



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ-ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

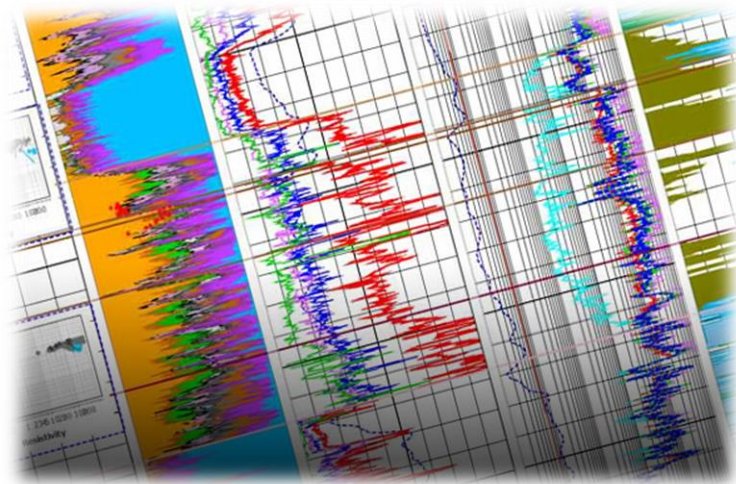
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ Γ. ΖΙΑΜΠΑ

ΟΙ ΠΕΤΡΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ
ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΤΟΜΕΑ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ-
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2021





ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ Γ. ΖΙΑΜΠΑ

Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5360

ΟΙ ΠΕΤΡΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΦΥΣΙΚΟΥ
ΑΕΡΙΟΥ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας,
Εργαστήριο Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων

ΓΕΩΡΓΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ



© Ευαγγελία Γ. Ζιάμπα, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΟΙ ΠΕΤΡΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ- Διπλωματική εργασία

©Evangelia G. Ziampa, School of Geology, Dept. of Mineralogy- Petrology- Economic Geology, 2020

All rights reserved.

THE PETROPHYSICAL PROPERTIES OF NATURAL GAS RESERVOIR ROCKS –
Bachelor Thesis

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

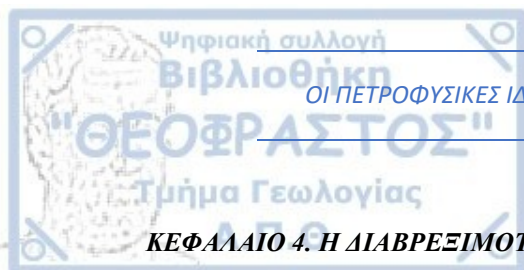
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εξώφυλλο: <https://everett-petrophysics.com/>



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	- 6 -
ABSTRACT	- 7 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 8 -
1.1 ΟΙ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ : ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ	- 8 -
1.1.1 ΤΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ	- 8 -
1.1.2 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ.....	- 9 -
1.2 ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ	- 12 -
1.2.1 Η ΓΕΝΕΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ.....	- 12 -
1.2.2 Η ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ.....	- 12 -
1.2.3 ΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ	- 13 -
1.3 ΟΙ ΠΕΤΡΟΦΥΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ	- 14 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ.....	- 15 -
2.1 Ο ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ	- 15 -
2.2 Η ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ	- 16 -
2.2.1 ΕΝΕΡΓΟ ΚΑΙ ΟΛΙΚΟ ΠΟΡΩΔΕΣ	- 16 -
2.2.2 ΠΡΩΤΟΓΕΝΕΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΕΣ ΠΟΡΩΔΕΣ	- 17 -
2.3 ΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ	- 18 -
2.4 Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ.....	- 21 -
2.4.1. ΟΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ	- 21 -
2.4.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ (IMBIBITION METHOD).....	- 22 -
2.4.1.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ ΑΕΡΙΩΝ (GAS EXPANSION METHOD).....	- 23 -
2.4.1.3 ΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	- 24 -
2.4.1.4 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΓΧΥΣΗΣ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ	- 25 -
2.4.2 ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ	- 26 -
2.5 Ο ΠΥΡΗΝΙΚΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ (NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE)	- 30 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Η ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ	- 32 -
3.1 Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ DARCY ΚΑΙ ΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΡΟΗΣ	- 32 -
3.1.1 Η ΑΠΟΛΥΤΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ	- 33 -
3.1.2 Η ΕΝΕΡΓΟΣ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ.....	- 33 -
3.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ	- 35 -
3.3 ΣΧΕΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΚΑΙ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ	- 37 -
3.4 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΤΟΥ KLINKENBERG	- 37 -



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Η ΔΙΑΒΡΕΞΙΜΟΤΗΤΑ	- 39 -
4.1.1 Η ΓΩΝΙΑ ΕΠΑΦΗΣ Θ ΚΑΙ ΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΤΗΝ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ	- 40 -
4.2 Η ΔΙΑΒΡΕΞΙΜΟΤΗΤΑ ΣΤΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ.....	- 43 -
4.3 Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΕΞΙΜΟΤΗΤΑΣ.....	- 45 -
4.3.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΕΠΑΦΗΣ Θ	- 45 -
4.3.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΜΟΤΤ-HARVEY	- 47 -
4.3.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ USBM (UNITED STATES BUREAU OF MINES).....	- 49 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 50 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 51 -

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με θέμα “Οι πετροφυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων ταμιευτήρων φυσικού αερίου”, εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των σπουδών μου στο Τμήμα Γεωλογίας, της Σχολής Θετικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Πρόκειται για μία βιβλιογραφική εργασία το αντικείμενο της οποίας σχετίζεται με την περιγραφή των ιδιοτήτων των ταμιευτήριων πετρωμάτων υδρογονανθράκων. Σκοπός της εργασίας είναι η εμβάθυνση σε πετροφυσικές έννοιες, κυρίως σε θεωρητικό επίπεδο που περιλαμβάνει και την ανάλυση των εργαστηριακών μετρήσεων τους.

Το 1^ο Κεφάλαιο πραγματεύεται θεμελιώδεις έννοιες της Γεωλογίας Πετρελαίου και εισάγει τον αναγνώστη στο θέμα. Στο 2^ο Κεφάλαιο περιγράφεται η ιδιότητα του πορώδους. Ορίζεται το μέγεθος, ταξινομείται σε κατηγορίες, αναλύονται οι παράγοντες που το επηρεάζουν και παραθέτονται αναλυτικά οι εργαστηριακές μέθοδοι μέτρησής του. Με παρόμοιο τρόπο, στο 3^ο Κεφάλαιο, ο αναγνώστης λαμβάνει γνώση για την ιδιότητα της διαπερατότητας, η οποία συγκρίνεται με αυτή του πορώδους. Το 4^ο Κεφάλαιο αναλύει την τελευταία πετροφυσική ιδιότητα που είναι η διαβρεξιμότητα των ταμιευτήρων. Τέλος, στο 5^ο Κεφάλαιο γίνεται η σύνοψη και εξάγονται τα συμπεράσματα της μελέτης των τριών ιδιοτήτων.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Κύριο Ανδρέα Γεωργακόπουλο για την εμπιστοσύνη του, την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας. Ακόμη τον ευχαριστώ και για τις γνώσεις που μας προσέφερε στα μαθήματα της Κοιτασματολογίας Πετρελαίου και Ανθράκων του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών. Επίσης θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου, που ήταν δίπλα μου με αμέριστη υποστήριξη καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ: Ταμιευτήρες Υδρογονανθράκων, Πετροφυσική, Πορώδες, Διαπερατότητα, Διαβρεξιμότητα



ABSTRACT

The present Dissertation entitled "The petrophysical properties of gas reservoir rocks", was prepared in the context of completing my studies at the Department of Geology, Faculty of Sciences, Aristotle University of Thessaloniki. This is a bibliographic work whose object is related to the description of the properties of hydrocarbon rock deposits. The purpose of the work is to delve into petrophysical concepts, mainly at a theoretical level that includes the analysis of their laboratory measurements.

Chapter 1 deals with the fundamental concepts of Petroleum Geology and introduces the reader to the subject. In the next chapter, porosity is described. The size is defined, it is classified, the factors that affect it are analyzed and the laboratory methods of its measurement are presented in detail. Similarly, in Chapter 3, the reader becomes aware of the permeability, which is compared with porosity. Chapter 4 analyzes the petrophysical property which is the wettability of the reservoirs. Finally, in the 5th Chapter, a summary is made and the conclusions of the study of the three properties are drawn.

At this point, I would like to warmly thank my supervising professor, Mr. Andreas Georgeakopoulos for his trust, guidance, and valuable help during the preparation of the work. I also thank him for the knowledge he offered us in the courses of Petroleum and Coal Economic Geology of the undergraduate study program. I would also like to express my gratitude to my family, who were by my side with their full support throughout my studies.

KEYWORDS: Hydrocarbon Reservoirs, Petrophysics, Porosity, Permeability, Wettability

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΟΙ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ: ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ

Στη σύγχρονη κοινωνία ο ρόλος των υδρογονανθράκων είναι ζωτικής σημασίας. Οι ενεργειακές ανάγκες στηρίζονται στην χρήση του πετρελαίου και του φυσικού αερίου ως καύσιμα. Είναι κοινά αποδεκτό πως η πορεία των υδρογονανθράκων έχει βαθιά επιρροή στην παγκόσμια οικονομία και στις διεθνείς οικονομικές σχέσεις. Οι υδρογονάνθρακες είναι οργανικές ενώσεις που αποτελούνται από άνθρακα (C) και υδρογόνο (H).

Αυτοί διαχωρίζονται σε:

- Κορεσμένους ή αλκάνια όπως είναι το μεθάνιο (CH_4), το αιθάνιο (C_2H_6), το προπάνιο (C_3H_8)
- Ακόρεστους με ένα διπλό δεσμό ή αλκένια όπως το αιθένιο (C_2H_4) και το προπένιο (C_3H_6)
- Ακόρεστους με ένα τριπλό δεσμό ή αλκίνια
- Αλκαδιένια
- Κυκλικούς
- Αλειφατικούς πολυακόρεστους
- Αρωματικούς

Σε ένα τυπικό πρόγραμμα έρευνας υδρογονανθράκων, περιλαμβάνονται διαδοχικά στάδια με σκοπό αρχικά την ανακάλυψη τους και στη συνέχεια την εκμετάλλευσή τους. Αρχικά πραγματοποιούνται οι γεωλογικές, κοιτασματολογικές, υδρογεωλογικές και γεωφυσικές έρευνες της περιοχής ενδιαφέροντος. Παράλληλα λαμβάνονται υπόψη οι οικονομικές παράμετροι και ο προϋπολογισμός της επένδυσης. Η αξιολόγηση της περιοχής βασίζεται σε εργασίες τηλεπισκόπησης, σεισμικές έρευνες, χαρτογραφήσεις και ερευνητικές γεωτρήσεις. Η διαδικασία αυτή είναι φυσικά πολυδάπανη και πολυετής. Αφού διαπιστωθεί ότι το κοίτασμα είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμο θα διεξαχθεί η εξόρυξη του και θα επέλθει το στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας.

1.1.1 ΤΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ

Το πετρέλαιο είναι ένα σύνθετο μίγμα διαφορετικών χημικών ενώσεων, ως επί το πλείστον υδρογονανθράκων. Στις ενώσεις αυτές περιέχονται ακόμα άζωτο, θείο, οξυγόνο αλλά και

μεταλλικές ενώσεις. Στη σύστασή του, οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες υδρογονανθράκων που περιέχονται είναι:

- *Παραφίνες (paraffins)*: πρόκειται για κορεσμένους υδρογονάνθρακες
- *Ναφθένια*: είναι μία κατηγορία κυκλοαλκανίων δηλαδή κορεσμένων υδρογονανθράκων με ένα δαχτύλιο, όπως το κυκλο-πεντάνιο (C_5H_{10}).
- *Αρωματικές σειρές*: το βενζόλιο (C_6H_6) είναι ένας χαρακτηριστικός αρωματικός υδρογονάνθρακας. Οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες είναι ακόρεστοι κυκλικής δομής.

Το πετρέλαιο αμέσως μετά την εξόρυξη του χαρακτηρίζεται ως **αργό (crude oil)**. Για την παραγωγή πετρελαιοκλών προϊόντων όπως είναι η βενζίνη, το ντίζελ, η κηροζίνη, η άσφαλτος και άλλες πετροχημικές πρώτες ύλες χρειάζεται να επεξεργαστεί στα διυλιστήρια. Ανάλογα με την πυκνότητά του, η οποία υπολογίζεται σε μονάδες API, χαρακτηρίζεται ως ελαφρύ (light petroleum) εάν είναι χαμηλής πυκνότητας και σε βαρύ (heavy oil) στην περίπτωση που έχει υψηλή πυκνότητα. Τα κλάσματα πετρελαίου χαμηλής πυκνότητας έχουν μεγαλύτερη τιμή API σε σχέση με τα κλάσματα υψηλότερης πυκνότητας. Επιπλέον, η περιεκτικότητά του σε θείο το κατατάσσει σε γλυκό (sweet) εάν το θείο έχει περιεκτικότητα μικρότερη του 0,5% και σε sour εάν η περιεκτικότητά του είναι μεγαλύτερη. Το ιξώδες του πετρελαίου μειώνεται με την αύξηση του βάθους στο οποίο εντοπίζεται μέσα σε κάποιο ταμιευτήριο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα στα μεγαλύτερα βάθη μέσα στον φλοιό της Γης, να εμφανίζεται με μεγαλύτερη ρευστότητα σε σχέση με τα πιο μικρά βάθη. Συνεπώς, το ιξώδες του πετρελαίου συνδέεται με τη γεωθερμική βαθμίδα, δηλαδή με το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας από την επιφάνεια προς το εσωτερικό της Γης, ο οποίος διαφέρει από τόπο σε τόπο και κυμαίνεται στους 25°C–30°C/km (Speight, 2014).



Εικόνα 1.1: Αργό πετρέλαιο και ελαφρύ (Djuang, 2019)

1.1.2 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ

Το φυσικό αέριο είναι ένα μείγμα αέριων υδρογονανθράκων που εντοπίζεται σε μεγάλα βάθη υπόγειων ιζηματογενών λεκανών. Σε ένα κοίτασμα φυσικού αερίου, η κυρίαρχη χημική ένωση είναι το μεθάνιο (CH_4), παράλληλα όμως μπορεί να είναι υπαρκτό σε αυτό αιθάνιο (C_2H_6), προπάνιο (C_3H_8) και βουτάνιο (C_4H_{10}). Επιπλέον, στη σύστασή του συμμετέχουν ποσότητες μη καύσιμων αερίων όπως είναι το άζωτο, το υδρογόνο, το αργό, το ήλιο, το διοξείδιο του άνθρακα, το υδρόθειο και διάφορες θειούχες ενώσεις καθώς και νερό. Σε

αμελητέες συγκεντρώσεις μπορεί να συμμετέχουν ορισμένες φορές αρωματικοί υδρογονάνθρακες όπως το βενζόλιο ή το ξυλόλιο. Το φυσικό αέριο θεωρείται το καύσιμο του μέλλοντος και πλεονεκτεί συγκριτικά με το πετρέλαιο, καθώς πρόκειται για μία, μη τοξική, αποδοτική ενεργειακή επιλογή, με μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα και όχι πολλά στερεά κατάλοιπα. Πιο συγκεκριμένα, κατά την καύση του εκλύονται στο περιβάλλον 55600 kJ ενέργειας ανά κιλό συγκριτικά με την καύση των κλασμάτων πετρελαίου τα οποία εκκλείουν 46000 kJ ενέργειας ανά κιλό καύσης. Συγκριτικά με το πετρέλαιο, οι εκπομπές σωματιδίων της καύσης του φυσικού αερίου εμφανίζονται κατά ένα ποσοστό της τάξης του 90% χαμηλότερες και 99% χαμηλότερες σε σχέση με την καύση άνθρακα (Αχιλιάς, Ελευθεριάδης, & Νικολαΐδης, 2015). Ακόμη θα πρέπει να σημειωθεί πως η παραγωγή του έχει φθηνό κόστος και οι εγκαταστάσεις του απαιτούν μικρότερο κόστος συντήρησης σε σχέση με αυτές των συμβατικών καυσίμων. Κάτι που θα πρέπει να αναφερθεί είναι πως πρόκειται για ένα ασφαλές καύσιμο, χαμηλής αναφλεξιμότητας με όριο ανάφλεξης 4,5%-15%, άοσμο που σε περίπτωση διαρροής διαφεύγει προς τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας καθώς έχει μικρότερη πυκνότητα από τον αέρα. Η ολοένα και αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση στον πλανήτη οδήγησε στην ανάπτυξη μιας νέας μορφής ενέργειας μη συμβατικών καυσίμων. Το αέριο σχιστών (shale gas), οι υδρίτες μεθανίου, το βαθύ αέριο (deep natural gas), οι βιτουμενιούχοι σχίστες και το μεθάνιο από κοιτάσματα γαιανθράκων αποτελούν είδη μη συμβατικών πηγών φυσικού αερίου. Η νέα τεχνολογία στα συστήματα γεωτρήσεων επιτρέπει πλέον την ανάπτυξη αυτής της νέας μορφής ενέργειας, ωστόσο υπάρχει εντονός προβληματισμός για τις επακόλουθες επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Πίνακας 1.1: Η χημική σύσταση του φυσικού αερίου¹

ΧΗΜΙΚΗ ΕΝΩΣΗ	ΧΗΜΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ(%)
Μεθάνιο	CH ₄	70%-90%
Αιθάνιο	C ₂ H ₆	20%
Προπάνιο	C ₃ H ₈	
Βουτάνιο	C ₄ H ₁₀	
Διοξείδιο του άνθρακα	CO ₂	0-8%
Οξυγόνο	O ₂	0-0,2%
Άζωτο	N ₂	0-5%
Υδρόθειο	H ₂ S	0-5%
Άλλα αέρια	A, He, Ne, Xe	Αμελητέες ποσότητες

¹<http://naturalgas.org/overview/background/>

Το φυσικό αέριο πριν την εισαγωγή του στους αγωγούς διανομής, υφίστανται διαδικασίες επεξεργασίας με σκοπό την εξασφάλιση υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Οι διεργασίες κατεργασίας του περιλαμβάνουν την απομάκρυνση νερού, πετρελαίου, θείου, διοξειδίου του άνθρακα και άλλων υγρών με την ονομασία NGL (natural gas liquids) από τη σύσταση του. Για τον σκοπό αυτό υπάρχουν διάφορα στάδια και γίνεται χρήση διαλυμάτων όπως η γλυκόλη, οι αμίνες κ.α. Η υγροποιημένη μορφή του φυσικού αερίου είναι γνωστή ως υγροποιημένο φυσικό αέριο ή liquefied natural gas (LNG). Αυτός ο τύπος αερίου παράγεται μέσω της ψύξης του σε θερμοκρασία περίπου $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$, με σκοπό τη μεταφορά του και διανομή σε μακρινές αποστάσεις με δεξαμενόπλοια.



Εικόνα 1.2 : Μονάδα επεξεργασίας φυσικού αερίου²

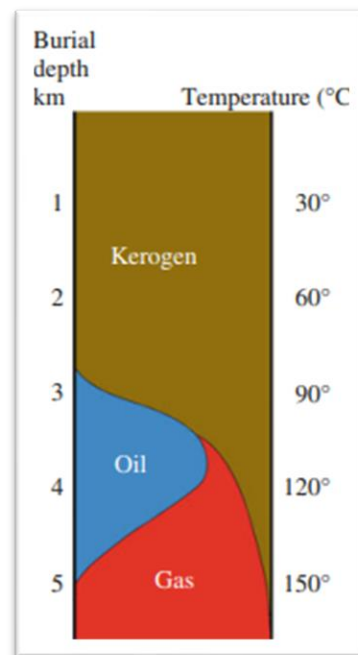
² Η διαδικασία καύσης του φυσικού αερίου στις μονάδες επεξεργασίας αποσκοπεί στην αφαίρεση αποβλήτων από την χημική σύσταση του αερίου και για λόγους ασφάλειας.

Πηγή: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/natural-gas/#natural-gas>

1.2 ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

1.2.1. Η ΓΕΝΕΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

Η δημιουργία των υδρογονανθράκων συντελείται μέσα στα μητρικά πετρώματα (source rock). Επαρκείς συγκεντρώσεις νεκρής οργανικής ύλης, φυτικής και ζωικής, αποτίθενται σε διάφορες κλειστές ιζηματογενείς λεκάνες. Τέτοιες λεκάνες μπορεί να είναι παράκτιες λίμνες, ρηχές θάλασσες, βάλτοι αλλά και ηπειρωτικά περιθώρια. Με το πέρασμα του γεωλογικού χρόνου, η νεκρή οργανική ύλη θάβεται κάτω από τα υπερκείμενα ιζήματα που αποτίθενται στις λεκάνες. Αυτό, σε συνδυασμό με την επικράτηση αναερόβιων συνθηκών, και απουσία οξυγόνου οδηγεί στην αύξηση των τιμών θερμοκρασίας και πίεσης με αποτέλεσμα την σταδιακή βακτηριακή αποσύνθεση του οργανικού υλικού και τη γένεση των υδρογονανθράκων. Η οργανική ύλη διαχωρίζεται στο κηρογόνο και στο βιτουμένιο. Οι θερμικές αντιδράσεις του κηρογόνου, σε θερμοκρασίες μεταξύ 60° και 120° (oil window) οδηγούν στην παραγωγή του πετρελαίου ενώ στις θερμοκρασίες από 120°-150° (gas window) και πάνω συντελείται η μετατροπή σε φυσικό αέριο (Γεωργακόπουλος, 2020).



Εικόνα 1.3 :Η μετατροπή του κηρογόνου σε πετρέλαιο και αέριο (Knut, 2010)

1.2.2 Η ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

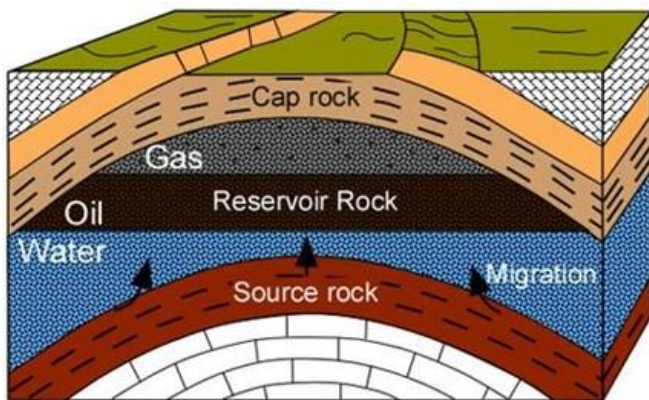
Οι υδρογονάνθρακες, μετά τη γένεση τους εντός των μητρικών πετρωμάτων, διαφεύγουν και μεταναστεύουν σε γειτονικούς σχηματισμούς, μεγαλύτερου πορώδους και διαπερατότητας. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως μετανάστευση (migration). Οι υδρογονάνθρακες (πετρέλαιο και φυσικό) μετά τον σχηματισμό τους μέσα στα μητρικά πετρώματα μεταπίπτουν σε γειτονικούς σχηματισμούς κορεσμένους σε νερό. Ωστόσο, εξαιτίας της μικρότερης πυκνότητας που εμφανίζουν οι υδρογονάνθρακες, τείνουν να μεταναστεύουν προς την επιφάνεια του νερού και να ωθούνται εκτός του ταμιευτήρα. Το στάδιο της απομάκρυνσης των υδρογονανθράκων έξω από το μητρικό πέτρωμα ονομάζεται **πρωτογενής μετανάστευση (primary migration)**. Η δευτερογενής μετανάστευση

(secondary migration) αντιπροσωπεύει τη ροή και κίνηση του πετρελαίου και του αερίου εντός των ταμιευτήρων.

1.2.3 ΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ

Τα διάφορα κοιτάσματα πετρελαίου και αερίου αποτελούν ιζηματογενείς σχηματισμούς που επιτρέπουν τη ροή και αποθήκευση τους. Πρόκειται για τους ταμιευτήρες (reservoirs) των υδρογονανθράκων. Ένα πέτρωμα για να χαρακτηριστεί ως ταμιευτήρας πρέπει να περιέχει ικανοποιητικές ποσότητες υδρογονανθράκων αλλά και να χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές **πορώδους** και **διαπερατότητας**. Τα δυο αυτά φυσικά μεγέθη θα αναλυθούν εκτενέστερα στα επόμενα κεφάλαια. Η έννοια του πορώδους σχετίζεται με τον κενό χώρο που υπάρχει ανάμεσα στους διάφορους κόκκους, εντός του πετρώματος. Η διαπερατότητα ωστόσο αφορά την ιδιότητα των ρευστών να διαπερνούν έναν σχηματισμό. Οι δύο αυτές πετροφυσικές ιδιότητες, δεν έχουν σχέση αλληλοεξάρτησης μεταξύ τους, καθώς πορώδεις σχηματισμοί - όπως για παράδειγμα οι άργιλοι - δεν είναι υδατοπερατοί και εμφανίζουν στεγανότητα. Ο ταμιευτήρας, προκειμένου να μπορέσει να αποφύγει τις διαφυγές υδρογονανθράκων και να δημιουργήσει συνθήκες παγίδευσης και δημιουργίας κοιτάσματος, καλύπτεται από το πέτρωμα κάλυμμα (cap rock). Αυτό μπορεί να είναι ένα αργιλικό στρώμα ή στρώμα κρυσταλλικού άλατος (εβαπορίτης), αδιαπέρατο, το οποίο εμποδίζει την απομάκρυνση των υδρογονανθράκων έξω από τον ταμιευτήρα. Τα πιο τυπικά πετρώματα ταμιευτήρες είναι τα ψαμμιτικά και τα ανθρακικά δηλαδή ασβεστόλιθοι και δολομίτες. Έχει υπολογιστεί πως περίπου το 50 % των παγκόσμιων αποθεμάτων υδρογονανθράκων βρίσκονται μέσα σε ασβεστολιθικούς σχηματισμούς. Γεωλογικές δομές όπως τα ρήγματα, οι δόμοι άλατος και τα αντίκλινα λειτουργούν πολύ συχνά ως παγίδες υδρογονανθράκων.

Εικόνα 1.4: Σχηματική απεικόνιση του μητρικού πετρώματος, της μετανάστευσης, του ταμιευτήρα και του αδιαπέρατου καλύμματος³



³https://res.cloudinary.com/engineering-com/image/upload/w_640,h_640,c_limit/Source_Rock_Reservoir_Rock_and_Cap_Rock_gojiln.jpg

Μία πλήρης κοιτασματολογική έρευνα περιλαμβάνει μεθόδους προσομοίωσης των ταμιευτήρων. Κάθε προσομοίωση στηρίζεται στη συνδιαστική συμβολή της φυσικής, των μαθηματικών, της μηχανικής των ταμιευτήρων και στον προγραμματισμό υπολογιστών, με σκοπό την ανάπτυξη εργαλείων πρόβλεψης των μελλοντικών αποθεμάτων σε έναν ταμιευτήρα (Abou-Kassem , FarouqAli , & RafiqIslam , 2006). Επιπλέον, μέσω της προσομοίωσης, είναι δυνατό να γίνει η εύρεση γειτονικών δυνητικών ταμιευτήρων αλλά και να βρεθούν καινούργιες θέσεις μέσα στον ίδιο ταμιευτήρα που μπορεί να περιέχουν ποσότητες υδρογονανθράκων. Ακόμη, μια δυνατότητα της μοντελοποίησης επιτρέπει τον υπολογισμό των ποσοτήτων που χάθηκαν στο στάδιο της μετανάστευσης καθώς και τον αρχικό όγκο τους μέσα στα μητρικά πετρώματα (Γεωργακόπουλος, 2020). Τα υπολογιστικά αυτά μοντέλα έχουν μεγάλη χρήση από τις εταιρείες βιομηχανίας υδρογονανθράκων καθώς αποσκοπούν σε μια περισσότερο αποδοτική εκμετάλλευση των ταμιευτήρων.

1.3 ΟΙ ΠΕΤΡΟΦΥΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

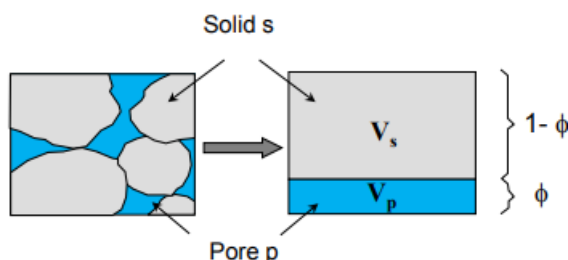
Η πετροφυσική ασχολείται με την μελέτη των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων- ταμιευτήρων, αλλά και με την αλληλεπίδραση τους με τα διάφορα ρευστά που εγκλείονται μέσα σε αυτούς (υδρογονάνθρακες, υδατικά διαλύματα). Αυτή εμπλέκει θεμελιώδεις γνώσεις Φυσικής, Χημείας και Μαθηματικών. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων αυτών, είναι βασικής αναγκαιότητας τόσο κατά το στάδιο των ερευνών για την αναζήτηση πετρελαίου και φυσικού αερίου, όσο και για τον μετέπειτα προγραμματισμό της εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων (Γεωργακόπουλος, 2020). Πιο συγκεκριμένα, οι μέθοδοι της χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των ταμιευτήρων, την εκτίμηση των αποθεμάτων εντός του κοιτάσματος, τον σχεδιασμό για την εξόρυξη του κ.α με απώτερο στόχο την αποφυγή οικονομικής ζημίας. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δεδομένα από μετρήσεις που γίνονται εντός των γεωτρήσεων (wireline log data) αλλά και από υπολογισμούς σε δείγματα πυρήνων καθώς επίσης και με δεδομένα σεισμικών μετρήσεων. Κάποιες από τις ιδιότητες που εξετάζονται από την πετροφυσική είναι: το πορώδες (porosity), η διαπερατότητα (permeability), η διαβρεξιμότητα (wettability), η πυκνότητα (density), η λιθολογία (lithology), η τριχοειδής πίεση (capillary pressure), το φυσικό φαινόμενο NMR (Nuclear Magnetic Resonance), η ηλεκτρική αγωγιμότητα κ.α.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ

2.1 Ο ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ

Οι υδρογονάνθρακες εντοπίζονται μέσα στους πόρους των ταμιευτήρων. Το πορώδες ως φυσική ιδιότητα εκφράζει την χωρητικότητα αποθήκευσης δηλαδή τον κενό χώρο σε έναν σχηματισμό. Μαθηματικά, ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των πόρων ενός πετρώματος προς τον συνολικό όγκο αυτού. Στη διεθνή βιβλιογραφία συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα ϕ . Η εξίσωση που επιτρέπει τον υπολογισμό του είναι η εξής :

$$\text{Πορώδες } (\phi) = \frac{\text{Όγκος των πόρων}}{\text{Ολικός όγκος πετρώματος}} \text{ ή εναλλακτικά } \phi = \frac{V_{\text{pore}}}{V_{\text{bulk}}} \quad (2.1)$$



Εικόνα 2.1 : Ο ορισμός του πορώδους (Schön J., 2015)

Η τιμή του μεγέθους αυτού μπορεί να εκφραστεί ως κλάσμα ή και ως ποσοστό επί τοις εκατό. Το μέγεθος των κοιτασμάτων που φιλοξενούνται στους ταμιευτήρες λοιπόν, είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με το πορώδες. Ένα ιζηματογενές πέτρωμα θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή τιμή πορώδους, ώστε να χαρακτηριστεί ως ταμιευτήρας υδρογονανθράκων. Όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες του ταμιευτήρα τόσο μεγαλύτερο θα είναι το κοίτασμα, συνεπώς αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερο οικονομικό όφελος και κάτι τέτοιο οδηγεί φυσικά στο να διαπιστωθεί εάν η εκμετάλλευση του έχει νόημα ή όχι. Για τον λόγο αυτό η μελέτη του πορώδους στην κοιτασματολογία είναι ζωτικής σημασίας τόσο κατά το στάδιο της ερευνητικής διαδικασίας όσο και κατά το στάδιο της παραγωγής-εκμετάλλευσης. Εάν θεωρηθεί πως σε κάποιον ταμιευτήρα πετρελαίου για παράδειγμα το πορώδες είναι της τάξης του 30 %, το κοίτασμα θα περιλαμβάνει περίπου 250 L πετρελαίου και 50 L νερού. Αν το ποσοστό ανάκτησης είναι 50% θα παραχθούν 125 L από αυτό. Ανάλογα, αν ο ταμιευτήρας έχει τη μισή τιμή πορώδους, δηλαδή 15% το παραγόμενο προϊόν θα είναι λιγότερο από 50 L (Knut, 2010). Συνήθως στους ταμιευτήρες υδρογονανθράκων οι τιμές του πορώδους κυμαίνονται μεταξύ 5% έως 25%.

ΤΙΜΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ
0-5%	Αμελητέο πορώδες
5-10%	Φτωχό πορώδες
10-15%	Μέτριο πορώδες
15-20%	Καλό πορώδες
>20%	Πολύ καλό πορώδες

Πίνακας 2.1: Χαρακτηρισμός των ταμιευτήρων με βάση την τιμή πορώδους που εμφανίζουν (Tiab & Donaldson, 2012)

2.2 Η ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ



Σχήμα 2.1: Η ταξινόμηση του πορώδους

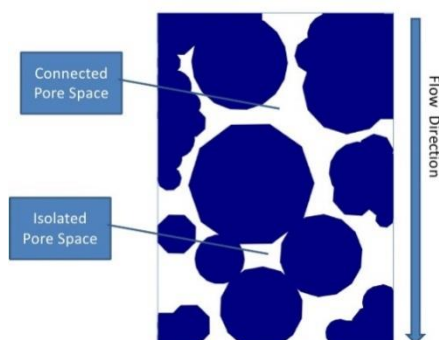
2.2.1 ΕΝΕΡΓΟ ΚΑΙ ΟΛΙΚΟ ΠΟΡΩΔΕΣ

Το πορώδες διακρίνεται σε ενεργό (effective porosity) και σε ολικό ή απόλυτο (total porosity). Το ενεργό εκφράζει το ποσοστό των πόρων που επικοινωνούν μεταξύ τους (interconnected pores). Από την άλλη πλευρά, το ολικό πορώδες υπολογίζεται από το ολικό σύνολο των πόρων που περιλαμβάνει και αυτούς που είναι σε επικοινωνία και τους απομονωμένους (interconnected and isolated pores). Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι εδαφικά κενά που είναι απομονωμένα δεν λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του ενεργού πορώδους. Επομένως, το ενεργό πορώδες θα είναι μικρότερο ή ίσο με το ολικό, γεγονός που εξαρτάται από τη ποσότητα των απομονωμένων πόρων στο πέτρωμα (Ekwere J. Peters, 2012). Στα ψαμμιτικά πετρώματα, συνήθως το ενεργό πορώδες ισούται με το ολικό ενώ στα ανθρακικά το ολικό είναι μεγαλύτερο του ενεργού. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της ετερογένειας που εμφανίζουν οι ανθρακικοί σχηματισμοί. Στα ψαμμιτικά πετρώματα οι τυπικές τιμές

πορώδους κυμαίνονται μεταξύ 8% έως 38%, με μέση τιμή 18%. Το 95% των τιμών αυτών αφορά τιμές ενεργού πορώδους. Παράλληλα, το πορώδες των ανθρακικών ταμιευτήρων είναι πολύ μικρότερο της τάξης μεταξύ 3% έως 15% και μέσης τιμής 8%(Ekwere J.Peters, 2012).

Προσχώσεις	Πορώδες (%)	Ιζηματογενή πετρώματα	Πορώδες (%)	Κρυσταλλικά πετρώματα	Πορώδες (%)
Μικρά χαλίκια	24-36	Ψαμμίτες	5-30	Ρωγματομένα	0-10
Μεγάλα χαλίκια	25-38	Ιλυόλιθοι	21-41	Μη ρωγματομένα	0-5
Χονδρόκοκκη άμμος	31-48	Ασβεστόλιθοι	0-40	Βασάλτες	3-35
Λεπτόκοκκη άμμος	26-53	Καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι	0-40	Αποσαθρωμένοι γρανίτες	34-57
Ιλύς	34-61	Σχιστόλιθοι	0-10		
Άργιλος	34-60				

Πίνακας 2.2: Ενδεικτικές τιμές ολικού πορώδους σε διάφορους σχηματισμούς(Καλλέργης, 1999)



Εικόνα 2.2:Οι συνδεδεμένοι και απομονωμένοι πόροι ⁴

2.2.2 ΠΡΩΤΟΓΕΝΕΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΕΣ ΠΟΡΩΔΕΣ

Ανάλογα με την προέλευση του, το πορώδες μπορεί επιπλέον να ταξινομηθεί σε πρωτογενές και σε δευτερογενές. Η πρώτη κατηγορία αφορά τη δημιουργία του πορώδους κατά την απόθεση των ιζημάτων. Το δευτερογενές πορώδες προέρχεται μέσω των γεωλογικών διαδικασιών που ακολουθούν την απόθεση και τη ταφή των σχηματισμών(Ekwere J.Peters, 2012). Τέτοιες διαδικασίες μπορεί να περιλαμβάνουν κινήσεις του νερού, τεκτονικές καταπονήσεις στους σχηματισμούς έπειτα από σεισμούς, ανθρωπογενείς παρεμβάσεις, αποσάθρωση, φυσικοχημικές διαδικασίες κ.α . Το πορώδες των ψαμμιτικών πετρωμάτων είναι πρακτικά πρωτογενές, ενώ των ανθρακικών τείνει να εμφανίζεται περισσότερο ως

⁴<https://image.slidesharecdn.com/wccm2010presentation-12977555257965-phpapp01/95/capturing-effective-permeabilities-of-field-compaction-bands-19-728.jpg?cb=1297734032>

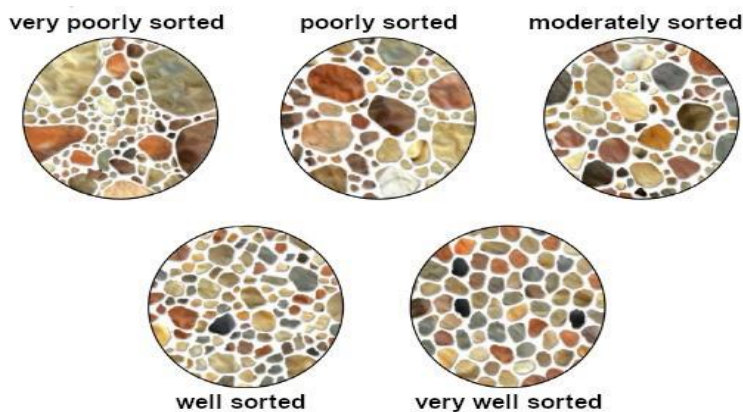
δευτερογενές (Ekwere J. Peters, 2012). Ένα τυπικό παράδειγμα δευτερογενούς πορώδους είναι η δημιουργία σπηλαίων εντός των ασβεστολίθων (Γεωργακόπουλος, 2020).

2.3 ΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ

Το πορώδες των ταμιευτήρων επηρεάζεται σημαντικά από διάφορους παράγοντες. Πιο αναλυτικά, οι βασικοί συντελεστές είναι:

- Η ταξινόμηση του μέγεθος των κόκκων που συγκροτούν τον σχηματισμό (*sorting*)

Οι κόκκοι των ψαμμιτικών πετρωμάτων τείνουν να εμφανίζονται με μια παρόμοια κατανομή στο μέγεθος δηλαδή με πολύ καλή ταξινόμηση (*well sorted*). Αντίθετα, υπάρχουν σχηματισμοί όπως για παράδειγμα οι τιλλίτες, στους οποίους η ταξινόμηση των κόκκων χαρακτηρίζεται πολύ φτωχή. Κατά την περίπτωση όπου θα γινόταν σύγκριση ανάμεσα σε δυο ψαμμίτες με καλή και φτωχή ταξινόμηση, το υλικό με την καλή ταξινόμηση θα είχε μεγαλύτερη τιμή πορώδους σε σχέση με το άλλο. Η πλειοψηφία των καλά ταξινομημένων ψαμμίτων έχουν τιμές που κυμαίνονται μεταξύ του 40-42%.

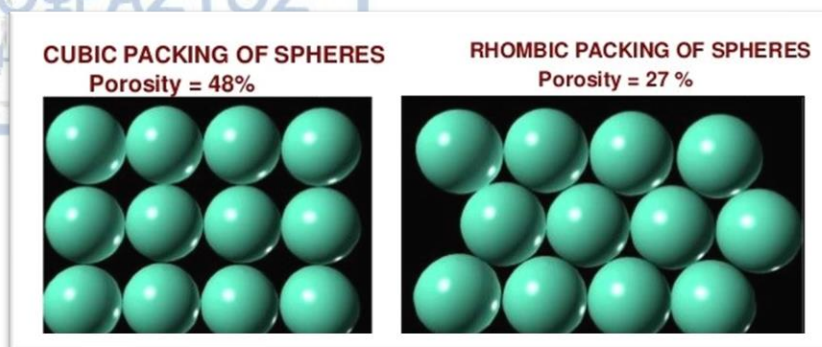


Εικόνα 2.3: Οι βαθμοί ταξινόμησης των κόκκων⁵

- Ο τρόπος κατανομής των κόκκων (*packing*)

Όσον αφορά στον τρόπο διάταξης των κόκκων μέσα στους ταμιευτήρες, στο *cubic packing* όπου υπάρχει συγκεκριμένη κατανομή των κόκκων του ενός πάνω στον άλλο, η τιμή του πορώδους κυμαίνεται περίπου στο 48%. Το πυκνότερο *packing* είναι το ρομβοεδρικό με τιμή πορώδους στο 26% (Knut, 2010). Στη φύση, τα ιζήματα δεν έχουν ένα ομοιόμορφο ιδανικό σφαιρικό σχήμα κόκκων και τα περισσότερα έχουν τιμές χαμηλότερες του 48% και περισσότερα συχνά λιγότερο του 26%.

⁵<https://img.geocaching.com/cache/large/b8a9823a-fcbe-4f8f-8504-dbd3e626efa6.png>



Εικόνα 2.4:Κυβικό και ρομβοεδρικό πακετάρισμα⁶

- Το βάθος εντοπισμού του σχηματισμού

Χρειάζεται επίσης να σημειωθεί πως το βάθος από την επιφάνεια στο οποίο βρίσκεται ένα κλαστικό ιζηματογενές πέτρωμα συντελεί στη μείωση του πορώδους. Αυτό αποδεικνύεται έπειτα από έρευνα πυρήνων σε 110 δείγματα γεωτρήσεων ψαμμίτη που ελήφθησαν στη Βόρεια θάλασσα. Η σχέση του πορώδους n (%) με τη βάθος από την επιφάνεια z (km) δόθηκε ως εξής: $n = 42,7 - 6,9z$ (Ramm&Bjorlykke, 1994).

- Η ταφή και διαγένεση των ιζημάτων

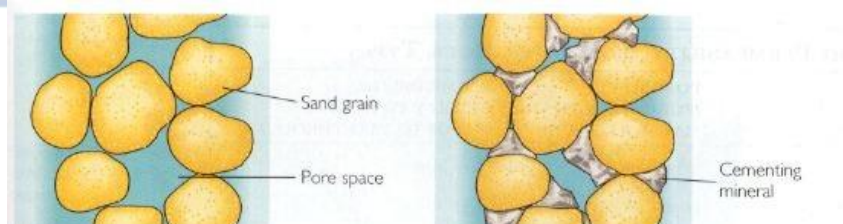
Ένας άλλος παράγοντας που οδηγεί στην αλλαγή των ιδιοτήτων των σχηματισμών είναι οι διαδικασίες της ταφής και διαγένεσης των ιζημάτων. Οι διάφοροι ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, τόσο οι ψαμμίτες όσο και τα ανθρακικά πετρώματα, κατά τη διάρκεια της γεωλογικής τους ιστορίας, υποβάλλονται στη διαγένεση. Η διαδικασία αυτή προκαλεί μείωση του πορώδους. Όταν ένα ίζημα υποβάλλεται σε συνθήκες υψηλής πίεσης, υφίσταται μηχανική συμπίεση (compaction). Ως εκ τούτου επέρχεται ολική αλλαγή στο συνολικό όγκο, οι κόκκοι του συμπυκνώνονται, το ίζημα γίνεται πυκνότερο και το πορώδες μειώνεται.

- Το συνδετικό υλικό των κόκκων

Η σύνδεση των κόκκων μέσω του συνδετικού [συγκολλητικού] υλικού επιδρά στις αλλαγές των ιδιοτήτων του πορώδους και της διαπερατότητας. Όσο περισσότερο είναι το συνδετικό

⁶<https://image.slidesharecdn.com/reservoirporosity-190722101905/95/reservoir-porosity-28-638.jpg?cb=1566717540>

υλικό, τόσο περισσότερο χώρο καταλαμβάνει στον ταμιευτήρα, συνεπώς ο κενός χώρος μεταξύ των κόκκων μειώνεται.



Εικόνα 2.5 : Η μείωση του πορώδους λόγω παρουσίας συνδετικού υλικού ⁷

- *Η θραυσιγενής τεκτονική*

Ταυτόχρονα, ορισμένες δομές της θραυσιγενούς τεκτονικής συνδέονται με την αύξηση του πορώδους στους σχηματισμούς. Τέτοιες δομές όπως είναι τα ρήγματα και οι διακλάσεις, ευνοούν τη δημιουργία επιπλέον κενών χώρων εντός των πετρωμάτων.

- *Η καρστική διάλυση και η δολομιτίωση*

Οι ασυνέχειες, τα ρήγματα και οι διακλάσεις συνεισφέρουν στη δημιουργία δευτερογενούς πορώδους των ανθρακικών σχηματισμών, με αποτέλεσμα την ενίσχυση της ικανότητας ροής. Στα ανθρακικά πετρώματα το μετεωρικό νερό κατεισδύει εντός των επιφανειακών ασυνεχειών, με αποτέλεσμα τη χημική αποσάθρωση και τη διάλυση οδηγώντας σε καρστική διάβρωση. Επακόλουθο της προχωρημένης διάλυσης είναι η απομάκρυνση κρυσταλλικών ορυκτών, η ύπαρξη διακένων, κοιλοτήτων και σπηλαίων (Τσιραμπίδης, 2008). Η διάλυση είναι μια χημική αντίδραση κατά την οποία το νερό εμπλουτίζεται με διοξείδιο του άνθρακα και μετατρέπεται σε ανθρακικό οξύ (H_2CO_3). Το ανθρακικό οξύ αντιδρά με το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) που περιέχεται στην ανθρακική μάζα και μετασχηματίζεται σε δισανθρακικό ασβέστιο $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την καρστική διάλυση είναι οι ακόλουθες :



Μία ακόμα χημική αντίδραση η οποία επιδρά στο πορώδες των σχηματισμών είναι η χημική αντικατάσταση, στην οποία ένα ιόν αντικαθιστά κάποιο άλλο οδηγώντας στη γένεση μίας νέας χημικής ένωσης. Ένα τυπικό παράδειγμα χημικής αντικατάστασης είναι η δολομιτίωση.

⁷<https://www.csun.edu/~psk17793/ES9CP/PoreSpace100.jpg>

Η δολομιτίωση είναι η αντίδραση κατά την οποία ο ασβεστόλιθος μετατρέπεται σε δολομίτη με την αντικατάσταση των ιόντων ασβεστίου του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) από ιόντα μαγνησίου. Συνήθως η δολομιτίωση συνοδεύεται από καταστροφή των απολιθωμάτων και συρρίκνωση του όγκου σε ποσοστό περίπου 11%, με αντίστοιχη αύξηση του δευτερογενούς πορώδους (Τσιραμπίδης, 2008). Η δολομιτίωση περιγράφεται μέσω της σχέσης:



2.4 Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ

Υπάρχει πληθώρα μεθόδων που εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό του πορώδους. Τέτοιες μπορεί να είναι απευθείας μετρήσεις (εργαστηριακές) αλλά και έμμεσες (σεισμικές, διαγραφίες γεωτρήσεων, απεικόνισης CT κ.ά). Οι έμμεσες μετρήσεις στηρίζονται στον συσχετισμό που υπάρχει ανάμεσα στο πορώδες και σε άλλες φυσικές ιδιότητες όπως είναι η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, η πυκνότητα, οι διαγραφίες νετρονίων κ.ά. Ταυτόχρονα, υπάρχει και η δυνατότητα υπολογισμού μέσω του φυσικού φαινομένου NMR (Nuclear Magnetic Resonance) (Schön J. , 2011).

2.4.1. ΟΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ

Οι εργαστηριακές μετρήσεις θεωρούνται περισσότερο αξιόπιστες και γι' αυτό το λόγο προτείνεται η χρήση τους. Ωστόσο, για την αποφυγή σφαλμάτων και αναξιόπιστων μετρήσεων, θα πρέπει να εκτελούνται με απόλυτη ακρίβεια και στις κατάλληλες συνθήκες. Τα δείγματα θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά ολόκληρου του σχηματισμού και η λήψη του να γίνεται προσεκτικά. Ενδεικτικά η (Lucia, 2007) αναφέρει πως η τιμή του πορώδους σε έναν πυρήνα ενδέχεται να υπολογιστεί εσφαλμένα χαμηλότερη λόγω της μη ολοκληρωμένης αφαίρεσης των ρευστών από τους πόρους. Επιπλέον, σε πυρήνες που περιέχουν γύψο και αργιλικά ορυκτά, οι υψηλές θερμοκρασίες κατά την απόληψη τους, προκαλούν την αλλοίωση τους με αποτέλεσμα η τιμή του πορώδους που θα εκτιμηθεί να είναι ψευδώς υψηλότερη. Σύμφωνα με τον (Dullien, 1979), οι πειραματικές μέθοδοι κατηγοριοποιούνται σε :

- Μέθοδος κορεσμού (imbibitions method)
- Μέθοδος διαστολής αερίων (gas expansion method)
- Οπτικές μέθοδοι
- Μέθοδος έγχυσης υδραργύρου

➤ Μέθοδος μέτρησης πυκνότητας

2.4.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ (IMBIBITION METHOD)

Σε αυτή συλλέγονται πυρήνες μέσω δειγματοληπτικών γεωτρήσεων (core analysis). Οι πυρήνες αυτοί έχουν μια γεωμετρική μορφή συνήθως κυλινδρικού σχήματος. Είναι γνωστό εξ ορισμού πως το πορώδες ισούται με το πηλίκο του όγκου των πόρων προς τον συνολικό όγκο του υλικού. Ο συνολικός όγκος είναι το άθροισμα του όγκου των πόρων και του όγκου των κόκκων στο πέτρωμα. Αυτή η σχέση μαθηματικά εκφράζεται ως εξής : $\phi = \frac{V_{\text{πόρων}}}{V_{\text{ολικό}}} \%$ (2.1) , όπου $V_{\text{ολικό}} = V_{\text{πόρων}} + V_{\text{κόκκων}}$ (2.2). Συνεπώς ,η εξίσωση (2.1) γίνεται:

$$\phi = \frac{V_{\text{πόρων}}}{V_{\text{πόρων}} + V_{\text{κόκκων}}} \% (2.3)$$

Αρχικά, ο πυρήνας ζυγίζεται και υπολογίζεται το ξηρό βάρος του. Στην συνέχεια, ακολουθεί η καταβύθιση του πορώδους δείγματος σε δοχείο με υγρό. Η μέτρηση πρέπει να πραγματοποιείται σε συνθήκες κενού γι' αυτό ο αέρας που περιέχεται στους πόρους αφαιρείται με αντλία. Όταν ο κενός χώρος του υλικού κορεστεί πλήρως σε H₂O ή σε οποιοδήποτε άλλο ρευστό περιέχει το δοχείο π.χ. πετρέλαιο, γίνεται η μέτρηση του βάρους στον κορεσμένο πλέον πυρήνα. Εάν αφαιρεθεί το ξηρό βάρος που μετρήθηκε αρχικά από το βάρος του κορεσμένου πυρήνα υπολογίζεται το βάρος του ρευστού που απορροφήθηκε.

$$(\text{Βάρος κορεσμένου πυρήνα} - \text{Βάρος αρχικό} = \text{Βάρος ρευστού}) (2.4)$$

⇒ Όταν ο πυρήνας έχει κυλινδρικό σχήμα, ο συνολικός όγκος του ($V_{\text{ολικό}}$) είναι γνωστός:

$$V_{\text{ολικό κυλίνδρου}} = \pi r^2 u$$

- $\pi = 3,14$
- r = ακτίνα κυλίνδρου
- u = ύψος κυλίνδρου

Για τον υπολογισμό του πορώδους απαιτείται η γνώση των όγκων $V_{\text{πόρων}}$, $V_{\text{ολικό}}$ και $V_{\text{κόκκων}}$. Όμως, στη συγκεκριμένη περίπτωση, το $V_{\text{ολικό}}$ είναι γνωστό και ίσο με το άθροισμα του $V_{\text{πόρων}}$ και $V_{\text{κόκκων}}$ (2.2). Άρα αρκεί ο υπολογισμός του $V_{\text{πόρων}}$. Το βάρος του ρευστού που καταλαμβάνει τους πόρους του πυρήνα, είναι γνωστό όπως και η πυκνότητα ρ . Όμως $\rho = \frac{m_{\text{ρευστού}}}{V_{\text{πόρων}}}$ (2.5). Τελικά, λόγω της σχέσης (2.5) υπολογίζεται το $V_{\text{πόρων}}$ και αντικαθίσταται στην εξίσωση (2.3).

2.4.1.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ ΑΕΡΙΩΝ (GAS EXPANSION METHOD)

Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζει τα αποτελέσματα της στον νόμο του Boyle. Σύμφωνα με αυτόν το νόμο της θερμοδυναμικής, η πίεση μιας ποσότητας αερίου είναι αντιστρόφως ανάλογη του όγκου του σε σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας.⁸ Η διαδικασία της πειραματικής διάταξης είναι η ακόλουθη. Αρχικά το υπο διερεύνηση δείγμα τοποθετείται σε ένα δοχείο γνωστού όγκου V_1 , το οποίο βρίσκεται υπό πίεση P_1 αερίου. Το αέριο αυτό μπορεί να είναι οποιοδήποτε αέριο, όπως είναι το άζωτο ή το ήλιο. Μέσω μιας βαλβίδας το δοχείο όγκου V_1 συνδέεται με ένα δεύτερο δοχείο γνωστού όγκου V_2 , το οποίο είναι εκκενωμένο και άδειο. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων η βαλβίδα ανοίγει και το αποτέλεσμα είναι η μεταβολή της πίεσης του συστήματος σε P_2 , λόγω παροχέυσης αερίου στο εκκενωμένο δοχείο. Ο Νόμος του Boyle στη συγκεκριμένη περίπτωση εκφράζεται μέσω της εξίσωσης:

$$(V_1 - V_s) P_1 = (V_1 - V_s + V_2) P_2$$

Όπου:

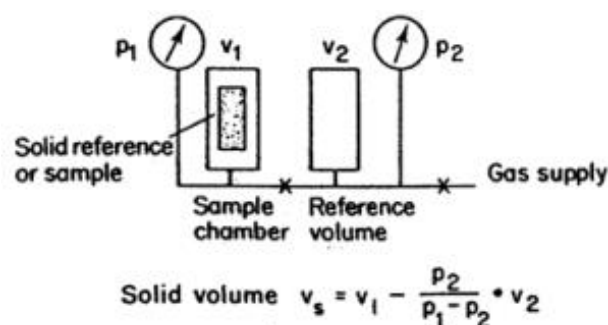
V_1 : Ο όγκος του δοχείου 1

V_s : Ο όγκος των πόρων εντός του δείγματος

P_1 : Η πίεση στο δοχείο 1

V_2 : Ο όγκος του δοχείου 2

P_2 : Η τελική πίεση του συστήματος



Εικόνα 2.6 :Η διάταξη της μεθόδου (Ekwere J. Peters, 2012)

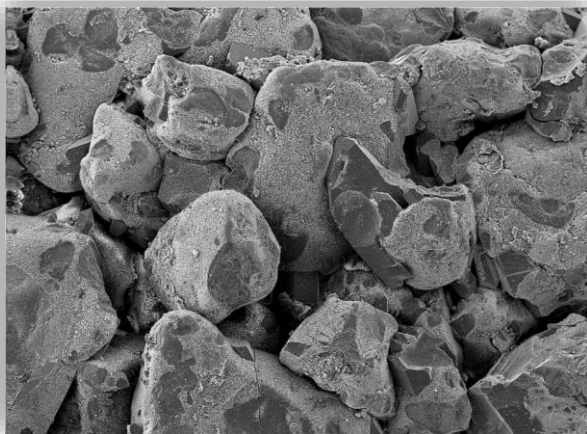
Μέσω αυτής της μεθόδου μπορεί να προσδιοριστεί ο όγκος των πόρων V_s του πετρώματος που εξετάζεται. Λόγω της σχέσης (2.6) ισχύει ότι : (2.7)

$$V_s = V_1 - V_2 \left(\frac{P_2}{P_1 - P_2} \right)$$

⁸https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9D%CF%8C%CE%BC%CE%BF%CF%82_%CF%84%CE%BF%CF%85_%CE%9C%CF%80%CF%8C%CE%B9%CE%BB

2.4.1.3 ΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Στις οπτικές μεθόδους προσδιορισμού του πορώδους συγκαταλέγονται μετρήσεις που πραγματοποιούνται με το οπτικό μικροσκόπιο αλλά και με το μικροσκόπιο σαρωτικής ηλεκτρονικής μικροσκοπίας SEM. Η μικροσκοπία SEM, προσφέρει εικόνες υψηλής ανάλυσης, ευκρίνειας και πολύ μεγάλης διακριτικής ικανότητας της τάξεως των 0,2 nm συγκριτικά με τα οπτικά μικροσκόπια, τα οποία δεν προσφέρουν τόσο ικανοποιητική παρατήρηση. Μία δέσμη ηλεκτρονίων προσπίπτει πάνω στο εξεταζόμενο δείγμα, σαρώνοντας το. Τα αποτελέσματα που είναι δυνατόν να εξαχθούν αφορούν πληροφορίες για τη χημική σύσταση, για τη μορφολογία και δομή του υλικού ανάλογα με το είδος των ηλεκτρονίων που σκεδάζεται. Οι ακτίνες X που εκπέμπονται από το δείγμα παρέχουν πληροφορίες για την χημική σύσταση και την στοιχειομετρική ανάλυση του. Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται είναι δύο ειδών: δευτερεύοντα και οπισθοσκεδαζόμενα. Συνεπώς, οι εικόνες που εκπέμπονται από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι τριών ειδών: εικόνες ακτίνων X, εικόνες δευτερεύοντων ηλεκτρονίων και εικόνες οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων. Ο προσδιορισμός του πορώδους μέσω της μικροσκοπικής μελέτης πραγματοποιείται με λογισμικά προγράμματα τα οποία ψηφιοποιούν τις εικόνες και εξάγουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων.



Εικόνα 2.7: Εικόνα δευτερεύοντων ηλεκτρονίων απο μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης SEM⁹

⁹<https://www.oolithica.com/wp-content/uploads/2016/08/SEM-image-1-from-GP.jpg>

2.4.1.4 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΓΧΥΣΗΣ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ

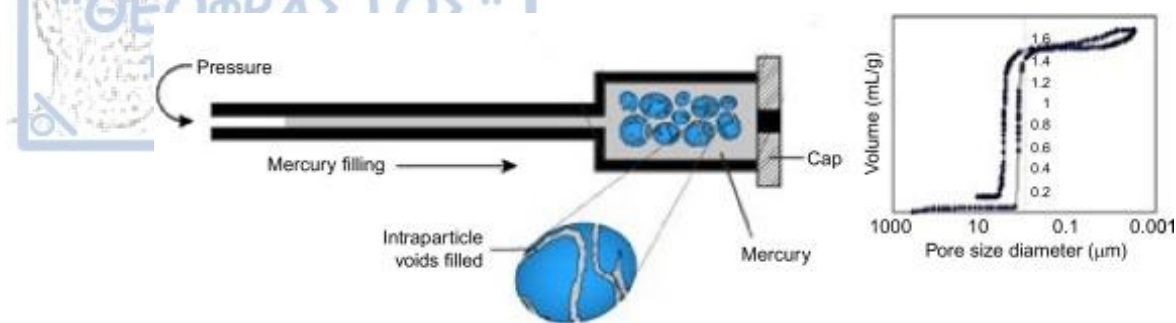
Η ποροσιμετρία υδραργύρου (Mercury Intrusion Porosimetry) είναι μια τεχνική άμεσης ανάλυσης που θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε πετρώματα-ταμιευτήρες ακανόνιστου σχήματος (Yang, 2016). Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων απαιτείται η χρήση ειδικών οργάνων που ονομάζονται ποροσίμετρα υδραργύρου. Τα δείγματα πετρωμάτων που απαιτούν ανάλυση, τοποθετούνται σε έναν εκκενωμένο χώρο του ποροσίμετρου. Στη συνέχεια, μια ποσότητα υδραργύρου εισπίζεται προς το δείγμα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως ο υδράργυρος ως υλικό, έχει πολύ μικρή τιμή διαβρεξιμότητας (γωνία επαφής $\theta > 90^\circ$). Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η κλιμακούμενη αύξηση της πίεσης ώστε να γεμίσουν και οι μικρότεροι πόροι των κόκκων των σχηματισμών. Οι μικρότεροι πόροι της τάξης διαμέτρου των 3,5 nm απαιτούν συνθήκες πίεσης 60.000 psia ή 400 MPa (Giesche, 2006). Τα σύγχρονα όργανα μετρήσεων μπορούν να υπολογίσουν με ακρίβεια τον όγκο του υδραργύρου που απαιτήθηκε για την πλήρωση των πόρων. Ο συνολικός αυτός όγκος που εφαρμόζεται στις συγκεκριμένες συνθήκες πίεσεων αντιπροσωπεύει τον ολικό όγκο των πόρων του πετρώματος. Σύμφωνα με τον (Ekwere J.Peters, 2012), το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η καταστροφή του δείγματος μετά το πέρας της διαδικασίας εξαιτίας των υψηλών πιέσεων. Η μέθοδος στηρίζεται στην εξίσωση του Washburn, η οποία διατυπώνεται ως εξής :

(2.8)

$$D = \frac{-4\gamma \cos \theta}{P}$$

Όπου:

- D= διάμετρος πόρων, (μm)
- γ = επιφανειακή τάση του υδραργύρου, (dynes/ cm²)
- θ = γωνία επαφής θ , (°)
- P = πίεση (psia)



Εικόνα 2.8:Συσκευή ποροσιμετρίας υδραργύρου και καμπύλη της διαμέτρου πόρων σε σχέση με τον όγκο υδραργύρου ¹⁰

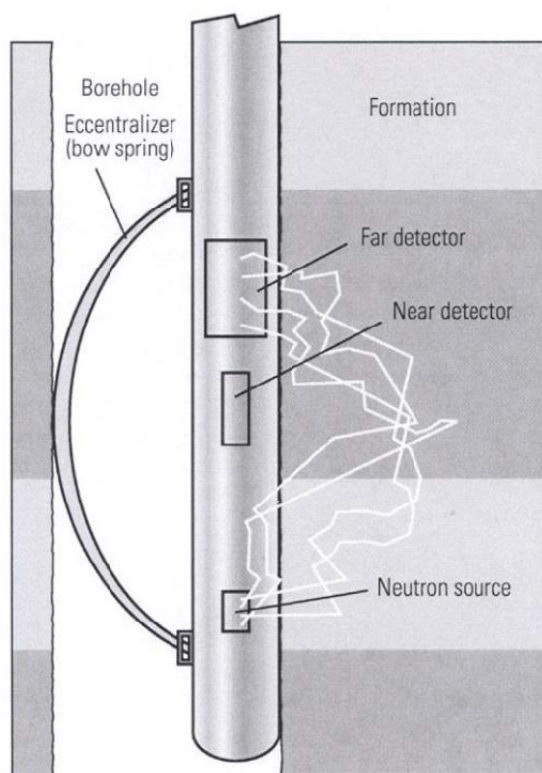
2.4.2 ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ

Η συμβολή των γεωφυσικών διαγραφιών (logging) στη Μηχανική Πετρελαίου είναι καθοριστική, καθώς αυτές προσφέρουν σημαντικές συνδυαστικές γεωλογικές πληροφορίες που αφορούν το πορώδες, τη λιθολογία, τη διαπερατότητα, το βαθμό κορεσμού σε ρευστά κ.α. Μια διαγραφή αποτελεί μια συνεχή καταγραφή μετρήσεων μέσω ειδικών οργάνων, των φυσικών ιδιοτήτων των σχηματισμών εντός μίας γεώτρησης. Οι διαγραφίες αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι μιας κοιτασματολογικής έρευνας καθώς παρέχουν πληθώρα πληροφοριών σε βάθος με αυτοματοποιημένο τρόπο. Οι διαγραφίες αποτελούν επιτόπιες μετρήσεις που δεν απαιτούν πυρηνοληψίες, γεγονός που αποτελεί πλεονέκτημα καθώς αυτές δεν είναι πάντα εφικτές για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους, υπό συγκεκριμένες συνθήκες (Γεωργακόπουλος, 2020). Υπάρχουν διάφοροι τύποι γεωφυσικών διαγραφιών. Στα πλαίσια της εκτίμησης του πορώδους, οι κατά κόρον χρησιμοποιούμενες διαγραφίες είναι: οι διαγραφίες νετρονίων, οι ακουστικές διαγραφίες, οι διαγραφίες πυκνότητας (γάμμα-γάμμα) και οι διαγραφίες NMR. Μια διαγραφή είναι μια έμμεση μέθοδος καταγραφής του πορώδους και για αυτό το λόγο ο συνδυασμός της χρήσης παραπάνω του ενός είδους συνίσταται για πιο ακριβή αποτελέσματα.

¹⁰<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/mercury-porosimetry>

➤ ΔΙΑΤΑΞΗ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ (NEUTRON LOG)

Το πορώδες ενός σχηματισμού προσδιορίζεται ενδεικτικά έπειτα από τη 'ρίψη' νετρονίων, μέσω μιας πηγής υψηλής ενέργειας και την εκπομπή επαγόμενης ακτινοβολίας. Πιο αναλυτικά, η διάταξη της διαγραφίας περιλαμβάνει την πηγή νετρονίων και δύο ανιχνευτές που μετρούν την ακτινοβολία γ ή τα νετρόνια που επιστρέφουν. Τα νετρόνια υψηλής ταχύτητας έχουν την ιδιότητα όταν συγκρουστούν με μόρια υδρογόνου που βρίσκονται στους υδρογονάνθρακες των ταμιευτήρων, να χάνουν μέρος της ενέργειας τους¹¹. Το πορώδες εκφράζει την αποθηκευτική ικανότητα των υδρογονανθράκων, συνεπώς όσο μεγαλύτερο είναι τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το μέγεθος του κοιτάσματος που εγκλείεται. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη μείωση της ενέργειας και της επιβράδυνσης των εκπεμπόμενων νετρονίων κατά την σύγκρουση τους με το υδρογόνο. Συμπερασματικά, το ποσοστό ακτινοβολίας που επιστρέφει στους ανιχνευτές είναι αντιστρόφως ανάλογο της τιμής του πορώδους (Krygowski, 1995,2000,2003, p. 52). Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό αυτό, τόσο πιο μικρή η τιμή του πορώδους. Η διάταξη νετρονίων είναι πολύ χρήσιμη για την ανίχνευση πετρωμάτων μεγάλου πορώδους καθώς και για ανίχνευση φυσικού αερίου εξαιτίας της μικρότερης πυκνότητας υδρογόνου¹².



Εικόνα 2.9: Συσκευή γεωφυσικής διαγραφίας νετρονίων¹³

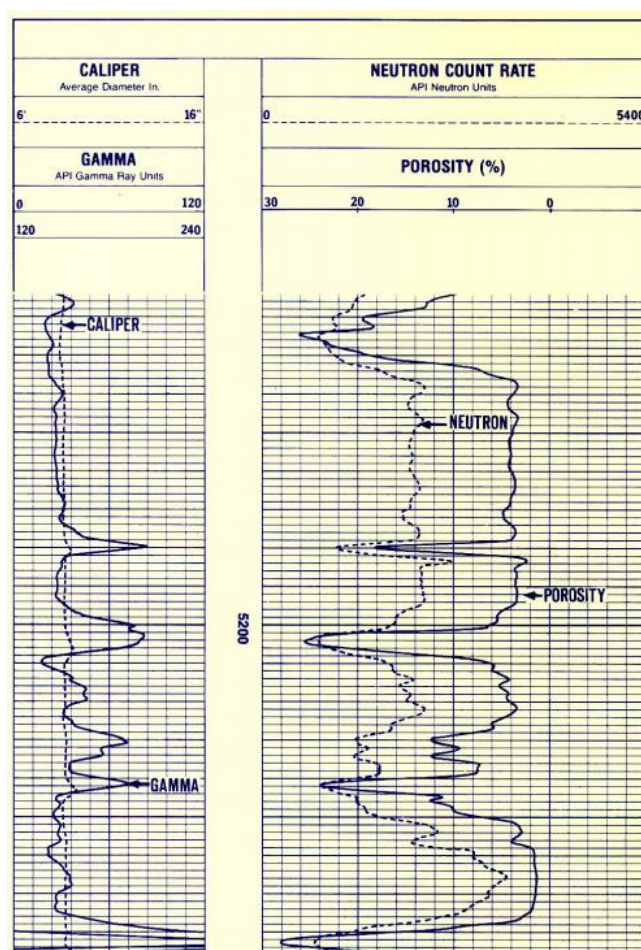
¹¹<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9D%CE%B5%CF%84%CF%81%CF%8C%CE%BD%CE%B9%CE%BF>

¹²http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/PDF/LEC9_NEW.pdf

¹³https://www.researchgate.net/profile/Leonard_Bond/publication/239866577/figure/fig7/AS:651498518241282@1532340759598/Generic-Dual-Detector-Neutron-Tool-Ellis-et-al-2003-Reprinted-with-permission-from.png

➤ ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ (DENSITY LOG-GAMMA RAY)

Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να αποτελέσει ένα δείκτη για το μέγεθος του πορώδους ενός πετρώματος όταν είναι γνωστή η λιθολογία του. Η διάταξη πυκνότητας αποτελείται από μια ραδιενεργό πηγή (^{60}Co) εκπεμπόμενων ακτίνων γ και από ανιχνευτές της ακτινοβολίας (Τσούρλος & Βεργεμέζης). Η εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία γ , κατά την σύγκρουση με τους σχηματισμούς, μεταφέρει ποσότητα της ενέργειας με αποτέλεσμα η ακτινοβολία που σκεδάζεται και επιστρέφει στους ανιχνευτές να διαφέρει από την αρχική. Ο αριθμός αυτός είναι ανάλογος με την πυκνότητα του σχηματισμού. Οι συμπαγείς σχηματισμοί, όπως οι ασβεστόλιθοι οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μεγάλη πυκνότητα, τείνουν να απορροφούν μεγάλο ποσοστό ακτίνων γ . Το γεγονός αυτό εξηγείται μέσω του φαινομένου Compton, και έχει ως αποτέλεσμα την επιστροφή και ανίχνευση μικρών ποσοτήτων ακτίνων γ . Αναλόγως, στους σχηματισμούς μικρής πυκνότητας, η απορρόφηση ακτίνων είναι μικρή και η σκέδαση μεγάλη.



Εικόνα 2.10: Διαγραφή νετρονίων σε σχέση με το πορώδες και διαγραφίες φυσικής ακτινοβολίας γ και caliper (EkwereJ.Peters, 2012)

➤ **ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ (SONIC LOG)**

Η μέτρηση του πορώδους πραγματοποιείται μέσω της καταγραφής του χρονικού διαστήματος που απαιτεί η διάδοση ενός ηχητικού παλμού, απόστασης ενός ποδιού (1 ft) σε κάποιον ταμιευτήρα. Το όργανο καταγραφής σε μία γεωφυσική διαγραφή τέτοιου είδους, αποτελείται από έναν πομπό ηχητικών κυμάτων και δύο δέκτες. Ο χρόνος διαδρομής των ηχητικών κυμάτων εξαρτάται τόσο από τη λιθολογική σύσταση όσο και από την τιμή του πορώδους. Όσο πιο πυκνό είναι ένα πέτρωμα τόσο μικρότερος θα είναι και ο χρόνος διαδρομής των κυμάτων. Συνεπώς, η αύξηση του χρόνου διαδρομής αποτελεί ένδειξη αύξησης του πορώδους (J.Peters, 2012). Το 1956 ο Wyllie έπειτα από την διεξαγωγή εργαστηριακών διατάξεων κατέληξε στη διατύπωση της σχέσης που συνδέει το πορώδες με τον χρόνο που απαιτεί η διάδοση ενός ηχητικού παλμού δια μέσω ενός πορώδους, ομοιόμορφου σχηματισμού. Η σχέση αυτή είναι η παρακάτω :

$$\Delta t = \phi \Delta t_f + (1 - \phi) \Delta t_m$$

Όπου:

- Δt = ο χρόνος διάδοσης του ηχητικού κύματος
- ϕ = το πορώδες
- Δt_m = ο χρόνος διάδοσης του ηχητικού κύματος
- Δt_f = ο χρόνος διάδοσης του ηχητικού κύματος στο ρευστό της γεώτρησης

Το πορώδες δίνεται από την σχέση :

(2.10)

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_m}{\Delta t_f - \Delta t_m}$$

Οι ταχύτητες διάδοσης που χρησιμοποιούνται για την εύρεση του πορώδους, στις ακουστικές διαγραφίες, είναι γνωστές για τους κυριότερους λιθολογικούς σχηματισμούς όπως επίσης και ο χρόνος διάδοσης των ηχητικών κυμάτων στα ρευστά της γεώτρησης που κυμαίνεται σε 189 $\mu\text{sec/ft}$ (J.Peters, 2012).

2.5 Ο ΠΥΡΗΝΙΚΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ (NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE)

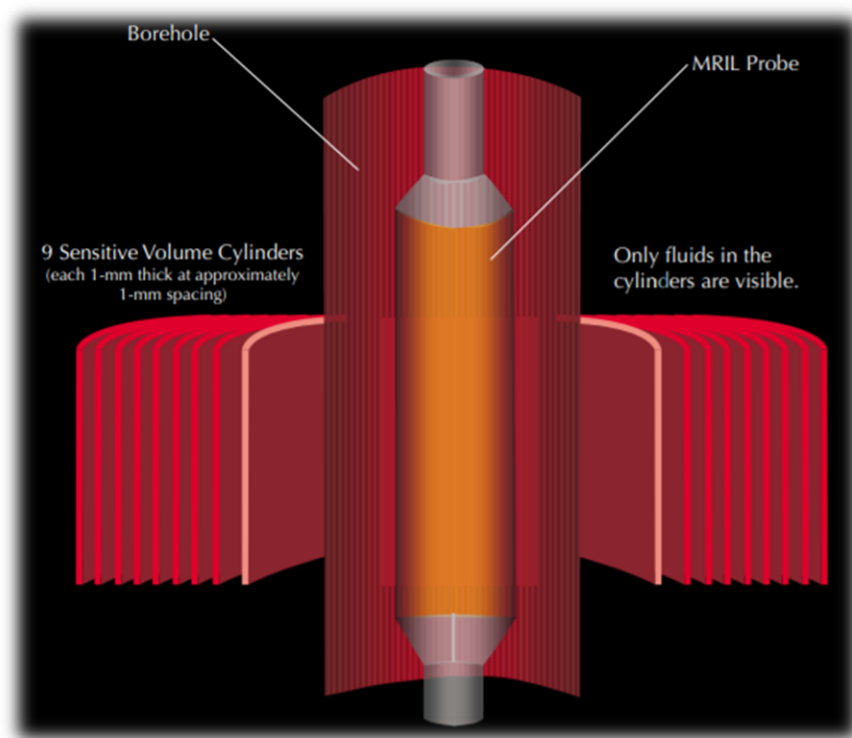
Η φασματομετρία πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού αποτελεί μια αναλυτική τεχνική μελέτης με πληθώρα εφαρμογών στις επιστήμες της Χημείας, της Φυσικής, της Ιατρικής, της Φαρμακευτικής, της Βιοχημείας, της Τεχνολογίας Τροφίμων και Ποτών αλλά και της Τεχνολογίας Πετρελαίου. Σκοπός αυτού του είδους φασματοσκοπίας είναι η λεπτομερής καταγραφή και η ταυτοποίηση της δομής οργανικών ενώσεων και άλλων σωματιδίων. Η μέθοδος βασίζεται στο φαινόμενο του πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού, στο οποίο οι πυρήνες των ατόμων εντός ενός μαγνητικού πεδίου, απορροφούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ραδιοκύματα), με αποτέλεσμα την αλλαγή του ενεργειακού τους επιπέδου και αναστροφή του spin (συντονισμός). Η συνεισφορά της μεθόδου NMR στη βιομηχανία υδρογονανθράκων είναι μεγάλη καθώς παρέχει πληροφορίες για το πορώδες και τη διαπερατότητα των ταμιευτήρων, για την ποσότητα αλλά και το είδος των περιεχόμενων ρευστών αλλά και για την παραγωγή τους.

2.5.1 ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ NMR (NMR LOGGING)

Οι υδρογονάνθρακες που περιέχονται εντός των ταμιευτήρων, εξαιτίας των θετικών φορτίων τους, συμπεριφέρονται σαν μικροσκοπικοί μαγνήτες. Οι διαγραφίες NMR στηρίζονται στην χρήση μαγνητών, οι οποίοι δημιουργούν στα περιβάλλοντα πετρώματα πολύ μεγάλο μαγνητικό πεδίο. Το αποτέλεσμα της επίδρασης του εξωτερικού αυτού μαγνητικού πεδίου στα πρωτόνια είναι η ευθυγράμμιση τους. Το φαινόμενο αυτό ορίζεται ως **πόλωση** και παρουσιάζει εκθετική αύξηση με τον χρόνο T_1 . Οι διαγραφίες NMR πλεονεκτούν συγκριτικά με τις συμβατικές διαγραφίες που προαναφέρθηκαν, καθώς δίνουν μια πληθώρα πληροφοριών που αφορούν στις φυσικοχημικές ιδιότητες των ρευστών του ταμιευτήρα αλλά και ιδιότητες όπως είναι το ιξώδες, η λιθολογία κ.α. Τέτοιες ιδιότητες πολλές φορές είναι αδύνατον να προσδιοριστούν με μεγάλη ακρίβεια από τις άλλες διαγραφίες και χωρίς την χρήση ραδιενεργών ουσιών.¹⁴ Επιπλέον, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονιστεί πως ο υπολογισμός του πορώδους μέσω των διαγραφιών NMR είναι ανεξάρτητος της λιθολογικής σύστασης των ταμιευτήρων. Το πορώδες εξαρτάται μόνο από το περιεχόμενο ποσοστό υδρογόνου. Αυτό συνεπάγεται μια αμεσότερη πετροφυσική ανάλυση σε πετρώματα-

¹⁴[https://petrowiki.spe.org/Nuclear_magnetic_resonance_\(NMR\)_logging](https://petrowiki.spe.org/Nuclear_magnetic_resonance_(NMR)_logging)

ταμειυτήρες πολύπλοκης δομής. Στα μειονεκτήματα των διαγραφιών NMR πρέπει να αναφερθεί το υψηλό κόστος που απαιτεί η εγκατάστασή τους, οι εμπειρικές και όχι τόσο ακριβείς μετρήσεις διαπερατότητας καθώς και το μικρό βάθος γεώτρησης.



Εικόνα 2.11: Ανιχνευτής MRIL για τον υπολογισμό του πορώδους σε έναν σχηματισμό (Coates, Lizhi, & Manfred G. Prammer, 1999)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Η ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

3.1 Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ DARCY ΚΑΙ ΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΡΟΗΣ

Η διαπερατότητα συνιστά μια ακόμη καίριας σημασίας πετροφυσική ιδιότητα για την Μηχανική Πετρελαίου. Η ιδιότητα αυτή συμβολίζεται με το γράμμα k και εκφράζει την ικανότητα ροής των ρευστών συστατικών εντός των πορώδων πετρωμάτων. Ένας ταμειευτήρας οικονομικού ενδιαφέροντος, είναι σημαντικό να χαρακτηρίζεται ταυτόχρονα από υψηλές τιμές πορώδους και διαπερατότητας. Ένα πορώδες πέτρωμα το οποίο διαθέτει διασυνδεδεμένο πορώδες και επιτρέπει τη ροή των ρευστών διαμέσου των πόρων ορίζεται ως διαπερατό (Γεωργακόπουλος, 2020). Ο Γάλλος μηχανικός Henry Darcy, με πειραματικές διατάξεις, ερμήνευσε τα αποτελέσματα του διατυπώνοντας τον περίφημο Νόμο του Darcy. Η διαφορική μορφή του νόμου του Darcy είναι η ακόλουθη:

(3.1)

$$U = \frac{Q}{A} = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{dp}{dx}$$

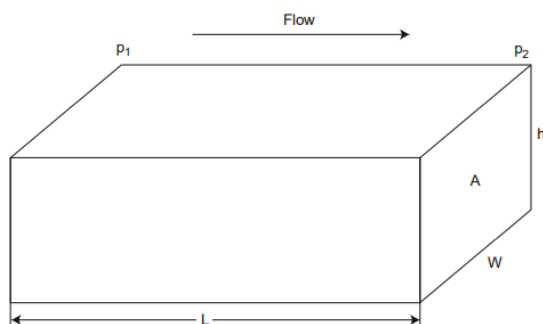
Όπου:

- U = η ταχύτητα του ρεστού, cm/s
- Q = η παροχή του ρευστού, cm³/s
- A = η τομή του δείγματος δια μέσω της οποίας ρέει το ρευστό, cm²
- k = η διαπερατότητα, 1 Darcy=10⁻⁸ cm²
- μ = το ιξώδες του ρευστού σε centipoise
- $\frac{dp}{dx}$ = η μεταβολή της πίεσης κατά μήκος της ροής του ρευστού, atm/cm

Στην γραμμική ροή σταθερής κατάστασης ενός μονοφασικού ρευστού σε οριζόντιο σύστημα, ο Νόμος του Darcy εκφράζεται ως εξής (Peters, 2012):

(3.2)

$$Q = \frac{kA\Delta p}{\mu L}$$



Εικόνα 3.1: Γεωμετρία γραμμικής ροής (Ahmed, 2006)

3.1.1 Η ΑΠΟΛΥΤΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Ο συντελεστής διαπερατότητας, k εκφράζει την απόλυτη διαπερατότητα που εμφανίζει ένας σχηματισμός και η σχέση που περιγράφει το μέγεθος είναι η εξής:

(3.3)

$$k = \frac{Q\mu l}{A\Delta p}$$

Η απόλυτη διαπερατότητα που μπορεί να εμφανίζει ένας ταμιευτήρας αναφέρεται στην ιδανική περίπτωση κατά την οποία αυτός είναι πλήρως κορεσμένος σε ποσοστό 100% με ένα μονοφασικό συστατικό (πετρέλαιο, νερό ή φυσικό αέριο) (Tiab & Donaldson, 2004). Μονάδα μέτρησης της είναι το 1 Darcy, το οποίο ισοδυναμεί με 10^{-8} cm^2 . Σε έναν σχηματισμό η τιμή της απόλυτης διαπερατότητας είναι πάντα η ίδια ανεξαρτήτως των ιδιοτήτων του ρευστού που το διαρρέει σε κάθε περίπτωση (Peters, 2012). Συμπερασματικά λοιπόν το μέγεθος αυτό εξαρτάται μόνο από τη φύση του πετρώματος. Στη βιομηχανία πετρελαίου και αερίου χρησιμοποιείται περισσότερο η υπομονάδα millidarcy (mD), καθώς το Darcy θεωρείται μια αρκετά μεγάλη μονάδα μέτρησης (Yang, 2016). Οι ταμιευτήρες υδρογονανθράκων έχουν τιμές διαπερατότητας που παρουσιάζουν διακυμάνσεις μεταξύ του 0,1 έως και άνω των 1000 millidarcy (Tiab & Donaldson, 2004). Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στους ταμιευτήρες φυσικού αερίου, σύμφωνα με τα πρότυπα SY/T 6168-2009 της Πετρελαϊκής Βιομηχανίας της Κίνας, η τιμή ενός ταμιευτήρα υψηλής διαπερατότητας υπολογίζεται στα 300 millidarcy, ενός μετριας τιμής στα 300-20 millidarcy, ενός χαμηλής διαπερατότητας στα 20-1 millidarcy και τέλος οι χαμηλότερες τιμές κυμαίνονται κάτω του 1 millidarcy (Yang, 2016).

3.1.2 Η ΕΝΕΡΓΟΣ ΚΑΙ Η ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Σε έναν ταμιευτήρα υδρογονανθράκων, τις περισσότερες φορές, δεν εγκλείεται ένα μονοφασικό ρευστό αλλά είναι συνδιασμός πολλών φάσεων. Για παράδειγμα, η υγρή φάση του πετρελαίου και του νερού συνυπάρχει με την αέρια φάση του φυσικού αερίου. Σε αυτή την περίπτωση της πολυφασικής κατάστασης, η διαπερατότητα που αφορά τον ταμιευτήρα ορίζεται ως ενεργός. Πιο αναλυτικά, στο συγκεκριμένο ταμιευτήρα, η ενεργός διαπερατότητα του φυσικού αερίου συμβολίζεται με k_g και εκφράζει την ικανότητα και την ευκολία να κινείται εντός του ταμιευτήρα υπό την παρουσία των δύο άλλων ρευστών. Αντίστοιχα, οι συμβολισμοί για την ενεργό διαπερατότητα του πετρελαίου και του νερού είναι k_o και k_w .

Η σχετική διαπερατότητα εκφράζει την αναλογία της ενεργού διαπερατότητας προς την απόλυτη, επί τις εκατό. Ο ορισμός της δίνεται από την παρακάτω σχέση :

- $k_{ro} = \frac{k_o}{k}$, όταν πρόκειται για την σχετική διαπερατότητα του πετρελαίου
- $k_{rg} = \frac{k_g}{k}$, όταν πρόκειται για την σχετική διαπερατότητα του φυσικού αερίου
- $k_{rw} = \frac{k_w}{k}$, όταν πρόκειται για την σχετική διαπερατότητα του νερού

ΥΛΙΚΟ	k (cm/s)
Χάλικες	$10^0 - 10^{-1}$
Αμμοχάλικα	$10^0 - 10^{-3}$
Λεπτόκοκκοι άμμοι, ιλύες	$10^{-3} - 10^{-5}$
Ιλυώδεις άργιλοι, άργιλοι	$10^{-5} - 10^{-11}$
Ασβεστόλιθοι ελαφρά ρηγματωμένοι χωρίς έντονη καρστικοποίηση	$10^{-1} - 10^{-4}$
Ασβεστόλιθοι έντονα ρηγματωμένοι	$10^1 - 10^{-2}$
Ιλυόλιθοι, ψαμμίτες σχεδόν υγιείς έως λίγο ρηγματωμένοι	$10^{-3} - 10^{-8}$

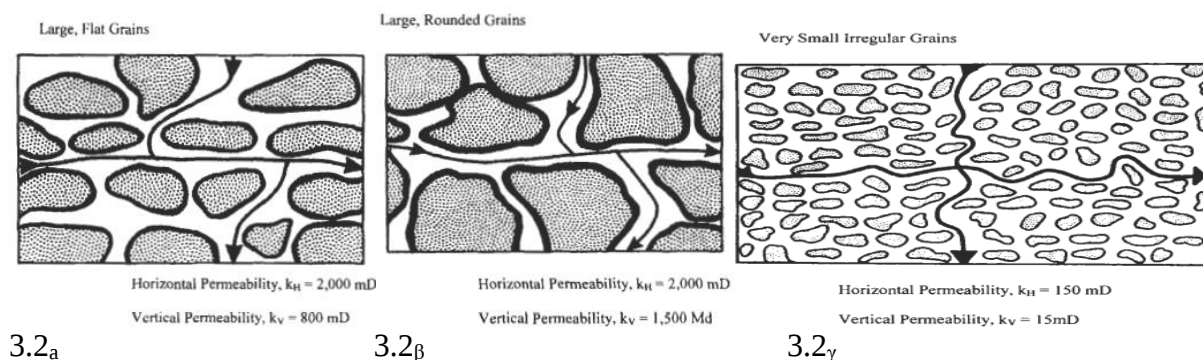
Πίνακας 3.1: Τιμές του δείκτη διαπερατότητας k (cm/s) (Καββαδάς Μ. & Πανταζίδου Μ., 2007)

3.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Το μέγεθος της διαπερατότητας εξαρτάται από μερικούς παράγοντες. Αυτοί, ως επί το πλείστον συμπίπτουν, με τους παράγοντες που επιδρούν στο πορώδες και είναι οι ακόλουθοι:

- Το μέγεθος, το σχήμα και ο προσανατολισμός των κόκκων που συγκροτούν τους σχηματισμούς

Σε αντίθεση με ό,τι αναφέρθηκε σχετικά με την επίδραση του μεγέθους των κόκκων και την τιμή του πορώδους η οποία αυξάνεται με ενδεχόμενη μείωση του μεγέθους των κόκκων, η διαπερατότητα μειώνεται με τη μείωση του μεγέθους αυτού. Όσον αφορά στο σχήμα των κόκκων και τον προσανατολισμό τους, επιδρούν συνδιαστικά στην τιμή της διαπερατότητας. Πιο συγκεκριμένα, εάν οι κόκκοι του σχηματισμού είναι μεγάλοι σε μέγεθος και πεπλατυσμένοι ως προς το οριζόντιο επίπεδο όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2α, η διαπερατότητα στο οριζόντιο επίπεδο θα είναι πολύ υψηλή ενώ η ροή στο κατακόρυφο επίπεδο θα χαρακτηρίζεται μέτρια προς υψηλή. Στην περίπτωση όπου οι κόκκοι χαρακτηρίζονται μεγάλοι ως προς το μέγεθος και μεγάλης στρογγυλότητας (εικόνα 3.2β), οι τιμές της κάθετης και οριζόντιας διαπερατότητας θα είναι εξίσου πολύ υψηλές. Στη φύση, η πλειοψηφία των ταμιευτήρων υδρογονανθράκων, αφορά πετρώματα με ακανόνιστο σχήμα κόκκων μεγάλης ανομοιομορφίας και μικρού μεγέθους (εικόνα 3.2γ). Οι τιμές της διαπερατότητας είναι αισθητά χαμηλότερες σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις σχηματισμών, με γενικό κανόνα, σε όλες τις περιπτώσεις, τη μικρότερη διαπερατότητα κατά το κατακόρυφο επίπεδο.



Εικόνα 3.2 : Η διαπερατότητα στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο, σε σχέση με το σχήμα, το μέγεθος και τον προσανατολισμό των κόκκων (Tiab & Donaldson, 2004, σσ. 103-104)

- Η ταξινόμηση του μεγέθους των κόκκων του πετρώματος (sorting)

Η κακή ταξινόμηση των κόκκων, μειώνει το πορώδες αλλά και τη διαπερατότητα σε έναν σχηματισμό.

- Η παρουσία του συγκολλητικού υλικού πλήρωσης των πόρων (cement)

Η παρουσία συγκολλητικού υλικού, ως αποτέλεσμα διάφορων διαγενετικών και μεταμορφικών διαδικασιών εντός των σχηματισμών, οδηγεί πάντα σε μείωση των ιδιοτήτων του πορώδους και της διαπερατότητας.

- Η παρουσία αργιλικών υλικών

Σε τυπικούς αδρόκοκκους ψαμμίτες όπως είναι οι αρκόζες και οι γραουβάκες, το υλικό πλήρωσης εντός των κόκκων, είναι σε ποσοστό περίπου 15% αργιλικής σύστασης, άφθονο σε ιλίτη, χλωρίτη και σερικήτη (Τσιραμπίδης, 2008, σσ. 93-94). Τα αργιλικά ορυκτά χαρακτηρίζονται από την παραμόρφωση διόγκωσης κατά την επαφή τους με το νερό και την αύξηση του όγκου τους. Αυτό οδηγεί συνεπώς σε μείωση της διαπερατότητας εντός των σχηματισμών. Η προσθήκη αλάτων όπως είναι το NaCl και το KCl μπορεί να μειώσουν τέτοιου είδους διογκώσεις (Peters, 2012).

- Οι τεκτονικές διεργασίες

Όπως αναφέρθηκε στο 2^ο Κεφάλαιο, η συμβολή της Τεκτονικής μέσω των εφελκυστικών και συμπιεστικών δομών (ρήγματα, διακλάσεις) οδηγεί στην αύξηση του πορώδους των πετρωμάτων αφού αυξάνεται το ποσοστό των διασυνδεδεμένων πόρων και ο κενός χώρος στο εσωτερικό τους. Η αύξηση αυτή οδηγεί ταυτόχρονα και στην αύξηση της διαπερατότητας, με μεγάλη συχνότητα στους ανθρακικούς σχηματισμούς.

- Η μηχανική συμπίεση των ιζημάτων

Η κλιμακούμενη αύξηση της πίεσης που είναι αποτέλεσμα των συμπιεστικών διαδικασιών που δέχεται ένας σχηματισμός, κατά την ταφή του και την διαγένεση, μειώνει το πορώδες. Η μείωση αυτή οδηγεί και σε μείωση της διαπερατότητας, καθώς ο αρχικός όγκος μειώνεται με αποτέλεσμα τη μείωση των διασυνδεδεμένων πόρων.

3.3 ΣΧΕΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΚΑΙ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

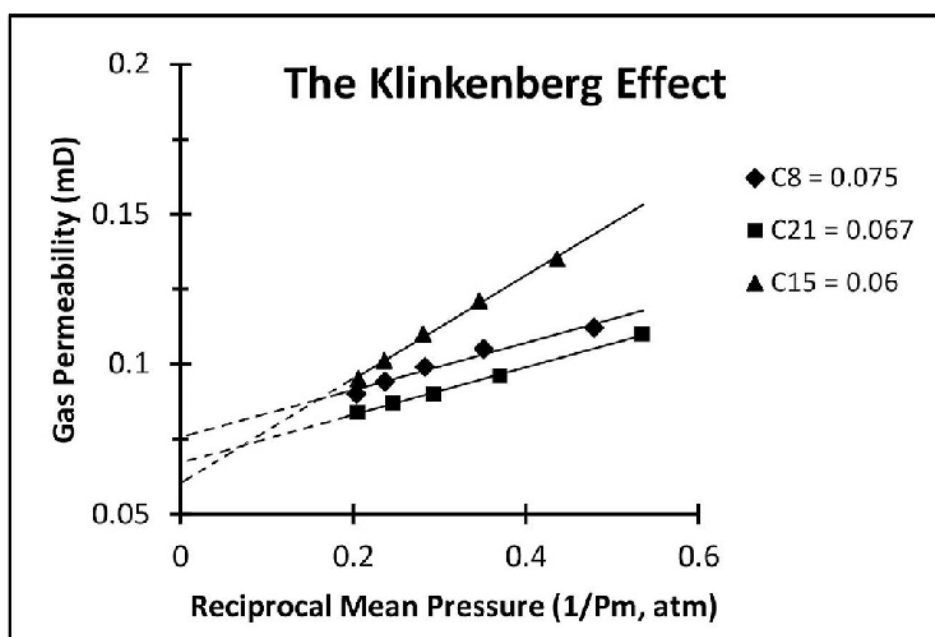
Το πορώδες και η διαπερατότητα είναι δύο θεμελιώδεις πετροφυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων, οι οποίες μεταβάλλονται από παρόμοιους παράγοντες. Ωστόσο, δεν παρουσιάζουν σχέση αλληλοεξάρτησης μεταξύ τους. Κάτι τέτοιο αποδεικνύεται από το γεγονός πως, σχηματισμοί που χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλές τιμές πορώδους όπως είναι η κίσσηρις (87%), έχουν σημαντικά χαμηλές τιμές διαπερατότητας. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη διασυνδεδεμένων πόρων οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την επίτευξη της ροής και την αύξηση της διαπερατότητας. Αντίστοιχα, μεγάλη τιμή διαπερατότητας ενός σχηματισμού δεν εξασφαλίζει μεγάλη τιμή πορώδους, όπως συμβαίνει σε καρστικοποιημένους ασβεστόλιθους. Ωστόσο αυτό δεν σημαίνει πως η μεταβολή στο ένα μέγεθος δεν μπορεί να επηρεάσει το άλλο, καθώς συγκριτικές μελέτες έδειξαν πως κάποια αύξηση στην τιμή του πορώδους, προκαλεί αύξηση και στην διαπερατότητα (Ψιλοβίκος & Ψιλοβίκος, 2010).

3.4 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΤΟΥ KLINKENBERG

Το 1941 ο Klinkenberg ασχολήθηκε με τη μελέτη της επίδρασης που ασκεί το είδος του αερίου και η πίεση αυτού, επί των τιμών της διαπερατότητας του. Κατέληξε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Σε χαμηλές τιμές πιέσεων, τα μόρια του αερίου έχουν μεγάλη απόσταση μεταξύ τους και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ολίσθηση τους με ελάχιστες απώλειες ενέργειας.
- Το αέριο συμπεριφέρεται με παρόμοιο τρόπο σε σχέση με υγρά μόνο σε συνθήκες πολύ υψηλών πιέσεων. Κατά την περίπτωση όπου η πίεση του αερίου μέτρησης είναι αρκετά χαμηλή, η τιμή της διαπερατότητας διαφέρει αρκετά από την πραγματική.

Η διαδικασία μέτρησης της διαπερατότητας, αρχικά περιλαμβάνει τη λήψη μιας ομάδας μετρήσεων διαπερατότητας K_g , κάτω από διάφορες τιμές μέσωσων πιέσεων (P_m). Στο γράφημα που προκύπτει, η ευθεία γραμμή αντιπροσωπεύει τις τιμές της διαπερατότητας K_g που αντιστοιχούν στις τιμές $1/P_m$. Η απόλυτη διαπερατότητα δίδεται από την αποτέμνουσα της ευθείας αυτής αφού $1/P_m=0$, δηλαδή P_m τείνει στο άπειρο. Η τιμή της είναι μικρότερη από κάθε άλλη μετρούμενη τιμή γιατί αντιστοιχεί σε άπειρη πίεση.



Εικόνα 3.3 : Διάγραμμα του φαινομένου Klinkenberg¹⁵

¹⁵https://www.researchgate.net/profile/Mohamed_Salah66/publication/338358342/figure/fig1/AS:848328988303360@1579268800327/The-Klinkenberg-correction-plot-for-the-estimation-of-rock-permeability-Extrapolation-of.png

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Η ΔΙΑΒΡΕΞΙΜΟΤΗΤΑ

4.1 Ο ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΕΞΙΜΟΤΗΤΑΣ

Μιά πρόσθετη ιδιότητα των ταμιευτήρων είναι η διαβρεξιμότητα (wettability). Στο εσωτερικό των ταμιευτήρων, όπου φιλοξενούνται πετρέλαιο και φυσικό αέριο, αλλά και το περιεχόμενο νερό, η ιδιότητα της διαβρεξιμότητας είναι αυτή που καθορίζει και εκφράζει την ιδιότητα των διάφορων ρευστών να εμμένουν ή να διασκορπίζονται πάνω στις επιφάνειες των πετρωμάτων -ταμιευτήρων υπό την παρουσία άλλων μη αναμίξιμων ρευστών. Η πετροφυσική αυτή ιδιότητα, ελέγχει την σχετική κατανομή του νερού, του πετρελαίου και του αερίου εντός των πόρων του ταμιευτήρα καθώς και το ρυθμό ροής τους. Σύμφωνα με τον (Schön J. , 2011) στην ορολογία της Επιστήμης πετρελαίου, ένας ταμιευτήρας μπορεί να υπόκειται στις παρακάτω κατηγορίες, σε σχέση με την διαβρεξιμότητα του :

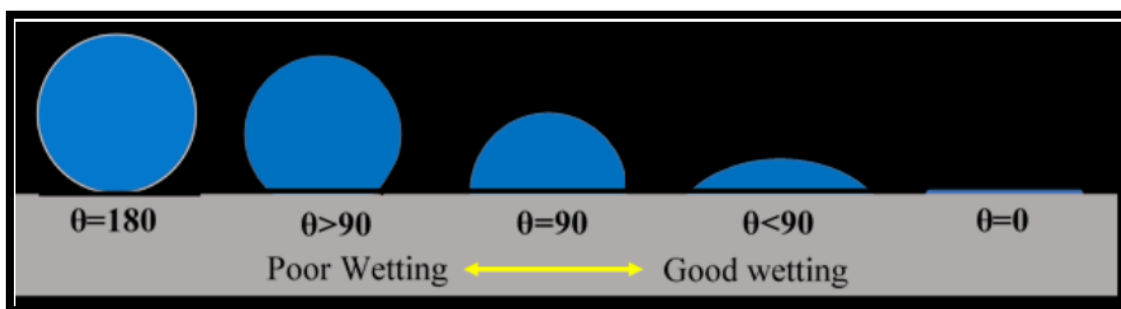
- Water-wet
- Oil –wet
- Ενδιάμεσης διαβρεξιμότητας (intermediate/neutral wettability)

Οι ταμιευτήρες των υδρογονανθράκων είναι πολυφασικά συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, στο εσωτερικό ενός ταμιευτήρα, είναι δυνατόν να περιέχεται κοίτασμα φυσικού αερίου σε συνδιασμό με πετρέλαιο και νερό. Στην περίπτωση που το πέτρωμα χαρακτηριστεί ως water-wet, η επιφάνεια του επικαλύπτεται από το νερό και τις κεντρικές θέσεις των μεγαλύτερων πόρων του κατέχουν το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο. Το αντίθετο λαμβάνει χώρα στους ταμιευτήρες με χαρακτηρισμό oil-wet . Οι σχετικές θέσεις πετρελαίου και νερού έχουν αντιστραφεί. Στην τρέχουσα περίπτωση, στην επιφάνεια του ταμιευτήρα, είναι διαχυμένο το πετρέλαιο και το νερό βρίσκεται στο κέντρο ανάμεσα στους μεγάλους πόρους. Τέλος, στους ταμιευτήρες ενδιάμεσης διαβρεξιμότητας (intermediate), τείνει τόσο το πετρέλαιο όσο και το νερό να προσκολλώνται πάνω στις επιφάνειες των πόρων. Οι ψαμμιτικοί ταμιευτήρες, στην πλειοψηφία τους, ανήκουν στην κατηγορία water-wet, ενώ εμφανίζονται και με ενδιάμεση διαβρεξιμότητα. Αντιθέτως, οι ανθρακικοί ταμιευτήρες (ασβεστόλιθοι, δολομίτες) στην πλειοψηφία τους εμφανίζονται περισσότερο ως oil–wet (Schön J. , 2011). Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η έννοια της διαβρεξιμότητας ας θεωρήσουμε ένα υγρό το οποίο έρχεται σε άμεση επαφή με μια στερεή επιφάνεια. Εάν το υγρό αυτό διατηρήσει την επαφή του με την επιφάνεια και παραμείνει σε μορφή σταγονιδίων πάνω της τότε η διαβρεξιμότητα της επιφάνειας θα είναι πολύ χαμηλή. Το υγρό αυτό θα χαρακτηριστεί ως non-wetting ή μη διαβρέχον ρευστό. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην επίδραση της διεπιφανειακής τάσης, τα

μόρια στην επιφάνεια των υγρών έλκονται μεταξύ τους σχηματίζοντας δεσμούς υδρογόνου, συνέπεια των δυνάμεων συνοχής¹⁶. Πολύ υψηλής διαβρεξιμότητας επιφάνειες διαβρέχονται πλήρως από το υγρό, που χαρακτηρίζεται ως το ρευστό διαβροχής (complete wetting).

4.1.1 Η γωνία επαφής θ και οι παράγοντες που την επηρεάζουν

Για την περιγραφή του βαθμού διαβρεξιμότητας ενός υλικού, εισάγεται η έννοια της γωνίας επαφής θ . Ως γωνία επαφής θ (contact angle), ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται στο σημείο διεπαφής του υγρού-αέριου σώματος με την στερεή επιφάνεια. Η τιμή της γωνίας επαφής είναι αντιστρόφως ανάλογη με την διαβρεξιμότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της γωνίας θ , τόσο χαμηλότερη είναι η διαβρεξιμότητα και το αντίθετο. Οι ακραίες τιμές $\theta=180^\circ$ και $\theta=0^\circ$, αντιπροσωπεύουν τις καταστάσεις μη διαβροχής και απόλυτης διαβροχής ανάλογα. Όταν η γωνία επαφής θ ισούται με 90° , υπάρχει είτε πλήρης διαβροχή της επιφάνειας είτε καθόλου. Ακολουθούν σχήματα που απεικονίζουν τις περιπτώσεις που προαναφέρθηκαν.



Εικόνα 4.1: Βαθμοί διαβρεξιμότητας υλικού, σε σχέση με την γωνία επαφής θ ¹⁷

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές της γωνίας επαφής θ , είναι :

➤ Η ορυκτολογική σύσταση του υλικού επαφής

Σύμφωνα με τις απόψεις των (Zinszner&Pellerin, 2007), η ορυκτολογία της επιφάνειας που έρχεται σε άμεση επαφή με το ρευστό, ενδέχεται να καθορίζει τον βαθμό διαβρεξιμότητας. Λόγου χάριν, ο ασβεστίτης, συστατικό των ανθρακικών πετρωμάτων, εμφανίζει διαβροχή ως προς το πετρέλαιο είναι δηλαδή oil-wet όπως και αργιλικά ορυκτά (καολινίτης). Οι ψαμμίτες αποτελούνται από περισσότερα είδη ορυκτών όπως ο χαλαζίας και οι άστριοι στους οποίους οι γωνίες επαφής θ είναι μικρότερες των 90° , αλλά και από αργιλικά ορυκτά και σουλφίδια

¹⁶https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_tension

¹⁷https://www.researchgate.net/figure/Wetting-degree-of-surfactants-liquid-drop-in-different-contact-angles_fig1_328272205

(Yang, 2016). Εμφανίζουν έτσι μια μεγαλύτερη ποικιλία ιδιοτήτων και περισσότερη πολυπλοκότητα σε σχέση με τους ανθρακικούς ταμιευτήρες.

➤ Η τραχύτητα των στερεών επιφανειών

Η τραχύτητα των επιφανειών αυξάνει τη διαβρεξιμότητα των υδρόφοβων επιφανειών (γωνία επαφής $\theta > 90^\circ$) και τείνει να μειώσει τη διαβρεξιμότητα των υδρόφιλων (γωνία επαφής $\theta < 90^\circ$). Με σκοπό τον προσδιορισμό της διαβρεξιμότητας σε κάποια επιφάνεια, όπου έχει αυξηθεί η τραχύτητα γίνεται χρήση της εξίσωσης του Wenzel.

Εξίσωση Wenzel

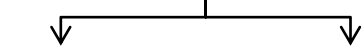
$$\cos\theta_w = \zeta \cos\theta$$

Όπου :

θ_w = η γωνία επαφής της τραχιάς επιφάνειας

θ = η γωνία επαφής της ομαλής επιφάνειας

ζ = η αναλογία τραχύτητας

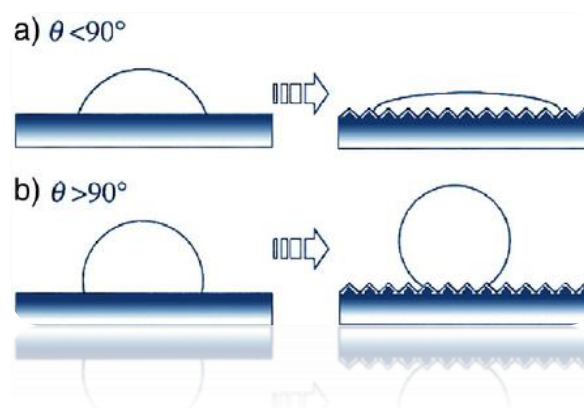


$\zeta=1$

$\zeta>1$

ομαλή επιφάνεια

τραχιά επιφάνεια



Εικόνα 4.2: Η επίδραση της τραχύτητας στην γωνία επαφής¹⁸

➤ Η σύσταση των ρευστών του ταμιευτήρα

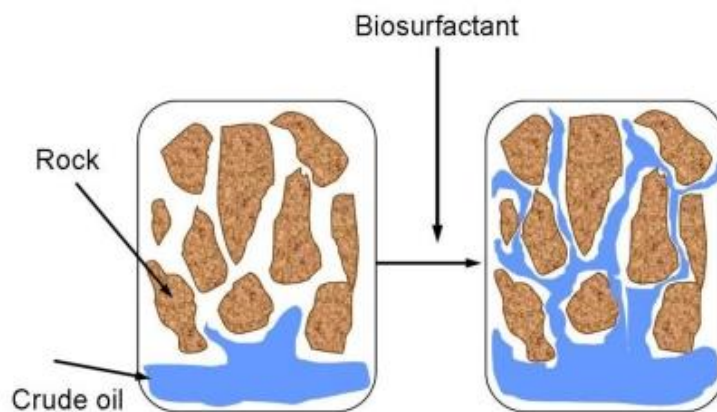
Η πολυπλοκότητα της σύστασης των υδρογονανθράκων, που περιέχονται εντός των ταμιευτήριων πετρωμάτων, επηρεάζει τη γωνία επαφής και επομένως την τιμή της διαβρεξιμότητας. Σύμφωνα με τον (Yang, 2016), όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ανθράκων των διάφορων υδρογονανθράκων, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της γωνίας θ . Παράδειγμα αποτελεί το οκτάνιο C_8H_{18} , το οποίο έχει μεγαλύτερη γωνία επαφής θ από το εξάνιο C_6H_{14} .

¹⁸https://www.researchgate.net/profile/Korneli_Grigorov/publication/260869891/figure/fig2/AS:296653664866308@1447739153412/Contact-angle-value-and-surface-roughness-according-to-the-Wenzel-Eq-5.png

➤ Οι επιφανειοδραστικές ενώσεις κατά την Μικροβιακή ανάκτηση πετρελαίου (MEOR)

Η εξόρυξη υδρογονανθράκων πραγματοποιείται σε διαδοχικά στάδια, ώστε να αυξηθεί το ποσοστό ανάκτησης τους. Μία μέθοδος η οποία πραγματοποιείται κατά το τελικό στάδιο εκμετάλλευσης είναι η Μικροβιακή ανάκτηση πετρελαίου (MEOR). Πρόκειται για μία μέθοδο με πολύ ενθαρρυντικές προοπτικές, κατά την οποία το κοίτασμα εμβολίζεται με διάφορους μικροοργανισμούς με σκοπό την παραγωγή βιοεπιφανειοδραστικών ουσιών.

Οι επιφανειοδραστικές ή τασιενεργές ουσίες έχουν την ιδιότητα να προκαλούν μείωση στις διεπιφανειακές τάσεις μεταξύ των μη αναμίξιμων υγρών. Η μείωση αυτή επιφέρει μείωση των δυνάμεων συνοχής στα ρευστά, μείωση της γωνίας επαφής δηλαδή αύξηση της διαπερατότητας.



Εικόνα 4.3 : Ανάκτηση πετρελαίου από βιοεπιφανειοδραστικές ουσίες¹⁹

➤ Η ενέργεια των επιφανειών

Ταυτόχρονα, η υψηλή ενέργεια επιφάνειας, ισοδυναμεί με μικρή γωνία επαφής και υψηλή διαβρεξιμότητα.

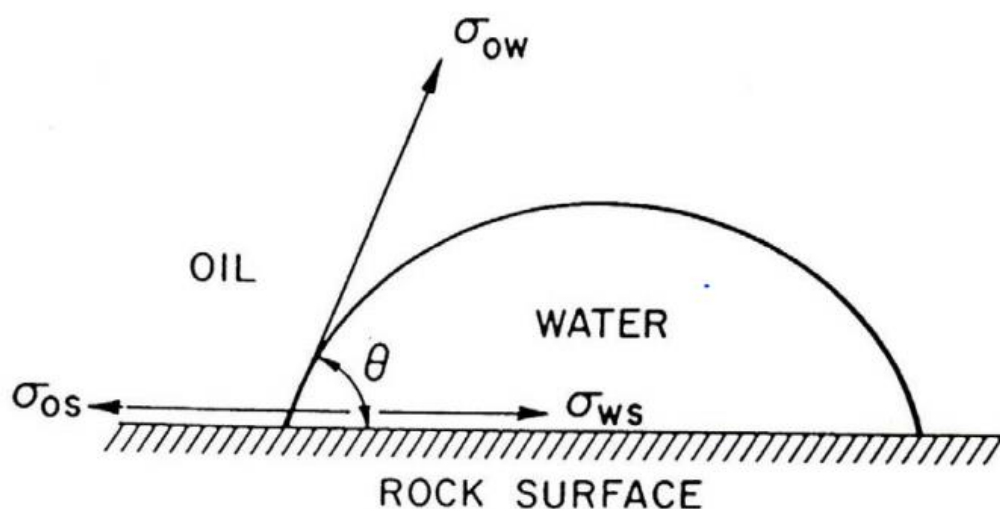
➤ Η ύπαρξη ακαθαρσιών πάνω στις επιφάνειες

Παράλληλα, η ύπαρξη ακαθαρσιών επάνω στις επιφάνειες, αποτρέπει την άμεση επαφή μεταξύ των ρευστών και της επιφάνειας, με αποτέλεσμα τη μείωση της διαβρεξιμότητας και την αύξηση της γωνίας επαφής.

¹⁹https://www.researchgate.net/profile/Swaranjit_Cameotra/publication/49854063/figure/fig4/AS:201524790730771@1425058662672/Mechanism-of-enhanced-oil-recovery-by-biosurfactants.png

4.2 Η ΔΙΑΒΡΕΞΙΜΟΤΗΤΑ ΣΤΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στην επιφάνεια των υγρών σωμάτων, επιδρούν επιφανειακές τάσεις οι οποίες δημιουργούνται εξαιτίας των ελκτικών δυνάμεων μεταξύ των μορίων. Έτσι ερμηνεύεται από φυσική άποψη η σφαιρικότητα που λαμβάνουν οι σταγόνες του νερού καθώς πέφτουν πάνω στα φύλλα των δέντρων. Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση του τριφασικού συστήματος, με σκοπό την μελέτη του μεγέθους της διαβρεξιμότητας.



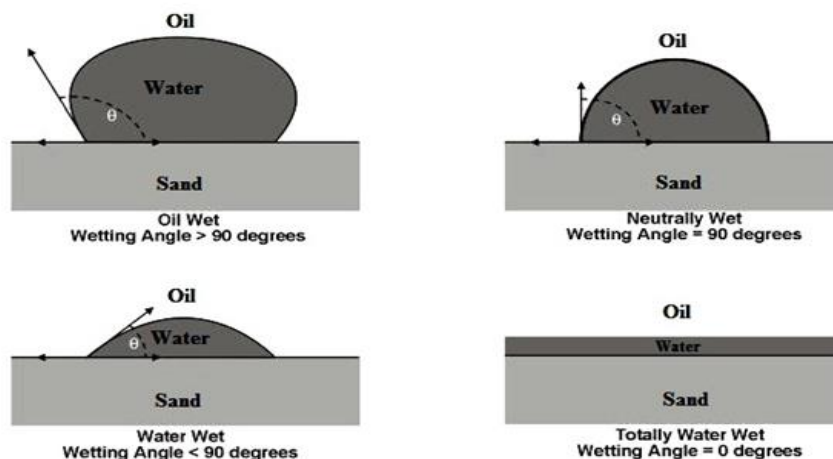
Εικόνα 4.4: Επιφανειακές τάσεις στο σύστημα νερού-πετρελαίου-επιφάνειας (J.Peters, 2012)

Στο σχήμα υπάρχουν τρεις επιφανειακές τάσεις. Η πρώτη είναι η τάση σ_{os} , η οποία ασκείται μεταξύ του πετρελαίου και της στερεής επιφάνειας του ταμιευτήρα. Η δεύτερη, σ_{ow} , είναι η τάση μεταξύ πετρελαίου και νερού. Τέλος η τάση σ_{ws} , αναπτύσσεται ανάμεσα στο νερό και την επιφάνεια του ταμιευτήρα. Η γωνία θ , είναι γωνία επαφής (contact angle), η οποία μετριέται μέσω του πυκνότερου ρευστού που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι το νερό. Σε συνθήκες ισορροπίας οι επιφανειακές τάσεις συνδέονται μεταξύ τους με την εξίσωση Young-Dupre.

$$\text{Εξίσωση Young : } \sigma_{os} - \sigma_{ws} = \sigma_{ow} \cos \theta \quad (4.1)$$

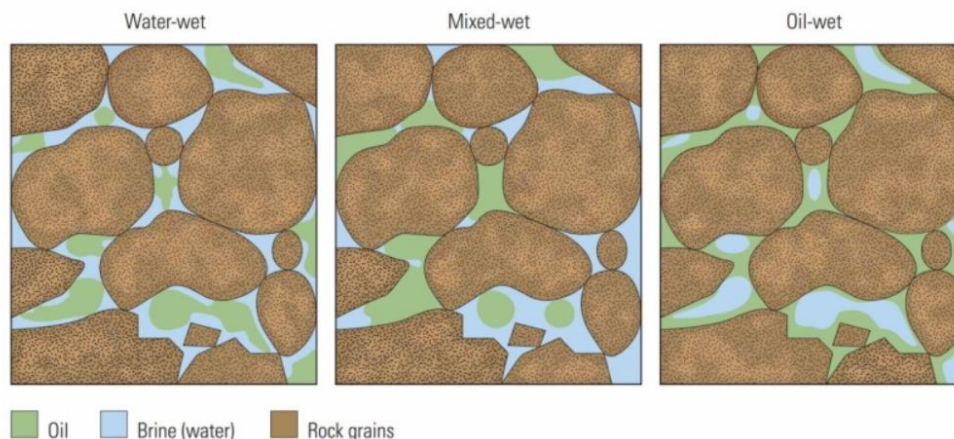
- 1^η περίπτωση: Στην περίπτωση που οι τιμές των επιφανειακών τάσεων σ_{os} και σ_{ws} είναι ίσες μεταξύ τους, η εξίσωση Young (4.1) θα γίνει $\sigma_{ow} \cos \theta = 0$. Όταν η τάση σ_{ws} είναι διαφορετική του μηδενός τότε το συνημίτονο της γωνίας θ θα έχει τιμή 0. Αυτό υποδηλώνει πως η γωνία επαφής θ , είναι 90° . Η διαβρεξιμότητα λοιπόν είναι ουδέτερη ή ενδιάμεσης τιμής (intermediate wettability).

- 2^η περίπτωση: Κατά τη συνθήκη όπου η τάση σws έχει μικρότερη τιμή από την τάση sos, η γωνία επαφής επακόλουθα θα είναι μικρότερη των 90°. Πρακτικά, σε έναν ταμιευτήρα υδρογονανθράκων, αυτό σημαίνει πως η επιφάνεια των κόκκων του ταμιευτήρα περιβάλλεται από το νερό το οποίο εκτοπίζει το πετρέλαιο και το τελευταίο, διεισδύει ανάμεσα στους πόρους του πετρώματος μέχρι να επέλθουν συνθήκες ισορροπίας. Ο ταμιευτήρας χαρακτηρίζεται ως water-wet. Τέτοιοι ταμιευτήρες είναι συνήθως ψαμμιτικά πετρώματα.
- 3^η περίπτωση : Στην αντίθετη περίπτωση όπου η επιφανειακή τάση σws είναι μεγαλύτερη της sos, η γωνία επαφής θα έχει τιμή μεγαλύτερη των 90°. Ο ταμιευτήρας στην προκειμένη περίπτωση θα ανήκει στην κατηγορία oil-wet, δηλαδή η επιφάνεια του πετρώματος-ταμιευτήρα θα καλύπτεται από το πετρέλαιο και το περιεχόμενο ύδωρ θα εντοπίζεται ανάμεσα στους πόρους.
- 4^η περίπτωση : Στην ακραία τιμή των 180 ° πάνω στον ταμιευτήρα υπάρχει πλήρης εξάπλωση πετρελαίου. Η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει την κατάσταση μηδενικής διαβροχής (non-wetting).
- 5^η περίπτωση : Το ακριβώς αντίθετο λαμβάνει χώρα, όταν η γωνία θ έχει τιμή ίση με 0°. Το νερό επικαλύπτει εντελώς την στερεή επιφάνεια του ταμιευτήρα (complete wetting). Βέβαια έχει παρατηρηθεί πως απόλυτη διασπορά των ρευστών των ταμιευτήρων δεν υφίσταται.



Εικόνα 4.5: Περιπτώσεις διαβρεξιμότητας σε τριφασικά συστήματα ²⁰

²⁰<https://perminc.com/resources/fundamentals-of-fluid-flow-in-porous-media/chapter-2-the-porous-medium/multi-phase-saturated-rock-properties/wettability/>



Εικόνα 4.6: Τύποι ταμιευτήρων σε σχέση με την διαβρεξιμότητα ²¹

Η κατανομή των ρευστών εντός των ταμιευτηρίων πετρωμάτων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η διαβρεξιμότητα επηρεάζει την κατανομή των ρευστών μέσα στους πόρους ενός ταμιευτήρα (Forest F. Craig, 1971). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.5, σε έναν ταμιευτήρα όπου το υγρό διαβροχής είναι το νερό, αυτό περιβάλλει τους κόκκους του πετρώματος υπό τη μορφή ενός λεπτού φιλμ. Παράλληλα, το κοίτασμα πετρελαίου, εντοπίζεται “παγιδευμένο” στο κεντρικό σημείο των κόκκων. Το αντίθετο συμβαίνει σε έναν ταμιευτήρα τύπου oil-wet. Στην ενδιάμεση περίπτωση, όπου υπάρχει διαβροχή του ταμιευτήρα τόσο από το νερό όσο και από πετρέλαιο, η κατανομή των ρευστών περιπλέκεται. Σε τέτοιου είδους ταμιευτήρες, οι πιο μικροί πόροι του ταμιευτήρα περιβάλλονται από το νερό ενώ στους μεγαλύτερους πόρους το υγρό διαβροχής είναι το πετρέλαιο (Tiab & Donaldson, 2012).

4.3 Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΕΞΙΜΟΤΗΤΑΣ

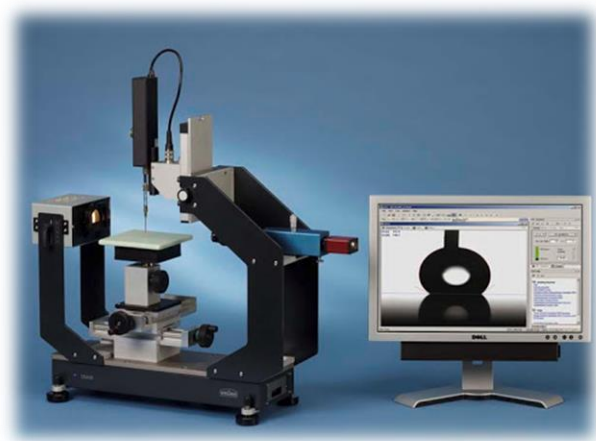
Για τον προσδιορισμό του μεγέθους της διαβρεξιμότητας σε ένα υλικό, γίνεται χρήση διαφόρων μεθόδων. Σε γενικές γραμμές οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για τον σκοπό αυτό, ποσοτικοποιούν την διαβρεξιμότητα και είναι οι ακόλουθες: η μέθοδος Amott, η USBM (US Bureau of Mines) και η μέθοδος της γωνίας επαφής θ (contact angle method).

4.3.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΕΠΑΦΗΣ θ

Με τη μέθοδο της γωνίας επαφής θ , είναι άμεσος ο προσδιορισμός του μεγέθους της διαβρεξιμότητας. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται πολύ συχνά, διότι αναμφισβήτητα είναι πολύ έμπιστη και απλή σε εκτέλεση. Επιπλέον, το πλεονέκτημα της έγκειται στο γεγονός ότι είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί υπό συνθήκες που

²¹http://www.epgeology.com/gallery/image_page.php?image_id=270

προσομοιάζονται με αυτές των ταμιευτήρων (υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης). Για την εκτέλεση της μεθόδου μια σταγόνα πετρελαίου, νερού ή ακόμα και των δύο ρευστών τοποθετείται πάνω στο υπό εξέταση δείγμα πετρώματος, το οποίο είναι τοποθετημένο μέσα σε μια ειδική συσκευή. Με την χρήση γωνιόμετρου γίνεται ο υπολογισμός της γωνίας θ . Στη μέθοδο, γίνεται χρήση κάμερας ή οπτικού συστήματος και λογισμικών τα οποία καταγράφουν το αποτέλεσμα. Θα πρέπει να σημειωθεί πως είναι επιθυμητό τα δείγματα πυρήνων να έχουν ληφθεί πρόσφατα ώστε να μην έχουν οξειδωθεί, να είναι καθαρά και λεία στην επιφάνεια τους. Οι προδιαγραφές εκτέλεσης της μεθόδου είναι αυστηρές και όσον αφορά στην θερμοκρασία, η οποία θα πρέπει να παραμένει σταθερή. Η διάρκεια της μεθόδου εξαρτάται από τον χρόνο που απαιτεί το σύστημα ώστε να επιτευχθεί ισορροπία προσρόφησης του ρευστού. Κάτι τέτοιο μπορεί να διαρκέσει αρκετές εβδομάδες. Παρόλα τα πλεονεκτήματα της μεθόδου, αυτή έχει και μερικά μειονεκτήματα τα οποία πρέπει να αναφερθούν. Η διάρκεια της μεθόδου συγκαταλέγεται σε ένα από αυτά, όπως επίσης και η ανομοιογένεια που παρουσιάζουν οι ταμιευτήρες. Για την ακρίβεια της μέτρησης απαιτείται μια ομοιογενής και επίπεδη στερεή επιφάνεια του ταμιευτήρα, όπως προαναφέρθηκε, κάτι που φυσικά δεν αντιπροσωπεύουν πλήρως τα δείγματα που χρησιμοποιούνται. Τέλος, αν υπάρχουν δύο ρευστά, έχει αποδειχθεί πως το πρώτο ρευστό που θα έρθει σε επαφή με τον ταμιευτήρα θα επηρεάσει την μέτρηση της γωνίας θ . Ενδεικτικά, σύμφωνα με τα πρότυπα SY/T 5153-2007 της βιομηχανίας πετρελαίου, τιμές μετρούμενων γωνιών επαφής από 0° έως 75° , υποδηλώνουν ταμιευτήρες τύπου water-wet, τιμές από 75° έως 105° αφορούν ταμιευτήρες ενδιάμεσης διαβρεξιμότητας ενώ τιμές από 105° έως 180° ανήκουν στα oil-wet συστήματα (Yang, 2016).



Εικόνα 4.7 : Ο εξοπλισμός της μεθόδου μέτρησης της γωνίας επαφής²²

²²http://www.physics.gla.ac.uk/igr/index.php?L1=capabilities&L2=equipment&L3=contact_angle

4.3.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ AMOTT-HARVEY

Πρόκειται για μία ποσοτική μέθοδο ανάλυσης πυρήνων, η οποία στηρίζεται στη συνδυασμένη δράση των διαδικασιών της απορρόφησης ρευστών στο εσωτερικό ενός πυρήνα χωρίς την δράση πιέσεων, αλλά και της εξαναγκασμένης έγχυσης ρευστών εντός του ίδιου πυρήνα. Η μέθοδος απαιτεί την χρήση διυλισμένου πετρελαίου και νερού πλούσιου σε χλωριούχο νάτριο (NaCl). Η διαδικασία περιλαμβάνει πέντε διαδοχικά στάδια. Αναλυτικότερα:

1. Κατά το αρχικό στάδιο της διαδικασίας συλλέγεται ένα δείγμα πετρώματος, το οποίο περιέχει μια ποσότητα πετρελαίου και κορεσμένου νερού *Saturation Water (A)*.
2. Κατά το δεύτερο στάδιο, αυτό τοποθετείται σε ένα ειδικά κατασκευασμένο δοχείο με περιεχόμενο νερό πλούσιο σε χλωριούχο νάτριο. Κατατάσσοντας το δείγμα στην κατηγορία water-wet, συνεπάγεται η απορρόφηση ποσότητας νερού στο εσωτερικό του, με αποτέλεσμα την αποβολή πετρελαίου από τον πυρήνα και την εμφάνιση του λόγω μικρότερης πυκνότητας στην επιφάνεια του δοχείου. Μέσω αυτής της διαδικασίας επιτυγχάνεται η φυσική αύξηση του κορεσμού σε νερό *Saturation Water (B)*. Στη διεθνή βιβλιογραφία η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως **spontaneous imbibition**. Συμπερασματικά, κατά το στάδιο αυτό επιτυγχάνεται η απορρόφηση νερού από τον πυρήνα χωρίς αυτό να υπόκειται σε συνθήκες υψηλής πίεσης. Στη συνέχεια γίνεται η καταγραφή του όγκου του πετρελαίου.
3. Κατά το 3^ο στάδιο της διαδικασίας, ο πυρήνας εξάγεται και απομακρύνεται από το δοχείο και έπειτα τοποθετείται σε έναν υποδοχέα πυρήνων (core holder). Στο στάδιο αυτό μέσω μιας αντλίας πίεσης, πραγματοποιείται εξαναγκασμένος κορεσμός νερού εντός του δείγματος, διαδικασία ευρέως γνωστή με την ονομασία **forced injection**. Ο κορεσμός του πυρήνα σε νερό μεταβάλλεται σε *Saturation Water (C)*. Ο κορεσμός σε πετρέλαιο σε αυτό το στάδιο υπολογίζεται από την σχέση(4.2): $Saturation\ Oil(C) = 1 - Saturation\ Water(C)$
4. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τη βύθιση του δείγματος στο αναποδογυρισμένο δοχείο, το οποίο αυτή τη φορά περιέχει διυλισμένο πετρέλαιο αντί για νερό. Το δείγμα υπόκειται σε μία δεύτερη διαδικασία απορρόφησης χωρίς πίεση, αυτή τη φορά, πετρελαίου. Το νερό που αποβάλλεται από τον πυρήνα υπολογίζεται όπως προηγήθηκε και ο υπολογισμός του πετρελαίου στο δεύτερο στάδιο. Ο κορεσμός σε νερό μεταβάλλεται σε *Saturation Water (D)*.

5. Στο τελικό στάδιο της μέτρησης λάμβάνει χώρα η τοποθέτηση στον υποδοχέα πυρήνων και η δεύτερη έγχυση με τη χρήση αντλίας (forced oil injection) . Το ρευστό που εγχύεται είναι διυλισμένο πετρέλαιο αντί νερού και κατα αυτό τον τρόπο το νερό αποβάλλεται από τον πυρήνα. Το κορεσμένο πετρέλαιο συμβολίζεται ως Saturation Oil (E).

Ο δείκτης Amott, που θα χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της διαβρεξιμότητας υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση : $I_{AMOTT} = I_{WATER} - I_{OIL}$ (4.3)

Όπου:

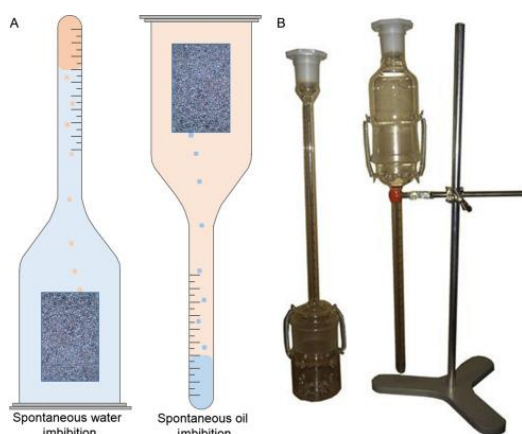
- I_{AMOTT} : ο δείκτης Amott
- I_{WATER} : ο δείκτης νερού Amott
- I_{OIL} : ο δείκτης πετρελαίου Amott

$$I_{WATER} = \frac{SaturationWater(B) - SaturationWater(A)}{SaturationWater(C) - SaturationWater(A)} \text{ και } I_{OIL} = \frac{SaturationOil(D) - SaturationOil(C)}{SaturationOil(E) - SaturationOil(C)}$$

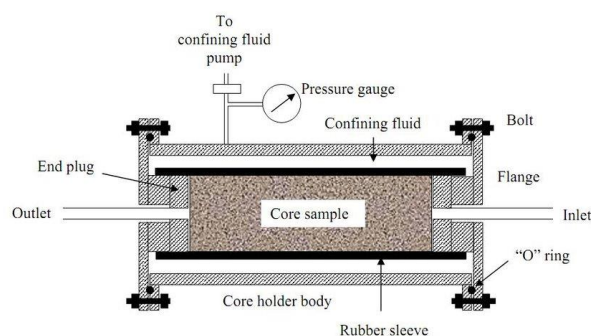
Συνεπώς υπολογίζοντας του δύο δείκτες ξεχωριστά η σχέση (4.3) μπορεί να λάβει τις παρακάτω τιμές.

ΔΕΙΚΤΗΣ AMOTT	ΤΙΜΕΣ	ΔΕΙΓΜΑ
I_{AMOTT}	1 έως 0,3	Water-wet
I_{AMOTT}	0,3 έως -0,3	Ενδιάμεσης διαβρεξιμότητας
I_{AMOTT}	-0,3 έως -1	Oil -wet

Πίνακας 4.1: Προσδιορισμός της διαβρεξιμότητας ενός σχηματισμού με βάση τις τιμές του δείκτη Amott.



Εικόνα 4.8: Δοχείο Amott²³



Εικόνα 4.9: Υποδοχέας πυρήνων²⁴

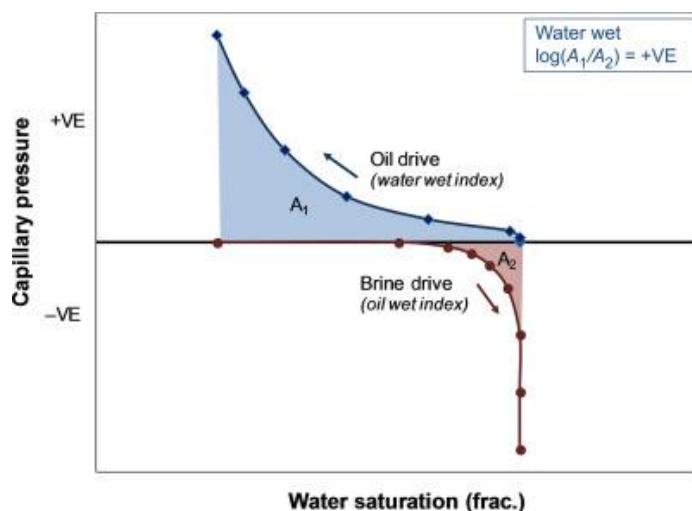
²³ <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-B978044463533400007X-f07-10-9780444635334.jpg>

²⁴ https://www.researchgate.net/profile/Ali_Yahya_Jirjees/publication/321038126/figure/fig10/AS:560298421231632@1510596961506/Schematic-of-a-core-holder.png

4.3.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ USBM (United States Bureau of Mines)

Πρόκειται για μια ποσοτική μέθοδο εξέτασης της διαβρεξιμότητας, η οποία λειτουργεί συνδιαστικά με τα αποτελέσματα της μεθόδου Amott. Τα δεδομένα της μεθόδου εξάγονται από τις καμπύλες τριχοειδούς πίεσης, οι οποίες αναπαριστούν τις μεταβολές της τριχοειδούς πίεσης σε συνάρτηση με τον κορεσμό σε νερό κατά την διαδικασία της μεθόδου Amott. Ο δείκτης της μεθόδου USBM συμβολίζεται με το γράμμα W και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$W = \log \left(\frac{A_1}{A_2} \right)$$



Εικόνα 4.10: Καμπύλη τριχοειδούς πίεσης²⁵

Οι τιμές του δείκτη W κυμαίνονται από +1 έως -1. Οι ακραίες αυτές καταστάσεις αντιπροσωπεύουν τις καταστάσεις απόλυτης διαβροχής από νερό και από πετρέλαιο αντίστοιχα. Οι τιμές της ενδιάμεσης διαβρεξιμότητας κυμαίνονται κοντά στο 0.

²⁵<https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-B978044463533400007X-f07-12-9780444635334.jpg>



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επεδίωξε να αναλύσει μερικές από τις πετροφυσικές ιδιότητες των ταμιευτήριων πετρωμάτων. Στην επιστήμη της Μηχανικής Ταμιευτήρων και Πετρελαίου οι ιδιότητες αυτές αποτελούν κρίσιμα σημεία, τόσο κατά το ερευνητικό στάδιο όσο και κατά το παραγωγικό στάδιο εκμετάλλευσης των υδρογονανθράκων. Η Πετροφυσική συμβάλλει σημαντικά στη μεγιστοποίηση της οικονομικής ανάκτησης των κοιτασμάτων αλλά και στην κατανόηση των φυσικών παραμέτρων του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και των διάφορων ρευστών του ταμιευτήρα. Ακόμη, τα αποτελέσματα μιας ανάλογης έρευνας αξιοποιούνται για την ερμηνεία της γεωμηχανικής συμπεριφοράς των σχηματισμών. Για παράδειγμα, είναι γνωστό, ότι η αντοχή ενός σχηματισμού μειώνεται με την αύξηση της ιδιότητας του πορώδους ενώ η παραμορφωσιμότητα αυξάνεται. Η εκμεταλλευσιμότητα των κοιτασμάτων αξιολογείται με βάση τις πετροφυσικές αναλύσεις και τα μεγέθη των αποθεμάτων. Όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες του ταμιευτήρα, τόσο μεγαλύτερα και τα αποθέματα αυτού. Επιπλέον, μεγάλη σημασία διαδραματίζει η κατανομή του πετρελαίου και του αερίου εντός των σχηματισμών. Γι' αυτόν το λόγο η ιδιότητα της διαβρεξιμότητας έχει μεγάλη αξία. Οι σύγχρονες μέθοδοι πετροφυσικών αναλύσεων μέσω ανάλυσης πυρήνων, διαγραφιών, εργαστηριακών μετρήσεων και διάφορων λογισμικών, καθιστούν την Πετροφυσική σαν έναν από τους πλέον απαραίτητους τομείς της Μηχανικής Πετρελαίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής βιβλιογραφία

Abou-Kassem , J., FarouqAli , S., & RafiqIslam , M. (2006). *Petroleum Reservoir Simulation A Basic Approach*. Houston: Gulf Publishing Company.

Ahmed, T. (2006). *Working guide to reservoir rock properties and fluid flow*. Elsevier.

Coates, G. R., L. X., & Manfred G. Prammer. (1999). *NMR Logging Principles & Applications*. United States of America: Halliburton Energy Services.

Djuang, J. (2019). *The Story of Oil and Gas: How Oil and Gas Are Explored, Drilled and Produced*.

Dullien, F. (1979). *Porous Media Fluid Transport and Pore Structure*. Canada: Academic Press.

Forest F. Craig, J. (1971). *The Reservoir Engineering Aspects Of Waterflooding*. New York: Society of Petroleum Engineers of AIME.

Giesche, H. (2006). *Mercury Porosimetry: A General (Practical) Overview*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

J.Peters, E. (2012). *Advanced Petrophysics Volume 2 Dispersion, Interfacial Phenomena/Wettability, Capillarity/Capillary Pressure, Relative Permeability*. Live Oak Book Company.

Knut, B. (2010). *Petroleum Geoscience From Sedimentary Environments to Rock Physics*. Berlin Heidelberg: SpringerLink.

Krygowski, D. A. (1995,2000,2003). *Guide to Petrophysical Interpretation*. Austin, Texas.

Lucia, F. J. (2007). *Carbonate Reservoir Characterization An Integrated Approach 2nd edition*. Texas, USA: Springer.

Peters, E. J. (2012). *Advanced Petrophysics: Volume 1: Geology, Porosity, Absolute Permeability, Heterogeneity and Geostatistics*. Austin : Live Oak Book Company.

Ramm, M., & Bjorlykke, K. (1994). *POROSITY/DEPTH TRENDS IN RESERVOIR SANDSTONES ASSESSING THE QUANTITATIVE EFFECTS OF VARYING PORE-PRESSURE, TEMPERATURE HISTORY AND MINERALOGY,NORWEGIAN SHELF DATA*. University of Oslo, Department of Geology, Oslo.

Schön, J. (2011). *Physical Properties of Rocks : A Workbook* (Τόμ. 8). (J. Cubitt, Επιμ.) Oxford, Great Britain: Elsevier.

Schön, J. (2015). *Basic Well Logging and Formation Evaluation*. bookboon.

Speight, J. G. (2014). *The Chemistry and Tehnology of Petroleum fifth edition*. New York: CRC Press Taylor & Francis Group.

Tiab , D., & Donaldson, E. (2004). *Petrophysics Theory and Practise of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties second edition*. Elsevier.

Tiab, D., & Donaldson, E. (2012). *Petrophysics Theory and Practice of Measuring Reservoir Third Edition* (Τόμ. III). United States of America: Gulf Professional Publishing Elsevier.

Yang, S. (2016). *Fundamentals of Petrophysics Second Edition*. Beijing: Petroleum Industry Press and Springer.

Zinszner, B., & Pellerin, F. M. (2007). *A Geoscientist's Guide To Petrophysics*. Paris: TECHNIP.

Ελληνική βιβλιογραφία

Αχιλιάς, Δ., Ελευθεριάδης, Ι., & Νικολαΐδης, Ν. (2015). *Βιομηχανική Οργανική Χημεία*. Εκδόσεις Κάλλιπος.

Γεωργακόπουλος, Α. Ν. (2020). *ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ -Διδακτικές σημειώσεις*. Θεσσαλονίκη, Ελλάδα.

Καβαβάδης Μ., & Πανταζίδου Μ. (2007). *ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ*. Έκδοση Εθνικού Μετσόβειου Πολυτεχνείου.

Καλλέργης, Γ. Α. (1999). *Εφαρμοσμένη - περιβαλλοντική υδρογεωλογία*. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος.

Τσιραμπίδης, Α. (2008). *Ιζηματογενή Πετρώματα*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Γιαχούδη.

Τσούρλος, Π., & Βεργεμέζης, Γ. (χ.χ.). *Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ*. (Τ. Γ. ΑΠΘ, Επιμ.) Θεσσαλονίκη.

Ψιλοβίκος, Α., & Ψιλοβίκος, Ά. (2010). *Ιζηματολογία*. Εκδόσεις Τζιόλα.