



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ-ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΙΤΛΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: « Πετροφυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων – ταμιευτήρων υδρογονανθράκων»

ΤΗΣ ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ: Ταξοπούλου Μαρία Ελένη

ΑΕΜ: 5049

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Γεωργακόπουλος Ανδρέας, Καθηγητής

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναλύει τις ιδιότητες των πετρωμάτων που φιλοξενούν τους υδρογονάνθρακες, δηλαδή το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η ανάλυση των ιδιοτήτων των πετρελαϊκών συστημάτων σε ότι αφορά τα πετρώματα μέσα στα οποία βρίσκονται τα ρευστά μετά την πρωτογενή μετανάστευσή τους από το μητρικό πέτρωμα (source rock). Οι ιδιότητες αυτές διαφοροποιούνται ανάλογα με την ορυκτολογική και χημική σύσταση των πετρωμάτων αυτών, την τεκτονική καταπόνησή τους, κ.α. Στη συγκεκριμένη εργασία θα αναλυθούν γενικώς οι δύο μεγάλες κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται τα πετρώματα – ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, ενώ θα δοθεί εκτενέστερη έμφαση στους ψαμμιτικούς ταμιευτήρες, καθώς είναι περισσότερο διαδεδομένοι σε παγκόσμια κλίμακα, αναφορικά με τα συμβατικά πετρελαϊκά συστήματα (conventional petroleum systems).

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	5-7
Κεφάλαιο 2: Πετροφυσικές ιδιότητες των ταμιευτήρων υδρογονανθράκων.....	8-34
2.1. Χημική και ορυκτολογική σύσταση.....	9-11
2.2. Πορώδες.....	12-14
2.2.1. Ολικό πορώδες – Ενεργό πορώδες.....	12-13
2.2.2. Πρωτογενές πορώδες – Δευτερογενές πορώδες.....	13-15
2.3. Διαπερατότητα.....	16-20
2.3.1. Ο νόμος Darcy.....	16-17
2.3.2. Οριζόντια – κάθετη διαπερατότητα.....	18-19
2.3.3. Σχέση πορώδους – διαπερατότητας.....	20-21
2.4. Κορεσμός ρευστών.....	21-25
2.5. Διαβρεξιμότητα.....	25-29
2.6. Τριχοειδής πίεση.....	30-33
Κεφάλαιο 3: Κυριότερες πετρολογικές κατηγορίες πετρωμάτων – ταμιευτήρων υδρογονανθράκων. Ψαμμιτικοί ταμιευτήρες.....	34-56
3.1. Κυριότερες κατηγορίες πετρωμάτων – ταμιευτήρων.....	35-38
3.1.1. Ανθρακικοί ταμιευτήρες (ασβεστόλιθοι και δολομίτες).....	39-40
3.2. Ψαμμιτικοί ταμιευτήρες (κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα).....	41-53
3.2.1. Βασικά χαρακτηριστικά.....	42-44
3.2.2. Κατηγορίες ψαμμιτικών πετρωμάτων.....	45-48

3.2.3. Διαγένεση ψαμμιτικών ταμιευτήρων.....	48-51
3.2.3.1. Διάλυση ορυκτών.....	51-52
3.3. Γεωχημική εξέλιξη της οργανικής ύλης. Διαγένεση – Καταγένεση – Μεταγένεση.....	53-55
Κεφάλαιο 4:Περιγραφή των ιδιοτήτων του δελταϊκού ταμιευτήρα του βορειοδυτικού Hutton Field στη Βόρεια Θάλασσα.....	56-69
4.1. Εισαγωγή.....	57-58
4.2. Στρωματογραφία.....	58-62
4.3. Γεωμετρία ταμιευτήρα – παγίδευση υδρογονανθράκων.....	63-64
4.4. Πετρογραφικοί τύποι.....	64-65
4.5. Πετροφυσικές παράμετροι και ποιότητα ταμιευτήρων.....	66-67
4.6. Συμπεράσματα	68
Παραπομπές.....	69-71
Βιβλιογραφία.....	72-73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κοιτασματολογία πετρελαίου δομείται από τις πιο σπουδαίες γεωλογικές αρχές, με τη βοήθεια των οποίων εντοπίζονται τα αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος είναι μια χρονοβόρα και ιδιαίτερα δαπανηρή διαδικασία, όμως το αναμενόμενο κέρδος, λόγω της ζήτησης των υδρογονανθράκων, την καθιστά μια εξαιρετικά επικερδή επένδυση.

Η έρευνα και εκμετάλλευση των υδρογονανθράκων ολοένα και εξελίσσεται, καθώς με το πέρασμα του χρόνου τα περισσότερα κοιτάσματα στον κόσμο έχουν ανακαλυφθεί και πολλά από αυτά έχουν τεθεί σε εκμετάλλευση. Παλαιότερα, λόγω της έλλειψης τεχνολογίας και εξειδίκευσης στον τομέα, η εκμετάλλευση των υδρογονανθράκων περιοριζόταν μόνο στα πλέον προσβάσιμα κοιτάσματα, τα οποία πλέον έχουν σχεδόν εξαντληθεί. Η αυξανόμενη ζήτηση των υδρογονανθράκων, σε συνδυασμό με την εξέλιξη της τεχνολογίας και τη δημιουργία προηγμένων τεχνικών απόληψης και επεξεργασίας, έχει ως αποτέλεσμα την αναζήτηση νέων κοιτασμάτων σε δύσβατες περιοχές, κυρίως θαλάσσιες (offshore), καθώς και στην εκμετάλλευση μη συμβατικών συστημάτων πετρελαίου (unconventional oil systems), τα οποία αποτελούν πρόκληση για τους επιστήμονες.

Η πιθανότητα ενός κοιτάσματος υδρογονανθράκων να κριθεί εκμεταλλεύσιμο εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων. Στο πλαίσιο ενός ερευνητικού προγράμματος εκμετάλλευσης ενός κοιτάσματος εξετάζεται μεταξύ άλλων η ευκολία πρόσβασης σε αυτό, το βάθος ταφής, ο τύπος των υδρογονανθράκων, το είδος των πετρωμάτων μέσα στα οποία είναι παγιδευμένοι οι υδρογονάνθρακες καθώς και τα πιθανά αποθέματα τα οποία υπολογίζονται τόσο με γεωφυσικές μεθόδους όσο και με επί τόπου (in situ) δοκιμές (ερευνητικές γεωτρήσεις). Η ανάλυση των παραπάνω παραμέτρων, σε συνδυασμό με οικονομικά, γεωπολιτικά και πολιτισμικά κριτήρια, καθορίζει κατά πόσο ένα εν δυνάμει κοιτάσμα είναι δυνατό να τεθεί σε εκμετάλλευση και να αποφέρει κέρδος.

Είναι πολύ σημαντικό να γίνουν αντιληπτές οι γεωλογικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα και η σημασία τους στη δημιουργία ενός κοιτάσματος πετρελαίου και φυσικού αερίου, καθώς διαμέσου αυτών, η ανάλυση του πετρελαϊκού συστήματος διαχωρίζεται σε επιμέρους κάδους της γεωλογίας.

Πρωταρχικό ρόλο παίζει ο καθορισμός του τύπου του πετρώματος μέσα στο οποίο δημιουργούνται οι υδρογονάνθρακες. Εφόσον η όλη διαδικασία λαμβάνει χώρα ως επί το πλείστον μέσα σε ιζηματογενή πετρώματα, είναι λογικό η *πετρολογία ιζηματογενών πετρωμάτων* να κατέχει μια σημαντική θέση στην ανάλυση ενός πετρελαϊκού συστήματος. Επιπλέον, η μοντελοποίηση (2D/3D modeling) των ιζηματογενών πετρωμάτων και λεκανών, βοηθά στην εύρεση πιθανών παγίδων πετρελαίου (traps), μητρικών πετρωμάτων (source rocks), ταμιευτήρων (reservoirs) και πετρωμάτων – καλυμμάτων πετρελαίου (cap rocks).

Μια εξίσου σημαντική θέση κατέχει ο κλάδος της *στρωματογραφίας* (stratigraphy) . Πιο συγκεκριμένα, συνδυάζοντας τον βιοστρωματογραφικό συσχετισμό και την μικροπαλαιοντολογία μπορούν να βγουν σημαντικά συμπεράσματα για την παρουσία ή απουσία υδρογονανθράκων, καθώς και για το είδος και την έκταση των υδρογονανθράκων που βρίσκονται στο βάθος. Τα δεδομένα αυτά βοηθούν σημαντικά τον υπολογισμό του συνολικού κέρδους από την εξόρυξη του πετρελαίου, αφού διαφορετικοί τύποι αργού πετρελαίου (crude oil) δέχονται διαφορετική επεξεργασία ως το τελικό προϊόν, μια διαδικασία που μπορεί να είναι αρκετά δαπανηρή. Ο στρωματογραφικός συσχετισμός (correlation) γίνεται κυρίως κατά το στάδιο των ερευνητικών γεωτρήσεων, καθώς οι πυρήνες των γεωτρήσεων δίνουν πληροφορίες τόσο για την ορυκτολογική και πετρολογική σύσταση των πετρωμάτων, όσο και για την παρουσία απολιθωμάτων που μπορεί να είναι δείκτες υδρογονανθράκων.

Ο προσδιορισμός των φάσεων ιζηματογένεσης, και κατ' επέκταση και του περιβάλλοντος απόθεσης, δίνει πληροφορίες για την αρχική σύσταση των ταμιευτήρων. Οι φάσεις ιζηματογένεσης, ανάλογα με το περιβάλλον, περιέχουν και διαφορετικά είδη οργανικής ύλης, τα οποία και δίνουν διαφορετικούς τύπους πετρελαίου. Επίσης, οι διαδικασίες διαγένεσης και οι χημικές διαδικασίες που έλαβαν χώρα κατά την εξελικτική διαδικασία

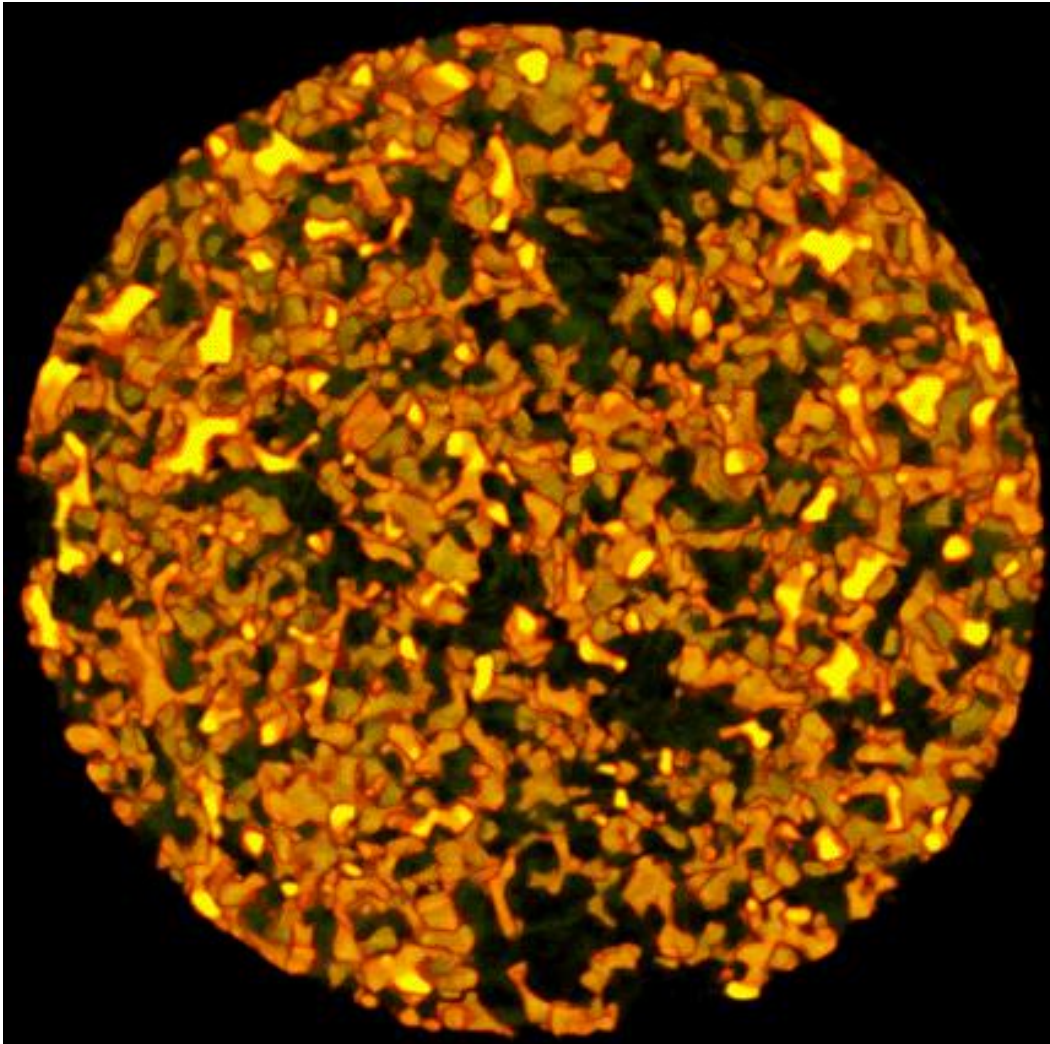
δίνουν πληροφορίες για τις ιδιότητες του πετρώματος που φιλοξενεί τους υδρογονάνθρακες. Πληροφορίες για τον προσδιορισμό του πορώδους (porosity), της διαπερατότητας (permeability), της διαβρεξιμότητας (wettability) κ.α. είναι εκείνες τις οποίες συλλέγει ο γεωλόγος πετρελαίου, ο οποίος ασχολείται με τις ιδιότητες του ταμιευτήρα ενός εν δυνάμει παραγωγικού κοιτάσματος πετρελαίου.

Άλλοι κλάδοι ζωτικής σημασίας για την έρευνα και ανάλυση ενός πετρελαϊκού συστήματος είναι η οργανική γεωχημεία, η τεκτονική γεωλογία, οι μέθοδοι ενσύρματων γεωφυσικών καταγραφών (wireline logs), οι οποίες μετρούν φυσικές παραμέτρους και δίνουν πληροφορίες σχετικά με τις δομές του υπεδάφους (ρήγματα, μεγαπτυχές) που μπορεί να λειτουργούν ως «θύλακες» υδρογονανθράκων, η χαρτογράφηση του κοιτάσματος, καθώς και η χρήση εξελιγμένων μηχανημάτων για την δειγματοληψία (sampling) και ανάλυση in situ των διαφορετικών πετρωμάτων, μέσα στα οποία φιλοξενούνται οι υδρογονάνθρακες. Η πραγματοποίηση των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων γίνεται σε ένα πιο προχωρημένο στάδιο, και εφόσον υπάρχουν θετικές ενδείξεις για παρουσία υδρογονανθράκων από την ανάλυση πληροφοριών κατά τα προκαταρκτικά στάδια της έρευνας (desk study). Τούτο συμβαίνει διότι μια γεώτρηση πετρελαίου είναι δαπανηρή και χρονοβόρα, όμως ταυτόχρονα είναι ο μόνος τρόπος να εξακριβωθεί στο εκατό τοις εκατό η ύπαρξη ή η απουσία υδρογονανθράκων.

Αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας με τίτλο «Πετροφυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων – ταμιευτήρων υδρογονανθράκων» είναι:

- Η ανάλυση των βασικότερων πετροφυσικών ιδιοτήτων ενός ταμιευτήρα υδρογονανθράκων,
- Η παρουσίαση των κύριων κατηγοριών των πετρωμάτων – ταμιευτήρων και η λεπτομερέστερη αναφορά στους ψαμμιτικούς ταμιευτήρες,
- Η αναφορά σε ένα πετρελαϊκό σύστημα στην Ευρώπη και η περιγραφή των ιδιοτήτων του συγκεκριμένου ταμιευτήρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΤΡΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ



Μικροσκοπική εικόνα ψαμμίτη όπου φαίνεται ευδιάκριτα το πορώδες. Πηγή: Texas Geosciences,
<http://www.ctlab.geo.utexas.edu/terrafb/>

Πρωταρχικός στόχος για τον χαρακτηρισμό ενός ταμιευτήρα υδρογονανθράκων είναι η «κατασκευή» μιας γενικής εικόνας της χημικής και ορυκτολογικής σύστασης, καθώς και των πετροφυσικών ιδιοτήτων του σε τρεις διαστάσεις. Οι κύριες πετροφυσικές ιδιότητες που θα αναφερθούν παρακάτω είναι το πορώδες, η διαπερατότητα, η σχετική διαπερατότητα, η τριχοειδής πίεση, η διαβρεξιμότητα και ο κορεσμός σε υδρογονάνθρακες.

2.1 Χημική και ορυκτολογική σύσταση

Τα πετρώματα που λειτουργούν ως αποθηκευτικοί χώροι του πετρελαίου, μετά τη δημιουργία του από τη διάσπαση οργανικών ενώσεων, αποτελούνται από χημικές ενώσεις συγκεκριμένων ορυκτών. Οι παραπάνω σχηματισμοί θα αναφέρονται στο εξής ως ταμιευτήρες (reservoirs) υδρογονανθράκων.

Οι σχηματισμοί αυτοί μπορεί να διαφέρουν από ένα κοίτασμα σε ένα άλλο, ή ακόμη και σε επάλληλους ορίζοντες του ίδιου κοιτάσματος. Μπορεί να αποτελούνται από πυριγενή πετρώματα, όπως ρυόλιθους, γρανίτες, σερπεντινίτες, ελαφρά ή ισχυρά μεταμορφωμένα πετρώματα με ιδιαίτερες τεκτονικές δομές, όπως γνεύσιοι, σχιστόλιθοι, ή και από συνήθη ιζηματογενή πετρώματα, όπως ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, ασβεστόλιθοι, δολομίτες ⁽¹⁾ Ωστόσο, η κάθε κατηγορία πετρωμάτων προϋποθέτει συγκεκριμένες ορυκτολογικές και πετροφυσικές παραμέτρους ώστε να συνιστά έναν εν δυνάμει ταμιευτήρα. Από την ορυκτολογική σύσταση του ταμιευτήρα λαμβάνονται ιδιαίτερα χρήσιμες πληροφορίες, τόσο για τον τύπο των υδρογονανθράκων που φιλοξενούνται, όσο και για τα αποθέματα, το ποσοστό ανάκτησής τους, αλλά και τη δυσκολία εκμετάλλευσης του κοιτάσματος.

Τα ιζηματογενή πετρώματα αποτελούν περίπου το 66% του συνόλου των πετρωμάτων της Γης και καλύπτουν πάνω από το 75% της επιφάνειάς της ⁽²⁾ Καθώς τα πιο εμπορικά εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα βρίσκονται μέσα σε ιζηματογενή reservoirs, τα πετρώματα αυτά είναι

χρήσιμα για τη μελέτη των πετροχημικών ιδιοτήτων και τη μηχανική των ταμιευτήρων πετρελαίου. Η ερμηνεία τους γίνεται δυνατή με την εξέταση και περιγραφή των διεργασιών υποβάθμισης του πετρώματος, από τη συγκόλληση των κόκκων και τη διαγένεσή του, ως την τωρινή του μορφή και την παρουσία ή απουσία δευτερογενών γεωλογικών δομών.

Ο διαχωρισμός των κύριων κατηγοριών ιζηματογενών πετρωμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί βάσει της προέλευσης τους (μηχανικής, χημικής ή βιολογικής) και της σύστασής τους (Πίνακας 2.1).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: ΤΑ ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ⁽³⁾		
Ιζηματογενή πετρώματα		
Μηχανισμός	Σχηματισμός	Σύσταση
Μηχανική προέλευση	Ψαμμίτης	Χαλαζίτης – Κόκκοι Qtz δελταϊκής προέλευσης
		Αρκόζη (Fs-ούχος αρενίτης) – 20% + κόκκοι αστρίων
		Γραουβάκης – Πτώχα ταξινομημένοι κόκκοι άλλων πετρωμάτων με αστρίους και αργιλικά ορυκτά
		Ασβεστώδη – Θραύσματα ασβεστόλιθου
	Εύθρυπτη άμμος	Κλαστικά – Χαλαρά τσιμεντοποιημένοι κόκκοι άλλων πετρωμάτων
	Μη συμπτυκνωμένη άμμος	Κλαστικά – Χαλαρή άμμος – κόκκοι άλλων πετρωμάτων
	Ιλύολιθος	Κλαστικά – Συμπαγή, τσιμεντοποιημένα, λεπτόκοκκα πετρώματα με μέγεθος κόκκων <1/16 bmm
Χημική προέλευση	Κροκαλοπαγή	Χαλίκια τσιμεντοποιημένα με πηλό και λεπτόκοκκη άμμο
	Σχιστή άργιλος	Άργιλος – Συμπαγείς λεπτόκοκκοι σχηματισμοί με μέγεθος κόκκων <1/256 bmm. Συνήθως ελασματοειδή σε καθορισμένα οριζόντια στρώματα. Όπως και οι πετρελαιοφόροι σχίστες περιέχουν οργανική ύλη (κηρογόνο)
		Εβαπορίτες
		Αλίτες και κάποιοι ασβεστόλιθοι
		-Γύψος ($CaSO_4H_2O$)
		-Ανυδρίτης ($CaSO_4$)
		-Αλίτης ($NaCl$)

		-Ασβεστόλιθος (CaCO_3)
	Δολομίτης [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]	-Ανθρακικά – Χημική αντίδραση με ασβεστόλιθο [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]
	Ασβεστόλιθος	Ανθρακικά – Βιολογική ελευθέρωση ασβεστίου και σχηματισμός CaCO_3
Βιολογική προέλευση	Ύφαλοι	Ανθρακικά – Υπολείμματα απολιθωμάτων θαλάσσιων οργανισμών
	Γη διατόμων	Πυριτιούχα υπολείμματα μικροσκοπικών θαλάσσιων φυτών (φυτοπλαγκτόν)

Ως γνωστόν, οι φυσικές ιδιότητες των ιζηματογενών πετρωμάτων ελέγχονται από την πρωτογενή τους σύσταση και διαφοροποιούνται κατά τη διάρκεια της διαγένεσης.

- Μηχανική προέλευση: Με τη δράση του νερού, του αέρα ή του πάγου αποκολλώνται κόκκοι από το μητρικό πέτρωμα, που μπορεί να είναι πυριγενές, ιζηματογενές ή μεταμορφωμένο.
- Χημική προέλευση: Από καταβύθιση των συστατικών ιόντων διάφορων διαλυμάτων εξαιτίας της έντονης εξάτμισης που δημιουργεί τους εβαπορίτες.
- Βιολογική προέλευση: Από συσσώρευση των σκελετικών στοιχείων διάφορων ζωικών ή φυτικών οργανισμών.

Το πορώδες αποτελεί μια θεμελιώδη ογκομετρική ιδιότητα των πετρωμάτων η οποία είναι σημαντική στην εκμετάλλευση υδρογονανθράκων, καθώς αντιπροσωπεύει την σχετική αποθηκευτική ικανότητα ενός ρεζερβουάρ και επηρεάζει τις περισσότερες φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων, όπως για παράδειγμα την ελαστική ταχύτητα κύματος, την ηλεκτρική αντίσταση ή την πυκνότητα. Ως *πορώδες* ορίζεται ο λόγος του συνολικού όγκου των πόρων ενός ιζηματογενούς πετρώματος, προς το συνολικό όγκο του πετρώματος αυτού, και ο λόγος αυτός προσδιορίζει το τμήμα το οποίο δεν καταλαμβάνεται από στερεά φάση.⁽⁴⁾

2.2.1 Ολικό Πορώδες – Ενεργό πορώδες

Το πορώδες εκφράζεται ως κλάσμα όγκου (αδιάστατο μέγεθος) ή επί τοις εκατό (%) με βάση τις παρακάτω εξισώσεις:

$$(1) \text{ Ολικό πορώδες: } Pt = \frac{V_p}{V_r} \times 100$$

$$(2) \text{ Ενεργό πορώδες: } Pe = \frac{V_i}{V_r} \times 100$$

όπου:

Pt ολικό πορώδες,
 Pe ενεργό πορώδες,
 V_p συνολικός όγκος πόρων,
 V_i όγκος επικοινωνούντων πόρων,
 V_r όγκος ιζήματος (δείγμα),

Η εξίσωση (1) αναφέρεται στο *απόλυτο ή ολικό πορώδες*, το οποίο μετρά όλα τα κενά διαστήματα μέσα στο ιζηματογενές πέτρωμα, ανεξάρτητα αν επικοινωνούν μεταξύ τους ή όχι.

Αν ληφθούν υπ' όψιν μόνο οι πόροι που επικοινωνούν μεταξύ τους και μετρηθεί ο λόγος του συνολικού όγκου τους (V_i) προς το συνολικό όγκο του ιζηματογενούς πετρώματος (V_r), το κλάσμα αυτό χαρακτηρίζεται ως το *ενεργό πορώδες* του πετρώματος (2). Για τη μελέτη των ταμιευτήρων πρακτική αξία έχει ο υπολογισμός του ενεργού πορώδους, γιατί επιτρέπει την εκτίμηση της πραγματικής δυνατότητας απόληψης των αποθηκευμένων υδρογονανθράκων.

Θεωρητικά οι τιμές για το πορώδες κυμαίνονται από 0% έως 100%, όμως πρακτικά είναι 5-25%, ενώ μεγαλύτερες τιμές αποτελούν εξαιρετικές περιπτώσεις ιδιαίτερα ευνοϊκές για την αποθήκευση και παραγωγή πετρελαίου. ⁽⁵⁾

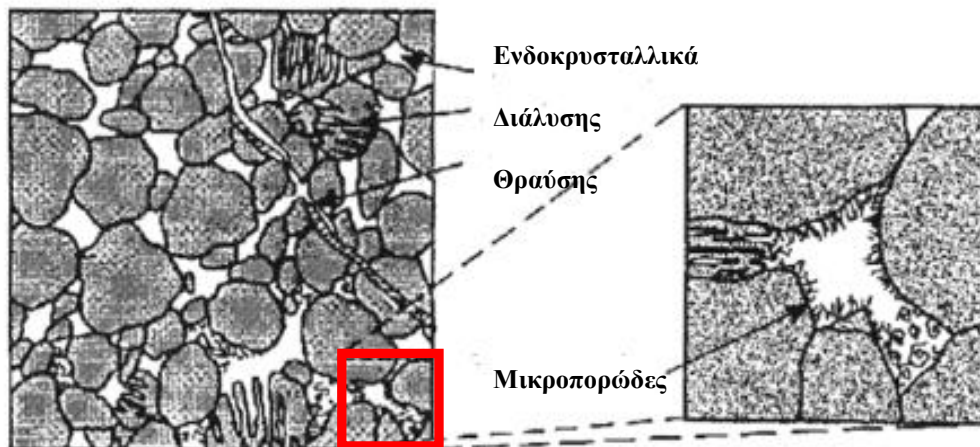
2.2.2.: Πρωτογενές – Δευτερογενές πορώδες

Μια δεύτερη διάκριση του πορώδους αποτελεί ο διαχωρισμός σε πρωτογενές και δευτερογενές πορώδες. Το *πρωτογενές πορώδες* ορίζεται ως το πορώδες που υπάρχει στο πέτρωμα κατά την απόθεσή του. Εξαρτάται από το σχήμα, το μέγεθος και τη διάταξη των κόκκων, ενώ μπορεί να αλλάξει και να μειωθεί κατόπιν συμπίεσης των πετρωμάτων ή μετά από διαγενετικές διεργασίες που σχετίζονται με τη ροή υπόγειων νερών. Οι βασικές διεργασίες σχηματισμού πρωτογενούς πορώδους είναι:

- 1) Ανακρυστάλλωση και δημιουργία κενών στο πέτρωμα: κενά μεταξύ σχισμών, μεμονωμένων κρυστάλλων ή μέσα στα κρυσταλλικά πλέγματα των ορυκτών. Πολλά από αυτά είναι τριχοειδή, δηλαδή έχουν διάμετρο μικρότερη των 0,002 mm. Το πορώδες που βρίσκεται

στα κρυσταλλικά πλέγματα και μεταξύ των σωματιδίων ονομάζεται μικροπορώδες (Pittman, 1979). Η ασυνήθιστα υψηλή ανάκτηση νερού από ορισμένα κοιτάσματα πετρελαίου μπορεί να οφείλεται στην παρουσία μεγάλου ποσοστού μικροέμπορους.

- 2) Διασωματιδιακά κενά: Κενά μεταξύ των κόκκων ή αλλιώς τα διάκενα όλων των ειδών σε όλους τους τύπους πετρωμάτων. Τα κενά αυτά κυμαίνονται από μεγέθη υπό-τριχοειδή ($<0.002 \text{ mm}$) έως και υπέρ-τριχοειδή ($>0,5 \text{ mm}$ διάμετρος).
- 3) Κενά ενδιάμεσα των στρώσεων: Πολλών ειδών διάκενα συγκεντρώνονται παράλληλα με την στρώση των στρωμάτων, καθώς σε πληθώρα ταμιευτήρων τα ρευστά είναι *εγκλωβισμένα* μέσα σε τέτοια κενά. Αυτά δημιουργούνται λόγω διαφορετικής σύστασης των πετρωμάτων που αποτίθενται, τόσο όσον αφορά στην ορυκτολογία όσο και στο μέγεθος των κόκκων και στην κατανομή τους, καθώς επίσης και στη διαφορετικότητα του περιβάλλοντος απόθεσης.
- 4) Διάφορα κενά στην ιζηματογένεση λόγω παρουσίας απολιθωμάτων, άνισης συγκόλλησης των ωολίθων, ακανόνιστα κενά λόγω διαφορετικών μεγεθών κόκκων που συγκολλήθηκαν, κενά που δημιουργούνται από τους ζωντανούς οργανισμούς κατά τη διάρκεια της απόθεσης κ.α.



Σχήμα 2.1: Τύποι πορώδους μέσα σε ένα ψαμμιτικό πέτρωμα (Τροποποιημένο, από Pittman, 1979).⁽⁶⁾

Το δευτερογενές πορώδες δημιουργείται μετά την απόθεση του ιζήματος σε μια λεκάνη και κατά τη διαγένεση του, ως αποτέλεσμα τεκτονικών και φυσικοχημικών διεργασιών που φτάνουν μέχρι την πλήρη καταστροφή της αρχικής υφής και δομής των ιζημάτων σε ορισμένες περιπτώσεις. Παραδείγματα δημιουργίας δευτερογενούς πορώδους αποτελούν φαινόμενα ανακρυστάλλωσης, όπου δημιουργούνται κενά στο πέτρωμα λόγω της δημιουργίας νέων ορυκτών σταθερών στις εξωτερικές συνθήκες του συστήματος, ρωγματώσεις, φαινόμενα διάλυσης (καρστ) ή έκπλυσης ορυκτών (leaching of minerals). Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του δευτερογενούς πορώδους είναι ότι μπορεί να δημιουργηθεί από διάφορες διεργασίες, ακόμη και σε συμπαγή και αδιαπέρατα πετρώματα (ασβεστόλιθοι, μάρμαρα), στα οποία δεν υφίσταται πρωτογενές πορώδες ή είναι πολύ χαμηλό.

Η *διαπερατότητα* ή υδραυλική αγωγιμότητα χαρακτηρίζει την ικανότητα ενός υλικού (μέσου) να επιτρέπει την μετακίνηση ρευστών στο εσωτερικό του. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται - αναφορικά με τις ιδιότητες του υλικού - από το πλήθος, το μέγεθος, το σχήμα και το ποσοστό σύνδεσης των πόρων μεταξύ τους, ενώ σχετίζεται και με τις ιδιότητες των ρευστών, όπως το ιξώδες. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο παίζουν η πίεση και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Πρακτικά, η διαπερατότητα συσχετίζει την ελασματοειδή ροή ενός αδρανούς ρευστού (όγκος ρευστού ανά μονάδα χρόνου) σε μια διατομή ενός πετρώματος, με το ιξώδες του ρευστού και την πίεσή του.

2.3.1. Εξίσωση Darcy

Ποσοτικά, η διαπερατότητα μπορεί να οριστεί με βάση την εξίσωση του *Darcy* ⁽⁷⁾:

$$(3) \quad Q = \left(\frac{k}{\mu}\right) * \left(\frac{A * (P_1 - P_2)}{B * L}\right)$$

Όπου:

Q η ποσότητα μετακινούμενου ρευστού ανά μονάδα χρόνου δηλ. η παροχή (σε βαρέλια/ημέρα)

k η διαπερατότητα [σε darcy (d) ή millidarcy (md)]

A η επιφάνεια διατομής, κάθετη στη διεύθυνση ροής (cm^2 ή ft^2)

L το μήκος κυλινδρικού δείγματος διατομής A μέσα από το οποίο διέρχεται το ρευστό (σε m ή cm)

$P_1 - P_2$ η διαφορά πίεσεως στα δύο ακραία σημεία του κυλινδρικού δείγματος απόστασης L (N/m^2)

μ το δυναμικό ιξώδες [το μέτρο της αντίστασης του ρευστού στη μεταβολή του σχήματός του για μια ορισμένη ταχύτητα. Εκφράζει το λόγο της δύναμης ανά μονάδα επιφάνειας και μεταβολής της ταχύτητας [σε $Kg/(m*s)$ ή σε *centipoises*].

B ο συντελεστής όγκου του σχηματισμού (formation volume factor σε *Bbl/stock tank Bbl*)

Στην παραπάνω εξίσωση το k εκφράζει τη μονάδα μέτρησης της διαπερατότητας, που είναι το *darcy (D)*, αλλά για διευκόλυνση χρησιμοποιείται συνήθως το *millidarcy (mD)* καθώς τα πετρώματα τα οποία εξετάζονται στην κοιτασματολογία πετρελαίου παρουσιάζουν τιμές μεταξύ 5 και 500 *mD*. Τιμές διαπερατότητας άνω του 1 *D* αποτελούν εξαιρετικά σπάνιο φαινόμενο σε ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, και εφόσον η υψηλή διαπερατότητα διευκολύνει την άντληση των υδρογονανθράκων, τέτοιες περιπτώσεις χρήζουν άμεσης εκμετάλλευσης.

Συνοπτικά, οι τιμές διαπερατότητας χωρίζονται σε:

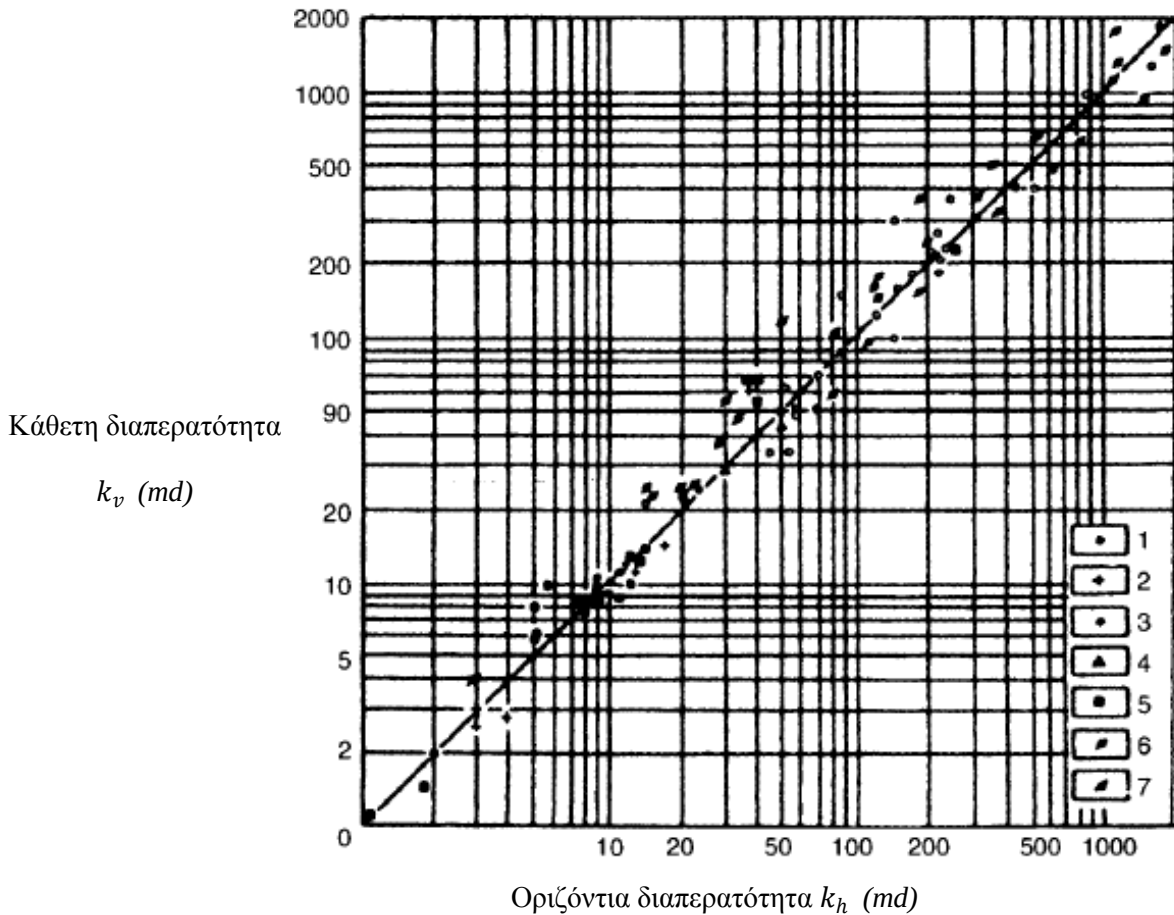
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2.:ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ⁽⁸⁾		ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΙΜΩΝ
	ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ
1	>1 <i>D</i>	Εξαιρετικά υψηλές
2	100-1000 <i>mD</i>	Εξαιρετικές
3	10-100 <i>mD</i>	Καλές
4	1-10 <i>mD</i>	Ικανοποιητικές
5	<1 <i>mD</i>	Χαμηλές

2.3.2. Οριζόντια και κάθετη διαπερατότητα

Η διαπερατότητα μειώνεται από την υπερκείμενη πίεση των σχηματισμών, και αυτός ο παράγοντας πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν για την εκτίμηση της διαπερατότητας ενός εν δυνάμει ταμιευτήρα, καθώς η διαπερατότητα είναι μια ισότροπη ιδιότητα των πόρων του πετρώματος σε ορισμένες περιοχές του συστήματος. Με άλλα λόγια, είναι κατευθυνόμενη (directional) και τασική (tensor) αυτή η ιδιότητα.

Η *οριζόντια διαπερατότητα* k_h (horizontal permeability) έχει συνήθως μεγαλύτερη τιμή από ότι η κάθετη διαπερατότητα (vertical permeability) κυρίως αναφορικά με τους ψαμμιτικούς ταμιευτήρες, όπου η ροή του νερού μέσα από τα πετρώματα προσανατολίζει τους κόκκους της άμμου παράλληλα με την κίνησή της, για να διευκολύνεται η κίνηση των ρευστών. Επηρεάζεται από τη διαβάθμιση των κόκκων σε στρώσεις, την ύπαρξη κόκκων μεγέθους αργίλου, την κατά στρώσεις συμπαγοποίηση και την επιλεκτική συγκέντρωση κάποιου μεγέθους κόκκων σε ορισμένα σημεία. Οι αναλύσεις πυρήνων εστιάζουν σε δείγματα που έχουν ληφθεί παράλληλα με τη στρώση του πετρώματος, και άρα παράλληλα με τη διεύθυνση ροής των ρευστών μέσα στον ταμιευτήρα. Οι μετρήσεις διαπερατότητας σε τέτοιους πυρήνες εκφράζουν την οριζόντια διαπερατότητα k_h .

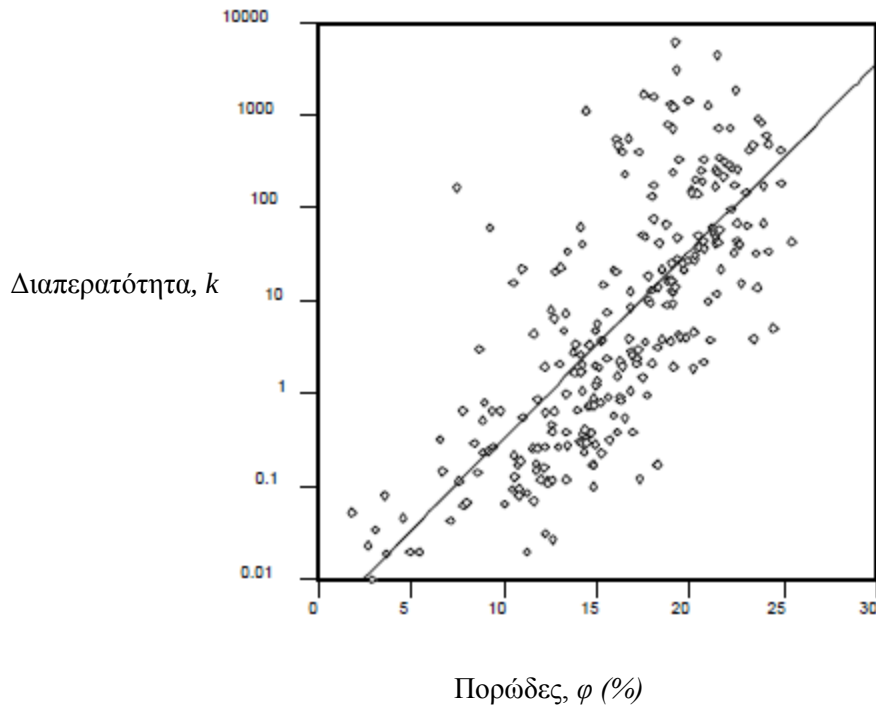
Η κάθετη διαπερατότητα k_v (vertical permeability) είναι κάθετη προς τη στρώση του πετρώματος. Συνήθως είναι μικρότερη από την οριζόντια διαπερατότητα λόγω της ύπαρξης φυλλώδων ορυκτών που βρίσκονται οριζόντια σε επίπεδα ενδιάμεσα των στρώσεων. Επιπλέον η κάθετη διαπερατότητα μπορεί να μειωθεί περεταίρω λόγω φυλλοποίησης της σχιστής αργίλου σε ψαμμίτες, ή λόγω δημιουργίας στυλολίθων σε ανθρακικά πετρώματα.⁽⁹⁾



Σχήμα 2.2: Σχέση μεταξύ οριζόντιας και κάθετης διαπερατότητας σε δολομίτες με ενδοκρυσταλλικό πορώδες. (1) Kuybyshev Along-Volga Region, Russia (2) Saman-Tepe, Turkmenistan, (3) Uchkyr, Uzbekistan, (4) Adam-Tash, Afghanistan (5) Orenburg, Russia, (6) Vuktyl, Russia, (7) Urta-Bulak, Uzbekistan (Τροποποιημένο, από Bagrintseva, 1977, p.45.) ⁽¹⁰⁾

2.3.3. Σχέση πορώδους – διαπερατότητας

Σχήμα 2.3.: Ένα τυπικό διάγραμμα k - ϕ ⁽¹¹⁾



Το γεωλογικό περιβάλλον και οι παράγοντες απόθεσης που επηρεάζουν το πορώδες επηρεάζουν επίσης τη διαπερατότητα και συχνά μπορεί να υπάρχει μια προφανής σχέση μεταξύ των δύο. Η σχέση αυτή ποικίλλει ανάλογα με τον σχηματισμό και τον τύπο του πετρώματος και αντικατοπτρίζει την ποικιλία της γεωμετρίας των πόρων εντός του πετρώματος. Τυπικά, σε ψαμμιτικούς ταμιευτήρες, η αυξημένη διαπερατότητα συνοδεύεται από αυξημένο πορώδες. Η σταθερή διαπερατότητα που συνοδεύεται από αυξημένο πορώδες υποδεικνύει παρουσία περισσότερων αλλά μικρότερων πόρων.

Οι διεργασίες απόθεσης στις άμμους, συμπεριλαμβανομένης της συγκέντρωσης και της συγκόλλησης, οδηγούν σε μια μετακίνηση προς τα

αριστερά της σχέσης πορώδους-διαπερατότητας, ενώ η δολομιτίωση ενός ασβεστόλιθου τείνει να μετακινήσει τη σχέση αυτή προς τα δεξιά. Στην πρώτη περίπτωση, τόσο η διαπερατότητα όσο και το πορώδες μειώνονται καθώς με τη διαγένεση και την τσιμεντοποίηση μειώνονται οι κενοί χώροι του πετρώματος, ενώ στη δεύτερη περίπτωση και οι δυο συντελεστές αυξάνονται λόγω της αντικατάστασης των ιόντων του ασβεστίου (Ca^{2+}) με ιόντα μαγνησίου (Mg^{2+}) στο ανθρακικό πέτρωμα, τα οποία έχουν μικρότερη ιοντική ακτίνα από αυτά του ασβεστίου και έτσι δημιουργούνται κενοί χώροι λόγω των χημικών αυτών διεργασιών.

2.4. Κορεσμός ρευστών

Σε έναν ταμιευτήρα συνυπάρχουν παραπάνω από μία φάση ρευστών, η οποία καταλαμβάνει τον χώρο μεταξύ των κόκκων του πετρώματος. Σε έναν ταμιευτήρα πετρελαίου, συνυπάρχουν μαζί πετρέλαιο και νερό, ενώ σε έναν ταμιευτήρα φυσικού αερίου συνυπάρχουν το φυσικό αέριο με το νερό. Επίσης, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μπορούν να συνυπάρξουν νερό, πετρέλαιο και φυσικό αέριο μαζί στον ίδιο ταμιευτήρα. Για το λόγο αυτό δημιουργείται η ανάγκη υπολογισμού της ποσότητας και της έκτασης που καταλαμβάνουν τα ρευστά μέσα στους πόρους του πετρώματος.

Η πετροφυσική ιδιότητα που περιγράφει την ποσότητα του κάθε τύπου ρευστού μέσα στο πέτρωμα ονομάζεται *κορεσμός (saturation)*. Ορίζεται ως το κλάσμα, ή το επί τοις εκατό ποσοστό, του όγκου των πόρων που καταλαμβάνονται από ένα ρευστό (πετρέλαιο, αέριο ή νερό). Αυτή η ιδιότητα του πετρώματος εκφράζεται και μαθηματικά με τον παρακάτω τύπο ⁽¹²⁾.

$$(4) \quad \text{Κορεσμός } (S) = \frac{\text{Συνολικ ός όγκος ρευστο ύ}}{\text{Όγκος των πόρων}}$$

Εφαρμόζοντας τον παραπάνω μαθηματικό τύπο του κορεσμού για κάθε ρευστό που υπάρχει μέσα στον ταμιευτήρα, θα έχουμε:

$$(5) \quad S_o = \frac{\text{Όγκος πετρελαίου}}{\text{Όγκος πόρων}}, \text{ όπου } S_o = \text{κορεσμός πετρελαίου}$$

$$(6) \quad S_w = \frac{\text{Όγκος νερού}}{\text{Όγκος πόρων}}, \text{ όπου } S_w = \text{κορεσμός νερού}$$

$$(7) \quad S_g = \frac{\text{Όγκος αερίου}}{\text{Όγκος πόρων}}, \text{ όπου } S_g = \text{κορεσμός αερίου}$$

Συμπερασματικά, όλες οι τιμές κορεσμού εξαρτώνται στον όγκο των πόρων και όχι στον ολικό όγκο του ταμιευτήρα.

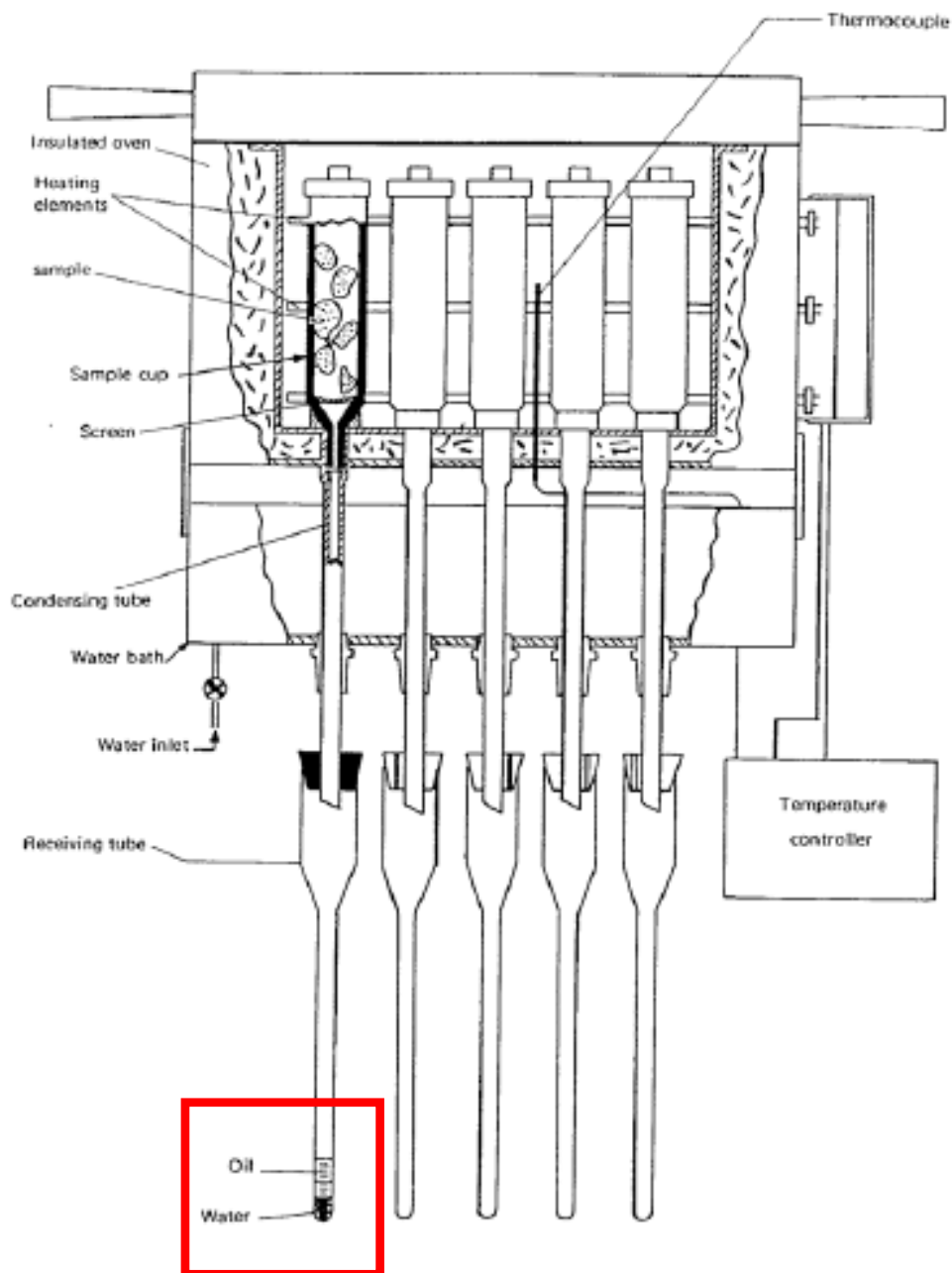
Ο κορεσμός από την κάθε ρευστή φάση δέχεται τιμές μεταξύ 0 και 100%, και συνεπώς το άθροισμα των επιμέρους τιμών κορεσμού κάθε ρευστής φάσης θα είναι 100%, δηλαδή:

$$(8) \quad S_o + S_w + S_g = 100\% \text{ ή } 1.0$$

Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι in-situ προσδιορισμού του κορεσμού των ρευστών σε έναν ταμιευτήρα υδρογονανθράκων. Η πιο άμεση μέθοδος είναι η μέτρηση του κορεσμού από ένα δείγμα (πυρήνα) που λαμβάνεται μέσα από τον ταμιευτήρα, ενώ η έμμεση μέθοδος είναι ο υπολογισμός συγκεκριμένων φυσικών ιδιοτήτων του πετρώματος που μπορούν να συσχετιστούν με τον κορεσμό του σε ρευστά.

Μία μέθοδος άμεσου προσδιορισμού του κορεσμού των ρευστών είναι η «μέθοδος της απόσταξης» (retort method). Η διαδικασία της μεθόδου απαιτεί τη θέρμανση ενός δείγματος από πυρηνοληψία, μέχρι το σημείο εξάτμισης του νερού και του πετρελαίου, τα οποία συμπυκνώνονται και συλλέγονται σε ειδικά βαθμονομημένο δοκιμαστικό σωλήνα. Ο όγκος του

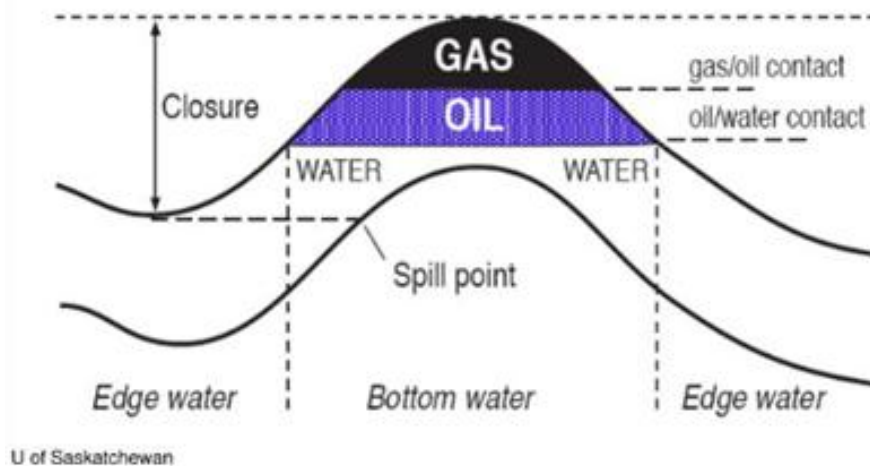
κάθε ρευστού διαιρούμενος με τον όγκο των πόρων του δείγματος δίνουν τον κορεσμό του δείγματος αυτού σε νερό και πετρέλαιο. Ο κορεσμό σε φυσικό αέριο λαμβάνεται έμμεσα, λόγω της προϋπόθεσης ότι το άθροισμα των κορεσμών των τριών ρευστών θα μας δίνει αποτέλεσμα 1.0 ή 100%.



Σχήμα 2.4.: Συσκευή απόσταξης και αναρρόφησης.⁽¹³⁾

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει δύο μειονεκτήματα στον προσδιορισμό του κορεσμού. Προκειμένου να αφαιρεθεί το πετρέλαιο, είναι απαραίτητο να θερμανθεί ο πυρήνας σε θερμοκρασίες της τάξεως των 538,7-593,3 °C. Σε αυτές τις θερμοκρασίες, το ενδοκρυσταλλικό νερό των ορυκτών του πετρώματος διασπάται, με αποτέλεσμα ο εκτιμώμενος κορεσμός σε νερό να είναι μεγαλύτερος από τον πραγματικό. Το δεύτερο μειονέκτημα είναι ότι, όταν το πετρέλαιο θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες, έχει την τάση "to crack and coke". Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου του πετρελαίου, και συνεπώς ο εκτιμώμενος κορεσμός του δείγματος σε πετρέλαιο θα είναι μικρότερος από την πραγματική τιμή του. Για να μειωθεί το σφάλμα στον υπολογισμό των κορεσμών είναι απαραίτητο να γίνονται διορθώσεις στις μετρήσεις, έτσι ώστε οι τιμές που λαμβάνονται να πλησιάζουν όσο περισσότερο είναι δυνατό, στις πραγματικές τιμές κορεσμού.

Παρόλο που οι τιμές κορεσμού που λαμβάνονται από τέτοιες άμεσες μετρήσεις σε δείγματα μπορεί να μην αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές τιμές κορεσμού στο βάθος του ταμιευτήρα, μας παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες αναφορικά με τον ταμιευτήρα. Οι πληροφορίες αυτές αφορούν κυρίως την γενικευμένη τοποθέτηση των ορίων αερίου-πετρελαίου (*GOC – Gas Oil Contact*) και νερού-πετρελαίου (*WOC – Water Oil Contact*) μέσα στον ταμιευτήρα.



Σχήμα 2.5: Σχηματική απεικόνιση ορίων αερίου-πετρελαίου (GOC) και πετρελαίου-νερού (OWC) μέσα σε ταμιευτήρα. ⁽¹⁴⁾

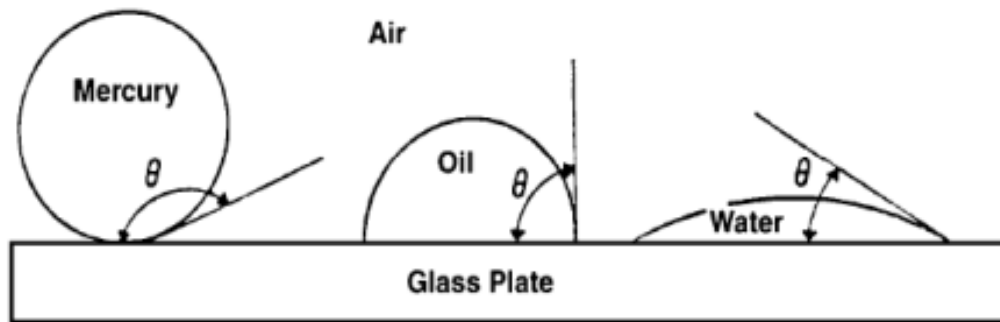
Ο κορεσμός σε ρευστά προσφέρει πληροφορίες μόνο για το ποσοστό του κάθε τύπου ρευστού μέσα στους κενούς πόρους του πετρώματος-ταμιευτήρα, όμως δεν μπορεί να προσδιορίσει πώς είναι κατανεμημένα τα ρευστά μέσα στον ταμιευτήρα. Για να εξάγουμε την πληροφορία αυτή, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη της διεπιφανειακές δυνάμεις και τα φαινόμενα που προκύπτουν όταν τα μη αναμίξιμα ρευστά περιορίζονται σε πόρους του ταμιευτήρα τριχοειδών διαστάσεων. Οι σημαντικές διεπιφανειακές δυνάμεις και τα φαινόμενα περιλαμβάνουν την επιφανειακή τάση (*surface tension*), την ενδοεπιφανειακή τάση (*interfacial tension*), τη διαβρεξιμότητα (*wettability*) και την τριχοειδή πίεση (*capillary pressure*).

Άλλες χρήσιμες παρατηρήσεις μπορούν να ληφθούν από τα δεδομένα ανάλυσης δειγμάτων (πυρήνων). Η χαμηλή τιμή κορεσμού του υπολειμματικού πετρελαίου περίπου 20% υποδηλώνει έναν ταμιευτήρα «ελαφρού» πετρελαίου (*light crude oil*), σε αντίθεση με έναν ταμιευτήρα «βαρύ» πετρελαίου (*heavy crude oil*) όπου η τιμή κορεσμού του υπολειμματικού πετρελαίου θα είναι πολύ υψηλότερη από 20% λόγω του υψηλού ιξώδους του πετρελαίου.

2.5. Διαβρεξιμότητα (Wettability)

Η διαβροχή ή διαβρεξιμότητα αναφέρεται στην τάση που έχει ένα ρευστό να εξαπλωθεί ή να προσκολληθεί σε μια στερεά επιφάνεια παρουσία άλλων, μη αναμίξιμων, υγρών. Το υγρό που απλώνεται ή προσκολλάται στην επιφάνεια είναι γνωστό ως υγρό διαβροχής. Σε έναν ταμιευτήρα πετρελαίου, η στερεά επιφάνεια είναι το πέτρωμα που αποτελεί τον ταμιευτήρα, το οποίο είναι συνήθως ψαμμίτης, ασβεστόλιθος ή δολομίτης μαζί με υλικό συγκόλλησης. Τα ρευστά που υπάρχουν μέσα στο στερεό υλικό είναι το νερό και οι υδρογονάνθρακες, δηλαδή το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Υπό κανονικές συνθήκες, το νερό και το πετρέλαιο αποτελούν τη φάση διαβροχής, ενώ το αέριο είναι μια φάση χωρίς ανάμιξη.

Η τάση ενός υγρού να εξαπλωθεί πάνω από την επιφάνεια ενός στερεού αποτελεί ένδειξη των χαρακτηριστικών διαβροχής του υγρού για το στερεό. Αυτή η τάση εξάπλωσης μπορεί να εκφραστεί πιο βολικά με τη μέτρηση της γωνίας επαφής στην επιφάνεια υγρού-στερεού, που ονομάζεται *γωνία επαφής* θ . Η γωνία επαφής υπολογίζεται πάντα διαμέσου του υγρού προς το στερεό, ενώ όσο αυτή μειώνεται, η ικανότητα διαβροχής του υγρού αυξάνεται. Η διαβρεξιμότητα των πετρωμάτων ταμιευτήρων υδρογονανθράκων στα ρευστά είναι σημαντική καθώς η κατανομή των ρευστών στα πορώδη μέσα είναι συνάρτηση της διαβρεξιμότητας. Λόγω των ελκτικών δυνάμεων, η φάση διαβροχής τείνει να καταλαμβάνει τους μικρότερους πόρους του ταμιευτήρα, ενώ η φάση της μη διαβροχής καταλαμβάνει τα πιο ανοικτά κανάλια των πόρων.



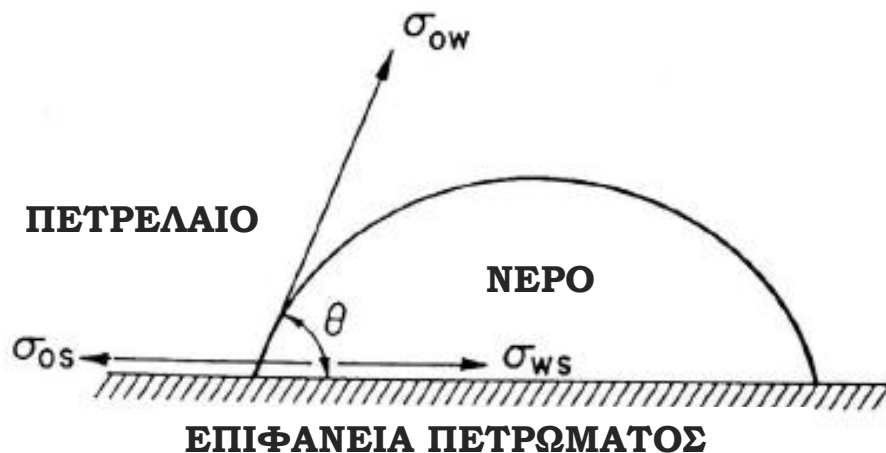
Σχήμα 2.6: Ενδεικτικές γωνίες επαφής τριών ρευστών (υδράργυρος, λάδι, νερό) σε γυάλινη στερεή επιφάνεια. ⁽¹⁵⁾

Στο σχήμα 1.6. απεικονίζονται τρεις σταγόνες από υδράργυρο, λάδι και νερό αντίστοιχα, τοποθετημένα πάνω σε μια γυάλινη πλάκα. Τα τρία στοιχεία εξετάζονται ως προς τη διαβρεξιμότητά τους στο συγκεκριμένο υλικό. Παρατηρείται από το σχήμα ότι ο υδράργυρος διατηρεί το σφαιρικό του σχήμα, το λάδι αναπτύσσει ένα περίπου ημισφαιρικό σχήμα, ενώ το νερό τείνει να εξαπλωθεί σε όλη τη στερεή γυάλινη επιφάνεια.

Ας χρησιμοποιήσουμε ως παράδειγμα ένα σύστημα που περιέχει νερό και πετρέλαιο μέσα σε ένα πέτρωμα (Σχήμα 2.7). Προκύπτουν λοιπόν τρεις διεπιφανειακές τάσεις (συγκεκριμένες ελεύθερες επιφανειακές ενέργειες): σ_{os} είναι η τάση στερεού (πετρώματος) – πετρελαίου, σ_{ow} είναι η τάση πετρελαίου – νερού και σ_{ws} είναι η τάση νερού – πετρώματος. Η γωνία θ αποτελεί τη γωνία επαφής και υπολογίζεται μέσω του νερού, γιατί είναι το πιο πυκνό ρευστό. Η μέτρηση αυτής της γωνίας δίνει τη διαβρεξιμότητα του στερεού.

Οι διεπιφανειακές τάσεις σχετίζονται με την εξίσωση *Young – Dupre* που λαμβάνεται με τον υπολογισμό της οριζόντιας ισορροπίας του σημείου επαφής των διεπιφανειακών τάσεων. Για το σχήμα 1.6, η εξίσωση αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$(9) \quad \sigma_{os} - \sigma_{ws} = \sigma_{ow} \cos \theta$$

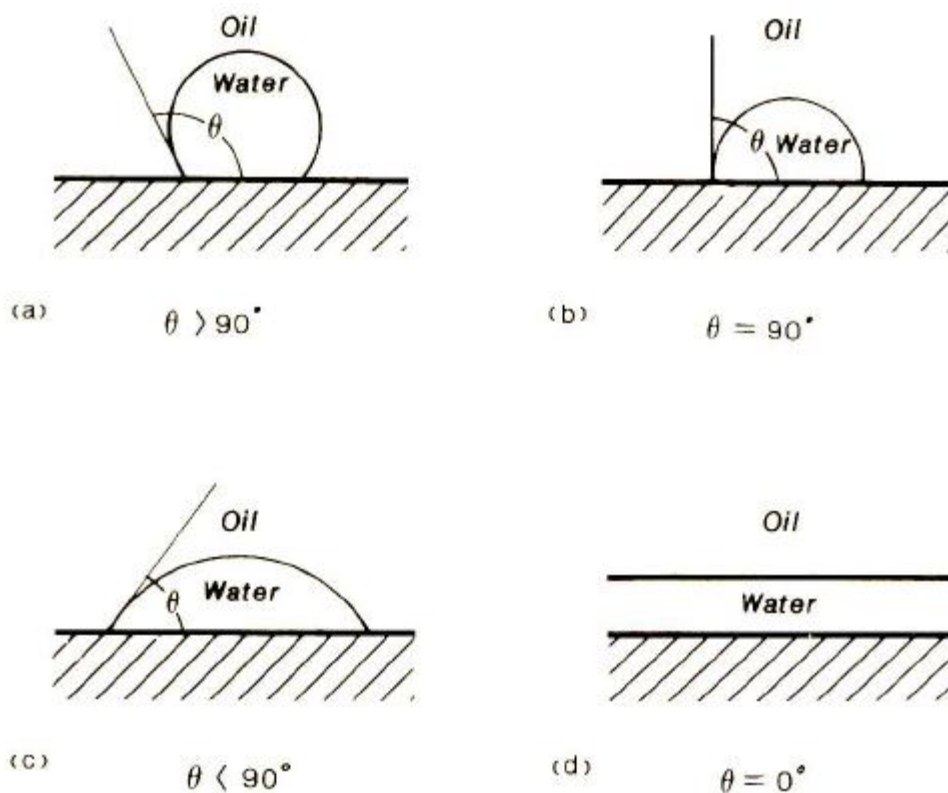


Σχήμα 2.7: Διεπιφανειακές τάσεις σε ένα σύστημα νερού-πετρελαίου-στερεού. ⁽¹⁶⁾

Οι ελεύθερες επιφανειακές ενέργειες για τις διεπαφές πετρελαίου-στερεού και νερού-στερεού δεν μπορούν να μετρηθούν εύκολα. Ωστόσο, η διαφορά τους μπορεί να προσδιοριστεί με τη μέτρηση της διεπιφανειακής τάσης πετρελαίου-νερού και της γωνίας επαφής τους. Αυτή η διαφορά ελέγχει την κίνηση της διεπαφής πριν επιτευχθεί ισορροπία.

1. Εάν οι ελεύθερες επιφανειακές ενέργειες σ_{os} και σ_{ws} είναι ίσες, τότε το αριστερό σκέλος της εξίσωσης (9) είναι μηδέν. Εφόσον η σ_{ow} είναι μη μηδενική, το $\cos\theta$ στο δεξί σκέλος της εξίσωσης θα πρέπει να ισούται με μηδέν, δίνοντας έτσι γωνία επαφής ίση με 90° . Γωνία επαφής που είναι κάθετη σημαίνει ότι το στερεό δεν έχει επιλεκτική διαβρεξιμότητα για το νερό ή το πετρέλαιο. Αυτή είναι μια περίπτωση ουδέτερης διαβρεξιμότητας. [Σχήμα 2.8 (b)]
2. Εάν $\sigma_{ws} < \sigma_{os}$, τότε θα ισχύει $\theta < 90^\circ$. Το στερεό έχει επιλεκτική διαβρεξιμότητα για το νερό, και εάν τα τρία αυτά υλικά έρθουν σε επαφή, το νερό θα εξαπλωθεί γρηγορότερα στη στερεή επιφάνεια, εκτοπίζοντας ουσιαστικά το πετρέλαιο, μέχρι να συμβεί μια ισορροπία με μια μέση γωνία επαφής με βάση την εξίσωση (9). Κατά τη διάρκεια της εξάπλωσης του νερού, η ελεύθερη ενέργεια του συστήματος μειώνεται καθώς ισχύει $\sigma_{ws} < \sigma_{os}$. Η διαφορά ($\sigma_{os} - \sigma_{ws}$) ονομάζεται τάση πρόσφυσης (adhesion tension). [Σχήμα 2.8 (c)]
3. Εάν $\sigma_{ws} > \sigma_{os}$ τότε $\theta > 90^\circ$. Το στερεό έχει επιλεκτική διαβρεξιμότητα για το πετρέλαιο. [Σχήμα 2.8 (a)]

4. Πλήρης κάλυψη της στερεής επιφάνειας με πετρέλαιο λαμβάνει χώρα για $\theta=180^\circ$ και πλήρη κάλυψη της επιφάνειας με νερό για $\theta=0^\circ$ [Σχήμα 2.8 (d)]. Η κατάσταση αυτή είναι θεωρητική, καθώς ποτέ σε ταμιευτήρες πετρελαίου δεν έχει παρατηρηθεί πλήρη εξάπλωση ενός μόνο ρευστού λόγω επιλεκτικής διαβρεξιμότητας του πετρώματος του ταμιευτήρα σε αυτό.



Σχήμα 2.8: Γωνίες επαφής που δείχνουν τέσσερις καταστάσεις διαβρεξιμότητας. ⁽¹⁷⁾

2.6. Τριχοειδής πίεση (Capillary pressure)

Οι τριχοειδείς δυνάμεις μέσα σε έναν ταμειυτήρα πετρελαίου είναι ο συνδυασμός των επιδράσεων της επιφάνειας και των διεπιφανειακών τάσεων του πετρώματος και των ρευστών, του μεγέθους των πόρων και της γεωμετρίας τους, καθώς και των χαρακτηριστικών διαβρεξιμότητας του συστήματος αυτού. Κάθε κυρτή επιφάνεια μεταξύ δύο μη αναμίξιμων ρευστών έχει την τάση να συστέλλεται σε όσο το δυνατόν μικρότερη περιοχή ανά μονάδα όγκου. Αυτό ισχύει για όλους τους συνδυασμούς ρευστών που μας ενδιαφέρουν – πετρελαίου, νερού και φυσικού αερίου - ακόμα και με παρουσία αέρα. Όταν δύο μη αναμίξιμα υγρά έρχονται σε επαφή, δημιουργείται μια ασυνέχεια στην πίεση μεταξύ τους, η οποία εξαρτάται από την καμπυλότητα της επιφάνειας η οποία χωρίζει τα δύο αυτά ρευστά. Αυτή η διαφορά πίεσης ονομάζεται τριχοειδής πίεση (capillary pressure) και συμβολίζεται με p_c .⁽¹⁸⁾

Η τριχοειδής πίεση p_c ισούται με⁽¹⁹⁾:

$$(10) \quad P_c = (4\sigma \cos\theta) / d, \quad \text{όπου:}$$

σ = διεπιφανειακή τάση ανάμεσα στο νερό και στο πετρέλαιο

(10^{-5} N/cm ή dynes/cm),

d = διάμετρος των πόρων (cm) και

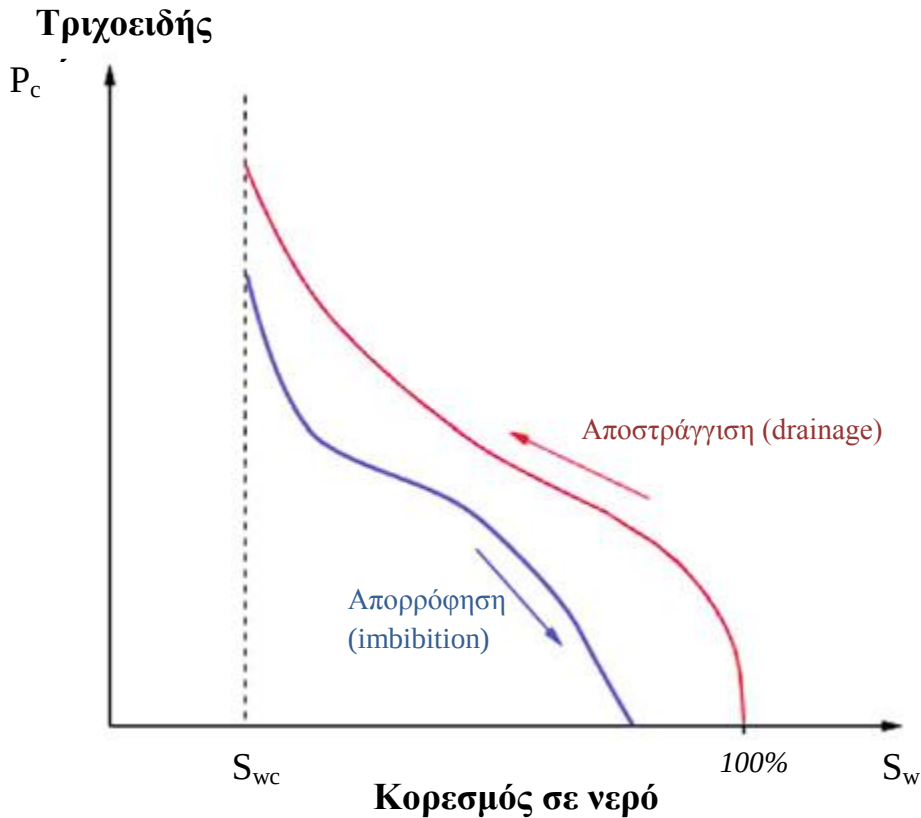
θ = γωνία επαφής.

Η μετατόπιση ενός ρευστού από ένα μέρος του πορώδους μέσου σε ένα άλλο είτε ενισχύεται είναι αντιτίθεται στις επιφανειακές δυνάμεις της τριχοειδούς πίεσης. Κατά συνέπεια, προκειμένου να διατηρηθεί ένα

πορώδες μέσο μερικώς κορεσμένο σε ρευστό χαμηλής διαβρεξιμότητας (nonwetting fluid) και ενώ το μέσο εκτίθεται επίσης σε ρευστό υψηλής διαβρεξιμότητας (wetting fluid), είναι απαραίτητο να διατηρηθεί η πίεση του πρώτου ρευστού σε τιμές μεγαλύτερες από αυτές δεύτερου ρευστού. Με άλλα λόγια, εφόσον η γωνία επαφής εξαρτάται από τις διεπιφανειακές τάσεις, οι οποίες με τη σειρά τους μπορεί να επηρεάζονται από επιφανειοδραστικές ουσίες (ουσίες που τείνουν να μειώσουν την επιφανειακή τάση ενός υγρού στο οποίο διαλύονται), αυτές οι χημικές ουσίες μπορεί να μεταβάλλουν την ανάκτηση του ρευστού, μεταβάλλοντας τόσο τη γωνία επαφής όσο και την ενδοεπιφανειακή τάση. Καθώς το πετρέλαιο μετατοπίζεται από το νερό, το οποίο «υγραίνει» το πέτρωμα, η τριχοειδής πίεση είναι η κινητήρια δύναμη. Αν όμως το νερό δεν «υγραίνει» την επιφάνεια του πετρώματος, η τριχοειδής πίεση είναι επιβραδυντική δύναμη, η οποία πρέπει να υπερνικηθεί.

Η ένταση της τριχοειδούς πίεσης στους πόρους, έχοντας μια ακτίνα περίπου 15 μm , δεν είναι μεγάλη, και ως εκ τούτου η τριχοειδής πίεση δεν αποτελεί σημαντική δύναμη κατά τη διάρκεια της μετακίνησης του σημείου επαφής νερού-πετρελαίου (WOC), υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει ανάμιξη. Ωστόσο, ανάμιξη υπάρχει λόγω αυτής την μετακίνησης, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται διαλύματα νερού-πετρελαίου καθώς και νερού – αερίου - πετρελαίου (Muravyov *et al*, 1958).

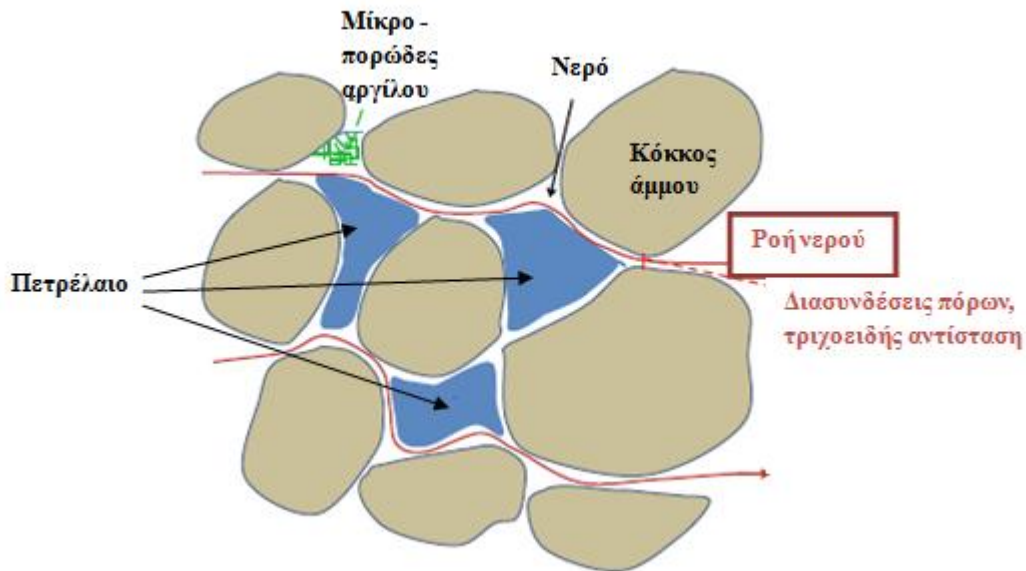
Όσο αυξάνεται η φάση διαβροχής (δηλ. το νερό), η γωνία επαφής αυξάνεται και μειώνεται η αντίσταση των τριχοειδών. Αυτό ονομάζεται απορρόφηση (imbibition) και σημαίνει πως ένα πέτρωμα με υψηλό κορεσμό σε πετρέλαιο μπορεί να απορροφήσει νερό. Όταν μειώνεται η φάση διαβροχής, ονομάζεται αποστράγγιση (drainage). Η γωνία επαφής σχηματίζει μια υστέρηση σε ταμιευτήρες με υψηλή διαβροχή ως προς το νερό, ως συνάρτηση της μετατόπισης πετρελαίου και νερού (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.9.: Αποστράγγιση και απορρόφηση πετρελαίου και νερού ως μια λειτουργία του κορεσμού του νερού και της τριχοειδούς πίεσης P_c ⁽²⁰⁾.

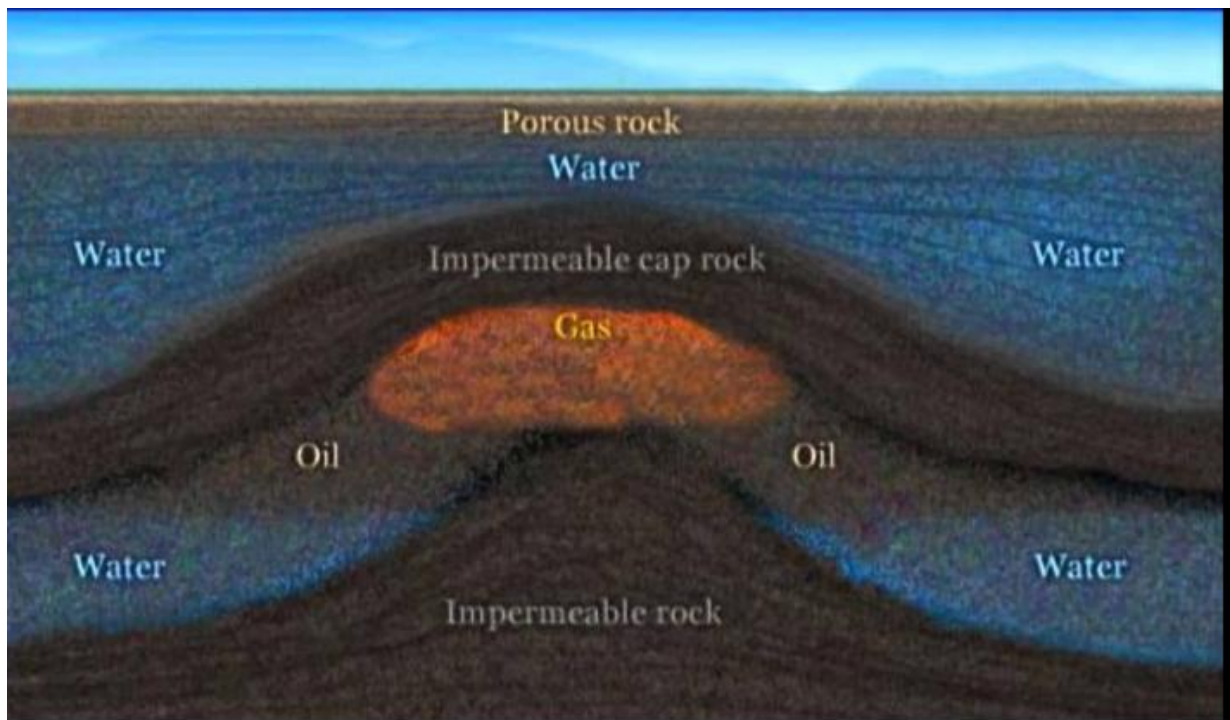
Ξεκινώντας με 100% κορεσμό σε νερό, μετατοπίζεται από το πετρέλαιο έτσι ώστε ο κορεσμός του νερού να μειωθεί σε μια τιμή S_{wc} . Αυτό ονομάζεται *αισθητός κορεσμός του νερού (connate water saturation)*. Δεν είναι δυνατή η αποβολή περισσότερου νερού (μείωση του κορεσμού του νερού) από το πετρέλαιο πέρα από αυτή την τιμή λόγω των υψηλών τριχοειδών πιέσεων P_c . Όταν το νερό ρέει πίσω μέσα στο πέτρωμα (απορρόφηση), η καμπύλη τριχοειδούς πίεσης ακολουθεί μια διαφορετική πορεία, φθάνοντας σε ένα σημείο όπου η τριχοειδής πίεση είναι μηδέν. Συνεπώς, το νερό δεν μπορεί να μετατοπίσει όλο το πετρέλαιο και το

σύστημα δεν μπορεί να επιστρέψει στον 100% κορεσμό του σε νερό. Αυτό συμβαίνει επειδή η φάση του πετρελαίου δεν είναι πλέον συνεχής και υπάρχουν μόνο σταγονίδια πετρελαίου στο νερό. Τα σταγονίδια του πετρελαίου θα συναντήσουν ισχυρή τριχοειδή αντίσταση όταν προσπαθήσουν να κινηθούν ανάμεσα στους διασυνδεδεμένους πόρους του πετρώματος, ενώ το νερό μπορεί ρέει μέσα στον ταμιευτήρα χωρίς να μετακινεί το υπολειπόμενο πετρέλαιο (Σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10.: Σχηματική απεικόνιση που δείχνει πώς το νερό μπορεί να παρακάμψει το πετρέλαιο καθώς ρέει γύρω από αυτό. Το πετρέλαιο πρέπει να ξεπεράσει μια μεγαλύτερη τριχοειδή αντίσταση για να ρέει μέσα από τις διασυνδέσεις των πόρων ⁽²¹⁾.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΚΕΣ
ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ - ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ
ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ. ΨΑΜΜΙΤΙΚΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ.**



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ - ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ. ΨΑΜΜΙΤΙΚΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ.

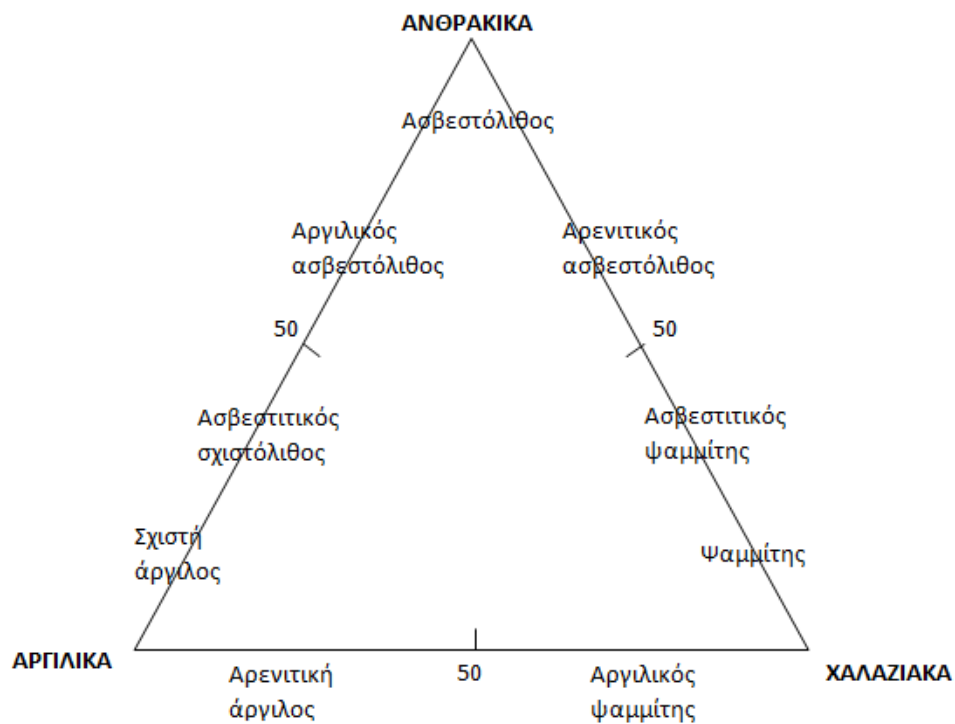
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κυριότερες κατηγορίες των πετρωμάτων που αποτελούν ταμιευτήρες πετρελαίου. Επιπλέον, γίνεται εκτενής αναφορά στους ψαμμιτικούς ταμιευτήρες, με παρουσίαση των κύριων χαρακτηριστικών που ενδιαφέρουν τους γεωεπιστήμονες κατά την έρευνα και εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος υδρογονανθράκων.

3.1. Κυριότερες κατηγορίες πετρωμάτων – ταμιευτήρων

Τα πετρώματα που αποτελούν τους ταμιευτήρες (reservoir rocks) των υδρογονανθράκων είναι πορώδη πετρώματα με υψηλό ποσοστό διαπερατότητας ώστε να επιτρέπουν τη ροή ρευστών μετά τη δημιουργία τους στο μητρικό πέτρωμα (source rock) και την μετανάστευσή τους από εκεί σε γειτονικά πετρώματα (primary migration). Οι ταμιευτήρες είναι πετρώματα κορεσμένα σε νερό, στα οποία εισέρχονται τα ρευστά και, δεδομένου ότι οι υδρογονάνθρακες είναι ελαφρύτεροι από το νερό, τείνουν να κινούνται προς τα πάνω (secondary migration). Επομένως, λόγω της παρουσίας διαφόρων υγρών φάσεων διαφορετικής πυκνότητας και ιξώδους, όπως το νερό, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, η κίνησή τους επηρεάζεται από τις δυνάμεις βαρύτητας, καθώς και τις τριχοειδείς τάσεις. Ως αποτέλεσμα, τα ρευστά διαχωρίζονται κατά σειρά πυκνότητας όταν η ροή διαμέσου ενός περατού πετρώματος διακόπτεται από μια ζώνη χαμηλής διαπερατότητας (π.χ. ρήγμα που μετατοπίζει το περατό στρώμα και το φέρνει σε επαφή με ένα λιγότερο περατό στρώμα). Με την πάροδο του γεωλογικού χρόνου η συνεχής συσσώρευση μορίων υδρογονανθράκων σε

μια «παγίδα» (trap) δημιουργεί έναν ταμιευτήρα και ένα πιθανό κοίτασμα υδρογονανθράκων.

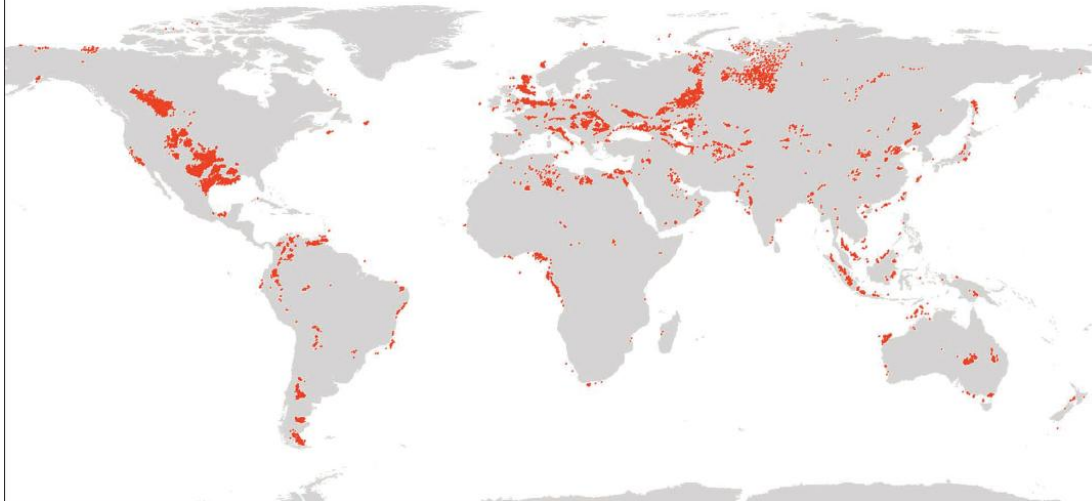
Ένα πέτρωμα ικανό να φιλοξενήσει και να δώσει πετρέλαιο και φυσικό αέριο ονομάζεται πέτρωμα – ταμιευτήρας. Για να έχει όμως εμπορική αξία και να χρήζει εκμετάλλευσης, ένας ταμιευτήρας θα πρέπει να έχει *επαρκές πάχος, μεγάλη επιφάνεια και υψηλό πορώδες*, έτσι ώστε να περιέχει μεγάλο όγκο υδρογονανθράκων, ενώ θα πρέπει να αποδίδει τα περιεχόμενα ρευστά με *ικανοποιητικό ρυθμό* όταν ο ταμιευτήρας διατρηθεί από μια γεώτρηση. Γενικά, οποιοδήποτε πέτρωμα σε βάθος, είτε ιζηματογενές είτε πυριγενές είτε μεταμορφωμένο, θα μπορούσε να αποτελέσει έναν ταμιευτήρα. Ωστόσο, οι περισσότεροι ταμιευτήρες αποτελούνται από ιζηματογενή πετρώματα.



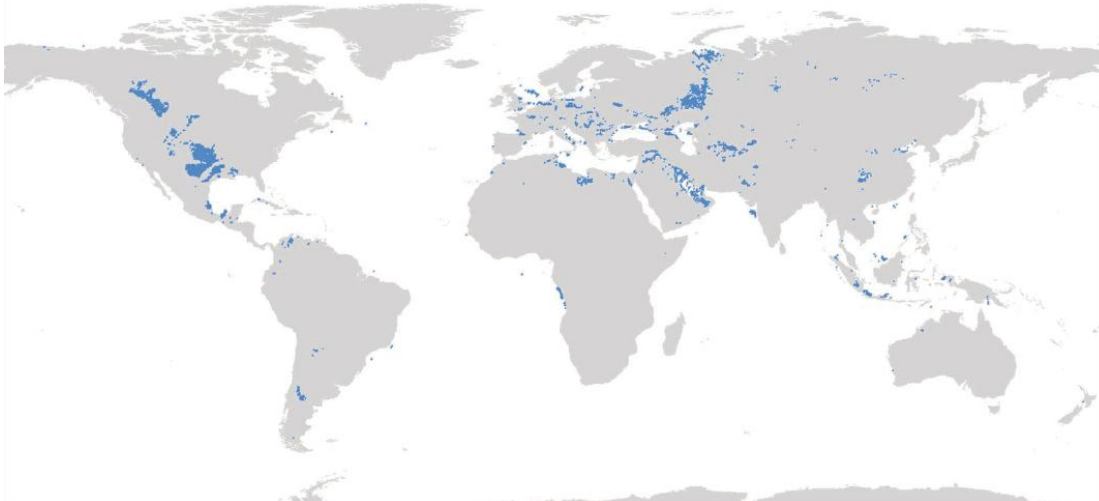
Σχήμα 3.1.: Ταξινόμηση ιζηματογενών πετρωμάτων σε τριγωνικό διάγραμμα ⁽²²⁾.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που ευνοούν τη συσσώρευση υδρογονανθράκων χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι *ψαμμίτες* (sandstones) και τα *ανθρακικά πετρώματα* (carbonate rocks). Οι δύο αυτές κατηγορίες πετρωμάτων είναι οι πιο συνηθισμένες, καθώς περιέχουν τα περισσότερα από τα παγκόσμια αποθέματα πετρελαίου σε περίπου ίσες αναλογίες, αν και τα ανθρακικά πετρώματα αποτελούν μόνο το 25% των ιζηματογενών πετρωμάτων.

Α. ΨΑΜΜΙΤΙΚΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ



Β. ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ



Σχήμα 3.2.: Γεωγραφική κατανομή των ταμιευτήρων πετρελαίου, ταξινομημένη κατά λιθολογία ⁽²²⁾.



Σχήμα 3.3. Πυρήνας κλαστικού πετρώματος (αριστερά), πυρήνας ανθρακικού πετρώματος (δεξιά) ⁽²³⁾.

Οι δύο θεμελιώδεις διαφορές μεταξύ των ανθρακικών και των ψαμμιτικών ταμιευτήρων είναι:

- (1) η θέση της δημιουργίας τους (οι ψαμμίτες είναι αλλόχθονα ιζήματα ενώ τα ανθρακικά πετρώματα είναι αυτόχθονα ιζήματα) και
- (2) η έντονη *αντιδραστικότητα* που έχουν τα ανθρακικά πετρώματα (Choquette and Pray, 1970, Moore, 2001)

Η τελευταία διαφορά έχει μεγάλη σημασία για τη διαγένεση και την ποιότητα του πετρώματος - ταμιευτήρα, διότι τα πυριτικά στρώματα των ψαμμιτών εμφανίζουν ως επί το πλείστον μόνο δευτερεύοντα αποτελέσματα της διαγένεσης εκτός από το πιθανώς ανθρακικό συγκολλητικό υλικό και την ανάπτυξη του εδάφους, ενώ τα ανθρακικά χαρακτηρίζονται από εκτεταμένη πρόωρη λιθοποίηση και έντονη τροποποίηση του πορώδους. Λόγω αυτής της αντίθεσης, θα ήταν αναμενόμενες συστηματικές διαφορές στην κατανομή του πορώδους και της διαπερατότητας με το βάθος σε αυτές τις δύο βασικές λιθολογικές κατηγορίες ταμιευτήρων πετρελαίου. Αν και η ύπαρξη τέτοιων διαφορών φαίνεται ευρέως αποδεκτή και αναφέρεται συνήθως ως βάση για ιδιαίτερη έρευνα των ανθρακικών αποθεμάτων (Tucker and Wright, 1990, Lucia, 1999, Moore, 2001), το πραγματικό μέγεθος αυτών των διαφορών δεν έχει τεκμηριωθεί επαρκώς.

3.1.1 Ανθρακικοί ταμιευτήρες (ασβεστόλιθοι και δολομίτες)

Τα περισσότερα ανθρακικά πετρώματα, όπως και τα κλαστικά, αποτελούνται από σωματίδια μεγέθους αργίλου έως άμμου (0,002-2 mm), οι οποίοι αποτέθηκαν σε θαλάσσιο περιβάλλον. Ωστόσο διαφέρουν από τα χερσαία κλαστικά στο γεγονός ότι τα ανθρακικά πετρώματα δημιουργούνται από απόθεση ασβεστίου τοπικά (αυτόχθονα), ενώ τα ψαμμιτικά πετρώματα δημιουργούνται από μεταφορά κόκκων από εξωτερική πηγή προέλευσης (αλλόχθονα), με τη βοήθεια του νερού ή του αέρα. Άλλη μια σημαντική διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι τα ανθρακικά υπόκεινται σε μετά-αποθετική διαγένεση που κυμαίνεται από την απλή συγκόλληση των αρχικών σωματιδίων μέχρι την ολοκλήρωση της ανακρυστάλλωσης ή την αντικατάσταση του Ca^+ από Mg^+ και τη δημιουργία δολομίτη (dolomitization). Τέλος, είναι επιρρεπή στη διάλυση σε όλα τα στάδια της διαγένεσής τους. Συνήθως είναι λιγότερο καλά ταξινομημένα από τα ψαμμιτικά πετρώματα, ενώ το ποσοστό αποληψιμότητας in-situ από ανθρακικά πετρώματα είναι πολύ χαμηλό (<20%).

Τα συστατικά των ανθρακικών πετρωμάτων είναι συνήθως (1) κόκκοι διάφορων πετρωμάτων, (2) ασβεστιτικό πολτό και (3) ανθρακικό τσιμέντο που καθιζάνει τελευταίο. Υπάρχουν πολλά είδη κόκκων, εκ των οποίων τέσσερα είναι τα πιο σημαντικά. Αυτά είναι (α) θραύσματα κελυφών, (β) θραύσματα παλαιών ασβεστόλιθων που «ανακατεύτηκαν» και συμπαγοποιήθηκαν, που ονομάζονται ενδοκλάστες, (γ) μικρά στρόγγυλα σφαιρίδια (εκκρίματα σκουληκιών) και (δ) ωόλιθοι από σωματίδια ασβεστίου που κύλησαν κατά μήκος του πυθμένα. Ο ασβεστιτικός πολτός αποτελείται από σωματίδια ασβεστολίθου μεγέθους πηλού, ενώ είναι το συγκολλητικό υλικό που βρίσκεται μεταξύ των κόκκων.

Οι ασβεστόλιθοι αποτελούνται από ανθρακικά ορυκτά σε ποσοστό άνω του 50%. Σε αυτό το ποσοστό, το 50% ή και παραπάνω αποτελείται από ασβεστίτη ή/και αραγωνίτη. Μικρό ποσοστό αργιλικών ορυκτών ή οργανικής ύλης δίνει το γκριζό χρώμα στους ασβεστόλιθους, το χρώμα των οποίων μπορεί επίσης να είναι λευκό, σκούρο γκρι, κιτρινωπό, πρασινωπό ή μπλε, ακόμα και μαύρο.

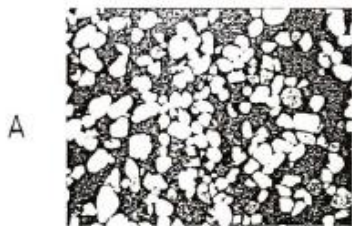
Το υψηλό πορώδες στους ανθρακικούς ταμιευτήρες συνήθως οφείλεται στη δολομιτίωση. Ο μεγαλύτερος όγκος αποθεμάτων πετρελαίου από ανθρακικούς ταμιευτήρες παγκοσμίως προέρχεται από δολομίτες. Οι δολομίτες είναι ανθρακικά πετρώματα που αποτελούνται από πάνω από 50% σε δολομίτη και ασβεστίτη/αραγωνίτη, με το δολομίτη να είναι το κυρίαρχο ορυκτό. Η χημική σύσταση ενός καθαρού δολομίτη είναι 45,7% $MgCO_3$ και 54,3% $CaCO_3$ κατά βάρος, ή αλλιώς 47,8% CO_2 , 21,8% MgO , 30,4% CaO . Η δολομιτίωση είναι μια γεωλογική διαδικασία κατά την οποία σχηματίζεται το ανθρακικό ορυκτό δολομίτη από αντικατάσταση των ιόντων Ca^{+} από ιόντα Mg^{+} σε ένα ασβεστολιθικό πέτρωμα, λόγω της δράσης νερού πλούσιου σε ιόντα μαγνησίου (θαλασσίνο ή μετεωρικό νερό). Η διαδικασία αυτή περιγράφεται από την στοιχειομετρική εξίσωση (11) ⁽²⁴⁾ η οποία προτάθηκε από τον Γάλλο γεωλόγο *Jean-Baptiste Élie de Beaumont* το 1836 ως εξής:



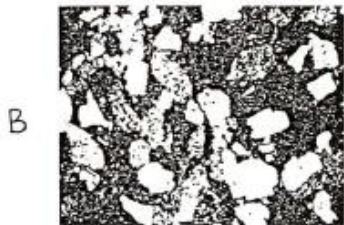
Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει σημαντικό ποσοστό ανακρυστάλλωσης και δημιουργίας κενών χώρων λόγω της διαφοράς ιοντικής ακτίνας του μαγνησίου (160pm) από του ασβεστίου (197pm), καθώς μια απώλεια όγκου 12 έως 13% λόγω της δολομιτίωσης προκαλεί αντίστοιχη αύξηση του πορώδους. Η ανακρυστάλλωση λόγω δολομιτίωσης δημιουργεί επίπεδες επιφάνειες κρυστάλλου και σκληρότερες κρυσταλλικές δομές. Έτσι, οι δολομίτες διατηρούν μεγαλύτερο μέρος του πορώδους τους κατά την συμπαγοποίηση από ότι οι ασβεστόλιθοι.

3.2 Ψαμμιτικοί ταμιευτήρες (Κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα)

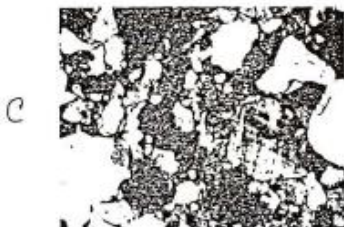
Περίπου το 60% όλων των ταμιευτήρων πετρελαίου είναι ψαμμιτικοί. Οι ψαμμίτες αποτελούνται από θρυμματισμένο υλικό, το οποίο έχει μεταφερθεί και αποτεθεί σε ένα σημείο με τη βοήθεια της δράσης των θαλάσσιων και ποτάμιων ρευμάτων και το οποίο έχει υποβληθεί σε ποικίλους βαθμούς επεξεργασίας λόγω της δράσης του νερού. Κατά συνέπεια, οι ψαμμιτικοί ταμιευτήρες ποικίλλουν, από καλά ταξινομημένο ψαμμίτη με στρογγυλεμένους κόκκους (Σχήμα 3.3a), αστριούχους ψαμμίτες με πιο γωνιώδεις κόκκους που περιέχουν διάφορες ποσότητες αργίλου (Σχήμα 3.3b) έως και αργιλικούς ψαμμίτες, πτωχά ταξινομημένους, που περιέχουν μεγάλο ποσοστό κροκάλων και θραυσμάτων (Σχήμα 3.3c). Όλοι οι παραπάνω σχηματισμοί μπορούν να επηρεαστούν από διάφορους βαθμούς συμπίκνωσης, διαγένεσης, διάλυσης και αντικατάστασης ορυκτών.



Α
Ψαμμίτης σε επιπειρωτικό περιβάλλον ιζηματογένεσης, St. Peter sand, Mid Continent (πολωμένο φως)



Β
Ψαμμίτης σε παράλιο περιβάλλον ιζηματογένεσης, Seeligson field, south Texas (πολωμένο φως)



Γ
Ψαμμίτης σε ορογενετικό περιβάλλον ιζηματογένεσης, Ventura field, California (πολωμένο φως)

Σχήμα 3.3: Παραδείγματα ψαμμιτικών πετρωμάτων ταμιευτήρων ⁽²⁵⁾.

(Α) καθαρό, καλά ταξινομημένο ψαμμίτης, (Β) γωνιώδης, αστριούχος ψαμμίτης και (Γ) αργιλικός, πτωχά ταξινομημένος ψαμμίτης

3.2.1 Βασικά χαρακτηριστικά ψαμμιτικών ταμιευτήρων

Τα κύρια συστατικά των ψαμμιτών είναι πέντε:

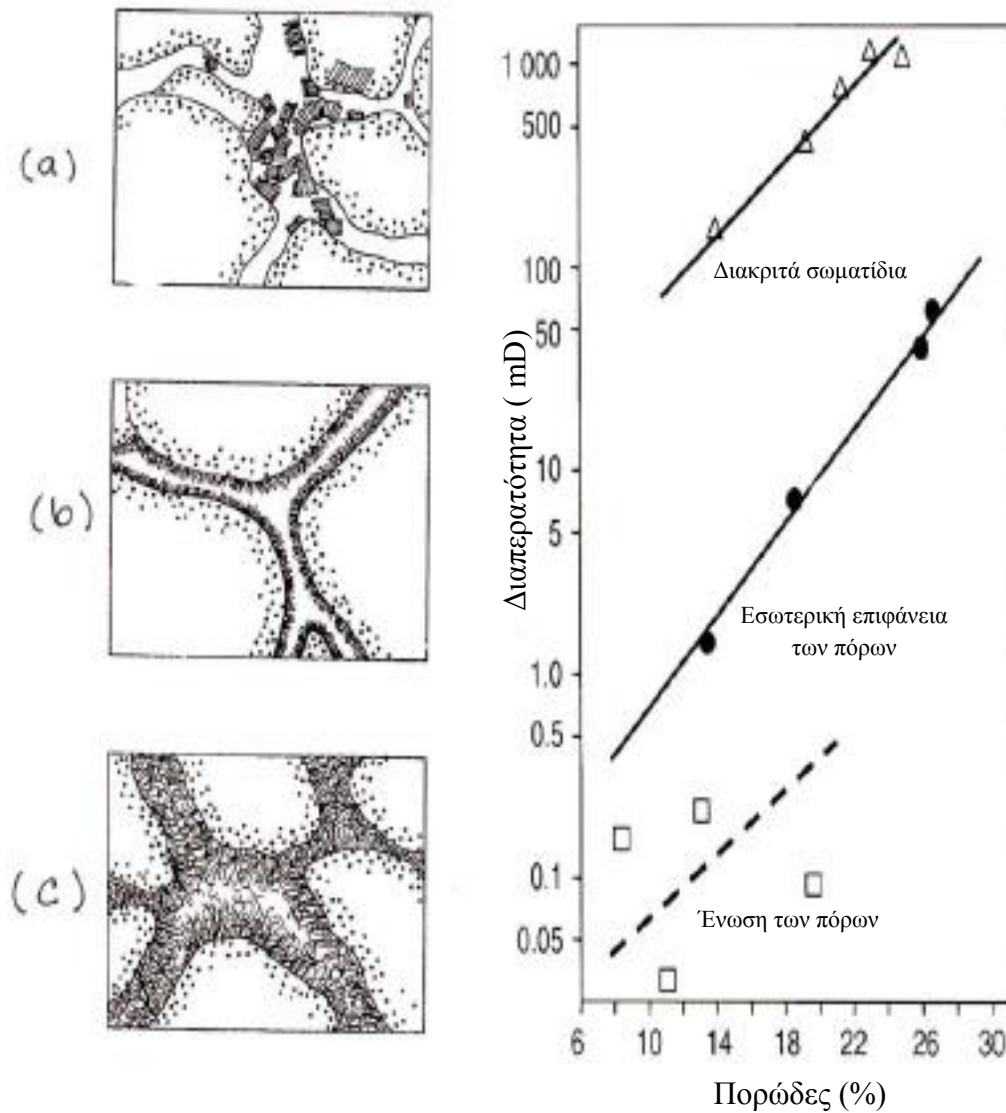
1. Κόκκοι χαλαζία (Qtz)
2. Κόκκοι αστρίων (Fs)
3. Θραύσματα πετρωμάτων (U.R.F.)
4. Υλικό πλήρωσης (matrix)
5. Συγκολλητικό υλικό (cement)

Η βασική εικόνα ενός ψαμμιτικού ταμιευτήρα δίνεται από τους κόκκους της άμμου που είναι συμπαγοποιημένοι σε κάποιον βαθμό, μεταξύ των οποίων μπορεί να υπάρχει υλικό πλήρωσης ή κενοί χώροι. Το πλήθος αυτών των ενδιαμέσων κενών χώρων – δηλαδή το πορώδες – ελέγχεται πρωτίστως από την ταξινόμηση του ιζηματογενούς πετρώματος και δευτερευόντως από το βαθμό συμπαγοποίησης των κόκκων. Η ταξινόμηση είναι το μέτρο της εξάπλωσης της κατανομής του μεγέθους των κόκκων κατά μέσο όρο σε ένα ίζημα.

Το πορώδες είναι στο μέγιστο βαθμό σε ένα καλά ταξινομημένο ίζημα με υψηλό βαθμό σφαιρικότητας στους κόκκους, αλλά σταδιακά μειώνεται καθώς η γωνιότητα των κόκκων αυξάνεται, καθώς οι γωνιώδεις κόκκοι τείνουν να συσσωρεύονται πιο κοντά από ότι οι αποστρογγυλεμένοι. Πειραματικά δεδομένα από τεχνητές άμμους επιβεβαιώνουν ότι το μέγεθος των κόκκων ουσιαστικά δεν επηρεάζει το πορώδες για μια καλά ταξινομημένη άμμο. Ωστόσο, το πορώδες της κορεσμένης άμμου δείχνει μια γενική μείωση καθώς η ταξινόμηση γίνεται φτωχότερη. Αυτό συμβαίνει καθώς τα διάκενα μεταξύ των μεγαλύτερων κόκκων πληρώνονται από μικρότερους κόκκους, οι οποίοι αποτελούν το υλικό πλήρωσης και έτσι μειώνουν τους κενούς χώρους του πετρώματος.

Η διαπερατότητα, ως μέτρο της ευκολίας με την οποία ένα υλικό διευκολύνει την κίνηση ρευστών στο εσωτερικό του, εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος, το σχήμα και την έκταση των συνδεδεμένων πόρων (ενεργό πορώδες) παρά από το μέγεθος των ίδιων των πόρων. Ωστόσο, επειδή οι διασυνδέσεις αυτές σχετίζονται άμεσα με το μέγεθος των πόρων, το οποίο με τη σειρά του σχετίζεται με το μέγεθος των κόκκων, υπάρχουν σχέσεις μεταξύ αυτών των παραγόντων και της διαπερατότητας. Οι *Krumbein* και *Monk* (1942) ⁽²⁶⁾ έδειξαν ότι η διαπερατότητα μεταβάλλεται ως το τετράγωνο της μέσης διαμέτρου κόκκων και μια σύνθετη συνάρτηση ταξινόμησης (με τους άλλους παράγοντες να είναι ίσοι). Τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν μια σημαντική μείωση της διαπερατότητας καθώς μειώνεται το μέγεθος των κόκκων και καθώς η ταξινόμηση γίνεται φτωχότερη. Επίσης, η διαπερατότητα που μετράται κάθετα στη στρώση είναι συνήθως μικρότερη από τη διαπερατότητα που μετράται παράλληλα με τη στρώση και ότι μεγάλες διακυμάνσεις στη διαπερατότητα συμβαίνουν σε διαφορετικές κατευθύνσεις στο επίπεδο της στρώσης.

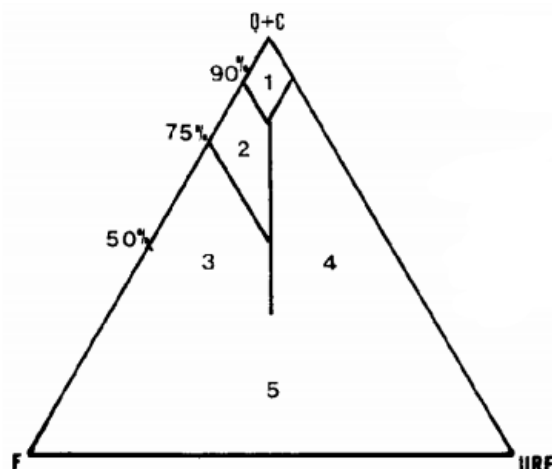
Η ύπαρξη αργιλικού υλικού στο ενδιάμεσο των πόρων ενός ταμιευτήρα μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοσή του κατά την απόληψη των υδρογονανθράκων. Η ποσότητα και το είδος του αργιλικού υλικού, καθώς και η κατανομή του στο πέτρωμα έχει σημαντική επίδραση στη διαπερατότητα του πετρώματος, ενώ ένα μικρό ποσοστό υλικού έχει μικρή επίδραση στο πορώδες.



Σχήμα 3.4: Τρεις γενικευμένοι τύποι αργιλικού υλικού μέσα σε ψαμμιτικούς ταμιευτήρες, και οι επιπτώσεις στην διαπερατότητα: (α) διακριτά σωματίδια καολινίτη, (β) κάλυψη της επιφάνειας των κόκκων από χλωρίτη, (γ) «φράξιμο» των πόρων από ιλλίτη (Τροποποιημένο, από Neasham, 1977) ⁽²⁷⁾

3.2.2 Κατηγορίες ψαμμιτικών πετρωμάτων – ταμιευτήρων

Εάν χρησιμοποιήσουμε ένα διάγραμμα τριών στοιχείων, μπορούμε να διακρίνουμε τους κόκκους άμμου σε αυτούς που αποτελούνται από χαλαζία, αστρίους και θραύσματα πετρωμάτων (*Unstable Rock Fragments, U.R.F.*). Τα θραύσματα πετρωμάτων αποτελούνται από μικροκρυσταλλικό (ή κρυπτοκρυσταλλικό) χαλαζία, συμπεριλαμβανομένου του κερατόλιθου, ενός σκληρού, αδιαφανούς πετρώματος που αποτελείται από χαλαζία σε μορφή χαλκηδόνιου με μια άμορφη ή μικροσκοπικά λεπτόκοκκη υφή. Οι ψαμμίτες με ποσοστό άνω του 25% σε αστρίους και χαμηλή περιεκτικότητα σε θραύσματα πετρωμάτων ονομάζονται *αρκόζες*. Αν το ποσοστό των θραυσμάτων είναι υψηλό, αποτελούν τους *λιθικούς ψαμμίτες* που φυσιολογικά προέρχονται από πολύ λεπτόκοκκους ιζηματογενείς σχηματισμούς ή βασάλτες και άλλα πυριγενή πετρώματα στα οποία ένας κόκκος άμμου συχνά αποτελείται από διάφορα ορυκτά.



Q+C = χαλαζίας + κερατόλιθος
F = αστρίοι
URF = θραύσματα πετρωμάτων

Ταξινόμηση

- 1 = χαλαζιακός αρενίτης ή βάκης
- 2 = αστριούχος αρενίτης ή βάκης
- 3 = αρκοζικός αρενίτης ή βάκης
- 4 = λιθικός αρενίτης ή βάκης
- 5 = ηφαιστειακός αρενίτης ή βάκης

Σχήμα 3.5.: Ταξινόμηση ψαμμιτών κατά Williams et al., 1954.⁽²⁸⁾

Χαλαζιακοί αρενίτες ή βάκες ή αλλιώς ορθοχαλαζίτες είναι ο όρος για καθαρούς χαλαζιακούς ψαμμίτες που περιέχουν αστρίους και θραύσματα πετρωμάτων σε ποσοστό κάτω από 5% . Ψαμμίτες με μέτριο ποσοστό αστρίων (5-25%) ονομάζονται *υποαρκόζες*. Όταν γρανιτικά πετρώματα και άλλα αδρόκοκκα ως μεσαίου μεγέθους κόκκων πετρώματα διασπώνται από τις καιρικές συνθήκες ή τη διάβρωση, σχηματίζουν κόκκους άμμου που αποτελούνται ως επί το πλείστον από μεμονωμένα ορυκτά, κυρίως χαλαζία και αστρίους.

Προϋπόθεση για τον σχηματισμό αρκόζης είναι ότι δεν έχει μετατραπεί υπερβολικά μεγάλο ποσοστό αστρίων του μητρικού πετρώματος σε αργιλικά ορυκτά λόγω εξαλλοίωσης (π.χ. καολινίτης). Οι αρκόζες λοιπόν σχηματίζονται λόγω ταχύτατης διάβρωσης πετρωμάτων όπως είναι οι γρανίτες και οι γνεύσιοι, όπου τα ιζήματα θάβονται σε μια λεκάνη μετά από μια σχετικά μικρή απόσταση μεταφοράς. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι αρκόζες σχετίζονται με ρηξιγενείς ιζηματογενείς λεκάνες, οι οποίες δημιουργήθηκαν από ρήγματα που προκλήθηκαν σε γνευσιακά και γρανιτικά πετρώματα, όπως γίνεται σε περιπτώσεις ηπειρωτικού φλοιού. Σε ψυχρά κλίματα το ποσοστό της διάβρωσης μειώνεται, διατηρώντας έτσι τους αστρίους και τα U.R.F.

Σύσταση κόκκων	Κλαστικό υλικό πλήρωσης >15% ¹ . Σχεδόν απουσία συγκολλητικού υλικού χημικής προέλευσης	Κλαστικό υλικό πλήρωσης <15%. Πόροι άδειοι ή πληρωμένοι με συγκολλητικό υλικό χημικής προέλευσης		
Άστριοι > Θραύσματα πετρωμάτων	ΓΡΑΟΥΒΑΚΕΣ αστριούχοι	ΑΡΚΟΖΙΚΟΙ ΨΑΜΜΙΤΕΣ		ΟΡΘΟΧΑΛΑΖΙΤΕΣ
		αρκόζες	υποαρκόζες ή αστριούχοι ψαμμίτες	ελεύθεροι κερατόλιθου
Θραύσματα πετρωμάτων > Αστρίους	ΓΡΑΟΥΒΑΚΕΣ λιθικοί	ΛΙΘΙΚΟΙ ΨΑΜΜΙΤΕΣ		με κερατόλιθο
		υπογραουβάκες	πρωτοχαλαζίτες	
Χαλαζίας ²	<75%	<75%	75-95%	>95%

Πίνακας 3.1.: Ταξινόμηση ψαμμιτών κατά Pettijohn, 1957.⁽²⁹⁾

Σε τεκτονικά σταθερές περιοχές με ώριμο ανάγλυφο υπάρχει πολύ περισσότερος χρόνος για διάβρωση τόσο του αυτόχθονου υποστρώματος, όσο και του ιζήματος κατά τη μεταφορά του. Σε τέτοια περιβάλλοντα οι κόκκοι άμμου αποτίθενται και διαβρώνονται πολλές φορές πριν φτάσουν στο τελικό σημείο μεταφοράς, όπου και θα γίνει η διαγένεση. Μεγαλύτερη αναλογία κόκκων αστρίων θα διασπαστεί κατά τη διάρκεια της μεταφοράς, καθώς οι άστριοι (συνήθως στις αρκόζες βρίσκονται ως μικροκλινής) υποδηλώνουν ορυκτολογική ανωριμότητα σε ένα ιζηματογενές πέτρωμα και είναι από τα πρώτα ορυκτά που αλλοιώνονται κατά τη μεταφορά των ιζημάτων από την πηγή προέλευσης.

Οι *ορθοχαλαζίτες* ή *χαλαζιακοί αρενίτες* είναι οι πιο «καθαροί» χαλαζιακοί ψαμμίτες, οι οποίοι σχηματίζονται καθώς οι καιρικές συνθήκες έχουν εξαλείψει όλα τα ασταθή ορυκτά (όπως οι άστριοι), έτσι ώστε να παραμείνουν μόνο κόκκοι χαλαζία, ο οποίος είναι σκληρό ορυκτό που δεν επιδέχεται αλλοιώσεις, καθώς και μερικά βαριά μέταλλα. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στις παράλιες άμμους, από τις οποίες έχει αφαιρεθεί όλο το ποσοστό σε αργιλικά ορυκτά. Οι ποτάμιες άμμοι είναι λιγότερο καλά ταξινομημένες και μπορεί να περιέχουν περισσότερη άργιλο. Οι ψαμμίτες με ποσοστό μεγαλύτερο από 15% σε συγκολλητικό υλικό (matrix) ονομάζονται *γραουβάκες* (*greywackes*).

Η άμμος που μεταφέρεται σε αιώρηση ή μέσω μαζικής ροής (όπως για παράδειγμα οι *τουρβιδίτες*) μπορεί να έχει φτωχότερη ταξινόμηση, υψηλή περιεκτικότητα σε συγκολλητικό υλικό, οπότε και σχηματίζει *γραουβάκες*. Τα αργιλικά ορυκτά που μπορεί να υπάρχουν μέσα στους ψαμμίτες μπορεί να σχηματιστούν μετά την απόθεση και κατά τη διάρκεια της διαγένεσης από εξαλλοιώσεις σε αστρίους, μικροκλινή και θραύσματα ορυκτών ευαίσθητων σε εξαλλοιώσεις. Αυτή η διεργασία μειώνει το βαθμό ταξινόμησης του πετρώματος κατά τη διάρκεια της απόθεσης.

Βασικά πετρώματα όπως ο γάββρος και ο βασάλτης, τα οποία περιέχουν ορυκτά όπως οι αμφίβολοι και οι πυρόξενοι είναι εκ φύσεως ασταθή, τόσο μηχανικά όσο και χημικά. Πρωτογενείς κόκκοι προέλευσης ηφαιστειακών ή βασικών πετρωμάτων μπορούν να σπάσουν σε τόσο μεγάλο βαθμό κατά τη μεταφορά τους που να αποτελούν το συγκολλητικό υλικό στο ιζηματογενές πέτρωμα που θα δημιουργηθεί, κάνοντας πολύ δύσκολη την αναγνώρισή τους και την εύρεση της πηγής προέλευσής τους.

Από τις παραπάνω πληροφορίες γίνεται αντιληπτό ότι διαφορετικοί τύποι ψαμμιτικών πετρωμάτων αντανακλούν διαφορετικά παλαιοπεριβάλλοντα, διαφορετικές πηγές προελεύσεως των συστατικών τους, καθώς και διαφορετική ορυκτολογική ωριμότητα και τεκτονική σταθερότητα. Όλοι αυτοί οι δείκτες μπορούν να χρησιμεύσουν για να βρεθεί το γεωλογικό παρελθόν της περιοχής και του πετρώματος, πληροφορία σημαντική για την αναζήτηση υδρογονανθράκων, καθώς και η γένεσή τους απαιτεί συγκεκριμένες κλιματικές και περιβαλλοντικές συνθήκες.

3.2.3 Η διαγένεση των ψαμμιτικών ταμιευτήρων

Η διαγένεση στους ψαμμιτικούς ταμιευτήρες έχει σημασία, καθώς επηρεάζει το αρχικό τους πορώδες, τη διαπερατότητα και τον κορεσμό σε νερό. Αυτό προκαλείται από μια διεργασία που ονομάζεται *συγκόλληση ή τσιμεντοποίηση (cementation)*, με ταυτόχρονο σπάσιμο των κόκκων σε μικρότερους και αύξηση της πίεσης των διαλυμάτων. Στους ψαμμίτες, η δημιουργία συγκολλητικού υλικού μειώνει το πορώδες και τη διαπερατότητα και έτσι η κίνηση των ρευστών στο εσωτερικό δυσχεραίνεται και αυξάνεται η πίεση εισόδου στους πόρους του πετρώματος. Επίσης, η δημιουργία ορυκτών της αργίλου λόγω εξαλλοιώσεων των ορυκτών του πετρώματος μπορεί να επηρεάσει

αρνητικά τις ιδιότητες του πετρώματος αυτού. Τα ορυκτά αυτά αποτελούν ταυτόχρονα και παράγοντες συγκόλλησης, τα οποία μπορούν να δημιουργηθούν αυθιγενώς στα ψαμμιτικά πετρώματα. Τα πιο συνηθισμένα αργιλικά ορυκτά είναι ο καολινίτης, ο χλωρίτης, ο ιλλίτης και ο σμεκτίτης. Γενικά όμως στα ψαμμιτικά πετρώματα τα πιο συνήθη ορυκτά που συναντώνται ως συγκολλητικό υλικό είναι ο ασβεστίτης, ο δολομίτης, ο χαλαζίας, ο σιδηρίτης, ο ανυδρίτης, ο μοσχοβίτης, ο καλιούχος άστριος, ο αιματίτης και οι ζεόλιθοι.

Το μέγεθος των πόρων στο συγκολλητικό υλικό είναι συνήθως $<5\mu\text{m}$ αλλά μπορεί σε μερικές περιπτώσεις να φτάσει και ως τα $40\mu\text{m}$. Το πορώδες και η διαπερατότητα επηρεάζονται ενεργά, τόσο από τη σύσταση του υλικού συγκόλλησης όσο και από το μέγεθος των κόκκων. Η επίδραση των αργιλικών ορυκτών στη διαπερατότητα των ψαμμιτών είναι πολύ υψηλή, ακόμη και σε περιπτώσεις όπου η συνολική περιεκτικότητα σε αργιλικά ορυκτά φτάνει μόλις το 5%. Επιπλέον, το πορώδες και η διαπερατότητα επηρεάζονται με την αύξηση του βάθους του ιζηματογενούς σχηματισμού. Γενικά, ο βαθμός μείωσης των ιδιοτήτων αυτών είναι υψηλότερος σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη γεωθερμική βαθμίδα, ενώ η παρουσία υδρογονανθράκων μπορεί να αναστείλει τη συγκόλληση και τη μείωση του πορώδους. Αυτή η αναστολή είναι χαμηλότερη σε πετρώματα που περιέχουν αέριους υδρογονάνθρακες από ότι σε πετρώματα που περιέχουν υγρούς υδρογονάνθρακες. Τέλος, σημαντικό ρόλο παίζει στην αλλαγή του πορώδους και της διαπερατότητας το περιβάλλον απόθεσης του πετρώματος.

Το περιβάλλον απόθεσης έχει πρωταρχική σημασία ως προς το ποσοστό του αρχικού ενδοπορικού νερού στους ψαμμίτες. Σε αυτό το ποσοστό έπειτα προστίθενται το μετεωρικό νερό και το θαλάσσιο νερό. Η θεμελιώδης διαφορά των δύο είναι το pH τους, καθώς το μετεωρικό νερό γενικά έχει χαμηλό pH ενώ το pH του θαλασσινού νερού κυμαίνεται σταθερά μεταξύ 8 και 8,3. Κατά συνέπεια, μια θαλάσσια φάση ψαμμιτικής ιζηματογένεσης και μια φάση γλυκού νερού, όπως για

παράδειγμα οι ποτάμιες φάσεις ιζηματογένεσης ψαμμιτών, ξεκινούν τη διαγένεσή τους σε εντελώς αντίθετα αποθετικά περιβάλλοντα, και προφανώς χημικά συστήματα.

Πίνακας 3.2: Σύσταση των κύριων στοιχείων σε θαλάσσια και ποτάμια ύδατα (Τροποποιημένο, από Holland, 1978, table 5-1, p.154)⁽³⁰⁾.

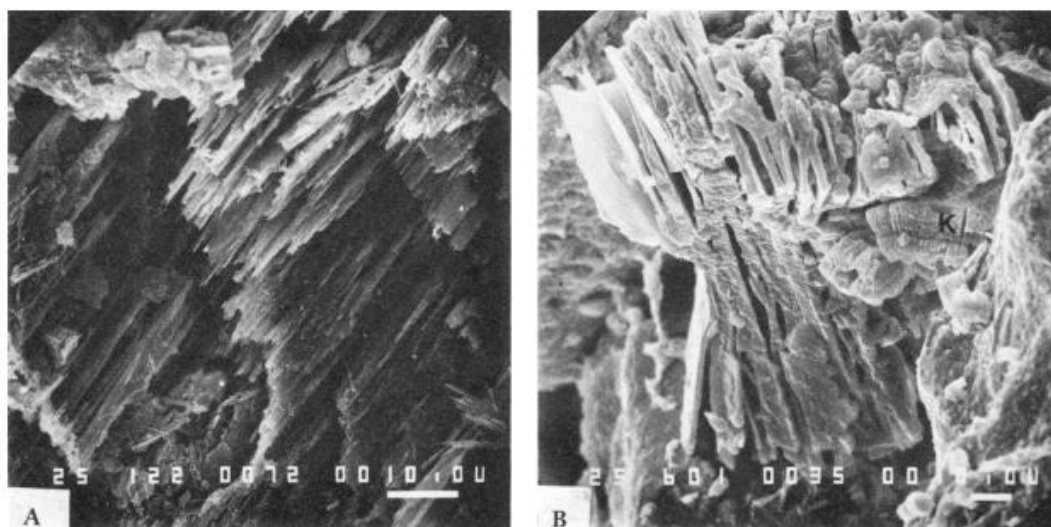
<u>ΣΤΟΙΧΕΙΟ</u>	<u>ΜΕΣΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ ΜΕ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ 35%</u> <u>(mg kg⁻¹)</u>	<u>ΜΕΣΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΣΕ ΠΟΤΑΜΙΟ ΝΕΡΟ</u> <u>(mg kg⁻¹)</u>
Νάτριο	10-760	6-9
Μαγνήσιο	1-294	3-9
Ασβέστιο	412	15-0
Κάλιο	399	2-1
Στρόντιο	7-9	
Χλώριο	19-350	8-1
Θείο	2-712	10-6
Διττανθρακικά (XHCO_3^-)	145	55-9
Βρωμιούχα	67	
Βόριο	4-6	
Φθοριούχα	1-3	

Δεν υφίσταται μοναδικός παράγοντας που να ελέγχει την διαγένεση των ψαμμιτών. Στη διαδικασία αυτή λαμβάνει μέρος ένα σύνολο διαφορετικών παραγόντων, από τους οποίους ο καθένας λειτουργεί διαφορετικά ως προς το αποτέλεσμα της διαγένεσης. Επιπλέον, όλοι αυτοί οι παράγοντες είναι συγγενικοί μεταξύ τους, για παράδειγμα η θερμική αποσύνθεση ενός ορυκτού, παρουσία υδατικού διαλύματος, θα αλλάξει τη σύσταση του ενδοπορικού νερού καθώς αυτό αποσυντίθεται σταδιακά. Τελικά, η θερμοκρασία είναι αυτή που ασκεί την κύρια επιρροή στη σύσταση και στις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε ένα ψαμμιτικό πέτρωμα, καθώς η μεταμορφική διαδικασία λαμβάνει χώρα (Robin, 1979, Beach, 1979). Παρόλα αυτά, στην πλειονότητά τους οι

ταμιευτήρες υδρογονανθράκων δεν σχετίζονται τυπικά με υψηλές θερμοκρασίες ταφής, καθώς οι πιο σημαντικές διαγενετικές αντιδράσεις είναι αυτές που συμβαίνουν μεταξύ της απόθεσης του ιζήματος σε μικρό βάθος (επιφανειακά) και μέχρι να φτάσει τα 2-4 km βάθος λόγω ενταφιασμού.

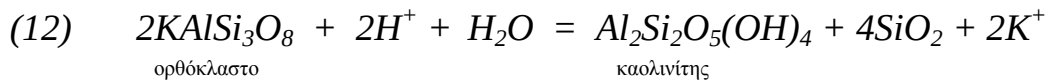
3.2.3.1. Διάλυση ορυκτών.

Τα κύρια ορυκτά που σχηματίζουν πετρώματα σε ψαμμίτες διαλύονται ασυμβίβαστα κάτω από φυσικές συνθήκες του ενδοπορικού νερού με ρυθμούς διάλυσης που σχετίζονται με επιφανειακές αντιδράσεις (Berner, 1978). Η διάλυση των ορυκτών στους ψαμμίτες είναι σημαντική για δύο πρακτικούς λόγους: (1) τα πυριτικά ορυκτά αποτελούν πηγή υλικού για τις αυθιγενείς αργίλους και (2) η διαλυτοποίηση των πυριτικών ορυκτών αυξάνει το μικρο-πορώδες (δευτερογενές πορώδες) των ορυκτών, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η διαπερατότητα, ιδιότητα χρήσιμη για έναν ταμιευτήρα πετρελαίου.

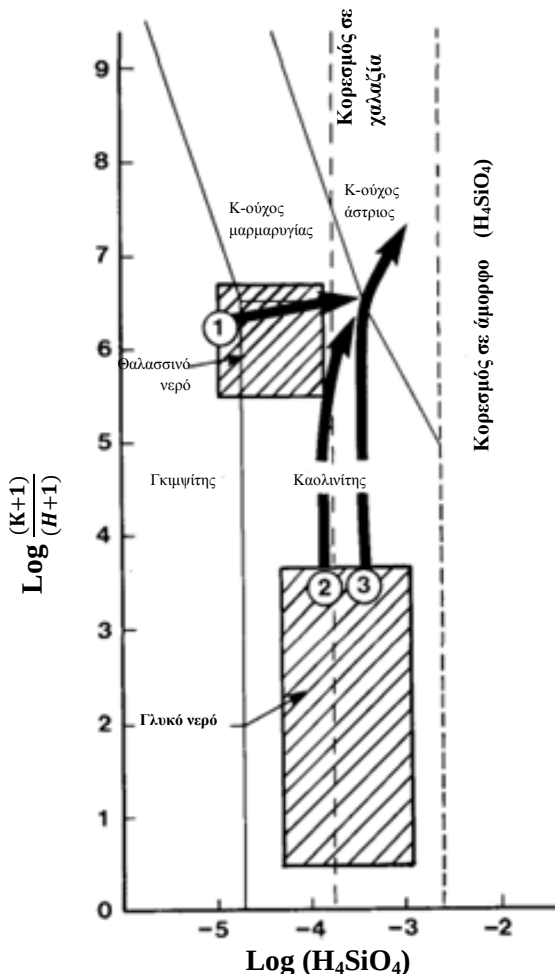


Σχήμα 3.6.⁽³¹⁾: (Α) Διαβρωμένος καλιούχος άστριος που εμφανίζει στοιχεία σχετικά με ασυμβίβαστη διάλυση κατά μήκος της σχιστότητας σε δύο επίπεδα. Κλίμακα: 10 μm . (Β) Διαβρωμένος μοσχοβίτης. Η διάλυση έχει προκαλέσει διατάραξη της σχιστότητας, δημιουργώντας λυγισμένες και εξογκωμένες προεξοχές. Περιέχεται επίσης αυθιγενής καολινίτης (K). Κλίμακα: 10 μm .

Η διάλυση του αστρίου έχει συνδεθεί με μια διαδικασία όξινης διάλυσης η οποία παράγει αυθιγενή καολινίτης ως εξής⁽³²⁾:



Για να συνεχιστεί η διάλυση του πυριτίου και η εξίσωση (12) να μεταφερθεί προς τα δεξιά, είναι απαραίτητη η απομάκρυνση των διαλυμένων κατιόντων. Για το λόγο αυτό, σε φυσικά συστήματα, αρκεί μια ροή όξινου νερού για να διαλύσει μεγάλες ποσότητες καολινίτη που θα σχηματιστεί με την παραπάνω διαδικασία. Διάφορα διαλυμένα πυριτικά άλατα, κυρίως μαρμαρυγίες μπορούν να παράγουν επίσης καολινίτη, καθώς σε περίπτωση που η δημιουργία κατιόντων καλίου είναι πολύ γρήγορη, οι μαρμαρυγίες μπορούν να σχηματίσουν μεταστατικό βερμικουλίτη (*Fanning & Keramidas, 1977*).



Σχήμα 3.7.⁽³³⁾: Διάγραμμα δραστηριότητας του $\log (K^+/H^+)$ προς το $\log (H_4SiO_4)$ στους 25 °C (τροποποιημένο, από Morgan, 1967). Υποδεικνύονται τρεις δρόμοι της πιθανής εξέλιξης του ενδοπορικού νερού: (1) δείχνει την εξισορρόπηση του θαλασσινού νερού με διαλυμένη συγκέντρωση, (2) δείχνει την εξισορρόπηση του γλυκού νερού με διαλυμένα ορυκτά και μικρό ποσοστό χαλαζιακού ιζήματος, (3) όπως στο (2) όμως με περισσότερο χαλαζιακό υλικό και υπερκορεσμό σε σχέση με τους αστρίους.

3.3. Γεωχημική εξέλιξη της οργανικής ύλης. Διαγένεση – Καταγένεση - Μεταγένεση

Η διαδικασία της γένεσης του πετρελαίου λαμβάνει χώρα σε ένα πλαίσιο θερμοκρασιών και πιέσεων οι οποίες είναι χαμηλότερες από αυτές που προκαλούν την εκτεταμένη μετατροπή των ορυκτών γνωστή ως μεταμόρφωση. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας και μέσα στο γεωλογικό χρόνο, τα ορυκτά υφίστανται μόνο μικρές μετατροπές, ενώ η οργανική ύλη είναι ένας πιο ευαίσθητος παράγοντας από τα ορυκτά ως δείκτης αλλαγής πιέσεων και ιδιαίτερα αλλαγής θερμοκρασιών, στα πρώτα χιλιόμετρα βάθους ταφής του πετρώματος. Έπειτα οι ρόλοι αντιστρέφονται και οι τροποποιήσεις των υπολειμμάτων άνθρακα, τα οποία αποτελούν το αποτέλεσμα της οργανικής εξέλιξης της ζώνης αυτής, είναι λιγότερο ευαίσθητα στη μεταμόρφωση των ορυκτών.

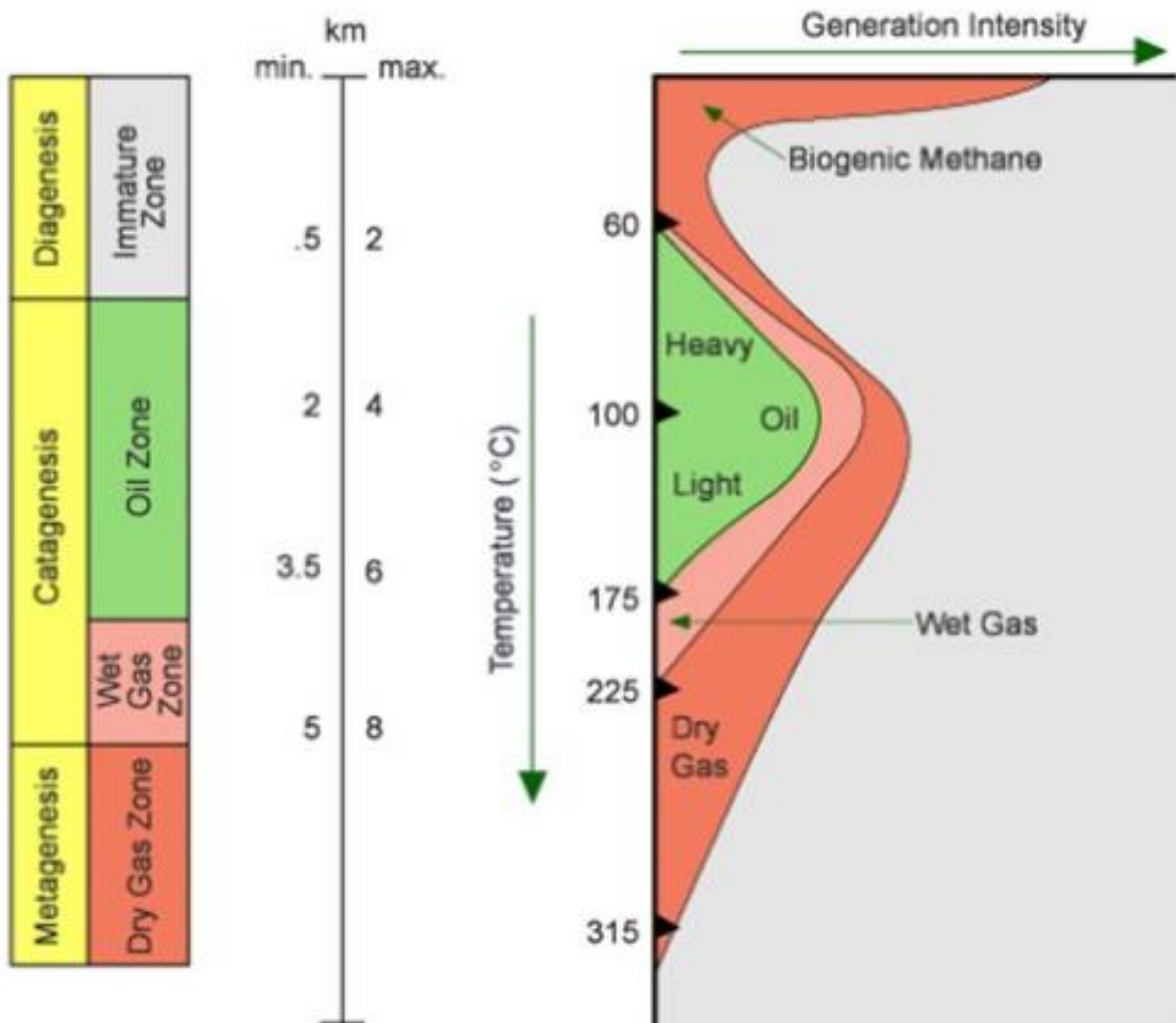
Η οργανική γεωχημεία, η οποία ασχολούνταν αρχικά μόνο με την ανάλυση των συστατικών των ζωντανών οργανισμών, γρήγορα έλαβε γενικότερη έννοια. Η οργανική ύλη αρχικά δημιουργείται από έντονο πολυμερισμό στερεού υλικού και διακρίνεται πολύ δύσκολα από το *χερσαίο κηρογόνο (terrestrial kerogen)*. Η μαζική εμφάνιση της χερσαίας οργανικής ύλης σχετίζεται με την εμφάνιση της ζωής στον πλανήτη μας. Είναι δύσκολο να αξιολογηθεί η ποσότητα της βιομάζας για δεδομένο χρόνο από το περιεχόμενο της οργανικής ύλης των αντίστοιχων πετρωμάτων. Οι πιο εξομαλυσμένες ταξινομήσεις δίνουν μια αργή και ομαλά ανοδική καμπύλη σε σχέση με το χρόνο, κάτι το οποίο έχει διάφορες εύλογες εξηγήσεις. Παρά ταύτα, από ποιοτικής απόψεως, η εμφάνιση και έκρηξη κατά το Παλαιοζωικό της πλούσιας σε λιγνιτικό υλικό χερσαίας φυτικής ύλης σηματοδοτεί μια αποκοπή με τον προγενέστερο χρόνο, όταν η ζωντανή ύλη ήταν ωκεάνιου περιβάλλοντος (φυτοπλανκτόν). Επίσης, το γεγονός αυτό καθιερώνει την αρχική διαφοροποίηση μεταξύ αυτόχθονων ηπειρωτικών και θαλάσσιων εισροών στην ιζηματογένεση.

Ο σχηματισμός των υδρογονανθράκων ξεκινά από τη διάσπαση της οργανικής ύλης και το σχηματισμό του κηρογόνου, από το οποίο έπειτα θα σχηματιστούν οι υδρογονάνθρακες (πετρέλαιο και φυσικό αέριο). Η γένεσή τους εξαρτάται από τις παρακάτω βασικές προϋποθέσεις: την παρουσία οργανικού υλικού σε ικανή ποσότητα, την έλλειψη οξυγόνου (ανοξικές συνθήκες), την κατάλληλη θερμοκρασία και το χρόνο ώστε το μητρικό πέτρωμα να οδηγηθεί σε *ωρίμανση (maturation)*, καθώς επίσης την κατάλληλη πίεση και την έντονη παρουσία βακτηρίων και μικροοργανισμών.

Οι φυσικοχημικές διαδικασίες που δρουν στην οργανική ύλη κατά τη μετατροπή της σε υδρογονάνθρακες χωρίζονται σε τρία στάδια. Αυτά είναι:

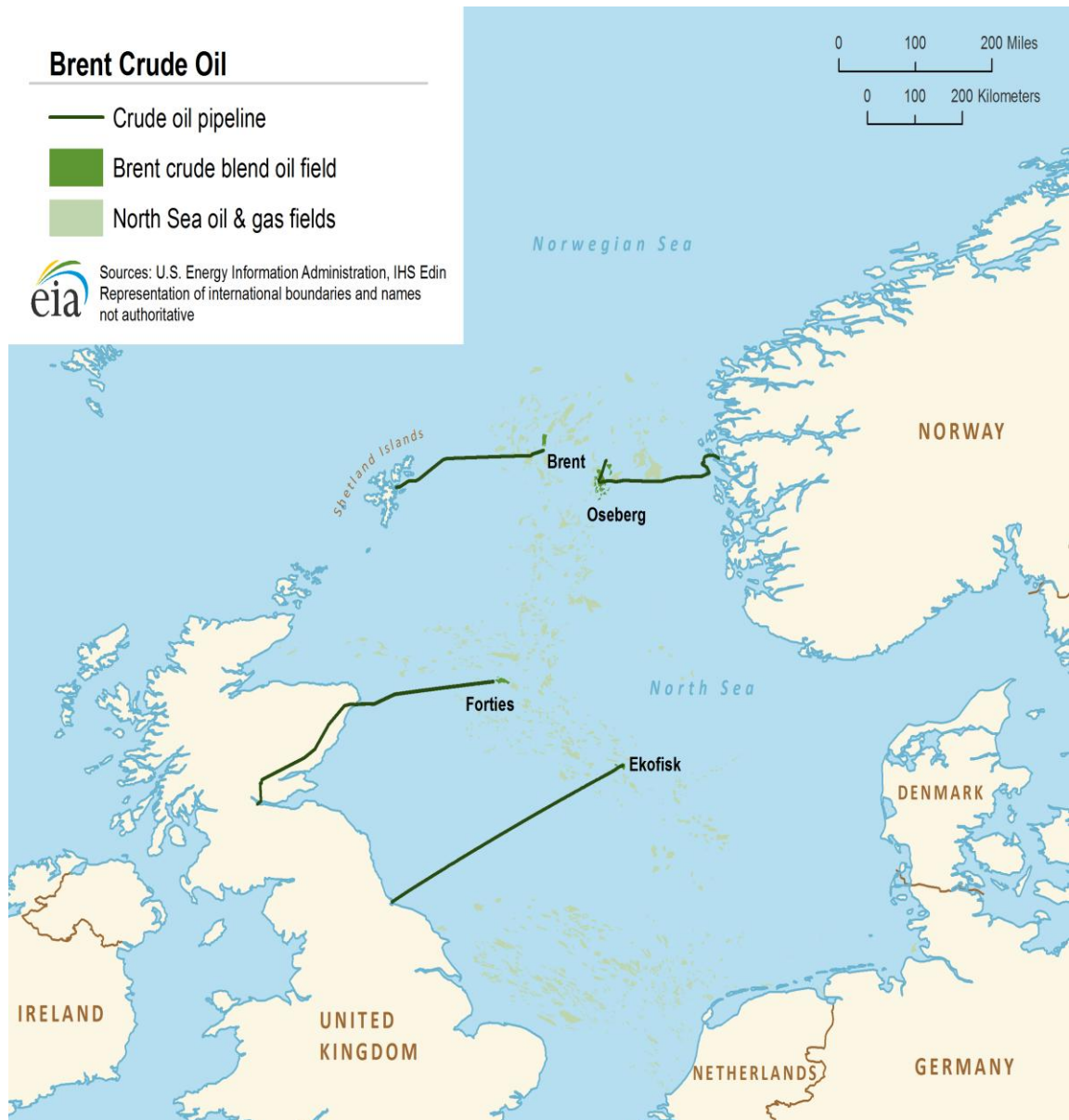
- I. **Διαγένεση:** αποτελεί πρωταρχικό στάδιο της αλλοίωσης των μη συμπαγοποιημένων (ακόμα) ιζημάτων, καθώς ξεκινά η ωρίμανση του κηρογόνου, η οποία απαιτεί θερμοκρασία μικρότερη των 50 °C. Κατά τη διάρκεια της διαγένεσης, η δράση των μικροοργανισμών και των αναερόβιων βακτηρίων είναι ο βασικός τρόπος διάσπασης του οργανικού υλικού, με ταυτόχρονη παραγωγή βιογενούς αερίου (*biogenic gas*).
- II. **Καταγένεση:** κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου λαμβάνει χώρα χημική και φυσική αλλοίωση των ιζηματογενών σχηματισμών καθώς και των περιεχόμενων ρευστών τους. Οι θερμοκρασίες του σταδίου αυτού κυμαίνονται από 50 έως τουλάχιστον 150 °C, καθώς σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών γίνεται η *αποδόμηση* των πολύπλοκων χημικών δεσμών του κηρογόνου, σχηματίζοντας πετρέλαιο. Εάν η θερμοκρασία φτάσει στους 150 °C, μπορεί να συμβεί μια δευτερογενής διάσπαση των χημικών δεσμών των μορίων του πετρελαίου με την παραγωγή μορίων φυσικού αερίου.

III. Μεταγένεση: αποτελεί το τελικό στάδιο της ωρίμανσης της οργανικής ύλης σε θερμοκρασίες από 150 έως πάνω από 200 °C, στο τέλος της οποίας τα μόρια του πετρελαίου διασπώνται σε μόρια αερίου, δημιουργώντας μεθάνιο, ξηρό αέριο, και άλλα αέρια όπως N_2 , H_2S , CO_2 κ.α.



Σχήμα 3.10: Μετασχηματισμοί οργανικής ύλης. (www.wou.edu)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΔΕΛΤΑΪΚΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΤΟΥ ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΟΥ HUTTON FIELD ΣΤΗ ΒΟΡΕΙΑ ΘΑΛΑΣΣΑ



Σχήμα 4.1.: Απεικόνιση σε χάρτη των πεδίων πετρελαίου και φυσικού αερίου στην περιοχή της Βόρειας Θάλασσας, καθώς και τους αγωγούς μεταφοράς. Πηγή: US Dept. of Interior USGS Bulletin 2204-C
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:North_Sea_OilandGas_Fields.jpg

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΔΕΛΤΑΪΚΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΤΟΥ ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΟΥ HUTTON FIELD ΣΤΗ ΒΟΡΕΙΑ ΘΑΛΑΣΣΑ

4.1.: Εισαγωγή

Τα δέλτα ποταμών που κυριαρχεί η κυματική δράση (wave-dominated deltas) αποτελούνται από φυλλώδεις άμμους που χτίστηκαν από τις κατακόρυφες πεδιάδες της παραλίας ή από νησιά φραγμάτων που συμπλέκονται με τα κύρια διανεμητικά στόμια. Οι μαιανδρικές ζώνες και τα κανάλια που τροφοδοτούν αυτές τις ακτές απαρτίζονται από προσανατολισμένα ψαμμιτικά σώματα, τα οποία είναι πιο χαλκώδη από ότι οι παράλιες άμμοι που αυτοί κόβουν (λόγω της δράσης του νερού και της διάβρωσης). Σε πολλές λεκάνες, οι καλύτεροι ταμιευτήρες είναι αυτοί που αποτελούνται από αρχαία δέλτα που κυριαρχούσε η κυματική δράση, παρόλο που είναι ογκομετρικά λιγότερο σημαντικές. Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει τα χαρακτηριστικά μιας Μεσοζωικής ηλικίας λεκάνης με ψαμμιτικά πετρώματα από αρχαία δέλτα ποταμών που κυριάρχησε η κυματική δράση.

Το βοριοδυτικό Hutton Field είναι μια από τις πιο σύνθετες περιοχές στην επαρχία Brent της Βόρειας Θάλασσας του Ηνωμένου Βασιλείου. Το πεδίο αυτό περιλαμβάνει μια σειρά κεκλιμένων ψαμμιτικών στρωμάτων με πυκνή ρωγμάτωση. Αυτή η πολυπλοκότητα στη δομή συνδυάζεται με έναν ταμιευτήρα με έντονες διαφοροποιήσεις του πετρώματος στην έκτασή του και στη γεωμετρία του, καθώς και με μια διαγενετική διαδικασία συνδεδεμένη με το βάθος ταφής των ετερογενών αυτών πετρωμάτων. Ο συνδυασμός αυτών των δομικών, στρωματογραφικών και διαγενετικών χαρακτηριστικών είχε ως

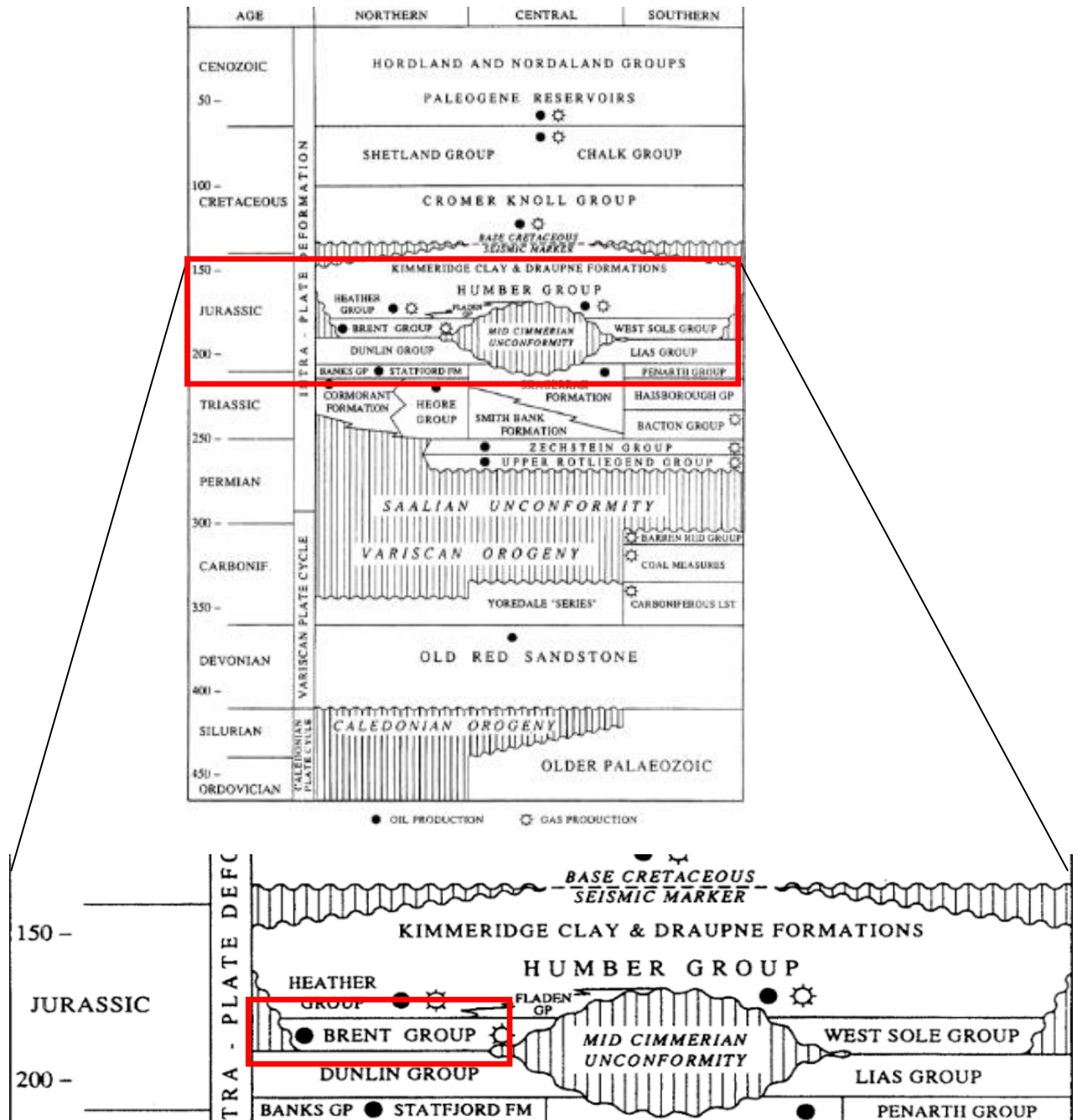
αποτέλεσμα ένα πεδίο το οποίο έχει φυσικώς διαχωριστεί, τόσο οριζόντια όσο και κάθετα.

Το πεδίο αυτό ανακαλύφθηκε το 1975 από τις εταιρίες Enterprise Oil, North Sea, Texas Eastern North Sea και Amerada Hess κατά την ανόρυξη της γεώτρησης 211/27-3 η οποία συνάντησε έναν ταμιευτήρα 121 μέτρων σε βάθος 3.385 μέτρα κάτω από τη θάλασσα. Η ανάπτυξη του πεδίου αυτού ξεκίνησε το 1979, ενώ 8 γεωτρήσεις αξιολογήθηκαν την περίοδο 1979-1983. Οι πρώτες 7 ανεπτυγμένες γεωτρήσεις το 1983, με την παραγωγή να αγγίζει τα 86,680 BOPD (Barrels of Oil Per Day/ Βαρέλια Πετρελαίου ανά ημέρα). Επιπλέον εργασίες ανάκτησης πετρελαίου ξεκίνησαν το 1984, αρχικά με εισπίεση νερού σε γεωτρήσεις και μεταγενέστερα με τεχνικές ανόδου αερίου, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στα τέλη του 1984. Σήμερα, το πεδίο αυτό έχει 26 παραγωγικές γεωτρήσεις και 9 γεωτρήσεις επανεισαγωγής νερού.

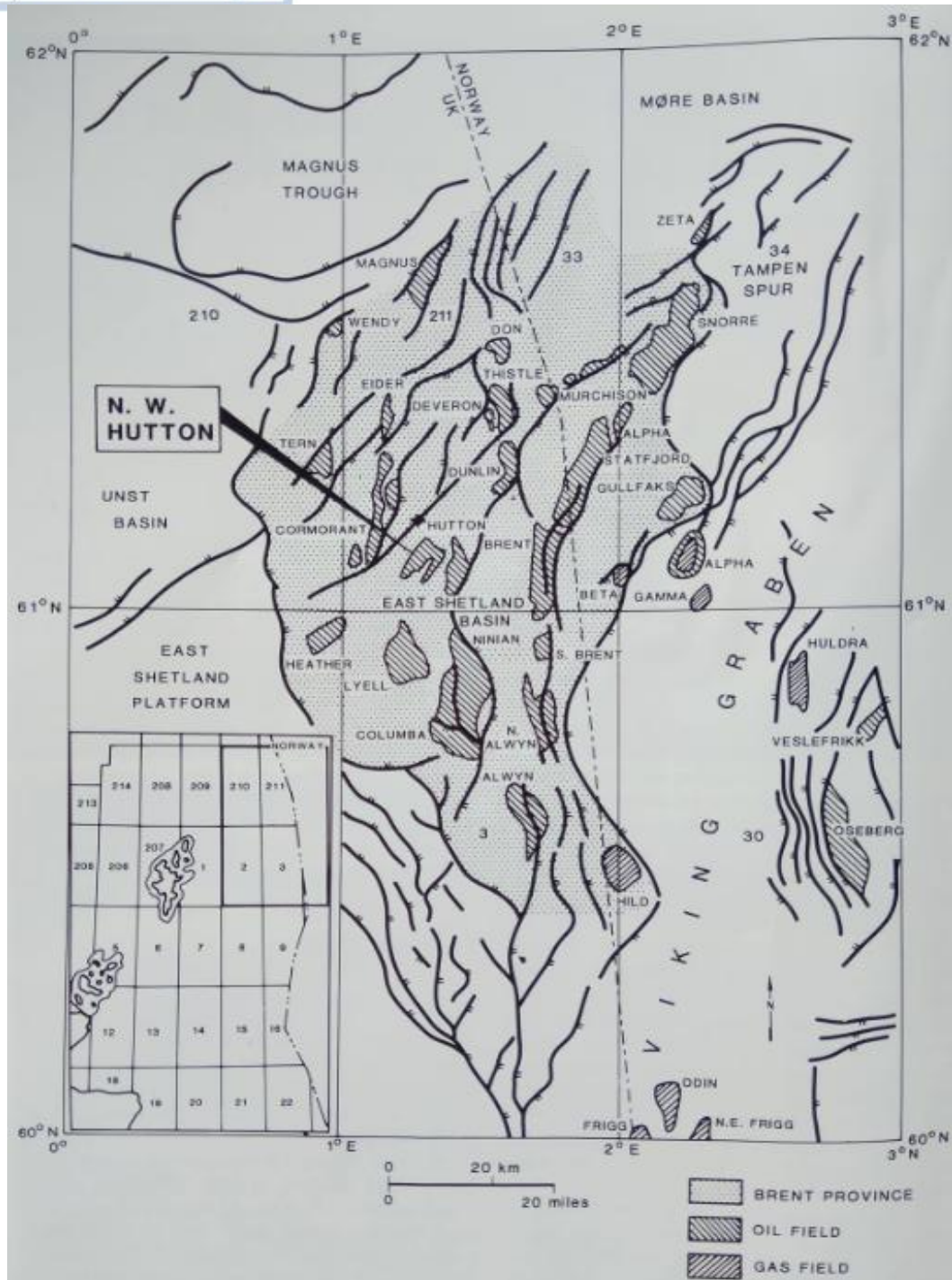
4.2. Στρωματογραφία

Τα παλαιότερα πετρώματα που διατρήθηκαν από γεωτρήσεις στην περιοχή αυτή του Hutton Field είναι Τριαδικά ερυθροστρώματα του σχηματισμού Cormorant (Deegan and Scull, 1977; Morton et al., 1987). Η ακολουθία συνδυάζει ηπειρωτικά αλλούβια κροκαλοπαγή ποτάμιας δράσης και ψαμμίτες, τα οποία διακόπτουν στρώματα ιλυολίθων λιμναίου περιβάλλοντος. Το υπερκείμενο στρώμα ηλικίας κάτω Τριαδικού ονομάζεται σχηματισμός Statfjord και αποτελείται από ποτάμια ιζήματα τα οποία αποτέθηκαν σε ένα πιο υγρό περιβάλλον, παράγοντας παχυστρωματώδεις, μαιανδρικούς ψαμμίτες. Οι ποτάμιες αυτές αποθέσεις διακόπηκαν από μια άνοδο της στάθμης της θάλασσας και την εισχώρησή της στη στεριά, με αποτέλεσμα την απόθεση των πηλόλιθων της σειράς Dunlin σε ασυμφωνία με το σχηματισμό Statfjord. Αυτοί οι πηλόλιθοι περιέχουν μικρό ποσοστό άμμου και ιλύος

(Vollset and Dore, 1984), αντιπροσωπεύοντας τυρβώδεις, παλιρροϊκές ροές σε ρηχό, κλειστό περιβάλλον. Αποθέσεις μεγαλύτερου βάθους έγιναν στο ανατολικότερο μέρος της ανατολικής λεκάνης του Shetland, καθώς και στο βύθισμα Viking, όπου το πάχος της σχιστής αργίλου ξεπερνάει τα 150 μέτρα.



Σχήμα 4.2.: Απλοποιημένη στρωματογραφική στήλη της βόρειας, κεντρικής και νότιας Βόρειας Θάλασσας, με γεωλογικές ηλικίες των κύριων ταμιευτήρων πετρελαίου και φυσικού αερίου. ⁽³⁴⁾



Σχήμα 4.3.: Γενικευμένος γεωλογικός χάρτης της ανατολικής λεκάνης του Shetland που απεικονίζει την τοποθεσία του βορειοδυτικού πεδίου Hutton. ⁽³⁵⁾

Τοπική καθίζηση στη λεκάνη αυτή σε συνδυασμό με ανύψωση και μετακίνηση της πλατφόρμας προς τα ΝΔ είχε ως αποτέλεσμα την μετάθεση των θαλάσσιων πηλόλιθων. Η υψηλή τροφοδοσία σε ιζήματα έδωσε δελταϊκούς σχηματισμούς μεγάλης κλίμακας που αποτελούν την ενότητα Brent ηλικίας Μέσου Ιουρασικού. Αυτοί οι σχηματισμοί έκλιναν προς τα ΒΑ σε σχετικά βαθιά νερά από την ανατολική πλατφόρμα του Shetland (Richards et al., 1988). Η απόθεση επηρεάστηκε από συναποθετικές τεκτονικές δομές ρηξιγενούς φύσεως, οι οποίες φαίνεται να είχαν επηρεάσει τη διεύθυνση της ροής του νερού που διέσχιζε την περιοχή ως το δέλτα.

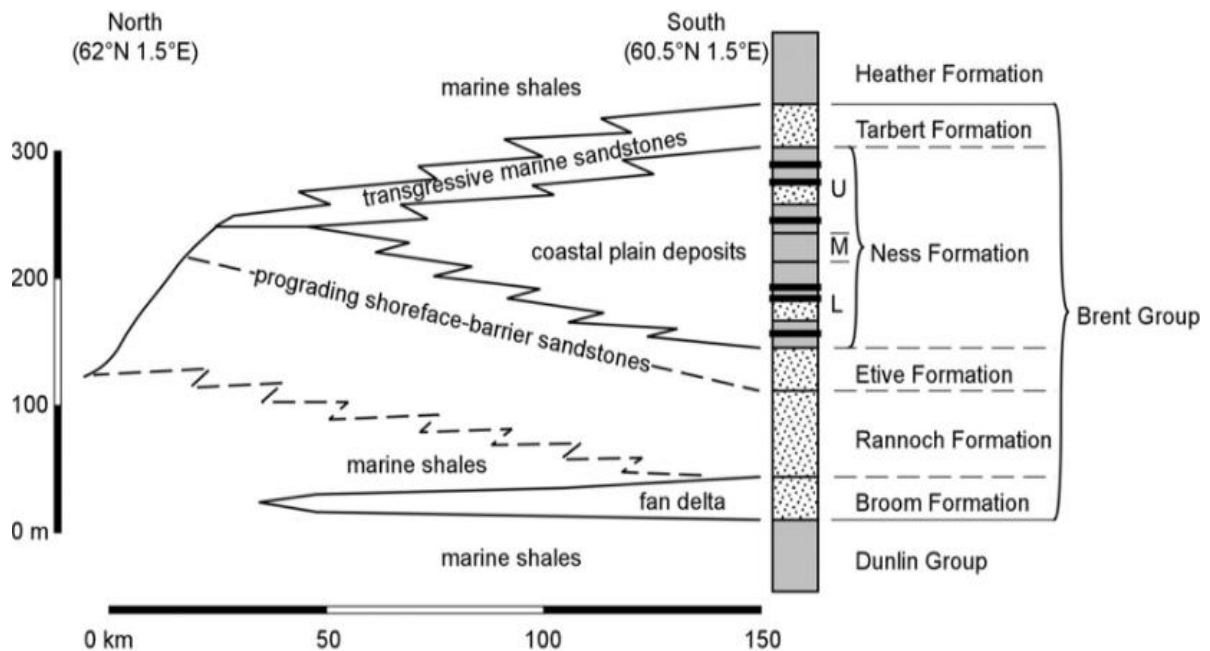
Η ενότητα Brent υποδιαιρείται σε πέντε σχηματισμούς στο βορειοδυτικό Hutton Field (Deegan and Scull, 1977). Δύο αποθετικά συστήματα έχουν εξακριβωθεί: ένα κατώτερο σύστημα που απεικονίζεται από την παρουσία αδρόκοκκων ψαμμιτών του σχηματισμού Broom, οι οποίοι αποτέθηκαν από ένα δελταϊκό σύμπλεγμα αδρόκοκκων ψαμμιτών οι οποίοι κινήθηκαν από τα ανατολικά (Brown et al., 1987), και ένα ανώτερο σύστημα αποτελούμενο από μια οπισθοδρομική κλαστική σφήνα που περιλαμβάνει τους σχηματισμούς Rannoch και Tarbert.

Επί του παρόντος παραμένουν παχιά στρώματα σχιστής αργίλου της Βαθόνιας, Καλόβιας ή Οξφόρδιας εποχής (Μέσο – Άνω Ιουρασικό) τα οποία είναι σύμφωνα με τους ανώτερους ψαμμίτες της ενότητας Brent. Σε άλλες περιοχές, μια απότομη ασυμφωνία οριοθετεί την αλλαγή του Μέσου Ιουρασικού. Τα ιζήματα του Ανώτερου Ιουρασικού στην περιοχή του Hutton Field εκπροσωπούνται από σχιστές αργίλους χερσαίας προέλευσης του σχηματισμού Heather (Οξφόρδιο). Πελαγικές αποθέσεις λόγω κατάρρευσης της λεκάνης που είχε δημιουργηθεί παρατηρούνται στις πιο ρηχές έως μεσαίου βάθους περιοχές. (Badley et al., 1988). Σε εκείνη τη χρονική περίοδο, η τεκτονική δράση ήταν έντονη και παρουσιαζόταν ως τοπικά μικρά ρήγματα και με μικρές μετατοπίσεις των τεμαχών, με αποτέλεσμα την ανάδυση της περιοχής.

Το τέλος της Ιουρασικής ιζηματογένεσης σηματοδοτήθηκε από μια εκτεταμένη περιφερειακή ασυμφωνία, την επονομαζόμενη Base Cretaceous Unconformity (Βασική Κρητιδική Ασυμφωνία). Αυτή η τεκτονική της Κιμμέριας ηπείρου επηρέασε αρκετά τα παλαιότερα υποκείμενα πετρώματα καθώς υπέστησαν ανάδυση και αναστροφή των τεμαχών τους.

Κατά το Κατώτερο Κρητιδικό η ιζηματογένεση φάσης βαθιάς θάλασσας είχε εκτεταμένη εξάπλωση στην περιοχή. Οι σχίστες και οι ασβεστόλιθοι διατηρούνται στις πιο συγκλινικές δομές που υπάρχουν ως και σήμερα στη λεκάνη αυτή. Η διάβρωση του Άνω Κρητιδικού αργότερα απομάκρυνε μεγάλο μέρος αυτών των δομών, ενώ στο κέντρο της λεκάνης οι σχηματισμοί που αποτέθηκαν στο Κάτω και στο Άνω Κρητιδικό είναι σύμφωνοι.

Στην Τεταρτογενή ιζηματογένεση κύριο ρόλο κατείχαν οι αργιλικόι ψαμμίτες. Γενικότερα, στο Παλαιόκαινο και Ηώκαινο στην περιοχή κατά κύριο λόγο συνέβη ιζηματογένεση ιλυούχων και αργιλικών υλικών σε ρηχά έως και βαθιά νερά θαλάσσιας φάσης.



Σχήμα 4.4.: Στρωματογραφική στήλη όλων των σχηματισμών του Brent Group. Πηγή: <http://pg.lyellcollection.org/content/9/3/209>

4.3. Γεωμετρία ταμιευτήρα – Παγίδευση υδρογονανθράκων

Οι ψαμμίτες έχουν πάχος μεταξύ 98 και 152 μέτρων, ενώ η κατανομή του πάχους των σχηματισμών στην περιοχή δείχνει μια γενική λοβόμορφη γεωμετρία, με τους λοβούς να προσανατολίζονται σε μια διεύθυνση BA-NΔ. Ο σχηματισμός Ness υποδιαιρείται σε δύο ανώτερες και κατώτερες κατηγορίες από μια συνεχή, θαλάσσιας προέλευσης, σχιστή άργιλο που ονομάζεται Mid-Ness Shale. Ο σχηματισμός Etive έχει παρόμοια δομή, όμως παχαίνει σε διεύθυνση ανατολή – δύση, στο νοτιότερο μέρος της περιοχής.

Το Hutton Field συμπεριλαμβάνει μια σειρά περίπλοκα συνδεδεμένων και κεκλιμένων στρωμάτων, αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των ρωγματομένων αυτών δομών. Η παραγωγική περιοχή του πεδίου αυτού διαχωρίζεται από τρία δομικά στοιχεία, τα οποία είναι: (1) ένα κύριο ρήγμα διεύθυνσης BA-NΔ στην ανατολική πλευρά που φέρνει τους ψαμμίτες του Brent κάτω από τους σχιστόλιθους του Κατώτερου Κρητιδικού, (2) ένα κύριο ΒΔ-ΝΑ ρήγμα το οποίο αντιπαραθέτει τους ψαμμίτες του Brent με τους σχιστόλιθους στη βόρεια πλευρά, και (3) δομική κλίση προς τα ΝΔ.

Το πεδίο αυτό χωρίζεται περεταίρω σε τέσσερα παραγωγικά τεμάχια – μπλοκ λόγω της ύπαρξης ρηγμάτων που λειτουργούν ως όρια. Τα τεμάχια αυτά έχουν διεύθυνση BA-NΔ, διεύθυνση παράλληλη με το ρήγμα του ανατολικού πεδίου. Η παγίδα αυτή του πετρελαίου σφραγίζεται κάθετα από αργίλικα στρώματα που ανήκουν στους σχηματισμούς Heather και Kimmeridge, ηλικίας Μέσου-Άνω Ιουρασικού, ενώ ολόκληρη αυτή η δομή πετρελαίου καλύπτεται από ένα παχύ στρώμα Κρητιδικού σχιστολίθου, το οποίο δημιουργεί ένα περιφερειακό κάλυμμα

Οι υδρογονάνθρακες προήλθαν από μια περιοχή με αργιλικό υλικό πλούσιο σε οργανική ύλη, ηλικίας Άνω Ιουρασικού. Η χρήση μοντέλων για τον υπολογισμό της ωριμότητας του πετρελαίου έδειξε ότι η γένεσή του ξεκίνησε κατά το Ηώκαινο (Goff, 1983), με τη μετανάστευση να κινείται κατά τη διεύθυνση των ρηγμάτων του σχηματισμού Kimmeridge Clay, ως τα στρωματογραφικά κατώτερα στρώματα ψαμμίτη του Brent Group που λειτουργούν ως ταμιευτήρες.

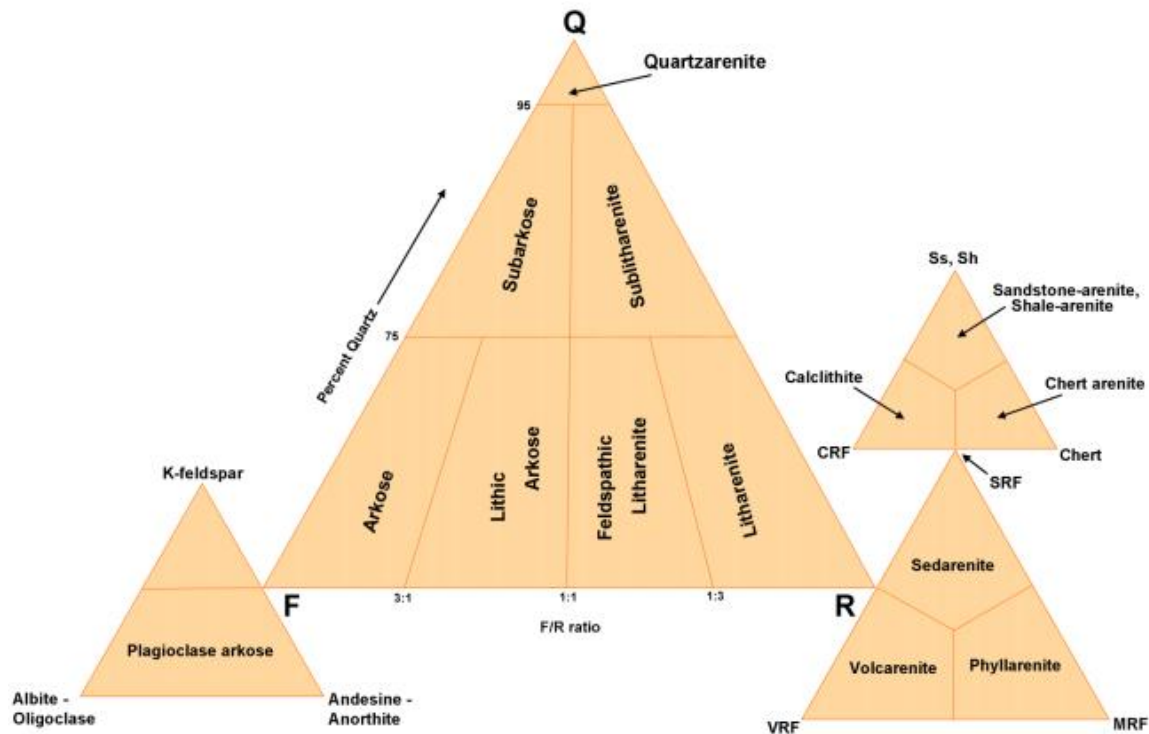
4.4. Πετρογραφικοί τύποι

Οι ψαμμίτες του Brent Group είναι κυρίως χαλαζιακοί αρενίτες έως υποαστριούχοι αρενίτες (κατάταξη από Folk et al., 1970, σχήμα 4.5), οι οποίοι αποτελούνται από κόκκους χαλαζία, αστρίων, μαρμαρυγίων και λιθικών θραυσμάτων. Ορυκτά όπως ο ασβεστίτης, ο καολινίτης και ο ιλλίτης είναι αυτά που μπαίνουν ανάμεσα στους κενούς χώρους των κόκκων.

Ο χαλαζίας είναι το κυρίαρχο ορυκτό που πλαισιώνει τα υπόλοιπα, και η υψηλότερη ποσότητα σε χαλαζία βρίσκεται σε ψαμμίτες που προέρχονται από τη δράση μικρών ποτάμιων κλάδων. Οι κόκκοι είναι υπογωνιώδεις έως υποστρογγυλοί, κοινώς παρουσιάζοντας συσσώρευση χαλαζιακών κόκκων στις όχθες, εκτός από τα σημεία που υπάρχει υψηλή τσιμεντοποίηση ανθρακικού υλικού. Τοπικά ο ψαμμίτης που βρίσκεται σε πιο χαλαρές αποθέσεις με πιο αδρόκοκκο υλικό και μεγαλύτερους σε μέγεθος κόκκους υποδεικνύει την ύπαρξη τσιμεντοποιημένου ανθρακικού υλικού το οποίο έχει απομακρυνθεί.

Οι άστριοι είναι το δεύτερο σε πληθώρα ορυκτό και βρίσκεται σε όλους τους ψαμμίτες του Brent Group. Είναι το επικρατέστερο ορυκτό στους ψαμμίτες που αποτέθηκαν σε ρηχά νερά του σχηματισμού Broom. Η πλειοψηφία των αστρίων δείχνει έναν βαθμό αλλοίωσης, από δημιουργία αυθιγενούς αργιλικού υλικού έως πλήρη καταστροφή και μερική ή ολική απομάκρυνση των αστρίων.

Τα θραύσματα πετρωμάτων (R) είναι σπάνια και βρίσκονται σε ισχυροστοιχεία σε όλους τους ψαμμίτες. Οι μαρμαρυγίες είναι τυπικά σε μικρό ποσοστό στους πιο λεπτόκοκκους ψαμμίτες. Υψηλότερο ποσοστό μαρμαρυγία συναντάται σε ψαμμίτες που βρίσκονται στην περιοχή του δέλτα του σχηματισμού Rannoch. Τέλος, ίχνη βαρέων μετάλλων υπάρχουν σε όλους τους ψαμμίτες, ενώ στις περιοχές όπου υπάρχει υψηλή συγκέντρωση, βρίσκονται σε στρώματα.



Σχήμα 4.5.: Ταξινόμηση ψαμμιτών κατά Folk et al., 1970. Πηγή:
https://en.wikipedia.org/wiki/Folk_classification

4.5. Πετροφυσικές παράμετροι και ποιότητα ταμιευτήρα

Η κατανομή των ιδιοτήτων των ταμιευτήρων στο βορειοδυτικό πεδίο Hutton επηρεάζεται έντονα τόσο από το περιβάλλον απόθεσης, όσο και από τους διαγενετικούς παράγοντες, με τους τελευταίους να είναι πιο σημαντικοί όσο αυξάνεις το βάθος. Οι διεργασίες απόθεσης καθορίζουν το μέγεθος και τη διαλογή των κόκκων, τα οποία με τη σειρά τους δείχνουν την ποιότητα των ταμιευτήρων. Γενικότερα ισχύει ότι όσο πιο αδρόκοκκος είναι ένας ψαμμίτης, τόσο μεγαλύτερο πορώδες και διαπερατότητα θα έχει. Με αυτή τη λογική, οι άμμοι που προήλθαν από διανεμητικά κανάλια (distributary - channel sands) έχουν την μεγαλύτερη διαπερατότητα, ενώ οι άμμοι που βρίσκονται στα όρια του δέλτα με τη θάλασσα έχουν την χαμηλότερη ποιότητα. Οι διακυμάνσεις στα μεγέθη των κόκκων ελέγχουν την εσωτερική ποιότητα του ταμιευτήρα ανάμεσα στα μεμονωμένα ψαμμιτικά σώματα. Οι ψαμμίτες του σχηματισμού Broom αποτελούν εξαίρεση καθώς, αν και είναι αδρόκοκκοι, έχουν σχετικά χαμηλή ποιότητα ταμιευτήρα λόγω της διαγένεσης (Scotchman et al. 1989).

Η ποιότητα των ταμιευτήρων είναι πολύ μεταβλητή λόγω του σχηματισμού Broom. Το πορώδες κυμαίνεται από 13 έως 23%, με μια μέση τιμή στο 14% ενώ η διαπερατότητα κυμαίνεται από 10 έως 100 mD με μέση τιμή τα 17 mD. Στο νότιο τμήμα του πεδίου, το πορώδες μειώνεται σε ένα ποσοστό του 9% με τη διαπερατότητα να φτάνει κάτω από 1 mD.

Η συμπαγοποίηση των σχηματισμών λόγω διαγένεσης είναι ένας σημαντικός τρόπος ελέγχου της ποιότητας (Scotchmann et al., 1989). Οι περισσότεροι ψαμμίτες των σχηματισμών Etive, Ness και Tarbert δεν υπέστησαν την πρόωμη διαγένεση και συμπαγοποιήθηκαν αργότερα από χαλαζία, καολινίτη και ιλλίτη. Η ποιότητα των ταμιευτήρων σε αυτούς τους ψαμμίτες καθοριζόταν αρχικά από το μέγεθος των πόρων, μετά τη διαγένεση όμως το ποσοστό χαλαζία και ιλλίτη έγινε ο καθοριστικός παράγοντας. Συγκεκριμένα για τον ταμιευτήρα στους ψαμμίτες του

σχηματισμού Broom, ο καολινίτης είναι το κυρίαρχο ορυκτό που καθορίζει την ποιότητα.

Στους σχηματισμούς Broom και Rannoch, η πρώτη ανθρακική διαγένεση περιορίζεται σε λεπτά διαστήματα όπου αλλάζει δραστικά την ποιότητα και ως αποτέλεσμα έχει τη δημιουργία κάθετων «φραγμών» που «κόβουν» τη διαπερατότητα των στρωμάτων. Η ποιότητα του ταμιευτήρα του σχηματισμού Broom μειώνεται στο νοτιοδυτικό κομμάτι του πεδίου, όσο η συσσωρευμένη πυκνότητα των ανθρακικών διαστημάτων αυξάνεται. Η λιγότερη τσιμεντοποίηση συνέβη στο σχηματισμό Broom στο νοτιοανατολικό μέρος του πεδίου.

Η ποιότητα του ταμιευτήρα στο πεδίο μειώνεται λόγω της προοδευτικής συσσώρευσης των ενδοπορικών κενών με χαλαζία και ιλλίτη. Με εξαίρεση του σχηματισμού Broom, η υφή της απόθεσης ασκεί τον κύριο έλεγχο στην ποιότητα των ταμιευτήρων. Η συμπαγοποίηση καταστρέφει την καλή ποιότητα των ταμιευτήρων σε βάθη μεγαλύτερα από 3.750-3.810 m κάτω από τη θάλασσα, με βάση τη γεώτρηση 211/27-A38 μπορεί να οριστεί για τη δυτική πλευρά του πεδίου.

Καμία επαφή νερού-πετρελαίου (OWC) δε βρίσκεται στο βορειοδυτικό πεδίο Hutton. Οι επαφές ελέγχονται στρωματογραφικά, με σταδιακά υψηλότερες επαφές ανάμεσα στα δυτικότερα και ανατολικότερα τεμάχια. Οι διάφορες επαφές νερού-πετρελαίου μπορούν να συνδεθούν με διαδρομές μετανάστευσης των υδρογονανθράκων και μεταγενέστερες δομικές κινήσεις.

4.6. Συμπεράσματα

Το πεδίο του βορειοδυτικού πεδίου Hutton αποτελείται από ψαμμίτες ρηχής παράλιας φάσης, κυματικής δράσης, δελταϊκής προέλευσης και καναλιών. Η ποιότητα των ταμιευτήρων εξαρτάται κυρίως από τις φάσεις απόθεσης, με μια διαγενετική δράση που δεν τείνει να αλλάξει τη σχετική ποιότητα των πετρωμάτων. Οι αποθετικές και διαγενετικές επιρροές έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός πολύπλοκου ταμιευτήρα με μεγάλη ετερογένεια. Η επιτυχής ανάπτυξη και εκμετάλλευση ενός πετρελαϊκού συστήματος τέτοιου τύπου εξαρτάται από τη διεξοδική γνώση του αποθετικού περιβάλλοντος, των λιθοφάσεων, της διαγένεσης, και των αποτελεσμάτων της εκμετάλλευσης.

ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

(1)(2)(3): Petrophysics - Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid transport Properties, Djebbar Tiab, Erle C. Donaldson, Chapter 1 (modified) (το 3 είναι ο πίνακας σελίδα 8)

(4) (5) : Ιζηματολογία , Α. Ψιλοβίκος, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφ.2

(6) : Petrophysics - Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid transport Properties, Djebbar Tiab, Erle C. Donaldson, Chapter 3, page 71 (modified)

(7),(8) Κοιτασματολογία Πετρελαίου, Σημειώσεις Ανδρέα Γεωργακόπουλου, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ.86 (Τροποποιημένο)

(9)(11): Bowen D. G.: Formation Evaluation and Petrophysics, Chapter 1 p.16-18

(10): Buryakovsky L., Chilingar G. V., Rieke H. H., Shin S. , Fundamentals of the Petrophysics of Oil and Gas Reservoirs, Chapter 2 , p.75

(12): Ahmed T. ,Working Guide to Reservoir Rock Properties and Fluid Flow, Section 2.2, p. 36

(13): Peters E.J. , Petrophysics, p. 2-19

(14): <http://www.slideserve.com/tori/geology-and-co-2-sequestration-in-kuwait>

(15): Πρόγραμμα Δια Βίου Μάθησης «Σύγχρονες Εξελίξεις στις Θαλάσσιες Κατασκευές», Παρουσίαση με θέμα: «Ανίχνευση, Όρυξη και Παραγωγή υδρογονανθράκων: Μηχανική ταμιευτήρων» , Χρ. Παρασκευά, Επ. Καθηγητή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών ([διαφάνεια 7/59](#))

(16) (17): Peters E.J. Petrophysics, Chapter 6, p.6-34 (Τροποποιημένο) , 6-36

(18): Ahmed T. ,Working Guide to Reservoir Rock Properties and Fluid Flow, Section 2.5, p.43

(19): Physical Properties of Rocks - Fundamentals and Principles of Petrophysics - Juergen H. Schön, p.104

(20),(21): petroleum geoscience, page 448. Chapter 20.1

(22): Physical Properties of Rocks - Fundamentals and Principles of Petrophysics - Juergen H. Schön, p.20 introduction

(24): Physical Properties of Rocks - Fundamentals and Principles of Petrophysics - Juergen H. Schön, p.38

(25): Peters E.J. Petrophysics p. 1-11 figure 1.2 (modified)

(26)): Peters E.J. Petrophysics p.1-13

(27)): Peters E.J. Petrophysics p.1-14 fig 1.4 (modified)

(28),(29): Πετρολογία Ιζηματογενών πετρωμάτων, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Ηλεκτρονική διδασκαλία :
<http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo321y/Theoria-7o.pdf>

(30):https://www.researchgate.net/profile/Andrew_Hurst2/publication/249852370_Geological_Modelling_of_Clay_Diagenesis_in_Sandstones/links/551058170cf2a8dd79bc62fa.pdf , table 1. Page 10

(31):https://www.researchgate.net/profile/Andrew_Hurst2/publication/249852370_Geological_Modelling_of_Clay_Diagenesis_in_Sandstones/links/551058170cf2a8dd79bc62fa.pdf ,p.10, fig.5

(32):https://www.researchgate.net/profile/Andrew_Hurst2/publication/249852370_Geological_Modelling_of_Clay_Diagenesis_in_Sandstones/links/551058170cf2a8dd79bc62fa.pdf , p.11, eq. (1)

(33)https://www.researchgate.net/profile/Andrew_Hurst2/publication/249852370_Geological_Modelling_of_Clay_Diagenesis_in_Sandstones/links/551058170cf2a8dd79bc62fa.pdf , p.11, fig.6

(34) : Petroleum Geology of the North Sea: Basic Concepts and Recent Advances, K. W. Glennie, p.10 figure 1.8

(35): Sandstone Petroleum Reservoirs, John H. Barwis, John McPherson, Joseph R.J. Studlick, p. 228, fig. 10-1

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Diagenesis, Catagenesis and Metagenesis of Organic Matter, Bernard P. Tissot, Dietrich H. Welte
- Kerogen: Insoluble Organic Matter from Sedimentary Rocks, edited by Bernard Durand
- Geochemistry in Petroleum Exploration, Douglas W. Waples
- The Chemistry and Technology of Petroleum, Fifth Edition, James G. Speight
- GEOLOGICAL MODELLING OF CLAY DIAGENESIS IN SANDSTONES ANDREW HURST AND HILARY IRWIN* Geologisk Laboratorium, Statoil, Forus, Postboks 300, N-4001 Stavanger, Norway, and *17 Braiklay Avenue, Tarves, Aberdeen, (Received 28 May 1981; revised 10 September 1981)
- Sandstone vs. carbonate petroleum reservoirs: A global perspective on porosity-depth and porosity-permeability relationships, S. N. Ehrenberg and P. H. Nadeau, AAPG Bulletin, v. 89, no. 4 (April 2005), pp. 435–445
- Whitaker, Fiona F.; Xiao, Yitian (June 2010), "[Reactive transport modeling of early burial dolomitization of carbonate platforms by geothermal convection](#)", [AAPG Bulletin](#), 6, 94 (6): 889–917, [doi:10.1306/12090909075](#), retrieved 2011-04-13
- Sandstone Petroleum Reservoirs, John H. Barwis, John McPherson, Joseph R.J. Studlick, pages 227-261, Wave Dominated Deltaic Reservoirs of the Brent Group, Northwest Hutton Field, North Sea, Iain C. Scotchman and L. Hywel Johnes, Amoco (UK) Exploration Co., London, England

- Petrophysics - Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid transport Properties, Djebbar Tiab, Erle C. Donaldson
- Ιζηματολογία , Α. Ψιλοβίκος, Εκδόσεις Τζιόλα
- Κοιτασματολογία Πετρελαίου, Σημειώσεις Ανδρέα Γεωργακόπουλου, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- Bowen D. G.: Formation Evalyation and Petrophysics
- Buryakovsky L., Chilingar G. V., Rieke H. H., Shin S. , Fundamentals of the Petrophysics of Oil and Gas Reservoirs
- Ahmed T. ,Working Guide to Reservoir Rock Properties and Fluid Flow
- Peters E.J. , Petrophysics
- Physical Properties of Rocks - Fundamentals and Principles of Petrophysics - Juergen H. Schön
- Petroleum Geology of the North Sea: Basic Concepts and Recent Advances, K. W. Glennie
- **Κεφάλαιο 4:** Sandstone Petroleum Reservoirs, John H. Barwis, John McPherson, Joseph R.J. Studlick, pages 227-261, Wave Dominated Deltaic Reservoirs of the Brent Group, Northwest Hutton Field, North Sea, Iain C. Scotchman and L. Hywel Johnes, Amoco (UK) Exploration Co., London, England