

# **Κεφάλαιο 1: Διαβρεγτότητα - Βασικές έννοιες.**

## **1.1 Ορισμός της έννοιας της διαβρεγτότητας (wettability).**

Η διαβρεγτότητα <sup>(1)</sup> γενικά ορίζεται σαν η τάση μιας ρευστής φάσης να απλώνεται ή να προσκολλάται πάνω σε μια στερεή επιφάνεια παρουσία άλλων μη αναμειζιμων ρευστών.

Όλα τα μόρια ενός ρευστού με εξαίρεση εκείνα που βρίσκονται στην διεπιφάνεια του ρευστού με ένα δεύτερο ρευστό, ή κάποιο στερεό, υφίστανται την επίδραση συμμετρικών δυνάμεων Van der Waals από τα ομοειδή τους μόρια<sup>(43)</sup>.

Αντίθετα, τα μόρια στην διεπιφάνεια τα οποία βρίσκονται σε επαφή και με τα μόρια ενός δεύτερου ρευστού (αερίου ή υγρού), περιβάλλονται μόνο μερικώς από ομοειδή μόρια του ίδιου και επομένως υφίστανται την επίδραση ασύμμετρων ελκτικών δυνάμεων. Στην περίπτωση, για παράδειγμα, του συστήματος νερού / αέρα αυτή η διαφορά δυνάμεων τείνει να μειώσει την έκταση της επιφάνειας στο ελάχιστο και για δεδομένο όγκο η ελάχιστη αυτή επιφάνεια είναι η σφαίρα.

Η αυτόματη συστολή της επιφάνειας του ρευστού δείχνει ότι συμμετέχει ελεύθερη ενέργεια και επομένως για να απλωθεί μια τέτοια επιφάνεια χρειάζεται να δαπανηθεί έργο.

Η ποσότητα του έργου που απαιτείται για να απλωθεί μια μονάδα έκτασης επιφάνειας καλείται ελεύθερη επιφανειακή ενέργεια του ρευστού (surface energy).

Η συνισταμένη διαφορά των αντιτιθέμενων δυνάμεων για ένα σύστημα δύο ρευστών εκπεφρασμένη σαν η δύναμη ανά μονάδα μήκους που απαιτείται για να μετακινήσει ένα μόριο ρευστού διαμέσω της διεπιφάνειας καλείται διεπιφανειακή τάση (σ) (surface tension) και έχει μονάδες: dyn/cm στο CGS & N/m στο SI.

Η διεπιφανειακή τάση δρα παράλληλα προς την επιφάνεια με διεύθυνση προς τα μέσα και αντιτίθεται στην προσπάθεια επέκτασης της επιφάνειας .

Στην μελέτη πολυφασικών συστημάτων που βρίσκονται σε ένα πορώδες μέσο πρέπει να ληφθούν υπόψη όχι μόνο οι δυνάμεις στην διεπιφάνεια των υγρών αλλά επίσης και οι δυνάμεις που επενεργούν μεταξύ των ρευστών και των στερεών επιφανειών.

Στο Σχ.1.παριστάνεται νερό και πετρέλαιο σε επαφή με μια στερεή επιφάνεια (για παράδειγμα τοίχωμα πόρου πετρώματος) καθώς και οι διεπιφανειακές τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα τέτοιο σύστημα.

Σχ.1. : Ισορροπία δυνάμεων σε ένα σύστημα πετρώματος νερού πετρελαίου.

## **1.2. Διαβρεχτότητα και επιφανειακές δυνάμεις.**

### 1.2.1. Εννοια της γωνίας επαφής (contact angle).

Ο όρος που χαρακτηρίζει τον βαθμό της διαβρεχτότητας μιας επιφάνειας από μία ρευστή φάση είναι η γωνία επαφής (contact angle).

Όταν μια σταγόνα πετρελαίου τοποθετηθεί πάνω σε μια επιφάνεια η οποία είναι βυθισμένη σε νερό, διαμορφώνεται (σχ.2.) μια γωνία επαφής η τιμή της οποίας είναι από 0-180 μοίρες (0 - 3.14 rad). Οι επιφανειακές ενέργειες σε ένα τέτοιο σύστημα σχετίζονται με την εξίσωση του Young :

$$\sigma_{ow} \cos\theta = \sigma_{os} - \sigma_{ws} \quad (1)$$

όπου:

$\sigma_{ow}$  : διεπιφανειακή ενέργεια η διεπιφανειακή τάση (IFT) μεταξύ πετρελαίου και νερού.

$\sigma_{os}$ : διεπιφανειακή τάση μεταξύ πετρελαίου και στερεού

$\sigma_{ws}$ : διεπιφανειακή τάση μεταξύ νερού και στερεού

$\theta$  : γωνία επαφής η οποία από συνθήκη μετριέται μέσω του νερού.

Το Σχ.2. δείχνει ορισμένα παραδείγματα γωνιών επαφής σε λείες στερεές επιφάνειες για την πετρελαική και υδατική φάση<sup>(24)</sup>.

Σχ.2. : Παραδείγματα γωνιών επαφής σε στερεές επιφάνειες.

Πολλές μελέτες των φαινομένων διαβρεχτότητας μέχρι σήμερα έχουν δείξει ότι το εξωτερικό στρώμα μορίων μιας επιφάνειας επηρεάζει την γωνία επαφής και επομένως και την διαβρεχτότητα.

Στην ύπαρξη ενός τέτοιου στρώματος μπορεί να οφείλεται αλλαγή της γωνίας επαφής (μετάβαση στο Σχ.2 από την κατάσταση α στην ε) κάτι που σημαίνει και αυτόματα αλλαγή της κατάστασης διαβρεχτότητας.

Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί, για παράδειγμα, αν στην συγκεκριμένη επιφάνεια απορροφηθεί ένα στρώμα πολικών μορίων έτσι ώστε το εξωτερικό στρώμα αυτής να απαρτίζεται από υδρογονανθρακικές αλυσίδες.

Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή της ισορροπίας των διαμοριακών δυνάμεων μεταξύ της επιφάνειας και της ρευστής φάσης.

Μια πρώτη προσέγγιση η οποία περιγράφει αυτές της διαμοριακές δυνάμεις είναι η εργασία των Derjaguin , Landau , Verwey , Overbeek γνωστή και ως θεωρία DLVO της σταθερότητας των κolloειδών<sup>(25,26)</sup>.

Η θεωρία αυτή περιγράφει την σταθερότητα και την κροκίδωση λυοφοβικών κolloειδών παίρνοντας υπόψη τις αλληλεπιδράσεις ηλεκτροστατικών δυνάμεων καθώς και δυνάμεων Van der Waals και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την εξήγηση της σταθερότητας λεπτού φιλμ νερού που διαβρέχει μια επιφάνεια.

### 1.2.2. Υστέρηση γωνίας επαφής (contact angle hysteresis)

Αν η επιφάνεια πάνω στην οποία βρίσκεται ο μηνίσκος του υγρού δεν είναι ιδεατά ομαλή ή απόλυτα καθαρή, η παρατηρούμενη στατική γωνία επαφής δεν είναι μοναδική

αλλά κυμαίνεται σε ένα διάστημα  $[\theta_A, \theta_R]$  όπου  $\theta_A$  είναι η προπορευόμενη γωνία και  $\theta_R$  η υπολειπόμενη (βλ. σχ.3.)

Σε μια οριζόντια αλλά όχι απόλυτα ομαλή επιφάνεια που περιέχει "κορυφές" και "κοιλιάδες" η σταγόνα του υγρού θα εφάπτεται πάνω σε μια επιφάνεια που στην πραγματικότητα δεν θα είναι οριζόντια. Αυτή κυρίως η ανωμαλία της επιφάνειας είναι που προκαλεί την διαφοροποίηση στις παρατηρούμενες γωνίες επαφής.

Σχ.3. : Εμφάνιση του φαινομένου υστέρησης .

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υστέρηση της γωνίας επαφής και ποσοτικά δίνεται από την διαφορά  $\theta_A - \theta_R$  . Το φαινόμενο αυτό αποδεικνύει ότι για ένα συστατικό είναι δύσκολο να παρατηρηθεί πειραματικά μια τιμή στατικής γωνίας.

### **1.3.Δυνάμεις που επιδρούν στην σταθερότητα λεπτών φιλμ διαβροχής (DLVO Theory)<sup>(57)</sup>**

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η θεωρία DLVO εξηγεί την σταθερότητα λεπτών φιλμ διαβροχής σε μια στερεή επιφάνεια σαν αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης δυνάμεων Van der Waals, ηλεκτροστατικών δυνάμεων και δομικών δυνάμεων.

#### **1.3.1.Δυνάμεις Van der Waals - London ή δυνάμεις διάχυσης.**

Οι δυνάμεις αυτές είναι ελκτικής φύσεως. Η εισαγωγή τους στην μελέτη της σταθερότητας λεπτών φιλμ διαβροχής εισήχθη για πρώτη φορά από τους Mahanty & Niham<sup>(57)</sup>.

#### **1.3.2. Ηλεκτροστατικές δυνάμεις**

Οι δυνάμεις αυτές θεωρούνται απωστικής φύσεως και το μέγεθός τους μπορεί να υπολογισθεί αν υποθέσουμε δύο ομοειδώς φορτισμένα επίπεδα και παράλληλα στρώματα. Οι Devereux & de Bruyn έχουν δημοσιεύσει στο παρελθόν πίνακες με τις τιμές αυτών των δυνάμεων για διάφορα συστήματα<sup>(58)</sup>.

### 1.3.3. Δομικές δυνάμεις<sup>(27)</sup>.

Οι δυνάμεις Van der Waals και οι ηλεκτροστατικές μπορούν να εξηγήσουν ορισμένες από τις πολικές ιδιότητες του νερού. Δεν εξηγούν όμως φαινόμενα που οφείλονται σε δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω δεσμών υδρογόνου.

Τα φαινόμενα αυτά περιγράφονται από τις επονομαζόμενες δυνάμεις διάλυσης ή δομικές δυνάμεις. Το αποτέλεσμα αυτών των δυνάμεων είναι η υδροφιλική συμπεριφορά, όπως της επιφάνειας του χαλαζία, ή η υδροφοβική συμπεριφορά της ίδιας επιφάνειας καλυμμένης με λεπτό στρώμα οργανικής σύστασης.

## **1.4. Διαβρεχτότητα πετρώματος.**

Στην περίπτωση που έχουμε να κάνουμε με συστήματα πετρώματος/ πετρελαίου/ άλμης ορίζεται η έννοια της διαβρεχτότητας ως η προτίμηση που δείχνει το πέτρωμα ως προς το πετρέλαιο ή την άλμη.

Έχει γενικά υποτεθεί ότι η διαβρεχτότητα ενός δείγματος πετρώματος η ενός ταμιευτήρα οφείλεται στην σχετική αναλογία υδρόφιλων και υδρόφοβων περιοχών μέσα σε αυτό<sup>(40)</sup>. Θεωρητικά, η υδροφοβική συμπεριφορά σε ένα πέτρωμα μπορεί να οφείλεται στο ίδιο το πέτρωμα (ύπαρξη τέτοιων περιοχών είναι δυνατή πριν το πετρέλαιο μεταναστεύσει σε αυτό), στην απορρόφηση κάποιων συστατικών που βρίσκονται στο πετρέλαιο, ή στον συνδυασμό και των δύο προαναφερθέντων παραγόντων.

Κατά την μελέτη τριφασικών συστημάτων όπου εκτός από το πετρέλαιο και την άλμη έχουμε και την ύπαρξη αερίου θεωρούμε a priori ότι το αέριο αυτό δεν διαβρέχει την επιφάνεια του πετρώματος. Τούτο ερμηνεύεται από το ότι αποτελείται από μόρια χαμηλού μοριακού βάρους τα οποία και δεν αναπτύσσουν δυνάμεις πρόσφυσης με την επιφάνεια του βράχου<sup>(43)</sup>.

Η έννοια της διαβρεχτότητας έχει λοιπόν να κάνει με διαμοριακές αλληλεπιδράσεις δυνάμεων μεταξύ ρευστού / πετρώματος καθώς και μεταξύ των διαφορετικών φάσεων των ρευστών μεταξύ τους στην γειτονία των επιφανειών των πετρωμάτων.

Οι συνιστώσες των δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ ρευστού / πετρώματος είναι δυνάμεις Van der Waals, ηλεκτροστατικές καθώς και δομικές δυνάμεις εννοώντας κυρίως αλληλεπίδραση των δεσμών υδρογόνου του νερού με πολικά μόρια που εμπεριέχονται στο πετρέλαιο καθώς και με τις επιφάνειες των ορυκτών. Η μετρούμενη με διάφορες εργαστηριακές μεθόδους κατάσταση διαβρεχτότητας είναι αποτέλεσμα της συνισταμένης δράσης αυτών των δυνάμεων.

Αρχικά όλα τα πετρώματα ταμιευτήρων πετρελαίου πιστευόταν ότι ήταν ισχυρώς υδατοδιαβρεχτά. Και αυτό γιατί:

α) Έχει βρεθεί ότι όλα τα καθαρά ιζηματογενή πετρώματα είναι ισχυρώς υδατοδιαβρεχτά, και

β) Το περιβάλλον ιζηματογένεσης όλων των πετρωμάτων ταμιευτήρων είναι υδατικό.

### **1.5. Είδη διαβρεχτότητας**

Σε συστήματα πετρελαίου / άλμης / πετρώματος ορίζονται τα ακόλουθα είδη διαβρεχτότητας<sup>(16)</sup>:

α) Υδατοδιαβρεχτό (water wet) το πέτρωμα όπου η άλμη εμφανίζει την τάση να καταλαμβάνει τους μικρούς πόρους και να βρίσκεται σε επαφή με την πλειοψηφία της επιφάνειας του πετρώματος (βλ Σχ.5.). Η γωνία επαφής (contact angle) για αυτά τα πετρώματα παίρνει τιμές από 0- 75 μοίρες<sup>(16)</sup> (βλ.Σχ.4.)

Σχ.4. : Γωνία επαφής μεταξύ άλμης και μιας υδατοδιαβρεχτής επιφάνειας. Το σύστημα βρίσκεται σε σημείο Sor<sup>(23)</sup>.

Σχ.5.:Υδατοδιαβρεχτός κρύσταλλος γυαλιού. Το σύστημα βρίσκεται σε σημείο Swi.

Η κατανομή αυτή των ρευστών είναι η πιο ευμενής (χαμηλής ενέργειας) ενεργειακά για αυτό το σύστημα. Οποιοδήποτε πετρέλαιο που μπορεί να βρίσκεται στους μικρούς πόρους σε υδατοδιαβρεχτό σύστημα θα μεταναστεύσει στο κέντρο των μεγάλων πόρων προκειμένου να χαμηλώσει η ενέργεια του συστήματος.

β)Πετρελαιοδιαβρεχτό (oil wet) όπου συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο. Δηλαδή υπάρχει η τάση το πετρέλαιο να καταλαμβάνει τους μικρούς

πόρους και να βρίσκεται σε επαφή με την πλειοψηφία της επιφάνειας του συστήματος (βλ.Σχ.7.). Η γωνία επαφής (contact angle) για αυτά τα πετρώματα παίρνει τιμές από 105-180 μοίρες<sup>(16)</sup> (βλ.Σχ.6.)

Σχ.6.: Γωνία επαφής μεταξύ άλμης και πετρελαίου σε μια πετρελαιοδιαβρεχτή επιφάνεια . Το σύστημα βρίσκεται στο σημείο Swi<sup>(23)</sup>.



Σχ.7.: Λεπτό φιλμ πετρελαίου που διαβρέχει κρύσταλλο χαλαζία. Το σύστημα βρίσκεται στο σημείο Sor<sup>(23)</sup>.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο όρος διαβρεχτότητα αναφέρεται στο πέτρωμα και δεν έχει σχέση με το ρευστό που μπορεί να βρίσκεται σε επαφή με το πέτρωμα μια τυχαία χρονική στιγμή. Δηλαδή αν επιτευχθεί κορεσμός υδατοδιαβρεχτού πέτρωματος με ένα οποιοδήποτε αργό πετρέλαιο ή καθαρό υδρογονάνθρακα (π.χ. Silicon oil , Soltrol 130) το πέτρωμα εξακολουθεί να διατηρεί την ιδιότητά του αυτή.

Απόδειξη αυτού είναι ότι αν εμβαπτισθεί ένα υδατοδιαβρεχτό δοκίμιο κορεσμένο με πετρέλαιο σε άλμη τότε αυτή θα προσρροφηθεί από το πέτρωμα αποδεικνύοντας την "προτίμηση" του πετρώματος σε αυτό το ρευστό.

Για το συγκεκριμένο παράδειγμα αλλά και για οποιοδήποτε άλλο υδατοδιαβρεχτό πέτρωμα, η άλμη αποτελεί την διαβρέχουσα φάση ενώ το πετρέλαιο την μη διαβρέχουσα. Αντίστοιχα σε ένα πετρελαιοδιαβρεχτό πέτρωμα διαβρέχουσα φάση θα είναι το πετρέλαιο ενώ μη διαβρέχουσα η άλμη.

Ένα πέτρωμα το οποίο δεν δείχνει ιδιαίτερη προτίμηση ούτε στην μια φάση (άλμη) ούτε στην άλλη (πετρέλαιο) ορίζεται ως ενδιάμεσα διαβρεχτό. Η γωνίες επαφής (contact angle) για αυτά τα πετρώματα παίρνει τιμές από 75-105 μοίρες<sup>(16)</sup>.

Το πέτρωμα στο οποίο παρουσιάζονται περιοχές πετρώματος με διαφορετικές διαβρεχτότητες ονομάζεται κλασματικά διαβρεχτό (fractional wet).

Εδώ πρέπει επίσης να σημειωθεί και η έννοια της μεικτής διαβρεχτότητας (mixed wettability) όπως προτάθηκε από τον Salathiel<sup>(2)</sup>. Στην ουσία αποτελεί έναν τύπο η καλύτερα ένα εξειδικευμένο μοντέλο κλασματικής διαβρεχτότητας όπου οι πετρελαιοδιαβρεχτές επιφάνειες αποτελούν ένα συνεχές μονοπάτι διαμέσω των μεγαλύτερων πόρων ενώ οι μικρότεροι πόροι παραμένουν υδατοδιαβρεχτοί.

Αυτή είναι και η κατάσταση που παρατηρείται συχνά στα πετρώματα ταμιευτήρων πετρελαίου. Εξηγείται με το ότι το πετρέλαιο αρχικά εισήλθε στους μεγαλύτερους πόρους. Με την πάροδο του χρόνου έγινε επικάθηση των ασφαλτικών συστατικών σε ορισμένους πόρους καθιστώντας ορισμένες από αυτές πετρελαιοδιαβρεχτές.

### **1.6. Σημασία της διαβρεχτότητας.**

Η διαβρεχτότητα επηρεάζει πολλούς τομείς τόσο στην παραγωγική διαδικασία όσο και στις εργαστηριακές μετρήσεις:

1. Στην παραγωγική διαδικασία :

α) Κατανομή της υδατικής και πετρελαικής φάσης μέσα στους πόρους του πετρώματος .

β) Υπολειματικοί βαθμοί κορεσμού των φάσεων μέσα στο πέτρωμα.

γ) Το ποσό του πετρελαίου το οποίο μπορεί να αποληφθεί όπως επίσης και ο ρυθμός με τον οποίο γίνεται αυτή η απόληψη. Γνώση της διαβρεχτότητας του πετρώματος εξάλλου είναι αναγκαία για την επιλογή και εφαρμογή μεθόδων δευτερογενούς εκμετάλλευσης.

Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι η επιτροπή αποληψιμότητας πετρελαίου του Αμερικανικού Ινστιτούτου Πετρελαίου (API), έχει αναπτύξει εξισώσεις πρόβλεψης της παραγωγής από 312 περιπτώσεις ταμειωτήρων πετρελαίου. Η θεωρούμενη πιο αξιόπιστη τέτοια εξίσωση είναι η ακόλουθη<sup>(28)</sup> :

$$RE = 0.471 + 0.170 W + 0.130 k - 0.158 \log(\mu_0) \quad (4)$$

όπου:

RE : αποληψιμότητα πετρελαίου ( Recovery Efficiency)

W : δείκτης διαβρεχτότητας USBM (=  $\log(A1/A2)$ )

k : απόλυτη διαπερατότητα (mD)

$\mu_0$  : ιξώδες πετρελαίου (cP)

Με εφαρμογή στατιστικού ελέγχου (t - test) για καθεμία από τις παραμέτρους της εξίσωσης (4), το 90 % επίπεδο αβεβαιότητας είναι +/- 28% για το ιξώδες , +/- 42% για την διαπερατότητα και μόνο 19% για την διαβρεχτότητα.

2. Στις εργαστηριακές μετρήσεις η διαβρεχτότητα επηρεάζει όλων των ειδών τις αναλύσεις όπως:

α) Τριχοειδείς πιέσεις

β) Σχετικές διαπερατότητες

γ) Απόδοση εκτόπισης πετρελαίου από νερό

δ) Ηλεκτρικές ιδιότητες

## **1.7. Παράγοντες που επηρεάζουν την διαβρεχτότητα ενός πετρώματος**

### **1.7.1. Επιφανειακά ενεργοί παράγοντες.**

Οι επιφανειακά ενεργοί παράγοντες είναι ενώσεις που εμπεριέχονται στο πετρέλαιο<sup>(16)</sup> και επηρεάζουν την διαβρεχτότητα του πετρώματος. Πιστεύεται ότι είναι συστατικά που περιέχουν οξυγόνο, άζωτο και θείο (NSO compounds).

Αυτά τα συστατικά αποτελούνται συνήθως από ένα πολικό μέρος και από την υδρογονανθρακική αλυσίδα. Το πολικό μέρος που περιέχει τα προαναφερθέντα χημικά στοιχεία, εντοπίζεται κυρίως στα βαριά κλάσματα του πετρελαίου (όπως ρητίνες: αδιάλυτο κλάσμα του πετρελαίου σε προπάνιο και διαλυτό σε n - επτάνιο και ασφαλένια: αδιάλυτο κλάσμα του πετρελαίου σε n - επτάνιο ) και μπορεί να προσροφηθεί πάνω στην επιφάνεια του πετρώματος αφήνοντας ελεύθερη την υδρογονανθρακική αλυσίδα και καθιστώντας έτσι το πέτρωμα πετρελαιοδιαβρεχτό.

Οι ενώσεις που αντιστοιχούν σε αυτά τα στοιχεία είναι:

α)Οξυγόνο. Πιστεύεται ότι είναι όξινα και περιλαμβάνουν τις φαινόλες και μεγάλο μέρος των καρβοξυλικών οξέων. Οι Seifert & Howells<sup>(17)</sup> απέδειξαν πειραματικά ότι αυτή η ομάδα των ενώσεων είναι επιφανειακά ενεργός σε αλκαλικό pH .

β)Θείο. Περιλαμβάνουν ομάδες ενώσεων όπως σουλφίδια, πολυσουλφίδια, θεοφίνες και μερκαπτάνες.

γ)Άζωτο. Πιστεύεται ότι είναι είτε βασικά είτε ουδέτερα και περιλαμβάνουν ομάδες ενώσεων όπως αμίδια , πορφυρίνες και πυριδίνες.

Επειδή οι επιφανειακά ενεργοί παράγοντες που περιέχονται στο πετρέλαιο είναι πολλοί και εντοπίζονται σε μικρό κλάσμα της σύστασης του δεν έχει καταστεί δυνατό μέχρι σήμερα να προσδιοριστούν αναλυτικά αυτοί που επηρεάζουν την διαβρεχτότητα ενός πετρώματος.

Πειράματα έχουν δείξει ότι πολλοί από αυτούς τους επιφανειακούς παράγοντες είναι διαλυτοί στο νερό και ικανοί να περνούν από λεπτά στρώματα νερού και να προσροφώνται στην επιφάνεια του πετρώματος<sup>(15)</sup>.

### **1.7.2.Ορυκτολογική σύσταση πετρώματος**

Αν δεν ληφθεί υπόψη η χημική επίδραση της άλμης ο χαλαζίας τείνει να προσροφά απλά μόρια οργανικών βάσεων ενώ τα ασβεστολιθικά ορυκτά απλά μόρια οργανικών οξέων. Αυτό συμβαίνει γιατί ο χαλαζίας κανονικά είναι φορτισμένος αρνητικά και έχει

ελαφρά όξινη συμπεριφορά μέσα σε νερό με ουδέτερο pH ενώ τα ασβεστολιθικά ορυκτά στο ίδιο περιβάλλον είναι φορτισμένα θετικά και εμφανίζουν ελαφρά βασική συμπεριφορά.

Έτσι αυτές οι επιφάνειες (όσον αφορά τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις ) θα έλκουν και θα απορροφούν τα συστατικά εκείνα από το πετρέλαιο που έχουν το αντίθετο φορτίο πραγματοποιώντας μια σχέση οξέος - βάσεως.

Σε πιο περίπλοκα συστήματα πετρελαίου / άλμης / πετρώματος, η επιφάνεια του βράχου δεν εμφανίζει αναγκαία την προτίμηση προς τα αντίθετου φορτίου συστατικά. Σε πρόσφατη εργασία των M.Robin & E.Rosenberg<sup>(23)</sup> βρέθηκε ότι ο χαλαζίας, οι άστριοι και ο ιλλίτης είναι υδατοδιαβρεχτοί ενώ οι κρύσταλλοι καολινίτη είναι πετρελαιοδιαβρεχτοί σε μεγέθη 10 μ και υδατοδιαβρεχτοί σε μεγέθη 1 μ.

Επίσης πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει την απορρόφηση ασφατενίων και ρητινών σε αργιλλικά ορυκτά και βρήκαν ότι η απορρόφηση αυτή μπορεί να καταστήσει τα ορυκτά αυτά περισσότερο πετρελαιοδιαβρεχτά<sup>(19),(20)</sup>.

Οι Collins & Melrose<sup>(15)</sup> μέτρησαν πειραματικά την απορρόφηση ασφατενίων (διαλυμένων σε τολουόλη) σε καολινίτη. Οι ξηρές άργιλλοι έδωσαν τιμές απορρόφησης 30 mg ασφατενίων / gr πετρώματος. Πρόσθεση νερού στις άργιλλους μείωσαν την τιμή της απορρόφησης σε 13 mg/gr.

Αυτό αποδεικνύει ότι η γνώση και μόνο της ορυκτολογίας του πετρώματος δεν είναι αρκετή για τον προσδιορισμό της διαβρεχτότητας του.

#### 1.7.3. Ύπαρξη κατιόντων πολλαπλού φορτίου.

Έχει αποδειχτεί ότι πολλαπλού φορτίου κατιόντα που μπορεί να προέρχονται από την ύπαρξη βαρέων μετάλλων (π.χ. Ni , V ) στην σύσταση του πετρελαίου<sup>(59)</sup> είναι δυνατόν να αυξήσουν την απορρόφηση συστατικών αυτού στην επιφάνεια του πετρώματος.

#### 1.7.4. Χημεία της άλμης.

Η αλατότητα και το pH της άλμης είναι δύο πολύ σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την κατάσταση διαβρεχτότητας ενός πετρώματος. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο από την στιγμή που επιδρούν στο επιφανειακό φορτίο της επιφάνειας του βράχου και στις σχηματιζόμενες διεπιφάνειες μη αναμειξιμων ρευστών. Παράγοντες που

με την σειρά τους μπορεί να επηρεάσουν την απορρόφηση συστατικών του πετρελαίου στην επιφάνεια του πετρώματος.

Για παράδειγμα το επιφανειακό φορτίο του χαλαζία στο νερό με χαμηλή τιμή PH είναι θετικό αλλά γίνεται αρνητικό σε τιμή του PH πάνω από 2 - 3.7. Ενώ ο ασβεστόλιθος ο οποίος είναι θετικά φορτισμένος σε ουδέτερο pH όπως αναφέρθηκε το φορτίο του δεν αλλάζει σε αρνητικό πριν το pH ξεπεράσει την τιμή του 8 - 9.5.

Σε συστήματα χαλαζία / άλμης / πετρελαίου τα πολλαπλώς φορτισμένα ιόντα που μπορεί να περιέχονται μέσα στην άλμη μπορεί να μειώσουν την διαλυτότητα συστατικών του πετρελαίου και να αυξήσουν την απορρόφηση τους στις επιφάνειες των ορυκτών καθιστώντας τους πιο πετρελαιοδιαβρεχτές<sup>(18)</sup>. Σαν τέτοια ιόντα αναφέρονται τα  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $Cu^{+2}$ ,  $Ni^{+2}$  &  $Fe^{+3}$ .

Τα ιόντα αυτά επίσης μπορεί να δράσουν και σαν ενεργοποιητές συστατικών που περιέχονται στο πετρέλαιο λειτουργώντας σαν γέφυρες μεταξύ της επιφάνειας του πετρώματος και ενός συστατικού φέρνοντας αυτό πιο κοντά στην επιφάνεια του πετρώματος.

Στα εργαστηριακά πειράματα, η σύσταση της εργαστηριακής άλμης μπορεί επίσης να επηρεάσει και την αποληψιμότητα πετρελαίου με εκτόπιση από νερό, όπως αναφέρεται και στην εργασία των Yildiz H.O. & Morrow N.R. <sup>(56)</sup>. Ο συσχετισμός αυτός υπάρχει καθώς όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η αλατότητα επηρεάζει την διαβρεχτότητα του πετρώματος η οποία με την σειρά της σαν ιδιότητα επηρεάζει την αποληψιμότητα του πετρελαίου<sup>(56)</sup>.

### **1.8. Συσχετισμός διαβρεχτότητας / ορυκτολογίας πετρώματος / σύστασης πετρελαίου.**

Γενικά θεωρείται ότι η μετρήσιμη εργαστηριακά τιμή διαβρεχτότητας ενός δοκιμίου πετρώματος ή η διαβρεχτότητα ενός ταμιευτήρα πετρελαίου συνδέεται με την αναλογία υδροφιλικών και υδροφοβικών περιοχών στην επιφάνεια των πόρων του πετρώματος<sup>(40)</sup>.

Η υδροφοβία αυτή σε ένα πέτρωμα μπορεί να οφείλεται :

α) Στην υδροφοβική συμπεριφορά της στερεής επιφάνειας των πόρων (υδροφοβικές περιοχές μπορεί να υπάρχουν στους πόρους του πετρώματος πριν το πετρέλαιο μεταναστεύσει σε αυτούς).

β) Στην παρουσία κάποιων ενώσεων που εμπεριέχονται στην σύσταση του πετρελαίου και απορροφήθηκαν σε αρχικά υδροφιλικές επιφάνειες οι οποίες μετατράπηκαν εκ των υστέρων σε υδροφοβικές.

γ) Σε συνδυασμό και των δύο παραπάνω παραγόντων.

Λίγα πράγματα είναι γνωστά μέχρι σήμερα όσον αφορά τις ενώσεις που είναι ικανές να αλλάζουν την υδροφιλική συμπεριφορά των επιφανειών των πόρων ενός πετρώματος. Αυτό οφείλεται κυρίως στην πολυπλοκότητα της σύστασης του πετρελαίου. Κατά το παρελθόν διάφοροι ερευνητές έχουν ασχοληθεί με αυτό το θέμα προσπαθώντας να τους απομονώσουν<sup>(40,49,50,51,52)</sup>.

Οι παράγοντες αυτοί πιστεύεται<sup>(51)</sup> ότι εμπεριέχονται στο αποκαλούμενο «βαρύ κλάσμα» του πετρελαίου το οποίο περιέχει κύρια τις πολικές ενώσεις και αποτελείται από ασφαλτένια και ρητίνες.

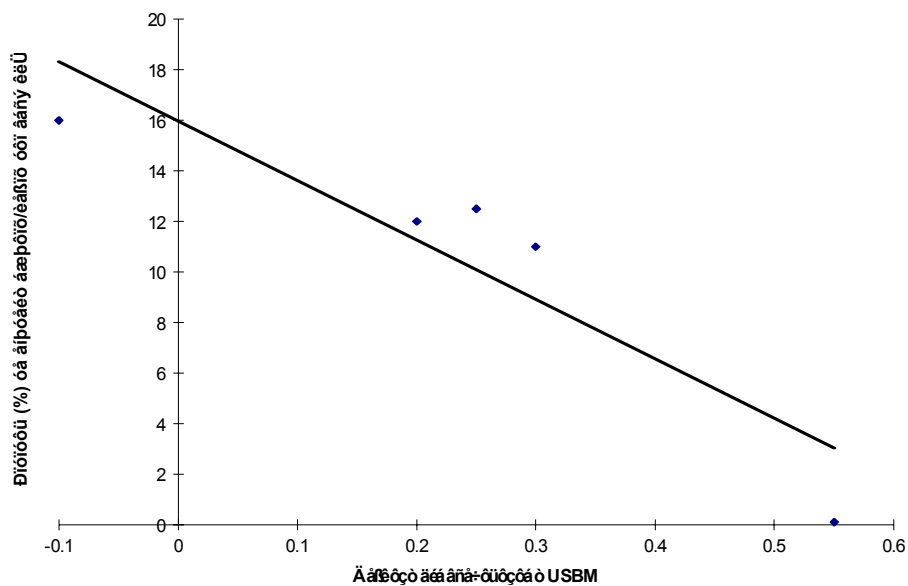
Στην πλέον πρόσφατη εργασία που έχει δημοσιευθεί πάνω σε αυτό το θέμα οι Crocker και Marchin<sup>(52)</sup> πραγματοποίησαν πειράματα γήρανσης χρησιμοποιώντας δοκίμια τύπου «Berea» με διαλύματα γνωστής περιεκτικότητας σε ρητίνες και μέτρησαν την αλλαγή της διαβρεχτότητας που επιτεύχθηκε κάθε φορά χρησιμοποιώντας την μέθοδο USBM.

Ένα άλλο μέρος των πειραμάτων τους είχε σχέση με την ανάλυση με φασματογράφο μάζας HRMS (High Resolution Mass Spectrometry) των διαλυμάτων αυτών προκειμένου να αναγνωριστούν οι επιφανειακά ενεργοί παράγοντες που είναι υπεύθυνοι για την αλλαγή της κατάστασης διαβρεχτότητας ενός πετρώματος.

Στο πετρέλαιο της εταιρίας Conoco με το οποίο επιτεύχθηκε μεγάλη ποσοτικά αλλαγή του δείκτη διαβρεχτότητας το 16% των πολικών του συστατικών ήταν ενώσεις αζώτου / θείου. Σαν επιφανειακά ενεργοί παράγοντες (υπεύθυνοι για την αλλαγή της διαβρεχτότητας) αναγνωρίστηκαν ενώσεις όπως οι θειονοπυρόλες, οι θειοπυριδίνες και οι ναφθenoθειοπυριδίνες.

Για το συγκεκριμένο τύπο πετρελαίου και πετρώματος αποδείχθηκε ότι η αυξημένη σύσταση ενώσεων αζώτου/θείου στο βαρύ κλάσμα έχει σαν αποτέλεσμα την μεγαλύτερη ποσοτικά αλλαγή της διαβρεχτότητας του πετρώματος από την υδατοδιαβρεχτή στην πετρελαιοδιαβρεχτή κατάσταση (βλ. Σχ.8.)

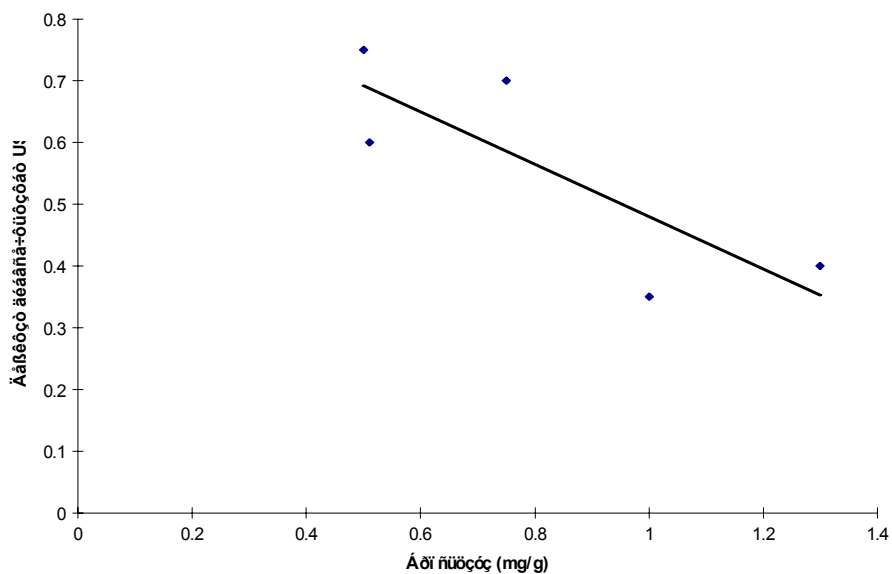
Όσο-άσεί υό άέά άηά-ούόςά ο ι ά δι οι ούι άί ρούι άφ οι ό / έάπ ό



Σχ.8.:Συσχετισμός διαβρεχτότητας και ποσοστού ενώσεων αζώτου/θείου στο πετρέλαιο<sup>(52)</sup>.

Στην ίδια εργασία έχει δειχθεί επίσης ότι η αυξημένη απορρόφηση των πολικών συστατικών έχει σαν αποτέλεσμα την αυξημένη ποσοτικά αλλαγή της διαβρεχτότητας.( βλ. Σχ.9.)

Όσο-άσεί υό άέά άηά-ούόςά ο δι οι γ ά δι ηύόςόό δι έέέρι άί ρούι



Σχ.9.:Συσχετισμός διαβρεχτότητας και ποσού πολικών ενώσεων στο πετρέλαιο<sup>(52)</sup>.





## Κεφάλαιο 2: Αποληψιμότητα και παγίδευση πετρελαίου σε πορώδη μέσα.

-

### 2.1. Αποληψιμότητα πετρελαίου

#### 2.1.1. Απόληψη πετρελαίου από πορώδη μέσα, με την διεργασία της αυθόρμητης απορρόφησης (spontaneous imbibition).

Η αυθόρμητη απορρόφηση συμβάλλει σημαντικά στην παραγωγή πετρελαίου από ρηγματωμένους ταμιευτήρες όπου η μεταφορά μάζας διαμέσω των ρωγμών καθορίζει την παραγωγή.

Επίσης είναι σημαντική στον υπολογισμό της διαβρεχτότητας πορώδων δοκιμίων. Ο βαθμός της απορρόφησης εξαρτάται κυρίως από το πορώδες μέσο, τα ρευστά και τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Πιο συγκεκριμένα :

- 1) Την απόλυτη διαπερατότητα του πετρώματος.
- 2) Τις σχετικές διαπερατότητες των ρευστών.
- 3) Το σχήμα του δοκιμίου του πετρώματος.
- 4) Την διεπιφανειακή τάση.
- 5) Την διαβρεχτότητα.
- 6) Τον αριθμό των επιφανειών απορρόφησης.

Οι περισσότερες αναλύσεις του φαινομένου της απορρόφησης μέχρι σήμερα στηρίχθηκαν στο μοντέλο των τριχοειδών κυλινδρικών σωλήνων. Για ένα κυλινδρικό τριχοειδή σωλήνα ακτίνας  $r$  η τριχοειδής πίεση δίνεται από την εξίσωση του Laplace :

$$P_c = 2 \sigma \cos\theta / r \quad (5)$$

όπου:

- $P_c$  : τριχοειδής πίεση.
- $\sigma$  : η διεπιφανειακή τάση.
- $\theta$  : γωνία επαφής.

Η σχέση μεταξύ της διαπερατότητας  $k$ , του πορώδους  $\phi$  και της σκολιότητας  $\tau$  για ένα σύστημα παράλληλων ίσου μεγέθους τριχοειδών σωλήνων ακτίνας  $r$  δίνεται από τον Leverett (1939):

$$r = 2 \sqrt{(2\delta k / \delta)} \quad (6)$$

Έτσι η τριχοειδής πίεση όπως αυτή δίνεται από την εξίσωση (4) γράφεται :

$$P_c = \sigma \cos\theta \sqrt{(\delta / 2\delta k)} \quad (7)$$

Ο λόγος της διαπερατότητας προς το μέγεθος των πόρων δίνει μια πρώτη έννοια του χαρακτηριστικού μήκους  $\xi$  αυτών που είναι συνάρτηση της διαπερατότητας του πορώδους και της σκολιότητας :

$$\xi = 2 k / r = \sqrt{(k\delta / 2\delta)} \quad (8)$$

Στην γραμμική απορρόφηση (linear imbibition) για παράδειγμα όπου νερό στιγμιαία εκτοπίζει αέρα (μη διαβρέχουσα φάση) το φαινόμενο του ιξώδους του νερού μπορεί να απαληφθεί. Ο ρυθμός απορρόφησης του νερού δίνεται από την εξίσωση:

$$Q_w = A \sigma \xi \cos\theta / X_w \mu_w \quad (9)$$

όπου  $A$  είναι η διατομή της επιφάνειας απορρόφησης,  $X_w$  η απόσταση που διανύει το μέτωπο της προσρόφησης και  $\mu_w$  το ιξώδες του νερού.

Αν όμως το ιξώδες της μη διαβρέχουσας φάσης πρέπει να συμπεριληφθεί όπως στην περίπτωση όπου νερό εκτοπίζει πετρέλαιο μέσω του φαινομένου της αυθόρμητης απορρόφησης τότε η (9) γράφεται :

$$Q_w = A \sigma \xi \cos\theta / L \mu_a \quad (10)$$

όπου το  $\mu_a$  είναι το φαινόμενο ιξώδες της διφασικής ροής μέσα από τους κυλινδρικούς τριχοειδείς σωλήνες και  $L$  μήκος αυτών. Το φαινόμενο ιξώδες στην περίπτωση αυτή δίνεται από τον τύπο :

$$\mu_a = \mu_w (X_w / L) + \mu_o (1 - (X_w / L)) \quad (11)$$

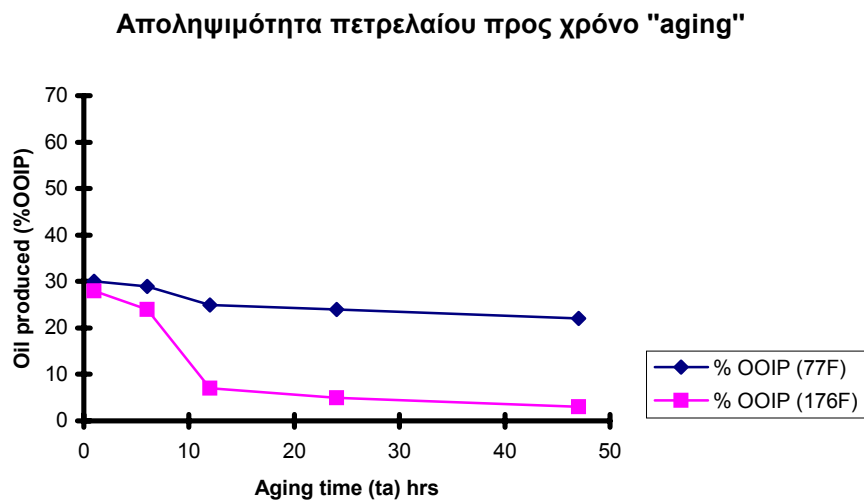
Εξ ορισμού, ο βαθμός κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης  $S_w$  είναι ίσος με τον λόγο  $(X_w / L)$  οπότε το φαινόμενο ιξώδες μπορεί να γραφεί και ως :

$$\mu_a = \mu_w S_w + \mu_o (1 - S_w) \quad (12)$$

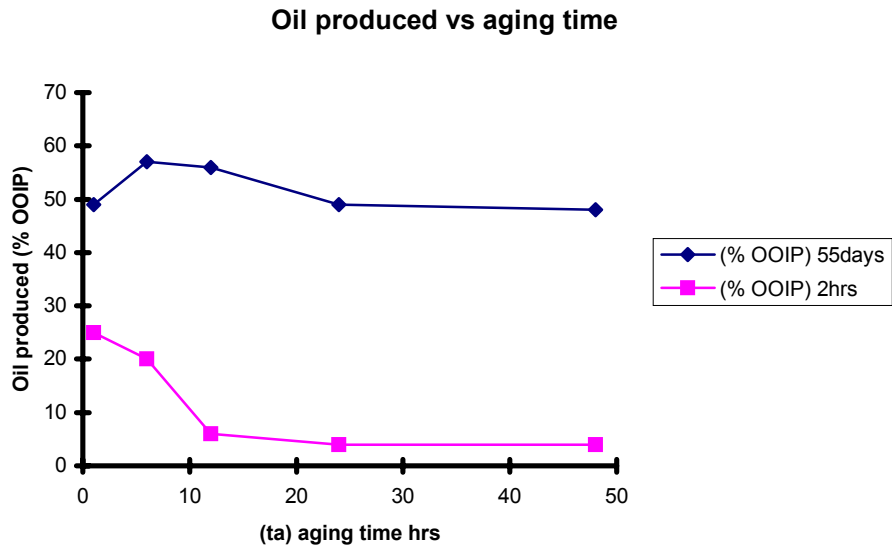
Από την εξίσωση (10) μπορούμε να δούμε ότι ο ρυθμός απορρόφησης είναι ανάλογος:

- 1)Του λόγου της επιφάνειας απορρόφησης προς το μήκος αυτής.
- 2)Του λόγου της διεπιφανειακής τάσης των δυο ρευστών προς το φαινόμενο ιξώδες αυτών.
- 3)Του χαρακτηριστικού μήκους των πόρων.
- 4)Του συνημιτόνου της γωνίας επαφής.

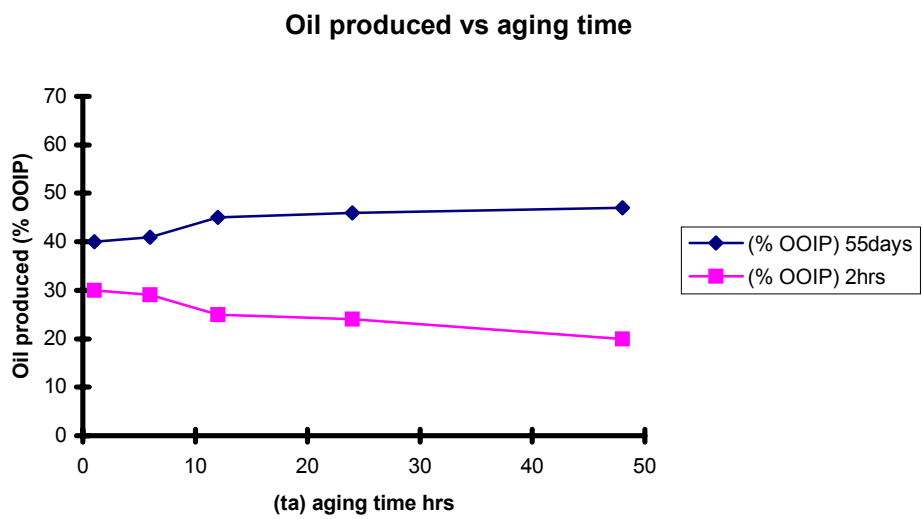
Τα διαγράμματα που ακολουθούν<sup>(6)</sup> συνοψίζουν την επίδραση του χρόνου της γήρανσης, καθώς και την θερμοκρασία που γίνεται αυτό, στην μικρής και μεγάλης χρονικής διάρκειας απόληψη πετρελαίου στα εργαστηριακά πειράματα.



Σχ.10. : Αποληψιμότητα πετρελαίου μετά από 2 ώρες αυθόρμητης απορρόφησης.



Σχ.11. : Αποληψιμότητα πετρελαίου για 2 ώρες και 55 ημέρες . Γήρανση στους 177 F.



Σχ.12. : Αποληψιμότητα πετρελαίου για 2 ώρες και 55 ημέρες . Γήρανση στους 77 F.

#### 2.1.1.1. Εισαγωγή της εξίσωσης αδιάστατου χρόνου - Ορισμός του δείκτη διαβρεχτότητας $W_R$

Αν πληρούνται οι εξής προϋποθέσεις<sup>(21)</sup>:

α) Τα σχήματα των δοκιμίων είναι ιδανικά.

β) Ο λόγος ιξώδους πετρελαίου / νερού του ταμιευτήρα είναι επαναλήψιμος στο εργαστήριο.

γ) Οι αρχικοί κορεσμοί του ταμιευτήρα πρέπει να είναι επαναλήψιμοι στο εργαστήριο.

δ) Οι εξισώσεις τριχοειδών πιέσεων στον ταμιευτήρα πρέπει να είναι επαναλήψιμες στο εργαστήριο, και

ε) Οι εξισώσεις σχετικής διαπερατότητας το ίδιο.

Όταν αυτές οι συνθήκες ικανοποιούνται οι βαθμοί κορεσμού που επιτυγχάνονται στο εργαστήριο είναι αντίστοιχοι με αυτούς στον ταμιευτήρα σε αντίστοιχους χρόνους.

Οι αντίστοιχοι χρόνοι για ένα εργαστηριακό πείραμα απόληξης πετρελαίου, με την διεργασία της αυθόρμητης απορρόφησης, και τον ταμιευτήρα δίνονται από την παρακάτω σχέση<sup>(21)</sup> (βλ. επίσης<sup>(22)</sup>):

$$(t k / \varphi \mu_w L^2) (dP_c / dS_w)_{\text{model}} = (t k / \varphi \mu_w L^2) (dP_c / dS_w)_{\text{matrix block}} \quad (13)$$

Συνήθως είναι δύσκολο να ικανοποιηθεί η απαίτηση να ταιριάζουν οι συναρτήσεις τριχοειδών πιέσεων και σχετικών διαπερατοτήτων μεταξύ μοντέλου και ταμιευτήρα. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν χρησιμοποιηθεί στην μέτρηση των παραμέτρων του μοντέλου αντιπροσωπευτικό δοκίμιο με την ίδια κατάσταση διαβρεχτότητας με τον ταμιευτήρα.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν ένα τέτοιο αντιπροσωπευτικό δείγμα οι διαφορές στις τιμές των απόλυτων διαπερατοτήτων δεν επηρεάζουν την απόληξη πετρελαίου από την στιγμή που οι σχετικές διαπερατότητες έχουν εφαρμογή σε όλο το πέτρωμα.

Ενώ οι διαφορές στις τριχοειδείς πιέσεις μπορεί να συμπεριληφθούν από την στιγμή που σε ίδιου τύπου πετρώματα οι τριχοειδείς πιέσεις συναρτήσει των βαθμών κορεσμού συσχετίζονται μεταξύ τους με την αδιάστατη συνάρτηση  $J(S_w)$  του Leverett<sup>(21)</sup>:

$$J(S_w) = (1 / \sigma f(\theta)) (\sqrt{k / \varphi}) P_c \quad (14)$$

όπου :

$f(\theta)$  : αδιάστατος συντελεστής διαβρεχτότητας

$P_c$  : τριχοειδής πίεση

$\sigma$  : διεπιφανειακή τάση πετρελαίου νερού

$k$  : απόλυτη διαπερατότητα σε νερό

$\varphi$  : πορώδες

Οι όροι  $\sigma$  ,  $f(\theta)$  ,  $k$  ,  $\varphi$  είναι ανεξάρτητοι του βαθμού κορεσμού σε νερό. Αν η (14) ολοκληρωθεί ως προς τον βαθμό κορεσμού σε νερό γράφεται:

$$d(J_{Sw}) / dSw = (1 / \sigma f(\theta)) (\sqrt{k / \varphi}) (dP_c / dSw) \quad (15)$$

Με αντικατάσταση στην (15) του  $dP_c / dSw$  με το ισοδύναμό του :

$$\sigma f(\theta) (\sqrt{\varphi / k}) (dJ_{Sw} / dSw) \quad (16)$$

και σημειώνοντας ότι τα  $dJ_{Sw} / dSw$  και ο συντελεστής διαβρεχτότητας  $f(\theta)$  είναι τα ίδια για το μοντέλο και τον ταμειυτήρα τότε παίρνουμε την εξίσωση:

$$(t \sqrt{k / \varphi}) (\sigma / \mu_w L^2)_{\text{model}} = (t \sqrt{k / \varphi}) (\sigma / \mu_w L^2)_{\text{matrix block}} \quad (17)$$

Με άλλα λόγια αν η παραγωγή πετρελαίου λόγω απορρόφησης σχεδιαστεί συναρτήσει του αδιάστατου παράγοντα  $[t \sqrt{k / \varphi} (\sigma / \mu_w / L^2)]$  τότε θα παραχθεί η ίδια καμπύλη αποληψιμότητας για το μοντέλο και για όλα τα δείγματα του ίδιου ορυκτολογικού τύπου και γεωμετρίας.

Η πειραματική απόδειξη αυτού του γεγονότος δίνεται από τα Σχ. 13,14 των Mattax & KYTE<sup>(21)</sup> όπου φαίνεται ότι η διαπερατότητα, το μήκος και το ιξώδες μπορούν να μετασχηματισθούν σε μια παράμετρο, τον αδιάστατο χρόνο  $t_D$ .

Σχ.13. : Δεδομένα πειράματος απορρόφησης

Σχ.14. : Δεδομένα πειράματος απορρόφησης ως προς αδιάστατο χρόνο  $t_D$ .

Μπορεί λοιπόν να εισαχθεί η έννοια του αδιάστατου χρόνου προκειμένου να υπάρξει αντιστοιχία των εργαστηριακών δεδομένων απόληψης πετρελαίου με τις συνθήκες πεδίου. Για τον σκοπό αυτό οι Mattax & KYTE πρότειναν την ακόλουθη εξίσωση αδιάστατου χρόνου<sup>(5)</sup>:

$$t_{D, MK} = C * t * \sqrt{k / \delta} * (\sigma / \mu_w) * (1 / Ls^2) \quad (18)$$

όπου:

$t_{D, MK}$  : ο αδιάστατος χρόνος

C : συντελεστής μετατροπής μονάδων ίσος με 0.018849 αν ο χρόνος απορρόφησης είναι σε min

k	: απόλυτη διαπερατότητα (mD)
φ	: πορώδες
σ	: διεπιφανειακή τάση (dyn/cm)
L	: χαρακτηριστικό μήκος (cm)
μ <sub>w</sub>	: ιξώδες νερού (cP)
t	: χρόνος απορρόφησης της υδατικής φάσης

Πριν ορίσουμε την έννοια του χαρακτηριστικού μήκους (L<sub>s</sub>) ορίζεται ο παράγοντας σχήματος ο οποίος δίνεται από την εξίσωση<sup>(5)</sup>:

$$F_s = (1/V) * \sum_{i=1}^n (A_i / d_{ai}) \quad (19)$$

όπου :

V : ολικός όγκος του δοκιμίου .

A<sub>i</sub> : η επιφάνεια ανοικτή στην απορρόφηση ως προς την (i) διεύθυνση.

d<sub>ai</sub> : η απόσταση της επιφάνειας A<sub>i</sub> από το κέντρο του δοκιμίου.

n: ο ολικός αριθμός των επιφανειών ανοικτών στην απορρόφηση .

Το χαρακτηριστικό μήκος τότε ορίζεται ως<sup>(5)</sup>:

$$L_s = \sqrt{(1/F_s)} = \sqrt{(V / \sum_{i=1}^n (A_i / d_{ai}))} \quad (20)$$

η

$$L_c = \sqrt{(V / \sum_{i=1}^n (A_i / X_{ai}))} \quad (21)$$

όπου X<sub>ai</sub> ορίζεται να είναι η απόσταση του μετώπου της απορρόφησης από το σημείο μη ροής (no flow boundary - βλ.Σχ.16) και L<sub>c</sub> & L<sub>s</sub> αναφέρονται στο αδιάστατο μήκος. Για τις συνθήκες που περιγράφονται στο Σχ.15. οι παράμετροι στις εξισώσεις (20) & (21) είναι ίδιες. Επομένως αν όλες οι επιφάνειες απορρόφησης είναι ανοικτές τότε L<sub>c</sub>=L<sub>s</sub> ενώ όταν μόνο μια επιφάνεια είναι ανοικτή (βλ.Σχ.15) τότε X<sub>ai</sub>=2d<sub>ai</sub> (βλ. και Σχ.16.) και

$$L_c = \sqrt{2} L_s \quad (22)$$



Σχ.15.: Πειραματικές συνθήκες όπως αυτές ορισθηκαν από τους Mattax & Kyte.

Σχ.16. «No flow boundaries» για τις πειραματικές συνθήκες του Σχ.15.

Προκειμένου όμως να συμπεριληφθεί και η επίδραση του ιξώδους (έχει δείχτεί ότι ο χρόνος απορρόφησης είναι ανάλογος του γεωμετρικού μέσου του ιξώδους νερού, πετρελαίου )

$$\mu_{gm} = \sqrt{\dot{\gamma} W^* \dot{\gamma} \ddot{\gamma}} \quad (25)$$

η εξίσωση των Mattax & KYTE διαμορφώνεται ως εξής :

$$t_{D, MK} = C^* t^* \sqrt{k / \ddot{\gamma}} * (\sigma / \mu_{gm}) * (1 / Lc^2) \quad (26)$$

Τα δεδομένα από ένα πείραμα απόληψης πετρελαίου με την διεργασία αυθόρμητης απορρόφησης από νερό, λαμβάνονται ως  $S_w = f(t)$ . Εν συνεχεία μετατρέπονται σε  $S_w = f(t_D)$  και σχεδιάζεται η καμπύλη των ψευδοτριχοειδών πιέσεων  $PS^{PS}$  συναρτήσει του βαθμού κορεσμού σε νερό  $PS^{PS} = f(S_w)$ .

Είναι:

$$PS^{PS} = 1 / \sqrt{td} \quad (27)$$

όπου:

$PS^{PS}$  : ψευδοτριχοειδείς πιέσεις.

$t_D$  : αδιάστατος χρόνος.

Ο αδιάστατος χρόνος  $t_D$  θα προκύψει από την εξίσωση (26). Το εμβαδόν που περικλείεται κάτω από αυτή την καμπύλη αποτελεί το έργο της απορρόφησης. Δηλαδή :

$$W = \int_{S_{wi}}^{1-S_{or}} P S dS_w \quad (28)$$

Μια ανάλογη καμπύλη έργου δίνει και ένα ισχυρά υδατοδιαβρεχτό δοκίμιο. Αυτή ορίζεται να είναι η καμπύλη αναφοράς. Ορίζουμε λοιπόν σαν δείκτη διαβρεχτότητας ( $W_R$ ):

$$W_R = W_{\text{ex core}} / W_{\text{strongly water wet core}} \quad (29)$$

όπου:

$W_{\text{ex core}}$  : έργο απορρόφησης δοκιμίου άγνωστης διαβρεχτότητας.

$W_{\text{strongly water wet core}}$  : έργο απορρόφησης ισχυρά υδατοδιαβρεχτού δοκιμίου.

Είναι προφανές ότι όσο αυτός ο δείκτης πλησιάζει την τιμή 1 τόσο πιο υδατοδιαβρεχτό είναι το δοκίμιο .

### 2.1.2. Απόληψη πετρελαίου από πορώδη μέσα με την διεργασία της εκτόπισης τύπου εμβόλου (piston like displacement).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόληψη πετρελαίου σε πορώδη μέσα κατά την εισπίεση νερού είναι :

- 1) Οι σχετικές διαπερατότητες νερού και πετρελαίου.
- 2) Ο λόγος ιξώδους νερού προς πετρέλαιο.
- 3) Τα τριχοειδούς φύσεως φαινόμενα (end effects).

Η απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης σχετικής ροής του νερού ένα οριζόντιο σύστημα σε οριζόντιο σύστημα, για εκτόπιση τύπου εμβόλου «piston like displacement» είναι<sup>(1)</sup>:

$$f_w(S_w) = \frac{1}{1 + (\mu_o/\mu_w) * (k_{ro}/k_{rw})} \quad (30)$$

όπου:

$f_w$  : κλασματική ροή του νερού στο σύστημα .

$S_w$  : βαθμός κορεσμού σε νερό

μο,μν :ιξώδες πετρελαίου και νερού αντίστοιχα.

kro,k<sub>rw</sub>:σχετικές διαπερατότητες πετρελαίου και νερού αντίστοιχα.

Στην εξίσωση αυτή:

α)Τα "end effects" θεωρούνται αμελητέα.

β)Η κλασματική ροή του νερού για δεδομένο και σταθερό βαθμό κορεσμού σε ένα δοκίμιο αυξάνεται όταν ο λόγος του ιξώδους νερού προς πετρέλαιο μειώνεται.

γ)Αύξηση του ιξώδους του πετρελαίου σημαίνει μείωση της κινητικότητας του σε σχέση με αυτή του νερού. Αυτή η αλλαγή προκαλεί την εμφάνιση του σημείου "breakthrough" νωρίτερα και σημαντική περίοδο διφασικής ροής νερού / πετρελαίου για οποιαδήποτε τιμή διαβρεχτότητας.

δ)Το ίδιο θα συμβεί και όταν αυξηθεί η τιμή του λόγου των σχετικών διαπερατοτήτων. Οι οποίες με την σειρά τους επηρεάζονται από την γεωμετρία των πόρων, την διαβρεχτότητα και την κατανομή των φάσεων μέσα στο δοκίμιο.

#### 2.1.2.1. Συσχετισμός διαβρεχτότητας - αποληψιμότητας πετρελαίου.

Ως σημείο "breakthrough" στην εκτόπιση πετρελαίου από νερό σε πορώδες μέσο, ορίζεται το σημείο στο οποίο εμφανίζεται η πρώτη ποσότητα νερού. Καθώς η διαδικασία συνεχίζεται, ο λόγος παραγόμενο νερό προς πετρέλαιο (WOR) αυξάνει μέχρι να φτάσουμε σε τέτοιο (WOR) όπου η έγχυση δεν είναι οικονομικά αποδεκτή. Το σημείο αυτό ονομάζεται πρακτικός ή οικονομικός υπολλειματικός βαθμός κορεσμού.

Βέβαια η εισπίεση μπορεί να συνεχιστεί μέχρι να σταματήσει πλήρως η παραγωγή πετρελαίου. Το σημείο αυτό ονομάζεται πραγματικός υπολλειματικός βαθμό κορεσμού σε πετρέλαιο. Σε ένα υδατοδιαβρεχτό σύστημα ο πρακτικός και ο οικονομικός υπολλειματικός βαθμός κορεσμού συμπίπτουν.

Η διαδικασία της εκτόπισης πετρελαίου από νερό στην κλίμακα του πορώδους είναι ως εξής:

Εστω υδατοδιαβρεχτό σύστημα σε υπολλειματικό βαθμό κορεσμού σε νερό (IWS). Το νερό ως διαβρέχουσα φάση θα καταλαμβάνει τους μικρότερους πόρους και τις επιφάνειες των μεγαλύτερων. Το πετρέλαιο ως μη διαβρέχουσα φάση θα καταλαμβάνει το κέντρο των πόρων αυτών. Αυτή η κατανομή των ρευστών μέσα στο πορώδες συμβαίνει με αυτόν τον τρόπο γιατί είναι αυτή που ευνοείται περισσότερο από άποψη

ενέργειας. Οποιαδήποτε ποσότητα πετρελαίου βρισκόταν έστω και τυχαία σε μικρούς πόρους θα μετανάστευε τελικά στο κέντρο των μεγαλύτερων πόρων λόγω αυθόρμητης απορρόφησης νερού. Κάτι τέτοιο θα χαμήλωνε την συνολική ενέργεια του συστήματος . Κατά την εισπίεση νερού σε αυτό το σύστημα αυτό θα κινείται σαν μέτωπο εισερχόμενο εύκολα στους μικρού και μεσαίου μεγέθους πόρους εκτοπίζοντας το πετρέλαιο στους μεγαλύτερους. Μπροστά από το μέτωπο αυτό μόνο πετρέλαιο θα κινείται (piston like displacement).

Ποσότητα πετρελαίου μπορεί να παγιδευτεί σε αδιέξοδα κανάλια του πορώδους. Η ποσότητα αυτή όταν το μέτωπο του νερού περάσει είναι πρακτικά ακίνητη και δεν μπορεί να αποληφθεί από το σύστημα όσο νερό και αν εισπιασθεί μέσα από αυτό. Ο λόγος παραγόμενο νερό προς πετρέλαιο "water to oil ratio" (WOR) τείνει συνεχώς αυξανόμενος μετά το σημείο "breakthrough".

Η απολήψιμη ποσότητα πετρελαίου είναι λοιπόν ανεξάρτητη από την συνολική ποσότητα ή όγκο νερού (PV) που θα εισπιασθεί στο σύστημα. Η ποσότητα πετρελαίου που απέμεινε στο σύστημα αποτελεί και τον υπολλειματικό βαθμό κορεσμού σε πετρέλαιο "residual oil saturation "(ROS).

Η ίδια διεργασία σε ένα πετρελαιοδιαβρεχτό σύστημα είναι ως εξής: Εστω δοκίμιο σε υπολλειματικό βαθμό κορεσμού σε νερό (IWS).

Εδώ λόγω της αντίστροφης ακριβώς κατάστασης διαβρεχτότητας η κατανομή των ρευστών είναι και η αντίστροφη σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση.

Το πετρέλαιο καταλαμβάνει αυτήν την φορά τους μικρότερους σε μέγεθος πόρους και την επιφάνεια των μεγαλύτερων ενώ το νερό καταλαμβάνει το κέντρο αυτών ακριβώς των πόρων .

Όταν αρχίσει η έγχυση νερού στο σύστημα αυτό θα δημιουργηθούν συνεχή μονοπάτια "fingering" στο κέντρο των μεγαλύτερων πόρων τραβώντας στην έξοδο το πετρέλαιο που καλύπτει την επιφάνεια των πόρων αυτών. Στους μικρού μεγέθους πόρους, το πετρέλαιο στην αρχή της διαδικασίας έγχυσης είναι ακινητοποιημένο μέχρι να καταφέρει το νερό να δημιουργήσει και εκεί συνεχή μονοπάτια. Μετά το σημείο «breakthrough» ο λόγος του παραγόμενου νερού προς πετρέλαιο αυξάνεται αλλά η παραγωγή του πετρελαίου συνεχίζεται αφού το νερό συνεχίζει να παρασέρνει το πετρέλαιο που βρίσκεται πάνω στα τοιχώματα των πόρων του πετρώματος.

Η αποληψιμότητα πετρελαίου σε αυτήν την περίπτωση, σε αντίθεση με την περίπτωση του υδατοδιαβρεχτού πετρώματος, είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ποσότητα ή τον όγκο του νερού που θα εγχυθεί, ενώ ο υπολλειματικός βαθμός κορεσμού σε πετρέλαιο δεν καθορίζεται μονοσήμαντα. Δηλαδή καθορίζεται πάντα σε συνάρτηση με τον όγκο νερού που χρησιμοποιήθηκε στην εισπίεση.

Τέλος πρέπει να επισημανθούν τα εξής:

α) Μιά έγχυση νερού σε ένα σύστημα συγκεκριμένης διαβρεχτότητας θα έχει την ίδια συμπεριφορά με μία έγχυση πετρελαίου σε ένα σύστημα της αντίστροφης διαβρεχτότητας .

β) Όλες οι διεργασίες αυτές λαμβάνουν χώρα όπου οι τριχοειδείς δυνάμεις είναι κυρίαρχες στο σύστημα. Αυτό συμβαίνει όταν ο λόγος δυνάμεων ιξώδους προς τριχοειδείς και ο λόγος δυνάμεων άνωσης προς τριχοειδείς (Bond number) έχουν αρκετά χαμηλές τιμές ώστε οι δυνάμεις άνωσης και ιξώδους να θεωρούνται αμελητέες στις παραπάνω διαδικασίες.

Για ένα υδατοδιαβρεχτό σύστημα ο υπολλειματικός βαθμός κορεσμού σε πετρέλαιο είναι ανεξάρτητος της παροχής του νερού έγχυσης. Παρόλα αυτά αν η παροχή γίνει αρκετά υψηλή τότε κάτι τέτοιο δεν θα ισχύει. Οι ιξώδεις δυνάμεις πλέον θα είναι κυρίαρχες στο σύστημα και ο μικροσκοπικός συντελεστής αποτελεσματικότητας εκτόπισης (Em) όπως αυτός ορίζεται από την σχέση<sup>(14)</sup> :

$$E_m = (1 - S_{or} - S_{wi} / 1 - S_{wi}) \quad (31)$$

θα πάρει διαφορετική τιμή. Προκειμένου να εκτιμηθεί το σημείο όπου γίνεται η αλλαγή από εκτόπιση πετρελαίου λόγω συμμετοχής των τριχοειδών δυνάμεων, σε εκτόπιση που οφείλεται και στην συμμετοχή των δυνάμεων ιξώδους θα πρέπει να συνδεθεί ο μικροσκοπικός συντελεστής αποτελεσματικότητας (Em) με έναν αδιάστατο αριθμό όπως αυτός είναι ο τριχοειδής αριθμός (capillary number) (Nca) και ο οποίος ορίζεται από την σχέση<sup>(14)</sup>:

$$Nca = (\mu_w U_w / \phi \gamma_{ow}) \quad (32)$$

όπου :

$\mu_w$  : ιξώδες νερού

$U_w$  : η παροχή ανα μονάδα επιφάνειας

$\phi$  : πορώδες

$\gamma_{ow}$ : διεπιφανειακή τάση νερού - πετρελαίου.

Το Σχ.17.<sup>(14)</sup> δίνει τις τιμές στις οποίες πρέπει να κυμαίνεται ο τριχοειδής αριθμός Nca ανάλογα με την καμπύλη κατανομής του μεγέθους των πόρων προκειμένου τα πειράματα εκτοπίσεων να διενεργούνται σε καθεστώς κυριαρχίας των τριχοειδών δυνάμεων (όπου η μικροσκοπική απόδοση εκτόπισης είναι σταθερή).

Σχ.17.: Συντελεστής αποτελεσματικότητας συναρτήσει του τριχοειδή αριθμού και της κατανομής των πόρων.

*Σημείωση : Από κάτω προς τα πάνω στις καμπύλες του σχ.17. : πλατειά καμπύλη κατανομής μεγέθους πόρων , μέση και στενή αντίστοιχα.*

Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό, προκειμένου να υποδιπλασιαστεί ο υπολλειματικός βαθμός κορεσμού σε πετρέλαιο κατά το ήμισυ πρέπει να αυξηθεί ο τριχοειδής αριθμός κατά 10 φορές.

Πρόσθετη ποσότητα πετρελαίου μπορεί επίσης να παραχθεί και με την χρήση προσθέτων για την ελάττωση της διεπιφανειακής τάσης.

#### 2.1.2.2. Φαινόμενα "end effects".

Τα φαινόμενα αυτά είναι αμελητέας σημασίας όσον αφορά την μελέτη σε κλίμακα ταμιευτήρα. Επηρεάζουν όμως σημαντικά τις εργαστηριακές μετρήσεις και πιο συγκεκριμένα τους βαθμούς κορεσμού και την αποληψιμότητα σε πετρέλαιο. Η εμφάνιση τους δε, εντοπίζεται τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο των προς εξέταση δοκιμίων.

##### 2.1.2.2.1. Φαινόμενα end effects εισόδου<sup>(39)</sup>.

Τα φαινόμενα «end effects» εισόδου ανακοινώθηκαν για πρώτη φορά στην πειραματική εργασία των Jones -Parra et all<sup>(65)</sup> και εμφανίζονται στα υδατοδιαβρεχτά συστήματα σαν αποτέλεσμα αυθόρμητης τοπικής απορρόφησης νερού στο δοκίμιο.

Το νερό στην αρχή της διαδικασίας της έγχυσης έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο με μία τοπική περιοχή του ολικού του όγκου. Αμέσως απορροφάται από τους πόρους λόγω της υδατοδιαβρεχτότητας του πετρώματος και κάτι τέτοιο έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία μιας αντίστροφης ροής πετρελαίου. Με άλλα λόγια, καθώς η έγχυση συνεχίζεται το νερό εξακολουθεί να εισρέει στο δοκίμιο από μία περιορισμένη περιοχή με αποτέλεσμα να ανατρέπεται η συνθήκη της γραμμικής ροής μέσα στο δοκίμιο.

Αν και δεν είναι δυνατόν να γίνει ποσοτική προσέγγιση στο φαινόμενο αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι αυτό εμφανίζεται ή εντείνεται υπό τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

α) Σε μικρού μήκους δοκίμια. Οπου γενικά τέτοια φαινόμενα είναι πιο έντονα από την στιγμή που το μήκος τους δεν επαρκεί για να αποκαταστήσει την ισορροπία των τριχοειδών δυνάμεων μέσα στο δοκίμιο.

β) Σε υψηλούς ρυθμούς παροχής. Αν και τα φαινόμενα αυτά εμφανίζονται πάλι στην είσοδο οι τριχοειδείς δυνάμεις που ελέγχουν την κατανομή των πιέσεων μέσα στο δοκίμιο τείνουν να ομαλοποιήσουν την κατανομή του νερού στην κάθετη προς την ροή επιφάνεια.

Σε χαμηλούς ρυθμούς παροχής οι τριχοειδείς δυνάμεις επικρατούν στο σύστημα και είναι ικανές να εξισορροπήσουν το φαινόμενο αυτό. Αντίθετα σε υψηλούς ρυθμούς παροχής οι τριχοειδείς δυνάμεις γίνονται αμελητέες με αποτέλεσμα να χάνεται η οποιαδήποτε εξισορρόπηση που θα μπορούσε να επιφέρει το σύστημα σε καθεστώς γραμμικής ροής.

γ) Σε λόγους ιξώδους πετρελαίου προς νερό μεγάλης τιμής.

Εδώ η χαμηλή αντίσταση στην περιοχή όπου έχει ήδη εισέλθει το νερό, σε σύγκριση με γειτονικά σημεία, τείνει να βοηθήσει την ανάπτυξη της ροής της του νερού μέσα στο δοκίμιο κατά την κατεύθυνση της βαθμίδας πίεσης. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι ένα είδος "fingering" που έχει προέλθει από το νερό.

#### 2.1.2.2.2. Φαινόμενα "end effects" εξόδου<sup>(39)</sup>.

Το αποτέλεσμα από την δράση αυτών των φαινομένων είναι η μεγαλύτερη τιμή του βαθμού κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης στην τοπική περιοχή της εξόδου του



δοκιμίου και στην καθυστέρηση της εμφάνισης του σημείου "breakthrough" . Στο Σχ.18. φαίνεται η κατανομή των ρευστών μέσα στο δοκίμιο πριν το νερό φτάσει στην έξοδο του δοκιμίου και αρχίσει η επίδραση του φαινομένου. Το Σχ. 18α αναφέρεται στην κλίμακα του δοκιμίου και το Σχ.18β στην κλίμακα των πόρων.

Σχ.18.: Κατανομή ρευστών σε ένα υδατοδιαβρεχτό δοκίμιο κατά την άφιξη του μετώπου του νερού στην έξοδο.

Στο (Σχ.18β) φαίνεται ότι την χρονική στιγμή ακριβώς πριν την έξοδο του νερού από το δοκίμιο η καμπυλότητα της διεπιφάνειας νερού - πετρελαίου στρέφει τα κοίλα προς την μεριά της εξόδου κάτι που αντικατοπτρίζει μια συγκεκριμένη τριχοειδή πίεση. Εκεί η πίεση στην μεριά της υδατικής φάσης είναι χαμηλότερη από αυτήν της πετρελαικής. Έτσι, όταν το νερό φτάσει στην έξοδο του δοκιμίου δεν θα παραχθεί αλλά θα συγκεντρωθεί εκεί έως ότου η πίεσή του γίνει μεγαλύτερη από την πίεση της πετρελαικής φάσης οπότε και η καμπυλότητα της μεταξύ τους διεπιφάνειας αντιστρέφεται(Σχ.19.)

Σχ.19.:Κατανομή ρευστών σε υδατοδιαβρεχτό δοκίμιο μετα το σημείο «breakthrough».

Όταν κάτι τέτοιο συμβεί, η εκτόπιση θα έχει φτάσει στο σημείο "breakthrough". Δηλαδή το σημείο "breakthrough" σε ένα υδατοδιαβρεχτό δοκίμιο δεν συμπίπτει με την χρονική στιγμή που το νερό φτάνει την έξοδο.

Κάτι τέτοιο βέβαια δεν συμβαίνει σε πετρελαιοδιαβρεχτό δοκίμιο όπου το σημείο "breakthrough" εμφανίζεται την στιγμή που το νερό φτάνει στην έξοδο. Η επίδραση αυτών των φαινομένων μειώνεται θεωρητικά:

α) Με την αύξηση του μήκους του δοκιμίου.

β) Με την αύξηση της παροχής. Εδώ όμως θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπέρμετρη αύξηση της παροχής δεν θα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής της πετρελαικής φάσης αλλά την μετάβαση σε καθεστώς μη γραμμικής ροής μέσα στο δοκίμιο.

γ) Με την αύξηση του ιξώδους των ρευστών.

Οι τρεις αυτοί παράγοντες συνοψίζονται στο γινόμενο ( $L \cdot v \cdot \mu$ ) το οποίο ονομάζεται "scaling coefficient"<sup>(35)</sup>.

Όπου :

L : μήκος δοκιμίου (cm)

v : ταχύτητα μέσα στους πόρους (cm/sec).

μ : ιξώδες εκτοπίζουσας φάσης mPa.sec.

Στην βιβλιογραφία (βλ και Σχ.20. που αναφέρεται σε υδατοδιαβρεχτό σύστημα) δίνονται οι τιμές που πρέπει να κυμαίνεται αυτό το γινόμενο, έτσι ώστε οι υπολειματικοί βαθμοί κορεσμού σε πετρέλαιο να είναι σταθεροί σε σχέση με την ταχύτητα της εκτόπισης.

Σχ .20.:Αποληψιμότητα πετρελαίου συναρτήσει του αδιάστατου παράγοντα  $(L \cdot v \cdot \mu)^{(3)}$ .

Άλλοι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τα πειράματα εκτόπισης καθώς και τους υπολλειματικούς βαθμούς κορεσμού που μετρούνται στο εργαστήριο εκφράζονται από τις κάτωθι εξισώσεις<sup>(37)</sup>:

$$N_{RL} = \frac{\Delta P}{P_c} = \frac{0.22 \delta p}{\sigma \cdot \sqrt{\phi / k}} \quad (33)$$

όπου:

$N_{RL}$  : το αδιάστατο κλάσμα των δυνάμεων ιξώδους προς τις τριχοειδείς  
(Rapoport & Leas number)<sup>(3,34)</sup>.

$\Delta P$  : πτώση πίεσης σε Mpa.

$P_c$  : τριχοειδής πίεση σε Mpa.

$k$  : διαπερατότητα σε mD.

$\phi$  : πορώδες.

$\sigma$  : διεπιφανειακή τάση σε dynes/cm.

Ο ίδιος λόγος για το επίπεδο του πορώδους είναι<sup>(34)</sup>:

$$N_c = \frac{0.01 \cdot \mu \cdot u}{\sigma} \quad (34)$$

όπου :

$\mu$  : ιξώδες εκτοπίζουσας φάσης (Pa.sec).

$u$  : γραμμική ταχύτητα (m/sec).

$\sigma$  : διεπιφανειακή τάση (N/m).

Όλα τα πειράματα εκτόπισης πρέπει να πραγματοποιούνται σε περιοχές τιμών όπου τα  $N_{RL}$  &  $N_c$  δεν αναμένεται να επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Είναι συνήθως αδύνατο να ικανοποιούνται ταυτόχρονα και οι δύο παράγοντες.

Για κάθε κατάσταση διαβρεχτότητας οι παράγοντες  $N_c$  &  $N_{RL}$  πρέπει να παίζουν κάποιο ρόλο ιδίως στην κατάσταση μεικτής διαβρεχτότητας.

Έτσι το  $N_{RL}$  πρέπει να κυμαίνεται στην περιοχή 1-10 το γινόμενο ( $L \cdot v \cdot \mu$ ) να είναι μεγαλύτερο του 1-5 ( $\text{cm}^2 \cdot \text{cp}/\text{min}$ ) και το  $N_c$  πρέπει να κυμαίνεται από  $10^{-4}$  -  $10^{-8}$ .

## **2.2. Παγίδευση πετρελαίου σε πορώδη μέσα - Μοντέλα περιγραφής της.**

### **2.2.1. Παγίδευση σύμφωνα με το μοντέλο διπλού πόρου - (pore doublet model)<sup>(3)</sup>**

Η παγίδευση πετρελαίου σε ένα πορώδες μέσο είναι μια αρκετά πολύπλοκη διεργασία. Οι Wardlaw & Cassan<sup>(36)</sup> έχουν ερευνήσει πιθανούς συσχετισμούς ανάμεσα στον υπολειματικό βαθμό κορεσμού σε πετρέλαιο και 27 πετροφυσικές παραμέτρους. Στα αποτελέσματά τους δεν αποδεικνύεται καμιά σχέση ανάμεσα στον υπολειματικό βαθμό κορεσμού σε πετρέλαιο ( $S_{or}$ ) και στην διαπερατότητα του πετρώματος. Παρατηρήθηκε ωστόσο μια μικρή τάση αύξησης του  $S_{or}$  με την μείωση του πορώδους. Η εξήγηση αυτής της τάσης αποδόθηκε στην ισχυρή εξάρτηση που βρέθηκε ανάμεσα στην παγίδευση του πετρελαίου και στον λόγο μήκος πόρου / μέγεθος λαιμού του πόρου αυτού γνωστό και ως "aspect ratio".

Μια δημοφιλής θεωρία που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την παγίδευση πετρελαίου σε μικροσκοπικό επίπεδο βασίζεται στο μοντέλο διπλού πόρου, "Pore doublet model" και προτάθηκε από τους Moore & Slobod<sup>(47)</sup> (1956). Το μοντέλο αυτό υποθέτει ότι η ροή συμβαίνει σε κάθε μονοπάτι της δυνάδας και ισχύει σύμφωνα με τις παρακάτω προϋποθέσεις:

α) Το καθεστώς τριχοειδούς ροής σε κάθε μονοπάτι του σχ.18. δίνεται από τον νόμο του Poiseuille:

$$Q = \pi r_o^4 (\Delta P) / 8 \mu L_t \quad (35)$$

όπου:

Q : παροχή

$r_o$  : διάμετρος τριχοειδούς

$L_t$  : μήκος

$\Delta P$  : διαφορά πίεσης (βλ.σχ.18.).

β) Η ύπαρξη διεπιφανειών μεταξύ των δύο φάσεων (διαβρέχουσα -μη διαβρέχουσα) δεν επηρεάζει την ροή .

Μια σχηματική παράσταση αυτού του μοντέλου δίνεται στο Σχ.21.

Σχ.21.: Σχηματική παράσταση του μοντέλου διπλού πόρου<sup>(3)</sup>.

Και οι δύο αυτές προϋποθέσεις θα ισχύουν μόνο αν το μήκος του διπλού πόρου είναι πολύ μεγαλύτερο από την ακτίνα του μεγαλύτερου πόρου και αν η ροή αρκετά αργή.

Η ολική ροή μέσα από την δυνάδα αυτή θα είναι :

$$Q = Q_1 + Q_2 = (\pi / 8 \mu L_t) (r_1^4 \Delta P_1 + r_2^4 \Delta P_2) \quad (36)$$

όπου :

και επειδή τα μονοπάτια της ροής είναι παράλληλα η διαφορά δυναμικού για κάθε μονοπάτι πρέπει να είναι η ίδια και θα ισχύει :

$$\Delta P1 - P_{c1} = \Delta P2 - P_{c2} \quad (37)$$

όπου:

1,2 υποδεικνύουν τα μονοπάτια ροής.

Σε αυτήν την εξίσωση οι τριχοειδείς πιέσεις θα είναι θετικές για την διεργασία της απορόφησης και αρνητικές για την διεργασία της εκτόπισης. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 36,37 είναι δυνατόν να εκφρασθεί η παροχή σύμφωνα με την γεωμετρία των πόρων, την διεπιφανειακή τάση και την γωνία επαφής (contact angle) για καθένα από τα μονοπάτια<sup>(3)</sup>:

$$Q1 = [Q - (\pi r_2^4 \sigma \cos\theta / 4 \mu L_t)(1/r_2 - 1/r_1)] / [1 + (r_2/r_1)^4] \quad (38)$$

$$Q2 = [Q (r_2/r_1)^4 + (\pi r_2^4 \sigma \cos\theta / 4 \mu L_t) (1/r_2 - 1/r_1)] / [1 + (r_2/r_1)^4] \quad (39)$$

Για να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά παγίδευσης στο μοντέλο αυτό σχηματίζεται ο λόγος των ταχυτήτων στα δύο μονοπάτια του διπλού πόρου:

$$u_2 / u_1 = [4 N_{uc} + ((1 / \beta) - 1)] / [(4 N_{uc} / \beta^2) - \beta^2 (1 / \beta) - 1] \quad (40)$$

όπου:

$\beta = r_2 / r_1$  είναι ο παράγοντας ετερογένειας και

$$N_{uc} = \mu L_t Q / \pi r_1^3 \sigma \cos\theta \quad (41)$$

είναι ο αδιάστατος λόγος των δυνάμεων ιξώδους προς τις τριχοειδείς γνωστός και ως τοπικός τριχοειδής αριθμός.

Η συμπεριφορά παγίδευσης της πετρελαικής φάσης στο μοντέλο περιγράφεται από την εξίσωση που δίνει τον λόγο των ταχυτήτων και από αυτήν που δίνει το  $N_{uc}$ .

Όταν οι τριχοειδείς δυνάμεις είναι αμελητέες ( κάτι που σημαίνει μεγάλο  $N_{uc}$  ) η ταχύτητα σε κάθε μονοπάτι του διαύλου ροής του διπλού πόρου είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της ακτίνας του κάθε πόρου. Έτσι η διεπιφάνεια νερού / πετρελαίου στο

μονοπάτι μεγάλης ακτίνας θα φτάσει την έξοδο πριν από τον μικρότερης ακτίνας και η μη διαβρέχουσα φάση (το πετρέλαιο) θα παγιδευτεί στον πόρο μικρής διαμέτρου.

Αλλά αν οι δυνάμεις ιξώδους είναι αμελητέες, ο μικρότερης ακτίνας πόρος θα προσροφήσει ρευστό με πιο γρήγορο ρυθμό με αποτέλεσμα να παγιδευθεί η μη διαβρέχουσα φάση (πετρέλαιο) στον μεγάλης ακτίνας πόρο.

Εκτός από την εξήγηση της διεργασίας παγίδευσης μέσα στο πορώδες μέσω το μοντέλο αυτό δίνει και τις ακόλουθες ποσοτικές ενδείξεις:

α) Σε καθεστώς ροής όπου επικρατούν τριχοειδείς δυνάμεις η μη διαβρέχουσα φάση παγιδεύεται σε μεγάλους πόρους ενώ η διαβρέχουσα σε μικρούς.

β) Ελάττωση των τριχοειδών δυνάμεων θα έχει σαν αποτέλεσμα μείωση της παγίδευσης.

γ) Για να εμφανιστεί η παγίδευση απαιτείται η ύπαρξη κάποιας ετερογένειας (όπως αυτή ορίζεται από τον παράγοντα β. Δηλαδή ο παράγοντας ετερογένειας πρέπει να είναι διάφορος της μονάδας.

Ως ποσοτικό εργαλείο για τον υπολογισμό του ποσοστού της παγίδευσης πετρελαίου μέσα στο πορώδες μέσω το μοντέλο αυτό υπολογίζει μεγαλύτερα ποσά υπολλειματικών βαθμών μη διαβρέχουσας φάσης, απ' ότι στην πραγματικότητα, σε χαμηλούς αριθμούς του τριχοειδή αριθμού. Σε υψηλές τιμές του τριχοειδή αριθμού δεν δίνει καμμία ένδειξη που να υποδεικνύει παγίδευση της μη διαβρέχουσας φάσης στους μικρούς πόρους.

Στην εργασία των Slobod & Moore<sup>(47,48)</sup> επισημαίνεται ότι για όλες τις τιμές παροχών σε ένα υδατοδιαβρεχτό σύστημα η διαφορά της τριχοειδούς πίεσης ανάμεσα στους δυο κλάδους είναι ο κύριος παράγοντας που ελέγχει την σχετική ταχύτητα σε καθένα από αυτό.

Σε αυτήν την περίπτωση η διεπιφάνεια νερού - πετρελαίου κινείται πιο γρήγορα διαμέσω του μικρότερης διαμέτρου τριχοειδή σωλήνα, οπότε η παγίδευση ανάμενεται να εμφανιστεί σε πόρους μεγαλύτερης διαμέτρου.

### 2.2.2. Παγίδευση σύμφωνα με το μοντέλο της αποκόλλησης (snap off model)<sup>(3)</sup>

Μια άλλη θεωρία που έχει αναπτυχθεί πάνω σε αυτό το θέμα είναι γνωστή ως "snap - off model" (βλ.Σ χ.22.)

Σχ.22.: Παγίδευση σύμφωνα με το μοντέλο snap - off.

Το μοντέλο αυτό υποθέτει ένα μοναδικό μονοπάτι ροής μεταβλητής διατομής μέσα από το οποίο ρέει η μη διαβρέχουσα φάση. Οι πλευρές του μονοπατιού αυτού καλύπτονται από την διαβρέχουσα φάση. Η τριχοειδής πίεση αλλάζει ανάλογα με την θέση κατά μήκος του μονοπατιού.



Πιο συγκεκριμένα, έχει μεγάλη τιμή όπου το μονοπάτι είναι στενό και μικρή τιμή όπου είναι πλατύ. Για συγκεκριμένες τιμές της βαθμίδας δυναμικού και της γεωμετρίας των πόρων, η βαθμίδα δυναμικού στην διαβρέχουσα φάση κατά μήκος ενός τμήματος μπορεί να είναι μικρότερη από την τριχοειδή πίεση του ίδιου τμήματος. Η εξωτερική δύναμη λοιπόν δεν είναι αρκετή για να εξαναγκάσει την μη διαβρέχουσα φάση να εισέλθει στο επόμενο τμήμα. Η μη διαβρέχουσα φάση τότε αποκολλάται σε σταγονίδια μέσα στο πορώδες .

Σύμφωνα με αυτή την υπόθεση, η επακινητοποίηση του σταγονιδίου μέσα στον πόρο δίνεται από την σχέση:

$$\Delta\Phi_w + \Delta\rho g \Delta L \eta_{μα} > \Delta P_c \quad (39)$$

όπου:

$\Delta\Phi_w$  : το δυναμικό ροής της διαβρέχουσας φάσης.

$\Delta P_c$  : η μεταβολή στην τριχοειδή πίεση της διαβρέχουσας φάσης.

$\Delta L$  : το μέγεθος της ακινητοποιημένης πετρελαικής φάσης (globule).

$\Delta\rho$  : διαφορά μεταξύ της πυκνότητας μεταξύ της διαβρέχουσας και μη διαβρέχουσας φάσης .

$a$  : η γωνία μεταξύ του κυρίου άξονα του σταγονιδίου (globule) και της οριζοντίου.

Η εξίσωση (39) εκφράζει τον ίδιο ανταγωνισμό μεταξύ των δυνάμεων ιξώδους και τριχοειδών δυνάμεων που δίνεται και στο μοντέλο του διπλού πόρου.

Σε ταμειυτήρες έχει βρεθεί ότι οι μηχανισμοί παγίδευσης ανταποκρίνονται κατά 80% στο μοντέλο της αποκόλλησης και κατά 20% στο μοντέλο του διπλού πόρου<sup>(38)</sup>.

### 2.2.3. Παγίδευση σε πραγματικά πορώδη μέσα<sup>(3)</sup>

Ο συσχετισμός του υπολλειματικού βαθμού κορεσμού της μη διαβρέχουσας ή της διαβρέχουσας φάσης με τον τοπικό τριχοειδή αριθμό (local capillary number) καλείται τριχοειδής καμπύλη αποκορεσμού (capillary desaturation curve or CDC). Το Σχ.23. δείχνει μια τυπική τέτοια καμπύλη .

Σχ.23.Καμπύλη αποκορεσμού.

Κανονικά αυτές οι καμπύλες δίνονται ως διαγράμματα του επί τοις εκατό υπολλειματικού κορεσμού για την μη διαβρέχουσα ή διαβρέχουσα φάση συναρτήσει (στον  $\psi$  - άξονα ) του τοπικού τριχοειδή αριθμού σε λογαριθμικό  $\chi$ - άξονα.

Σε χαμηλές τιμές του  $N_{uc}$ , ο κορεσμός τόσο της μη διαβρέχουσας φάσης ( $S_{nw}$ ) όσο και της διαβρέχουσας φάσης είναι σταθερές. Για συγκεκριμένη όμως τιμή του  $N_{uc}$  που ονομάζεται κριτικός τριχοειδής αριθμός ( $N_{uc}$ )<sub>c</sub> παρατηρείται ένα σημείο καμπής μετά από το οποίο οι υπολλειματικοί βαθμοί κορεσμού μειώνονται. Οι περισσότερες εκτοπίσεις (ιδίως στο εργαστήριο) πρέπει να γίνονται στην σταθερή περιοχή που δείχνεται στο Σχ.23.

## **Κεφάλαιο 3: Μέθοδοι μέτρησης διαβρεχτότητας πετρώματος.**

### **3.1. Γενικά.**

Στην διεθνή βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί διάφορες μέθοδοι για την ποιοτική εκτίμηση αλλά και τον ποσοτικό προσδιορισμό της<sup>(7)</sup>.

Μέθοδοι ποσοτικής μέτρησης:

- α) Τέστ γωνίας επαφής (contact angle method)
- β) Τέστ Ammot
- γ) Τέστ USBM
- δ) Τέστ ελεύθερης απορρόφησης (spontaneous imbibition )

Ποιοτικά η διαβρεχτότητα ενός συστήματος πετρελαίου / νερού / πετρώματος μπορεί να εκτιμηθεί με:

- α) Τέστ απορρόφησης
- β) Εξέταση με μικροσκόπιο
- γ) Μεθόδους flotation
- δ) Μέθοδο glass slide
- ε) Χρήση Cryo - SEM
- στ) Χρήση NMR (Nuclear Magnetic Resonance)

### **3.2. Συμπεριφορά της τριχοειδούς πίεσης για συστήματα πετρελαίου / άλμης / πετρώματος.**

Η κατανόηση της σχέσης μεταξύ της διαβρεχτότητας, των τριχοειδών πιέσεων και της κατανομής της υδατικής και πετρελαικής φάσεως μέσα στο πορώδες είναι αναγκαίο βήμα για τον ποσοτικό προσδιορισμό της διαβρεχτότητας και της σχέσης της με την απόληψιμότητα του πετρελαίου.

Θα οριστούν πρώτα οι έννοιες κατά την εκτόπιση των ρευστών μέσα στον ταμιευτήρα.

Απορρόφηση (imbibition) ορίζεται η αύξηση στον βαθμό κορεσμού της υδατικής φάσης (εν γένει της διαβρέχουσας φάσης).

Απομάκρυνση (drainage) ορίζουμε την μείωση στον κορεσμό της υδατικής φάσης ή αντίστοιχα την αύξηση στον κορεσμό της πετρελαικής φάσης (εν γένει της μη διαβρέχουσας φάσης).

Η εξαναγκασμένη απομάκρυνση (forced drainage) περιγράφει το φαινόμενο όπου οι μεγαλύτεροι πόροι τείνουν να αδειάζουν από την μη διαβρέχουσα φάση, πριν τους μεγαλύτερους<sup>(24)</sup>.

Η αυθόρμητη απορρόφηση (spontaneous imbibition) περιγράφει το γεγονός όπου οι μικρότεροι πόροι γεμίζουν με την διαβρέχουσα φάση πριν τους μεγαλύτερους<sup>(24)</sup>. Είναι μια φυσική διεργασία η οποία οδηγείται από τις τριχοειδείς δυνάμεις.

Σχ.24. : Σχέση μεταξύ διαβρεχτότητας όπως αυτή μετρήθηκε με tests Ammot & USBM.

Το Σχ.24.<sup>(24)</sup> δίνει τυπικές καμπύλες για τον κύκλο πρώτη απομάκρυνση- απορρόφηση - δεύτερη απομάκρυνση. Στο παραπάνω διάγραμμα, το οποίο περιλαμβάνει τις 3 συχνότερες μεθόδους μέτρησης διαβρεχτότητας (Ammot test, USBM test , Imbibition test ) παρατηρούμε :

- ι) Η τριχοειδής πίεση κατά την απορρόφηση μερικές φορές πέφτει στο μηδέν αλλά το πέτρωμα συνεχίζει άραυτα να απορροφάει νερό πολύ αργά.
- ιι) Για συστήματα όπου η τριχοειδής πίεση αλλάζει αλγεβρικό σημείο, όπως στιγμιαία απορρόφηση, που ακολουθείται από εξαναγκασμένη εκτόπιση επιτυγχάνουμε αύξηση του βαθμού κορεσμού στην διαβρέχουσα φάση.

### **3.3. Μέθοδος γωνίας επαφής (contact angle measurement)**

Οι μετρήσεις αυτές μας δίνουν κυρίως μια προσέγγιση της κατάστασης διαβρεχτότητας ενός πετρώματος. Η επιλογή της ορυκτής επιφάνειας πάνω στην οποία θα γίνει η μέτρηση γίνεται σε αυτό το ορυκτό που θεωρείται ότι αποτελεί το αντιπροσωπευτικό μέσα στο δείγμα μας .

Για να υπολογίσουμε την γωνία επαφής εμβαπτίζουμε δύο παράλληλες πλάκες, του ορυκτού που επιλέχθηκε, μέσα σε άλμη και μετά εισάγουμε μια σταγόνα του πετρελαίου ανάμεσα σε αυτές. Όταν οι δύο πλάκες κινηθούν παράλληλα η μια ως προς την άλλη παρατηρούνται οι προπορευόμενες (advancing) και οι υπολειπόμενες (receding) γωνίες επαφής. (βλ.Σχ.25.)

Σχ.25. : Μέτρηση γωνίας επαφής.

Οι αδυναμίες αυτής της μεθόδου εντοπίζονται κυρίως :

- α) Στα φαινόμενα υστέρησης των μετρούμενων γωνιών.
- β) Οι μετρήσεις αυτές δεν λαμβάνουν υπόψη τους την ετερογένεια των επιφανειών των πόρων στα πετρώματα.
- γ) Δεν ανταποκρίνονται σε μετρήσεις διαβρεχτότητας επαναποκαταστημένης κατάστασης όπου η ύπαρξη προσρροφημένης

πετρελαικής φάσης πάνω σε κάποιο ορυκτό μπορεί να δώσει άλλη τιμή διαβρεχτότητας από την μετρούμενη.

### **3.4. Μέθοδος Ammot ( Ammot test ).**

Η αρχή της μεθόδου αναφέρεται στο ότι το υγρό που διαβρέχει την επιφάνεια των πόρων ενός πετρώματος, θα απορροφηθεί στιγμιαία μέσα στο δοκίμιο εκτοπίζοντας την φάση του υγρού που δεν τη διαβρέχει.

Η μέθοδος αυτή δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα κοντά στην περιοχή ενδιάμεσης διαβρεχτότητας και συγκεκριμένα για γωνίες επαφής από 60-120 μοίρες. Η διαδικασία που ακολουθείται για τα ήδη κορεσμένα με άλμη δοκίμια είναι :

1)Εισπίεση πετρελαίου έτσι ώστε το δοκίμιο να φτάσει στον μη περαιτέρω μειώσιμο βαθμό κορεσμού σε νερό (IWS) ο οποίος και προσδιορίζεται.

2)Εισπίεση νερού έτσι ώστε το δοκίμιο να φτάσει τον υπολλειματικό βαθμό κορεσμού σε πετρέλαιο (ROS) ο οποίος και προσδιορίζεται.

3)Τοποθέτηση του δοκιμίου μέσα σε πετρέλαιο προκειμένου να λάβει χώρα η διαδικασία της αυθόρμητης απορρόφησης (spontaneous imbibition) όπου όγκος πετρελαίου θα εισέλθει στους πόρους και θα εκδιώξει όγκο νερού. Είναι προφανές ότι όσο πιο υδατοδιαβρεχτό είναι το εξεταζόμενο δοκίμιο τόσο πιο μικρός θα είναι ο εκτοπιζόμενος όγκος νερού λόγω της προτίμησης του βράχου προς το νερό. Ο όγκος αυτός του νερού μετρείται και είναι ο  $V_{wsp}$ .

4)Εκτόπιση (forced displacement) με πετρέλαιο και μέτρηση του όγκου του νερού που εκτοπίζεται. Ο όγκος αυτός είναι ο  $V_{wfd}$ .

5)Σχηματισμός του λόγου:

$$\delta_o = (V_{wsp} / V_{wsp} + V_{wfd}) \quad (42)$$

6)Τοποθέτηση του δοκιμίου σε νερό προκειμένου να γίνει η διαδικασία αυθόρμητης απορρόφησης όπου όγκος νερού θα εισέλθει στους πόρους και θα εκδιώξει όγκο πετρελαίου. Σε αντιστοιχία προς το βήμα 3 όσο πιο υδατοδιαβρεχτό είναι το δοκίμιο τόσο πιο μεγάλος θα είναι ο εξερχόμενος  $V_{osp}$  όγκος του πετρελαίου ο οποίος και μετρείται.

7)Εκτόπιση με νερό και μέτρηση του όγκου του πετρελαίου που εκτοπίζεται. Ο όγκος αυτός είναι ο  $V_{ofd}$ .

8)Σχηματισμός του λόγου:

$$\delta_w = (V_{osp} / V_{osp} + V_{ofd}) \quad (43)$$

9)Σχηματισμός της διαφοράς :

$$I = \delta w - \delta o \quad (44)$$

(Ammot - Harvey relative displacement index)

Σύμφωνα με τον Cuiec<sup>(40)</sup> ένα σύστημα θα είναι

- ι) υδατοδιαβρεχτό όταν το I παίρνει τιμές μεταξύ +0.3 έως 1
- ιι) ενδιάμεσα διαβρεχτό όταν το I παίρνει τιμές μεταξύ -0.3 έως 0.3
- ιιι) πετρελαιοδιαβρεχτό όταν το I παίρνει τιμές μεταξύ -0.3 έως -1

Το Σχ.6. δίνει τους συσχετισμούς των αλλαγών των βαθμών κορεσμού κάθε φορά σε σχέση με τις τριχοειδείς πιέσεις.

### **3.5. Μέθοδος USBM**

Κατ' αυτήν την μέθοδο<sup>(41)</sup> οι τριχοειδείς πιέσεις απορρόφησης και απομάκρυνσης μετρούνται με φυγοκέντρηση. Για τον ποσοτικό προσδιορισμό της διαβρεχτότητας χρησιμοποιείται το εμβαδόν των καμπυλών των τριχοειδών πιέσεων απορρόφησης και απομάκρυνσης (βλ. Σχ.26).

Σχ.26. : Μέτρηση διαβρεχτότητας USBM ( I - οδηγός φάση άλμη, II - οδηγός φάση πετρέλαιο) α)Μη επεξεργασμένο δοκίμιο,  
β)δοκίμιο που υπέστη επεξεργασία με organochlorosilane,  
γ)δοκίμιο που υπέστη aging με πετρέλαιο στους 324 C στους 140 F.

Σχηματίζουμε τον λόγο :

$$W = \log(A1/A2) \quad (45)$$

όπου :

A1 : περιοχή κάτω από την καμπύλη της δεύτερης απομάκρυνσης νερού.

A2 : περιοχή κάτω από την αρνητική καμπύλη απορρόφησης.

Οι θετικές τιμές του W είναι ένδειξη υδατοδιαβρεχτότητας και οι αρνητικές πετρελαιοδιαβρεχτότητας.

Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η ταχύτητα και η απλότητα της διαδικασίας των μετρήσεων καθώς και η ευαισθησία της γύρω στην περιοχή της ενδιάμεσης διαβρεχτότητας.

Από την άλλη μειονεκτεί σε περιπτώσεις μεικτής διαβρεχτότητας.



## **Κεφάλαιο 4: Ταμιευτήρας του Πρίνου.**

### **4.1. Γενικά.**

Ο ταμιευτήρας του Πρίνου καλύπτει μια περιοχή 4 Km<sup>2</sup> και εντοπίζεται σε βάθος 100-110 feet (30m) κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, 5 μίλια δυτικά της περιοχής Πρίνου στο νησί της Θάσου και 12 μίλια νοτιανατολικά της πόλης της Καβάλας.

Ο ταμιευτήρας αυτός ανακαλύφθηκε τον Φεβρουάριο του 1974 με τέστ παραγωγής της διερευνητικής γεώτρησης Πρίνος - 2 και ανακάλυψης οικονομικά βιώσιμων αποθεμάτων

### **4.2.Γενικά γεωλογικά στοιχεία του ταμιευτήρα<sup>(42)</sup>.**

Η λεκάνη του Πρίνου, διαστάσεων περίπου 38 km μήκους και 20 km πλάτους σχηματίστηκε από την δράση ρηγμάτων με ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ διευθύνσεις (βλ.Σχ.27.).

Σχ.27.: Χάρτης της ευρύτερης περιοχής Πρίνου.

Το σύνολο των ιζημάτων της λεκάνης έχει μέγιστο πάχος 5800m<sup>(42)</sup> και ο χρόνος απόθεσής τους είναι μεταξύ Κάτω Μειόκαινου - Πλειόκαινου και Πλειστόκαινου. Εν

συντομία, οι ιζηματογενείς ακολουθίες που διακρίνονται είναι (από την βάση προς τα ανώτερα τμήματα βλ.Σχ.28,29):

1.Τα κατώτερα κλαστικά ιζήματα με πάχος 2100m και ηλικία Κάτω ως Μέσο Μειόκαινο . Πρόκειται για εναλλαγές ψαμμιτών και αργιλικών σχιστολίθων.

2.Η εβαποριτική ακολουθία με πάχος 800m και ηλικία Μέσο ως Ανώτερο Μειόκαινο. Εχουν διακριθεί 7 εβαποριτικοί κύκλοι με ορυκτό άλας , ανυδρίτη και δολομίτη / ασβεστόλιθο. Ο σχηματισμός του "κάτω ορυκτού άλατος" είναι εκείνος που υπέρκειται του κοιτάσματος και αποτελεί το στεγανό κάλυμα (cap rock). Στην δομή του Πρίνου το πάχος του κυμαίνεται μεταξύ 80-90 m.

3.Τα ανώτερα κλαστικά ιζήματα, επίσης εναλλαγές ψαμμιτών και αργιλικών σχιστολίθων με πάχος 2700m και ηλικία Πλειόκαινο ως Πλειστόκαινο.

Σχ.28.: Γενικευμένη στρωματογραφική στήλη της περιοχής του πεδίου Πρίνου<sup>(42)</sup>.

Σχ.29: Γενικευμένη στρωματογραφική στήλη όπως προκύπτει από τα δεδομένα της γεώτρησης PB-26<sup>(42)</sup>.

## **Κεφάλαιο 5: Πειραματικές μετρήσεις**

### **5.1. Γενικά**

Οι κύριοι λόγοι που επηρεάζουν την αντιπροσωπευτικότητα των εργαστηριακών μετρήσεων είναι:

α) Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται στις εργαστηριακές μετρήσεις δεν αποτελούν παρά ένα απειροστά μικρό μέρος του ταμιευτήρα. Η επιλογή των δοκιμίων λοιπόν πρέπει να είναι τέτοια ώστε να αποτελεί ένα στατιστικά αντιπροσωπευτικό δείγμα του πετρώματος του ταμιευτήρα, όσον αφορά την ορυκτολογική τους σύσταση και την γεωλογία του σχηματισμού από τον οποίο προέρχονται.

Αυτό επιτυγχάνεται με προσεκτική εξέταση των γεωλογικών δεδομένων του πετρώματος που θέλουμε να κάνουμε την δειγματοληψία.

β) Τα δοκίμια μπορεί να μην βρίσκονται στην ίδια πετροφυσική κατάσταση με αυτή του ταμιευτήρα.

### **5.2. Είδη δοκιμίων για εργαστηριακές μετρήσεις.**

#### **5.2.1. Φυσικής κατάστασης (Native state cores)<sup>(16)</sup>:**

Η διαβρεχτότητα είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις πολυφασικής ροής όπως για παράδειγμα αυτές της σχετικής διαπερατότητας. Τα καλύτερα αποτελέσματα για τέτοιες μετρήσεις δίνονται από φυσικής κατάστασης δοκίμια. Σαν τέτοια ορίζονται τα δοκίμια όπου δεν έχει γίνει διαταραχή της αρχικής διαβρεχτότητας.

#### **5.2.2. Καθαρισμένα δοκίμια (cleaned state cores)<sup>(16)</sup>:**

Στα δοκίμια αυτά γίνεται μια προσπάθεια να απομακρυνθούν όλα τα περιεχόμενα ρευστά και οι προσροφημένες οργανικές ουσίες με εισπίεση διαλυτών μέσα από αυτά. Τα καθαρισμένα δοκίμια είναι συνήθως ισχυρά υδατοδιαβρεχτά και χρησιμοποιούνται για μετρήσεις πορώδους και απόλυτης διαπερατότητας. Οι μετρήσεις αυτές δεν

επηρεάζονται από την κατάσταση διαβρεχτότητας που βρίσκονται τα εξεταζόμενα δοκίμια.

### 5.2.3. Επαναποκαταστημένης κατάστασης (Restored state cores)<sup>(16)</sup>:

Αν και οι μετρήσεις σε δοκίμια φυσικής κατάστασης δίνουν τα πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα, συνήθως τέτοια δοκίμια δεν χρησιμοποιούνται στις εργαστηριακές μετρήσεις πολυφασικής ροής

Οι λόγοι που δεν επιτρέπουν κάτι τέτοιο είναι:

α) Η αρχική επιφανειακή κατάσταση (surface state) των δοκιμίων μπορεί να έχει αλλάξει μέχρι αυτά να φτάσουν στο εργαστήριο. Αλλαγές στις επιφανειακές πετροφυσικές ιδιότητες (όπως η διαβρεχτότητα) μπορεί να προκύψουν από διαφορές στην θερμοκρασία και στην πίεση και να προκαλέσουν επικάθηση των βαρέων κλασμάτων (παραφίνες, ασφαλτένια).

β) Οι πυρήνες μπορεί να έχουν αφεθεί εκτεθειμένοι στον ατμοσφαιρικό αέρα με αποτέλεσμα να χάσουν τα ρευστά τους και να αποσθραθούν.

Πιο συγκεκριμένα, τα ελαφρά κλάσματα των ρευστών, στην περίπτωση αυτή, έχουν χαθεί και έχει γίνει επικάθηση των βαρέων κλασμάτων. Κάτι τέτοιο έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή της διαβρεχτότητας του δοκιμίου που το καθιστά μη αντιπροσωπευτικό δείγμα του ταμιευτήρα που εξετάζουμε.

γ) Η πυρηνοληψία στην γεώτρηση μπορεί να έγινε με λάσπη η οποία πιθανόν να περιείχε γαλακτώματα πετρελαικής βάσης. Κάτι τέτοιο βέβαια μειώνει τον χρόνο και συνεπώς το κόστος διάτρησης.

Από την άλλη μεριά όμως συστατικά της λάσπης μπορεί να προσροφηθούν από τον πυρήνα με αποτέλεσμα να αλλάξει η διαβρεχτότητα των εξεταζόμενων δοκιμίων.

Εξ' αιτίας των λόγων που αναφέρονται παραπάνω, σε μετρήσεις διαβρεχτότητας ή πολυφασικής ροής χρησιμοποιούνται δοκίμια επαναποκατεστημένης κατάστασης (restored state). Μια τέτοια κατάσταση επιτυγχάνεται με την παρακάτω διαδικασία:

1) Καθαρισμός του δοκιμίου από όλα τα συστατικά που έχουν προσροφηθεί πάνω στην επιφάνεια του βράχου.

2) Κορεσμός του δοκιμίου με ρευστά του σχηματισμού από τον οποίο προήλθε. Η σειρά κορεσμού γίνεται με βάση την αρχή ότι το νερό προυπήρχε στον σχηματισμό ενώ το πετρέλαιο μετανάστευσε αργότερα σε αυτόν. Στο εργαστήριο προσομοιάζεται αυτή η φυσική διαδικασία διενεργώντας πρώτα κορεσμό του δοκιμίου με άλμη του σχηματισμού, ακολουθούμενη από εκτόπιση με πετρέλαιο

(dead anaerobic crude) προκειμένου αυτό να επιτευχθεί ο υπολλειματικός βαθμός κορεσμού σε νερό.

3) Το δοκίμιο ακολούθως τοποθετείται μέσα στο ίδιο το πετρέλαιο σε κλειστό αεροστεγές δοχείο που τοποθετείται σε φούρνο σε θερμοκρασία σχηματισμού για τέτοιο χρονικό διάστημα που κρίνεται ικανό (στην βιβλιογραφία αναφέρεται ότι ικανοποιητικό χρονικό διάστημα είναι περίπου 1000 ώρες) μέχρι να αποκατασταθεί ισορροπία στην απορρόφηση των στοιχείων που διαμορφώνουν την αρχική κατάσταση διαβρεχτότητας του δοκιμίου. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως γήρανση, "aging".

### **5.3 Πυρηνοληψία των δοκιμίων**

Τα δοκίμια κωδικού Bc είναι συγκεκριμένης και γνωστής ορυκτολογικής σύστασης (βλ κεφ.9.), καθορισμένης διαμέτρου και μήκους και συνεπώς αποτελούν πρότυπα δοκίμια για τις εργαστηριακές μας αναλύσεις.

Τα δοκίμια κωδικού Pc προέρχονται από καρότα δειγματοληψίας της γεώτρησης PB-26. Το βάθος από όπου προέρχονται τα καρότα αυτά είναι :

Κορυφή : 2622.60 m

Βάθος: 2623.62 m

για τα δοκίμια Pc1 - Pc8 και

Κορυφή: 2614.5 m

Βάθος: 2615.16 m

για τα δοκίμια PC10 και Pc11.

Το πέτρωμα χαρακτηρίζεται ως ψαμμίτης με στρώματα αργιλόλιθου σε βάθος 2623 m. (βλ .Φωτ. 1. & 2.)

Φωτ .1.:Καρότο γεώτρησης 2614.5-2615.16m

Φωτ .2. :Καρότο γεώτρησης 2622.6-2623.62m

Η πυρηνοληψία των δοκιμίων από τα καρότα δειγματοληψίας πραγματοποιήθηκε με περιστροφικό εργαστηριακό πυρηνολήπτη στον οποίο προσαρμόσθηκε κοπτικό διαμέτρου μίας ίντσας .

Η δειγματοληψία διενεργήθηκε κατά τον κάθετο άξονα προς τον κύριο άξονα του καρότου. Κατά την διενέργεια της δεν χρησιμοποιήθηκε φρέσκο νερό για την ψύξη του κοπτικού προκειμένου να μην επηρεαστούν πετροφυσικές ιδιότητες των δοκιμίων (όπως η διαπερατότητα)<sup>(56)</sup>. Η μεθοδολογία αυτή παρουσίασε φτωχά αποτελέσματα που οφείλονται :

α)Στον θρυμματισμό των δοκιμίων τόσο κατά την δειγματοληψία όσο και κατά την εξαγωγή από τον δειγματολήπτη.

β)Στην πετρολογική ετερογένεια του καρότου δειγματοληψίας που είχε σαν αποτέλεσμα την αστοχία του κοπτικού εργαλείου.

Για την αποφυγή του φαινομένου ευθρυπτότητας των δοκιμίων, η μεθοδολογία τροποποιήθηκε εμβαπτίζοντας το καρότο μέσα σε υγρό άζωτο για 2 - 4 ώρες πριν την διενέργεια δειγματοληψίας με σκοπό την αύξηση της συνεκτικότητας του πετρώματος<sup>(69)</sup>. Η μεθοδολογία αυτή έχει χρησιμοποιηθεί και από τους Torsaeter & Beldring<sup>(45)</sup> σε πέτρωμα ταμιευτήρα της Β.Θάλασσας. Στην εργασία αυτή ανακαλύφθηκαν αλλαγές στην διαπερατότητα και τους υπολειματικούς βαθμούς κορεσμού των δοκιμίων που οφείλονται στις αλλαγές της μορφολογίας του καοιλίνιτη κατά τη διαδικασία της ψύξης. Στην περίπτωση των δοκιμίων του Πρίνου, η μέθοδος αυτή έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα για μικρού μήκους δοκίμια (2-3cm) που προέρχονταν από το καρότο της Φωτ.1. αλλά απέτυχε όταν εφαρμόστηκε σε αυτό της Φωτ.1. λόγω της μεγαλύτερης ευθρυπτότητας που παρουσίαζε αυτό το πέτρωμα.

Ειδικά για το πέτρωμα που προερχόταν από το καρότο της Φωτ.1. εφαρμόστηκε η ακόλουθη μεθοδολογία:

- α) Εμβάπτιση του καρότου σε υγρό άζωτο για 2 - 4 ώρες.
- β) Κατασκευή δακτυλίου στήριξης του καρότου σε τόρνο.
- γ) Τοποθέτηση του καρότου στον τόρνο και μείωση της διαμέτρου του στο επιθυμητό μέγεθος (μία ίντσα).

Η μεθοδος αυτή έδωσε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα ακόμα και για δοκίμια μεγαλύτερου μήκους από 3 cm αλλά έχει το μειονέκτημα της μεγάλης σπατάλης πετρώματος κατά την διενέργεια της διαδικασίας μείωσης της διαμέτρου.

#### **5.4.Επιλογή δοκιμίων**

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν επιλέχθηκαν τα πρότυπα δοκίμια με κωδικούς Bc1, Bc3, Bc4, Bc7 και δοκίμια πετρώματος του ταμιευτήρα Πρίνος με κωδικούς Pc1- Pc11.

#### **5.5.Ορυκτολογική περιγραφή των δοκιμίων**

##### **5.5.1. Γενικά**

Πριν γίνουν οι κλασικές αναλύσεις στα δοκίμια (πορώδες, απόλυτη διαπερατότητα ) θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνει ορυκτολογική αναγνώριση σε κάποια από τα δείγματα που προήλθαν από την πυρηνοληψία και δεν μπορούσαν (λόγω μικρού μεγέθους ή θρυμματισμού) να υποβληθούν στα προγραμματισμένα πειράματα. Ετσι από τα δείγματα αυτά έγινε εξαγωγή λεπτών τομών και ακτινοδιαγράμματα.



Για τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής σύστασης κρίθηκαν απαραίτητες αναλύσεις XRD (X-Ray Diffraction) και λεπτών τομών (thin section analysis).

Οι XRD αναλύσεις έγιναν σε μηχανήμα τύπου D-500 Siemens συνδεδεμένο με υπολογιστική μονάδα IBM . Οι συνθήκες μέτρησης ήταν Cu-K (μήκος κύματος  $\lambda=1.5418 \text{ \AA}$  ), φίλτρο Ni , μονοχρωμάτορα γραφίτη 35000 V , ένταση 40 mA και βήμα ακτινοσκόπησης  $1^\circ / \text{min}$ .

Η αξιολόγηση των ακτινοδιαγραμμάτων έγινε σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα ICPDS (International centre for diffraction data 1986). Η διακριτική ικανότητα της ανάλυσης XRD σε περιεχόμενα ορυκτά είναι ως 3% σε κατά βάρος σύσταση.

Τόσο για την ανάλυση XRD όσο και για τις λεπτές τομές το προς παρατήρηση υλικό πρώτα καθαρίζεται από τα περιεχόμενα ρευστά. Για τις ανάγκες της ανάλυσης XRD δείγμα πετρώματος λειοτριβείται σε σφαιρόμυλο. Από το προϊόν του σφαιρόμυλου ετοιμάζεται πλακέτα εισαγωγής προς ανάλυση .

Με την παρατήρηση λεπτών τομών στο ανακλαστικό μικροσκόπιο (thin section analysis) μπορούν να εντοπιστούν και ορυκτά που είναι σε ποσοστία σύσταση κάτω του 3% καθώς και να γίνει μια εκτίμηση του ολικού πορώδους των δοκιμίων.

Η διαδικασία κατασκευής λεπτής τομής είναι η ακόλουθη :

α)Το δείγμα αφού κοπεί, λειαίνεται από την μία επιφάνεια με σκόνη silicon carbide 320 grid.

β)Προκειμένου να αποφευχθεί η είσοδος ατμοσφαιρικού αέρα στους πόρους του πετρώματος που θα έχει σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό φυσαλίδων που δυσχεραίνουν την εξέταση, το δείγμα εμποτίζεται με εποξειδική κόλλα Araldit βραδείας πήξεως δύο συστατικών (σκληρυντικό & ρητίνη σε αναλογία 1:1) και περνά πάλι από διαδικασία λείανσης με την ίδια σκόνη .

γ)Το προϊόν αυτής της διεργασίας επικολλάται με την λειαμένη του επιφάνεια σε γυαλί δειγματοφορέα το οποίο προηγουμένως έχει λειανθεί με την διαδικασία που προαναφέραμε .

δ)Το τελικό προϊόν που είναι πλέον η λεπτή τομή περνά από διαδοχικές λειάνσεις με σκόνη silicon carbide 320 & 600 grid.

### 5.5.2. Αποτελέσματα ανάλυσης X.R.D.

Πρότυπα δοκίμια: Η XRD ανάλυση έδειξε ότι τα δοκίμια κωδικού Bc αποτελούνται κατά κύριο λόγο (ανω του 97 % ) από χαλαζία ( $\text{SiO}_2$ ). Το υπόλοιπο αναγνωρίστηκε ως μικροκλινής ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ). Δεν παρατηρήθηκε ύπαρξη αργίλλων στα δείγματα (βλ Ακτινοδιάγραμμα 1.).

Ακτινοδιάγραμμα 1: XRD ανάλυση για πρότυπα δοκίμια.

Δοκίμια Πρίνου: Τα ακτινοδιαγράμματα των δοκιμίων κωδικού Pc (βλ. Ακτ. 2 &3)

έδωσαν την παρακάτω ορυκτολογική σύσταση :

- Χαλαζίας
- Δολομίτης
- Αλβίτης
- Μικροκλινής
- Μοσχοβίτης

Ακτινοδιάγραμμα 2: XRD για δοκίμια Πρίνου (2614.5-2615.16m)

Ακτινοδιάγραμμα 3: XRD για δοκίμια Πρίνου (2622.6-2623.26m)

### 5.5.3. Αποτελέσματα παρατήρησης λεπτών τομών

Πρότυπα δοκίμια:Οι λεπτές τομές παρατηρήθηκαν σε μεγέθυνση 63x τόσο σε παράλληλα όσο και σε διασταυρωμένα nicols (φωτ : 29A,30A,32A). Τα ορυκτά που εντοπίστηκαν σε αυτές είναι:

- ι)Χαλαζίας κατά το μεγαλύτερο μέρος.
- ιι)Πλαγιόκλαστα , καλιούχοι άστριοι (μικροκλινής)

Υπάρχει ομοιογενής κατανομή των πόρων μεταξύ των κρυστάλλων του χαλαζία. Οι κόκκοι μπορούν να χαρακτηρισθούν γωνιώδεις ως *surrounded* και το εκτιμώμενο πορώδες 20 % - 25 %.

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα στις τομές αυτές είναι η απουσία συνδετικού υλικού στους πόρους . Το πορώδες του πετρώματος εντοπίζεται στις επαφές των κόκκων. Το φαινόμενο αυτό ευνοεί θετικά τις τιμές πορώδους και διαπερατότητας των δοκιμίων.

Όσον αφορά το πορώδες, η ύπαρξη του συνδετικού υλικού μειώνει τον όγκο των πόρων και συνεπώς την αποθηκευτική ικανότητά τους σε ρευστά. Στην δε διαπερατότητα το συνδετικό υλικό μπορεί να φράξει ορισμένα μονοπάτια του πορώδους μέσα από τα οποία κινούνται τα ρευστά κάτι που θα έχει σαν επακόλουθο την μείωση της τιμής της διαπερατότητας .

Κατά την μακροσκοπική παρατήρηση ένα από τα δοκίμια εμφάνιζε σημάδια σκουριάς στην μια άκρη. Κάτι τέτοιο μπορεί να οφείλεται σε οξείδωση σιδηροξειδίων σε περίπτωση που το δοκίμιο βρισκόταν πριν σε υγρό περιβάλλον αποθήκευσης .

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθούν αναφορές στην βιβλιογραφία <sup>(4)</sup> που σχετίζονται με την αλλαγή της διαβρεχτότητας (αυξημένη υδατοδιαβρεχτότητα) που μπορεί να οφείλεται στην επικάλυψη των κόκκων χαλαζία των ψαμμιτών από σιδηροξειδία. Αυτό μπορεί να είναι αποτέλεσμα της αλλαγής του ζήτα - δυναμικού των κόκκων του ψαμμίτη ή της αλλαγής της πυκνότητας των δεσμών υδρογόνου και των ελεύθερων υδροξυλίων στην επιφάνεια του βράχου.

Δοκίμια Πρίνου: Οσον αφορά την ορυκτολογική σύσταση τα εμφανή στις λεπτές τομές ορυκτά είναι: ( παρατήρηση σε μεγέθυνση 63x & 250x )

- Χαλαζίας
- Μικροκλινης
- Καλιούχοι άστριοι
- Κρυστάλλοι μοσχοβίτη

Στην μεγαλύτερη μεγέθυνση 250x παρατηρήθηκε ύπαρξη σιδηροξειδίων (25A) και πιθανά υπολείματα οργανικής ύλης (όπως φαίνεται από το σχήμα) φυτικής προέλευσης (22A) .

Οι κρύσταλλοι είναι suprounded ως γωνιώδεις. Οσον αφορά το συνδετικό υλικό (1A,2A,6A) αυτό αποτελείται από δολομιτικά διαλύματα πρωτογενούς (εντοπίζεται γύρω από τους κρυστάλλους) αλλά και δευτερογενούς προέλευσης από το ίδιο υλικό (που εντοπίζεται στο κέντρο των πόρων ).

Το δείγμα είναι πολύ συνεκτικό με μικρό πορώδες (εκτιμώμενη τιμή <9%) πράγμα που οφείλεται στον δευτερογενούς προέλευσης δολομίτη που έχει καταλάβει θέση μέσα στους ελεύθερους πόρους. Αυτή ακριβώς η ύπαρξη του συνδετικού υλικού αναμένεται να έχει αρνητική επίδραση στις τιμές απόλυτης διαπερατότητας καθώς κλείνει τα μονοπάτια ροής του ρευστού (αλληλοσυνδεόμενο πορώδες).

Στην Φωτ.3Α. είναι εμφανές το αλληλοσυνδεόμενο πορώδες καθώς και η σκολιότητα (tortuosity) που παρουσιάζεται.

Κατά τις μετρήσεις πορώδους και διαπερατότητας τα δοκίμια Pc2 & Pc3 εμφάνισαν τιμή διαπερατότητας κοντά στα 2 mD και πορώδες κοντά στο 5%. Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η αιτία αυτής της διαφοροποίησης αποτελεσμάτων, σε σχέση με το Pc1 δοκίμιο έγιναν λεπτές τομές και εξετάσθηκαν στο ανακλαστικό μικροσκόπιο.

Οι μειωμένες τιμές διαπερατότητας οφείλονται όμως στην ύπαρξη μεγαλύτερης ποσότητας συνδετικού υλικού (ίδιας σύστασης) που καταλαμβάνει τους ελεύθερους πόρους και κλείνει το αλληλοσυνδεόμενο πορώδες (22A).

## **5.6. Καθαρισμός δοκιμίων**

Ο καθαρισμός των δοκιμίων πριν τις εργαστηριακές μετρήσεις εξυπηρετεί τις παρακάτω σκοπιμότητες:

α) Απομάκρυνση από το δοκίμιο όλων των ρευστών και συστατικών που έχουν απορροφηθεί πάνω στην επιφάνεια του βράχου για να γίνουν μετρήσεις πορώδους, διαπερατότητας & κορεσμών σε ρευστά. Μετρήσεις πολυφασικής ροής (π.χ. σχετικών διαπερατοτήτων) πρέπει να αποφεύγονται σε τέτοιου είδους δοκίμια εκτός κι αν είναι σίγουρο ότι αυτά είναι απολύτως υδατοδιαβρεχτά.

β) Η διαδικασία αυτή αποτελεί το πρώτο βήμα πριν φτάσουμε σε δοκίμιο επαναποκαταστημένης κατάστασης (restored state core).

Τα στάδια καθαρισμού ενός δοκιμίου είναι:

1) Εγχυση διαλυτών μέσα στο δοκίμιο προκειμένου να διαλυθεί και να απομακρυνθεί όσο το δυνατόν περισσότερο πετρέλαιο από αυτό.

2) Ξήρανση σε φούρνο προκειμένου να εξατμισθεί ο διαλύτης από την επιφάνεια των ορυκτών.

Αναφέρονται πολλές μεθοδολογίες καθαρισμού στην βιβλιογραφία<sup>(4,30,31,32,37,67)</sup>.

Επιλέχθηκε η μέθοδος Soxhlet.

Η επιλογή των διαλυτών που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται κυρίως από το είδος του πετρώματος αλλά και από το είδος των ρευστών που θα απομακρυνθούν.

Ως γενικοί κανόνες πάνω στην επιλογή των διαλυτών μπορούν να αναφερθούν οι εξής<sup>(31)</sup>:

α) Οι «οξικού τύπου» διαλύτες (οξικό οξύ, βενζοϊκό οξύ, τολουόλιο) είναι περισσότερο αποτελεσματικοί στην περίπτωση των ψαμμιτών.

Οι «βασικού τύπου» διαλύτες όπως η πυριδίνη είναι περισσότερο αποτελεσματικοί στην περίπτωση των ασβεστολίθων. Αυτό οφείλεται στην οξικού τύπου φύση της ψαμμιτικής επιφάνειας η οποία τείνει να απορροφά βασικά συστατικά από το πετρέλαιο. Έτσι όταν ένα ισχυρότερο οξύ περάσει μέσα από τον ψαμμίτη απογυμνώνει την επιφάνεια του πετρώματος από αυτά τα βασικά συστατικά.

β) Το τολουόλιο έχει βρεθεί ότι είναι πιο αποτελεσματικό για ασφαλτικού τύπου πετρέλαια. Επίσης είναι πιο αποτελεσματικό όταν συνδυάζεται με άλλους διαλύτες όπως μεθανόλη ή η αιθανόλη.

Σε αυτή την περίπτωση το τολουόλιο απομακρύνει από την επιφάνεια του πετρώματος τα ασφαλτένια ενώ η μεθανόλη απομακρύνει πολικά

συστατικά που αλλάζουν την διαβρεχτότητα και άλατα που προέρχονται από την άλμη.

γ) Η επιτυχία ή όχι του καθαρισμού αποδεικνύεται από την υδατοδιαβρεχτότητα του βράχου η οποία με την σειρά της μπορεί να πιστοποιηθεί με Ammot test.

δ) Γενικά κατά την ξήρανση δοκιμίων που περιέχουν μοντμοριλλονίτη πρέπει η θερμοκρασία ξήρανσης να είναι τέτοια έτσι ώστε αυτός να μην χάσει κρυσταλλικά νερά.

Κάτι τέτοιο θα έχει σαν αποτέλεσμα μια αύξηση της τάξεως 3.3 μονάδων πορώδους για κάθε 10% υπάρχοντος μοντμοριλλονίτη. Δείγματα που περιέχουν ενυδατωμένες αργίλλους ξηραίνονται σε θερμοκρασία 64 C και υγρασία 45% με σκοπό την διατήρηση των μοριακών στρωμάτων νερού στα ορυκτά αυτά. Ενδειξη για το αντίθετο μπορεί να είναι το σπάσιμο των δοκιμίων κατά την ξήρανση<sup>(32)</sup>.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί το γεγονός ότι υπάρχει πιθανότητα ο συνεχής καθαρισμός με τολουόλιο να καταστήσει το σύστημα μας λιγότερο υδατοδιαβρεχτό<sup>(4,30)</sup>.

Συμφωνα με την εργασία των Dubey S.T. , Waxman M.H.<sup>(29)</sup> αυτο το φαινόμενο οφείλεται :

α) Στην ικανότητα του τολουολίου να απομακρύνει το νερό από την επιφάνεια των ορυκτών ( η διαλυτότητα του νερού στο τολουένιο αυξάνει από 0.05 σε 0.38 gr νερού / 100 gr τολουολίου με αύξηση της θερμοκρασίας από 25 σε 90 C ) αφήνοντας έτσι να υπάρχει επαφή του διαλύματος τολουελίου / πετρελαίου με την επιφάνεια του ορυκτού.

β) Όπως επίσης και στην ικανότητα του να διαλύει τα κλάματα ασφαλτενίων και ρητινών που βρίσκονται στο πετρέλαιο και να διευκολύνει την απορρόφησή τους από την επιφάνεια των ορυκτών.

Οι ίδιοι ερευνητές απέδειξαν εξάλλου πειραματικά με χρήση μεθόδου P-FID (Pyrolysis Flame Ionization Detection ) ότι η χρήση διαλύματος χλωροφορμίου / μεθανόλης είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος απομακρύνοντας το 98.9% του πετρελαίου από το δοκίμιο, σε σύγκριση με το τολουόλιο όπου η αποτελεσματικότητα πέφτει στο 94.2%. Ιδια συμπεράσματα, όσον αναφορά την χρήση του τολουελίου στον καθαρισμό , αναφέρονται στην βιβλιογραφία και από τον Clementz<sup>(19)</sup>.

Πρότυπα δοκίμια : Για τον καθαρισμό τους χρησιμοποιήθηκε συσκευή Soxlet και διαλύτης- μίγμα 50% εξάνιο-50% ακετόνη. Τα δοκίμια εισήχθησαν στην συσκευή και παρέμειναν για 24 ώρες.

Ακολούθησε ξήρανση τους για άλλες 24 ώρες σε φούρνο σταθερής θερμοκρασίας 115 C. Μετά το πέρας της διαδικασίας ξήρανσης τα δοκίμια εισήχθησαν σε ξηραντήρα για τουλάχιστον 40 λεπτά πριν ζυγιστούν.

Δοκίμια Πρίνου :Εγινε χρήση της συσκευής Soxlet όπου εδώ όμως οι διαλύτες καθαρισμού είναι 50% τολουόλιο - 50% αιθανόλη ή μεθανόλη. Ακολούθησε ξήρανση στους 115 C για 24 ώρες.

Στα δοκίμια Pc6 - Pc11 η διαδικασία καθαρισμού με την συσκευή Soxlet εγκαταλείφθηκε προκειμένου να αποφευχθεί η αλλαγή της κατάστασης διαβρεχτότητας όπως περιγράφεται παραπάνω. Αντ' αυτού τα δοκίμια αυτά τοποθετήθηκαν στον υποδοχέα και έγιναν διαδοχικά εισπιέσεις τολουολίου και μετά μεθανόλης σε διάφορες παροχές με την ύπαρξη ελέγχου πίεσης στην έξοδο της συνδεσμολογίας " backpressure regulator" έτσι ώστε ο κάθε διαλύτης να πληρεί όλο το πορώδες του δοκιμίου. Στο τέλος τα δοκίμια αφήθηκαν για ξήρανση σε φούρνο στους 70 C (θερμοκρασία εξάτμισης μεθανόλης 58 C) για 24 ώρες.

### **5.7.Υδατική φάση - Προετοιμασία εργαστηριακής άλμης**

Ο λόγος που είναι αναγκαία η χρήση άλμης συγκεκριμένης σύνθεσης στα πειράματά έχει να κάνει τόσο με την εξεταζόμενη ιδιότητα της διαβρεχτότητας (βλ. και 1.7.4.) όσο και με το γεγονός ότι η χρήση νερού τυχαίας σύστασης μπορεί να οδηγήσει σε μετρήσεις απόλυτης διαπερατότητας πολύ μικρότερες από τις κανονικές όπως αναφέρεται και από την εργασία του Jones <sup>(44)</sup>. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ιόντα μαγνησίου και ασβεστίου μπορεί να εμποδίζουν την μετανάστευση σωματιδίων αργίλλων μέσα στους πόρους κάτι που θα είχε ως αποτέλεσμα μειωμένες τιμές διαπερατότητας .

Πρότυπα δοκίμια:Απο την βιβλιογραφία βρέθηκε ότι σύσταση νερού σχηματισμού της Β.Θάλασσας, η οποία και προσομοιώθηκε εργαστηριακά, είναι:

- NaCl καθαρότητας 95% , πυκνότητα : 41.7 gr/lit
- KCl καθαρότητας 99.5%, πυκνότητα : 1.2 gr/lit
- MgCl<sub>2</sub> καθαρότητας 99% , πυκνότητα : 2.2 gr/lit
- CaCl<sub>2</sub> καθαρότητας 95% , πυκνότητα : 22 gr/lit

Έχουν ελεγχθεί οι διαλυτότητες όλων των αλάτων και έχει βρεθεί ότι και τα τέσσερα είναι ευδιάλυτα σε κανονική θερμοκρασία στο νερό.

Επίσης πραγματοποιήθηκε και μέτρηση της πυκνότητας της άλμης που παρασκευάστηκε με πυκνόμετρο και βρέθηκε ίση με 1.042 gr/lit στους 20.4 C . Η άλμη που παρασκευάστηκε απαερώθηκε για 2 ώρες πριν γίνει κορεσμός των δοκιμίων με αυτή. Η τιμή pH αυτής μετρήθηκε και βρέθηκε ίση με 9.1 στους 30 C.

Δοκίμια Πρίνου:Παρασκευάστηκε εργαστηριακά άλμη που αναταποκρίνεται όσον αφορά την σύστασή της σε χημική ανάλυση του νερού του σχηματισμού:

- NaCl καθαρότητας 95% , πυκνότητα : 103 gr/lit
- KCl καθαρότητας 99.5%, πυκνότητα : 4.2 gr/lit
- MgCl<sub>2</sub> καθαρότητας 99% , πυκνότητα : 8.5 gr/lit
- CaCl<sub>2</sub> καθαρότητας 95% , πυκνότητα: 6.5 gr/lit

Πραγματοποιήθηκε μέτρηση της πυκνότητας της άλμης που παρασκευάστηκε με πυκνόμετρο και βρέθηκε ίση με 1.07gr/lit στους 20.4 C. Η άλμη που παρασκευάστηκε και φιλτραρίστηκε διαμέσω GF/A Whatman Paper filter με διάμετρο πόρων 1.6 μm & απαερώθηκε για 2 ώρες πριν γίνει κορεσμός των δοκιμίων με αυτή . Το pH της άλμης μετρήθηκε και βρέθηκε ίσο με 9.1 στους 27 C.

### **5.8. Πετρελαιοκή φάση**

Πριν τη χρήση του πετρελαίου του Πρίνου σε οποιαδήποτε πειραματική διαδικασία προηγμένως:

α)Ομογενοποιήθηκε με την βοήθεια υπερήχων σε μηχανήμα Vibracell.

β)Φιλτράρίστηκε υπό κενό μέσα από 1.6μm paperfilters.

Μετρήθηκαν η πυκνότητα και το κινηματικό ιξώδες. Για την μέτρηση της πυκνότητας (όπως και για την άλμη) χρησιμοποιήθηκε πυκνόμετρο Part DMA 35 .

Για τη μέτρηση του κινηματικού ιξώδους χρησιμοποιήθηκε η ASTM D445 μέθοδος. Επιλέχθη σωλήνας Cannon - Fenske αντίστροφης ροής για αδιαφανή δείγματα και μετρήθηκε τον χρόνο που χρειάστηκε μια ποσότητα του υγρού να περάσει από δύο προκαθορισμένα σημεία σε βαθμονομημένο σωλήνα. Ο χρόνος που μετρείται σε sec πολλαπλασιάζεται με μια σταθερά που δίνεται από τον κατασκευαστή για διάφορες θερμοκρασίες.



Χρησιμοποιήθηκε πετρέλαιο Πρίνου με κινηματικό ιξώδες 14.554 cP στους 40 C ,  
πυκνότητα: 0.874 gr/cc και τιμή διεπιφανειακής τάσης  $\sigma_{ow}=28 \text{ dyn/cm}^{(66)}$ .

### **5.9.Μακροσκοπική περιγραφή των δοκιμών**

Τα στοιχεία των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα αναφέρονται στους παρακάτω πίνακες :

#### Πίνακας στοιχείων προτύπων δοκιμών

<b>Κωδικός</b>	<b>Μήκος (cm)</b>	<b>Γεωμ.Ογκος (cc)</b>	<b>Μάζα (gr)</b>
<b>Bc1</b>	5.57	28.21	60.68
<b>Bc3</b>	5.36	27.19	59.39
<b>Bc4</b>	6.37	32.25	68.53
<b>Bc5</b>	7.3	36.97	78.59
<b>Bc7</b>	8.0	40.52	86.24

#### Πίνακας στοιχείων των δοκιμών Πρίνου

<b>Κωδικός</b>	<b>Μήκος (cm)</b>	<b>Μάζα (gr)</b>
<b>Pc1</b>	2.37	27.467
<b>Pc2</b>	3	39.044
<b>Pc3</b>	2.34	29.397
<b>Pc4</b>	2.49	19.809
<b>Pc5</b>	3.3	38.664
<b>Pc6</b>	4.0	35.758
<b>Pc7</b>	1.5	13.658
<b>Pc8</b>	3.26	28.109
<b>Pc10</b>	2.29	11.41

Το Pc6 δοκίμιο κατεστράφη κατά τα προγραμματισμένα πειράματα λόγω της εξαιρετικής του ευθρυπτότητας. Προκειμένου να αντιμετωπισθούν αυτά τα προβλήματα ευθρυπτότητας, έγινε εξωτερική επένδυση των 4 τελευταίων δοκιμίων με επίστρωση τεφλόν της εταιρίας Vindum Engineering<sup>R</sup>.

Το υλικό αυτό έχει την ιδιότητα να συρικνώνεται με την χρήση θερμοκρασίας και να καλύπτει το δοκίμιο εξωτερικά αυξάνοντας την συνοχή του κατά την διάρκεια της σειράς των πειραμάτων που θα ακολουθήσουν.

Η διάμετρος των όλων των δοκιμίων είναι 1 ίντσα (=2.54cm) εκτός των Pc7 -Pc11 που έχουν διάμετρο 2.49cm.

*Σημ: Οι μάζες είναι μετρημένες μετά τον καθαρισμό των δοκιμίων σε συσκευή Soxlet, την ξήρανσή τους, και την διατήρησή τους σε ξηραντήρα. Έτσι η ατμοσφαιρική υγρασία δεν είναι συνυπολογισμένη στην μέτρηση βάρους των δοκιμίων .*

## Κεφάλαιο 6: Πειράματα σε καθαρά δοκίμια.

### 6.1. Μέτρηση πορώδους :

#### 6.1.1. Παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές μετρήσεων πορώδους.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το πρωτογενές πορώδες ενός σχηματισμού είναι:

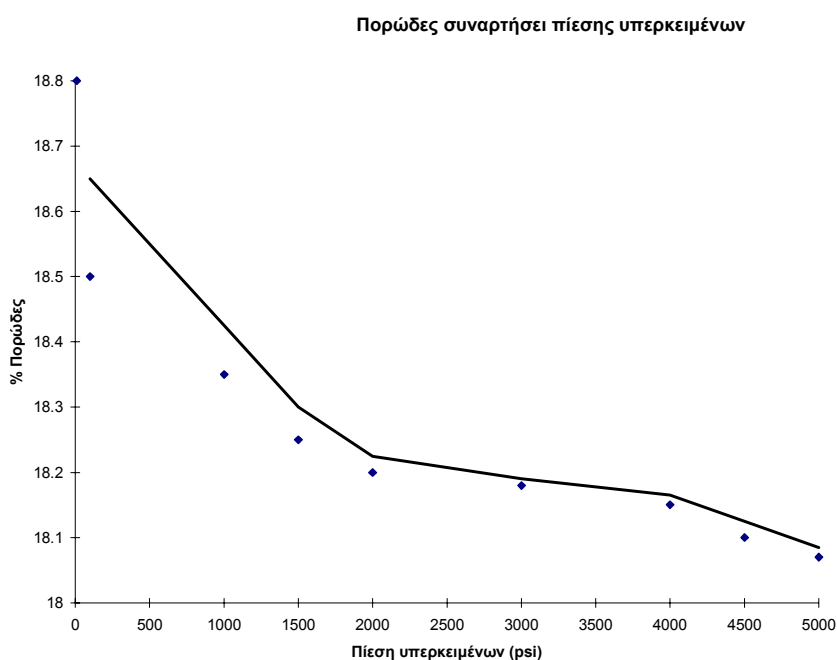
α) Το σχήμα των κόκκων

β) Η λοξότητα της στατιστικής συνάρτησης της κατανομής των κόκκων.

Όσο πιο ομοιόμορφα είναι ταξινομημένοι οι κόκκοι τόσο μεγαλύτερες οι τιμές του πορώδους.

γ) Η πίεση των υπερκειμένων πετρωμάτων<sup>(46)</sup>

Το Σχ.30. δείχνει την επίδραση της πίεσης των υπερκειμένων στο πορώδες πετρώματος τύπου Berea



Σχ.30.: Επίδραση της πίεσης των υπερκειμένων πετρωμάτων στο πορώδες.

Ο συσχετισμός μεταξύ πορώδους και πίεσης υπερκειμένων δίνεται από τον τύπο<sup>(46)</sup>:

$$\varphi = c P^d \quad (46)$$

όπου:

$c, d$  : σταθερές του δοκιμίου

$P$  : πίεση υπερκειμένων ( psi)

$\varphi$  : πορώδες.

Σε εργασία του Al - Marhoun<sup>(60)</sup> οι τιμές αυτών των σταθερών βρέθηκαν να είναι ίσες με :

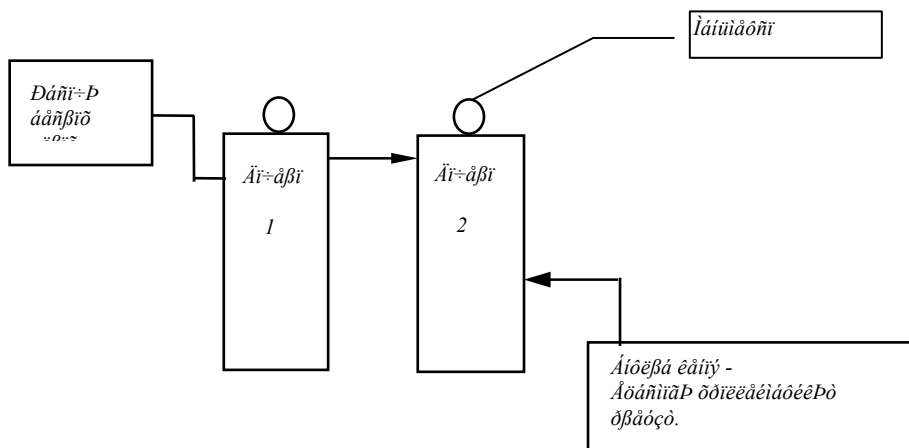
$$c = 1.2925 \text{ \& } d = -0.01002 .$$

### 6.1.2. Αποτελέσματα μετρήσεων πορώδους.

Πρότυπα δοκίμια :Εγινε πειραματική μέτρηση του πορώδους. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω όργανα:

- Μεταλλικά αεροστεγή δοχεία 1 & 2 ίσου όγκου 475 ml.
- Μανόμετρο ψηφιακό με διακριτική ικανότητα μέτρησης 0.01bar.
- Αντλία κενού.
- Φιάλη He.

Η πειραματική διάταξη της συνδεσμολογίας φαίνεται στο Σχ.31.:

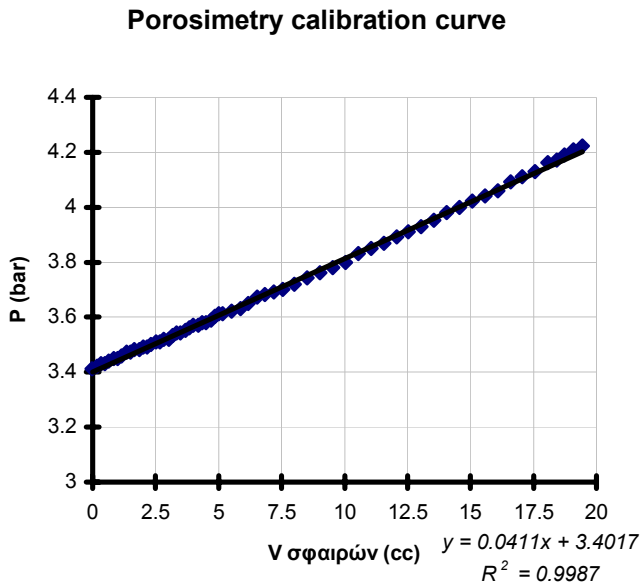


Σχ. 31.: Πειραματική διάταξη της μέτρησης πορώδους με εκτόνωση αερίου ηλίου.

Εγινε στην αρχή βαθμονόμηση του συστήματος με σκοπό την πειραματική εξαγωγή της σχέσης της καμπύλης  $P=f(V)$  που αναφέρεται στην πίεση που θα επικρατήσει μέσα στο σύστημα όταν αφηθεί να εκτονωθεί ο όγκος του αερίου από το δοχείο 1 και του όγκου στερεών συμπαγών δειγμάτων γνωστού όγκου που τοποθετώ στο δοχείο 2. Οι σφαίρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν όγκου 0.0335cc η κάθε μία.

Όλες οι μετρήσεις έγιναν αφού πρώτα στο δοχείο 2 εφαρμόστηκε, με χρήση της αντλίας κενού, υπολλειματική πίεση 6mbar .

Το Σχ.32. δίνει την καμπύλη βαθμονόμησης του ποροσίμετρου που υπολογίσθηκε με αυτήν την μέθοδο.



Σχ.32.:Καμπύλη βαθμονόμησης ποροσίμετρου.

Με βάση τα δεδομένα της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων του Σχ.32. μπορεί να προσδιοριστεί ο όγκος των κόκκων ενός δοκιμίου που τοποθετείται στο δοχείο 2 και κατ' επέκταση το ενεργό πορώδες του.

Μετά την κατασκευή της καμπύλης βαθμονόμησης (Σχ.32.), στο δοχείο 2 τοποθετήθηκε το δοκίμιο Bc1.

Προκειμένου να γίνει υπολογισμός του ενεργού πορώδους των δοκιμίων είναι αναγκαίο να βρεθεί ο ολικός όγκος (bulk volume).

Για το δοκίμιο Bc1 η ένδειξη του μανομέτρου ήταν 4.44 bar.

Ο όγκος του δοκιμίου (bulk volume) υπολογίζεται γεωμετρικά ως εξής:

$$V_{ολ} = \pi \cdot r^2 \cdot h = 30.909 \text{ cm}^3 \quad \text{όπου :}$$

$$\pi = 3.1415927$$

$$r = 2.54/2 = 1.27 \text{ cm}$$

$$h = 6.1 \text{ cm}$$

Η προβολή της τιμής πίεσης 4.44bar στο διάγραμμα P-V του Σχ.32., που έγινε με την μέθοδο των σφαιρών γνωστού σταθερού όγκου, μπορεί να βρεθεί ο όγκος των κόκκων

του δοκιμίου τούτου. Μετά από αριθμητική αντικατάσταση στην εξίσωση ελαχίστων τετραγώνων που έδωσε αυτή η διαδικασία :  $\psi=0.0411*\chi+3.4017$  ο όγκος κόκκων (Vκοκ) βρίσκεται ίσος με 5.646 cc .

Με την αναγωγή στα 100 το πορώδες του συγκεκριμένου δοκιμίου είναι περίπου  $\phi=18.267\%$ .

Το πορώδες των δοκιμίων υπολογίστηκε και ως διαφορά βάρους ξηρού και κορεσμένου σε άλμη δοκιμίου. Η μέθοδος με άλλα λόγια συνίσταται:

α)Στον κορεσμό του δοκιμίου με γνωστής πυκνότητας ρευστό (στην περίπτωση αυτή άλμη γνωστής πυκνότητας).

β)Στον υπολογισμό του όγκου των πόρων από την αύξηση σε βάρος που θα εμφανιστεί στο δείγμα.

Για τον κορεσμό των δοκιμίων έγινε απαέρωση της άλμης και ο κορεσμός των δοκιμίων έγινε εν κενώ. Τα δοκίμια κρατήθηκαν για κορεσμό μέσα στην άλμη για τουλάχιστον 48 ώρες. Στον παρακάτω πίνακα παραθέτονται τα βάρη των δοκιμίων τόσο ξηρά όσο και κορεσμένα :

#### Πίνακας υπολογισμού πορώδους για πρότυπα δοκίμια

<b>Κωδικός</b>	<b>Βάρος ξηρό (gr)</b>	<b>Βάρος κορ.(gr)</b>	<b>V πόρων (cc)</b>	<b>Πορώδες</b>
<b>Bc1</b>	60.68	66.14	5.239	18.57%
<b>Bc3</b>	59.398	63.43	3.869	18.25%
<b>Bc4</b>	68.53	75.22	6.42	19.9%
<b>Bc5</b>	78.586	85.958	7.075	19.13%
<b>Bc7</b>	86.241	95.185	8.343	20.77%

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα το μέσο πορώδες των πρότυπων δοκιμίων είναι περίπου 19.2%.

Δοκίμια Πρίνου: Το πορώδες των δοκιμίων εξήχθη ως διαφορά βάρους ξηρού και κορεσμένου σε άλμη δοκιμίου. Για τον σκοπό αυτό τα δοκίμια μετά την ξήρανση τους διατηρήθηκαν εν κενώ και κορέσθησαν με απαεριομένη άλμη σε ατμοσφαιρική πίεση .

#### Πίνακας υπολογισμού πορώδους για δοκίμια Πρίνου

<b>Κωδικός</b>	<b>Βάρος ξηρό (gr)</b>	<b>Βάρος κορ.(gr)</b>	<b>V πόρων (cc)</b>	<b>Πορώδες</b>
<b>Pc1</b>	27.467	28.74	1.12	9.33%
<b>Pc2</b>	39.044	40.014	0.906	5.964%

<b>Pc3</b>	29.397	30.05	0.61	5.148%
<b>Pc4</b>	19.809	21.694	1.677	13.3%
<b>Pc5</b>	38.664	40.122	1.458	8.72%
<b>Pc7</b>	14.835*	15.686*	0.814	11.15%
<b>Pc8</b>	29.546*	32.086*	2.373	14.96%
<b>Pc10</b>	19.005*	21.438*	2.269	19.88%
<b>Pc11</b>	21.8*	24.352*	2.38	18.26%

(\*) : Στα βάρη των δοκιμίων αυτών είναι συνυπολογισμένο και το βάρος της επικάλυψης από τεφλόν.

### 6.1.3. Παρατηρήσεις στις μετρήσεις πορώδους

1)Και με τις δυο μεθόδους μέτρησης πορώδους (εκτόνωση αερίου ηλίου & βαρυτομετρική διαφορά ξηρού και κορεσμένου σε άλμη δοκιμίου) το αποτέλεσμα είναι το ενεργό πορώδες. Με την μέθοδο του κορεσμού υπό κενό και του υπολογισμού του πορώδους με την διαφορά βάρους επιτυγχάνεται παράλληλα και η αποκατάσταση της ιοντικής ισορροπίας μεταξύ του πετρώματος και των αλάτων που περιέχονται στην άλμη. Στην παράγραφο 1.7.4 έχει ήδη αναφερθεί η επίδραση της χημείας της άλμης στην διαβρεχτότητα.

2)Το πορώδες που υπολογίστηκε με την δεύτερη μέθοδο είναι κατά 0.5 περίπου εκατοστιαίες μονάδες μικρότερο από την μέθοδο μέτρησης με εκτόνωση αερίου ηλίου. Πιθανές εξηγήσεις αυτής της διαφοράς αποτελεσμάτων μπορεί να εντοπισθούν<sup>(37)</sup> :

α)Το ήλιο ως μονοατομικό αέριο έχει την ικανότητα να διεισδύει σε πόρους που πιθανόν να είναι απρόσιτοι από τα μόρια του νερού δίνοντας με αυτόν τον τρόπο τιμή πορώδους μεγαλύτερη από αυτήν που υπολογίζεται ως διαφορά βάρους .

β)Δεν έχει επιτευχθεί 100% κορεσμός του δοκιμίου σε άλμη.

Και στις δυο μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του πορώδους υπάρχουν κάποιες αδυναμίες, με την μέθοδο εκτόνωσης αερίου να δίνει συνήθως υψηλότερες από την πραγματικότητα τιμές και την μέθοδο κορεσμού χαμηλότερες.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία<sup>(37)</sup> η διαφορά στις μέσες τιμές πορώδους που μπορεί να υπολογιστούν με αυτές τις μεθόδους είναι συνήθως της τάξης του 0.8% σε εκατοστιαίες μονάδες πορώδους.

Μόνο στα δοκίμια Bc1 & Bc3 χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο μεθοδολογίες πορώδους που αναφέρονται.

## **6.2. Μέτρηση απόλυτης διαπερατότητας σε άλμη.**

Ως διαπερατότητα ενός πετρώματος σε ένα συγκεκριμένο ρευστό, ορίζεται η ικανότητα του πετρώματος αυτού να άγει το εντός αυτού περικλειόμενο ρευστό. Θεωρείται ιδιότητα του πορώδους μέσου και όχι του ρευστού. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι σε ένα ταμιευτήρα πετρελαίου η διαπερατότητα ποικίλλει και κατά την οριζόντια και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.

Γενικά οι διαπερατότητες που μετρούνται παράλληλα προς τα επίπεδα καθίζησης των ιζηματογενών πετρωμάτων είναι σημαντικά πιο αυξημένες από τις αντίστοιχες κατακόρυφες διαπερατότητες. Η διαπερατότητα, δηλαδή, αποτελεί ένα ανισότροπο μέγεθος στους ταμιευτήρες πετρελαίου.

Η απόλυτη διαπερατότητα ενός δοκιμίου σε κάποιο ρευστό υπολογίζεται με χρήση της εξίσωσης του Darcy:

$$K = \frac{Q \cdot \mu \cdot L \cdot 1000}{(d/2)^2 \cdot \pi \cdot \Delta P \cdot 60} \quad (47)$$

όπου :

K : η διαπερατότητα του δοκιμίου στο συγκεκριμένο ρευστό σε mD.

μ: το ιξώδες του ρευστού σε cP.

L: το μήκος του δοκιμίου σε cm.

d: η διάμετρος του δοκιμίου σε cm.

ΔP : η πτώση πίεσης που προκαλείται σε bar.

Οι προϋποθέσεις κάτω από τις οποίες εφαρμόζεται αυτή η εξίσωση είναι:

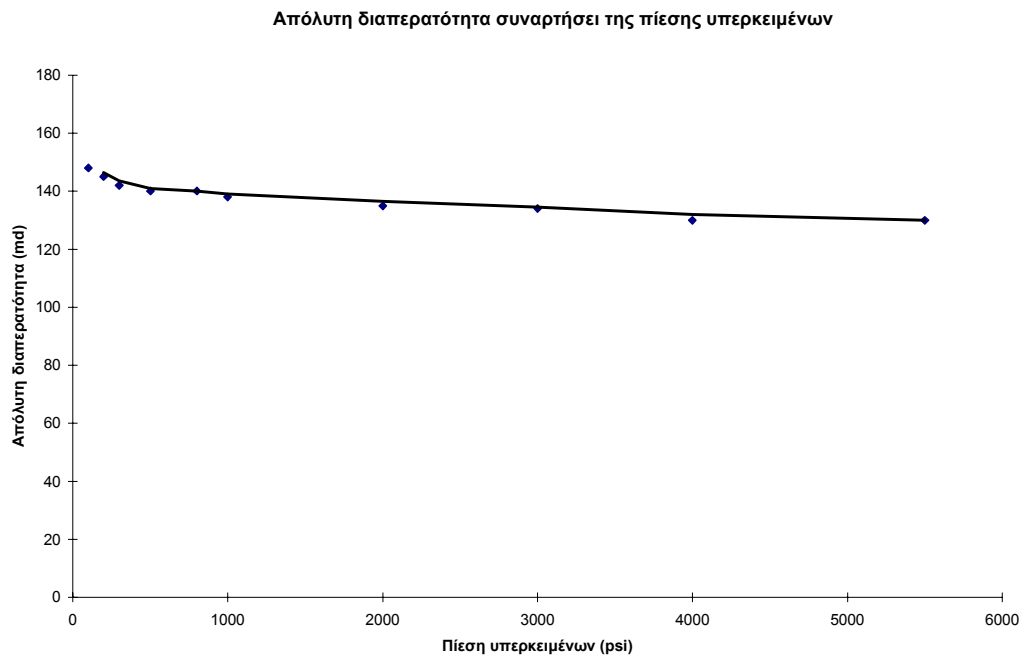
α) Δεν υπάρχει χημική αντίδραση μεταξύ του ρευστού και των τοιχωμάτων των πόρων.

β) Η παροχή του ρευστού είναι τέτοια ώστε η ροή να θεωρείται στρωτή και όχι τυρβώδης.

### **6.2.1. Παράγοντες που επιδρούν στις τιμές μετρήσεων απόλυτης διαπερατότητας.**



Η επίδραση της πίεσης των υπερκειμένων στις μετρήσεις της απόλυτης διαπερατότητας παρουσιάζονται στο Σχ.33. (για δοκίμια τύπου Berea)<sup>(46)</sup>:

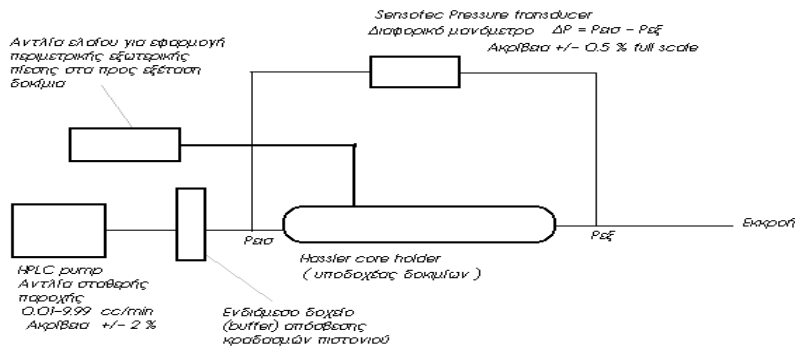


Σχ.33.: Επίδραση της πίεσης των υπερκειμένων στην απόλυτη διαπερατότητα σε άλμη<sup>(46)</sup>.

Αυτή η μείωση στην απόλυτη διαπερατότητα με την αύξηση της πίεσης των υπερκειμένων πετρωμάτων οφείλεται κατά κύριο λόγο στην μείωση του μεγέθους των πόρων.

### 6.2.2. Αποτελέσματα μετρήσεων απόλυτης διαπερατότητας σε άλμη

Η συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο Σχ.34.:



Σχ.34. : Πειραματική διάταξη μέτρησης της απόλυτης διαπερατότητας σε άλμη.

Πρότυπα δοκίμια: Εγιναν μετρήσεις απόλυτης διαπερατότητας σε άλμη και για τα τρία δοκίμια. Προκειμένου να γίνει προσομοίωση της υπερκείμενης πίεσης αλλά και για να διέρχονται τα ρευστά μόνο μέσα από το πορώδες του δοκιμίου, εξασκήθηκε στο Hassler core holder με την βοήθεια υδραυλικής αντλίας πίεση 28 atm.

Τα αποτελέσματα δίνονται στους παρακάτω πίνακες :

Κωδικός δοκιμίου	Παροχή (cm <sup>3</sup> /min)	L (cm)	$\Delta P$ (psi)	k (mD)
<b>Bc1</b>	2	5.57	0.55	1009.2
	3	5.57	0.82	1015.3
	4	5.57	1.26	881.09
	5	5.57	1.56	889.5
	6	5.57	1.91	871.8
	7	5.57	2.23	871.1
	8	5.57	2.5	888.01

Η μέση τιμή απόλυτης διαπερατότητας σε άλμη για το Bc1 (όπως αυτή υπολογίζεται από την εξ. 47) είναι 880 mD.

<b>Κωδικός δοκιμίου</b>	<b>Παροχή (cm<sup>3</sup>/min)</b>	<b>L (cm)</b>	<b>ΔP (psi)</b>	<b>k (mD)</b>
<b>Bc3</b>	2	5.37	0.52	1067.4
	3	5.37	0.91	816.3
	4	5.37	1.38	804.4
	5	5.37	1.66	835.9
	6	5.37	2	832.6
	7	5.37	2.24	867.3
	8	5.37	2.45	906.2

Η μέση τιμή απόλυτης διαπερατότητας σε άλμη για το Bc3 (όπως αυτή υπολογίζεται από την εξ. 47) είναι 843 mD

<b>Κωδικός δοκιμίου</b>	<b>Παροχή (cm<sup>3</sup>/min)</b>	<b>L (cm)</b>	<b>ΔP (psi)</b>	<b>k (mD)</b>
<b>Bc4</b>	2	6.37	0.85	653.01
	3	6.37	0.93	895.2
	4	6.37	1.33	834.7
	5	6.37	1.64	846.1
<b>Κωδικός δοκιμίου</b>	<b>Παροχή (cm<sup>3</sup>/min)</b>	<b>L (cm)</b>	<b>ΔP (psi)</b>	<b>k (mD)</b>
	6	6.37	2.43	685.3
	7	6.37	2.6	747.2
	8	6.37	2.81	790.1

Η μέση τιμή απόλυτης διαπερατότητας σε άλμη για το Bc4 (όπως αυτή υπολογίζεται από την εξ. 47) είναι 844 mD.

*Σημείωση: Στον υπολογισμό της μέσης τιμής απόλυτης διαπερατότητας σε άλμη δεν λήφθησαν υπόψη οι τιμές ΔP που αντιστοιχούν σε μικρές τιμές παροχών έτσι ώστε*

η γραμμή θορύβου του διαφορικού μανομέτρου να μην επηρεάζει τα αποτελέσματα.

Δοκίμια Πρίνου. Η πειραματική διάταξη του Σχ.34 χρησιμοποιήθηκε και για τα δοκίμια του Πρίνου. Με την μόνη διαφορά ότι οι παροχές που χρησιμοποιήθηκαν δεν ήταν οι ίδιες με αυτές των προτύπων δοκιμίων. Ο λόγος είναι ότι οι διαπερατότητες των δοκιμίων του Πρίνου (όπως φάνηκε και στην εξέταση των λεπτών τομών βλ. παρ. 5.5.3.) αναμένονται πολύ μικρότερες από αυτές των προτύπων με αποτέλεσμα οι διαφορές πίεσης που θα μετρηθούν να ξεπερνούν τα όρια λειτουργίας του διαφορικού μανόμετρου που είναι συνδεδεμένο στην πειραματική διάταξη.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

<b>Κωδικός δοκιμίου</b>	<b>Παροχή(cm<sup>3</sup>/min)</b>	<b>Μήκος(cm)</b>	<b>ΔP (psi)</b>	<b>k (mD)</b>
<b>Pc1</b>	1.9	2.37	10.98	20.6
	1.5	2.37	16.6	10.2
	1.8	2.37	10.54	19.3
	1.3	2.37	14.36	10.2
	2.0	2.37	7.74	29.2

Από τον πίνακα αυτόν προκύπτει ότι η μέση τιμή της απόλυτης διαπερατότητας σε άλμη για το Pc1 κυμαίνεται στα (όπως αυτή υπολογίζεται από την εξ. 47) είναι 18 mD.

Στα δοκίμια Pc2 & Pc3 δεν έγιναν τελικά μετρήσεις από την στιγμή που η διαπερατότητα που υπολογίζεται είναι πολύ κάτω των 2 mD και έτσι θεωρούνται πρακτικά αδιαπέρατα.

Οι χαμηλές αυτές τιμές της απόλυτης διαπερατότητας που μετρήθηκαν οφείλονται στην ύπαρξη του δολομιτικού τύπου συνδεδετικού υλικού που παρατηρήθηκε στις λεπτές τομές και το οποίο δυσκολεύει την κίνηση των ρευστών μέσα από αυτά.

Τα αποτελέσματα μετρήσεων της απόλυτης διαπερατότητας σε άλμη για τα δοκίμια Pc7 & Pc8 φαίνονται στους δύο παρακάτω πίνακες:

<b>Κωδικός δοκιμίου</b>	<b>Παροχή(cm<sup>3</sup>/min)</b>	<b>Μήκος(cm)</b>	<b>ΔP (psi)</b>	<b>k (mD)</b>
-------------------------	-----------------------------------	------------------	-----------------	---------------

<b>Pc7</b>	2.5	1.5	0.44	422.8
	3.0		0.46	485.3
	3.5		0.47	554.1
	4.0		0.49	607.4
	4.5		0.5	669.7
	5.0		0.52	715.5
	5.5		0.53	772.2

Η μέση τιμή της απόλυτης διαπερατότητας για αυτό το δοκίμιο (όπως αυτή υπολογίζεται από την εξ. 47) είναι 604 mD.

**Κωδικός Παροχή(cm<sup>3</sup>/min) Μήκος(cm) ΔP (psi) k (mD)  
δοκιμίου**

<b>Pc8</b>	1.5	3.26	0.61	398.06
	2.0		0.68	476.2
	2.5		0.79	512.3
	3.0		0.89	545.6
	3.5		1.08	524.6
	4.0		1.31	494.3
	4.5		1.58	461.05
	5.0		1.71	473.3

Η μέση τιμή της απόλυτης διαπερατότητας για αυτό το δοκίμιο (όπως αυτή υπολογίζεται από την εξ. 47) είναι 502 mD.

### **6.3.Μέτρηση νεκρού όγκου συστήματος**

Πριν γίνουν μετρήσεις κορεσμών των δοκιμίων πρέπει να υπολογιστεί πρώτα ο νεκρός όγκος του συστήματος, δηλαδή ο όγκος των βαλβίδων και των σωληνώσεων της συνδεσμολογίας του Σχ.34.

Για τον σκοπό αυτό τοποθετήθηκε στον υποδοχέα δοκιμίων ένα δοκίμιο Berea ( πιο συγκεκριμένα το Bc4 του οποίου ο όγκος πόρων είναι γνωστός και ίσος με 4.14 cc) και ετοιμάστηκε διάλυμα καυστικού νατρίου με τιμή pH = 12. Η διαδικασία μέτρησης περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα :

α)Κορεσμός της συνδεσμολογίας με απιονισμένο νερό του οποίου το pH μετρήθηκε και βρέθηκε ίσο με 5.6 στους 19.8 C .

β)Εισαγωγή διαλύματος καυστικού νατρίου (NaOH). Ακολούθησε έγχυση με παροχή 1 cc/min και ταυτόχρονη συλλογή της εκροής σε

μικρές φιάλες. Η διαδικασία κράτησε 19 min. Χρόνος που ήρκεσε για να περάσουν από το δοκίμιο 4.5 PV περίπου καυστικού νατρίου .

γ)Μέτρηση του pH των δειγμάτων που συλλέχθηκαν από την εκροή αφού πρώτα έγινε αραίωση με απιονισμένο νερό σε λόγο 1/19 (διαλυμένη ουσία /διαλύτης). Για τις μετρήσεις του pH χρησιμοποιήθηκε το WTW πεγάμετρο (0-14 ακρίβειας +/- 0.01) και υγρά βαθμονόμησης (buffers) pH=7 & pH=10 (+/- 0.02 ).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

No φιάλης	t (min)	V	PV	pH	T ( C)
1	1	1	0.242	5.54	21.3
2	2	2	0.483	5.69	21.1
3	3	3	0.725	5.85	21.2
4	4	4	0.966	5.71	21.4
5	5	5	1.208	5.78	21.8
6	6	6	1.449	5.6	21.6
7	7	7	1.691	5.76	23.7
8	8	8	1.932	5.49	21.5
9	9	9	2.174	5.54	22
10	10	10	2.415	5.32	21.5
11	11	11	2.657	5.66	23.7
12	12	12	2.899	6.36	22.7
13	13	13	3.140	10.56	23.4
14	14	14	3.382	11.2	22.3
15	15	15	3.623	11.29	23.3
16	16	16	3.865	11.52	22.9

17	17	17	4.106	11.37	23.9
18	18	18	4.348	11.49	23.3
19	19	19	4.589	11.42	23.3

Σύμφωνα με τις ως άνω μετρήσεις κατασκευάστηκε το παρακάτω διάγραμμα (Σχ.35.) PH & T (άξονας ψ) συναρτήσει των όγκων πόρων που πέρασαν από το δοκίμιο σε όλη την διάρκεια του πειράματος (άξονας χ). Από τα σημεία των πειραματικών μετρήσεων στο διάγραμμα διενεργήθηκε παρεμβολή πολυωνύμικης συνάρτησης  $\psi=f(x)$  έκτου βαθμού στα σημεία (pH,PV)

Ο νεκρός όγκος (βαλβίδες και σωληνώσεις ) και ο όγκος των πόρων του δοκιμίου είναι το σημείο d που ανταποκρίνεται στην λύση της εξίσωσης:

$$\int_0^d f(x)dx = (dm - d) * 1 - \int_d^{dm} f(x)dx \quad (48)$$

όπου:

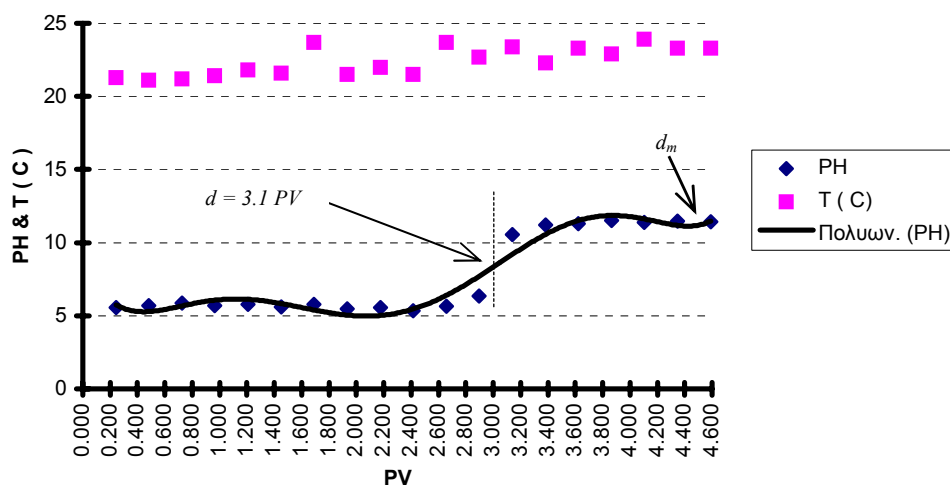
dm : η μέγιστη τιμή που έχει αυτό το σημείο.

d : το σημείο από το οποίο διέρχεται κάθετη γραμμή προς τον άξονα χ και χωρίζει την καμπύλη του Σχ.35 σε δύο ισεμβαδικές περιοχές .

Στην περίπτωση που εξετάζεται η τετμημένη αυτού του σημείου είναι 3.1 PV. Αυτό σημαίνει ότι 2.1 PV η  $2.1 * 4.14 = 8.69$  cc είναι ο νεκρός όγκος της συνδεσμολογίας μας.

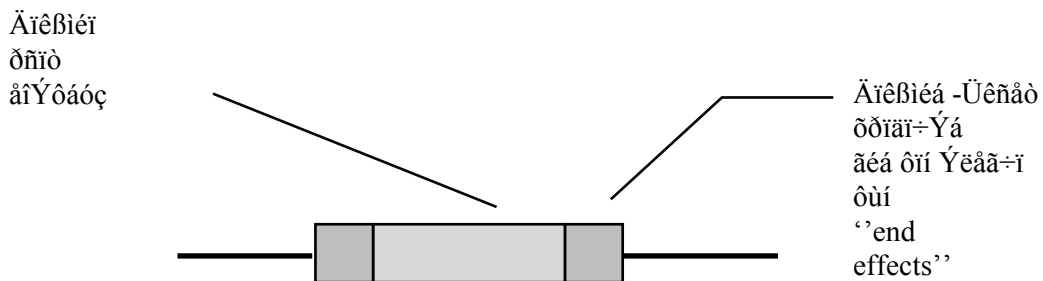
Διάγραμμα εύρεσης "νεκρού όγκου"

$$y = 0.1864x^6 - 2.6696x^5 + 14.271x^4 - 35.16x^3 + 40.535x^2 - 19.641x + 8.5716$$



Σχ.35.:Διάγραμμα για την εύρεση του νεκρού όγκου συνδεσμολογίας.

Ο νεκρός αυτός όγκος πρέπει να διορθωθεί εξαιτίας των ακραίων δοκιμίων που έχουμε τοποθετήσει στον υποδοχέα. Τα δοκίμια αυτά έχουν δικό τους υπολλειματικό βαθμό κορεσμού στο δωδεκάνιο. Για τον σκοπό στην πειραματική διάταξη του Σχ.36.:



Σχ.36. :Διάταξη δοκιμίων στο εσωτερικό του υποδοχέα δοκιμίων.

- α) Προσαρμόστηκαν μόνο τα ακραία δοκίμια.
- β) Επιτεύχθη κορεσμός αυτών σε άλμη.
- γ) Ακολούθησε εκτόπιση με δωδεκάνιο με παροχή 1 cc/min.
- δ) Συλλέχθηκε και μετρήθηκε σε προχοίδα η άλμη που εκτοπίστηκε.

Με την πειραματική αυτή διαδικασία βρέθηκε και να συμπεριελήφθηκε στον υπολογισμό του νεκρού όγκου και ο υπολλειματικός βαθμός κορεσμού που έχουν τα «ακραία δοκίμια».

Για τα πειράματα κορεσμού σε δοκίμια θα χρησιμοποιείται ως νεκρός όγκος η τιμή 5.5 cc. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι ο υπολλειματικός βαθμός κορεσμού που βρέθηκε για αυτά τα ακραία δοκίμια ισχύει μόνο για ρευστό εκτόπισης το δωδεκάνιο. Αν χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε άλλο ρευστό εκτόπισης, στα συγκεκριμένα ακραία δοκίμια, είναι προφανές ότι θα υπολογιστεί και διαφορετικός υπολλειματικός βαθμός κορεσμού.

#### **6.4. Υπολογισμός υπολλειματικών βαθμών κορεσμού**



Πρότυπα δοκίμια: Για την εύρεση των υπολειματικών σημείων κορεσμού καθώς και για την εκτέλεση του Ammot test χρησιμοποιήθηκε ως υδατική φάση εργαστηριακή άλμη, και ως πετρελαϊκή φάση δωδεκάνιο (καθαρότητας 99 + %). Η πειραματική διάταξη παρέμεινε η ίδια (βλ.Σχ.34.) με την διαφορά ότι όλα τα υγρά συλλέχθηκαν σε προχοίδες στην εκροή.

Δοκίμιο Bc1: Οι φάσεις οδηγήθηκαν μέσω της αντλίας σταθερής παροχής στο δοκίμιο με ρυθμό 2 cm<sup>3</sup>/min ενώ εγχύθηκαν τουλάχιστον 10 PV από κάθε φάση. Τα αποτελέσματα ήταν :

- Δοκίμιο κορεσμένο σε άλμη - εκτόπιση της άλμης από δωδεκάνιο. Ο υπολειματικός βαθμός κορεσμού σε νερό (IWS) ίσος με 42.73%.
- Δοκίμιο που βρίσκεται σε υπολειματικό βαθμό κορεσμού σε νερό (IWS) - εκτόπιση με νερό. Ο υπολλειματικός βαθμός κορεσμού σε δωδεκάνιο (ROS) ίσος με 79%.

Δοκίμιο Bc4: Τα υπολλειματικά σημεία κορεσμού του προηγούμενου πειράματος είναι πολύ μεγαλύτερα από τα αναμενόμενα. Για τον λόγο αυτό επαναλάβαμε την πειραματική διαδικασία με το δοκίμιο Bc4.

Προκειμένου να μελετηθεί καλύτερα η εξάρτηση των υπολειματικών σημείων κορεσμού με την παροχή οι εκτόπισεις σε αυτό το δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν στα 4 cc/min.

Επίσης αντικαταστάθηκαν τα ακραία δοκίμια, που είχαν χρησιμοποιηθεί στο προηγούμενο πείραμα (βλ.Σχ.36.) για τον περιορισμό των end effects με άπλες. Προκειμένου όμως να αποφευχθεί η επίδραση αυτών των φαινομένων στους βαθμούς κορεσμού τοποθετήθηκε ένας ρυθμιστής πίεσης (back pressure regulator) στην άκρη της πειραματικής διάταξης που δούλευε στα 4-5 bar.

Τα προϊόντα της εκτόπισης συλλέχθηκαν σε βαθμονομημένη προχοίδα. Το πείραμα επαναλήφθηκε όπως και στο δοκίμιο Bc1. Τα αποτελέσματα ήταν:

- Υπολειματικός βαθμός κορεσμού σε νερό (IWS) ίσος με 33.02 %
- Υπολειματικός βαθμός κορεσμού σε δωδεκάνιο (ROS) ίσος με 51.71 %

#### 6.4.1. Παρατηρήσεις πάνω στους υπολειματικούς βαθμούς κορεσμού:

Από τα αποτελέσματα του τελευταίου δοκιμίου (Bc4) παρατηρείται ότι ο υπολλειματικός βαθμός κορεσμού σε νερό είναι ακόμα ιδιαίτερα υψηλός . Εν μέρει δικαιολογείται η υψηλή αυτή τιμή αν ληφθεί υπόψη η αναμενόμενη υδατοδιαβρεχτότητα του πετρώματος λόγω της χρήσης δοκιμίου που έχει προέλθει από διαδικασία καθαρισμού.

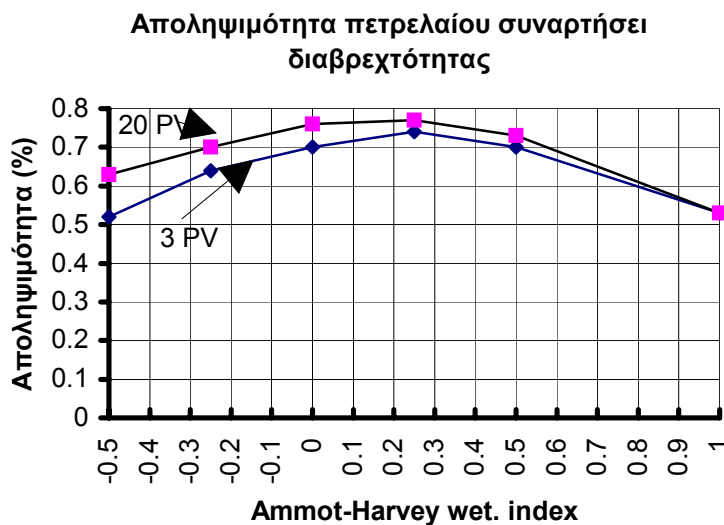
Στην βιβλιογραφία αναφέρεται εκτόπιση άλμης από 30PV πετρελαίου με σταθερή πίεση 2.41 bar σε δοκίμια τύπου Berea μήκους 8 cm και διαμέτρου 3.79 cm όπου επιτεύχθηκε χαμηλότερος υπολλειματικός βαθμός κορεσμού σε νερό 22%<sup>(12)</sup>.

Απρόσμενα υψηλός είναι και ο υπολλειματικός βαθμός κορεσμού σε πετρέλαιο (51.71 %). Το υδατοδιαβρεχτό πέτρωμα ενός πρότυπου δοκιμίου αναμενόταν να εμφανίσει σχετικά χαμηλό βαθμό κορεσμού σε δωδεκάνιο μετά την εκτόπιση από άλμη. Αυτό μπορεί να οφείλεται :

α) Στην μειωμένη απόληψη του πετρελαίου που εμφανίζουν οι ιδανικές πετρελαιοκές φάσεις, όπως το δωδεκάνιο, σε σχέση με το καθαρό πετρέλαιο "crude oil".

β) Την διατήρηση σημαντικής μάζας δωδεκανίου μέσα στο πορώδες του πετρώματος λόγω φαινομένων end effects που παρουσιάζονται σε χαμηλές παροχές ή φαινομένων "viscous fingering" που παρουσιάζονται σε υψηλές παροχές ή και τα δυο.

γ) Η αποληψιμότητα πετρελαίου είναι αυξημένη και παίρνει την μέγιστη τιμή της όταν το εξεταζόμενο δοκίμιο έχει περίπου 50% πετρελαιοδιαβρεχτών πόρων<sup>(11)</sup> (κατάσταση ενδιάμεσης διαβρεχτότητας). Αυτό φαίνεται και από τα πειραματικά αποτελέσματα των McDougal & Sorbie<sup>(11)</sup> (βλ.Σχ.37.):



Σχ.37.:Αποληψιμότητα πετρελαίου συναρτήσει της κατάστασης διαβρεχτότητας του πετρώματος<sup>(11)</sup>.

Προκειμένου να επαληθευθούν οι προηγούμενες υποθέσεις επαναλήφθηκε το ίδιο πείραμα χρησιμοποιώντας τον ίδιο τύπο πετρώματος (δοκίμιο Bc1) και πετρέλαιο Πρίνου ως πετρελαιοκή φάση.

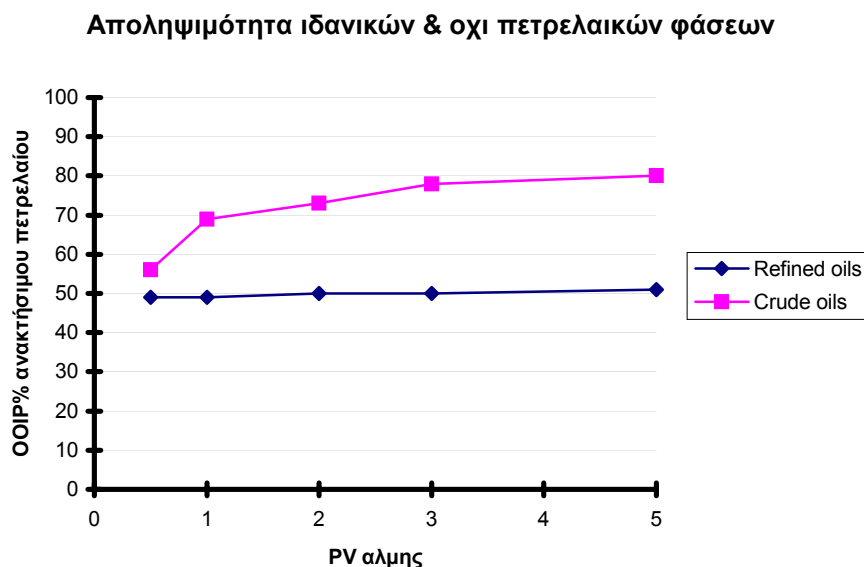
Το δοκίμιο κορέστηκε σε άλμη και μετά έγινε εκτόπιση πετρελαίου με οδηγό αέριο άζωτο και κάτω υπό σταθερή πίεση 5 bar. Ο υπολειματικός βαθμός κορεσμού σε νερό (IWS) μετρήθηκε μετά από 10 PV έγχυσης πετρελαίου και βρέθηκε ίσος με 20.19%.

Ακολούθησε εκτόπιση με άλμη υπό σταθερή παροχή 4 cc/min και μετά από 10 PV ο υπολειματικός βαθμός κορεσμού σε πετρέλαιο (ROS) βρέθηκε ίσος με 41.3%

Εδώ πρέπει επίσης να σημειωθούν τα εξής :

Σε σύγκριση με το αντίστοιχο πείραμα κορεσμού όπου έγινε χρήση καθαρού υδρογονάνθρακα (δωδεκάνιο) παρατηρήθηκε παραγωγή πετρελαίου και μετά την εμφάνιση του νερού στην έξοδο (water breakthrough). Πιθανώς ο υπολειματικός βαθμός κορεσμού σε πετρέλαιο να ήταν μικρότερης τιμής αν η έγχυση συνεχιζόταν στα 20 PV.

Σε περίπτωση πετρελαιοδιαβρεχτού πετρώματος η χαμηλή απόληψη στο σημείο «breakthrough» εν μέρει διορθώνεται από την συνεχή μετέπειτα απόληψη, συνεχιζόμενης της εκτόπισης. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει σε περιπτώσεις υδατοδιαβρεχτού πετρώματος όπου η αποληψιμότητα του πετρελαίου είναι μειωμένη μετά την εμφάνιση στην έξοδο της εκτοπίζουσας υδατικής φάσης (σημείο breakthrough). Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αποληψιμότητα σε καθαρούς υδρογονάνθρακες (refined oils) όπως είναι το δωδεκάνιο είναι χαμηλότερη από τα χρησιμοποιούμενα πετρέλαια (crude oils). Το γεγονός αυτό μπορεί να πιστοποιηθεί από το Σχ.38.:



Σχ.38.: Αποληψιμότητα ιδανικών και όχι πετρελαικών φάσεων<sup>(12)</sup>.

Δοκίμια Πρίνου: Στα κορεσμένα με άλμη δοκίμια του Πρίνου έγινε εκτόπιση της υδατικής φάσης με πετρέλαιο Πρίνου κάτω υπό σταθερή πίεση 6 bar για το δοκίμιο Pc7 και 5 bar για το δοκίμιο Pc8.

Οι ταχύτητες εκτόπισης ή καλύτερα οι γραμμικές ταχύτητες της εκτοπίζουσας φάσης σε εκτόπιση τύπου εμβόλου (piston like displacement) όπως αυτές υπολογίζονται από τον τύπο<sup>(33)</sup> :

$$u = l / t \quad (49)$$

όπου :

u : γραμμική ταχύτητα εκτόπισης (cm/sec)

l : μήκος δοκιμίου (cm).

t : χρόνος (sec) για την εμφάνιση του σημείου " breakthrough" .

βρέθηκαν να είναι 0.06 cm/sec για το δοκίμιο Pc7 και 0.047 cm/sec για το δοκίμιο Pc8.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι αυτός ο τύπος ισχύει μόνο για εκτόπιση υπό σταθερή πίεση και επηρεάζεται από οποιαδήποτε καθυστέρηση που μπορεί να εμφανισθεί στην εμφάνιση του " breakthrough" σημείου λόγω ύπαρξης "capillary end effects" .

Ο αντίστοιχος τύπος για εκτόπιση υπό σταθερή παροχή<sup>(33)</sup> είναι :

$$u = Q / A \Delta S \varphi \quad (50)$$

όπου:

u : γραμμική ταχύτητα εκτόπισης (cm/sec).

Q : παροχή (cm<sup>3</sup>/sec).

A : εμβαδό κάθετο στην ροή (cm<sup>2</sup>).

$\Delta S$  : η διαφορά  $S_{oi} - S_{or}$  εκπεφρασμένη σε (%) του όγκου των πόρων.

$\varphi$  : πορώδες.

Λόγω εμφάνισης φαινομένων "end effects " και σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να υπάρξουν διαφορές στις υπολογιζόμενες τιμές της τάξης του 10%.

Οι υπολειματικοί βαθμοί κορεσμού σε νερό που μετρήθηκαν για τα δοκίμια Pc7 & Pc8 είναι :

Swir (Pc7) : 38.57%

Swir (Pc8) : 30.45%

Η τιμή του τριχοειδή αριθμού  $N_c$  για την υπό σταθερή πίεση εκτόπιση των 5 bars υπολογίστηκε να είναι :  $N_c = 1.678 \cdot 10^{-4}$ . Σύμφωνα με την βιβλιογραφία ο αριθμός αυτός πρέπει να κυμαίνεται από  $10^{-4} - 10^{-8}$  (3,33,34,35).

Σε εκτόπιση με  $N_c = 1.678 \cdot 10^{-4}$  οι ιξώδεις δυνάμεις είναι αυτές που, κατά ένα μικρό μέρος, ελέγχουν το αποτέλεσμα του υπολειματικού βαθμού κορεσμού. Για τον λόγο αυτό οι εκτοπίσεις υπό σταθερή πίεση πρέπει να γίνονται στην περιοχή 3-4 bar (βλ. και παρ.2.1.2.).

## Κεφάλαιο 7: Πειράματα σε δοκίμια επαναποκατεστημένης κατάστασης

### 7.1. Μέτρηση διαβρεχτότητας με Ammot test

Πρότυπα δοκίμια :Για τα tests διαβρεχτότητας Ammot που έγιναν τόσο με πρότυπα δοκίμια όσο και με δοκίμια Πρίνου ακολουθήθηκε η πειραματική μεθοδολογία που αναφέρεται στην παρ.3.4.

Το δοκίμιο που (Bc5) βρίσκεται σε υπολλειματικό βαθμό κορεσμού σε νερό εισήχθη σε βαθμονομημένο κελί ελεύθερης απορόφησης μέσα σε δωδεκάνιο όπου και μετρήθηκε ο όγκος της άλμης που εκτοπίστηκε από το δωδεκάνιο και βρέθηκε ίσος με  $V_{wsp} = 0.2 \text{ cc}$

Στο επόμενο βήμα που είναι η εκτόπιση με δωδεκάνιο μετρήθηκε όγκος εκτοπιζόμενης άλμης  $V_{wfd} = 2.6 \text{ cc}$  (βαθμός κορεσμού σε νερό περίπου 45 %). Οπότε  $\delta o = (0.2 / (0.2 + 2.6)) = 0.071$

Εν συνεχεία το δοκίμιο εισήχθη σε βαθμονομημένο κελί ελεύθερης απορόφησης μέσα σε νερό όπου και μετρήθηκε ο όγκος του δωδεκανίου που εκτοπίστηκε από το νερό και βρέθηκε ίσος με  $V_{osp} = 1.2 \text{ cc}$

Στο τελευταίο στάδιο που είναι η εκτόπιση του δωδεκανίου από νερό (forced displacement) ο όγκος του δωδεκανίου που εκτοπίστηκε είναι 0.6 cc.

Οπότε ο λόγος  $\delta w = (1.2 / (1.2 + 0.6)) = 0.66$

Ο δείκτης διαβρεχτότητας Ammot-Harvey ( $I_w-o$ ) ο οποίος ορίζεται σαν η διαφορά  $\delta w - \delta o$  και παίρνει τις παρακάτω τιμές :

+1 : για ισχυρή υδατοδιαβρεχτότητα.

+0.3 < I < 1 για υδατοδιαβρεχτότητα .

-0.3 < I < +0.3 για ενδιάμεση διαβρεχτότητα.

-1 < I < -0.3 για πετελαιοδιαβρεχτότητα.

Στην περίπτωση του δοκιμίου Bc5 λοιπόν  $I_w-o = 0.66 - 0.071 = + 0.589$ , κάτι που συνεπάγεται ότι το δοκίμιο αυτό είναι υδατοδιαβρεχτό.

Δοκίμια Πρίνου :Στα πειράματα αυτά χρησιμοποιήθηκε ως μη διαβρέχουσα φάση πετρέλαιο Πρίνου. Το κορεσμένο σε άλμη δοκίμιο Pc1 τοποθετήθηκε στον υποδοχέα δοκιμίων όπου και έγινε η πρώτη εκτόπιση της άλμης από πετρέλαιο. Η εκτόπιση αυτή έγινε υπό σταθερή πίεση και το πετρέλαιο οδηγήθηκε με αέριο ήλιο μέσα στο δοκίμιο. Παρατηρήθηκε ότι η πίεση του οδηγού αερίου έπρεπε να ξεπεράσει την τιμή των 10 bar προκειμένου να παρατηρηθεί ικανοποιητική παροχή πετρελαίου (=0.05 cc/min).

Η διαπερατότητα του Pc1 δοκιμίου σε νερό έχει μετρηθεί και βρέθηκε ίση με 17.9 mD. Η διαφορά αυτή της πίεσης (πίεση οδηγού αερίου στην είσοδο της συνδεσμολογίας μείον την ατμοσφαιρική στην έξοδο) αντιστοιχεί σε πολύ μικρότερη διαπερατότητα. Για κάποιο λόγο η διαπερατότητα του δοκιμίου μειώθηκε δραματικά.

Πιθανολογείται ότι άλατα προερχόμενα από την άλμη η κάποια βαριά συστατικά προερχόμενα από το πετρέλαιο έφραζαν τους πόρους.

Στο επόμενο στάδιο του Ammot test (εμβάπτιση του δοκιμίου στο πετρέλαιο) δεν παρατηρήθηκε καμιά διεργασία αυθόρμητης απορρόφησης. Αυτό δεν σημαίνει ότι δεν απορροφήθηκε πετρέλαιο από το δοκίμιο (ή αντίστοιχα δεν εκτοπίστηκε νερό στο κελί ελεύθερης απορρόφησης). Με χρήση απογαλακτοποιητή η και οργανικών διαλυτών (όπως τολουόλη) έγινε δυνατό να διακριθεί τέτοια ποσότητα νερού αλλά αυτές οι μεθοδολογίες δεν προσφέρονται για τον ποσοτικό προσδιορισμό αυτού.

Η υψηλή περιεκτικότητα σε ασφαλένια του πετρελαίου του Πρίνου δεν καθιστά δυνατή την δημιουργία μετρήσιμης διεπιφάνειας ανάμεσα στις δυο φάσεις. Για τον λόγο αυτό τα πειράματα διαβρεχτότητας των δοκιμίων του Πρίνου έγιναν αποκλειστικά με την μέθοδο της αυθόρμητης απορρόφησης.

## **7.2.Μέτρηση διαβρεχτότητας με τεστ αυθόρμητης απορρόφησης .**

### Πρότυπα δοκίμια.

Πρότυπο δοκίμιο και συγκεκριμένα το Bc5 τοποθετήθηκε στον υποδοχέα (Hassler core holder) όπου:

- α)Έγινε καθαρισμός του δοκιμίου με εισπίεση στους πόρους του σειράς διαλυτών (εξάνιο - ακετόνη) προκειμένου να διασφαλισθεί η υδατοδιαβρεχτότητα.
- β)Ακολούθησε κορεσμός του δοκιμίου με εργαστηριακή άλμη.
- γ)Αφέθηκε για 48 ώρες μέσα στην άλμη προκειμένου να αποκατασταθεί η ιοντική ισορροπία μεταξύ της άλμης και του πετρώματος.

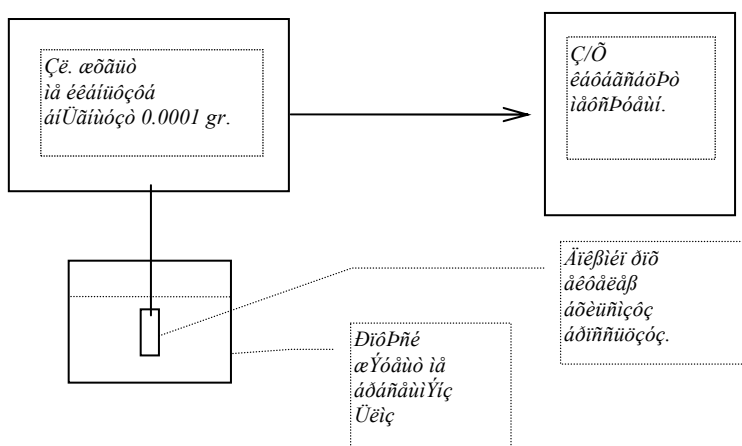
δ)Εγινε εκτόπιση με πετρέλαιο Πρίνου (STO) υπό σταθερή πίεση 5 bar προκειμένου και ο υπολειματικός βαθμός κορεσμού σε νερό βρέθηκε ίσος με 22.26%.

Το σημείο "breakthrough" του πετρελαίου ήταν 0.763 PV.

Προκειμένου να γίνει καταγραφή της διαφοράς βάρους του κορεσμένου δοκιμίου που προέρχεται από την είσοδο του νερού συναρτήσε του χρόνου, συνδέθηκε ηλεκτρονικός ζυγός με ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος κατέγραφε τα πειραματικά δεδομένα.

Η σύνδεση του ζυγού με τον υπολογιστή έγινε με σειριακό καλώδιο επικοινωνίας. Χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πακέτο «Proccomm» έτσι ώστε οι μετρήσεις του ζυγού να μεταφέρονται στον Η/Υ και να καταγράφονται σε αρχείο «ASCII». Ο ρυθμός καταγραφής δεδομένων ήταν 1 μέτρηση / 2 δευτ. και η ταχύτητα διοχέτευσης στον Η/Υ ήταν 9600 Baud.

Η πειραματική συνδεσμολογία φαίνεται στο Σχ.39.:



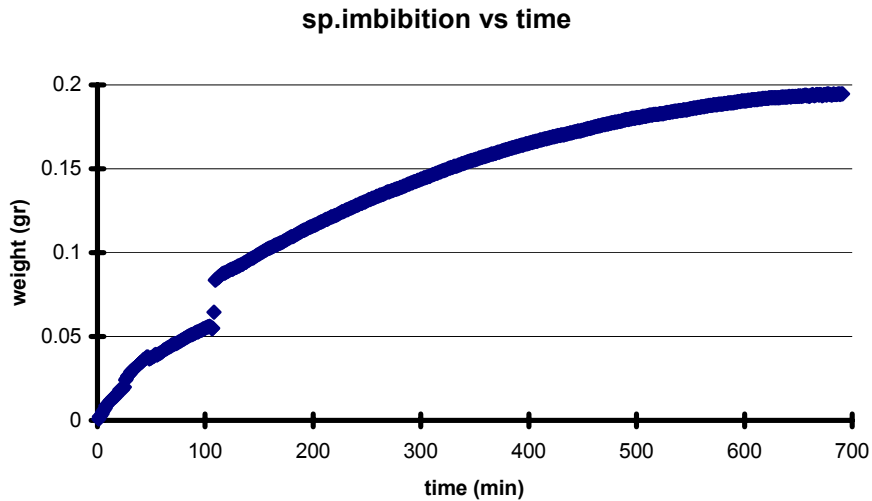
Σχ.39.: Συνδεσμολογία πειράματος αυθόρμητης απορρόφησης.

Εν συνεχεία το δοκίμιο συνδέθηκε στον ηλεκτρονικό ζυγό και βυθίστηκε σε απαερωμένη άλμη .

Το βάρος του πετρελαίου που αντικαταστάθηκε μέσα στους πόρους από το νερό μπορεί να υπολογιστεί γνωρίζοντας τις πυκνότητες του νερού και του πετρελαίου καθώς και το βάρος τους κάθε χρονική στιγμή.

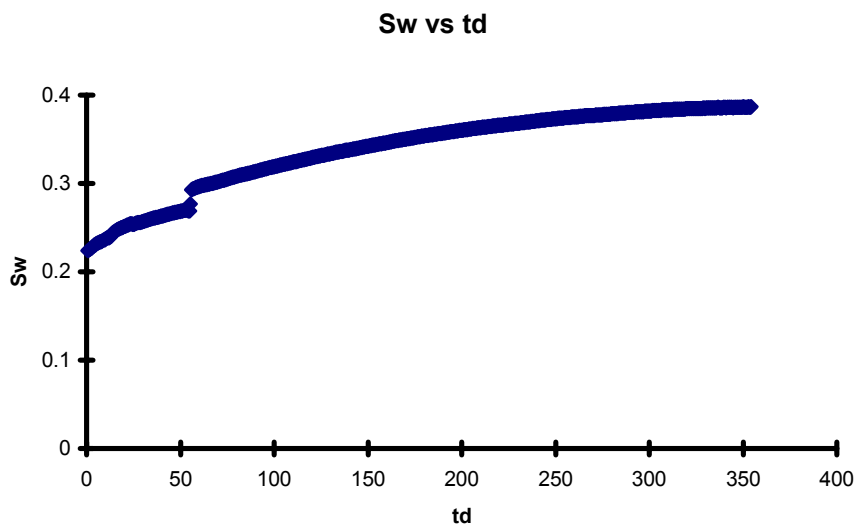
Η καμπύλη βάρους συνάρτηση του χρόνου που κατεγράφη από το πείραμα δίνεται από το Σχ.40.:





Σχ.40.:Μάζα άλμης που απορροφήθηκε συναρτήσει χρόνου (δοκίμιο Bc5).

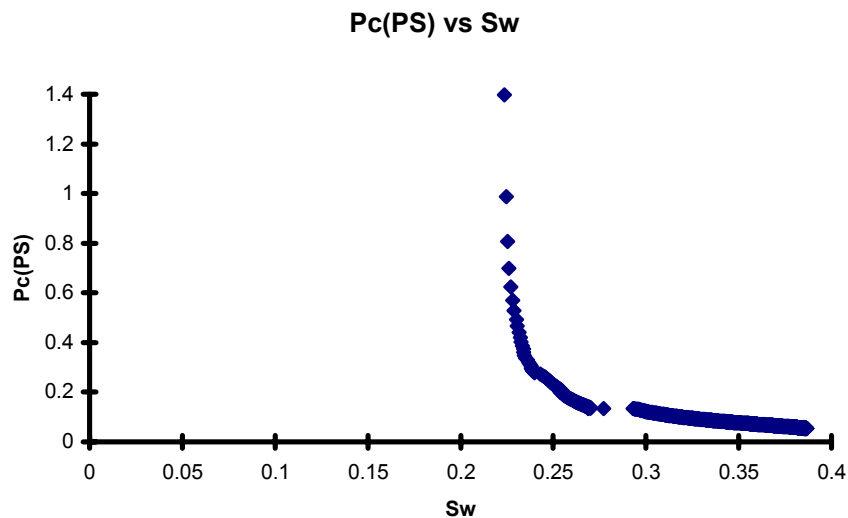
Το παρακάτω είναι το διάγραμμα του βαθμού κορεσμού σε νερό του δοκιμίου συναρτήσει του αδιάστατου χρόνου όπως αυτός υπολογίσθηκε από την εξίσωση (26):



Σχ.41.:Βαθμός κορεσμού σε νερό συναρτήσει αδιάστατου χρόνου της εξ.26. (δοκίμιο Bc5).

Η καμπύλη των ψευδοτριχοειδών δυνάμεων (όπως αυτές δίνονται από την εξίσωση 27 ) για το πρότυπο δοκίμιο φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 42.

Το δοκίμιο Bc5 χρησιμοποιήθηκε για να δώσει μια καμπύλη αναφοράς στην υδατοδιαβρεχτή περίπτωση.



Σχ.42.:Καμπύλη ψευδοτριχοειδών δυνάμεων (εξ.27) συναρτήσει βαθμού κορεσμού σε νερό (Bc5 δοκίμιο).

Δοκίμια Πρίνου: Προκειμένου να μετρηθεί η διαβρεχτότητα του πετρώματος του Πρίνου ακολουθήσαμε τα πειραματικά βήματα α-δ, όπως και στην περίπτωση των πρότυπων δοκιμίων.

Οι υπολειματικοί βαθμοί κορεσμού σε νερό έχουν βρεθεί:

$$Sw_{ir} (Pc7) : 38.57\%$$

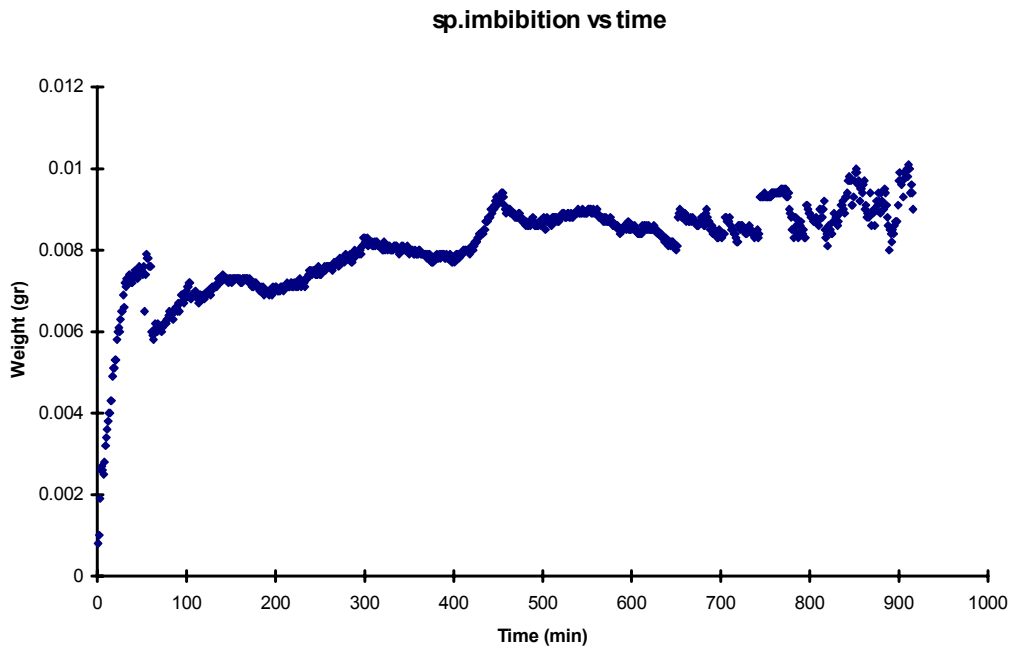
$$Sw_{ir} (Pc8) : 30.45\%$$

Τα δοκίμια αυτά ακολούθησαν την διαδικασία της γήρανσης. Συγκεκριμένα εμβαπτίσθηκαν σε δοχεία με πετρέλαιο Πρίνου τα οποία τοποθετήθηκαν σε μπάνιο στους 60 C για χρονικό διάστημα 10 ημερών.

Μετά την πάροδο των 10 ημερών τα δοκίμια αναρτήθηκαν στον ζυγό και τα αποτελέσματα ήταν:

#### Δοκίμιο Pc7

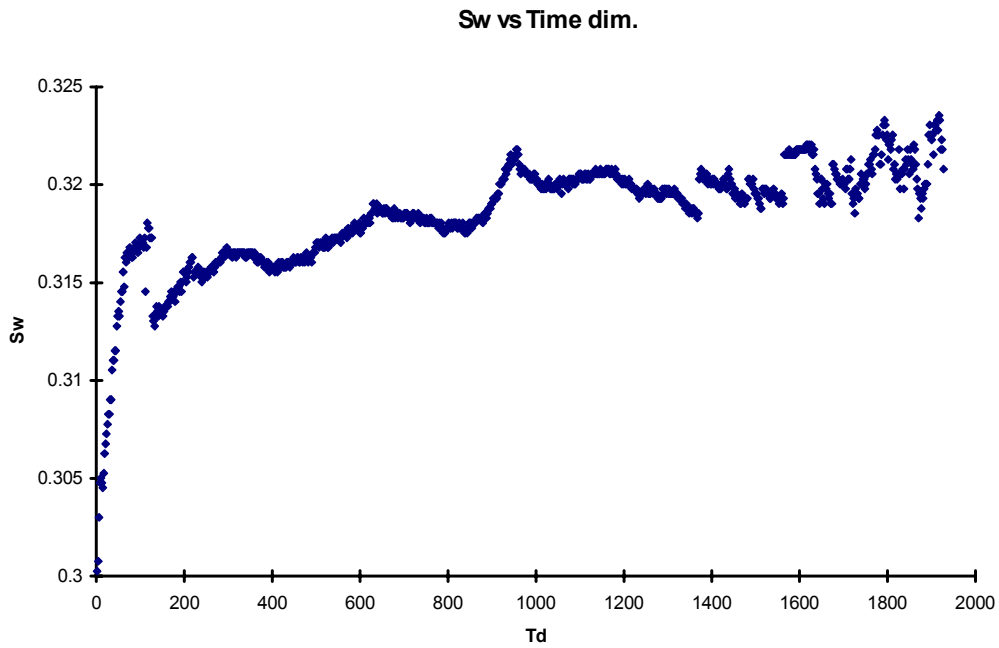
Η καμπύλη του βάρους συνάρτησε του χρόνου για το δοκίμιο Pc7, δίνεται στο Σχ.43.:



Σχ.43. : Μάζα άλμης που απορροφήθηκε συναρτήσει χρόνου (δοκίμιο Pc7).

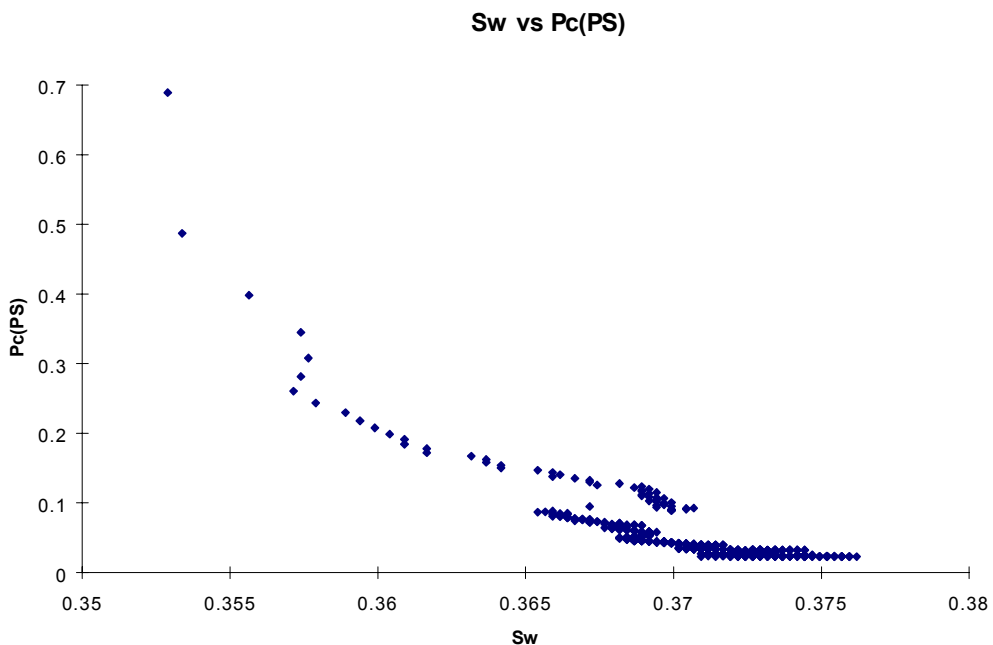
*Σημ: Οι τιμές που εμφανίζονται στο διάγραμμα δεν είναι ιδιαίτερα καλής ποιότητας λόγω διεξαγωγής θορύβου στο περιβάλλον μέτρησης.*

Η ίδια καμπύλη αν σχεδιαστεί συναρτήσει του αδιάστατου χρόνου θα δώσει το παρακάτω αποτέλεσμα :



Σχ.44.:Βαθμός κορεσμού σε νερό συναρτήσει του αδιάστατου χρόνου εξ.26. (δοκίμιο Pc7).

Η αντίστοιχη καμπύλη των ψευδοτριχοειδών δυνάμεων δίνεται στο Σχ.45.:

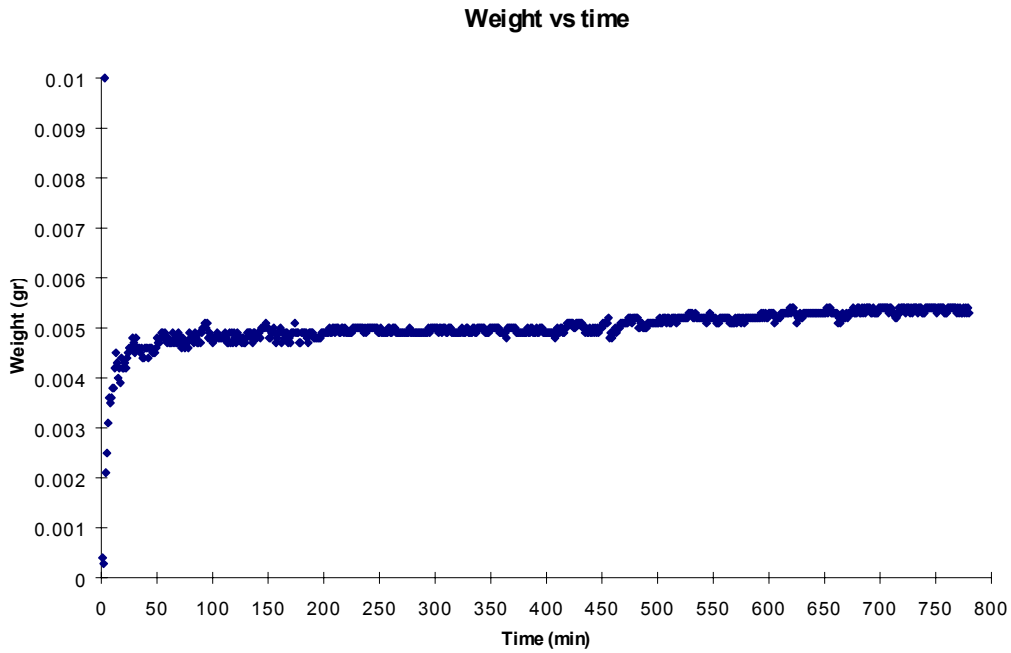


Σχ.45.:Καμπύλη ψευδοτριχοειδών δυνάμεων (εξ.27.) συναρτήσει βαθμού κορεσμού σε νερό (δοκίμιο Pc7).

## Δοκίμιο Pc8

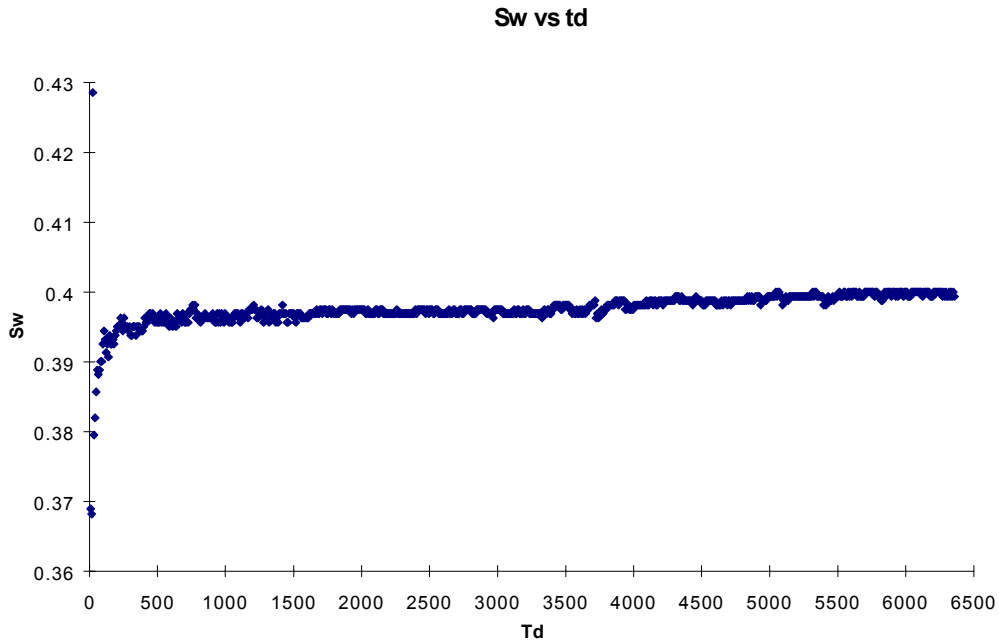
Λόγω της κακής ποιότητας των μετρήσεων αλλά και για να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα του πρώτου δοκιμίου επαναλάβαμε το πείραμα με το Pc8.

Τα αποτελέσματα βάρους συναρτήσει χρόνου δίνονται στο παρακάτω σχήμα :



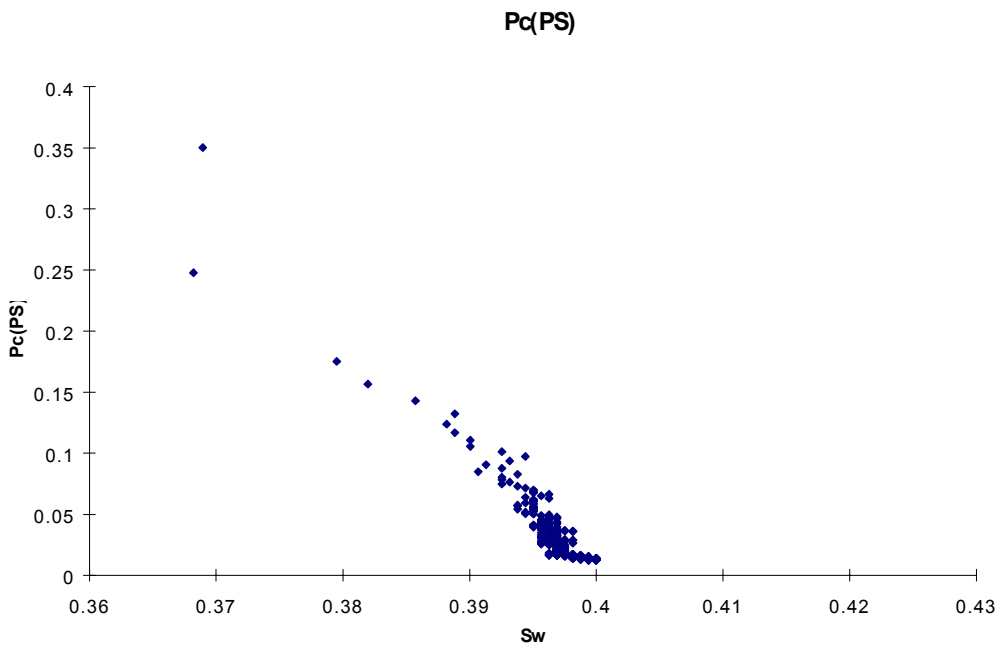
Σχ.46.:Μάζα νερού που απορροφήθηκε συναρτήσει χρόνου. (δοκίμιο Pc8).

Όπως επίσης και ο βαθμός κορεσμού του νερού συναρτήσει του αδιάστατου χρόνου όπως αυτός δίνεται από την εξίσωση (26).



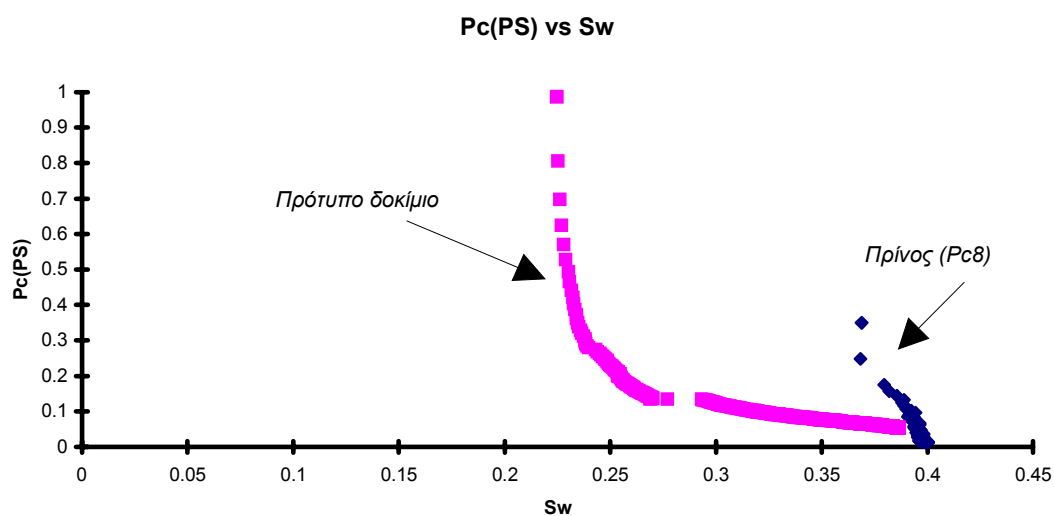
Σχ.47.:Βαθμός κορεσμού σε νερό που απορροφήθηκε συναρτήσει αδιάστατου χρόνου ,εξ.26. (δοκίμιο Pc8).

Η καμπύλη ψευδοτριχοειδών δυνάμεων για το δοκίμιο Pc8 δίνεται από το Σχ.48:



Σχ.48.:Καμπύλη ψευδοτριχοειδών δυνάμεων (εξ.27.) συναρτήσει βαθμού κορεσμού σε νερό (δοκίμιο Pc8)

Προκειμένου να απαντηθεί τελικά το ερώτημα σχετικά με την διαβρεχτότητα του πετρώματος του Πρίνου προβλήθηκαν στο ίδιο διάγραμμα οι καμπύλες των ψευδοτριχοειδών δυνάμεων συναρτήσει του βαθμού κορεσμού τόσο για το γνωστή διαβρεχτότητας πρότυπο δοκίμιο (Bc5) όσο και για το Pc8 .



Σχ.49.: Συγκριτικό διάγραμμα στις καμπύλες ψευδοτριχοειδών δυνάμεων (δοκίμια Bc5 & Pc8)

Όπως φαίνεται στο Σχ.61. το δοκίμιο του Πρίνου αποδείχθηκε περισσότερο υδατοδιαβρεχτό από το πρότυπο δοκίμιο (Bc5).

Για να γίνει μια ποσοτική εκτίμηση της διαβρεχτότητας θα έπρεπε να συγκριθούν η καμπύλη των ψευδοτριχοειδών δυνάμεων που ελήφθη πειραματικά από το δοκίμιο του Πρίνου με κάποια που θα δήλωνε εντονότερη υδατοδιαβρεχτότητα (χρησιμοποιώντας δοκίμια με δείκτη διαβρεχτότητας Ammot - Harvey ίσο με 1).

Σαν εκτίμηση μπορεί να αναφερθεί ότι το συγκεκριμένο δοκίμιο εμφανίζει δείκτη διαβρεχτότητας Ammot - Harvey μεγαλύτερο από +0.589.

Αυτό το αποτέλεσμα συμφωνεί και με τον υψηλό υπολειματικό βαθμό κορεσμού σε νερό που εμφανίζουν τα δοκίμια του Πρίνου.

#### **7.4. Συσχετισμός διαβρεχτότητας / ορυκτολογίας πετρώματος / σύστασης πετρελαίου.**

Οι τιμές διαβρεχτότητας που μετρήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι το αποτέλεσμα των φυσικοχημικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ορυκτών που βρίσκονται στην επιφάνεια των πόρων του πετρώματος και ενώσεων που περιέχονται στο πετρέλαιο. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας γήρανσης των δοκιμίων.

Με την χρήση του οργάνου FT-IR γίνεται μια απόπειρα να ανιχνευθούν οι ενώσεις εκείνες που περιέχονται μέσα στο πετρέλαιο και έχουν λάβει μέρος σε αυτήν την φυσικοχημική διεργασία καθορισμού της διαβρεχτότητας των δοκιμίων.

Έχοντας υπόψη τη βιβλιογραφία που αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.8. έγινε μια προσπάθεια προσέγγισης του ίδιου θέματος σαν δεδομένα :

α) Πετρέλαιο Πρίνου με περιεκτικότητα σε θείο 3% (PB-13 )

β) Πέτρωμα γνωστής ορυκτολογικής σύστασης.

Η κεντρική ιδέα στις ερευνητικές εργασίες που έχουν δημοσιευθεί πάνω στο θέμα αυτό μέχρι σήμερα, είναι ο διαχωρισμός του πετρελαίου σε κύρια κλάσματα (ασφαλτένια, ρητίνες κ.α.) και προσπάθεια συσχετισμού διαβρεχτότητας με ενώσεις που έχουν απορροφηθεί πάνω στην επιφάνεια των πόρων και προέρχονται από αυτά τα κλάσματα.

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η παρακάτω:

1. Γήρανση του δοκιμίου σε άλμη για 48 ώρες προκειμένου να αποκατασταθεί η ιοντική ισορροπία μεταξύ των ορυκτών των πόρων του πετρώματος και των εμπεριεχόμενων αλάτων στην άλμη<sup>(12)</sup>.
2. Επίτευξη υπογλυαιματικού βαθμού κορεσμού σε πετρέλαιο με εκτόπιση της άλμης από πετρέλαιο υπό σταθερή πίεση 5 bar.
3. Εισαγωγή των δοκιμίων σε πετρέλαιο και διαδικασία aging στους 60 C για 10 ημέρες.
4. Εκτόπιση του πετρελαίου που βρίσκεται στους πόρους με φρέσκο πετρέλαιο υπό σταθερή παροχή 1 cc/min.
5. Συλλογή του πετρελαίου των πόρων στην έξοδο της τροφοδοσίας και ανάλυση του σε συσκευή FT-IR της εταιρίας Perkin Elmer (mod. Spectum 1000).
6. Ανάλυση του πετρελαίου τροφοδοσίας στο FT-IR και σύγκριση των χρωματογραφημάτων από τα δυο είδη πετρελαίου (πετρέλαιο πόρων & πετρέλαιο εκτόπισης).

Η διαφορά προσέγγισης της παρούσας εργασίας έγκειται στην χρησιμοποίηση ολόκληρου του πετρελαίου και στην προσπάθεια αναγνώρισης ομάδων ενώσεων που



έχουν απορροφηθεί από την επιφάνεια των πόρων του πετρώματος κατά την διάρκεια της διαδικασίας της γήρανσης με την χρήση FT-IR και άρα λείπουν από το πετρέλαιο που συλλέγεται στο βήμα 5.

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών διαδικασιών δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην καθαρότητα της συνδεσμολογίας προκειμένου να είναι σίγουρο ότι η ανάλυση αφορά μόνο το πετρέλαιο των πόρων.

Η γραμμή θορύβου του οργάνου (baseline) είχε εύρος  $0.02 \text{ cm}^{-1}$ .

Η παραπάνω πειραματική διαδικασία εφαρμόστηκε στο δοκίμιο Bc7. Οι καμπύλες απορόφησης που αποδίδονται παρακάτω έχουν διορθωθεί με τα μαθηματικά φίλτρα<sup>(55)</sup> που περιγράφονται στο παράρτημα II.

### **7.5.Αξιολόγηση καμπύλων απορρόφησης.**

Από την παρατήρηση των καμπύλων απορρόφησης επισημαίνονται οι παρακάτω διαφορές (βλ. διαγρ. 1,2,3). Εγινε μεγέθυνση στις περιοχές απορρόφησης  $1680 \text{ \& } 750 \text{ cm}^{-1}$  :

1.Η περιοχή απορρόφησης των  $1680\text{-}1640 \text{ cm}^{-1}$  αντιστοιχεί στην ομάδα ενώσεων με δεσμό καρβονυλίου.

2.Στην περιοχή απορρόφησης των  $675 \text{ cm}^{-1}$  αντιστοιχεί στην ομάδα ενώσεων με αρωματικό δεσμό .

Εχει ήδη αναφερθεί (βλ. παρ. 1.7.1.) ότι οι ενώσεις που ονομάζονται επιφανειακά ενεργοί παράγοντες και αποτελούνται από το πολικό μέρος και την υδρογοναναθρακική αλυσίδα προσροφώνται στην επιφάνεια των πόρων και καθορίζουν την κατάσταση διαβρεχτότητας ενός πετρώματος.

Το πολικό μέρος αποτελείται από ενώσεις που πιστεύεται ότι είναι καρβοξυλικά οξέα, ενώσεις καρβονυλίου, σουλφίδια και αμίνες. Οι παραπάνω ομάδες ενώσεων περιέχονται κυρίως στα κλάσματα ασφαλτενίων και ρητινών. Η ποιοτική σύγκριση των διαγραμμάτων από το FT-IR υποδεικνύει ότι η διαφορά στην απορρόφηση σε αυτές τις περιοχές οφείλεται στην προσρόφηση κάποιων ποσοστού ενώσεων με καρβονυλικό και αρωματικό δεσμό στην επιφάνεια των πόρων του δοκιμίου Pc11 κατά την διάρκεια της γήρανσης.

Οι μετρήσεις αυτές αποτελούν μια πρώτη ένδειξη του συσχετισμού που υπάρχει μεταξύ της σύστασης πετρελαίου και της διαβρεχτότητας.

## **Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.**

Τα κύρια συμπεράσματα της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι:

α) Η διαβρεχτότητα είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα των πετρωμάτων ταμιευτήρων πετρελαίου που επηρεάζει τόσο την παραγωγική διαδικασία όσο και τα πειράματα που διεξάγονται στο εργαστήριο. Η τιμή της είναι το αποτέλεσμα μιας αλληλεπίδρασης δυνάμεων (Van der Waals-ηλεκτροστατικών-δυνάμεων διάλυσης) μεταξύ των ορυκτών στα τοιχώματα των πόρων του πετρώματος και των ρευστών που εμπεριέχονται σε αυτά.

β) Αναπτύχθηκαν πειραματικές μεθοδολογίες μέτρησης της διαβρεχτότητας πετρωμάτων (Amnot & Spontaneous imbibition tests). Το τεστ Amnot κρίνεται επιτυχές στον προσδιορισμό της διαβρεχτότητας των προτύπων δοκιμίων. Η εφαρμογή του όμως στον προσδιορισμό της διαβρεχτότητας των δοκιμίων που προέρχονταν από πέτρωμα της γεώτρησης PB-26 κρίνεται ως μη ικανοποιητική.

γ) Η εφαρμογή του τεστ διαβρεχτότητας αυθόρμητης απορρόφησης στα δοκίμια του Πρίνου κρίνεται επιτυχής. Αποδείχθηκε ότι τα δοκίμια αυτά είναι υδατοδιαβρεχτά.

Περαιτέρω πειραματική εργασία είναι αναγκαία για την ανάπτυξη μεθοδολογιών μέτρησης σχετικής διαπερατότητας προκειμένου να κατανοηθεί ο τρόπος που η κατανομή των ρευστών φάσεων σε ένα πορώδες δίκτυο (δοκίμιο πετρώματος), όπως αυτή εκφράζεται από την διαβρεχτότητα επηρεάζει την διφασική ροή και την αποληψιμότητα πετρελαίου, δηλαδή τις καμπύλες σχετικής διαπερατότητας.

δ) Το pH και η σύσταση της άλμης πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη πριν εκτελεστούν στο εργαστήριο πειράματα απόλυτης διαπερατότητας ή πειράματα διαβρεχτότητας και σχετικής διαπερατότητας σε δοκίμια επαναποκαταστημένης κατάστασης.

Στα πειράματα απόλυτης διαπερατότητας, η έλλειψη ομάδας ιόντων στην σύσταση της άλμης μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την μετακίνηση σωματιδίων αργίλλων μέσα στο πορώδες δίκτυο του πετρώματος με επακόλουθο την μέτρηση μειωμένων και όχι αντιπροσωπευτικών τιμών απόλυτης διαπερατότητας

Στα πειράματα διαβρεχτότητας, η σύσταση και το pH της άλμης επηρεάζουν την απορρόφηση στην επιφάνεια των πόρων των εμπεριεχόμενων συστατικών στο πετρέλαιο που καθορίζουν την κατάσταση διαβρεχτότητας ενός πετρώματος.

ε) Η πειραματική μεθοδολογία που προτάθηκε με την χρήση FT-IR για την εύρεση των ενώσεων που περιέχονται στο βαρύ κλάσμα του πετρελαίου απέδειξε την συμμετοχή αρωματικών ενώσεων και ενώσεων με δεσμούς καρβονυλίου στον καθορισμό της κατάστασης διαβρεχτότητας του συγκεκριμένου πετρώματος.

Περαιτέρω πειραματική εργασία είναι αναγκαία προκειμένου να διευκρινιστεί καλύτερα ο συσχετισμός που υπάρχει μεταξύ σύστασης πετρελαίου και ορυκτολογίας πετρώματος σε συστήματα πετρελαίου/άλμης/πετρώματος. Νέοι παράμετροι όπως ορυκτολογία πόρων, χρόνος γήρανσης καθώς και η χρήση και άλλων αναλυτικών μεθόδων για την εξέταση του πετρελαίου των πόρων όπως υγρή χρωματογραφία, φασματογραφία μάζας θα μπορούσαν επίσης να εισαχθούν.

Προτείνεται επίσης η επανάληψη της μεθοδολογίας που προτάθηκε με σκοπό να γίνει ποσοτική ερμηνεία της σχέσης ορυκτολογία πόρων και ποσοτού απορροφούμενων συστατικών.

ζ) Η χρήση υγρού αζώτου με σκοπό την εξαγωγή συμπαγών δοκιμίων από μη συμπαγές πέτρωμα κρίνεται ότι δίνει πολύ καλά αποτελέσματα αν συνδυασθεί με τórνο και τα δοκίμια επικαλυφθούν με στρώμα τεφλόν.

η) Η καλή γνώση της ορυκτολογίας των πόρων είναι αναγκαία πριν εκτελεσθεί μια δειγματοληψία δοκιμίων από κάποιο πέτρωμα. Χρήση νερού ή υγρού αζώτου για την ψύξη μπορεί να αλλάξει τις αρχικές τιμές διαπερατότητας.

θ) Η χρήση τολουολίου σε συσκευή Soxhlet δεν προτείνεται σε δοκίμια πετρώματος όπου θα γίνουν πειράματα επαναποκαταστημένης κατάστασης.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην τυχόν ύπαρξη αργίλλων στο πέτρωμα στους διαλύτες που χρησιμοποιούνται καθώς και στην πειραματική διαδικασία, προκειμένου να μην επηρεάζονται η διαπερατότητα και η διαβρεχτότητα του πετρώματος.

ι) Με εξέταση δειγμάτων πετρώματος σε μικροσκόπιο συνδέθηκαν οι τιμές πορώδους και διαπερατότητας που λαμβάνονται στο εργαστήριο με το ,πορώδες δίκτυο του πετρώματος.

κ) Αποδείχθηκε η σημασία του τοπικού τριχοειδή αριθμού (Nc) καθώς και των φαινομένων «end effects» στα πειράματα διφασικής ροής μέσα από δοκίμια πετρώματος.

Στα πειράματα απόληψης πετρελαίου που διεξήχθησαν βρέθηκε ότι οι εκτοπίσεις νερού από πετρέλαιο πρέπει να γίνονται υπό σταθερή πίεση 3-4 bar έτσι ώστε η διεργασία να ελέγχεται από την ανάπτυξη τριχοειδών δυνάμεων και όχι δυνάμεων ιξώδους.

Η γνώση και των παραγόντων που ελέγχουν τα πειράματα αυτά έχει ιδιαίτερη σημασία προκειμένου:

ι) Οι εργαστηριακές μετρήσεις να ανταποκρίνονται όσο το δυνατόν περισσότερο στην πραγματική κατάσταση που επικρατεί σε έναν ταμειυτήρα πετρελαίου.

ii) Τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα και επαναλήψιμα.



## Παράρτημα I : Αρχή λειτουργίας του FT - IR (Fourier-Transform Infrared)

Η υπέρυθη φασματοσκοπία είναι από τις πιο σημαντικές φασματοσκοπικές τεχνικές με πολλές εφαρμογές στην Οργανική Χημεία. Χρησιμοποιείται κυρίως στην περιοχή  $4000 - 650 \text{ cm}^{-1}$  ωστόσο αρκετά χρήσιμες πληροφορίες μπορούμε να παρατηρήσουμε και στην περιοχή  $400 - 10 \text{ cm}^{-1}$  που καλείται άπω υπέρυθη. Η άπω υπέρυθη περιοχή είναι η περιοχή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας όπου απορροφούν το δευτέριο, το τρίτιο, οι δεσμοί υδρογόνου κ.α.

Στην περιοχή όμως αυτή η ευαισθησία του φασματοφωτόμετρου είναι περιορισμένη και οι εντάσεις των απορροφήσεων πολύ μικρές με αποτέλεσμα ο θόρυβος να σκεπάζει τις ταινίες απορρόφησης. Η αδυναμία αυτή υπερνικήθηκε με την τεχνική φασματοφωτομετρίας με μετασχηματισμό Fourier. Τα πλεονεκτήματα της ανάλυσης FT-IR εντοπίζονται κυρίως στα παρακάτω σημεία<sup>(62)</sup>:

- α) Δυνατότητα λεπτομερούς πληροφόρησης σε σχέση με τους χημικούς δεσμούς.
- β) Ανάλυση που δεν καταστρέφει το δείγμα.
- γ) Ικανότητα ανάλυσης μη αγωγίμων υλικών σε οποιαδήποτε φάση βρίσκονται αυτά (στερεά, υγρή ή αέρια).
- δ) Ευκολία λήψης φασμάτων.
- ε) Ικανότητα αφαίρεσης ενός φάσματος από ένα άλλο (διαλύματα, προσμίξεις).

Ο μετασχηματισμός Fourier είναι η ανάλυση μιας μαθηματικής συνάρτησης ή μιας πειραματικά λαμβανόμενης καμπύλης με την μορφή μιας τριγωνομετρικής σειράς.

Στο Σχ. 62<sup>(63)</sup> δίνεται η αρχή λειτουργίας του φασματοφωτόμετρου FT-IR :

Σχ. 50.: Διάταξη για την μονάδα συμβολομέτρου FT-IR.

Η μέθοδος βασίζεται στην καταγραφή του φάσματος με συμβολομετρικές μετρήσεις που υπερτερούν των κοινών μηχανισμών σάρωσης του φάσματος. Το συμβολόμετρο είναι μια πλάκα (A) κατασκευασμένη από ημιδιαφανές υλικό, συνήθως KBr που δεν απορροφά την υπέρυθη ακτινοβολία και κατεργασμένη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ανακλά το 50% της ακτινοβολίας που πέφτει πάνω της.

Η πλάκα διαιρεί την ακτινοβολία σε δύο ίσα μέρη και στέλνει το  $\frac{1}{2}$  καθρέφτη K1 και το υπόλοιπο  $\frac{1}{2}$  στον καθρέφτη K2. Οι δυο δέσμες ανακλώνται στους K1 & K2 και γυρνούν στην πλάκα διαχωριστή της δέσμης φωτός όπου και συνενώνονται πάλι σε μια δέσμη φωτός με κατεύθυνση το δείγμα της ουσίας και μετά στον ανιχνευτή.

Όταν η συνενωμένη δέσμη ακτινοβολίας από την πλάκα A κατευθύνεται στο δείγμα, πριν φτάσει στον ανιχνευτή, τότε οι απορροφήσεις του δείγματος θα εμφανιστούν ως κενά στην κατανομή των συχνοτήτων.

Με τον μετασχηματισμό Fourier τα κενά αυτά μετατρέπονται σε κανονικό υπέρυθρο φάσμα. Η ικανότητα διαχωρισμού στην περιοχή  $4000-400 \text{ cm}^{-1}$  είναι περίπου  $4 \text{ cm}^{-1}$ .

## **Παράρτημα II :Μαθηματικά φίλτρα στην ανάλυση FT-IR**

- α)Φίλτρο ανάλυσης: Χρήση συνάρτησης παραγώγων για την ελαχιστοποίηση μεγάλου εύρους διακύμανσης της γραμμής βάσης καθώς και των περιοχών υψηλού θορύβου.
- β)Φίλτρο έντασης : Μείωση της επίδρασης από τα δεδομένα που βρίσκονται σε περιοχές στο τέλος του φάσματος όπου ο λόγος σήμα / θόρυβο είναι χαμηλότερος
- γ)Φίλτρο θορύβου : Μειώνει την επίδραση περιοχών μετρήσεων με υψηλό θόρυβο.
- δ) Φίλτρο CO<sub>2</sub> : Αφαιρεί όλες τις μετρήσεις στην περιοχή μεταξύ 2390 - 2280 cm<sup>-1</sup> .
- ε) Φίλτρο H<sub>2</sub>O : Αφαιρεί όλες τις μετρήσεις στις περιοχές 4000 - 3500 cm<sup>-1</sup> και 1900 - 1300 cm<sup>-1</sup>.



## **Βιβλιογραφία**

1. Craig F.F. : "The reservoir engineering aspects of waterflooding." SPE Richardson TX Vol. 3 (1971).
2. Salathiel R.A. : " Oil recovery by surface film drainage in mixed wettability rocks." JPT (Oct 1973) 1216-1224.
3. Lake L.W. : "Enhanced oil recovery " , Prentice Hall ,New Jersey (1989) 70-73 ,145-147.
4. Hirasaki G.J. , Rohan J.A. , Dubey S.T. , Niko H. : "Wettability evaluation during Restored state core analysis " SPE paper 20506 .
5. Xiaoyun Z. , Morrow R.N. & Shouxiang M. : " Experimental Verification of a Modified Scaling group for Spontaneous imbibition" SPE 30762 paper.
6. Xia-min Z. , Torsaeter O. , Xina X. Morrow R.N. : " The effect of Crude-oil aging time and temperature on the rate of water imbibition and long - term recovery by imbibition."
7. Anderson G.A. " Wettability Literature Survey - Part 2 Wettability measurement" JPT, November 1986
8. Muqem M.A. , Bentsen R.G. : "Effect of temperature on three - phase water - oil - gas relative permeabilities of unconsolidated sand. " JCPT March 1995 ,Volume 34 , No3.
9. Udell K.S. , Lofty J.D. : " Permeability reduction of unconsolidated Media due to Stress induced silica dissolution." SPE 13655 paper , presented at the SPE California Regional meeting Bakersfield CA , March 1985.
10. Anderson W.G. : " Wettability literature survey - Part 5 : The effects of wettability on relative permeability" JPT November 1987 .
11. McDougal S.R. Sorbie K.S. : " The impact of wettability on waterflooding: Pore scale simulation." SPE Reservoir Engineering August 1995.
12. Jadhunandan P.P. , Morrow N.R. : " Effect of wettability on waterflood recovery for Crude-oil / Brine / Rock systems " SPE Reservoir Engineering February 1995.
13. Morrow N.R. , Ma S. , Zhou X. & Zhang X. : " Characterization of wettability and the effects of Initial water saturation and aging time on wettability and oil recovery by waterflooding"
14. Melrose J.C. , Brandner C.F. : "Role of capillary forces in determining Microscopic Displacement Efficiency for oil recovery by Waterflooding" The Journal of Canadian Petroleum Technology October - December 1974.

15. Collins S.H , Melrose J.C. : "Adsorption of asphaltenes and water on Reservoir Rock minerals" SPE 11800 paper presented at the 1983 SPE Int. Symposium on Oilfield and Geothermal chemistry , Denver , June 1 - 3.
16. Anderson W.G. : " Literature survey - Part 1 : Rock / oil / brine interactions and the effects of core handling on Wettability" Journal of Petroleum Technology , October 1986
17. Seifert W.K. , Howells W.G. : " Interfacially Active Acids in a California Crude oil" Analytical Chemistry June 1970.
18. Castor T.P. , Somerton W.H. & Kelly J.F. : " Recovery mechanisms of Alkaline Flooding" Surface phenomena in Enhanced Oil Recovery , Plenum Press , New York city , 1981
19. Clementz D.M. : "Interaction of petroleum Heavy ends with montmorillonite" Clay and Minerals magazine, 1976.
20. Clementz D.M. : " Alteration of Rock properties by Adsorption of petroleum Heavy ends : Implications for Enhanced Oil Recovery " 10683 SPE paper presented at the 1982 SPE/DOE Enhanced Oil Recovery Symposium , Tulsa , April 4-7.
21. Mattax C.C. , Kyte J.R. : " Imbibition oil recovery from fractured , water drive reservoir" SPE Journal 1962.
22. Rapoport L.A. : " Scaling laws for use in design and operation of water - oil flow models" SPE paper presented at Petroleum Branch Fall Meeting in San Antonio , 1954
23. Robin M. , Rosenberg E. & Fassi - Fihri O. : "Wettability Studies at the Pore - Level : A New Approach by Use of Cryo - SEM" SPE Formation Evaluation magazine March 1995
24. Morrow N.R. : " Wettability and its effect on oil recovery " SPE Distinguished Author Series.
25. Derjaguin B.V. , Churaev N.V. & Muller : " Surface forces " Consultants Bureau , New York city (1985)
26. Derjaguin B.V. : " Theory of stability of Colloids and thin films " Consultants Bureau , New York city (1989)
27. Hirasaki G.J. : " Wettability : Fundamentals and surface forces" SPE Formation Evaluation magazine , June 1991.
28. Donaldson E. , Thomas R. & Lorenz P. : " Wettability determination and its effect on recovery efficiency" 2338 SPE paper, March 1969.
29. Dubey S.T. , Waxman M.H. : "Asphaltene Adsorption and Desorption from mineral surfaces " SPE 18462 paper.
30. Gant P.L. , Anderson W.G. : " Core cleaning for restoration of Native Wettability " Unsolicited SPE 14875 paper AiME (1985).

- 31.Morrow N.R. : " Interfacial Phenomena in Petroleum Recovery" , Surfactant Science Series , Volume 36 , Marcel Dekker Inc.
- 32." Core analysis " PE 405 book.
- 33.Abrams A. : "The Influence of fluid viscosity , Interfacial tension , and Flow velocity on Residual oil saturation left by waterflood" SPE 5050 paper , October 1975.
- 34.Kamath J. , De Zabala E.F. & Boyer R.E. : " Water / oil relative permeability endpoints of Mixed - wet Low - permeability Diatomaceous Mudstones" SPE 26092 paper .
- 35.Rapoport L.A. , Leas W.J. : " Properties of Linear Waterfloods" , Trans. AIME 1953.
- 36.Wardlaw N.C. , Cassan J.P. : " Oil recovery efficiency and the Rock - pore properties of some sandstone reservoirs", Bull. Canadian Petroleum Geology , June 1979.
- 37.Amyx J.W. , Bass D.M. & Whiting R.L. : " Petroleum Reservoir Engineering", McGraw Hill Classic Textbook Reissue.
- 38.Chatzis I. , Morrow N.R. & Lim H.T. : "Magnitude and detailed structure of Residual oil saturation" SPE 10681 paper , April 1983.
- 39.Kyte J.R. , Rapoport L.A. : " Linear waterflood behavior and End - Effects in Water - wet Porous media" Trans. AIME June 1958.
- 40.Cuiec L. : " Rock / Crude -oil interactions and wettability : An attempt to understand their interrelation" ,SPE 13211 paper ,1984.
- 41.Donaldson E.D. , Thomas R.D. & Lorentz P.B. : " Wettability determination and its effect on Recovery Efficiency" , SPEJ , March 1969.
- 42.Φώσκολος Α. , Λιάτη Α & Μονόπωλης Δ. : " Μελέτη της διαγένεσης αργιλικών σχιστολίθων και ψαμμιτών συναρτήσει του βάθους ταφής σε πυρήνες γεωτρήσεων της περιοχής Β.Αιγαίου : Επίδραση στην αναζήτηση και εκμετάλλευση κοιτασμάτων υδρογονάνθρακων " , Πολυτεχνείο Κρήτης , Ιανουάριος 1995
- 43.Βαρότσης Ν. : "Σημειώσεις του μαθήματος Εκμετάλλευση Ταμειυτήρων " Πολυτεχνείο Κρήτης , Ιανουάριος 1995
- 44.Jones F.O. : " Influence of chemical composition of water on clay blocking of permeability" JPT , April 1964
- 45.Torsaeter O, Beldring B. : " The effect of freezing of slightly consolidated cores " SPE Formation Evaluation, September 1987.
46. Ali H.S. , Al - Marhoun M.A. , Abu - Khasmin S.A. & Celik M.S. : " The effect of overburden pressure on relative permeability." 15370 SPE paper.
- 47.Moore T.F. , Slobod R.L. : " The effect of viscosity and capillarity on the displacement of oil by water" Production Monthly ,August 1956.

48. Abrams A. : " The influence of fluid viscosity , interfacial tension and flow velocity on residual oil saturation left by waterflood." 5050 SPE paper , October 1975.
49. Denekas M.O. , Mattax C.C. & Davis G.T. : « Effects of Crude oil components on rock wettability» paper presented at the AIChE - SPE Joint Symposium in Kansas City May 1959.
50. Clementz D.M. : « Alteration of rock properties by adsorption of Petroleum Heavy Ends . Implications for Enhanced Oil Recovery.' SPE/DOE 10683 paper ,1982.
51. Collins S.H. , Melrose J.C. : « Adsorption of Asphaltenes and Water on Reservoir Rock Minerals « , 11800 SPE paper , June 1983
52. Crocker M.E. , Marchin L.M. : « Wettability and adsorption characteristics of Crude oil Asphaltene and Polar fractions» ,14885 paper ,1988.
53. Sastry M.I.S. , Mukherjee S. , Kapur G.S. , Sarpal A.S. , Jain S.K. , Srivastava S.P. : « Modified method for hydrocarbon type analysis of blended base stocks by infrared spectroscopy» , Fuel Vol.24 , No 9 , 1343-1346, 1995.
54. Diehl J.W. , Finkbeiner J.W. & DiSanzo P. : « Determination of Aromatic Hydrocarbons in gasolines by Gas - Chromatography / Fourier Transform Infrared Spectroscopy» ,Analytical Chemistry ,Vol 67, 2015-2019, 1995.
55. Spectrum for Windows , User s Reference by Perkin Elmer.
56. Yildiz H.O. , Morrow N.R. : « Effect of brine composition on recovery of Moutray crude oil by waterflooding» , Journal of Petroleum Science and Engineering ,14, 1996
57. Melrose J.C. : « Interpretation of Mixed Wettability states in Reservoir rocks» ,presented at the 57th Annual Fall Technical Conference Sept 1982.
58. Devereux O.F. , De Bruyn P.L. : « Interaction of Plane - Parallel Double Layers» , M.I.T. Press , Cambridge , Massachusetts (1963).
59. Dodd C.G. , Moore J.W. & Denekas M.O. : « Metalliferous Substances Adsorbed at the Crude Petroleum - Water Interfaces » , Ind.Eng.Chem (1952),44.
60. Al - Marhoun M.A. : « Pressure - Volume - Temperature Correlation for Saudi Crude oils « SPE 13718 paper presented at the SPE Oil Exhibition Conference ,1985
61. Pecsok / Shields / Cairns / McWilliam: « Σύγχρονες Μέθοδοι στη Χημική Ανάλυση» , Εκδόσεις Γ.Α. Πνευματικός.
62. [Http:// www.surface-science.com/ftir.html](http://www.surface-science.com/ftir.html) , " Surface Science Laboratories,625-B Clyde Avenue,Mountain View , California 94043.
63. Βαλαβανίδης Α : " Βασικές αρχές μοριακής φασματοσκοπίας και εφαρμογές στην Οργανική Χημεία " , Τμήμα Χημείας ,Πανεπιστήμιο Αθηνών 1990.
64. Berg J.C. : «Wettability» , surfactant science series, volume 49.

65. Jones - Parra J., Stahl C.D. & Calhouun J.C. : « A Theoretical and Experimental Study of Constant Rate Displacements in Water wet Systems », Prod. Monthly , January 1954.
66. Prinos , Special core analysis data.
67. Wendel D.J., Anderson W.G. & Meyers J.D.: «Restored state core analysis for the Hutton reservoir» , SPE Formation Evaluation , December 1987.

## Πρόλογος

Διπλωματική εργασία με θέμα :

Προσδιορισμός της διαβρεχτότητας δοκιμίων του ταμιευτήρα Πρίνος

Η εργασία αυτή έχει σαν στόχο :

α) Την ανάπτυξη εργαστηριακών μεθοδολογιών για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό της διαβρεχτότητας σε δοκίμια πετρωμάτων.

β) Πετρογραφική περιγραφή των δοκιμίων αυτών και σύνδεση του τρόπου διαβροχής του πετρώματος με την πετρογραφική του σύσταση και την σύσταση των ρευστών.

Το θέμα αυτό επιλέχθηκε για να αποτελέσει τον συνδυαστικό κρίκο μεταξύ των θεωρητικών γνώσεων που αποκομίστηκαν κατά την διάρκεια της πενταετούς φοίτησής μου στο τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και της εφαρμογής αυτών στην ανάπτυξη εργαστηριακών μεθοδολογιών για τον προσδιορισμό πετροφυσικών ιδιοτήτων πετρωμάτων ταμιευτήρων πετρελαίου.

Η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την συνεργασία: α) Των καθηγητών :

- Ν.Βαρότση
- Α.Φώσκολου
- Ζ.Αγιουτάντη

β) Των επιστημονικών υπεύθυνων των εργαστηρίων:

- Ν.Πασαδάκη , «Εργαστήριο Ανάλυσης Ρευστών & Πυρήνων Υπόγειων Ταμιευτήρων».
- Δ.Πεντάρη , « Εργαστήρια Ανόργανης & Οργανικής Γεωχημείας «.
- Σ.Κλεφτάκη , «Εργαστήριο Κοπής Πετρωμάτων και Εργαστήριο Η/Υ».
- Ε. Μυστακίδου ,«Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας».
- Γ. Αλεβίζο ,«Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας».
- Γ.Αποστολάκη , « Εργαστήριο Στίλβωσης Πετρωμάτων».
- Α.Παναγιωτάκη , « Εργαστήριο Μηχανικής».

γ) Του μεταπτυχιακού φοιτητή :

- Μ.Σαλδάρη

## Περιεχόμενα

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΔΙΑΒΡΕΧΤΟΤΗΤΑ - ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.</b>	<b>1</b>
1.1 Ορισμός της έννοιας της διαβρεχτότητας (wettability).	1
1.2. Διαβρεχτότητα και επιφανειακές δυνάμεις.	2
1.3. Δυνάμεις που επιδρούν στην σταθερότητα λεπτών φιλμ διαβροχής (DLVO Theory) <sup>(57)</sup>	4
1.4. Διαβρεχτότητα πετρώματος.	5
1.5. Είδη διαβρεχτότητας	6
1.6. Σημασία της διαβρεχτότητας.	9
1.7. Παράγοντες που επηρεάζουν την διαβρεχτότητα ενός πετρώματος	11
1.8. Συσχετισμός διαβρεχτότητας / ορυκτολογίας πετρώματος / σύστασης πετρελαίου.	13
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΠΟΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΑΓΙΔΕΥΣΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΣΕ ΠΟΡΩΔΗ ΜΕΣΑ.</b>	<b>17</b>
2.1. Αποληψιμότητα πετρελαίου	17
2.2. Παγίδευση πετρελαίου σε πορώδη μέσα - Μοντέλα περιγραφής της.	36
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΙΑΒΡΕΧΤΟΤΗΤΑΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ.</b>	<b>43</b>
3.1. Γενικά.	43
3.2. Συμπεριφορά της τριχοειδούς πίεσης για συστήματα πετρελαίου / άλμης / πετρώματος.	43
3.3. Μέθοδος γωνίας επαφής (contact angle measurement)	44
3.4. Μέθοδος Ammot ( Ammot test ).	46
3.5. Μέθοδος USBM	47
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ ΤΟΥ ΠΡΙΝΟΥ.</b>	<b>49</b>
4.1. Γενικά.	49
4.2. Γενικά γεωλογικά στοιχεία του ταμειωτήρα <sup>(42)</sup> .	49
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ</b>	<b>52</b>
5.1. Γενικά	52
5.2. Είδη δοκιμών για εργαστηριακές μετρήσεις.	52
5.3 Πυρηνοληψία των δοκιμών	54

5.4.Επιλογή δοκιμίων	56
5.5.Ορυκτολογική περιγραφή των δοκιμίων	56
5.6. Καθαρισμός δοκιμίων	61
5.7.Υδατική φάση - Προετοιμασία εργαστηριακής άλμης	63
5.8. Πετρελαική φάση	64
5.9.Μακροσκοπική περιγραφή των δοκιμίων	65
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΕ ΚΑΘΑΡΑ ΔΟΚΙΜΙΑ.</b>	<b>67</b>
6.1. Μέτρηση πορώδους :	67
6.2. Μέτρηση απόλυτης διαπερατότητας σε άλμη.	72
6.3.Μέτρηση νεκρού όγκου συστήματος	77
6.4. Υπολογισμός υπολλειματικών βαθμών κορεσμού	80
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ ΕΠΑΝΑΠΟΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	<b>86</b>
7.1. Μέτρηση διαβρεχτότητας με Ammot test	86
7.2.Μέτρηση διαβρεχτότητας με τεστ αυθόρμητης απορρόφησης .	87
7.4. Συσχετισμός διαβρεχτότητας / ορυκτολογίας πετρώματος / σύστασης πετρελαίου.	96
7.5.Αξιολόγηση καμπύλων απορρόφησης.	97
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι : ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ FT - IR (FOURRIER-TRANSFORM INFRARED)</b>	<b>102</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ :ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ FT-IR</b>	<b>104</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>105</b>