προσδιοριστεί με δύο σημεία.

Εάν θεωρηθεί ιδανικό πορώδες μέσο ροής πλαστικού υγρού στο 100% του πορώδους του, υπάρχει ένα ζεύγος τιμών, η ακτίνα κυλινδρικών ομοιόμορφων τριχοειδών με τη διεύθυνση της ροής να πραγματοποιείται κάθετα της διατομής τους και η οριακή διατμητική τάση που ασκείται στην επιφάνεια επαφής των στρωμάτων που αποτελούν το ρευστό, ώστε να προκληθεί ροή, για τα οποία η ροή πλαστικού ρευστού προκαλεί την ίδια υδραυλική βαθμίδα σε πραγματικό πορώδες μέσο ίσης απόλυτης

διαπερατότητας με αυτό. Οι διαπερατότητες του πλαστικού υγρού δεν είχαν τέλεια προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα, όταν η παροχή ήταν γραμμική συνάρτηση της πτώσης πίεσης στη βιβλιογραφία, αλλά τα προσέγγιζαν ικανοποιητικά (Κεφάλαιο 3.3). Άρα για τα πειραματικά σημεία, η διαπερατότητα σε νερό δεν είναι σταθερή, αλλά είναι συνάρτηση της πτώσης πίεσης.

Το κριτήριο με το οποίο θα ελεγχθεί η εγκυρότητα του παραπάνω ισχυρισμού στα πειραματικά δεδομένα, είναι να προκύψει καμπύλη προσαρμογής:

$$y = ax + \beta \quad (4.41)$$

Με το $\beta < 0$ αφού η καμπύλη, τέμνει τον άξονα της πτώσης πίεσης στο διάγραμμα $Q(\Delta P)$ για $Q(0)$, στην οριακή πτώση πίεσης, $TP(atm)$ που απαιτείται για να προκληθεί ροή.

Η καμπύλη προσαρμογής είναι:

$$Q = 0,0145 \cdot \Delta P - 0,0654 \quad (4.42)$$

Η οριακή πτώση πίεσης είναι:

$$TP = 4,50 \text{ atm}$$

Η οριακή τιμή της πτώσης πίεσης αντιπροσωπεύει την ελάχιστη πτώση πίεσης που απαιτείται, για να προκληθεί ροή, για πόρους με διάμετρο άνωθεν της εκάστοτε οριακής τιμής ή στο σύνολο του πορώδους, αναλόγως της κατανομή μεγέθους πόρων του πετρώματος.

Από την εξίσωση Buckingham-Reiner (4.43), μπορεί να προσδιοριστεί η μεταβολή της διαπερατότητας σε νερό με βάση τη πτώση πίεσης της ροής. Δε μπορεί να γίνει εκτίμηση για πτώση πίεσης χαμηλότερη της οριακής, TP . Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η σχέση 4.43 έχει προκύψει από το νόμο του Darcy. Οι προϋποθέσεις εφαρμογής του νόμου του Darcy (κεφάλαιο 1.6) πληρούνται. Η ροή είναι στρωτή, όπως θα δειχθεί στο κεφάλαιο 4.2.4, γιατί ο αριθμός $Re \ll 1$ (θα υπολογιστεί υπό τη μέγιστη τιμή της ογκομετρικής παροχής κατά τη μονοφασική ροή πετρελαίου).

$$K_w(\Delta P) = \frac{\Phi R^2}{8} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2L\tau_y}{R\Delta P} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2L\tau_y}{R\Delta P} \right)^4 \right] \quad (4.43)$$

Τα σημεία $K_1=6,86$ mD σε $\Delta P_1=9.09$ atm και $K_2=6,41$ mD σε $\Delta P_2=8.51$ atm, ικανοποιούν τη σχέση 4.43. Επιπλέον έστω πως $x = \frac{\tau_y}{R}$:

$$K_1 = \frac{\Phi R^2}{8} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2Lx}{R\Delta P_1} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2Lx}{R\Delta P_1} \right)^4 \right] \quad (4.44)$$

$$K_2 = \frac{\Phi R^2}{8} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2Lx}{R\Delta P_2} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2Lx}{R\Delta P_2} \right)^4 \right] \quad (4.45)$$

Αν διαιρεθούν οι εξισώσεις 4.44 και 4.45 κατά μέλη προκύπτει:

$$ax^4 + bx + c = 0 \quad (4.46)$$

Οι σταθεροί όροι της πολυωνυμικής συνάρτησης:

$$a = \frac{16}{3} L^4 \left(\frac{K_2}{\Delta P_1^4} - \frac{K_1}{\Delta P_2^4} \right) \quad (4.47)$$

$$b = \frac{8}{3} L \left(\frac{K_1}{\Delta P_2} - \frac{K_2}{\Delta P_1} \right) \quad (4.48)$$

$$c = K_2 - K_1 \quad (4.49)$$

$$a = -9,33 \cdot 10^{-28} \frac{m^6}{Pa^4}$$

$$b = 1,24 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{Pa}$$

$$c = -4,48 m^2$$

Με εφαρμογή της μεθόδου Newton-Raphson στην:

$$f(x) = ax^4 + bx + c \quad (4.50)$$

Η ρίζα της $f(x)$ θα προσεγγιστεί με την αναδρομική σχέση:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (4.51)$$

Όπου n, ο αριθμός των επαναλήψεων και η παράγωγος της f(x):

$$f'(x) = 4ax^3 + b \quad (4.52)$$

Μία εκτίμηση της ρίζας:

$$x_0 = 4,5 \cdot 10^6 \frac{Pa}{m}$$

Με βάση την αναδρομική εξίσωση 4.51 απαιτούνται 4 επαναλήψεις:

$$f(x_0) = 0,740 \quad f'(x_0) = 9,04 \cdot 10^{-7}$$

$$x_1 = 3681300,94 \frac{Pa}{m} \quad f(x_1) = -6,72 \cdot 10^{-2} \quad f'(x_1) = 1,06 \cdot 10^{-6}$$

$$x_2 = 3744819,85 \frac{Pa}{m} \quad f(x_2) = -3,10 \cdot 10^{-4} \quad f'(x_2) = 1,05 \cdot 10^{-6}$$

$$x_3 = 3745115,31 \frac{Pa}{m} \quad f(x_3) = -6,85 \cdot 10^{-9} \quad f'(x_3) = 1,05 \cdot 10^{-6}$$

$$x_4 = 3745115,32 \cdot 10^6 \frac{Pa}{m} \quad f(x_4) = 0$$

Από τη σχέση 4.44 ή 4.45:

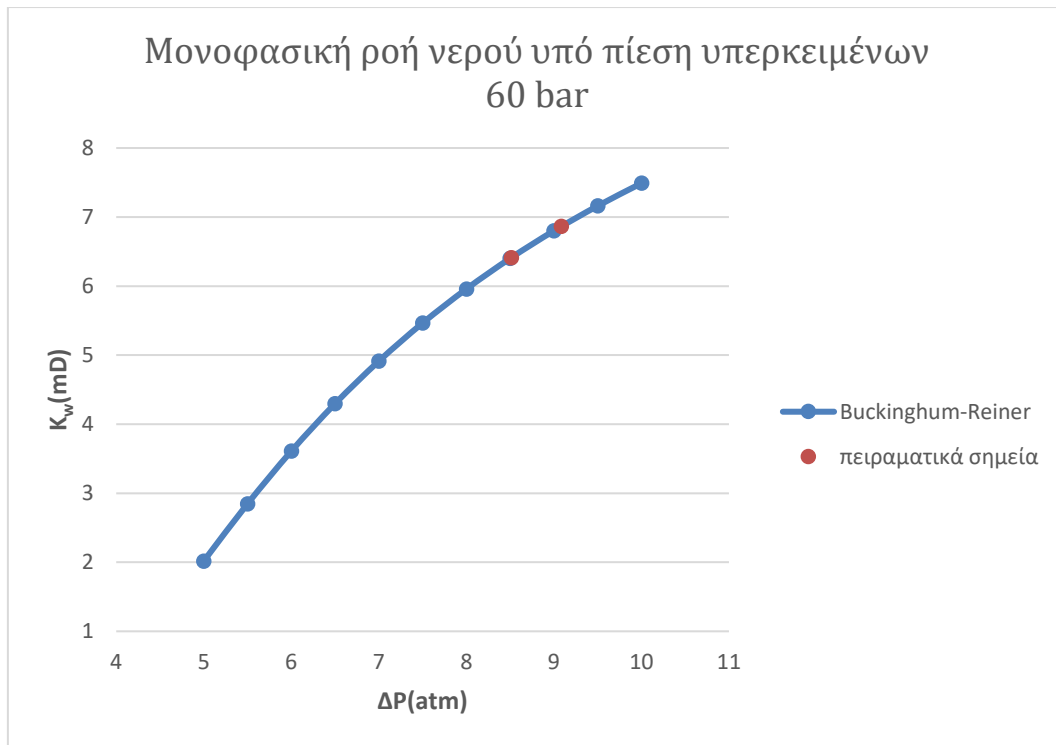
$$R = 0,776 \mu m$$

$$\tau_y = 2,90 Pa$$

Από το διάγραμμα 3.7, φαίνεται ότι η ακτίνα των πόρων του ιδανικού πορώδους μέσου, αντιστοιχεί στη μέγιστη ακτίνα του 30% του όγκου κενών του πραγματικού. Πρακτικά, αυτό σημαίνει πως λόγω του ωσμωτικού φαινομένου, η ροή αντιπροσωπεύεται καλύτερα από πόρους μικρότερους της διάμεσης ακτίνας (όγκος κενών ίσος με 50%).

$\Delta P(atm)$	$K_w(mD)$
5	2,02
5,5	2,85
6	3,61
6,5	4,30
7	4,91
7,5	5,46
8	5,96
8,5	6,40
9	6,80
9,5	7,16
10	7,49

Πίνακας 4. 5: Διαπερατότητα του δοκιμίου σε νερό κατά Buckingham-Reiner για κάθε τιμή της πτώσης πίεσης υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.



Διάγραμμα 4. 8: Πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα της διαπερατότητας του δοκιμίου σε νερό συναρτήσει της πτώσης πίεσης υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.

Στο διάγραμμα 4.8, φαίνεται πως η διαπερατότητα σε νερό δεν είναι σταθερή, αλλά αυξάνεται όσο η πτώση πίεσης βαίνει αυξανόμενη. Παρόλο που η απόλυτη διαπερατότητα μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά σε σχέση με τη πτώση πίεσης της ροής, η ύπαρξη οριακών διατμητικών τάσεων τ_y , στην πραγματικότητα θα διαφέρουν λόγω της διαφορετικής κατανομής μεγέθους των πόρων. Άρα πρέπει να ληφθεί υπόψιν, το ενδεχόμενο εάν η πτώση της πίεσης του δοκιμίου είναι μικρότερη από 10 atm, σημαντικός όγκος νερού εκπεφρασμένος σε όγκο κενών, να βρίσκεται σε ακινησία στους μικρούς πόρους.

Η εξίσωση Buckingham-Reiner, εκπίπτει επίσης στο νόμο του Poiseuille υπό πολύ υψηλές πιέσεις. Άρα αναμένεται στο διάγραμμα της διαπερατότητας σε νερό συναρτήσει της πτώσης πίεσης, υπό υψηλές τιμές της δεύτερης η πρώτη να προσεγγίζει ασυπτωτικά μία σταθερή τιμή, την απόλυτη διαπερατότητα του δοκιμίου σε νευτώνειο ρευστό:

$$K_{\infty} = \lim_{\Delta P \rightarrow \infty} K_{abs}(\Delta P) = \frac{\Phi R^2}{8} \quad (4.53)$$

Η μέγιστη διαπερατότητα του νερού:

$$K_{\infty} = 14,0 \text{ mD}$$

Το σχετικό σφάλμα της μέγιστης διαπερατότητας σε νερό είναι 17,2% της διορθωμένης διαπερατότητας σε αέρα, υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar. Η πλαστική ροή αντιπροσωπεύει τη ροή του νερού μέσω τριχοειδών όμοιας ακτίνας πόρων και οριακής διατμητικής τάσης, που στη πραγματικότητα δεν είναι ρεαλιστικό αλλά μία προσέγγιση, οπότε και είναι αναμενόμενο να μην υπάρχει απόλυτη ταύτιση των θεωρητικών σημείων με τα πειραματικά. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η προσαρμογή των δεδομένων σε πλαστική ροή δεν είναι πάντα αντιπροσωπευτική, όταν η παροχή δεν είναι γραμμική συνάρτηση της πτώσης πίεσης. Οπότε και θα μελετηθεί η διαπερατότητα σε υψηλότερες παροχές συναρτήσει της πτώσης πίεσης, ώστε η ροή να απαιτεί λιγότερο χρόνο για να σταθεροποιηθεί και να ληφθούν περισσότερα πειραματικά δεδομένα, για να διαπιστωθεί και γραφικά η προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων στην $y = ax + \beta$ και την εξίσωση Buckingham-Reiner, αντίστοιχα.

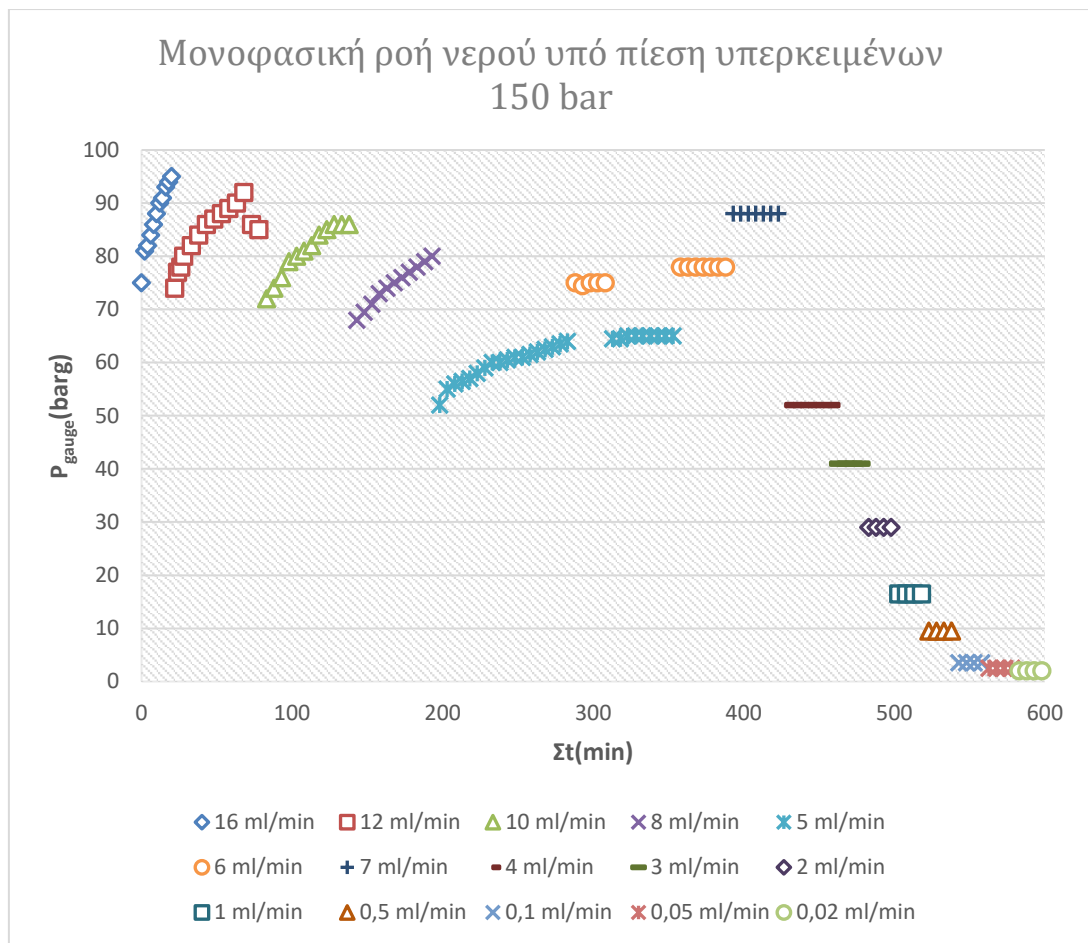
Ακόμα όμως και να υπάρχει ικανοποιητική προσαρμογή, υπάρχει το ενδεχόμενο, λόγω ύπαρξης μικρών πόρων, τα αργίλικα σωματίδια να έχουν δεσμεύσει το νερό σε τέτοιο βαθμό που να απαιτείται υψηλότερη πτώση πίεσης για να αποδεσμευτεί, αρά και υψηλότερες παροχές νερού. Στη περίπτωση που υπάρχει αυτό το φαινόμενο, οι πόροι αυτοί, αφορούν ένα μικρό ποσοστό του όγκου κενών. Για να αυξηθεί όμως η παροχή, θα πρέπει να αυξηθεί και η ενεργή πίεση του συστήματος. Ως ενεργή πίεση ορίζεται η διαφορά της πίεσης των πόρων από την πίεση υπερκειμένων. Αν δεν αυξηθεί η ενεργή πίεση τότε οι πόροι θα παραμορφωθούν και η κατανομή μεγέθους των πόρων δε θα είναι σταθερή. Η ενεργή πίεση διατηρήθηκε, τουλάχιστον 50 bar. Η ενεργή πίεση κατά τη μονοφασική ροή σε νερό ήταν 8 bar μικρότερη της ενεργής πίεσης κατά τη μονοφασική ροή αερίου. Οπότε, η αύξηση της διαπερατότητας σε νερό, θεωρείται αμελητέα.

Στη συνέχεια, θα μελετηθεί η διαπερατότητα του νερού συναρτήσει της πτώσης πίεσης, έως και τα 100 bar υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar. Θα αντικατασταθεί όμως, το πόσιμο νερό, με απιοντισμένο. Σκοπός είναι εκτός των όσων προαναφέρθηκαν, να διαπιστωθεί εάν η ύπαρξη του

μέγιστου δυνατού διπλού στρώματος νερού θα επηρεάσει την απόλυτη διαπερατότητα του πετρώματος. Η σύγκριση αυτή θα είναι ποιοτική (δε μπορεί να γίνει σύγκριση των διαπερατοτήτων σε νερό), καθώς από τις διορθωμένες διαπερατότητες σε αέρα η αύξηση της πίεσης υπερκειμένων επέφερε δραματική μείωση της απόλυτης διαπερατότητας του δοκιμίου. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία αναμένεται επιπλέον, περαιτέρω μείωση της απόλυτης διαπερατότητας σε νερό, λόγω της μείωσης της συγκέντρωσης των ηλεκτρολυτών, του πολικού διαλύτη για δεδομένη πίεση πόρων και υπερκειμένων (Κεφάλαιο 3.3). Σκοπός της παρούσας διπλωματικής δεν είναι να συγκρίνει το βαθμό επίδρασης της μίας παραμέτρου ως προς τη δεύτερη, αλλά συνολικά πως επηρεάζουν την απόλυτη διαπερατότητα.

Η πίεση του νερού και του πετρελαίου για υψηλότερες τιμές πίεσης μετρήθηκε με μανόμετρο Bourdon (μοντέλο PG23LT) της Wika Inc. Έχει εύρος 0-100 barg και διακριτική ικανότητα, ± 1 barg.

Συλλέχθηκαν δεδομένα της παροχής (0,02-16 ml/min) και της μανομετρικής πίεσης (0-100 barg) για κάθε τιμή του αθροιστικού χρόνου (Παράρτημα A.8). Το μανόμετρο είχε αρνητική απόκλιση, $P_{\text{offset}} = -4$ barg.

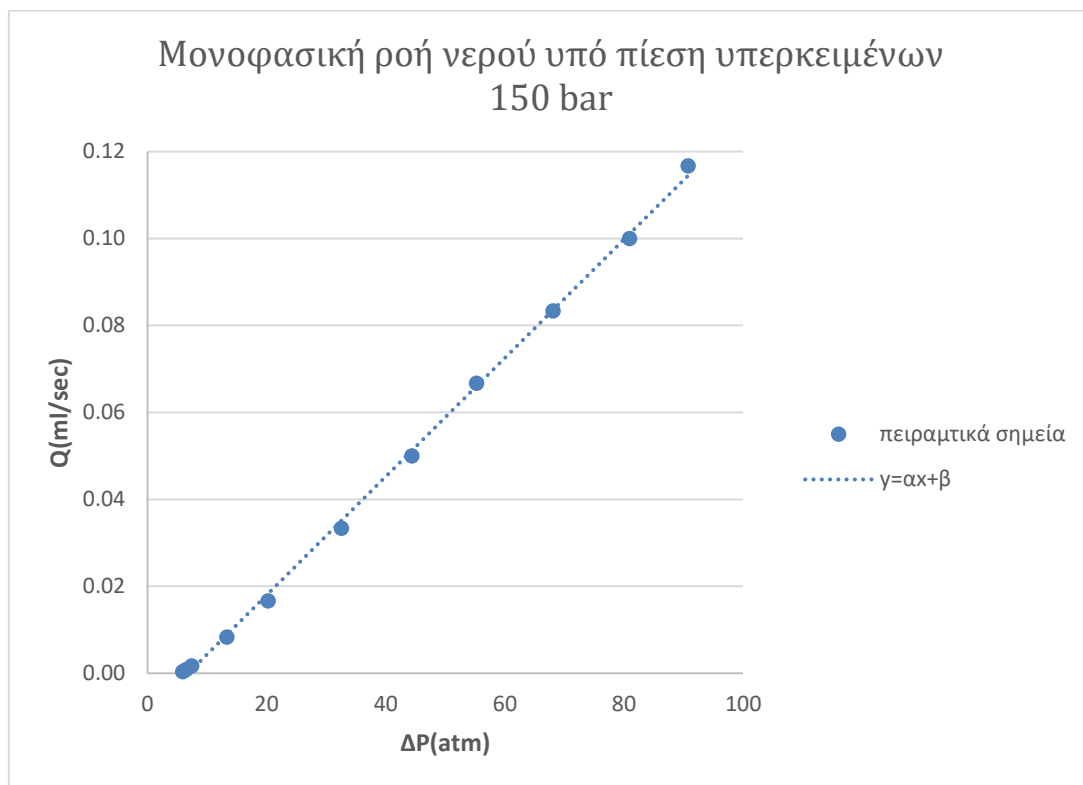


Διάγραμμα 4. 9: Μανομετρική πίεση συναρτήσει του αθροιστικού χρόνου για κάθε παροχή νερού υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.9, η παροχή άρχισε να σταθεροποιείται για παροχή 6 ml/min, στο χρονικό διάστημα 288-308 min. Στα 5 ml/min σταθεροποιήθηκε στο χρονικό διάστημα 313-353 ml/min. Στη συνέχεια όμως, φάνηκε πως στα 6 ml/min η παροχή σταθεροποιήθηκε σε λίγο υψηλότερη παροχή στο διάστημα 358-388 ml/min. Παροχή 7 ml/min σταθεροποιήθηκε στα 393-423, τα 4 ml/min στα 428-458, τα 3 ml/min στα 463-478, τα 2 ml/min στα 483-498, το 1 ml/min στα 503-518 ml/min, τα 0,5 ml/min στα 523-538, τα 0,1 ml/min στα 543-558 ml/min, τα 0,05 ml/min στα 563-578 min και 0,02 ml/min στα 583-598 min. Οι διαπερατότητες, για κάθε σταθεροποιημένη πτώση πίεσης στην αντίστοιχη παροχή της, υπολογίζεται από το νόμο του Darcy, στον πίνακα 4.6:

Q(ml/sec)	ΔP(atm)	Kw(mD)
0,1167	90,8	1,20
0,1000	80,9	1,16
0,0833	68,1	1,14
0,0667	55,3	1,13
0,0500	44,4	1,05
0,0333	32,6	0,957
0,0167	20,2	0,771
0,0083	13,3	0,59
0,0017	7,4	0,21
0,0008	6,4	0,12
0,0003	5,9	0,05

Πίνακας 4. 6: Σταθεροποιημένες τιμές πτώσης πίεσης και διαπερατότητας σε νερό για δεδομένες παροχές, κάθε χρονικό διάστημα, υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.



Διάγραμμα 4. 10: Παροχές νερού συναρτήσει της πτώσης πίεσης υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Με εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων στα πειραματικά σημεία των παροχών σε νερό συναρτήσει της πτώσης πίεσης (διάγραμμα 4.10):

$$y = ax + b \quad (4.54)$$

Οι τιμές των παραμέτρων:

$$a = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ ml/atm} \cdot \text{sec}$$

$$b = -9,27 \cdot 10^{-3} \text{ ml/sec}$$

Οι τυπικές αποκλίσεις των παραμέτρων:

$$\sigma_a = 1,47 \cdot 10^{-5} \text{ ml/atm} \cdot \text{sec}$$

$$\sigma_b = 7,16 \cdot 10^{-4} \text{ ml/sec}$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι:

$$R^2 = 0,999$$

Η οριακή πτώση πίεσης:

$$TP_1 = 6,80 \text{ atm}$$

Το μεγάλο εύρος παροχών στο οποίο σταθεροποιήθηκαν οι πτώσεις πίεσης, δεν έδειξε πως στις μικρότερες παροχές η οριακή πτώση πίεσης διαφέρει απ' ότι στις υψηλότερες. Από τη κατανομή μεγέθους πόρων προκύπτει πως ο ψαμμίτης διαθέτει πολύ μικρούς αλλά και πολύ μεγάλους πόρους, οπότε είναι πιθανό να μειώνεται η οριακή πτώση πίεσης μειούμενης της παροχής. Έως τα 0,02 ml/min, που είναι πολύ κοντά στη διακριτική ικανότητα του παροχόμετρου δε παρατηρήθηκε μείωση της οριακής πτώσης πίεσης. Η οριακή διατμητική τάση που ασκεί το ένα στρώμα νερού στο γειτονικό του, βαίνει αυξανόμενη, με την αύξηση της απόστασης από το κέντρο του πόρου και αυξάνεται όσο μικρότερη είναι η ακτίνα των πόρων. Δηλαδή, σε μικρές παροχές μεγαλύτερη ποσότητα νερού παραμένει στους μικρότερους πόρους σε ακινησία και το εσωτερικό στρώμα νερού στους μεγαλύτερους πόρους έχει μεγαλύτερο πάχος απ' ότι σε υψηλότερες παροχές που μεγαλύτερη ποσότητα νερού τίθεται σε κίνηση.

Τα σημεία $K_1=0,59 \text{ mD}$ σε $\Delta P_1=13,3 \text{ atm}$ και $K_2=1,20 \text{ mD}$ σε $\Delta P_2=90,8 \text{ atm}$, ικανοποιούν τη σχέση 4.43. Μέσω των σχέσεων 4.44-4.52:

$$a = 9,70 \cdot 10^{-29} \frac{m^6}{Pa^4}$$

$$b = -1,03 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{Pa}$$

$$c = 6,09 m^2$$

Με εφαρμογή της μεθόδου Newton-Raphson μία εκτίμηση της ρίζας:

$$x_0 = 6 \cdot 10^6 \frac{Pa}{m}$$

Με βάση την αναδρομική εξίσωση απαιτούνται 3 επαναλήψεις:

$$f(x_0) = 0,740 \quad f'(x_0) = 9,04 \cdot 10^{-7}$$

$$x_1 = 6011924,9640752 \frac{Pa}{m} \quad f(x_1) = 2,98 \cdot 10^{-6} \quad f'(x_1) = -9,49 \cdot 10^{-7}$$

$$x_2 = 6011928,1075117 \frac{Pa}{m} \quad f(x_2) = 2,07 \cdot 10^{-13} \quad f'(x_2) = -9,49 \cdot 10^{-7}$$

$$x_3 = 6011928,1075119 \frac{Pa}{m} \quad f(x_3) = 0$$

Από τη σχέση 4.44 ή 4.45:

$$\mathbf{R = 0,238 \mu m}$$

$$\mathbf{\tau_y = 1,43 Pa}$$

Από το διάγραμμα 3.7, φαίνεται ότι η ακτίνα των πόρων του ιδανικού πορώδους μέσου, αντιστοιχεί στη μέγιστη ακτίνα του 17% του όγκου κενών του πραγματικού.

Από τη σχέση 4.53, η μέγιστη διαπερατότητα του νερού:

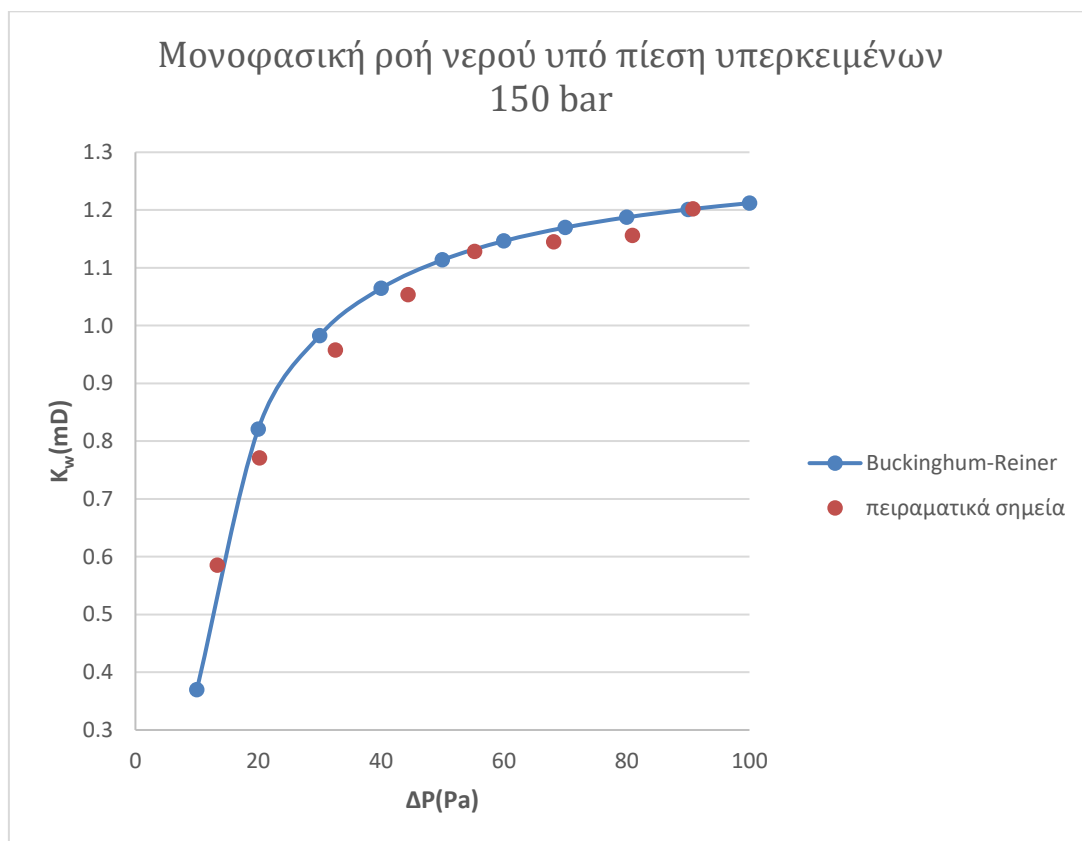
$$\mathbf{K_{\infty} = 1.31 mD}$$

Από την εξίσωση 4.44, μπορεί να προσδιοριστεί η μεταβολή της διαπερατότητας σε νερό με βάση τη πτώση πίεσης της ροής (πίνακας 4.7):

$\Delta P(\text{atm})$	$K_w(\text{mD})$
10	0,369
20	0,821
30	0,983
40	1,064
50	1,11
60	1,15
70	1,17
80	1,19
90	1,20
100	1,21

Πίνακας 4. 7: Διαπερατότητα του δοκιμίου σε νερό κατά Buckingham-Reiner για κάθε τιμή της πτώσης πίεσης υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Η προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων στην εξίσωση Buckingham-Reiner είναι πολύ καλή, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.11:



Διάγραμμα 4. 11: Πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα της απόλυτης διαπερατότητας του δοκιμίου σε νερό συναρτήσει της πτώσης πίεσης υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Τα διαγράμματα 4.10 και 4.11, επιβεβαιώνουν την προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων σε πλαστική ροή ιδανικού πορώδους μέσου. Το σχετικό σφάλμα της μέγιστης διαπερατότητας σε νερό είναι 61,8% της διορθωμένης διαπερατότητας σε αέρα. Αυτό το ποσοστό είναι πολύ μεγάλο για να δικαιολογήσει τα σφάλματα από την προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων σε πλαστική ροή. Αυτό σημαίνει, πως το ωσμωτικό φαινόμενο ήταν πολύ ισχυρό σε σημαντικό ποσοστό του όγκου κενών στους μικρότερους πόρους, που το νερό έμεινε ακινητοποιημένο, παρόλο που η οριακή πτώση πίεσης ήταν μικρή σε σχέση με τη μέγιστη πίεση πόρων. Το αντίστοιχο σχετικό σφάλμα υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar, ήταν 17,2%. Άρα η μείωση της κατανομής του μεγέθους των πόρων σε συνδυασμό με τη μείωση των ηλεκτρολυτών του νερού, επέφερε ισχυρή επίδραση του ωσμωτικού φαινομένου στην απόλυτη διαπερατότητα του δοκιμίου.

Η ζυγαριά με την οποία ζυγίστηκε το δοκίμιο για τον υπολογισμό των περιεχόμενων ρευστών έχει την επωνυμία KERN, το μοντέλο ALT 220-4M, διακριτικής ικανότητας 0,0001 gr.

Ο βαθμός κορεσμού σε νερό υπολογίστηκε για ένα δείγμα μήκους $L=4,751$ cm και ενός δείγματος $L=8$ cm. Η διάμετρος της διατομής των δοκιμίων είναι $d=2,543$ cm. Με βάση τις διαστάσεις αυτές, υπολογίστηκε από τη σχέση 4.2, ο φαινόμενος όγκος του δοκιμίου. Στη συνέχεια, τα δοκίμια ζυγίστηκαν ξηρά (m_{rock}) και υγρά ($m_{rock+fluid}$), έπειτα από τον πλήρη κορεσμό του δοκιμίου σε νερό. Ο όγκος κενών (PV), υπολογίστηκε από τη σχέση 4.1. Η πυκνότητα του νερού, $\rho_w=0.997$ gr/cm³. Το πορώδες (Φ), υπολογίστηκε από τις σχέσεις 4.1-4.3:

m_{rock}(gr)	m_{rock+fluid}(gr)	PV(cm³)	BV(cm³)	Φ(%)
87,6389	95,3234	7,71	40,63	19,0
51,3449	55,3071	3,97	24,13	16,5
51,3449	55,4582	4,13	24,13	17,1
51,3449	55,9899	4,66	24,13	19,3
51,3449	55,5278	4,20	24,13	17,4
51,3449	55,7894	4,46	24,13	18,5

Πίνακας 4. 8: Ζύγιση δοκιμίων πλήρως κορεσμένων σε νερό

Οι τιμές του πορώδους ακολουθούν τη κανονική κατανομή επειδή τα σφάλματα μέτρησης είναι τυχαία, οπότε για $n=6$ δείγματα, θα

προσεγγιστεί η τιμή του με τη κατανομή Student. Από το στατιστικό πίνακα αθροιστικής πιθανότητας των κρίσιμων τιμών, η τυχαία μεταβλητή $t^{[36]}$ της κατανομής Student, για $n=6$ δείγματα, βαθμούς ελευθερίας $d=n-1=5$ και στάθμη εμπιστοσύνης $1-\alpha=99\%$:

$$t_{15,0.5\%} = 4,032$$

Η δειγματική μέση τιμή του πορώδους:

$$\bar{\Phi} = 18,0 \%$$

Η δειγματική τιμή της τυπικής απόκλισης του πορώδους:

$$S_{\Phi} = 1,1 \%$$

Η τυπική απόκλιση του πορώδους είναι:

$$\sigma_{\Phi} = 1,9 \%$$

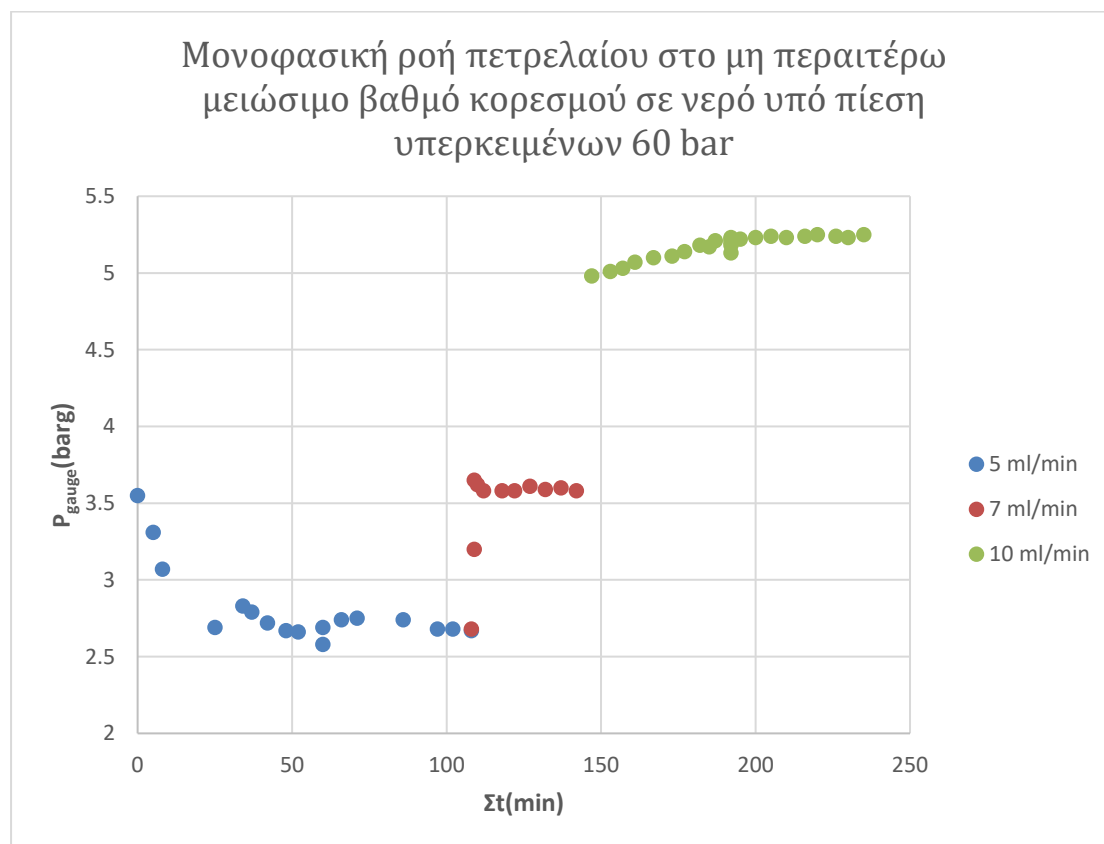
$$\Phi = 18,0 \pm 1,9 \%$$

Το σχετικό σφάλμα του πορώδους με τη μέθοδο της ζύγισης είναι 1,64% του πορώδους από τη κατανομή μεγέθους πόρων (2^ο πείραμα). Η δειγματική μέση τιμή του πορώδους από 8 μετρήσεις προσεγγίζει ικανοποιητικά τη πραγματική της τιμή, αν και η τυπική απόκλιση είναι υψηλή, λόγω του μικρού μεγέθους του δείγματος.

4.2.4. Διαπερατότητα πετρελαίου στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό.

Ακολουθεί ο μέγιστος βαθμός κορεσμού του δοκιμίου σε πετρέλαιο. Λόγω της διαβρεχτότητας του αναμένεται η μανομετρική πίεση να σταθεροποιείται για δεδομένη παροχή πολύ ταχύτερα από τη μονοφασική διέλευση σε νερό, γιατί το πετρέλαιο θα προτιμά να διέρχεται κυρίως από τους μεγαλύτερους πόρους (Παράρτημα A.9). Πράγματι για μικρότερες πτώσεις πίεσης χρειάστηκαν 235 min για τη λήψη τριών σημείων για το διάγραμμα της παροχής συναρτήσει της πτώσης πίεσης της ροής. Το

δοκίμιο που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια έχει μήκος $L=4,751$ cm. Η πίεση υπερκειμένων είναι 60 bar.



Διάγραμμα 4. 12: Μανομετρική πίεση συναρτήσει του αθροιστικού χρόνου για κάθε παροχή πετρελαίου υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.

Η αντλία νερού 260D Syringe Pump, χρησιμοποιήθηκε για τον εκτοπισμό του πετρελαίου από το πιστόνι. Για παροχή πετρελαίου $Q=5$ ml/min, η μανομετρική παροχή σταθεροποιήθηκε από τα 42 min έως τα 108 min (διάγραμμα 4.12). Για παροχή πετρελαίου $Q=7$ ml/min, η μανομετρική πίεση σταθεροποιήθηκε στο διάστημα 112-142 min και σε παροχή $Q=10$ ml/min, η μανομετρική πίεση σταθεροποιήθηκε εντός του διαστήματος των 192-235 min.

Ο εκτιμητής του διαστήματος εμπιστοσύνης της μέσης τιμής της πτώσης πίεσης, $\Delta P_1(atm)$ που προκαλεί η παροχή $Q=5$ ml/min, εκτιμάται σύμφωνα με τη κατανομή Student. Από το στατιστικό πίνακα αθροιστικής πιθανότητας των κρίσιμων τιμών, η τυχαία μεταβλητή $t^{[36]}$ της κατανομής Student, για $n=11$ δείγματα, βαθμούς ελευθερίας $d=n-1=10$ και στάθμη εμπιστοσύνης $1-\alpha=99\%$:

$$t_{10,0.5\%} = 3,169$$

Η δειγματική μέση τιμή της πτώσης πίεσης:

$$\overline{\Delta P_1} = 2,69 \text{ atm}$$

Η δειγματική τυπική απόκλιση της πτώσης πίεσης:

$$S_{\Delta P_1} = 0,05 \text{ atm}$$

Η τυπική απόκλιση της πτώσης πίεσης είναι:

$$\sigma_{\Delta P_1} = 0,05 \text{ atm}$$

$$\Delta P_1 = 2,69 \pm 0,05 \text{ atm}$$

Ο εκτιμητής του διαστήματος εμπιστοσύνης της μέσης τιμής της πτώσης πίεσης που προκαλεί η παροχή $Q=7 \text{ ml/min}$ είναι η $\Delta P_2(\text{atm})$. Από το στατιστικό πίνακα αθροιστικής πιθανότητας των κρίσιμων τιμών, η τυχαία μεταβλητή $t^{[36]}$ της κατανομής Student, για $n=7$ δείγματα, βαθμούς ελευθερίας $d=n-1=6$ και στάθμη εμπιστοσύνης $1-\alpha=99\%$:

$$t_{6,0.5\%} = 3,707$$

Η δειγματική μέση τιμή της πτώσης πίεσης:

$$\overline{\Delta P_2} = 3,58 \text{ atm}$$

Η δειγματική τυπική απόκλιση της πτώσης πίεσης:

$$S_{\Delta P_2} = 0,01 \text{ atm}$$

Η τυπική απόκλιση της πτώσης πίεσης, $\sigma_{\Delta P_2}(\text{atm})$ είναι:

$$\sigma_{\Delta P_2} = 0,02 \text{ atm}$$

$$\Delta P_2 = 3,58 \pm 0,02 \text{ atm}$$

Ο εκτιμητής του διαστήματος εμπιστοσύνης της μέσης τιμής της πτώσης πίεσης που προκαλεί η παροχή $Q=10 \text{ ml/min}$ είναι η $\Delta P_3(\text{atm})$. Από το στατιστικό πίνακα αθροιστικής πιθανότητας των κρίσιμων τιμών, η τυχαία μεταβλητή $t^{[36]}$ της κατανομής Student, για $n=10$ δείγματα, βαθμούς ελευθερίας $d=n-1=9$ και στάθμη εμπιστοσύνης $1-\alpha=99\%$:

$$t_{9,0.5\%} = 3,250$$

Η δειγματική μέση τιμή της πτώσης πίεσης:

$$\overline{\Delta P_3} = 5,21 \text{ atm}$$

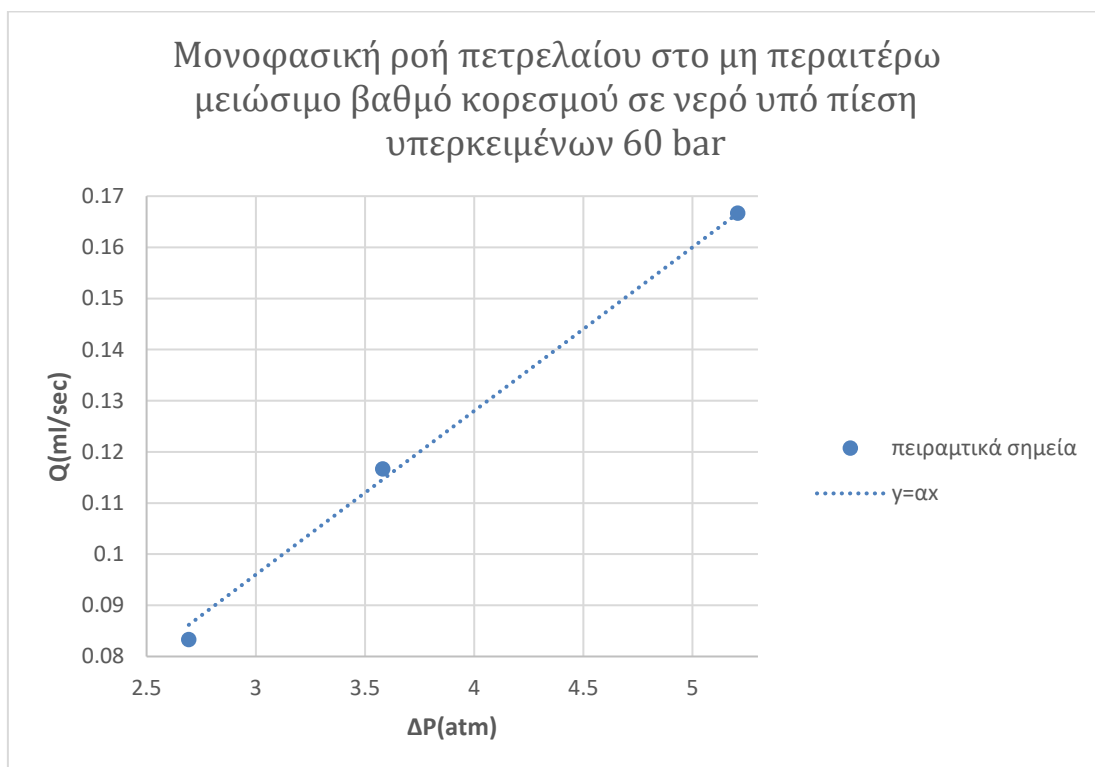
Η δειγματική τυπική απόκλιση της πτώσης πίεσης:

$$S_{\Delta P_3} = 0,01 \text{ atm}$$

Η τυπική απόκλιση της πτώσης πίεσης, $\sigma_{\Delta P_3} \text{ (atm)}$ είναι:

$$\sigma_{\Delta P_3} = 0,01 \text{ atm}$$

$$\Delta P_3 = 5,21 \pm 0,01 \text{ atm}$$



Διάγραμμα 4. 13: Παροχή πετρελαίου συναρτήσει της πτώσης πίεσης υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.

Με εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων (διάγραμμα 4.13) στα πειραματικά σημεία :

$$y = ax \quad (4.55)$$

Η τιμή της παραμέτρου:

$$a = 0,0329 \text{ ml/atm} \cdot \text{sec}$$

Η τυπική απόκλιση της παραμέτρου:

$$\sigma_a = 0,00174 \text{ ml/atm} \cdot \text{sec}$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι:

$$R^2 = 0,997$$

Από τη κλίση της σχέσης 4.55, μέσω του νόμου του Darcy καθίσταται εφικτός ο υπολογισμός της ενεργής διαπερατότητας του δοκιμίου σε πετρέλαιο στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό, $K_{eo@Swi}(mD)$:

$$Q = \frac{K_{eo@Swi} A}{1000 \mu_o L} \Delta P \quad (4.56)$$

$Q(\text{ml/sec})$: Παροχή πετρελαίου.

$\Delta P(\text{atm})$: Πτώση πίεσης της ροής.

$\mu_o(cP)$: Δυναμικό ιξώδες του πετρελαίου.

$A(\text{cm}^2)$: Εμβαδόν διατομής του δοκιμίου.

$L(\text{cm})$: Μήκος του δοκιμίου.

Το δυναμικό ιξώδες του πετρελαίου, σε θερμοκρασία 20°C είναι $\mu_o = 0,386 \text{ cP}$.

$$K_{eo@Swi} = 11,9 \text{ mD}$$

Οι διαπερατότητα του πετρώματος σε πετρέλαιο στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό, θα πρέπει να είναι μικρότερη από τη μέγιστη διαπερατότητα του σε νερό υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar, διότι στην πρώτη περίπτωση υπάρχει ένας σημαντικός όγκος κενών ο οποίος περιέχει νερό σε ακινησία, ενώ στη δεύτερη περίπτωση το νερό στους πόρους σε ακινησία θα βρίσκεται σε μικρότερο ποσοστό επί του πορώδους, γιατί η δεύτερη τιμή βρίσκεται εγγύτερα της διορθωμένης διαπερατότητας σε αέρα. Η διέλευση του εξανίου στους μεγαλύτερους πόρους, θα αντικαταστήσει το εξωτερικό στρώμα του νερού με

αποτέλεσμα να σταματήσει η ιοντοανταλλαγή, επειδή το εξάνιο είναι μη πολικό ρευστό και το ωσμωτικό φαινόμενο θα είναι αμελητέο. Λόγω της υδατοδιαβρεχτότητας του πετρώματος (Κεφάλαιο 5), αναμένεται να μην εξαλείφεται πλήρως στους μεγάλους πόρους. Στη συνέχεια, θα διερευνηθεί υπό υψηλότερες παροχές, το ενδεχόμενο, η επίδραση του ωσμωτικού φαινομένου να είναι σημαντικά μεγαλύτερη στους μικρότερους πόρους. Για πτώση πίεσης μέχρι τις 5 atm, το πετρέλαιο δεν εκτοπίζει από τους μικρούς πόρους το νερό που δεσμεύεται λόγω του φαινομένου του διπλού στρώματος. Τα παραπάνω υποδεικνύονται, από το γεγονός ότι η ενεργή διαπερατότητα είναι σταθερή, διότι τα πειραματικά σημεία ακολουθούν το νόμο του Darcy.

Στη συνέχεια το δοκίμιο ζυγίστηκε. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε, αλλά χωρίς να αφαιρεθεί ο αέρας από το δοκίμιο. Δηλαδή, στο δοκίμιο εφαρμόστηκε παροχή πετρελαίου, δίχως να ξηρανθεί, να κορεστεί πλήρως σε νερό και έπειτα να κορεστεί σε πετρέλαιο έως το μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό. Θα ελεγχθεί εάν είναι δυνατόν να απομακρυνθεί ο περισσότερος όγκος αέρα, εκτοπιζόμενος από το πετρέλαιο. Επιπλέον λόγω της πτητικότητας του εξανίου, το δοκίμιο θα τυλίγεται με ζελατίνη κατά τη ζύγισή του. Η μάζα της ζελατίνης είναι $m_{\text{ζελ}}=0,5514 \text{ gr}$.

Για να μειωθούν τα σφάλματα που υπεισέρχονται κατά τη ζύγιση, ο όγκος κενών θα υπολογιστεί με βάση το πορώδες της κατανομής μεγέθους πόρων:

$$PV = LA\Phi \quad (4.57)$$

$$PV = 4,420 \text{ cm}^3$$

Με εφαρμογή της εξίσωσης 4.5:

m_{rock+fluid}(gr)	S_{wi}(%)	τρόπος ζύγισης
55,2624	64,0	χωρίς αέρα
55,1575	56,5	με αέρα
55,2362	62,2	με αέρα
55,2073	60,1	με αέρα
55,2431	62,7	με αέρα
55,1848	58,5	με αέρα

Πίνακας 4. 9: Ζύγιση κορεσμένου δοκιμίου υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar σε πετρέλαιο στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό.

Οι τιμές του S_{wi} (πίνακας 4.9), ακολουθούν τη κανονική κατανομή επειδή τα σφάλματα μέτρησης είναι τυχαία, οπότε για $n=6$ δείγματα, θα προσεγγιστεί η τιμή του βαθμού κορεσμού με τη κατανομή Student. Από το στατιστικό πίνακα αθροιστικής πιθανότητας των κρίσιμων τιμών, η τυχαία μεταβλητή t ^[36] της κατανομής Student, για $n=6$ δείγματα, βαθμούς ελευθερίας $d=n-1=5$ και στάθμη εμπιστοσύνης $1-\alpha=99\%$:

$$t_{15,0.5\%} = 4,032$$

Η δειγματική μέση τιμή του S_{wi} :

$$\overline{S_{wi}} = 60,7 \%$$

Η δειγματική τιμή της τυπικής απόκλισης του S_{wi} :

$$S_{S_{wi}} = 2,8 \%$$

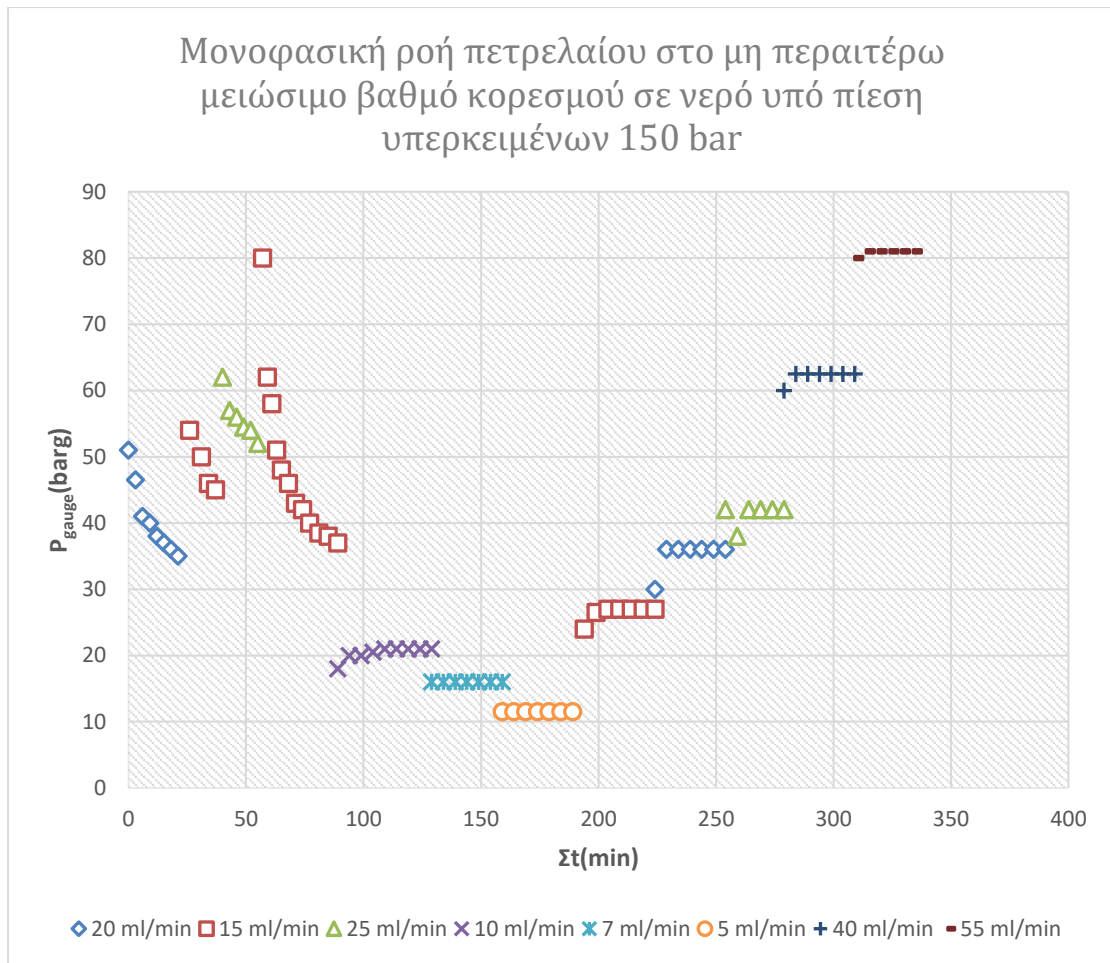
Η τυπική απόκλιση του πορώδους είναι:

$$\sigma_{S_{wi}} = 4,6 \%$$

$$S_{wi} = 60,7 \pm 4,6 \%$$

Ο μη περαιτέρω μειώσιμος βαθμός κορεσμού σε νερό είναι πολύ μεγάλος. Με χρήση υψηλότερων παροχών πετρελαίου θα γίνει έλεγχος, αν μπορούν να εξαλειφθούν τα τριχοειδή φαινόμενα σε πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Δοκιμές παροχής $Q=5-55$ ml/min, δοκιμάστηκαν έως να σταθεροποιηθούν οι μανομετρικές πιέσεις (Παράρτημα A.10):



Διάγραμμα 4. 14: Μανομετρική πίεση συναρτήσει του αθροιστικού χρόνου για κάθε παροχή πετρελαίου υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Οι τιμές των σταθεροποιημένων μανομετρικών πιέσεων (διάγραμμα 4.14):

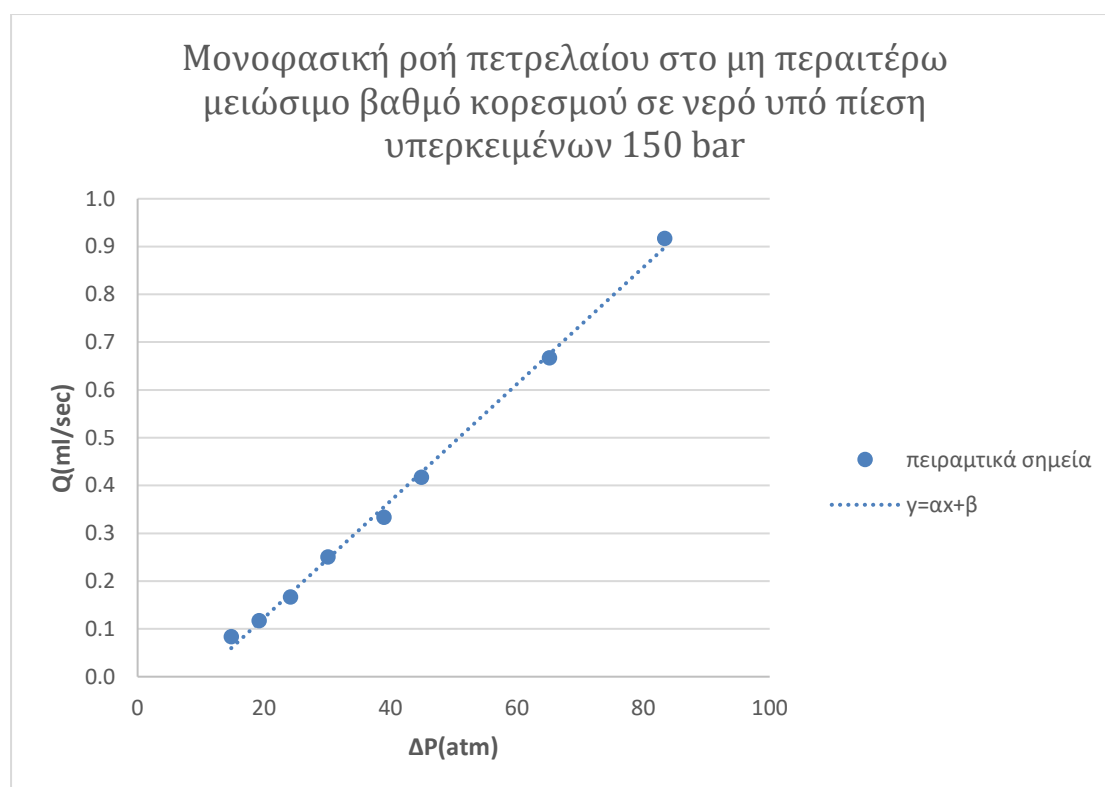
P_{gauge} (barg)	Σt (min)
21,0	109-129
16,0	129-159
11,5	159-189
27,0	204-224
36,0	229-254
42,0	259-279
62,5	284-309
81,0	314-334

Πίνακας 4. 10: Πίνακας σταθεροποιημένων μανομετρικών πιέσεων συναρτήσει του αθροιστικού χρόνου υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Οι ενεργές διαπερατότητες του πετρελαίου στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό (πίνακας 4.11), των σταθεροποιημένων τιμών (πίνακας 4.10), υπολογίζονται από το νόμο του Darcy:

Q(ml/sec)	$\Delta P(\text{atm})$	$K_{eo@Swi}(\text{mD})$
0,0833	14,8	2,03
0,1167	19,2	2,19
0,1667	24,2	2,49
0,2500	30,1	3,00
0,3333	39,0	3,09
0,4167	44,9	3,35
0,6667	65,1	3,70
0,9167	83,4	3,97

Πίνακας 4. 11: Παροχή συναρτήσει της σταθεροποιημένης πτώσης πίεσης και η ενεργή διαπερατότητα του πετρελαίου υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.



Διάγραμμα 4. 15: Παροχή πετρελαίου συναρτήσει της πτώση πίεσης υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Με εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων (διάγραμμα 4.15) στα πειραματικά σημεία:

$$y = ax + b \quad (4.58)$$

Οι τιμές των παραμέτρων:

$$a = 0,0122 \text{ ml/atm} \cdot \text{sec}$$

$$b = -0,121 \text{ ml/sec}$$

Οι τυπικές αποκλίσεις των παραμέτρων:

$$\sigma_a = 0,000264 \text{ ml/atm} \cdot \text{sec}$$

$$\sigma_b = 0,0121 \text{ ml/sec}$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι:

$$R^2 = 0,997$$

Οριακή πτώσης πίεση εκκίνησης της ροής:

$$TP = 9,93 \text{ atm}$$

Οι μετρήσεις της ενεργής διαπερατότητας του πετρελαίου στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό, υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar, είναι μεγαλύτερες από τη μέγιστη διαπερατότητα σε νερό, όσο η πίεση των πόρων βαίνει αυξανόμενη. Αφενός, η πίεση των πόρων ήταν αρκετά υψηλή, ώστε να αυξήσει τη διάμετρο των πόρων, διότι από τη πτώση πίεσης των 55 atm και άνωθεν η διαπερατότητα ήταν υψηλότερη της διορθωμένης διαπερατότητας σε αέρα υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar. Επιπλέον, οι πόροι παραμορφώνονται σε μεγαλύτερο βαθμό, άνωθεν των 60 bar της πίεσης των υπερκειμένων. Να σημειωθεί, πως λόγω της διαβρεχτότητας του πετρώματος, ένα σημαντικό ποσοστό του όγκου κενών θα καταλαμβάνεται από νερό. Αυτό σημαίνει, πως όταν η πίεση των πόρων ανέρχεται στις 80 atm, η απόλυτη διαπερατότητα του πετρώματος ξεπερνά τα 4 mD. Το γεγονός αυτό, επιβεβαιώνει ότι κατά τη μονοφασική ροή σε νερό υπάρχουν πόροι στους οποίους το νερό παραμένει ακίνητο, καθώς η διαπερατότητα σε νερό είναι 3 φορές μικρότερη της ενεργής διαπερατότητας του πετρελαίου υπό πίεση πόρων 80 atm.

Η υψηλότερη τιμή της ογκομετρικής παροχής των 55 ml/min, εφαρμόστηκε κατά τη μονοφασική ροή πετρελαίου, πίεσης υπερκειμένων 150 bar. Ο αριθμός Reynolds, θα υπολογιστεί στη συνέχεια για να διερευνηθεί αν διατηρήθηκε στρωτή η ροή. Παρατηρείται, πως για

παροχές μεγαλύτερες των 25 ml/min, η διορθωμένη διαπερατότητα σε αέρα προσεγγίζει ικανοποιητικά τη διαπερατότητα σε πετρέλαιο. Οι Tang, Tao και He^[59], προσδιόρισαν μία σταθερή ακτίνα, $R(m)$ ομοιόμορφων κυλινδρικών τριχοειδών με τη διεύθυνση της ροής να πραγματοποιείται κάθετα της διατομής τους.

$$K_l = \frac{N\pi R^4}{8A} \quad (4.59)$$

$K_l(m^2)$: διορθωμένη διαπερατότητα του αέρα.

$R(m)$: Ακτίνα τριχοειδών.

N : Πλήθος τριχοειδών που απαρτίζουν το δοκίμιο.

$A(m^2)$: εμβαδόν διατομής δοκιμίου.

Το σύνολο της διατομής των τριχοειδών ισούται με τη διατομή του δοκιμίου:

$$N\pi R^2 = \Phi A \quad (4.60)$$

Από τις σχέσεις 4.59 και 4.60:

$$K_l = \frac{\Phi R^2}{8} \quad (4.61)$$

Η διορθωμένη διαπερατότητα σε αέρα της σχέσης 4.61 ισούται με τη διαπερατότητα Buckingham-Reiner, υπό υψηλές τιμές της πτώσης πίεσης (4.53).

$$R = 0.385 \mu m$$

Ο αριθμός Reynolds (1.16):

$$Re = 0,0065 \ll 1$$

Η παροχή της κάθε φάσης, αλλά και η συνολική παροχή διατηρήθηκε πολύ χαμηλότερα από 55 ml/min, άρα η ροή διατηρήθηκε ως στρωτή και κατά τη διφασική ροή νερού και πετρελαίου.

Με τη μέθοδο της ζύγισης υπολογίστηκε ο μη περαιτέρω μειώσιμος βαθμός κορεσμού σε νερό:

$m_{\text{ελ}}(\text{gr})$	$m_{\text{rock+fluid}}(\text{gr})$	$S_{\text{wi}}(\%)$	τρόπος ζύγισης
0,9653	54,8124	31,8	χωρίς αέρα
0,6417	54,8325	33,3	με αέρα
0,6417	54,8982	38,0	με αέρα
0,6417	54,7915	30,3	με αέρα
0,6417	54,8213	36,2	με αέρα
0,6333	54,7507	27,4	με αέρα

Πίνακας 4. 12: Βάρος ζελατίνης, κορεσμένου δοκιμίου και μη περαιτέρω μειώσιμος βαθμός κορεσμού σε νερό με αέρα ή χωρίς υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Οι τιμές του S_{wi} (πίνακας 4.12), ακολουθούν τη κανονική κατανομή επειδή τα σφάλματα μέτρησης είναι τυχαία, οπότε για $n=6$ δείγματα, θα προσεγγιστεί η τιμή του βαθμού με τη κατανομή Student. Από το στατιστικό πίνακα αθροιστικής πιθανότητας των κρίσιμων τιμών, η τυχαία μεταβλητή $t^{[36]}$ της κατανομής Student, για $n=6$ δείγματα, βαθμούς ελευθερίας $d=n-1=5$ και στάθμη εμπιστοσύνης $1-\alpha=99\%$:

$$t_{5,0.5\%} = 4,032$$

Η δειγματική μέση τιμή του S_{wi} :

$$\overline{S_{\text{wi}}} = 32,8 \%$$

Η δειγματική τιμή της τυπικής απόκλισης του S_{wi} :

$$S_{S_{\text{wi}}} = 3,9 \%$$

Η τυπική απόκλιση του πορώδους είναι:

$$\sigma_{S_{\text{wi}}} = 6,4 \%$$

$$S_{\text{wi}} = 32,8 \pm 6,4 \%$$

Τα τριχοειδή φαινόμενα στην εκροή ελαχιστοποιούνται σύμφωνα με τις μέγιστη πτώση πίεσης που μπορεί να εφαρμοστεί στο μανόμετρο, λόγω υψηλών παροχών σε πετρέλαιο. Το σχετικό σφάλμα του μη περαιτέρω μειώσιμου βαθμού κορεσμού σε νερό για μικρές παροχές πετρελαίου (υπό 60 bar πίεσης υπερκειμένων) είναι 85,1% του μη περαιτέρω μειώσιμου βαθμού κορεσμού σε νερό για υψηλές παροχές πετρελαίου (υπό 150 bar πίεσης υπερκειμένων).

Θα πρέπει επίσης να διερευνηθεί ποιοτικά ο βαθμός της απόδοσης του εκτοπισμού κατά την αποστράγγιση. Με βάση τις σχέσεις 1.21 και 1.20, ο λογάριθμος του λόγου των ιξωδών φάσεων, $\log M$ και ο λογάριθμος του τριχοειδούς αριθμού, $\log C$ κατά τη παροχή 55 ml/min πετρελαίου:

$$\log M = -0,413$$

$$\log C = -4,12$$

Η ροή βρίσκεται στο όριο εντός της τριχοειδούς ζώνης με τη μεταβατική ζώνη (εικόνα 1.7). Άρα οι ιξώδεις δυνάμεις των δύο ρευστών είναι μικρότερες από τις τριχοειδείς στους μικρότερους πόρους. Ο μη ανακτήσιμος όγκος κενών σε νερό, θα θεωρηθεί μικρός, καθώς η ροή βρίσκεται κοντά στη μεταβατική ζώνη.

Ο λογάριθμος του τριχοειδούς αριθμού, κατά τη παροχή 5 ml/min πετρελαίου:

$$\log C = -5,16$$

Αυτό σημαίνει πως η ανακτησιμότητα του νερού βελτιώνεται ελάχιστα σε μικρές παροχές όπως φαίνεται στην εικόνα 1.7. Το αντίθετο αποτέλεσμα παρατηρείται όμως κοντά στην εκροή, διότι αποδείχτηκε πως τα τριχοειδή φαινόμενα στην εκροή ελαχιστοποιούνται υπό υψηλές παροχές.

Οι Tang και Kovscek^[62] έδειξαν πως ο βαθμός της απόδοσης του εκτοπισμού κατά τον εμποτισμό διατάρασσε σε μικρό βαθμό το μέτωπο της εκτόπισης του πετρελαίου από την άλμη, σε ψαμμίτη Berea. Ο μη ανακτήσιμος όγκος κενών σε άλμη αυξάνεται με την αύξηση της παροχής της εκτοπίζουσας φάσης (άλμη) και την αύξηση του δυναμικού ιξώδους της εκτοπιζόμενης φάσης (πετρέλαιο).

4.3. Σχετικές διαπερατότητες νερού και πετρελαίου συναρτήσει του βαθμού κορεσμού σε νερό.

Η καμπύλη της απορρόφησης που ακολουθούν οι σχετικές διαπερατότητες του νερού και του πετρελαίου συναρτήσει του βαθμού κορεσμού σε νερό, οδηγούν σε πτώση της πίεσης του ταμιευτήρα. Οι διαπερατότητες επηρεάζονται από τη πίεση των πόρων. Στη παρούσα τεχνική έκθεση θα επιλεγθούν πιέσεις, για τις οποίες η διαπερατότητα βάσης θα μεταβάλλεται ελάχιστα, ώστε οι ενεργές διαπερατότητες των ρευστών, να υπολογιστούν σε μία πίεση πόρων περίπου 80 atm και πίεσης υπερκειμένων 150 bar.

Από τις σχέσεις 4.7-4.10 το πρώτο τελικό σημείο της καμπύλης των σχετικών διαπερατοτήτων:

$$K_{base} = K_{eo@S_{wi}}(83,4) = 3,97 \text{ mD}$$

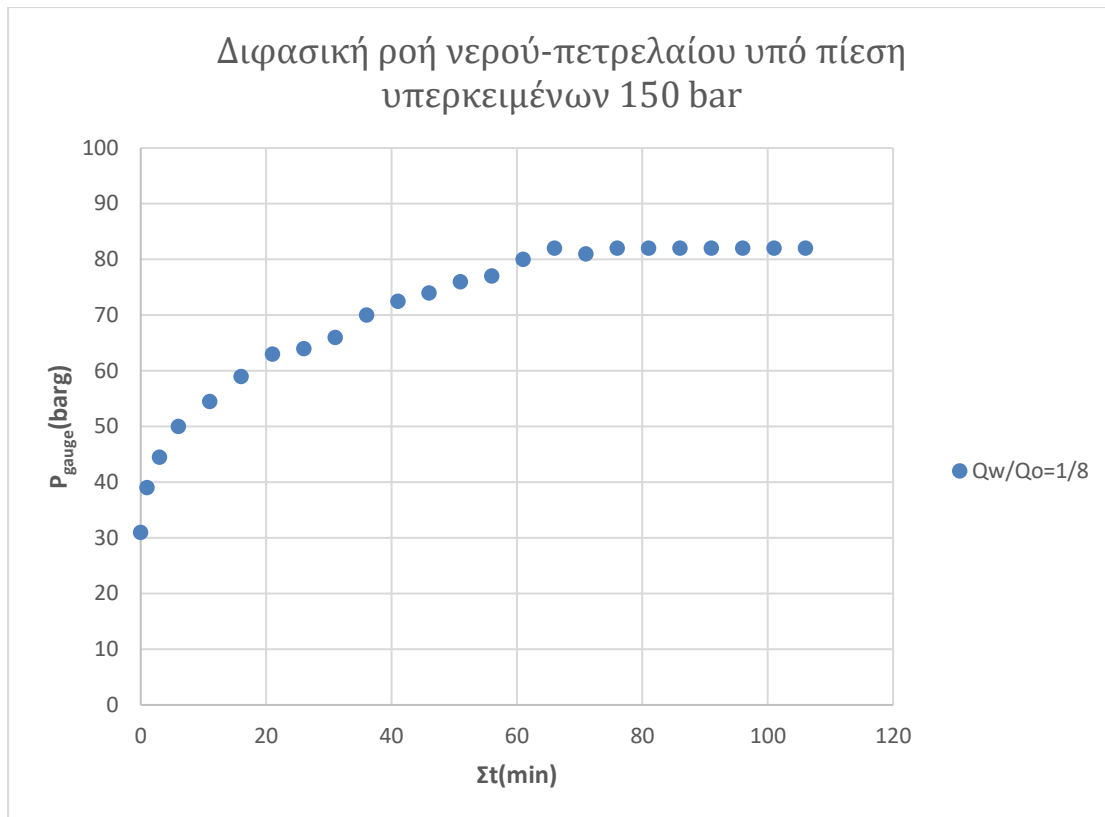
$$K_{ew@S_{wi}}(80) = 0 \text{ mD}$$

$$K_{ro@S_{wi}} = 1$$

$$K_{rw@S_{wi}} = 0$$

$$S_{wi} = 32,8 \%$$

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που αναφέρθηκε προηγουμένως, αναμένεται να σταθεροποιηθεί η μανομετρική πίεση στο πρώτο ενδιάμεσο σημείο (Παράρτημα A.11) για λόγο παροχών $\frac{Q_w}{Q_o} = \frac{1}{8}$. Το παροχόμετρο έχει αρνητική απόκλιση $P_{offset} = -4 \text{ barg}$. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.16:



Διάγραμμα 4. 16: Μανομετρική πίεση συναρτήσει του αθροιστικού χρόνου για το πρώτο ενδιάμεσο σημείο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar

Η μανομετρική πίεση, παροχής $Q_o=6$ ml/min και $Q_w=0,75$ ml/min, σταθεροποιήθηκε στο χρονικό διάστημα 76-106 min. Η πτώση πίεσης σταθεροποιήθηκε στα 84,9 atm. Από τις σχέσεις 4.11-4.14:

$$K_{eo@S_{w1}}(84,9) = 0,425 \text{ mD}$$

$$K_{ew@S_{w1}}(84,9) = 0,14 \text{ mD}$$

Οι σχετικές διαπερατότητες του νερού και του πετρελαίου:

$$K_{ro@S_{w1}} = 0,107$$

$$K_{rw@S_{w1}} = 0,035$$

Ο βαθμός κορεσμού σε νερό (πίνακας 4.13) υπολογίστηκε με τη μέθοδο της ζύγισης:

$m_{\text{ζελ}}(\text{gr})$	$m_{\text{rock+fluid}}(\text{gr})$	$S_{w1}(\%)$	τρόπος ζύγισης
0,6335	54,9691	43,0	με αέρα
0,6335	54,9006	38,1	χωρίς αέρα
0,7388	54,9629	42,6	χωρίς αέρα
0,7388	54,9991	45,2	χωρίς αέρα
0,7388	54,9946	44,9	χωρίς αέρα
0,7388	54,9662	42,8	χωρίς αέρα

Πίνακας 4. 13: Βάρος ζελατίνης, κορεσμένου δοκιμίου και βαθμός κορεσμού σε νερό του πρώτου ενδιάμεσου σημείου με αέρα ή χωρίς υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Οι τιμές του S_{w1} ακολουθούν τη κανονική κατανομή επειδή τα σφάλματα μέτρησης είναι τυχαία, οπότε για $n=6$ δείγματα, θα προσεγγιστεί η τιμή του βαθμού κορεσμού με τη κατανομή Student. Από το στατιστικό πίνακα αθροιστικής πιθανότητας των κρίσιμων τιμών, η τυχαία μεταβλητή t ^[36] της κατανομής Student, για $n=6$ δείγματα, βαθμούς ελευθερίας $d=n-1=5$ και στάθμη εμπιστοσύνης $1-\alpha=99\%$:

$$t_{5,0.5\%} = 4,032$$

Η δειγματική μέση τιμή του S_{w1} :

$$\overline{S_{w1}} = 42,8 \%$$

Η δειγματική τιμή της τυπικής απόκλισης του S_{wi} :

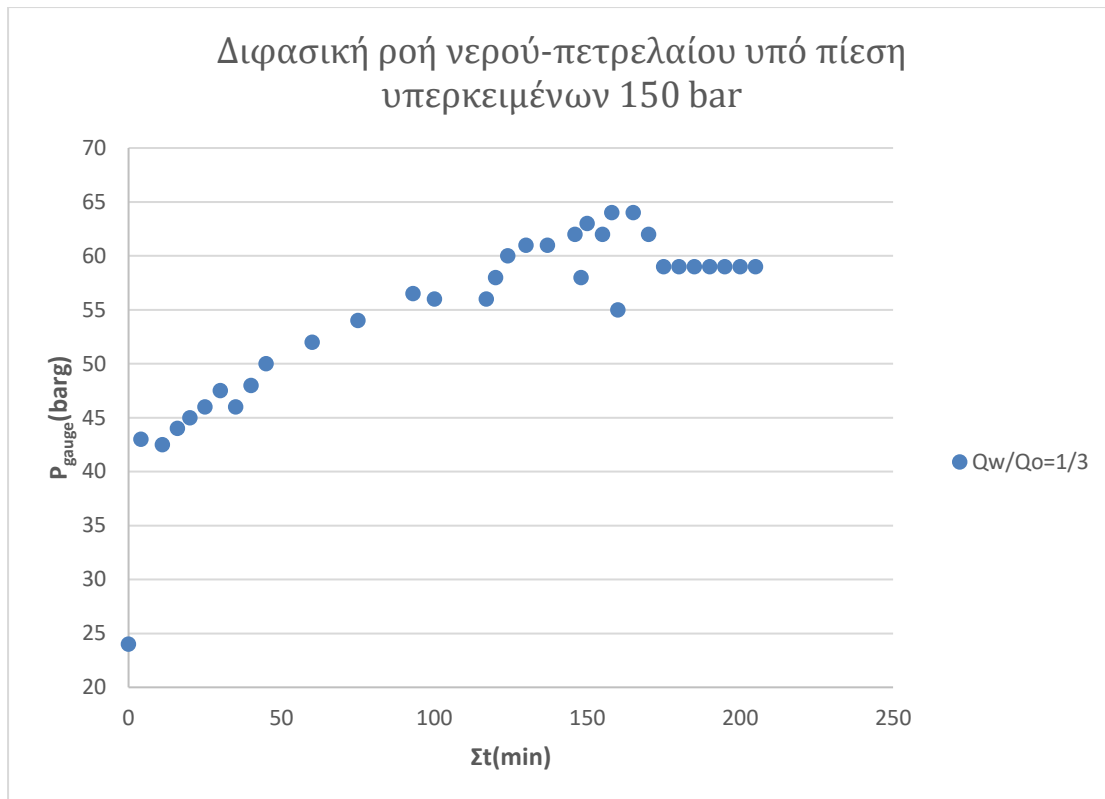
$$S_{S_{wi}} = 2,5 \%$$

Η τυπική απόκλιση του πορώδους είναι:

$$\sigma_{S_{w1}} = 4,2 \%$$

$$S_{w1} = 42,8 \pm 4,2 \%$$

Αναμένεται να σταθεροποιηθεί η μανομετρική πίεση στο δεύτερο ενδιάμεσο σημείο (Παράρτημα A.12) για λόγο παροχών $\frac{Q_w}{Q_o} = \frac{1}{3}$. Το παροχόμετρο έχει αρνητική απόκλιση $P_{\text{offset}} = -3,5 \text{ barg}$. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.17:



Διάγραμμα 4. 17: Μανομετρική πίεση συναρτήσει του αθροιστικού χρόνου για το δεύτερο ενδιάμεσο σημείο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Η μανομετρική πίεση, παροχής $Q_o=3$ ml/min και $Q_w=1$ ml/min, σταθεροποιήθηκε στο χρονικό διάστημα 175-205 min. Η πτώση πίεσης σταθεροποιήθηκε στις 61,7 atm. Από τις σχέσεις 4.11-4.14:

$$K_{eo@S_{w2}}(61,7) = 0,293 \text{ mD}$$

$$K_{ew@S_{w2}}(61,7) = 0,253 \text{ mD}$$

Θα ελεγχθεί, επίσης η ενεργή διαπερατότητα της κάθε φάσης, αφού ζυγιστεί, δηλαδή παρουσία αέρα, ώστε να διαπιστωθεί αν η εκτόπιση της μεγαλύτερης ποσότητας του αέρα θα επηρεάσει τις διαπερατότητες. Επαναλαμβάνεται το πείραμα με τις ίδιες παροχές ρευστών. Η πτώση πίεσης σταθεροποιείται στις 92,3 atm. Οι ενεργές διαπερατότητες:

$$K_{eo@S_{w2}}(92,3) = 0,196 \text{ mD}$$

$$K_{ew@S_{w2}}(92,3) = 0,169 \text{ mD}$$

Πράγματι η παρουσία του αέρα επηρεάζει σημαντικά τις διαπερατότητες των δύο φάσεων. Η ενεργή διαπερατότητα του πετρελαίου παρουσία αέρα είναι το 66.9% της ενεργής διαπερατότητα του πετρελαίου απουσία αέρα. Η διαπερατότητα μειώνεται. Το ίδιο παρατηρείται και με τις ενεργές διαπερατότητες του νερού, με τον αντίστοιχο λόγο τους να ανέρχεται στο 66.8% αντίστοιχα.

Το σχετικό σφάλμα της $K_{eo@S_{wi}}(65,1)$ είναι 6,89% της διαπερατότητας βάσης. Η σταθεροποίηση των εγγεόμενων παροχών σε πετρέλαιο και νερό, απαιτούσε πολύ χρόνο για να επιτευχθεί σε πίεση πόρων 80 atm, οπότε το σφάλμα αυτό θα θεωρηθεί ότι θα υπερεκτιμήσει ελάχιστα τις σχετικές διαπερατότητες των δύο φάσεων.

Οι σχετικές διαπερατότητες του νερού και του πετρελαίου:

$$K_{ro@S_{w2}}(61,7) = 0,0731$$

$$K_{rw@S_{w2}}(61,7) = 0,0631$$

Ο βαθμός κορεσμού σε νερό του δεύτερου ενδιάμεσου σημείου στον πίνακα 4.14:

m_{ζελ}(gr)	m_{rock+fluid}(gr)	S_{w2}(%)	τρόπος ζύγισης
0,9652	55,07	50,3	χωρίς αέρα
1,076	54,9303	40,3	χωρίς αέρα
0,7366	55,0072	45,8	με αέρα
0,7366	54,9851	44,2	με αέρα
0,7366	55,0104	46,0	με αέρα

Πίνακας 4. 14: Βάρος ζελατίνης, κορεσμένου δοκιμίου και βαθμός κορεσμού σε νερό του δεύτερου ενδιάμεσου σημείου με αέρα ή χωρίς υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Οι τιμές του S_{w2} ακολουθούν τη κανονική κατανομή επειδή τα σφάλματα μέτρησης είναι τυχαία, οπότε για n=5 δείγματα, θα προσεγγιστεί η τιμή του βαθμού κορεσμού με τη κατανομή Student. Από το στατιστικό πίνακα αθροιστικής πιθανότητας των κρίσιμων τιμών, η τυχαία μεταβλητή t ^[36] της κατανομής Student, για n=5 δείγματα, βαθμούς ελευθερίας d=n-1=4 και στάθμη εμπιστοσύνης 1-α=99%:

$$t_{4,0.5\%} = 4,604$$

Η δειγματική μέση τιμή του S_{w2} :

$$\overline{S_{w2}} = 45,3 \%$$

Η δειγματική τιμή της τυπικής απόκλισης του S_{w2} :

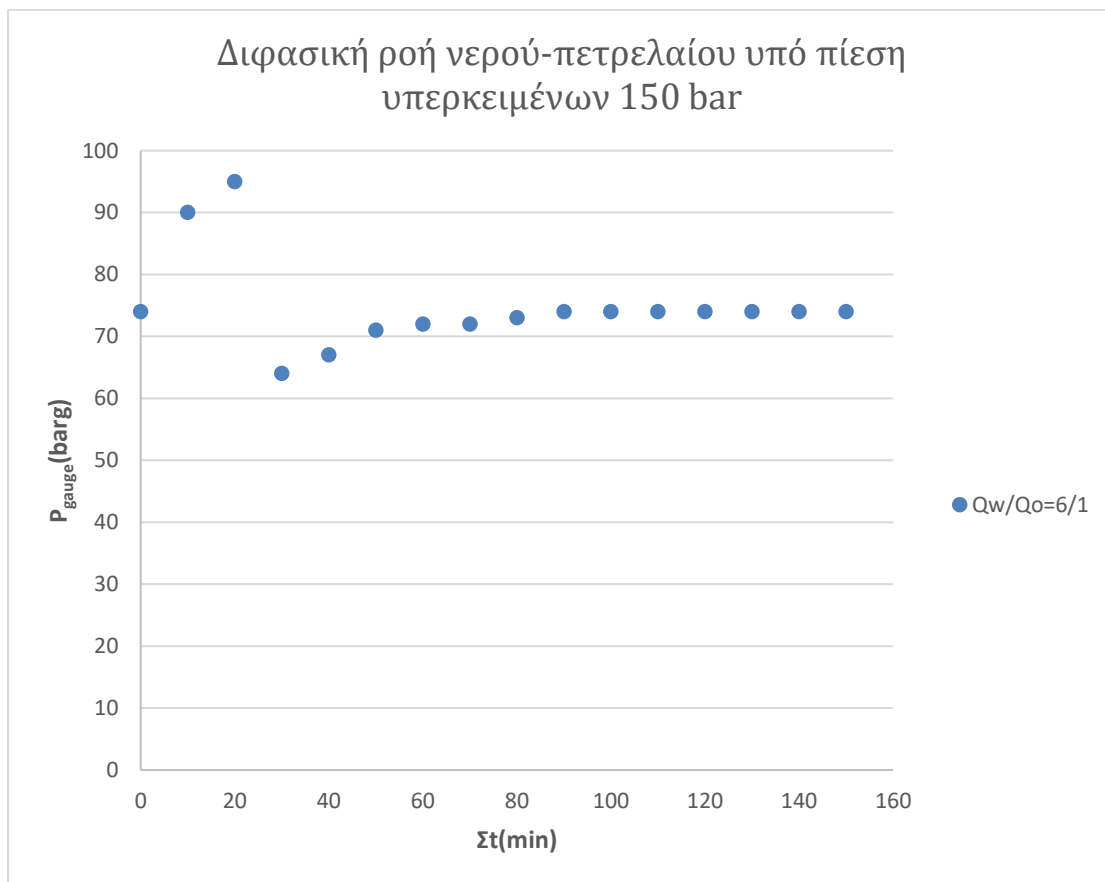
$$S_{S_{w2}} = 3,6 \%$$

Η τυπική απόκλιση του πορώδους είναι:

$$\sigma_{S_{w2}} = 7,4 \%$$

$$S_{w2} = 45,3 \pm 7,4 \%$$

Στη συνέχεια, η παροχή του νερού ρυθμίζεται στα $Q_w=3$ ml/min και η παροχή του πετρελαίου, $Q_o=0,5$ ml/min. Η μανομετρική πίεση σταθεροποιήθηκε στα 74 barg σε χρονικό διάστημα 90-150 min (Παράρτημα A.13). Η μανομετρική απόκλιση ήταν $P_{\text{offset}}=-4$ barg. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.18:



Διάγραμμα 4. 18: Μανομετρική πίεση συναρτήσει του αθροιστικού χρόνου για το τρίτο ενδιάμεσο σημείο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Η πτώση πίεσης σταθεροποιήθηκε στις 61,7 atm. Από τις σχέσεις 4.11-4.14:

$$K_{eo@S_{w3}}(77,0) = 0,039 \text{ mD}$$

$$K_{ew@S_{w3}}(77,0) = 0,608 \text{ mD}$$

Οι σχετικές διαπερατότητες του νερού και του πετρελαίου:

$$K_{ro@S_{w3}} = 0,010$$

$$K_{rw@S_{w3}} = 0,153$$

Ο βαθμός κορεσμού σε νερό του τρίτου ενδιάμεσου σημείου:

m_{ζελ}(gr)	m_{rock+fluid}(gr)	S_{w3}(%)	τρόπος ζύγισης
0,7361	55,1231	54,1	χωρίς αέρα
0,7361	55,0802	51,0	με αέρα
0,7361	55,0484	48,7	με αέρα
0,7361	55,0706	50,3	με αέρα
0,7361	55,1052	52,8	με αέρα

Πίνακας 4. 15: Βάρος ζελατίνης, κορεσμένου δοκιμίου και βαθμός κορεσμού σε νερό του τρίτου ενδιάμεσου σημείου με αέρα ή χωρίς υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Οι τιμές του S_{w3} (Πίνακας 4.15) ακολουθούν τη κανονική κατανομή επειδή τα σφάλματα μέτρησης είναι τυχαία, οπότε για $n=5$ δείγματα, θα προσεγγιστεί η τιμή του βαθμού κορεσμού με τη κατανομή Student. Από το στατιστικό πίνακα αθροιστικής πιθανότητας των κρίσιμων τιμών, η τυχαία μεταβλητή $t^{[36]}$ της κατανομής Student, για $n=5$ δείγματα, βαθμούς ελευθερίας $d=n-1=4$ και στάθμη εμπιστοσύνης $1-\alpha=99\%$:

$$t_{4,0.5\%} = 4,604$$

Η δειγματική μέση τιμή του S_{w3} :

$$\overline{S_{w3}} = 51,4 \%$$

Η δειγματική τιμή της τυπικής απόκλισης του S_{w3} :

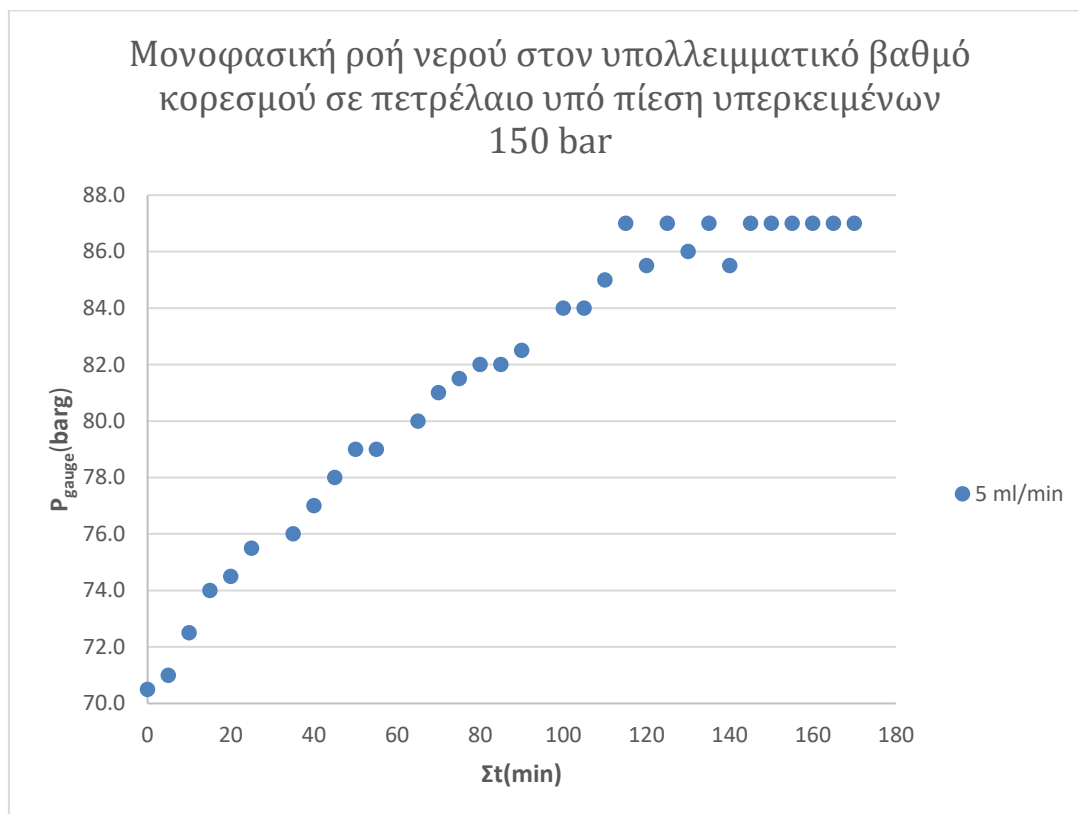
$$S_{S_{w3}} = 2,1 \%$$

Η τυπική απόκλιση του πορώδους είναι:

$$\sigma_{S_{w3}} = 4,3 \%$$

$$S_{w3} = 51,4 \pm 4,3 \%$$

Τέλος η παροχή του νερού ρυθμίζεται για το δεύτερο τελικό σημείο, $Q_w=5$ ml/min. Η μανομετρική απόκλιση ήταν $P_{\text{offset}}=-3,5$ barg. Η πίεση σταθεροποιήθηκε στα 87 barg (Παράρτημα A.14), στο χρονικό διάστημα 145-170 min (διάγραμμα 4.19)



Διάγραμμα 4. 19: Μανομετρική πίεση συναρτήσεως του αθροιστικού χρόνου για το δεύτερο τελικό σημείο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Η πτώση πίεσης σταθεροποιήθηκε στις 89,3 atm. Από τις σχέσεις 4.15-4.18:

$$K_{eo@S_{w3}}(89,3) = 0 \text{ mD}$$

$$K_{ew@S_{w3}}(89,3) = 0,865 \text{ mD}$$

Οι σχετικές διαπερατότητες του νερού και του πετρελαίου:

$$K_{ro@S_{w3}} = 0$$

$$K_{rw@S_{w3}} = 0,218$$

Ο βαθμός κορεσμού στο δεύτερο τελικό σημείο:

m_{ζελ}(gr)	m_{rock+fluid}(gr)	1-S_{or}(%)	τρόπος ζύγισης
0,7361	55,3088	67,4	χωρίς αέρα
0,7349	55,4051	74,3	με αέρα
0,7349	55,3729	72,0	με αέρα
0,7349	55,3340	69,2	με αέρα
0,7349	55,3185	68,1	με αέρα

Πίνακας 4. 16: Βάρος ζελατίνης, κορεσμένου δοκιμίου και βαθμός κορεσμού σε νερό του δεύτερου τελικού σημείου με αέρα ή χωρίς υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Οι τιμές του $1 - S_{or}$ (πίνακα 4.16) ακολουθούν τη κανονική κατανομή επειδή τα σφάλματα μέτρησης είναι τυχαία, οπότε για $n=5$ δείγματα, θα προσεγγιστεί η τιμή του βαθμού κορεσμού με τη κατανομή Student. Από το στατιστικό πίνακα αθροιστικής πιθανότητας των κρίσιμων τιμών, η τυχαία μεταβλητή $t^{[36]}$ της κατανομής Student, για $n=5$ δείγματα, βαθμούς ελευθερίας $d=n-1=4$ και στάθμη εμπιστοσύνης $1-\alpha=99\%$:

$$t_{4,0.5\%} = 4,604$$

Η δειγματική μέση τιμή του $1 - S_{or}$:

$$\overline{1 - S_{or}} = 70,2 \%$$

Η δειγματική τιμή της τυπικής απόκλισης του $1 - S_{or}$:

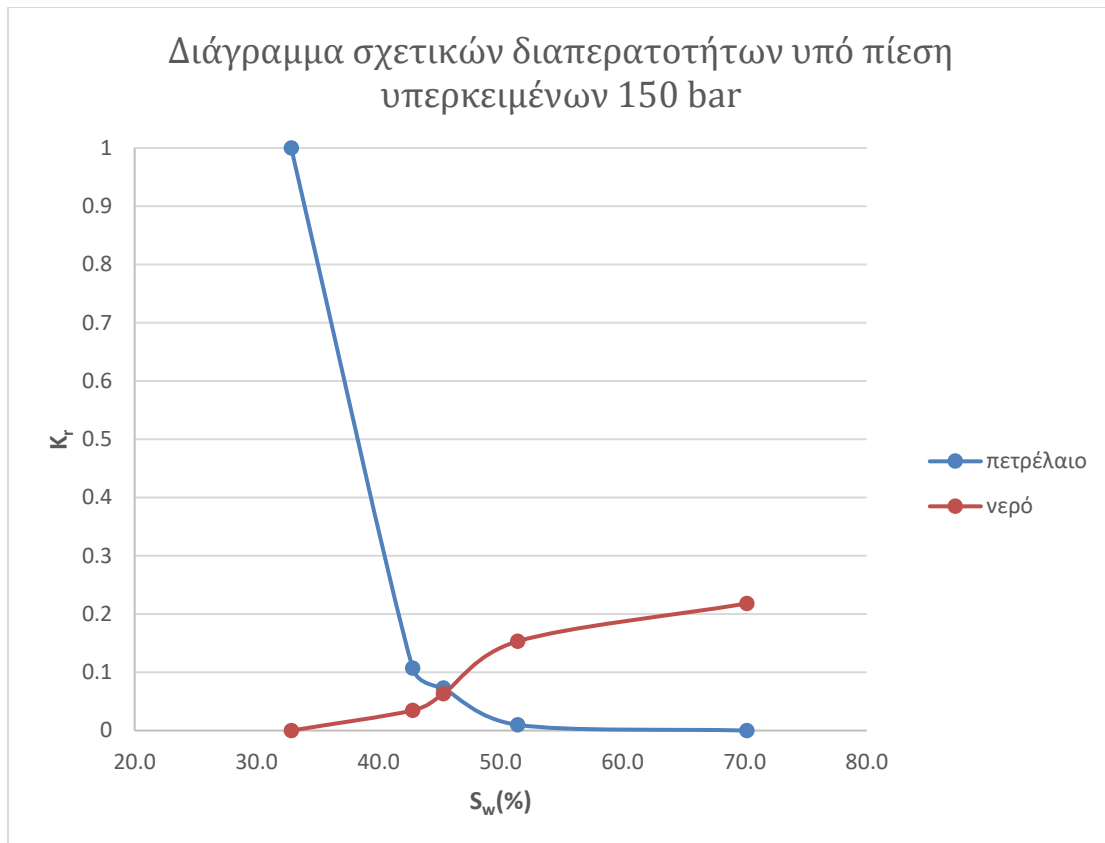
$$S_{1-S_{or}} = 2,9 \%$$

Η τυπική απόκλιση του $1 - S_{or}$ είναι:

$$\sigma_{1-S_{or}} = 5,9 \%$$

$$1 - S_{or} = 70,2 \pm 5,9 \%$$

Το διάγραμμα 4.20 απεικονίζει τις σχετικές διαπερατότητες σε νερό και πετρέλαιο συναρτήσει του βαθμού κορεσμού σε νερό:



Διάγραμμα 4. 20: Σχετικές διαπερατότητες σε νερό και πετρέλαιο συναρτήσει του βαθμού κορεσμού σε νερό υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar

Κεφάλαιο 5: Διαβρεχτότητα

Η διαβρέχουσα φάση καταλαμβάνει τα τοιχώματα των πόρων. Άρα όλο και μεγαλύτερες ποσότητες της μη διαβρέχουσας φάσης θα διέρχονται, αυξανόμενης τις ακτίνας των πόρων και στους μικρότερους θα παραμείνουν μεγαλύτερες ποσότητες της διαβρέχουσας φάσης. Συνεπώς, η προτίμηση διαβροχής του πετρώματος επηρεάζει τις σχετικές διαπερατότητες σε νερό και πετρέλαιο συναρτήσει του βαθμού κορεσμού σε νερό.

5.1. Επίδραση του τρόπου διαβροχής στις σχετικές διαπερατότητες των ρευστών

Οι Owens και Archer^[63], έδειξαν πως για δεδομένο βαθμό κορεσμού σε νερό, η σχετική διαπερατότητα σε νερό ενός υδατοδιαβρεχτού πετρώματος είναι μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή για ένα πετρελαιοδιαβρεχτό. Η αύξηση της τάσης διαβροχής σε πετρέλαιο, προκαλεί την αύξηση της σχετικής διαπερατότητας σε νερό και τη μείωση της σε πετρέλαιο, άρα η αύξηση της τάσης διαβροχής σε νερό θα έχει το αντίστροφο αποτέλεσμα. Οι Forrest και Craig^[64], παρουσίασαν τα γενικά χαρακτηριστικά για τους δύο τύπους ταμιευτήρα, με βάση τις τιμές του βαθμού κορεσμού σε νερό και το σημείο τομής των καμπυλών, των σχετικών διαπερατοτήτων σε νερό και πετρέλαιο. Ο μη περαιτέρω μειώσιμος βαθμός κορεσμού σε νερό υδατοδιαβρεχτού πετρώματος είναι μεγαλύτερος του 20-25% και μικρότερος του 15% για ελαιοδιαβρεχτό πέτρωμα αντίστοιχα. Η τιμή που μετρήθηκε στο εργαστήριο είναι $S_{wi} = 32,8\%$. Οι σχετικές διαπερατότητες σε νερό και πετρέλαιο ισούνται για βαθμό κορεσμού σε νερό υψηλότερο του 50%, σε υδατοδιαβρεχτό πέτρωμα και μικρότερο του 50% για ελαιοδιαβρεχτό πέτρωμα αντίστοιχα. Η μέση τιμή του βαθμού κορεσμού σε νερό που εκτιμήθηκε βρίσκεται μεταξύ των δύο προτιμήσεων διαβροχής, $S_{w3} = 45,3\% \pm 7,4\%$. Άρα η μέτρηση αυτή δεν έχει την ακρίβεια που απαιτείται για να κριθεί η προτίμηση διαβροχής

του δοκιμίου. Η σχετική διαπερατότητα σε νερό στον υπολειμματικό βαθμό κορεσμού σε πετρέλαιο, υδατοδιαβρεχτού πετρώματος είναι μικρότερη του 0,3 και μεγαλύτερη του 0,5 σε ελαιοδιαβρεχτό πέτρωμα αντίστοιχα. Στο πείραμα μετρήθηκε 0,22. Η τιμή αυτή υποδεικνύει, πως η ενεργή διαπερατότητα του πετρελαίου στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό είναι πολύ μεγαλύτερη της ενεργής διαπερατότητας του νερού στον υπολειμματικό βαθμό κορεσμού σε πετρέλαιο. Συνεπώς, το πέτρωμα παρουσιάζει έντονη προτίμηση διαβροχής από το νερό σε σχέση με το πετρέλαιο.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Εν κατακλείδι, η ύπαρξη αργιλικών ορυκτών σε πετρώματα μικρής κατανομής μεγέθους πόρων, είναι ικανά να μειώσουν δραματικά τη διαπερατότητα του πετρώματος, λόγω της μετανάστευσης των αργιλικών σωματιδίων στους μικρότερους πόρους. Η επίδραση του φαινομένου του διπλού στρώματος μειώνεται με την αύξηση των παροχής του νερού ή την αύξηση της παροχής του πετρελαίου και του νερού (όταν ο λόγος των παροχών τους παραμένει σταθερός), την αύξηση της θερμοκρασίας, το ιοντικό σθένος των κατιόντων, των ηλεκτρολυτών του νερού και τη μετατόπιση της κατανομής μεγέθους των πόρων σε τιμές μεγαλύτερης διαμέτρου. Διαπιστώθηκε πως απαιτούνται υψηλές παροχές για να εξαλειφθούν τα τριχοειδή φαινόμενα στην εκροή. Τα ιξώδη και τριχοειδή δάχτυλα επηρεάζουν σε μικρό βαθμό την απόδοση της αποστράγγισης και του εμποτισμού.

Η παρούσα διπλωματική εργασία δε κατάφερε να εξηγήσει το λόγο που η διορθωμένη διαπερατότητα σε αέρα υπολογίζεται από την εξίσωση ολίσθησης 2^{ου} βαθμού σε πίεση υπερκειμένων 60 bar, ενώ στα 150 bar υπολογίζεται από την εξίσωση του Klinkenberg. Υπήρχαν επίσης ερευνητές, που τα ευρήματά τους ήρθαν σε σύγκρουση με το φαινόμενο του διπλού στρώματος, όπου η αύξηση του ιοντικού σθένους των κατιόντων της άλμης προκάλεσε τη μείωση της διαπερατότητας του πετρώματος. Τα ευρήματα αυτά έρχονται σε σύγκρουση με την αναφερόμενη βιβλιογραφία και χρήζουν μελλοντικής έρευνας.

Βιβλιογραφία

- [1] Ι. Ηλιόπουλος και Β. Ξανθοπούλου, *Προσδιορισμός Πορώδους & Ειδικής Επιφάνειας*, Πάτρα: Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών: Γεωεπιστήμες και περιβάλλον, Πανεπιστήμιο Πατρών, pp. 4-6.
- [2] Y. D. Abhijit, *Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties*, Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, LLC, 2013, pp. 19-23.
- [3] L. C. Graton και H. J. Fraser, «Systematic packing of spheres: with particular relation to porosity and permeability,» *The Journal of Geology*, τόμ. 43, αρ. 8, p. 805, Νοέμβριος-Δεκέμβριος 1935.
- [4] Ν. Βαρότσης, *Εκμετάλλευση Ταμιευτήρων*, Χανιά: Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2017, pp. 6-7.
- [5] Ν. Βαρότσης, *Εκμετάλλευση Ταμιευτήρων*, Χανιά: Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2017, pp. 57-59.
- [6] Ν. Βαρότσης, *Εκμετάλλευση Ταμιευτήρων*, Χανιά: Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2017, p. 66.
- [7] Ν. Βαρότσης, *Εκμετάλλευση ταμιευτήρων*, Χανιά: Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2017, pp. 59-60.
- [8] A. Kantzas, J. Bryan και S. Taheri, *Fundamentals of Fluid Flow in Porous Media*, Calgary, Alberta: PERM Inc., p. 63.
- [9] Y. D. Abhijit, *Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties*, Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, LCC, 2013, pp. 134-135.
- [10] P. A. Webb, *An Introduction To The Physical Characterization of Materials by Mercury Intrusion Porosimetry with Emphasis On Reduction And Presentation of Experimental Data*, Norcross, Georgia: Micromeritics Instrument Corp., 2001, pp. 1-23.
- [11] W. G. Anderson, «Wettability Literature Survey- Part 4: Effects of Wettability on Capillary Pressure,» *Journal of Petroleum Technology*, τόμ. 39, αρ. 10, pp. 1.283 - 1.300, Οκτώβριος 1987.
- [12] D. Bourdet, *Handbook of Petroleum Exploration and Production*, τόμ. 3, Elsevier, 2002, p. 6.
- [13] B. Massey, *Mechanics of Fluids*, London and New York: Taylor & Francis, 2006, pp. 35,239.

- [14] R. Lenormand, E. Touboul και C. Zarcone, «Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media,» *Journal of fluid mechanics*, τόμ. 189, pp. 165-187, 1988.
- [15] Y. D. Abhijit, *Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties*, Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, LLC, 2013, p. 39.
- [16] Y. D. Abhijit, *Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties*, Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, LLC, 2013, pp. 205-206.
- [17] Y. D. Abhijit, *Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties*, Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2013, pp. 244-245.
- [18] J. G. Richardson, J. K. Kerver, J. Hafford και J. Osoba, «Laboratory Determination of Relative Permeability,» *Journal of Petroleum Technology*, τόμ. 4, αρ. 08, pp. 187 - 196, Αύγουστος 1952.
- [19] J. S. Osoba, J. G. Richardson, J. K. Kerver, J. A. Hafford και P. M. Blair, «Laboratory measurements of relative permeability,» *Journal of Petroleum Technology*, τόμ. 3, αρ. 02, pp. 47-56, Φεβρουάριος 1951.
- [20] N. Mahabadi, L. van Paassen, I. Battiato, T. S. Yun, H. Choo και J. Jang, «Impact of pore-scale characteristics on immiscible fluid displacement,» *Geofluids*, p. 10, 15 Μαΐου 2020.
- [21] N. Mahabadi, L. v. Paassen, I. Battiato, T. S. Yun, H. Choo και J. Jang, *Porous Media Research Laboratory*, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.nmahabadi.com/multiphase-flow.html>.
- [22] Y. D. Abhijit, *Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties*, Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, LLC, 2013, p. 221.
- [23] Y. D. Abhijit, *Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties*, Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, LLC, 2013, p. 208.
- [24] M. Honarpour, L. Koederitz και A. H. Harvey, *Relative Permeability of Petroleum Reservoirs*, Boca Raton, Florida: CRC Press , 2018, pp. 1-2.
- [25] A. Kantzas, J. Bryan και S. Taheri, *Fundamentals of Fluid Flow in Porous Media*, Calgary, Alberta: PERM Inc., pp. 53-59.
- [26] W. Rose, «Some problems in applying the Hassler relative permeability method,» *Journal of Petroleum Technology*, τόμ. 32, αρ. 07, pp. 1.161 - 1.163, Ιούλιος 1980.
- [27] M. Honarpour, L. Koederitz και A. H. Harvey, *Relative Permeability of Petroleum Reservoirs*, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2018, pp. 6-8.

- [28] A. Kantzas, J. Bryan και S. Taheri, *Fundamentals of Fluid Flow in Porous Media*, Calgary, Alberta, p. 111.
- [29] S. E. Buckley και M. C. Leverett, «Mechanism of Fluid Displacement in Sands,» *Transactions of the AIME*, τόμ. 146, αρ. 01, pp. 107 - 116, Δεκέμβριος 1942.
- [30] Y. D. Abhijit, *Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties*, Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, LLC, 2013, pp. 225-230.
- [31] H. J. Welge, «A simplified method for computing oil recovery by gas or water drive,» *Journal of Petroleum Technology*, τόμ. 4, αρ. 04, pp. 91 - 98, Απρίλιος 1952.
- [32] Y. D. Abhijit, *Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties*, Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, LLC, 2013, pp. 230-236.
- [33] E. F. Johnson, D. P. Bossler και O. V. Naumann, «Calculation of relative permeability from displacement experiments,» *Transactions of the AIME*, τόμ. 216, αρ. 01, pp. 370 - 372, Δεκέμβριος 1959.
- [34] S. C. Jones και W. O. Roszelle, «Graphical techniques for determining relative permeability from displacement experiments,» *Journal of Petroleum Technology*, τόμ. 30, αρ. 05, pp. 807 - 817, Μάϊος 1978.
- [35] Δ. Μαρινάκης, *Παρουσίαση εργαστηριακών ασκήσεων μέτρησης πορώδους - διαπερατότητας*, Χανιά: Εργαστήριο Ανάλυσης Ρευστών & Πυρήνων Υπογείων Ταμιευτήρων, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2016, pp. 3-13.
- [36] Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, «Σελίδες Χρηστών Α.Π.Θ.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://users.auth.gr/dkugiu/Teach/CivilEngineer/tablet.pdf>.
- [37] Ν. Βαρότσης, *ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΛΑΣΣΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΥΡΗΝΩΝ*, εργαστηριακές ασκήσεις, Χανιά: Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2017, p. 30.
- [38] Ν. Βαρότσης, *ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΛΑΣΣΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΥΡΗΝΩΝ*, εργαστηριακές ασκήσεις, Χανιά: Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2017, p. 28.
- [39] Ν. Βαρότσης, *ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΛΑΣΣΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΥΡΗΝΩΝ*, εργαστηριακές ασκήσεις, Χανιά: Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2017, pp. 26-27.
- [40] Δ. Μαρινάκης, *Παρουσίαση εργαστηριακών ασκήσεων μέτρησης υπολειμματικού βαθμού κορεσμού - κατανομής πόρων*, Χανιά: Εργαστήριο Ανάλυσης Ρευστών & Πυρήνων

Υπογείων Ταμειευτήρων, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2016, pp. 6-17.

- [41] Χ. Κανελλόπουλος, *Περιθλασιμετρία ακτίνων Χ – Οδηγός εκτέλεσης και αποτίμησης ακτινοδιαγραμμάτων με χρήση του λογισμικού EVA της Bruker*, Αθήνα: Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2017, pp. 4-31.
- [42] *Περίθλαση ακτίνων Χ*, Αθήνα: Τομέας Φυσικής: Εργαστηριακή άσκηση, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, p. 3.
- [43] *Περίθλαση Ακτίνων Χ*, Αθήνα: Τομέας Φυσικής: Εργαστηριακή άσκηση, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, pp. 2-4.
- [44] Χ. Κανελλόπουλος, *Περιθλασιμετρία ακτίνων Χ – Οδηγός εκτέλεσης και αποτίμησης ακτινοδιαγραμμάτων με χρήση του λογισμικού EVA της Bruker*, Αθήνα: Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2017, p. 16.
- [45] J. Byerlee, «Friction, overpressure and fault normal compression,» *Geophysical Research Letters*, τόμ. 17, αρ. 12, pp. 2109-2112, Νοέμβριος 1990.
- [46] W. Tanikawa και T. Shimamoto, «Comparison of Klinkenberg-corrected gas permeability and water permeability in sedimentary rocks,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, τόμ. 46, αρ. 2, pp. 229-238, Φεβρουάριος 2009.
- [47] R. J. Miller και P. F. Low, «Threshold gradient for water flow in clay systems,» *oil Science Society of America Journal*, pp. 605-609, Νοέμβριος-Δεκέμβριος 1963.
- [48] D. Swartzendruber, «Non-Darcy flow behavior in liquid-saturated porous media,» *Journal of Geophysical Research*, τόμ. 67, αρ. 13, pp. 5205-5213, Δεκέμβριος 1962.
- [49] A. Lever και R. A. Dawe, «Clay migration and entrapment in synthetic porous media,» *Marine and petroleum geology*, τόμ. 4, αρ. 2, pp. 112-118, Μάιος 1987.
- [50] J. S. Duncan, *Introduction to Colloid and Surface Chemistry*, 4η έκδοση επιμ., Liverpool: Butterworth-Heinemann, 2013, pp. 174-184.
- [51] A. Lever και R. A. Dawe, «Water-sensitivity and migration of fines in the hopeman sandstone,» *Journal of Petroleum Geology*, τόμ. 7, αρ. 1, pp. 97-107, Ιανουάριος 1984.
- [52] D. R. Faulkner και E. H. Rutter, «Comparisons of water and argon permeability in natural clay-bearing fault gouge under high pressure at 20°C,» *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, τόμ. 105, αρ. B7, pp. 16415-16426, 10 Ιουλίου 2000.

- [53] W. von Engelhardt και W. L. M. Tunn, The flow of fluids through sandstones, τόμ. 194, Urbana: Illinois State Geological Survey, 1955, pp. 1-16.
- [54] J. S. Duncan, Introduction to Colloid and Surface Chemistry, 4η έκδοση επιμ., Liverpool: Butterworth-Heinemann, 2013, pp. 42-44.
- [55] S. F. Kia, F. H. S. και M. G. Reed, «Effect of salt composition on clay release in Berea sandstones,» *In SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Society of Petroleum Engineers*, pp. 277-283, 4 Φεβρουαρίου 1987.
- [56] L. J. Klinkenberg, «The permeability of porous media to liquids and gases,» *Drilling and production practice, American Petroleum Institute*, pp. 200-213, 1 Ιανουάριος 1941.
- [57] J. Gao, Q. Yu και X. Lu, «Apparent permeability and gas flow behavior in carboniferous shale from the Qaidam Basin, China: an experimental study,» *Transport in Porous Media*, τόμ. 116, αρ. 2, pp. 585-611, 2017.
- [58] A. A. Moghadam και R. Chalaturnyk, «Expansion of the Klinkenberg's slippage equation to low permeability porous media,» *International Journal of Coal Geology*, τόμ. 123, pp. 2-9, 1 Μαρτίου 2014.
- [59] G. H. Tang, W. Q. Tao και Y. L. He, «Gas slippage effect on microscale porous flow using the lattice Boltzmann method,» *Physical Review E*, τόμ. 72, αρ. 5, pp. 056301-1 έως 056301-8, 1 Νοεμβρίου 2005.
- [60] N. Okamoto, Y. Liang, S. Murata, T. Matsuoka, T. Akai και S. Takagi, «Slip velocity and permeability of gas flow in nanopores for shale gas development,» *SPE Asia Pacific Unconventional Resources Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers*, pp. 1-17, 9 Νοεμβρίου 2015.
- [61] A. J. Katz και A. H. Thompson, «Prediction of rock electrical conductivity from mercury injection measurements,» *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, τόμ. 92, αρ. B1, pp. 599-607, 10 Ιανουαρίου 1987.
- [62] G. Q. Tang και A. R. Kovscek, «High resolution imaging of unstable, forced imbibition in Berea sandstone,» *Transport in porous media*, τόμ. 86, αρ. 2, pp. 617-634, Ιανουάριος 2011.
- [63] W. W. Owens και D. Archer, «The effect of rock wettability on oil-water relative permeability relationships,» *Journal of Petroleum Technology*, τόμ. 23, αρ. 07, pp. 873-878, 1 Ιουλίου 1971.
- [64] F. Forrest και J. Craig, The Reservoir Engineering Aspects Of Waterflooding, 2η έκδοση επιμ., New York, Dallas: Society of Petroleum Engineers, 1971, p. 20.

Παράρτημα Α

Α.1 Πίνακας όγκου του πυκνομέτρου που καταλαμβάνει ο Hg σε κάθε πίεση (σχετική), χωρίς δοκίμιο.

V_{χδ}(ml)	P_{χδ}(barg)
353,08	0,0
353,10	0,2
353,20	0,5
353,30	0,7
353,40	0,9
353,49	1,2
353,60	1,7
353,69	2,5
353,80	4,0
353,89	6,0
353,97	8,8
354,07	11,9
354,20	17,7
354,30	26,9
354,40	38,3
354,50	51,7
354,57	61,1
354,62	68,1
354,66	74,4
354,70	79,0
354,76	87,4
354,80	93,2
354,84	99,0
354,89	101,5
354,94	111,4
354,98	117,6
355,04	124,4
355,07	129,6
355,10	133,5

A.2 Πίνακας όγκου του πυκνομέτρου που καταλαμβάνει ο Hg σε κάθε πίεση (σχετική), με δοκίμιο.

V_{μδ}(ml)	P_{μδ}(barg)
344,88	0,0
344,92	0,3
345,10	0,5
345,19	0,7
345,28	0,9
345,36	1,0
345,45	1,1
345,51	1,3
345,58	1,4
345,66	1,5
345,74	1,6
345,84	1,7
345,96	1,9
346,07	2,3
346,15	2,5
346,24	2,8
346,32	3,1
346,38	3,5
346,46	4,0
346,53	4,4
346,59	5,0
346,69	6,0
346,78	7,5
346,88	9,0
346,96	10,5
347,10	13,6
347,20	16,8
347,30	21,6
347,40	27,7
347,45	31,9
347,50	36,2
347,56	41,2
347,60	45,2
347,67	52,0
347,72	57,7
347,77	63,6
347,84	72,2
347,90	79,1
348,00	90,9
348,05	97,2
348,10	103,8

348,15	110,4
348,20	116,0
348,25	122,3
348,29	126,7
348,31	129,7

A.3 Πίνακας του βαθμού κορεσμού σε Hg έως και τη μικρότερη τιμή της ακτίνας των πόρων που θα καταλάβει (1^ο πείραμα).

P _{air} (bar)	P _{μδ} (bar)	V _{μδ} (ml)	V _{χδ} (ml)	V _{Hg} (ml)	S _{Hg} (%)	r(μm)
1,0	1,0	344,88	353,08	-0,0021058	-0,1402	-
1,0	1,3	344,92	353,12	-0,0030256	-0,2015	-
1,0	1,5	345,00	353,21	-0,0065049	-0,4331	-
1,1	1,7	345,19	353,30	0,087649	5,836	11,5
1,1	1,9	345,28	353,39	0,088142	5,869	8,8
1,1	2,0	345,36	353,43	0,12937	8,614	8,1
1,2	2,1	345,45	353,46	0,18547	12,35	7,7
1,2	2,3	345,51	353,52	0,19193	12,78	6,4
1,2	2,4	345,58	353,54	0,24080	16,03	6,1
1,3	2,5	345,66	353,56	0,30159	20,08	5,9
1,3	2,6	345,74	353,58	0,36229	24,12	5,8
1,4	2,7	345,84	353,60	0,43903	29,23	5,7
1,6	2,9	345,96	353,62	0,53519	35,63	5,5
1,7	3,3	346,07	353,67	0,60175	40,07	4,5
1,8	3,5	346,15	353,69	0,66202	44,08	4,3
2,0	3,8	346,24	353,72	0,72469	48,25	4,0
2,1	4,1	346,32	353,74	0,77990	51,93	3,7
2,2	4,5	346,38	353,77	0,81039	53,96	3,2
2,4	5,0	346,46	353,80	0,85853	57,16	2,8
2,6	5,4	346,53	353,82	0,90649	60,36	2,6
2,7	6,0	346,59	353,85	0,93817	62,47	2,2
3,0	7,0	346,69	353,89	1,0004	66,61	1,8
3,3	8,5	346,78	353,93	1,0458	69,64	1,4
3,8	10,0	346,88	353,98	1,1045	73,54	1,2
4,2	11,5	346,96	354,02	1,1386	75,82	1,0
4,5	14,6	347,10	354,13	1,1673	77,72	0,73
4,9	17,8	347,20	354,21	1,1923	79,39	0,57
6,2	22,6	347,30	354,25	1,2545	83,53	0,45
7,2	28,7	347,40	354,31	1,2916	86,00	0,34
7,7	32,9	347,45	354,35	1,3031	86,76	0,29
8,2	37,2	347,50	354,38	1,3167	87,67	0,25
9,2	42,2	347,56	354,42	1,3371	89,03	0,22

9,8	46,2	347,60	354,45	1,3470	89,69	0,20
11,3	53,0	347,67	354,50	1,3675	91,05	0,18
12,2	58,7	347,72	354,54	1,3767	91,67	0,16
13,0	64,6	347,77	354,59	1,3845	92,18	0,14
13,9	73,2	347,84	354,65	1,3920	92,69	0,12
15,1	80,1	347,90	354,70	1,4009	93,28	0,11
16,9	91,9	348,00	354,79	1,4118	94,00	0,098
17,3	98,2	348,05	354,84	1,4140	94,15	0,091
17,4	104,8	348,10	354,89	1,4143	94,17	0,084
17,6	111,4	348,15	354,93	1,4153	94,24	0,078
19,7	117,0	348,20	354,98	1,4244	94,85	0,076
21,0	123,3	348,25	355,02	1,4294	95,17	0,072
24,0	127,7	348,29	355,05	1,4384	95,77	0,071
23,6	130,7	348,31	355,07	1,4374	95,71	-

A.4 Πίνακας του βαθμού κορεσμού σε Hg έως και τη μικρότερη τιμή της ακτίνας των πόρων που θα καταλάβει (2^ο πείραμα).

P _{Hg} (psia)	Q(mL/g)	S _{Hg} (%)	D(nm)	R(μm)
1,5342	0,000000	0,000	117886,8125	58,9434063
1,9908	0,000113	0,126	90848,1625	45,4240813
2,9829	0,001274	1,417	60634,1688	30,3170844
3,9725	0,002100	2,336	45528,4875	22,7642438
5,4657	0,003160	3,515	33090,4063	16,5452031
6,9610	0,004462	4,964	25982,4469	12,9912234
8,4668	0,006056	6,737	21361,5313	10,6807656
10,4609	0,009074	10,094	17289,4391	8,6447195
12,9807	0,016043	17,846	13933,2469	6,9666234
15,9626	0,025364	28,215	11330,4297	5,6652148
19,9549	0,034763	38,670	9063,6367	4,5318184
22,9624	0,039314	43,733	7876,4977	3,9382488
24,9608	0,041483	46,146	7245,8969	3,6229484
29,9566	0,045386	50,487	6037,5266	3,0187633
36,0011	0,047627	52,980	5023,8281	2,5119141
46,6114	0,052027	57,875	3880,2398	1,9401199
56,6991	0,054966	61,144	3189,8820	1,5949410
72,2275	0,058153	64,689	2504,0824	1,2520412
86,8659	0,060438	67,231	2082,0996	1,0410498
112,3974	0,063344	70,464	1609,1430	0,8045715
137,1783	0,065542	72,909	1318,4555	0,6592277
172,0855	0,067876	75,505	1051,0096	0,5255048
217,1453	0,070161	78,047	832,9146	0,4164573

266,8470	0,072069	80,169	677,7798	0,3388899
326,9843	0,073868	82,170	553,1262	0,2765631
416,6521	0,075845	84,370	434,0876	0,2170438
516,8467	0,077363	86,058	349,9365	0,1749682
636,9534	0,078745	87,596	283,9510	0,1419755
697,1312	0,079267	88,177	259,4397	0,1297199
796,4454	0,080054	89,051	227,0885	0,1135442
987,8251	0,081176	90,300	183,0927	0,0915463
1197,1427	0,082068	91,292	151,0793	0,0755397
1295,7878	0,082447	91,714	139,5781	0,0697890
1395,9692	0,082761	92,063	129,5613	0,0647806
1495,4006	0,083032	92,365	120,9465	0,0604733
1595,1740	0,083297	92,659	113,3817	0,0566909
1697,8115	0,083530	92,918	106,5275	0,0532637
1890,9360	0,083907	93,338	95,6476	0,0478238
2046,0023	0,084165	93,624	88,3985	0,0441993
2194,9058	0,084379	93,863	82,4015	0,0412008
2347,0640	0,084590	94,097	77,0595	0,0385297
2493,5635	0,084774	94,302	72,5322	0,0362661
2640,2932	0,084978	94,530	68,5013	0,0342507
2689,3103	0,085030	94,588	67,2528	0,0336264
2840,5605	0,085181	94,755	63,6718	0,0318359
2992,1167	0,085341	94,933	60,4467	0,0302233
3238,6946	0,085548	95,163	55,8446	0,0279223
3488,8264	0,085733	95,369	51,8408	0,0259204
3736,5073	0,085887	95,540	48,4044	0,0242022
3984,5110	0,086043	95,714	45,3917	0,0226958
4234,3799	0,086187	95,874	42,7131	0,0213566
4484,8643	0,086343	96,047	40,3275	0,0201638
4722,8184	0,086381	96,090	38,2957	0,0191478
4984,5327	0,086517	96,241	36,2850	0,0181425
5282,1758	0,086642	96,381	34,2403	0,0171202
5482,9424	0,086734	96,483	32,9866	0,0164933
5732,0952	0,086794	96,549	31,5528	0,0157764
5979,4253	0,086885	96,650	30,2476	0,0151238
6230,9438	0,086973	96,749	29,0267	0,0145133
6479,2271	0,087053	96,837	27,9144	0,0139572
6726,4229	0,087121	96,914	26,8885	0,0134443
6978,7231	0,087199	97,000	25,9164	0,0129582
7476,7568	0,087321	97,136	24,1901	0,0120951
7973,4590	0,087454	97,284	22,6832	0,0113416
8474,7979	0,087569	97,411	21,3413	0,0106707
8972,8818	0,087687	97,543	20,1567	0,0100783
9270,6533	0,087761	97,625	19,5093	0,0097546

9568,4277	0,087828	97,699	18,9021	0,0094511
10015,3994	0,087919	97,801	18,0585	0,0090293
10455,8076	0,087990	97,880	17,2979	0,0086490
10953,1934	0,088083	97,984	16,5124	0,0082562
11457,4219	0,088159	98,068	15,7857	0,0078929
11957,7510	0,088246	98,165	15,1252	0,0075626
12557,7031	0,088334	98,263	14,4026	0,0072013
13056,6758	0,088400	98,336	13,8522	0,0069261
13601,5059	0,088482	98,428	13,2973	0,0066487
13950,8447	0,088524	98,474	12,9643	0,0064822
14293,1777	0,088573	98,528	12,6538	0,0063269
14549,9092	0,088610	98,570	12,4306	0,0062153
14948,0859	0,088652	98,616	12,0994	0,0060497
15400,9854	0,088722	98,694	11,7436	0,0058718
15754,0088	0,088768	98,745	11,4805	0,0057402
16152,5146	0,088819	98,802	11,1972	0,0055986
16599,3809	0,088872	98,861	10,8958	0,0054479
16943,4531	0,088913	98,906	10,6745	0,0053373
17298,4473	0,088965	98,964	10,4555	0,0052277
17644,5859	0,089000	99,003	10,2504	0,0051252
18049,4375	0,089049	99,058	10,0205	0,0050102
18398,7051	0,089085	99,098	9,8302	0,0049151
18748,1875	0,089133	99,151	9,6470	0,0048235
19148,6426	0,089180	99,204	9,4452	0,0047226
19751,7656	0,089234	99,263	9,1568	0,0045784
20251,8613	0,089234	99,263	8,9307	0,0044654
20763,3965	0,089286	99,322	8,7107	0,0043553
21166,4805	0,089335	99,376	8,5448	0,0042724
21622,8906	0,089370	99,415	8,3644	0,0041822
22023,4980	0,089401	99,450	8,2123	0,0041061
22624,3809	0,089439	99,491	7,9942	0,0039971
23174,9902	0,089460	99,515	7,8043	0,0039021
23726,4023	0,089497	99,556	7,6229	0,0038114
24076,1133	0,089511	99,572	7,5122	0,0037561
24626,6387	0,089540	99,604	7,3442	0,0036721
25027,3457	0,089572	99,640	7,2266	0,0036133
25428,7422	0,089601	99,672	7,1126	0,0035563
25880,0645	0,089627	99,701	6,9885	0,0034943
26430,1406	0,089653	99,730	6,8431	0,0034215
26928,3926	0,089679	99,759	6,7165	0,0033582
27376,2520	0,089712	99,796	6,6066	0,0033033
27770,6836	0,089718	99,802	6,5128	0,0032564
28191,1152	0,089757	99,846	6,4156	0,0032078
28919,9941	0,089779	99,869	6,2539	0,0031270

A.5 Πίνακας δεδομένων ροής σε αέρα υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.

$\Delta P(\text{psia})$	$Q(\text{ml/min})$	$1/P_{\text{avg}}(1/\text{atm})$	$k_{\text{air}}(\text{mD})$
5,4	120	0,845	79,3
6,6	151	0,817	78,9
7,5	173	0,797	77,6
8,4	197	0,778	77,1
9,5	225	0,756	75,6
10,3	250	0,741	75,9
11,3	277	0,722	74,8
12,1	302	0,708	74,7
13,0	335	0,693	75,5
14,0	368	0,677	75,2
15,1	401	0,661	74,1
15,8	424	0,650	73,7
16,3	458	0,643	76,4
17,6	514	0,625	77,2
18,2	540	0,618	77,4
19,1	580	0,606	77,8
19,7	618	0,599	79,4
20,5	645	0,589	78,3
21,6	686	0,576	77,3
1,2	22,8	0,961	77,1
2,5	50,7	0,922	79,0
3,4	71,3	0,896	79,4
3,9	83,4	0,883	79,8
4,4	96,4	0,870	80,5
5,0	110	0,855	79,4
5,5	123	0,842	79,6
5,9	132	0,833	78,7
6,1	139	0,828	79,7
6,5	148	0,819	78,8
6,8	156	0,812	78,7
7,1	165	0,805	79,1
7,4	171	0,799	78,0
7,8	182	0,790	77,9
8,1	190	0,784	77,7
8,2	193	0,782	77,7
8,3	195	0,780	77,4

A.6 Πίνακας δεδομένων ροής σε αέρα υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

$\Delta P(\text{psia})$	$Q(\text{ml/min})$	$1/P_{\text{avg}}(1/\text{atm})$	$k_{\text{air}}(\text{mD})$
3,5	8	8	9,71
5,1	11	11	8,47
7,4	17	17	8,21
9,2	21	21	7,69
11,1	27	27	7,74
13,3	34	34	7,65
15,0	41	41	7,83
17,6	51	51	7,81
20,4	60	60	7,46
23,3	70	70	7,18
25,1	76	76	6,99
25,5	77	77	6,92
27,5	84	84	6,75
28,9	90	90	6,71
29,8	94	94	6,69
31,1	99	99	6,60
33,5	111	111	6,60
35,5	118	118	6,41
38,9	135	135	6,36
41,5	147	147	6,25
44,0	159	159	6,15
46,3	170	170	6,06
47,9	178	178	6,00
49,8	186	186	5,89
53,5	208	208	5,85
56,1	223	223	5,80
59,6	243	243	5,71
62,7	261	261	5,63
64,2	269	269	5,58
66,5	283	283	5,53
68,5	294	294	5,46
70,8	309	309	5,43
72,5	319	319	5,38
74,8	334	334	5,34
76,9	347	347	5,29
78,2	356	356	5,27
79,7	366	366	5,24
81,8	380	380	5,20
83,3	389	389	5,16
84,6	398	398	5,14
86,2	407	407	5,08

87,5	416	416	5,06
88,6	423	423	5,04
89,5	429	429	5,02

A.7 Πίνακας μονοφασικής ροής νερού υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.

Q(ml/min)	P_{gauge}(barg)	K_w(mD)	Σt(min)
10,00	7,29	21,6	0
10,00	8,54	18,4	9
10,00	9,03	17,4	14
10,00	9,58	16,4	18
8,00	8,09	15,5	21
8,00	8,71	14,4	25
8,00	9,06	13,9	29
8,00	9,22	13,6	31
8,00	9,45	13,3	33
7,00	7,96	13,8	33
7,00	8,19	13,4	38
7,00	8,71	12,6	42
7,00	9,00	12,2	48
7,00	9,45	11,7	55
6,00	8,40	11,2	57
6,00	8,82	10,7	61
6,00	9,01	10,5	65
6,00	9,31	10,1	70
5,00	8,26	9,52	73
5,00	8,60	9,14	78
5,00	8,85	8,88	84
5,00	8,97	8,77	88
5,00	9,17	8,58	93
5,00	9,37	8,39	100
4,00	8,04	7,82	103
4,00	8,26	7,61	108
1,00	4,12	3,80	108
1,00	3,19	4,89	112
1,00	3,74	4,18	133
1,00	3,83	4,08	142
1,00	3,89	4,02	145
3,00	7,34	6,42	150
3,00	7,42	6,35	156
3,00	7,43	6,34	162

3,00	7,50	6,29	200
3,00	7,47	6,31	209
3,00	7,53	6,26	215
3,00	7,55	6,24	222
3,00	7,54	6,25	227
3,00	7,58	6,22	232
3,00	7,71	6,12	238
3,00	7,76	6,08	247
3,00	7,66	6,15	300
3,00	7,72	6,11	303
3,00	7,75	6,08	309
3,00	7,81	6,04	312
3,00	7,86	6,00	316
3,00	7,91	5,96	329
3,00	7,87	5,99	337
3,00	7,84	6,01	342
3,00	7,91	5,96	344
3,00	7,90	5,97	350
3,00	8,56	5,51	350
3,00	8,67	5,44	353
3,00	8,08	5,84	362
3,50	9,15	6,02	372
3,50	8,82	6,24	382
3,50	8,77	6,28	389
3,50	8,75	6,29	394
3,50	8,73	6,30	407
3,50	8,67	6,35	411
3,50	8,68	6,34	418
3,50	8,67	6,35	423
3,50	8,62	6,38	428
3,50	8,56	6,43	435
3,50	8,62	6,38	443
3,50	8,60	6,40	447
3,50	8,54	6,44	457
3,50	8,60	6,40	461
3,50	8,58	6,41	466
3,50	8,62	6,38	473
3,50	8,61	6,39	478
3,50	8,66	6,36	483
4,00	9,52	6,61	485
4,00	9,45	6,66	488
4,00	9,27	6,79	495
4,00	9,22	6,82	500
4,00	9,17	6,86	509

4,00	9,21	6,83	513
4,00	9,17	6,86	518
4,00	9,18	6,85	526
4,00	9,17	6,86	531
4,00	9,12	6,90	553
4,00	9,16	6,87	559
4,00	9,16	6,87	563
4,00	9,13	6,89	568
4,00	9,10	6,91	573
4,00	9,16	6,87	583
4,00	9,15	6,88	588
4,00	9,16	6,87	593
4,00	9,22	6,82	598
4,00	9,17	6,86	604
3,50	8,83	6,23	604
3,50	8,18	6,73	607
3,50	8,19	6,72	612
3,50	8,20	6,71	618
3,50	8,17	6,73	623
3,50	8,18	6,73	633
3,50	8,19	6,72	642
3,50	8,24	6,68	649
3,50	8,18	6,73	656
3,50	8,19	6,72	661
3,50	8,20	6,71	666
3,50	8,21	6,70	671
3,50	8,22	6,69	678
3,50	8,25	6,67	682
3,50	8,27	6,65	686
3,50	8,25	6,67	691
3,50	8,25	6,67	699
3,50	8,30	6,63	703
3,50	8,31	6,62	709
3,50	8,35	6,59	714
3,50	8,35	6,59	719
3,50	9,67	5,69	719
3,50	9,32	5,91	719
3,50	9,02	6,10	720
3,50	8,90	6,18	725
3,50	8,83	6,23	725
3,50	8,76	6,28	742
3,50	8,69	6,33	752
3,50	8,66	6,36	761
3,50	8,64	6,37	768

3,50	8,60	6,40	773
3,50	8,63	6,38	778
3,50	8,62	6,38	783
3,50	8,59	6,41	788
3,50	8,55	6,44	798
3,50	8,58	6,41	805
3,50	8,58	6,41	811
3,50	8,55	6,44	818
3,50	8,56	6,43	823
3,50	8,57	6,42	830
3,50	8,55	6,44	843
3,50	8,60	6,40	848
3,50	8,55	6,44	853
3,50	8,60	6,40	858
3,00	8,00	5,89	858
3,00	8,01	5,89	862
3,00	8,02	5,88	870
3,00	8,07	5,84	873
3,00	8,06	5,85	877
3,00	8,20	5,75	898
3,00	8,29	5,69	920
3,00	8,30	5,68	927
3,00	8,33	5,66	932
3,00	8,35	5,65	938
3,00	8,35	5,65	943
3,00	8,33	5,66	951
3,00	8,34	5,66	960
3,00	8,37	5,64	965
3,00	8,38	5,63	970
3,00	8,41	5,61	980
3,00	8,46	5,58	985
3,00	8,73	5,40	985
3,00	8,57	5,50	986
3,00	8,47	5,57	988
3,00	8,42	5,60	993
3,00	8,45	5,58	997
3,00	8,47	5,57	1004
3,00	8,44	5,59	1010
3,00	8,50	5,55	1018
3,00	8,54	5,52	1030
3,00	8,53	5,53	1037
3,00	8,52	5,54	1042
3,00	8,55	5,52	1047
3,00	8,57	5,50	1052

3,00	8,59	5,49	1057
3,00	8,62	5,47	1062
3,00	8,61	5,48	1067
3,00	8,63	5,47	1072
3,00	8,63	5,47	1077
3,00	8,63	5,47	1082
3,00	8,64	5,46	1087
3,00	8,66	5,45	1092
3,00	8,68	5,43	1097
3,00	8,66	5,45	1102
3,00	8,73	5,40	1105
3,00	8,71	5,42	1107
3,00	8,74	5,40	1112
3,00	8,72	5,41	1117

A.8 Πίνακας μονοφασικής ροής νερού υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Q(ml/min)	P _{gauge} (barg)	K _w (mD)	Σt(min)
40,00	75,0	8,00	0
16,00	81,0	2,97	2
16,00	82,0	2,94	4
16,00	84,0	2,87	6
16,00	86,0	2,81	8
16,00	88,0	2,75	10
16,00	90,0	2,69	12
16,00	91,0	2,66	14
16,00	93,0	2,61	16
16,00	94,0	2,58	18
16,00	95,0	2,55	20
12,00	74,0	2,43	22
12,00	77,0	2,34	24
12,00	78,0	2,31	26
12,00	80,0	2,26	28
12,00	82,0	2,20	33
12,00	84,0	2,15	38
12,00	86,0	2,11	43
12,00	87,0	2,08	48
12,00	88,0	2,06	53
12,00	89,0	2,04	58
12,00	90,0	2,02	63
12,00	92,0	1,97	68

12,00	86,0	2,11	73
12,00	85,0	2,13	78
10,00	72,0	2,08	83
10,00	74,0	2,03	88
10,00	76,0	1,97	93
10,00	79,0	1,90	98
10,00	80,0	1,88	103
10,00	81,0	1,86	108
10,00	82,0	1,84	113
10,00	84,0	1,80	118
10,00	85,0	1,77	123
10,00	86,0	1,76	128
10,00	86,0	1,76	133
10,00	86,0	1,76	138
8,00	68,0	1,76	143
8,00	69,5	1,72	148
8,00	71,0	1,69	153
8,00	73,0	1,64	158
8,00	74,0	1,62	163
8,00	75,0	1,60	168
8,00	76,0	1,58	173
8,00	77,0	1,56	178
8,00	78,0	1,54	183
8,00	79,0	1,52	188
8,00	80,0	1,50	193
5,00	52,0	1,41	198
5,00	55,0	1,34	203
5,00	56,0	1,32	208
5,00	56,5	1,31	213
5,00	57,0	1,29	218
5,00	58,0	1,27	223
5,00	59,0	1,25	228
5,00	60,0	1,23	233
5,00	60,0	1,23	238
5,00	60,5	1,22	243
5,00	61,0	1,22	248
5,00	61,0	1,22	253
5,00	61,5	1,21	258
5,00	62,0	1,20	263
5,00	62,5	1,19	268
5,00	63,0	1,18	273
5,00	63,5	1,17	278
5,00	64,0	1,16	283
6,00	75,0	1,20	288

6,00	74,5	1,21	293
6,00	75,0	1,20	298
6,00	75,0	1,20	303
6,00	75,0	1,20	308
5,00	64,5	1,15	313
5,00	64,5	1,15	318
5,00	65,0	1,14	323
5,00	65,0	1,14	328
5,00	65,0	1,14	333
5,00	65,0	1,14	338
5,00	65,0	1,14	343
5,00	65,0	1,14	348
5,00	65,0	1,14	353
6,00	78,0	1,16	358
6,00	78,0	1,16	363
6,00	78,0	1,16	368
6,00	78,0	1,16	373
6,00	78,0	1,16	378
6,00	78,0	1,16	383
6,00	78,0	1,16	388
7,00	88,0	1,20	393
7,00	88,0	1,20	398
7,00	88,0	1,20	403
7,00	88,0	1,20	408
7,00	88,0	1,20	413
7,00	88,0	1,20	418
7,00	88,0	1,20	423
4,00	52,0	1,13	428
4,00	52,0	1,13	433
4,00	52,0	1,13	438
4,00	52,0	1,13	443
4,00	52,0	1,13	448
4,00	52,0	1,13	453
4,00	52,0	1,13	458
3,00	41,0	1,05	463
3,00	41,0	1,05	468
3,00	41,0	1,05	473
3,00	41,0	1,05	478
2,00	29,0	0,957	483
2,00	29,0	0,957	488
2,00	29,0	0,957	493
2,00	29,0	0,957	498
1,00	16,5	0,771	503
1,00	16,5	0,771	508

1,00	16,5	0,771	513
1,00	16,5	0,771	518
0,50	9,5	0,59	523
0,50	9,5	0,59	528
0,50	9,5	0,59	533
0,50	9,5	0,59	538
0,10	3,5	0,21	543
0,10	3,5	0,21	548
0,10	3,5	0,21	553
0,10	3,5	0,21	558
0,05	2,5	0,12	563
0,05	2,5	0,12	568
0,05	2,5	0,12	573
0,05	2,5	0,12	578
0,02	2,0	0,05	583
0,02	2,0	0,05	588
0,02	2,0	0,05	593
0,02	2,0	0,05	598

A.9 Πίνακας ροής πετρελαίου στο μη περαιτέρω μείωσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό υπό πίεση υπερκειμένων 60 bar.

Q(ml/min)	P _{gauge} (barg)	K _{eo} (mD)	Σt(min)
3,00	2,29	7,85	0
5,00	3,55	8,49	0
5,00	3,31	9,10	5
5,00	3,07	9,80	8
5,00	2,69	11,2	25
5,00	2,83	10,6	34
5,00	2,79	10,8	37
5,00	2,72	11,0	42
5,00	2,67	11,3	48
5,00	2,66	11,3	52
5,00	2,58	11,6	60
5,00	2,69	11,2	60
5,00	2,74	11,0	66
5,00	2,75	10,9	71
5,00	2,74	11,0	86
5,00	2,68	11,2	97
5,00	2,68	11,2	102
5,00	2,67	11,3	108
7,00	2,68	15,7	108

7,00	3,2	13,2	109
7,00	3,65	11,6	109
7,00	3,62	11,7	110
7,00	3,58	11,8	112
7,00	3,58	11,8	118
7,00	3,58	11,8	122
7,00	3,61	11,7	127
7,00	3,59	11,8	132
7,00	3,6	11,7	137
7,00	3,58	11,8	142
10,00	4,98	12,1	147
10,00	5,01	12,1	153
10,00	5,03	12,0	157,00
10,00	5,07	11,9	161,00
10,00	5,1	11,9	167,00
10,00	5,11	11,8	173,00
10,00	5,14	11,8	177,00
10,00	5,18	11,7	182,00
10,00	5,17	11,7	185,00
10,00	5,21	11,6	187,00
10,00	5,22	11,6	192,00
10,00	5,13	11,8	192,00
10,00	5,18	11,7	192,00
10,00	5,2	11,6	192,00
10,00	5,23	11,6	192,00
10,00	5,22	11,6	195,00
10,00	5,23	11,6	200,00
10,00	5,24	11,5	205,00
10,00	5,23	11,6	210,00
10,00	5,24	11,5	216,00
10,00	5,25	11,5	220,00
10,00	5,24	11,5	226,00
10,00	5,23	11,6	230,00
10,00	5,25	11,5	235,00

A.10 Πίνακας ροής πετρελαίου στο μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Q(ml/min)	P_{gauge}(barg)	K_{eo}(mD)	Σt(min)
20,00	51,0	2,24	0
20,00	46,5	2,44	3
20,00	41,0	2,74	6

20,00	40,0	2,80	9
20,00	38,0	2,94	12
20,00	37,0	3,01	15
20,00	36,0	3,09	18
20,00	35,0	3,17	21
15,00	54,0	1,59	26
15,00	50,0	1,71	31
15,00	46,0	1,85	34
15,00	45,0	1,89	37
25,00	62,0	2,33	40
25,00	57,0	2,52	43
25,00	56,0	2,56	46
25,00	54,5	2,63	49
25,00	54,0	2,65	52
25,00	52,0	2,75	55
15,00	80,0	1,10	57
15,00	62,0	1,40	59
15,00	58,0	1,49	61
15,00	51,0	1,68	63
15,00	48,0	1,78	65
15,00	46,0	1,85	68
15,00	43,0	1,97	71
15,00	42,0	2,01	74
15,00	40,0	2,10	77
15,00	38,5	2,18	81
15,00	38,0	2,20	85
15,00	37,0	2,26	89
10,00	18,0	2,84	89
10,00	20,0	2,59	94
10,00	20,0	2,59	99
10,00	20,5	2,54	104
10,00	21,0	2,49	109
10,00	21,0	2,49	114
10,00	21,0	2,49	119
10,00	21,0	2,49	124
10,00	21,0	2,49	129
7,00	16,0	2,19	129
7,00	16,0	2,19	134
7,00	16,0	2,19	139
7,00	16,0	2,19	144
7,00	16,0	2,19	149
7,00	16,0	2,19	154
7,00	16,0	2,19	159
5,00	11,5	2,03	159

5,00	11,5	2,03	164
5,00	11,5	2,03	169
5,00	11,5	2,03	174
5,00	11,5	2,03	179
5,00	11,5	2,03	184
5,00	11,5	2,03	189
15,00	24,0	3,33	194
15,00	26,5	3,05	199
15,00	27,0	3,00	204
15,00	27,0	3,00	209
15,00	27,0	3,00	214
15,00	27,0	3,00	219
15,00	27,0	3,00	224
20,00	30,0	3,64	224
20,00	36,0	3,09	229
20,00	36,0	3,09	234
20,00	36,0	3,09	239
20,00	36,0	3,09	244
20,00	36,0	3,09	249
20,00	36,0	3,09	254
25,00	38,0	3,67	254
25,00	42,0	3,35	259
25,00	42,0	3,35	264
25,00	42,0	3,35	269
25,00	42,0	3,35	274
25,00	42,0	3,35	279
40,00	60,0	3,84	279
40,00	62,5	3,70	284
40,00	62,5	3,70	289
40,00	62,5	3,70	294
40,00	62,5	3,70	299
40,00	62,5	3,70	304
40,00	62,5	3,70	309
55,00	80,0	4,02	309
55,00	81,0	3,97	314
55,00	81,0	3,97	319
55,00	81,0	3,97	324
55,00	81,0	3,97	329
55,00	81,0	3,97	334

A.11 Διφασική ροή νερού και πετρελαίου για το πρώτο ενδιαμέσο σημείο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Q_w(ml/min)	Q_o(ml/min)	P_{gauge}(barg)	K_{ew}(mD)	K_{eo}(mD)	Σt(min)
0,75	6,00	31,0	0,34	1,05	0
0,75	6,00	39,0	0,28	0,851	1
0,75	6,00	44,5	0,24	0,754	3
0,75	6,00	50,0	0,22	0,678	6
0,75	6,00	54,5	0,20	0,625	11
0,75	6,00	59,0	0,19	0,581	16
0,75	6,00	63,0	0,18	0,546	21
0,75	6,00	64,0	0,17	0,538	26
0,75	6,00	66,0	0,17	0,523	31
0,75	6,00	70,0	0,16	0,494	36
0,75	6,00	72,5	0,15	0,478	41
0,75	6,00	74,0	0,15	0,469	46
0,75	6,00	76,0	0,15	0,457	51
0,75	6,00	77,0	0,15	0,452	56
0,75	6,00	80,0	0,14	0,436	61
0,75	6,00	82,0	0,14	0,425	66
0,75	6,00	81,0	0,14	0,430	71
0,75	6,00	82,0	0,14	0,425	76
0,75	6,00	82,0	0,14	0,425	81
0,75	6,00	82,0	0,14	0,425	86
0,75	6,00	82,0	0,14	0,425	91
0,75	6,00	82,0	0,14	0,425	96
0,75	6,00	82,0	0,14	0,425	101
0,75	6,00	82,0	0,14	0,425	106

A.12 Διφασική ροή νερού και πετρελαίου για το δεύτερο ενδιαμέσο σημείο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Q_w(ml/min)	Q_o(ml/min)	P_{gauge}(barg)	K_{ew}(mD)	K_{eo}(mD)	Σt(min)
1,00	3,00	24,0	0,574	0,665	0
1,00	3,00	43,0	0,340	0,393	4
1,00	3,00	42,5	0,343	0,398	11
1,00	3,00	44,0	0,333	0,385	16
1,00	3,00	45,0	0,326	0,377	20
1,00	3,00	46,0	0,319	0,370	25
1,00	3,00	47,5	0,310	0,359	30
1,00	3,00	46,0	0,319	0,370	35
1,00	3,00	48,0	0,307	0,355	40
1,00	3,00	50,0	0,295	0,342	45

1,00	3,00	52,0	0,285	0,330	60
1,00	3,00	54,0	0,275	0,318	75
1,00	3,00	56,5	0,263	0,305	93
1,00	3,00	56,0	0,265	0,307	100
1,00	3,00	56,0	0,265	0,307	117
1,00	3,00	58,0	0,257	0,297	120
1,00	3,00	60,0	0,249	0,288	124
1,00	3,00	61,0	0,245	0,284	130
1,00	3,00	61,0	0,245	0,284	137
1,00	3,00	62,0	0,241	0,279	146
1,00	3,00	58,0	0,257	0,297	148
1,00	3,00	63,0	0,238	0,275	150
1,00	3,00	62,0	0,241	0,279	155
1,00	3,00	64,0	0,234	0,271	158
1,00	3,00	55,0	0,270	0,313	160
1,00	3,00	64,0	0,234	0,271	165
1,00	3,00	62,0	0,241	0,279	170
1,00	3,00	59,0	0,253	0,293	175
1,00	3,00	59,0	0,253	0,293	180
1,00	3,00	59,0	0,253	0,293	185
1,00	3,00	59,0	0,253	0,293	190
1,00	3,00	59,0	0,253	0,293	195
1,00	3,00	59,0	0,253	0,293	200
1,00	3,00	59,0	0,253	0,293	205

A.13 Διφασική ροή νερού και πετρελαίου για το τρίτο ενδιαμέσο σημείο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Q_w(ml/min)	Q_o(ml/min)	P_{gauge}(barg)	K_{ew}(mD)	K_{eo}(mD)	Σt(min)
3,00	0,50	74,0	0,608	0,039	0
3,00	0,50	90,0	0,504	0,032	10
3,00	0,50	95,0	0,479	0,031	20
3,00	0,50	64,0	0,697	0,045	30
3,00	0,50	67,0	0,667	0,043	40
3,00	0,50	71,0	0,632	0,041	50
3,00	0,50	72,0	0,624	0,040	60
3,00	0,50	72,0	0,624	0,040	70
3,00	0,50	73,0	0,615	0,040	80
3,00	0,50	74,0	0,608	0,039	90
3,00	0,50	74,0	0,608	0,039	100
3,00	0,50	74,0	0,608	0,039	110
3,00	0,50	74,0	0,608	0,039	120

3,00	0,50	74,0	0,608	0,039	130
3,00	0,50	74,0	0,608	0,039	140
3,00	0,50	74,0	0,608	0,039	150

A.14 Διφασική ροή νερού και πετρελαίου για το δεύτερο τελικό σημείο υπό πίεση υπερκειμένων 150 bar.

Q(ml/min)	P _{gauge} (barg)	K _{ew} (mD)	Σt(min)
5,00	70,5	1,06	0
5,00	71,0	1,05	5
5,00	72,5	1,03	10
5,00	74,0	1,01	15
5,00	74,5	1,00	20
5,00	75,5	0,991	25
5,00	76,0	0,985	35
5,00	77,0	0,973	40
5,00	78,0	0,961	45
5,00	79,0	0,949	50
5,00	79,0	0,949	55
5,00	80,0	0,938	65
5,00	81,0	0,927	70
5,00	81,5	0,921	75
5,00	82,0	0,916	80
5,00	82,0	0,916	85
5,00	82,5	0,911	90
5,00	84,0	0,895	100
5,00	84,0	0,895	105
5,00	85,0	0,885	110
5,00	87,0	0,865	115
5,00	85,5	0,880	120
5,00	87,0	0,865	125
5,00	86,0	0,875	130
5,00	87,0	0,865	135
5,00	85,5	0,880	140
5,00	87,0	0,865	145
5,00	87,0	0,865	150
5,00	87,0	0,865	155
5,00	87,0	0,865	160
5,00	87,0	0,865	165
5,00	87,0	0,865	170