



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΖΥΓΑΝΙΤΙΔΟΥ Ι. ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

Μετανάστευση Υδρογονανθράκων
Hydrocarbons' Migration

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

Φεβρουάριος 2018





ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ Ι.ΖΥΓΑΝΙΤΙΔΟΥ

Φοιτήτρια του Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5113

ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας,
Τομέα Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Καθηγητής Ανδρέας Γεωργακόπουλος



© Αναστασία Ι. Ζυγανιτίδου, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Τομέας
Κοιτασματολογίας, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Μετανάστευση Υδρογονανθράκων – *Διπλωματική εργασία*

© Anastasia I. Zyganitidou, School of Geology, Dept. of Economic Geology,
2018

All rights reserved.

Hydrocarbons' Migration – *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 αναγράφεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

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

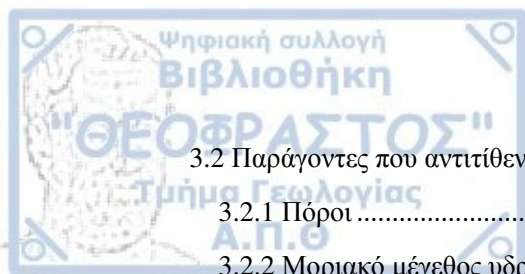


ΣΤΟΥΣ ΓΟΝΕΙΣ ΜΟΥ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΑΓΑΠΗΜΕΝΗ ΜΟΥ ΑΔΕΡΦΗ



Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	11
Κεφάλαιο 1	11
Εισαγωγή	11
1. Γενικές Έννοιες – Ορισμοί	11
1.1 Υδρογονάνθρακες	11
1.2 Πετρέλαιο	11
1.3 Πετρελαϊκό Σύστημα (Petroleum System)	11
1.4 Τα 7 Βασικά Στοιχεία (7 Basic Elements).....	12
1.4.1 Μητρικό πέτρωμα (Source Rock).....	12
1.4.2 Πέτρωμα ταμιευτήρας (Reservoir)	14
1.4.3 Πέτρωμα κάλυμμα (seal or cap rock)	14
1.4.4 Δομή παγίδευσης (Trap)	14
1.4.5 Ωρίμανση (Maturing)	15
1.4.6 Μετανάστευση (Migration)	15
1.4.7 Χρόνος (Timing of petroleum migration).....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	11
Κεφάλαιο 2	18
Μετανάστευση υδρογονανθράκων (Hydrocarbons Migration)	18
2.1 Πρωτογενής μετανάστευση (Primary migration)	18
2.2 Δευτερογενής μετανάστευση (Secondary migration).....	21
2.3 Τριτογενής μετανάστευση (Tertiary Migration).....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	11
Κεφάλαιο 3	26
Παράγοντες.....	26
3.1 Παράγοντες που προκαλούν τη διαδικασία της μετανάστευσης	26
3.1.1 Αύξηση του όγκου κατά τη διαδικασία της ωρίμανσης	26
3.1.2 Άνωση.....	26
3.1.3 Θερμοκρασία και πίεση	26
3.1.4 Χημικό δυναμικό	27
3.1.5 Τριχοειδής διαποτισμός	28
3.1.6 Συμπύεση ιζημάτων.....	28



3.2 Παράγοντες που αντιτίθενται στη διαδικασία της μετανάστευσης.....	28
3.2.1 Πόροι	28
3.2.2 Μοριακό μέγεθος υδρογονανθράκων	28
3.2.3 Τριχοειδείς πιέσεις.....	28
3.2.4 Διαπερατότητα.....	29
3.2.5 Πίεση πόρων	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	11
Κεφάλαιο 4	32
Ρυθμός μετανάστευσης, υπολογισμός και εκτίμηση	32
4.1.1 Ρυθμός μετανάστευσης.....	32
4.1.2 Parallel και serial διαδικασίες.....	32
4.1.3 Ρυθμοί για διαφορετικούς μηχανισμούς	32
4.2 Υπολογισμός ρυθμού μετανάστευσης	33
4.3 Υπολογισμός όγκου υδρογονανθράκων	34
4.4 Εκτίμηση βαθμού απόδοσης εκδίωξης των υδρογονανθράκων (estimating expulsion efficiency).....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	11
Κεφάλαιο 5	39
Μέθοδοι έρευνας υδρογονανθράκων	39
5.1 Δορυφορικές εικόνες και τηλεπισκόπηση	39
5.2 Βαρυτομετρική ανάλυση	39
5.3 Μαγνητικά δεδομένα	41
5.4 Σεισμικά δεδομένα.....	41
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	43
Βιβλιογραφία	43



ΠΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Σκοποί/Στόχοι – Ανάλυση κεφαλαίων – Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε από τη φοιτήτρια Ζυγανιτίδου Αναστασία του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου κατά το ακαδημαϊκό έτος 2017 υπό την επίβλεψη του καθηγητή Ανδρέα Γεωργακόπουλου.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι η μελέτη της μετανάστευσης των υδρογονανθράκων, σύμφωνα με απόψεις διαφόρων επιστημόνων. Πιο συγκεκριμένα, στα παρακάτω κεφάλαια γίνεται ανάλυση των κατηγοριών, στις οποίες τη διακρίνουμε, στους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται ο ρυθμός μετανάστευσης και ο υπολογισμός αυτού. Τέλος, παρατίθενται μερικές μέθοδοι έρευνας υδρογονανθράκων.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου, για την ανάθεση του θέματος και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, τη βοήθεια του αλλά και το ενδιαφέρον, που διέθεσε για τη διεκπεραίωση της διπλωματικής μου εργασίας. Θα ήθελα να εκφράσω επίσης, τις ευχαριστίες μου και την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου, που με στήριξε με διάφορους τρόπους για τη καλύτερη δυνατή μόρφωση μου.





ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1. Γενικές Έννοιες – Ορισμοί

1.1 Υδρογονάνθρακες

Είναι αέριες, υγρές ή στερεές οργανικές ενώσεις άνθρακα και υδρογόνου. Βιτουμένα είναι φυσικές εύφλεκτες ύλες ποικίλου χρώματος, σκληρότητας, και πτητικότητας και αποτελούνται κυρίως από υδρογονάνθρακες που στερούνται βασικά οξειδωμένων σωματιδίων, καθώς και από ελάχιστη ορυκτολογική ύλη.

Τα βιτουμένα διαλύονται σε βενζίνη, αιθέρα και διθειάνθρακα. Διακρίνονται τα εξής είδη υδρογονανθράκων:

Αέρια: φυσικό αέριο

Υγρά: πετρέλαιο, πίσσα

Στερεά: οζοκηρίτης, άσφαλτος (Τσιραμπίδης 2008)

1.2 Πετρέλαιο

Το πετρέλαιο δημιουργείται μετά τη σήψη των φυτικών και ζωικών οργανισμών, σε θερμοκρασίες $<200^{\circ}\text{C}$, με τα πρωτόζωα και το πλαγκτόν να αποτελούν τη σπουδαιότερη αρχική οργανική ύλη. Το πετρέλαιο σχηματίζεται μέσα σε οργανογενή ιζήματα (ελώδεις περιοχές, σύγχρονα ιζήματα κλπ.) υπό αναερόβιες συνθήκες και με τη βοήθεια της βακτηριδιακής δράσης. Έχουν διαπιστωθεί πέντε ομάδες υδρογονανθράκων: οι παραφίνες, ισοπαραφίνες, κυκλοπεντάνια, κυκλοεξάνια και αρωματικοί υδρογονάνθρακες. Οι πρώτες δυο ανήκουν στη σειρά του μεθανίου και αποτελούν τα κύρια συστατικά των παραφινικών πετρελαίων. Τα κυκλοαλκάνια αποτελούν τα κύρια συστατικά των ναφθεινικών πετρελαίων και τέλος, όταν επικρατούν οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες, τα πετρέλαια χαρακτηρίζονται αρωματικά. Για την εκτίμηση της ποιότητας του πετρελαίου, παίζει σημαντικό ρόλο το ειδικό βάρος του και το σημείο ζέσης των συστατικών του. Το ειδικό βάρος επηρεάζει το ιξώδες των συστατικών του αναλογικά και κυμαίνεται από 0,73-0,97. Το ποσοστό του θείου αυξάνει με την αύξηση του αζώτου και είναι σε μεγάλες περιεκτικότητες, όταν είναι αποθηκευμένο σε ανθρακικά- δολομιτικά πετρώματα. (Τσιραμπίδης 2008)

Πίνακας 1. Στοιχειακή ανάλυση πετρελαίων

C	H	S	O	N
82,2-87,1%	11,7-14,7%	0,1-5,5%	0,1-4,5%	0,1-1,5%

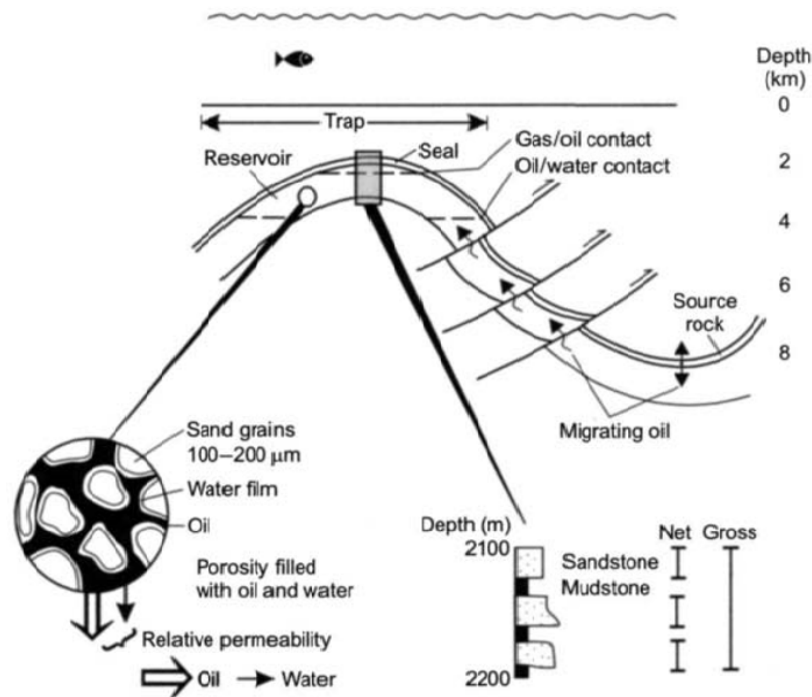
1.3 Πετρελαϊκό Σύστημα (Petroleum System)

Πετρέλαιο είναι ένα μείγμα υδρογονανθράκων και άλλων οργανικών μορίων που περιέχουν ποσότητες σε άζωτο, θείο, οξυγόνο, καθώς και άλλα μέταλλα. Ο όρος αναφέρεται τόσο στην υγρή, όσο και στην αέρια φάση των υδρογονανθράκων. Στην υγρή κατάσταση του πετρελαίου, το πετρέλαιο μπορεί να έχει χαμηλότερη πυκνότητα (density, $d=m/v$) από το υγρό αναφοράς, που συνήθως είναι το νερό, οπότε χαρακτηρίζεται ως ελαφρύ (light oils). Σε αντίθετη περίπτωση, όπου το πετρέλαιο είναι πυκνότερο από το υγρό αναφοράς, χαρακτηρίζεται ως βαρύ (heavy oil). Το πετρέλαιο μπορεί να χαρακτηριστεί και ως "γλυκό-sweet" στη περίπτωση που παρουσιάζει χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο S ($<0.5\%$), ενώ αν

Μετανάστευση Υδρογονανθράκων

είναι υψηλή, τότε αναφέρεται ως "ξινό- sour" ($>0,5\%$) (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013).

1.4 Τα 7 Βασικά Στοιχεία (7 Basic Elements)



Εικόνα 1. Λεκάνη που φέρει πετρέλαιο after John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013

Η Γεωλογία Πετρελαίου αξιολογεί τα επτά βασικά στοιχεία εντός των ιζηματογενών λεκανών, τα οποία διακρίνονται σε μητρικό πέτρωμα, πέτρωμα ταμιευτήρα, πέτρωμα κάλυμμα, δομή παγίδευσης και σε 3 διαδικασίες: χρόνος, ωρίμανση, μετανάστευση (βλ. Εικόνα 1). (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013) (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999)

1.4.1 Μητρικό πέτρωμα (Source Rock)

Μητρικό πέτρωμα είναι ένα ιζηματογενές πέτρωμα, πλούσιο σε οργανική ύλη κατά την ιζηματοπόθεση και με τη βοήθεια της θερμικής ωρίμανσης (thermal maturation), οδηγεί στη γένεση υδρογονανθράκων. Η θερμοκρασία παραγωγής πετρελαίου κυμαίνεται μεταξύ 60°C - 120°C (παράθυρο πετρελαίου), ενώ η θερμοκρασία παραγωγής αερίου κυμαίνεται 80°C - 200°C (παράθυρο αερίου). Ωστόσο, το οργανικό υλικό είναι ικανό να κάνει το κύκλο του και να αποικοδομηθεί, γεγονός που δεν συμβαίνει σε συνθήκες έλλειψης οξυγόνου. Επομένως, είναι απαραίτητες οι ανοξικές συνθήκες για τη γένεση υδρογονανθράκων. Η σύσταση του οργανικού υλικού διαφέρει, λόγω της ποικιλομορφίας των ζώντων οργανισμών. Τα βασικά συστατικά είναι οι υδατάνθρακες, τα λιπίδια, η λιγνίνη και οι πρωτεΐνες και σύμφωνα με τις αναλογίες τους, η ποιότητα του τελικού προϊόντος αλλάζει. Στη περίπτωση που τα ποσοστά λιγνίνης και λιπιδίων είναι υψηλά, η ποιότητα του πετρελαίου είναι κακή. Αξίζει να αναφερθεί ότι το ποσοστό της οργανικής ύλης μέσα σε ένα μητρικό πέτρωμα είναι πολύ χαμηλό 1-2%. Στους σχίστες (mud shales-shales) το ποσοστό είναι 0,99%, ενώ σε ανθρακικά – ψαμμίτες, το οργανικό υλικό είναι 0,33% και 0,28% αντίστοιχα. (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013)

Κηρογόνο

Το κηρογόνο είναι η πρόγονη κατάσταση της δημιουργίας του πετρελαίου, είναι δηλαδή ένα μείγμα οργανικών χημικών ενώσεων, το οποίο εν συνεχεία εξελίσσεται σε βιτουμένιο και τέλος στους υδρογονάνθρακες. Το κηρογόνο χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη περιεκτικότητα της οργανικής ύλης σε C, H, O (βλ. Εικόνα 2). (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999) (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013)

Τύπος I: Σαπροπηλικό Κηρογόνο

Δημιουργείται σε ανοξικά λιμναία περιβάλλοντα και προέρχεται κυρίως από λιμναία φύκια. Σχηματίστηκε από πρωτεΐνες και λιπίδια και περιέχει αλγινίτη, άμορφη οργανική ύλη, κυανοβακτήρια, φύκια του γλυκού νερού και ρητίνες χερσαίων φυτικών υπολειμμάτων. Η αναλογία υδρογόνου/άνθρακα είναι >1.25 , ενώ η αναλογία οξυγόνου/άνθρακα <0.15 .

Τύπος II: Πλανκτονικό Κηρογόνο

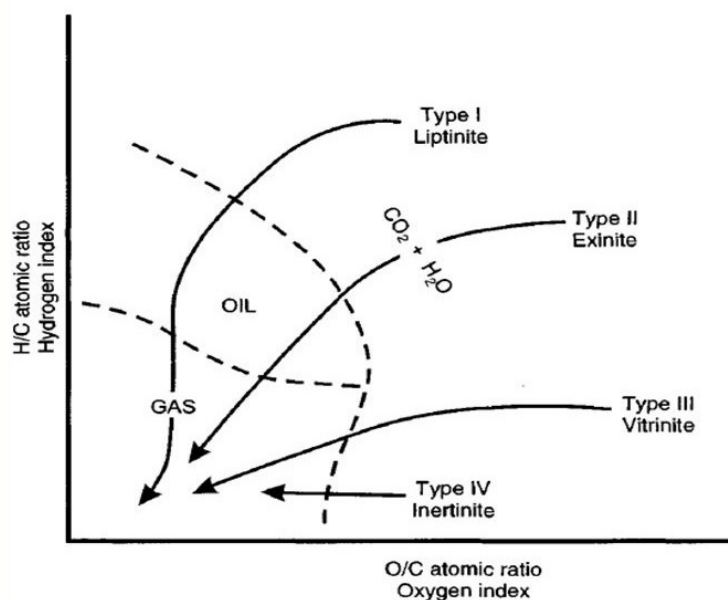
Μπορεί να περιέχει Σπορινίτη, Κουτινίτη, Ρεζινίτη, Λιπτινίτη, συστατικά που προέρχονται από λιπίδια που αποτέθηκαν σε αναγωγικές συνθήκες. Η οργανική ύλη είναι θαλάσσιας προέλευσης και εμφανίζει μέση έως υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Η αναλογία υδρογόνου/άνθρακα είναι <1.25 και η αναλογία οξυγόνου/άνθρακα είναι $0.03-0.18$.

Τύπος III: Χουμικό Κηρογόνο

Προέρχεται από χερσαία παράκτια φυτά, φτωχά σε λιπίδια και σχηματίζεται κυτταρίνη και λιγνίνη. Η αναλογία υδρογόνου/άνθρακα είναι <1 και η αναλογία οξυγόνου/άνθρακα κυμαίνεται από $0.03-0.3$.

Τύπος IV:

Αποτελεί το υπόλειμμα της οργανικής ύλης, με αναλογία υδρογόνου/άνθρακα <0.5 . Αυτός ο τύπος δεν έχει τη δυνατότητα να παράγει υδρογονάνθρακες.



Εικόνα 2. Τύποι Κηρογόνου after John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013

1.4.2 Πέτρωμα ταμιευτήρας (Reservoir)

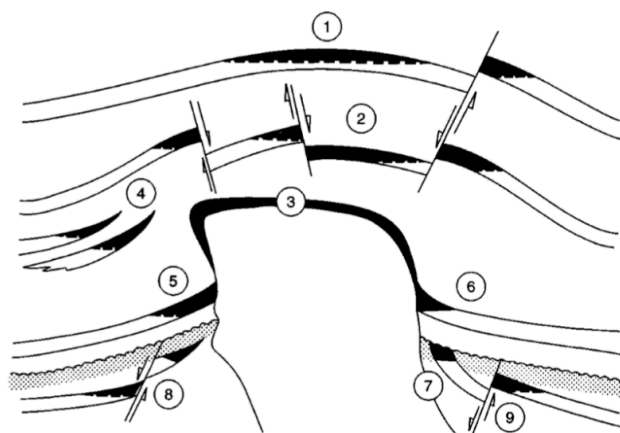
Το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο μέσα στο μητρικό πέτρωμα, εντός του οποίου σχηματίστηκαν, αποτελούνται από μικροσκοπικά μόρια υδρογονανθράκων, τα οποία σχηματίστηκαν από το Κηρογόνο. Οι υδρογονάνθρακες μέσα στο μητρικό πέτρωμα καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο από το κηρογόνο, με αποτέλεσμα να αποβάλλονται σε γειτονικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Αυτοί οι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως πετρώματα ταμιευτήρες. Πετρώματα ταμιευτήρες είναι οι ψαμμίτες και τα ανθρακικά (ασβεστόλιθοι και δολομίτες). Η διαπερατότητα και το πορώδες είναι δυο ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τους ταμιευτήρες. Το πορώδες (porosity) είναι ο λόγος των κενών χώρων προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος, ενώ η διαπερατότητα (permeability) είναι το κατά πόσο αυτοί οι κενοί χώροι επικοινωνούν μεταξύ τους. (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013)

1.4.3 Πέτρωμα κάλυμμα (seal or cap rock)

Ο σχηματισμός ενός κοιτάσματος υδρογονανθράκων εξαρτάται και από το πέτρωμα κάλυμμα, διότι η διέλευση τους δεν είναι αναγκαία προϋπόθεση και για τη συσσώρευση τους. Επομένως, απαιτείται ένα αδιαπέρατο πέτρωμα που δημιουργεί εμπόδιο πάνω από τον ταμιευτήρα και εμποδίζει τη διαφυγή των υδρογονανθράκων. Τέτοια πετρώματα είναι οι άργιλοι, πολύ συμπίεσμένα ανθρακικά πετρώματα καθώς και τα στρώματα κρυσταλλικού άλατος (ανυδρίτη και αλίτη). (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013)

1.4.4 Δομή παγίδευσης (Trap)

Οι παγίδες (hydrocarbon traps) είναι ένας γεωμετρικός συνδυασμός του ταμιευτήρα και του πετρώματος καλύμματος, τα οποία όταν συνδυάζονται με φυσικές και χημικές ιδιότητες των υπεδάφινων ρευστών, συσσωρεύονται οι υδρογονάνθρακες δημιουργώντας κοιτάσμα. Αναγνωρίζονται τρία συστήματα παγίδων, σύμφωνα με τα γεωλογικά δεδομένα και αυτά είναι: 1.Τεκτονικές παγίδες (structural traps), 2.Στρωματογραφικές παγίδες (stratigraphic traps), 3.συνδυασμός των παραπάνω (combination traps) (βλ. Εικόνα 3). (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013)



Εικόνα 3. Τύποι παγίδων που σχετίζονται με δόμο άλατος. 1.Αντίκλινο πάνω απο το δόμο, 2.Κανονικό ρήγμα πάνω απο το δόμο, 3.Πορώδες πέτρωμα καλύμματος, 4.a flank pinchout and

sandstone lens, 5.a trap beneath an overhang, 6.a trap uplifted and buttressed against a salt diapir, 7.an unconformity, 8.a fault trap downthrown away from a dome/diapir, 9. a fault trap downthrown toward a dome/diapir after Halbouty 1979 and John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013

1.4.5 Ωρίμανση (Maturing)

Η μικροβιακή δραστηριότητα διασπά την οργανική ύλη που έχει συσσωρευτεί σε λεκάνες ιζηματοπόθεσης, η οποία έχει καλυφθεί από υπερκείμενα στρώματα, με αποτέλεσμα τη παραγωγή βιογενούς αερίου (biogenic gas). Στη διαδικασία της Διαγένεσης, Καταγένεσης και Μεταγένεσης και κατ' επέκταση σε μεγαλύτερη έκθεση σε υψηλότερες θερμοκρασίες, το κηρογόνο μετατρέπεται σε υγρούς και αέριους υδρογονάνθρακες. Η γένεση των υδρογονανθράκων χαρακτηρίζεται από την παρακάτω αντίδραση:

$$k_i = A \exp \left(- \frac{E}{RT} \right)$$

Όπου,

T, είναι η απόλυτη θερμοκρασία,

R, η σταθερά αερίου (gas constant),

E, η activation energy

A, η σταθερά από την εξίσωση Arrhenius.

Κατά τη διάρκεια της ωρίμανσης της οργανικής ύλης περιλαμβάνεται και η δευτερογενής διάσπαση του πετρελαίου σε φυσικό αέριο.

1.4.6 Μετανάστευση (Migration)

Κατά τη μετατροπή του κηρογόνου σε υδρογονάνθρακες, οι τελευταίοι αυξάνονται και απόρροια αυτού είναι ο υπερκορεσμός σε υδρογονάνθρακες, που οδηγεί στη μετανάστευση τους (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013). Μετανάστευση υδρογονανθράκων γενικά περιγράφεται, ως το σύνολο διεργασιών, που είναι ικανές να θέσουν σε κίνηση τα μόρια των υδρογονανθράκων και από το μητρικό πέτρωμα να μεταφερθούν σε πέτρωμα ταμιευτήρα, όπου γίνεται η συσσώρευση τους. Οι ιδιότητες που καθορίζουν την μετανάστευση είναι η πίεση, η θερμοκρασία, ο τριχοειδής διαποτισμός, η διαπερατότητα, η επιφανειακή τάση, το μέγεθος των μορίων των υδρογονανθράκων, η πυκνότητα, καθώς και η διαλυτότητα των μεταναστεύσιμων υδρογονανθράκων (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999).

1.4.7 Χρόνος (Timing of petroleum migration)

Λόγω της ιδιότητας της άνωσης, το πετρέλαιο μεταναστεύει από το μητρικό πέτρωμα προς την επιφάνεια της Γης. Κατά την έρευνα πετρελαίου είναι απαραίτητη η σχεδίαση ενός χρονοδιαγράμματος της μετανάστευσης σε σχέση με το χρόνο εναπόθεσης και τον συνδυασμό των δομών του ταμιευτήρα και των παγίδων. Σε περίπτωση που η μετανάστευση συμβεί πριν τον κατάλληλο γεωμετρικό συνδυασμό, τότε το πετρέλαιο θα διαφύγει χωρίς τη δημιουργία κοιτάσματος (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Κεφάλαιο 2

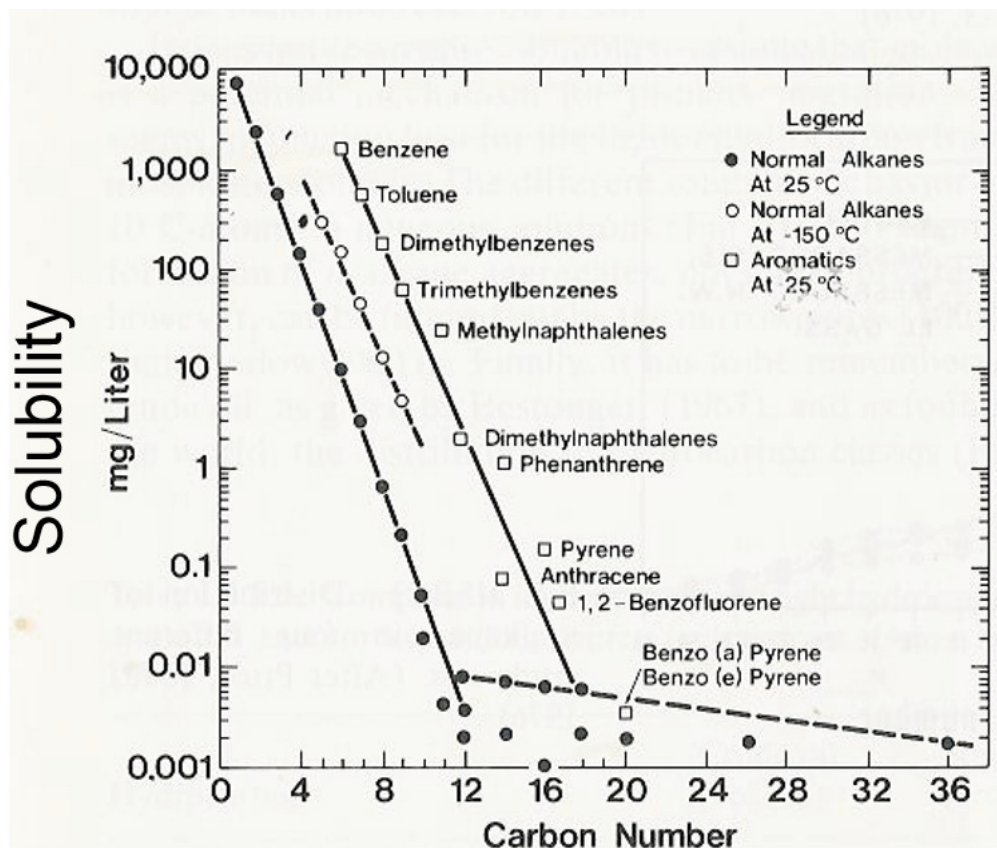
Μετανάστευση υδρογονανθράκων (Hydrocarbons Migration)

2.1 Πρωτογενής μετανάστευση (Primary migration)

Πρωτογενής μετανάστευση ορίζεται ως η μετακίνηση των υδρογονανθράκων από το μητρικό πέτρωμα προς το πέτρωμα ταμιευτήρα (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013) (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999). Οι μηχανισμοί πρωτογενούς μετανάστευσης διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες.

2.1.1 Migration by solution in Water

Σε αυτή τη κατηγορία έχουν ειπωθεί δυο απόψεις. Η πρώτη υποστηρίζει τη μετακίνηση των διαλυμένων μορίων των υδρογονανθράκων σε όλες τις φάσεις του (υγρή και αέρια) με τη κίνηση του νερού. (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999) (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013)

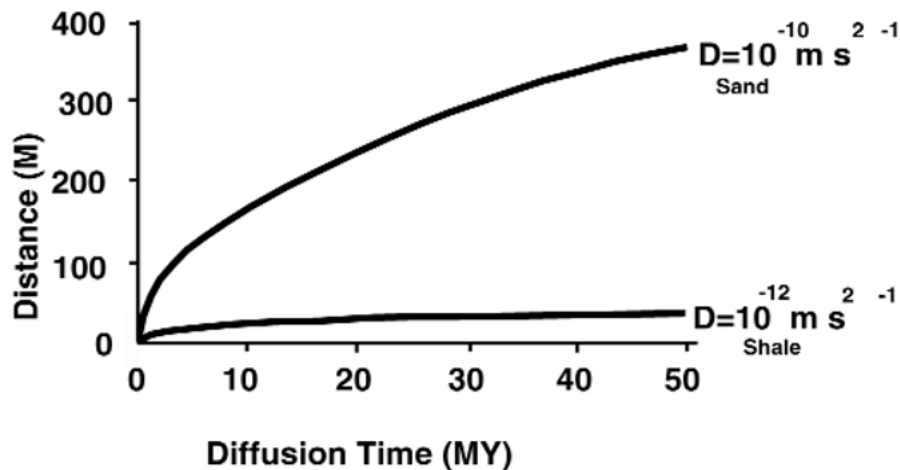


Εικόνα 4. Molecular solutions (oil water dissolved) after petrol_hydrodynamics, 2010

Η διαλυτότητα των υδρογονανθράκων με χαμηλό μοριακό βάρος κυμαίνεται από 100- 0,1 ppm για τους C4- C10, ενώ για τους C12- C30 η τιμή διαλυτότητας είναι κάτω από 0,01 ppm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.

Η μετακίνηση είναι δυνατόν να συμβεί εξαιτίας της συμπίεσης των μορίων των υδρογονανθράκων από τον υπερκορεσμό τους στο μητρικό πέτρωμα, εξαιτίας της κίνησης μετεωρικού νερού, καθώς και της διάχυσης (diffusion) και μεταγωγής (convection). Το φαινόμενο της διάχυσης γίνεται εξαιρετικά αργά και σε συνθήκες μετάπτωσης από πολύ

υψηλές συγκεντρώσεις σε χαμηλές. Η διαδικασία αυτή είναι υπεύθυνη για τη διαφυγή κυρίως των υδρογονανθράκων και όχι της συγκέντρωσης του. Ο χρόνος που χρειάζεται για να συσσωρευτεί το κοίτασμα με τη μέθοδο της διάχυσης φαίνεται στην Εικόνα 5. (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999)

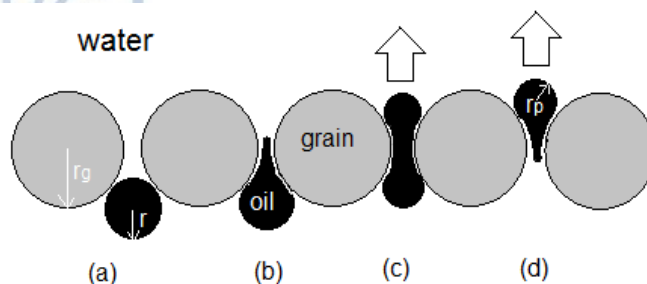


Εικόνα 5. Σχέση απόστασης και χρόνου διάχυσης after Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999

Η δεύτερη άποψη υποστηρίζει τη μετανάστευση που περιλαμβάνει την μετακίνηση του Κηρογόνου (kerogen network). Η κινητήρια δύναμη αυτής της μετακίνησης είναι η διαφορά πίεσης (pressure differential) μεταξύ μητρικού πετρώματος και πετρώματος ταμιευτήρα. Οι W. A. England and A. J. Fleet υποστήριξαν ότι το πετρέλαιο αποτίθεται ως ξεχωριστή φάση σε ένα water-wet rock matrix. Το βασικότερο επιχείρημα τους, εναντίον της υπόθεσης του μηχανισμού μετανάστευσης, με βάση τη διαλυτότητα στο νερό, είναι ότι τα περισσότερα συστατικά πετρελαίου έχουν χαμηλή διαλυτότητα και δεν μπορούν να μετακινηθούν σε μεγάλες ποσότητες. Τα Natural Soaps δεν είναι δυνατόν να μεταναστεύσουν, διότι έχουν μορφή γαλακτώματος όταν σχηματιστούν και το μέγεθος τους είναι μεγάλο, συγκριτικά με το μέγεθος των πόρων (small pore-throat size) στο μητρικό πέτρωμα. Επομένως, αυτός ο μηχανισμός αποτελεί την εξαίρεση και όχι τον κανόνα. (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013)

2.1.2 Migration by separate phase

Το μεθάνιο είναι ικανό να μετακινηθεί, εξαιτίας της υψηλής διαλυτότητας του (solubility) σε μεγάλο βάθος στο υπόστρωμα (subsurface), όπου οι συνθήκες που επικρατούν είναι συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας και το επιτρέπει να μεταναστεύσει ως διαλυμένο αέριο σε θέσεις πιο κοντά στην επιφάνεια. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διαδικασία της exsolution, όπου από ομογενής φάση προκύπτουν δυο ξεχωριστές φάσεις, χωρίς τη προσθήκη ή αφαίρεση συστατικών από το διάλυμα. Έτσι είναι δυνατόν να βρεθεί μεθάνιο σε συνθήκες χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013).



Εικόνα 6. Μετανάστευση κατά Berg modified after petrol_hydrodynamics, 2010 (capillary imbibition)

Στη πρωτογενή μετανάστευση μέσω του separate phase μηχανισμού, οι bubbles ή globules πρέπει να υπερνικήσουν τις τριχοειδείς πιέσεις (P_c), όπως φαίνεται στην Εικόνα 6 (2010, petrol_hydrodynamics).

Οι περισσότεροι ερευνητές υποστηρίζουν την υπόθεση, σύμφωνα με την οποία οι υδρογονάνθρακες αποβάλλονται από το μητρικό πέτρωμα ως ξεχωριστή φάση (separate) μέσα σε water-wet πέτρωμα (W. A. England and A. J. Fleet, 1 January 1991). Η άποψη αυτή υπερτερεί σε σχέση με την άποψη της διαλυτότητας των υδρογονανθράκων στο νερό, διότι η διαλυτότητα των περισσότερων συστατικών των υδρογονανθράκων είναι αρκετά χαμηλή, ώστε να μεταφέρει τις απαραίτητες ποσότητες, καθώς επίσης, η διαδικασία της διάλυσης θα έπρεπε να εμπλουτίζει το πετρέλαιο που βρίσκεται στον ταμιευτήρα, με αρωματικές ενώσεις, ενώ έχει παρατηρηθεί το αντίστροφο. Εξαιρέση αποτελεί το Μεθάνιο, η οποία είναι διαλυτή κάτω από συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας.

Παράδειγμα BP

Οι ερευνητές της BP πάνω στην πρωτογενή μετανάστευση το 1982, ανακάλυψαν, ότι η πυρηνοληψία 16/7b-20 διακόπηκε κατά λάθος, σε μητρικό πέτρωμα που αποβάλλει υδρογονάνθρακες. Το αναμενόμενο ύψος της οροφής του ταμιευτήρα υπολογίστηκε στα 3900m (κάτω από τη περιστρεφόμενη τράπεζα). Το βάθος αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι κόπηκε η σωλήνωση και χάθηκε μέσα σε μια ρωγμή. Τέσσερις πυρήνες διακόπηκαν μέσα σε μια ετερολιθική σειρά από τουρβιδίτες, και μαύρους αργιλικούς σχιστόλιθους του Kimmeridge Clay σχηματισμού. Τα περισσότερα στρώματα τουρβιδίτη ήταν πληρωμένα με πετρέλαιο, οι ψαμμιτικοί ταμιευτήρες βρέθηκαν και η πυρηνοληψία έγινε στα 4047m. Περισσότεροι πυρήνες λήφθηκαν από αντίστοιχες στρωματογραφικές θέσεις, σύμφωνα με την αρχική εκτίμηση της γεώτρησης 16/7b-23, οι οποίοι ήταν σε αργιλικά πετρώματα.

Οι W. A. ENGLAND, A. S. MACKENZIE, D. M. MANN & T. M. QUIGLEY, Geochemistry Branch, BP Research Centre ανέφεραν τα αποτελέσματα από μια σειρά πειραμάτων που διεξάχθηκαν στο Kimmeridge Clay, για να αποσαφηνιστεί η διαδικασία της πρωτογενούς μετανάστευσης. Αυτά είναι:

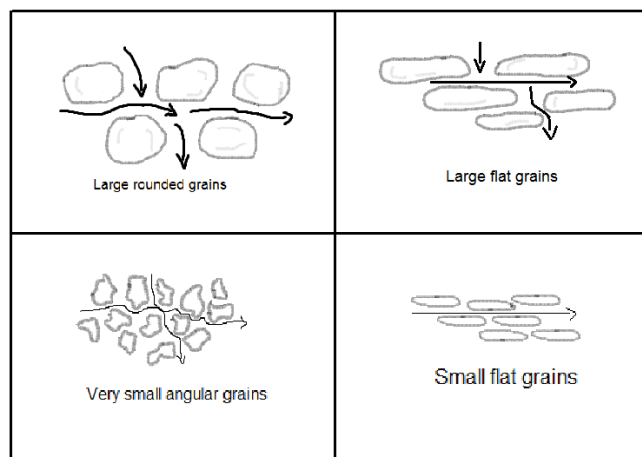
- Ο δείκτης υδρογόνου (Hydrogen index, HI) μειώνεται συστηματικά και στις δυο γεωτρήσεις (wells), 3850-4150m.
- Ο δείκτης παραγωγής πετρελαίου (petroleum generation index, PGI) αυξάνεται συστηματικά για τα ίδια βάθη.
- Η αποδοτικότητα εξαγωγής πετρελαίου (Petroleum Expulsion Efficiency, PEE) αυξάνεται, όπως και το PGI.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από αυτές τις παρατηρήσεις είναι πως η ωρίμανση στο μητρικό πέτρωμα και κατ' επέκταση, η παραγωγή πετρελαίου, αυξάνεται με το βάθος και τη θερμοκρασία. (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013)

2.2 Δευτερογενής μετανάστευση (Secondary migration)

Δευτερογενής μετανάστευση ορίζεται η κίνηση των υδρογονανθράκων από το πέτρωμα ταμιευτήρα μέχρι να βρει δομή παγίδευσης. Το πετρέλαιο από τη στιγμή που βγαίνει από το μητρικό πέτρωμα είναι διασκορπισμένο στην ευρύτερη περιοχή και αρχίζει να συσσωρεύεται όταν συναντήσει τη δομή παγίδευσης. Στη περίπτωση, που η δομή παγίδευσης διαρρηχθεί (disruption) ή υπερκορεστεί (over-filling), τότε το πετρέλαιο μεταναστεύει πάλι με τη διαδικασία της δευτερογενής μετανάστευσης, μέχρι να συναντήσει την επόμενη δομή παγίδευσης. Η διαδικασία αυτή τελειώνει με το πετρέλαιο να φτάνει στην επιφάνεια της Γης (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013).

Το πέτρωμα ταμιευτήρας είναι το μέσο, στο οποίο κινούνται οι υδρογονάνθρακες μέχρι να βρουν τη δομή παγίδευσης. Τέτοια πετρώματα είναι αυτά που έχουν καλό πορώδες και καλή διαπερατότητα, όπως είναι οι ψαμμίτες, ανθρακικά και πετρώματα με τεκτονισμένη δομή. Η διαπερατότητα εξαρτάται από το μέγεθος και τη μορφή των κόκκων του πετρώματος. Οι κόκκοι μπορεί να είναι στρογγυλεμένοι ή πεπλατυσμένοι ή και γωνιώδεις, οι οποίοι μεταβάλλουν την οριζόντια αλλά και κάθετη διαπερατότητα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.



Εικόνα 7. Διαπερατότητα - πορώδες modified

Η κινητήρια δύναμη για τη δευτερογενή μετανάστευση σε κατάσταση υδροστατικής πίεσης (Hydrostatic situations) είναι η διαφορά πυκνότητας μεταξύ πετρελαίου (χαμηλή πυκνότητα) και νερού (υψηλή πυκνότητα). Αυτό εκφράζεται με το φαινόμενο της άνωσης (Buoyancy) και υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο, ως διαφορά πίεσης:

$$\Delta p = Y_p g (\rho_w - \rho_p)$$

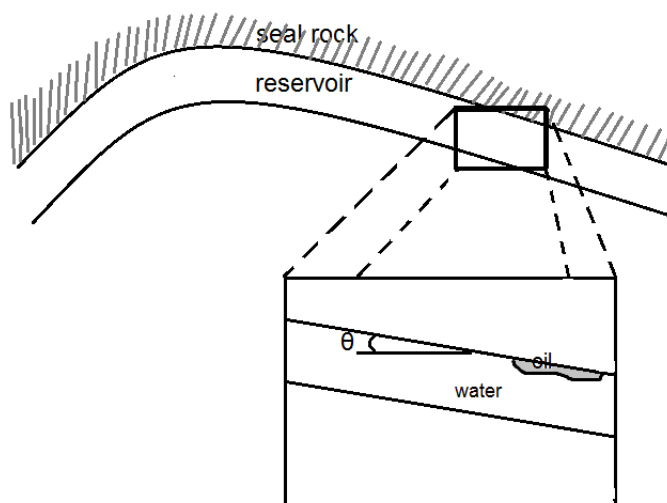
Όπου,

Y_p , το ύψος της πετρελαϊκής στήλης,

g επιτάχυνση της βαρύτητας,

ρ_w η πυκνότητα του νερού κάτω από την επιφάνεια της Γης,

ρ_p η πυκνότητα του πετρελαίου κάτω από την επιφάνεια. (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013)



Εικόνα 8. Ροή οδηγούμενη από την άνωση modified after petrol_hydrodynamics, 2010

$$q = \frac{k}{\mu} (\rho_w - \rho_o) g \sin \theta$$

Όπου,

k, η διαπερατότητα,

ρ_w , η πυκνότητα του νερού,

ρ_o , η πυκνότητα του πετρελαίου,

μ , το ιξώδες,

θ , η γωνία κλίσης,

g, η επιτάχυνση της βαρύτητας. (petrol_hydrodynamics 2010)

Σε υδροδυναμική κατάσταση (Hydrodynamics) η κίνηση του πετρελαίου επηρεάζεται από τη κίνηση του νερού και έτσι μπορεί να τροποποιηθεί η διεύθυνση και ο ρυθμός μετακίνησης. Η αλλαγή διεύθυνσης οδηγεί στη δημιουργία των oil pools σε υδροστατική κατάσταση. (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013)

Η δύναμη που περιορίζει τη μετακίνηση των υδρογονανθράκων είναι η τριχοειδής πίεση (capillary injection pressure). Τα μόρια των υδρογονανθράκων μεταναστεύουν από πόρο σε πόρο, ασκώντας πίεση στο πέτρωμα ταμιευτήρα. Η δύναμη που απαιτείται για να κινηθεί το πετρέλαιο μέσα από ένα pore throat οφείλεται στην διεπιφανειακή τάση μεταξύ του πετρελαίου και του νερού και στην διαβρεξιμότητα (wettability)

$$\text{displacement pressure} = \frac{2\gamma \cos \theta}{R}$$

Όπου,

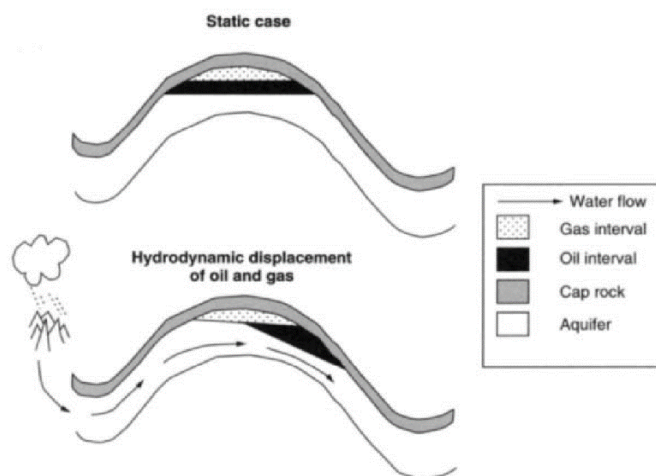
γ , η διεπιφανειακή πίεση (the interfacial pressure) ανάμεσα στο νερό και το πετρέλαιο,

θ , είναι η wettability,

R, η απόσταση ανάμεσα στους πόρους – ακτίνα. (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013)

Η διεπιφανειακή τάση εξαρτάται από τον παράγοντα της θερμοκρασίας, και μάλιστα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης είναι μεγαλύτερη για το σύστημα αέριο-νερό, σε σχέση με το σύστημα πετρέλαιο-νερό. Αυτό δείχνει ότι η πίεση αντικατάστασης (displacement pressure) είναι μεγαλύτερη στο αέριο, παρά στο πετρέλαιο, στο ίδιο πέτρωμα.

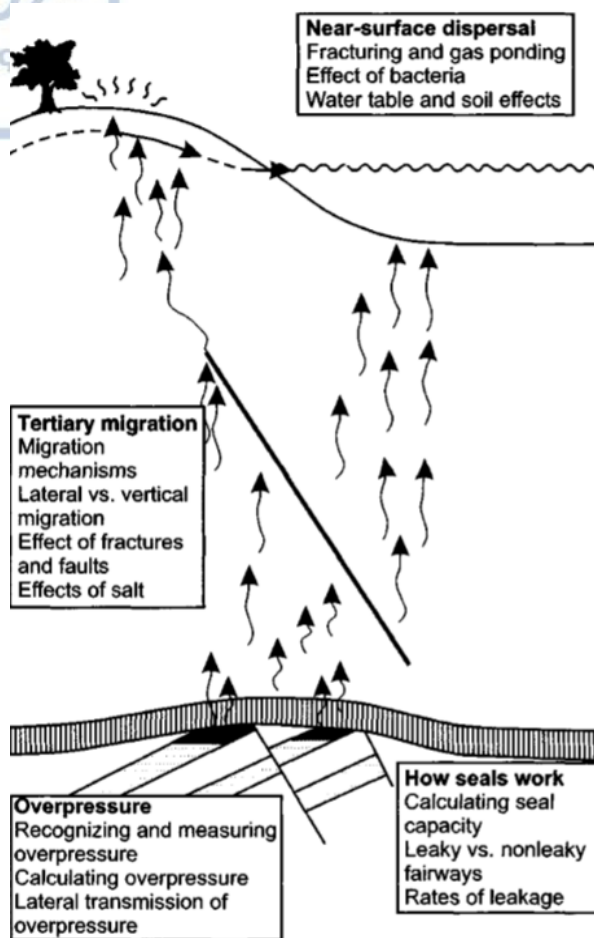
Επομένως, το πετρελαϊκό κοίτασμα δεν θα μπορούσε να δημιουργηθεί σε ένα mudstone, σε αντίθεση με το αέριο κοίτασμα στο ίδιο πέτρωμα, όπου οι συνθήκες το επιτρέπουν (βλ. Εικόνα 9).



Εικόνα 9. The hydrodynamic displacement of oil and gas accumulations through aquifer flow. The degree of displacement is a function of flow rate of water and an inverse function of the density contrast between water and the petroleum phases after John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013

2.3 Τριτογενής μετανάστευση (Tertiary Migration)

Τριτογενής μετανάστευση είναι η μετακίνηση των υδρογονανθράκων από το πέτρωμα ταμειευτήρα ή το μητρικό πέτρωμα προς την επιφάνεια. Ο κύριος μηχανισμός είναι η άνωση, όπως και στη δευτερογενή μετανάστευση. Όταν το πέτρωμα κάλυμμα σπάσει, τότε το πετρέλαιο θα διαρρεύσει προς ένα πέτρωμα με μεγαλύτερη διαπερατότητα, διανύοντας δεκάδες χιλιόμετρα μέχρι να βρει τη δομή παγίδευσης (βλ. Εικόνα 10).



Εικόνα 10. Τριτογενής Μετανάστευση after John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013

Η τριτογενής μετανάστευση μπορεί να έχει κάθετη κατεύθυνση, οριζόντια ή ένα συνδυασμό των δυο και περιλαμβάνει τη διαρροή, τη διασπορά και τη τροποποίηση του πετρελαίου, καθώς αυτό φτάνει στην επιφάνεια της γης. Η διαδικασία της τριτογενούς μετανάστευσης είναι η ίδια με αυτή της δευτερογενούς. Η άνωση οδηγεί το πετρέλαιο προς την επιφάνεια, εξαιτίας της υπερπίεσης και της υδροδυναμικής. Η μόνη διαφορά στα δυο είδη μετανάστευσης είναι ο ρυθμός παροχής πετρελαίου. Η αστοχία της παγίδας, μέσω τριχοειδούς διαρροής, υδραυλικού ή τεκτονικού ρήγματος παρέχουν πετρέλαιο σε ένα σύστημα μεταφοράς με μεγαλύτερο ρυθμό από ότι αυτό συμβαίνει σε ένα μητρικό πέτρωμα. Η κάθετη διεύθυνση οφείλεται στην παρουσία πυκνών σχιστόλιθων, στη ταχεία εναπόθεση (πρόκληση υψηλών υπερπίεσεων), καθώς και στην έλλειψη εκτενών στρωμάτων μεταφοράς (ψαμμίτες και ασβεστόλιθοι) με κλίση. Τα πετρώματα με κλίση, προωθούν την πλευρική μετανάστευση. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε διαρροή στις υπερπιεσμένες περιοχές, καθώς το πετρέλαιο εξέρχεται από το στρώμα μεταφοράς και όχι διαχυτικά από το πέτρωμα κάλυμμα. Η πλευρική μετανάστευση είναι πολύ καλά αναπτυγμένη σε περιοχές ενεργών περιθωρίων (foreland), όπως Faja της Venezuela, Wolf Lake, και Athabasca tar sands στον Καναδά., και τέλος σε παθητικά περιθώρια, όπως στον κόλπο του Μεξικού και στη Βόρεια Θάλασσα.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Παράγοντες

3.1 Παράγοντες που προκαλούν τη διαδικασία της μετανάστευσης

Η παρουσία φυσικού αερίου και πετρελαίου έχουν ως πηγές ενέργειας την άνωση, το χημικό δυναμικό που σχετίζεται με τις διαφορές στις συγκεντρώσεις, την έκταση που οφείλεται στη αλλαγή φάσης, την αύξηση του όγκου κατά τη διαδικασία της ωρίμανσης, και τέλος τη συμπαγοποίηση των ιζημάτων. Οι πηγές ενέργειας για τους υδρογονάνθρακες, που είναι θαμμένοι, είναι η θερμική διαστολή (thermal expansion), η κίνηση του νερού εξαιτίας της συμπίεσης, καθώς και η ροή εξαιτίας της τοπογραφίας. Τέλος, η αλλαγή φάσης και η διαστολή αερίου οδηγούν στην μείωση θερμοκρασίας και πίεσης, εξαιτίας της ανοδικής κίνησης της μετανάστευσης των υδρογονανθράκων. (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999)

3.1.1 Αύξηση του όγκου κατά τη διαδικασία της ωρίμανσης

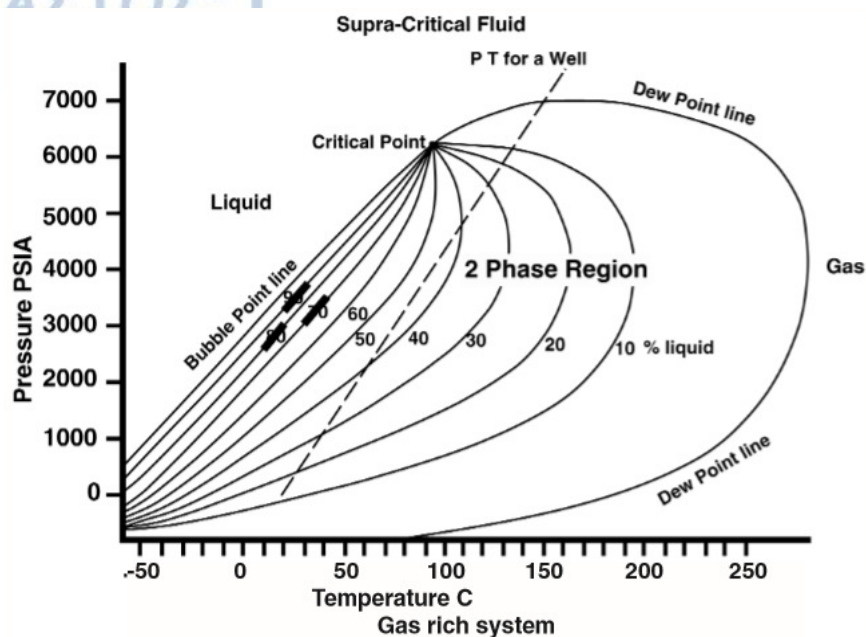
Κατά τη διαδικασία της ωρίμανσης το Κηρογόνο μετατρέπεται σε υγρούς και αέριους υδρογονάνθρακες. Η μετατροπή από τη μια φάση στην άλλη οδηγεί στην αύξηση του όγκου, με αποτέλεσμα την δημιουργία υψηλής πίεσης μέσα στο μητρικό πέτρωμα. Έτσι, οι υδρογονάνθρακες αναγκάζονται να διαφύγουν εκτός του μητρικού πετρώματος (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999). Το κηρογόνο αποτελείται από μεγάλα μόρια υδρογονανθράκων και παραμένουν σε σταθερή κατάσταση υπό συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013).

3.1.2 Άνωση

Η ανωστική δύναμη είναι ανάλογη της διαφοράς πυκνότητας και του ύψους της στήλης των υδρογονανθράκων. Μια ελεύθερη φάση υδρογονανθράκων έχει πολύ μικρή πυκνότητα σε μια υδάτινη στήλη, για αυτό ανεβαίνει προς τα πάνω. Λειτουργεί μόνο κατακόρυφα, γι' αυτό όταν οι υδρογονάνθρακες που είναι πάνω, όταν συναντήσουν κλίση χαμηλής διαπερατότητας (υψηλή πίεση εισόδου τριχοειδών) εκτρέπονται updip και η δύναμη που προκύπτει μειώνεται κατά μια ποσότητα ανάλογη προς τη κλίση της επιφάνειας αυτής. (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999)

3.1.3 Θερμοκρασία και πίεση

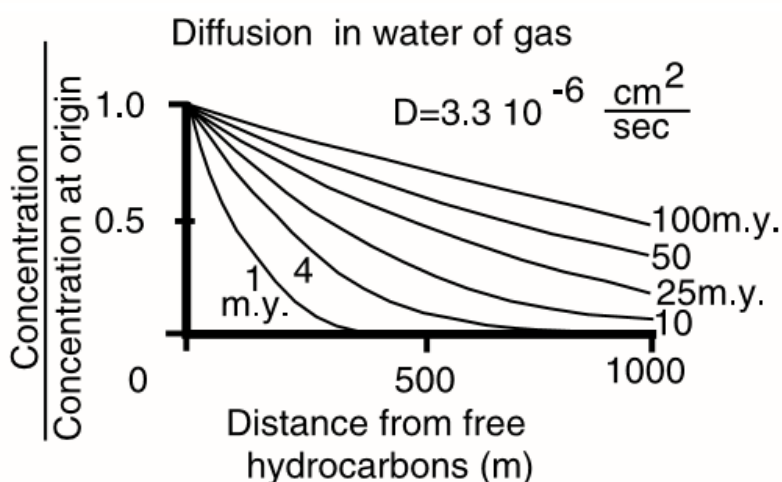
Καθώς οι υδρογονάνθρακες θάβονται, η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει και την ανωστική δύναμη. Ωστόσο, η πυκνότητα των υδρογονανθράκων σε υψηλές θερμοκρασίες μειώνεται περισσότερο σε σχέση με τη πυκνότητα του νερού. Η υψηλή πίεση από την άλλη μειώνει την ανωστική δύναμη των υδρογονανθράκων και αυξάνει τη πυκνότητα τους σε σχέση με το νερό. Αξίζει να αναφερθεί ότι η υψηλή πίεση είναι ικανή να μετατρέψει την αέρια μορφή σε υγρή, ενώ η υψηλή θερμοκρασία να μετατρέψει την υγρή σε αέρια (βλ. Εικόνα 11). (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999)



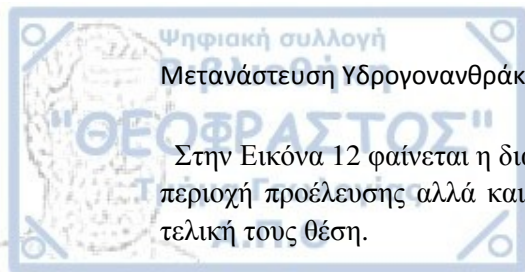
Εικόνα 11. Σχέση θερμοκρασίας πίεσης after Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999

3.1.4 Χημικό δυναμικό

Οι υδρογονάνθρακες μεταφέρονται διαλυμένοι στο νερό με το φαινόμενο της διάχυσης από περιοχές με υψηλή συγκέντρωση σε αυτούς σε περιοχές με χαμηλή συγκέντρωση. Η αποτελεσματικότητα αυτής της διεργασίας αποδεικνύεται από τη διάχυση σε βαθμίδες των Βενζολίου και Τολουολίου μέσα στους ταμιευτήρες. Ωστόσο, η έλλειψη μεταφοράς σημαντικής ποσότητας βενζολίου και τολουολίου μέσω των φραγμών και παγίδων δείχνει ότι αυτός ο μηχανισμός συσσώρευσης είναι ασήμαντος. (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999)



Εικόνα 12. Διάχυση του αέρα στο νερό after Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999



Μετανάστευση Υδρογονανθράκων

Στην Εικόνα 12 φαίνεται η διάχυση του αέρα σε νερό, ως συνάρτηση της συγκέντρωσης στη περιοχή προέλευσης αλλά και την απόσταση που διάνυσαν οι υδρογονάνθρακες μέχρι την τελική τους θέση.

3.1.5 Τριχοειδής διαποτισμός

Ο τριχοειδής διαποτισμός μεταφέρει συνδεδεμένες ελεύθερες φάσεις υδρογονανθράκων από τα λεπτοστρωματώδη προς τα χονδρόκοκκα στρώματα. Αυτή η δύναμη είναι κυρίαρχη στα μητρικά πετρώματα, ιδίως στην επαφή με αδρόκοκκα στρώματα. Εάν το στρώμα αυτό είναι μέσα στο μητρικό πέτρωμα, όπως μια ιλύς, οι υδρογονάνθρακες αποθηκεύονται εκεί μέχρι να συνδεθούν με ένα συνεχές δίκτυο εξωτερικού χονδρόκοκκου πετρώματος. Εάν το χονδρόκοκκο πέτρωμα βρίσκεται εξωτερικά του μητρικού πετρώματος, είναι παχύ και πλάγια εκτεταμένο, τότε θα λειτουργήσει ως φορέας (carrier bed) και θα ξεκινήσει η μετανάστευση.

3.1.6 Συμπίεση ιζημάτων

Το πορώδες των ιζηματογενών πετρωμάτων καθώς θάβονται και συμπιέζονται από τα υπερκείμενα, μειώνεται. Η κίνηση του νερού σε αντίθεση με τα ιζήματα είναι ανοδική, ωστόσο στη διεπιφάνεια νερού/ ιζήματος είναι καθοδική, επειδή κάποιο νερό παγιδεύεται συνεχώς, καθώς η καθίζηση συνεχίζεται. Το αποτέλεσμα αυτού είναι η διαφυγή των ρευστών, που συμπιέζονται, προς τις περιοχές συγκέντρωσης με πλευρικό τρόπο.

3.2 Παράγοντες που αντιτίθενται στη διαδικασία της μετανάστευσης

3.2.1 Πόροι

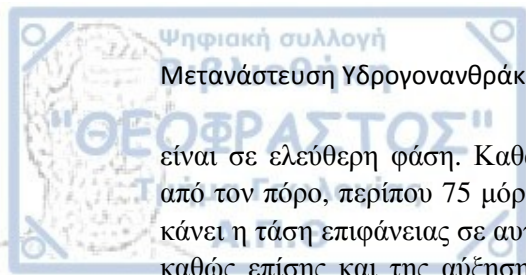
Οι πόροι στους λαιμούς λειτουργούν ως κόσκινα για τα μόρια, επιτρέποντας τα σωματίδια που είναι μικρότερα από το στόμιο να περάσουν και να συγκρατήσουν τα μεγαλύτερα.

3.2.2 Μοριακό μέγεθος υδρογονανθράκων

Το μέγεθος των πόρων των σχιστόλιθων ποικίλει σε πέντε τάξεις και είναι περίπου ίσο με τη διάμετρο των ατομικών μορίων των υδρογονανθράκων, με αποτέλεσμα να περνούν μόνο τα μικρότερα μόρια υδρογονανθράκων, εξαιτίας των φυσικών περιορισμών (steric effect). Επιπλέον, οι μεγάλοι πόροι των σχιστόλιθων είναι πληρωμένοι με υδρογονάνθρακες που έχουν προέλθει από απευθείας μετανάστευση του κηρογόνου σε επαφή με τους πόρους. Τέλος, οι μεγαλύτεροι πόροι προτιμώνται να πληρωθούν με παραφίνη και αρωματικά των γειτονικών μικρότερων πόρων. (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999)

3.2.3 Τριχοειδείς πιέσεις

Οι τριχοειδείς πιέσεις εμφανίζονται στην διεπαφή δυο ξεχωριστών φάσεων, δηλαδή είναι η επαφή μεταξύ των άμικτων (immiscible) υγρών και των πόρων του λαιμού. Καθώς η διαφορά πίεσης, κατά μήκος των τριχοειδών τάσεων αυξάνεται, η διεπαφή μετασχηματίζεται και τελικά η nonwetting φάση διαπερνά τον περιορισμό. Οι τριχοειδείς πιέσεις είναι αποδοτικές μόνο στην επαφή δυο άμικτων φάσεων. Η wetting φάση (συνήθως νερό) που διαβρέχει τις επιφάνειες των κόκκων είναι συνεχόμενη. Η nonwetting φάση υπολογίζεται ότι σχηματίζει ένα ή περισσότερα δίκτυα σε ένα στρώμα, όταν η συγκέντρωση του κυμαίνεται μεταξύ 4.5% και 17% του όγκου των πόρων. Για τις τριχοειδείς δυνάμεις σε μικρούς πόρους (100 nanometer ή λιγότερο) και σε μικρούς πόρους (10 nanometer ή λιγότερο), η κατάσταση για την τάση επιφάνειας γίνεται ασαφής. Ένας σφαιρικός πόρος διαμέτρου 100 nm έχει όγκο $5 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^3$. 1g μεθανίου διαλύεται σε 100g νερού, επομένως 150.000 μόρια μεθανίου μπορούν να διαλυθούν στο νερό, που βρίσκεται στους πόρους και οποιαδήποτε περίσσεια θα



Μετανάστευση Υδρογονανθράκων

είναι σε ελεύθερη φάση. Καθώς μια φυσαλίδα μεθανίου μετασχηματίζεται για να περάσει από τον πόρο, περίπου 75 μόρια αερίου βρίσκονται στο νερό του πόρου. Είναι ασαφές το τι κάνει η τάση επιφάνειας σε αυτά τα μόρια αερίου. Εξαιτίας της ελάττωσης της διαλυτότητας, καθώς επίσης και της αύξησης του μοριακού βάρους και της αύξησης του μεγέθους των μορίων, αυτές οι ερωτήσεις είναι ακόμη πιο κρίσιμες σε άλλα είδη υδρογονανθράκων και για μικρότερους πόρους, επειδή ο αριθμός των μορίων στους πόρους και οι πόροι λαιμού είναι ακόμα λιγότεροι. (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999)

3.2.4 Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα σχετίζεται με το μέγεθος των πόρων, τη διανομή και τη διασυνδεσιμότητα. Μετράει ποια υγρά περνούν μέσα από τους πόρους, καθώς και τον ρυθμό τους. Οι ιδιότητες των υγρών που παρευρίσκονται στους πόρους καθορίζουν και το ρυθμό με τον οποίο αυτά κινούνται μέσα στο σύστημα των πόρων, διότι η διαπερατότητα σχετίζεται με το ιξώδες των υγρών. Η παρουσία των παραπάνω από μια φάση στο σύστημα των πόρων, μειώνει τη διαπερατότητα που θα είχε το σύστημα, αν σε αυτό βρισκόταν μόνο μια φάση. Οι καταλληλότερες μετρήσεις διαπερατότητας γίνονται σε αμμώδεις σχηματισμούς παρά σε αργιλικούς, εξαιτίας περαιτέρω δυσκολιών. Και τέλος, η διαπερατότητα που μετριέται σε δείγμα πυρήνα είναι χαρακτηριστικά μικρότερη σε σχέση με αυτή που μετριέται κατά τη παραγωγική διαδικασία. (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999)

3.2.5 Πίεση πόρων

Οι διαφορές στην υπερπίεση των υγρών πόρων προσδιορίζουν το δυναμικό, τη γενική κατεύθυνση και τον ρυθμό της ροής των υγρών. Όσον αφορά τους υδρογονάνθρακες πρέπει να προστεθεί και η δύναμη της άνωσης. Η χωρική κατανομή των διαφορών πίεσης αλληλοεπιδρά με την διαπερατότητα και τις τριχοειδείς πιέσεις, ώστε να καθοριστεί ο ρυθμός ροής κατά μήκος των πολλαπλών μονοπατιών μετανάστευσης. Πετρώματα καλύμματα, από τα οποία δεν υπάρχει καμία διαρροή, σπάνια υπάρχουν και για αυτό ως τέλεια καλύμματα θεωρούνται αυτά που έχουν την ελάχιστη πίεση. Όταν όλες οι πιέσεις που δρουν στους υδρογονάνθρακες επιλύονται και συμβαίνει τοπική ελάχιστη πίεση, δεν υπάρχει μετανάστευση και οι υδρογονάνθρακες παραμένουν εκεί. (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ρυθμός μετανάστευσης, υπολογισμός και εκτίμηση

4.1.1 Ρυθμός μετανάστευσης

Ο ρυθμός μετανάστευσης είναι ο καθοριστικός παράγοντας που ελέγχει τον συνολικό ρυθμό της διαδικασίας. Σε αμμόδεις και σε αργιλικούς σχηματισμούς, ο ρυθμός εξαρτάται από την διαπερατότητα, αλλά και τον ρυθμό απομάκρυνσης των υδρογονανθράκων από το μητρικό πέτρωμα. Ωστόσο, ο ρυθμός μετανάστευσης μιας nonwetting διαχωρισμένης φάσης σε ένα αργιλικό σχηματισμό θεωρείται αυτορρυθμιζόμενος. Για παράδειγμα, στις παγίδες, οι υδρογονάνθρακες συσσωρεύονται και απλώνονται πλευρικά, μέχρις ότου το μέγεθος της συσσώρευσης που προκαλεί τη μετανάστευση μέσα στη δομή να είναι ίσο με αυτό, που πρόκειται να βγει εκτός δομής. Αυτή η διαδικασία συσσώρευσης αυξάνει το ρυθμό ροής των υδρογονανθράκων μέσα στο αργιλικό στρώμα, μεγαλώνοντας την περιοχή επαφής των υδρογονανθράκων με τις αργίλους. Σε οποιοδήποτε σημείο αδυναμίας μέσα στον αργιλικό σχηματισμό, όπως κάποιο ρήγμα, είναι δυνατόν να εισέλθουν οι υδρογονάνθρακες, αυξάνοντας έτσι τη διαρροή από την δομή παγίδας. (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999)

4.1.2 Parallel και serial διαδικασίες

Η ροή των υδρογονανθράκων διαχωρίζεται σε δυο κατηγορίες, τις parallel και serial. Οι parallel διαδικασίες συμβαίνουν ταυτόχρονα και διακρίνονται σε μετακίνηση μέσω διάχυσης, μέσω διάλυσης σε υδατώδες περιβάλλον και τέλος, σε μετακίνηση της διαχωρισμένης φάσης. Οι serial διαδικασίες είναι οι συνηθέστερες και συμβαίνουν διαδοχικά. Αυτές είναι η απομάκρυνση των υδρογονανθράκων από το μητρικό πέτρωμα, οι τριχοειδείς πιέσεις κατά μήκος της διαδρομής της μετανάστευσης μέχρι τη παγίδα και τέλος, η διαρροή από τη δομή παγίδευσης. (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999))

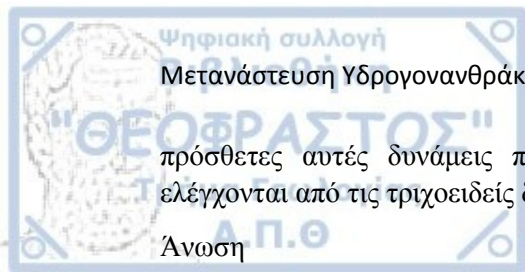
4.1.3 Ρυθμοί για διαφορετικούς μηχανισμούς

Πίνακας 2. Λίστες των μηχανισμών και των ρυθμών τους

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗΣ	ΡΥΘΜΟΙ ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗΣ
Υδροδυναμική	0.1 και 100 m/year
Συμπίεση	0.001 και 1 m/year
Άνοση	Meters per day for gas (oil not measured)
Διάχυση	1 to 10 m/m.y

Υδροδυναμική και συμπίεση

Ο ρυθμός κίνησης του νερού μέσω του υδροπορικού συστήματος θέτει το ανώτερο όριο στον ρυθμό μετακίνησης των υδρογονανθράκων. Αν οι υδρογονάνθρακες παρευρίσκονται ως ελεύθερη φάση, τότε οι ανωστικές δυνάμεις προστίθενται στον ρυθμό. Πρακτικά, οι



πρόσθετες αυτές δυνάμεις που παρέχονται από την υδροδυναμική και τη συμπίεση, ελέγχονται από τις τριχοειδείς δυνάμεις και τη διαπερατότητα.

Ανώση

Ο ρυθμός μετανάστευσης των υδρογονανθράκων, που επηρεάζεται από την άνωση, εξαρτάται από τη σχέση πυκνότητας των υδρογονανθράκων με το νερό, καθώς και με τη στήλη ύψους αυτών. Ο ρυθμός μετακίνησης μεγάλων μαζών υδρογονανθράκων περιορίζεται με το χρόνο που χρειάζεται η μάζα να συγκεντρωθεί σε μια στήλη ύψους, ώστε να μπορέσει να ξεπεράσει τις τριχοειδείς δυνάμεις και να μεταβεί σε μετανάστευση.

Διάχυση

Η μετακίνηση των υδρογονανθράκων μέσω της διάχυσης είναι πολύ αργή. Ο ρυθμός εξαρτάται από τη συγκέντρωση σε τοπικό επίπεδο, από όπου συμβαίνει η διάχυση. Ο συντελεστής διάχυσης κυμαίνεται μεταξύ 10-10 και 10-12 m²/sec. (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999)

4.2 Υπολογισμός ρυθμού μετανάστευσης

Ο ρυθμός μετανάστευσης πετρελαίου και φυσικού αερίου εκτιμάται με τον νόμο του Darcy, ή αλλιώς τον κανόνα της διαπερατότητας. Ο νόμος αυτός εφαρμόζεται κυρίως σε πετρώματα με σωληνοειδές σύστημα πόρων, ωστόσο μπορεί να εφαρμοστεί και σε πετρώματα με υψηλό ποσοστό σε αργιλικά, εξαιτίας του επιπέδου σχήματος των κόκκων αυτών. Η διαδικασία υπολογισμού του ρυθμού μετανάστευσης των υδρογονανθράκων αποτελείται από τρία βήματα. Αρχικά συλλέγονται δεδομένα που αφορούν τη διαπερατότητα, το ιξώδες του πετρελαίου, την πυκνότητα των ρευστών και την πίεση πόρων. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι ανωστικές πιέσεις και τέλος, υπολογίζεται ο ρυθμός μετανάστευσης των υδρογονανθράκων. (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999)

Υπολογισμό του ρυθμού μετανάστευσης υδρογονανθράκων με τον νόμο του Darcy:

$$R = - \left(k * \frac{A}{m} * [(P_{grad} + P_c) - \rho_{hc} * g] \right)$$

Όπου:

R, ρυθμός μετανάστευσης (m³/sec)

k, διαπερατότητα (m² ή Darcy)

A, cross sectional aerial (m²)

m, ιξώδες (Pa-sec ή centipoise) (0.01 Pa-sec για πετρέλαιο και 0.0001 για αέριο στους 20°C, 0.001 Pa-sec για πετρέλαιο και 0.00001 για αέριο στους 150°C)

P_{grad}, πίεση πόρων (Pa)

P_c, τριχοειδείς πιέσεις

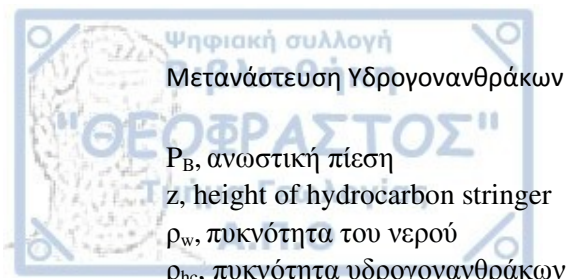
ρ_{hc}, πυκνότητα υδρογονανθράκων (kg/m³)

g, επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/sec²)

Για τον υπολογισμό του ρυθμού μετανάστευσης είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των ανωστικών πιέσεων, που υπολογίζεται από την εξίσωση

$$P_B = g * Z * (\rho_w - \rho_{hc})$$

Όπου:



Μετανάστευση Υδρογονανθράκων

P_B , ανωστική πίεση

z , height of hydrocarbon stringer

ρ_w , πυκνότητα του νερού

ρ_{hc} , πυκνότητα υδρογονανθράκων

4.3 Υπολογισμός όγκου υδρογονανθράκων

Ο όγκος του κοιτάσματος, που έχει παραχθεί στο μητρικό πέτρωμα υπολογίζεται σε τέσσερα βήματα. Αρχικά, χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση.

$$V = A * T * Y * M$$

Όπου:

V , ο δυναμικός όγκος

A , περιοχή

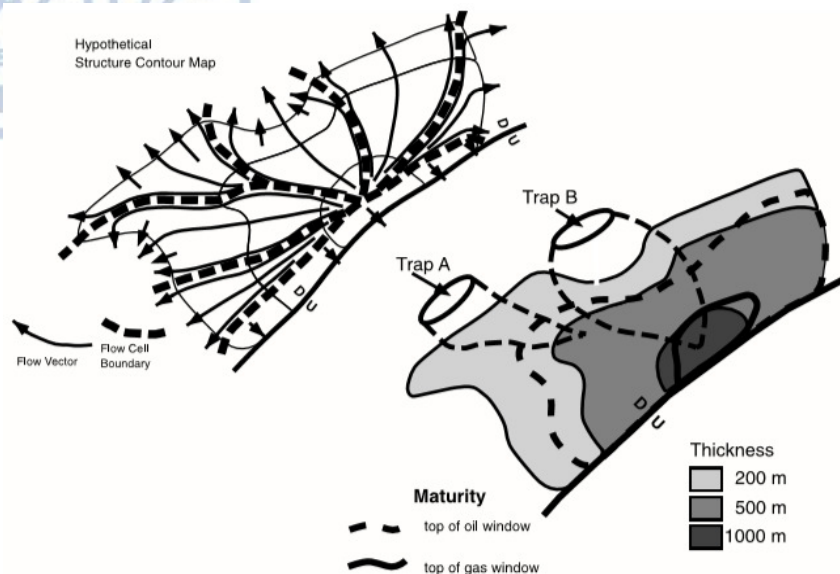
Y , οι παραγόμενοι υδρογονάνθρακες από το κηρογόνο (maturity class)

M , μετανάστευση

Στο δεύτερο βήμα, εκτιμάται η ποσότητα του μητρικού πετρώματος που παρέχει υδρογονάνθρακες στην περιοχή, όπου βρίσκεται η δομή παγίδας (drainage area). Στο τρίτο βήμα, εκτιμάται η αποδοτικότητα της διαδικασίας της μετανάστευσης. Για παράδειγμα, μετακινήθηκε το 20% των υδρογονανθράκων από το μητρικό πέτρωμα στο πέτρωμα παγίδα; Και τελευταίο βήμα, ο υπολογισμός του όγκου των υδρογονανθράκων που μετανάστευσαν, ικανών να συσσωρευτούν ως τη δομή παγίδας. (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999)

Εκτιμώντας την περιοχή αποστράγγισης

Είναι πολύ σημαντικό να χαρτογραφηθεί η περιοχή του μητρικού πετρώματος, καθώς και οι drainage areas, οι οποίες τροφοδοτούν τις περιοχές ενδιαφέροντος. Η καλύτερη αποτύπωση είναι, όταν η ανάλυση του σταδίου ωρίμανσης δείχνει τους υδρογονάνθρακες που μπορεί να μεταναστεύσουν. Ο χάρτης αποστράγγισης δημιουργείται από τον χάρτη μετανάστευσης. Πρέπει να περιλαμβάνει δεδομένα ωρίμανσης και παραγωγής υδρογονανθράκων (βλ. Εικόνα 13)



Εικόνα 13. Χάρτες αποστράγγισης

Στον κατώτερο χάρτη της Εικόνας 13 απεικονίζεται το πάχος του μητρικού πετρώματος, τα παράθυρα του πετρελαίου και του φυσικού αερίου και οι περιοχές αποστράγγισης για τις δυο παγίδες A, B της ίδιας περιοχής που φαίνονται και στον πάνω χάρτη. Οι περιοχές αποστράγγισης για τις παγίδες A, B δημιουργήθηκαν, χρησιμοποιώντας το χάρτη, που δείχνει το μονοπάτι μετανάστευσης.

Παράδειγμα υπολογισμού όγκου

Πίνακας 3. Παράδειγμα υπολογισμού όγκου (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999)

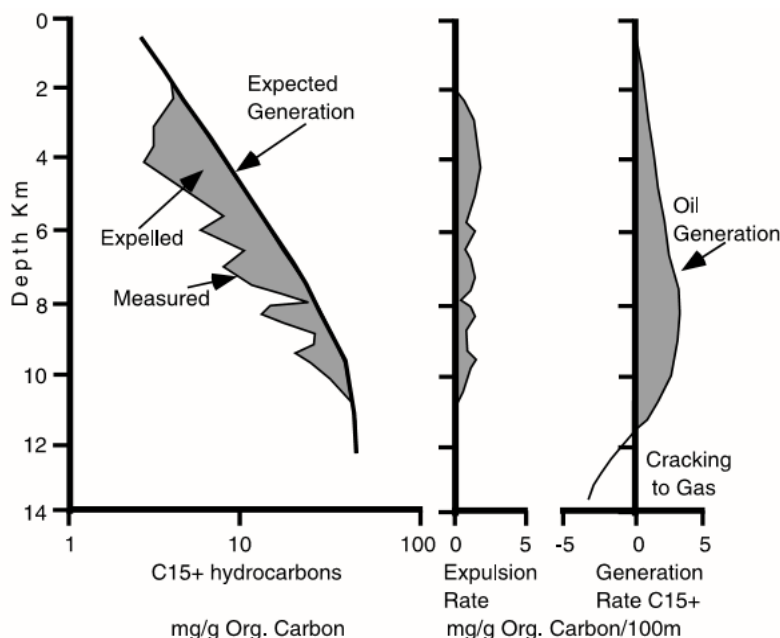
Factor	Trap A	Trap B
Περιοχή 1	0 km ²	50 km ²
Παραγωγή από το μητρικό πέτρωμα στην περιοχή 1	0.2 bbl/m ³	0.2 bbl/m ³
Συνολικός όγκος παραγόμενος στην περιοχή 1	0 bbl	10 billion bbl
Περιοχή 2 (500m πάχους ώριμου μητρικού πετρώματος)	10 km ²	350 km ²
Παραγωγή από την πηγή στη περιοχή 2	0.1	0.1
Συνολικός όγκος στην περιοχή 2	0.5 billion bbl	17.5 billion bbl
Περιοχή 3 (200 m πάχος)	40 km ²	10 km ²
Παραγωγή στην περιοχή 3	0.02	0.02

Μετανάστευση Υδρογονανθράκων

Συνολικός όγκος στην περιοχή 3	0.16 billion bbl	0.04 billion bbl
Συνολικά περιοχές 1, 2, 3	0.66 billion bbl	27.54 billion bbl
Μετανάστευση	10%	10%
Αποθέματα	0.066 billion bbl	2.754 billion bbl

4.4 Εκτίμηση βαθμού απόδοσης εκδίωξης των υδρογονανθράκων (estimating expulsion efficiency)

Ο βαθμός απόδοσης εκδίωξης των υδρογονανθράκων από το μητρικό πέτρωμα και μεταφοράς των υδρογονανθράκων πρέπει να εκτιμηθεί, προκειμένου να υπολογιστεί το εναπομένον ποσό στη διαδικασία της μετανάστευσης. (Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999)



Εικόνα 14. Βαθμός απόδοσης εκδίωξης, μετανάστευσης και παγίδευσης υδρογονανθράκων after Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999)

Οι τυπικές αποδοτικότητες πετρελαίου κυμαίνονται μεταξύ 5-10%, με 15% ασυνήθιστο και 30% σπάνια αποδεδειγμένο. Αυτή η αποδοτικότητα είναι χαμηλή, διότι στα περισσότερα μητρικά πετρώματα η συγκέντρωση οργανικού υλικού που παίρνει μέρος στην εξαγωγή είναι πολύ μικρή. Η αποδοτικότητα εξαγωγής του φυσικού αερίου εκτιμάται στα 50- 90, με συνήθη αξία των 75%. Δυστυχώς όμως, το περισσότερο από αυτό το αέριο είναι χαμένο, εξαιτίας της διάλυσης και έτσι δεν συμμετέχει στην πλήρωση ταμιευτήρα. Τόσο η αποδοτικότητα εξαγωγής του πετρελαίου όσο και του αερίου τείνουν να αυξηθούν, όσο αυξάνεται το TOC (total organic carbon), δηλαδή η κατά βάρος συγκέντρωση του οργανικού υλικού στο μητρικό πέτρωμα(βλ. Εικόνα 14). Η διαδικασία μέτρησης της αποδοτικότητας ακολουθεί τα παρακάτω στάδια (βλ. Εικόνα 15).

ΣΤΑΔΙΟ 1

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

Μετανάστευση Υδρογονανθράκων

Estimate the original kerogen content of the rock using TOC values measured from source rock samples.

ΣΤΑΔΙΟ 2

Model the original hydrocarbon generation potential of the source rock using the estimated original kerogen content.

ΣΤΑΔΙΟ 3

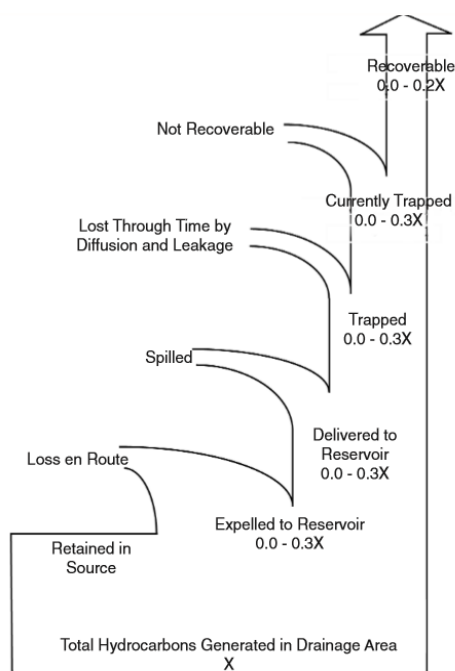
Measure the volume of hydrocarbons expelled during pyrolysis (S2.)

ΣΤΑΔΙΟ 4

Estimate the actual expelled hydrocarbon volume by subtracting the S2 value from the original hydrocarbon generation potential of the source rock.

ΣΤΑΔΙΟ 5

Calculate efficiency by dividing the expected volume of expelled hydrocarbons from the actual volume of hydrocarbons generated.



Εικόνα 15. Διαδικασία εκτίμησης βαθμού αποδοσης εκδίωξης υδρογονανθράκων after Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999

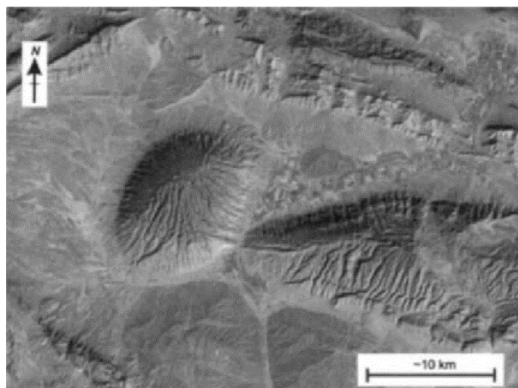


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μέθοδοι έρευνας υδρογονανθράκων

5.1 Δορυφορικές εικόνες και τηλεπισκόπηση

Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για την εξερεύνηση μιας ολόκληρης λεκάνης, ή τουλάχιστον ενός σημαντικού μέρους αυτής, παρά ένα συγκεκριμένο επίπεδο της ευρύτερης περιοχής. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου διευκολύνει την απόκτηση πληροφοριών με εύκολο και χαμηλού κόστους τρόπο (MT Halbouty, JD Moody). Επιπλέον, οι τεχνικές αυτής της μεθόδου τείνουν να επικεντρωθούν στη δομή της λεκάνης, όπως ρήγματα, καθώς επίσης και στην εκτίμηση του υλικού πλήρωσης, όπως ιζηματογενή ή ηφαιστειογενή πετρώματα. Ωστόσο, υπάρχουν και εφαρμογές αυτής της τεχνικής, όπου δορυφορικές εικόνες χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση διαρροής πετρελαίου, καθώς και κάποιες μεμονωμένες δομές παγίδων. Από τις δορυφορικές εικόνες αντλούνται δυο μορφές πληροφοριών, της φασματικής ανάλυσης και της φωτογεωλογίας/ φωτογεωμορφολογίας. Η φασματική ανάλυση κυμαίνεται μεταξύ 0.2 μm και 50cm, που περιλαμβάνει τις υπεριώδεις ακτίνες, το ορατό φως, το υπέρυθρο και τα μικροκύματα. Ωστόσο, στα μικροκύματα, κάποιες μπάντες δεν μπορούν να αξιοποιηθούν, εξαιτίας της ατμοσφαιρικής απορρόφησης της ακτινοβολίας. Όσον αφορά την μορφή φωτογραφίας από τις δορυφορικές εικόνες, είναι παρόμοιες με τις αεροφωτογραφίες. Κατά την αξιοποίηση ενός δορυφόρου για την εκτίμηση της εικόνας του υποστρώματος, πρέπει να λάβουμε υπ' όψη τις ατμοσφαιρικές και υδροσφαιρικές συνθήκες, καθώς και τις συνθήκες βλάστησης της περιοχής. Οι δορυφορικές εικόνες είναι ικανές να παρέχουν πληροφορίες δομής σε πολύ χαμηλό κόστος, συγκριτικά με άλλες μεθόδους, καθώς και, με μεγάλη επιτυχία, τον εντοπισμό της διαρροής πετρελαίου (βλ. Εικόνα 16). (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013)



Εικόνα 16. Δορυφορική εικόνα από το όρος Ζάγκρος, Ιράν. Στο κέντρο απεικονίζεται μια αντικλινική δομή πάνω από δόμο άλατος. Η ακτινική διάβρωση είναι ορατή. (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013)

5.2 Βαρυτομετρική ανάλυση

Τα βαρυτομετρικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν, προκειμένου να προσδιοριστεί το τεκτονικό σύστημα της περιοχής, να σημανθούν περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα και τέλος, να αναγνωριστούν οι σχηματισμοί που δημιουργήθηκαν από τους

σεισμούς (ύφαλοι, άλατα, ανασηκωμένα κάτω τεμάχη). Η μέθοδος αυτή διευκολύνει τους επιστήμονες να αποκτήσουν δεδομένα σε δυσπρόσιτες περιοχές για σεισμικά δεδομένα, όπως επίσης δεν είναι τόσο κοστοβόρα ανάλυση όσο η σεισμική. Ωστόσο, δεν είναι τόσο αξιόπιστη όσο τα σεισμικά δεδομένα και πολλές φορές προκύπτουν αμφιλεγόμενα συμπεράσματα. Η βαρομετρική ανάλυση βασίζεται στον Νόμο του Νεύτωνα, όπου η δύναμη της κοινής έλξης ανάμεσα σε δυο σωματίδια m_1 , m_2 , συνδέεται με τις μάζες τους και το διαχωρισμό τους. Ο νόμος ορίζει πως, δυο σωματίδια με μάζες m_1 , m_2 αντίστοιχα, και μικρής απόστασης r , που χωρίζει τα κέντρα τους, θα τα έλξει μια άλλη δύναμη F . (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013)

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Όπου G , η παγκόσμια σταθερά βαρύτητας ίση με $6.670 \cdot 10^{-8}$ centimeter- gram-second (c.g.s)

Η επιτάχυνση (α) της μάζας m_2 , υπολογίζεται διαιρώντας την ελκτική δύναμη με τη μάζα m_2

$$\alpha = \frac{F}{m_2} = G \frac{m_1}{r^2}$$

Οι βαρομετρικές ανωμαλίες προκαλούνται από ετερογενή κατανομή των πετρωμάτων, λόγω της διαφορετικής τους πυκνότητας. Για την καλύτερη δυνατή ερμηνεία των δεδομένων είναι απαραίτητος ο συνδυασμός των μαγνητικών δεδομένων, όπως επίσης και σεισμικών ή ακόμα και η χρήση δεδομένων πυκνότητας από πυρηνοληψία, αν αυτό είναι δυνατόν.

Πίνακας 4. Πυκνότητα πετρωμάτων

Πέτρωμα	Πυκνότητα g cm^{-3}	Μέση πυκνότητα
Γρανίτης	2.50-2.81	2.64
Βασάλτης	2.70-3.30	2.90
Όξινο πυριγενές	2.09-3.17	2.79
Βασικό πυριγενές	2.30-3.11	2.61
Μεταμορφωμένο	2.40-3.10	2.74
Σχιστόλιθος	2.10-2.50	2.22
Ψαμμίτης	1.61-2.76	2.35
Ασβεστόλιθος	1.93-2.90	2.55
Δολομίτης	1.77-3.20	2.70
Ιλινόλιθος/ Πηλόλιθος	2.58-3.42	2.40

5.3 Μαγνητικά δεδομένα

Τα μαγνητικά δεδομένα χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό και προσδιορισμό του σχήματος και του σχηματισμού (πχ δόμοι άλατος) της λεκάνης, καθώς τη τεκτονική της δομή, που προηγουμένως έχει αναγνωριστεί από σεισμικές αναλύσεις. Το μαγνητικό πεδίο της Γης χωρίζεται σε τρία τμήματα, από τα οποία μόνο το ένα έχει ενδιαφέρον για γεωφυσική έρευνα. Αυτά είναι το εξωτερικό πεδίο, το κύριο πεδίο και οι διακυμάνσεις στο κύριο πεδίο. Το εξωτερικό πεδίο προέρχεται από έξω από τη Γη και οι τιμές του ποικίλουν ημερήσια ή σε μεγαλύτερα διαστήματα στη χρονική κλίμακα. Το κύριο πεδίο προέρχεται από τον μεταλλικό πυρήνα της Γης και οι τιμές του ποικίλουν μέσα στον χρόνο, αλλά ο ρυθμός αλλαγής είναι αργός. Τέλος, οι διακυμάνσεις στο κύριο πεδίο έχουν συνήθως μικρότερες από τις τιμές του κύριου πεδίου και παράγονται από τις τοπικές μαγνητικές ανωμαλίες στο φλοιό και είναι σταθερές με το χρόνο. Αυτές οι ανωμαλίες είναι χρήσιμες για τους ερευνητές πετρελαίου.

Το μαγνητικό πεδίο μετριέται σε Oersteds (Oe) και στον Ισημερινό είναι 0,3 Oe, ενώ στους πόλους 0,6Oe. Στις γεωφυσικές αναλύσεις, οι ανωμαλίες μετρούνται με μονάδες gamma ίσο με νανοτέσλα (nT) στο σύστημα SI, όπου $1 \text{ gamma} = 0,000001 \text{ Oe}$. Ο μαγνητισμός στα πετρώματα χωρίζεται σε δυο μέρη, επαγόμενο και παραμένον. Το επαγόμενο είναι ανάλογο με το μαγνητικό πεδίο της Γης και αυτή η αναλογική σταθερότητα καλείται magnetic susceptibility. Επιπλέον, ένα συνολικό διάνυσμα χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη μαγνήτιση ενός πετρώματος, σε συνθήκες παραμένον και επαγόμενου μαγνητισμού. Η magnetic susceptibility μετράει το βαθμό στον οποίο ένα στοιχείο ή ορυκτό μπορεί να μαγνητιστεί. Τα πετρώματα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, διαμαγνητικά (αλίτης, ανυδρίτης), παραμαγνητικά (αργιλικά), σιδηρομαγνητικά (μαγνητίτης, ιλμενίτης).

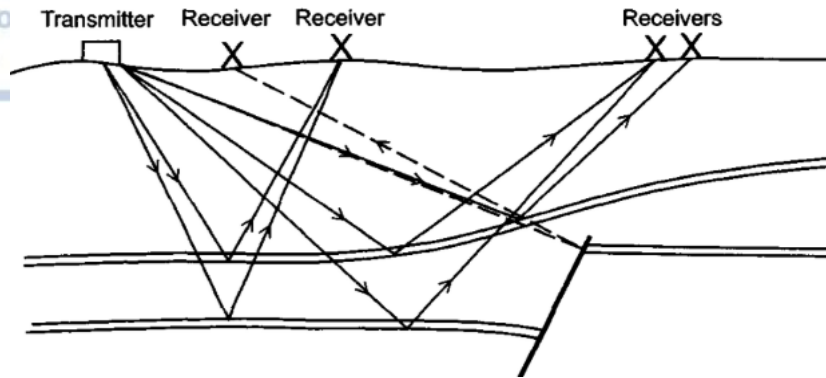
Η παραμένουσα μαγνήτιση υπάρχει εκεί όπου δεν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο. Είναι ανεξάρτητο από τα επαγωγικά φαινόμενα της Γης και σε αυτή στηρίζεται η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών.

Τα μαγνητικά δεδομένα μπορούν να συλλεχτούν είτε επί ξηράς, είτε εναέρια, είτε στη θάλασσα από πλοίο. Εφόσον συλλεχτούν πρέπει να γίνουν και οι κατάλληλες διορθώσεις, ώστε να αφαιρεθούν τα εξωτερικά, και κύρια μαγνητικά πεδία. (John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013)

5.4 Σεισμικά δεδομένα

Τα σεισμικά δεδομένα χρησιμοποιούνται για την εύρεση της δομής παγίδας. Η σεισμική εικόνα παράγεται από κύματα ενέργειας, τα οποία προκαλούνται από κάποιον ήχο και συλλέγονται σε κάποια απόσταση. Τυπικά παραδείγματα σεισμικών δεδομένων είναι τα εξής (βλ. Εικόνα 17):

- 2D κατά μήκος της λεκάνης, προκειμένου να ερμηνευτούν η δομή και η στρωματογραφία της
- 3D για την εκτίμηση των πιθανών αποθεμάτων και τον προσδιορισμό της θέσης μελλοντικών γεωτρήσεων.



Εικόνα 17. Αποτύπωση σεισμικών δεδομένων

Η acoustic contrast είναι συνδυασμός ταχύτητας και πυκνότητας και χαρακτηρίζεται από τη σταθερά ανάκλασης, R

$$R = \frac{v_2 \rho_2 - v_1 \rho_1}{v_1 \rho_1 + v_2 \rho_2}$$

Όπου,

R , η σταθερά ανάκλασης,

v , η ταχύτητα,

ρ , η πυκνότητα,

''1'', ''2'', ο ανώτερος και κατώτερος σχηματισμός αντίστοιχα.

Η πρωτογενής μετανάστευση οφείλεται στη μετακίνηση των υδρογονανθράκων από το μητρικό πέτρωμα προς το πέτρωμα ταμιευτήρα, εξαιτίας της διαφοράς πίεσης.

Η διάχυση και η μεταγωγή είναι ικανές να μετακινήσουν μόνο μικρές ποσότητες υδρογονανθράκων, συνεπώς αποτελεί εξαίρεση στον κανόνα, όπως συμβαίνει με τη περίπτωση του Μεθανίου, το οποίο μπορεί να μετακινηθεί προς την επιφάνεια της Γης, εξαιτίας της μεγάλης διαλυτότητας του.

Η ωρίμανση και κατά επέκταση, η παραγωγή πετρελαίου αυξάνεται με τη θερμοκρασία και το βάθος.

Η κινητήρια δύναμη της δευτερογενούς μετανάστευσης είναι η διαφορά πυκνότητας μεταξύ πετρελαίου και νερού (άνωση).

Παράγοντες που ευνοούν την μετανάστευση: άνωση, θερμοκρασία και πίεση, χημικό δυναμικό, τριχοειδής διαποτισμός, συμπίεση ιζημάτων, αύξηση του όγκου κατά τη διαδικασία της ωρίμανσης.

Παράγοντες που αντιτίθενται στην μετανάστευση: πορώδες, μοριακό μέγεθος υδρογονανθράκων, τριχοειδείς πιέσεις, διαπερατότητα, πίεση πόρων.

Η εκτίμηση της περιοχής αποστράγγισης γίνεται βασισμένη στους χάρτες μετανάστευσης και περιλαμβάνει δεδομένα ωρίμανσης και παραγωγής υδρογονανθράκων.

Τόσο η αποδοτικότητα εξαγωγής του πετρελαίου όσο και του αερίου, τείνουν να αυξηθούν όσο αυξάνεται η κατά βάρος συγκέντρωση του οργανικού υλικού στο μητρικό πέτρωμα.

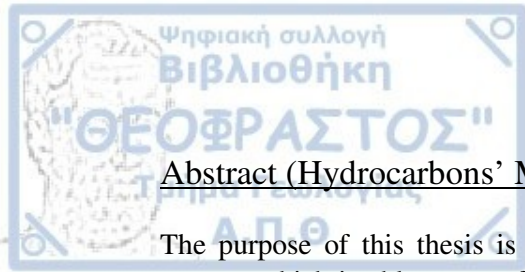


Περίληψη

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας όσον αφορά τη μετανάστευση των υδρογονανθράκων, μια διαδικασία, η οποία είναι υπεύθυνη για τη μετακίνηση των μορίων των υδρογονανθράκων από το μητρικό πέτρωμα στο πέτρωμα ταμιευτήρα. Η μετανάστευση διακρίνεται σε πρωτογενής, δευτερογενής και τριτογενής, για τις οποίες τεκμηριώνονται διάφορες απόψεις. Ο ρυθμός αυτής υπολογίζεται με μαθηματικούς τύπους και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η άνωση, η θερμοκρασία και η πίεση, η συμπίεση ιζημάτων, το χημικό δυναμικό, τριχοειδείς πιέσεις, διαποτισμός, πίεση πόρων. Τέλος, παρατίθενται μερικές μέθοδοι έρευνας υδρογονανθράκων, όπως η τηλεπισκόπηση, βαρομετρική ανάλυση, μαγνητικά και σεισμικά δεδομένα.

Λέξεις κλειδιά

Πρωτογενής, δευτερογενής, τριτογενής μετανάστευση τριχοειδείς πιέσεις, άνωση, μητρικό πέτρωμα, πέτρωμα ταμιευτήρας, PGI, HI, PEE.

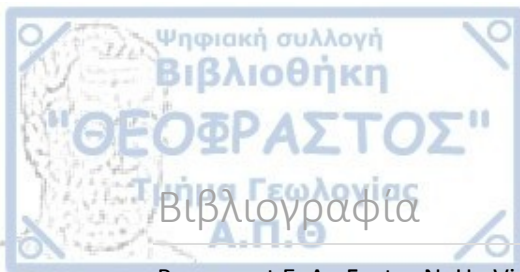


Abstract (Hydrocarbons' Migration, Zyganitidou Anastasia)

The purpose of this thesis is to review the literature regarding Hydrocarbon Migration, a process which is able to transfer the hydrocarbon's molecules from source rock to reservoir. Migration is divided in primary, secondary and tertiary. The rate is calculated by mathematics and depends on factors, such as buoyancy, temperature and pressure, sediment compaction, capillary pressure, suffusion, pore pressure. In the end, are examined the tools, which are important for exploration and exploitation, such as satellite images, gravimetric, magnetic and seismic data.

Key Words

Primary, secondary, tertiary, capillary pressure, buoyancy, source rock, reservoir, rate, PGI, HI, PEE.



Beaumont E. A., Foster N. H., Vincelette R. R., Downey M. W., Robertson J. D., 1999, *Exploring for Oil and Gas Traps Treatise Petroleum Geology*.

W. A. England and A. J. Fleet, 1 January 1991, Geological Society, London, Special Publications.

October 2010, *petrol_hydrodynamics*.

John Gluyas and Richard Swarbrick, 2013, *Petroleum Geoscience*.

Ανδρέας Γεωργακόπουλος, *Κοιτασματολογία Πετρελαίου*, Θεσσαλονίκη.

Τσιραμπίδης, Ανανίας. *Ιζηματογενή Πετρώματα*. Θεσσαλονίκη: Γιαχούδη, 2008.

MT Halbouty, JD Moody - 10th World Petroleum Congress, 1979

W. A. ENGLAND, A. S. MACKENZIE, D. M. MANN & T. M. QUIGLEY, Geochemistry Branch, BP Research Centre, Sunbury on Thames, Middlesex TW16 7LN, UK, Journal of the Geological Society, London, Vol. 144, 1987, Printed in Northern Ireland



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1. Λεκάνη που φέρει πετρέλαιο.....	12
Εικόνα 2. Τύποι κηρογόνου.....	14
Εικόνα 3. Τύποι παγίδων που σχετίζονται με το δόμο άλατος.....	15
Εικόνα 4. Molecular solutions (oil water dissolved).....	18
Εικόνα 5. Σχέση απόστασης και χρόνου διάχυσης.....	19
Εικόνα 6. Vertical oil Migration κατά Berg.....	20
Εικόνα 7. Διαπερατότητα – πορώδες.....	21
Εικόνα 8. Buoyancy driven flow.....	22
Εικόνα 9. The hydrodynamic displacement of oil and gas accumulations through aquifer flow.....	23
Εικόνα 10. Tertiary Migration.....	24
Εικόνα 11. Σχέση θερμοκρασίας πίεσης	27
Εικόνα 12. Διάχυση του αέρα στο νερό.....	27
Εικόνα 13. Drainage map.....	35
Εικόνα 14. Αποδοτικότητα εξαγωγής, μετανάστευσης και παγίδευσης.....	36
Εικόνα 15. Διαδικασία εκτίμησης αποδοτικότητας εξαγωγής.....	37
Εικόνα 16. Δορυφορική εικόνα από το όρος Ζάκρος, Ιράν.....	39
Εικόνα 17. Αποτύπωση σεισμικών δεδομένων.....	42

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

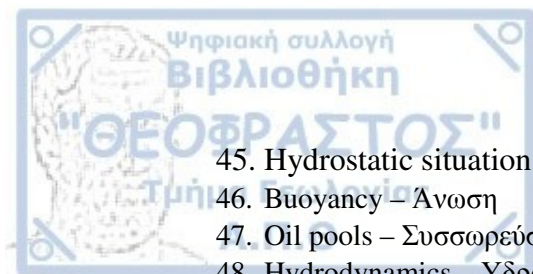
Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1. Στοιχειακή ανάλυση πετρελαίων.....	11
Πίνακας 2. Λίστες των μηχανισμών και των ρυθμών τους.....	32
Πίνακας 3. Παράδειγμα υπολογισμού όγκου.....	35
Πίνακας 4. Πυκνότητα πετρωμάτων.....	40



Αγγλικοί – Ελληνικοί όροι

1. Petroleum System – Πετρελαϊκό Σύστημα
2. Density – Πυκνότητα
3. Light oil – Ελαφρύ
4. Heavy oil – Βαρύ
5. Sweet – Γλυκό
6. Sour – Ξινό
7. 7 Basic Elements – 7 βασικά στοιχεία
8. Source Rock – Μητρικό πέτρωμα
9. Thermal Maturation – Θερμική ωρίμανση
10. Mud shales-shales – Σχίστες
11. Reservoir – Ταμιευτήρας
12. Porosity – Πορώδες
13. Permeability – Διαπερατότητα
14. Seal or Cap Rock – Πέτρωμα κάλυμμα
15. Trap – Δομή παγίδας
16. Structural Trap – Τεκτονική παγίδα
17. Stratigraphic Trap – Στρωματογραφική παγίδα
18. Combination Trap – Συνδυασμός τύπων παγίδων
19. Maturation – Ωρίμανση
20. Biogenic Gas – Βιογενές αέριο
21. Constant – Σταθερά
22. Activation Energy – Ενέργεια ενεργοποίησης
23. Migration – Μετανάστευση
24. Timing – Χρόνος
25. Primary – Πρωτογενής
26. Secondary – Δευτερογενής
27. Tertiary – Τριτογενής
28. Diffusion – Διάχυση
29. Convection – Μεταγωγή
30. Kerogen – Κηρογόνο
31. Pressure differential – Διαφορική πίεση
32. Water-wet rock matrix – Διαβρεγματικό υλικό πλήρωσης
33. Natural soap – Φυσικό σαπούνι
34. Pore throat size – Μέγεθος πόρων
35. Solubility – Διαλυτότητα
36. Subsurface – Υπόστρωμα
37. Exsolution – the process in which a solution of molten rock separate into its constituents upon cooling
38. Bubbles, globules – Σφαιρίδια
39. Separate – Ξεχωριστή φάση
40. Hydrogen index – Δείκτης υδρογόνου
41. Petroleum generation index – Δείκτης παραγωγής πετρελαίου
42. Petroleum expulsion efficiency – Βαθμός απόδοσης εκδίωξης των υδρογονανθράκων
43. Disruption – Διάρρηξη
44. Over filling – Υπερπλήρωση



- 45. Hydrostatic situation – Υδροστατική πίεση
- 46. Buoyancy – Άνωση
- 47. Oil pools – Συσσωρεύσεις πετρελαίου
- 48. Hydrodynamics – Υδροδυναμική
- 49. Capillary injection pressure – Τριχοειδείς πιέσεις
- 50. Wettability – Διαβρεξιμότητα
- 51. Interfacial pressure – Διεπιφανειακή πίεση
- 52. Displacement pressure – Πίεση αντικατάστασης
- 53. Mudstone – Πηλόλιθος
- 54. Carrier system – Σύστημα μεταφοράς
- 55. Foreland – in plate tectonics, the zone adjacent to a mountain chain where material eroded from it is deposited
- 56. Thermal expansion – Θερμική διαστολή
- 57. Steric effect – Φυσικοί περιορισμοί
- 58. Immiscible – Άμικτα
- 59. Nonwetting phase – μη υδατική φάση
- 60. Drainage areas – Περιοχές αποστράγγισης
- 61. Salt pillow – δόμοι άλατος
- 62. Magnetic susceptibility – Μαγνητική επιδεκτικότητα