



**ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ
(RESERVOIR GEOLOGY)**



**ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΗΛΙΑΣ
ΑΕΜ:5242**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Α. ΓΕΩΡΓΑΚΟΠΟΥΛΟΣ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ ΜΑΡΤΙΟΣ 2018**

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
-----------------------	----------

1.ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ.....	5
------------------------------	----------

1.ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	5
----------------------------------	----------

1.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ.....	6
--	----------

1.2 ΩΡΙΜΑΝΣΗ (MATURATION).....	8
---------------------------------------	----------

1.2.1 ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ.....	9
----------------------	---

1.2.2 ΚΑΤΑΓΕΝΕΣΗ.....	11
-----------------------	----

1.2.3 ΜΕΤΑΓΕΝΕΣΗ.....	12
-----------------------	----

1.3 ΜΗΤΡΙΚΟ ΠΕΤΡΩΜΑ.....	13
---------------------------------	-----------

1.4 ΚΑΛΥΜΜΑ (SEAL).....	17
--------------------------------	-----------

1.5 ΠΑΓΙΔΑ (TRAP).....	20
-------------------------------	-----------

1.6 ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗ (MIGRATION).....	23
--	-----------

1.7 ΠΟΡΩΔΕΣ (POROSITY).....	25
------------------------------------	-----------

1.8 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ (PERMEABILITY).....	26
--	-----------

1.9 ΚΟΡΕΣΜΟΣ (SATURATION).....	28
---------------------------------------	-----------

2.ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ.....	29
--------------------------------	-----------

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	29
--------------------------	-----------

2.2 ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ (CARBONATE).....	30
--	-----------

2.3 ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ.....	30
---	-----------

2.3.1 ΠΡΩΤΟΓΕΝΕΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	31
----------------------------------	----

2.3.1.1 ΥΦΗ.....	32
------------------	----

2.3.1.2 ΙΣΤΟΣ.....	32
--------------------	----

2.3.1.3 ΣΥΝΘΕΣΗ.....	33
----------------------	----

2.3.1.4 ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ.....	35
-------------------------------------	----

2.3.2 ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	36
-------------------------------------	----

2.3.2.1 ΠΟΡΩΔΕΣ (POROSITY).....	36
---------------------------------	----

2.3.2.2 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ (PERMEABILITY).....	37
---	----

2.4 ΑΠΟΘΕΤΙΚΟΙ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ.....	37
---	-----------

2.4.1 ΠΟΡΩΔΕΣ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗΣ (ΑΠΟΘΕΣΗΣ).....	38
--	----

2.4.2 ΑΠΟΘΕΤΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΚΑΙ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ.....	40
--	----

2.4.2.1 ΠΑΡΑΛΙΑΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	41
-----------------------------------	----

2.4.2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΛΙΑΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.....	43
--	----

2.4.2.3 ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΚΟ ΠΕΔΙΟ ΚΑΙ ΛΙΜΝΟΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ.....	45
---	----

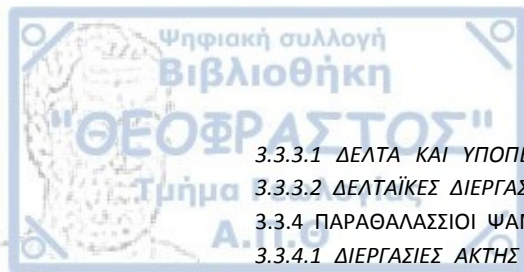
2.4.2.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ -ΛΙΜΝΟΘΑΛΑΣΣΩΝ.....	47
--	----

2.4.2.5 ΝΗΡΙΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	48
----------------------------------	----

2.4.2.6 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΝΗΡΙΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	50
--	----



2.4.2.7 ΠΕΡΙΘΩΡΙΟ ΑΝΘΡΑΚΙΚΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ (SLOPE BREAK).....	51
2.4.2.8 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΑΝΘΡΑΚΙΚΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ.....	52
2.4.2.9 ΥΦΑΛΟΠΡΑΝΕΣ (SLOPE) ΚΑΙ ΟΡΙΟ ΒΑΘΙΑΣ ΥΦΑΛΟΚΡΗΠΙΔΑΣ (TOE OF SLOPE).....	53
2.4.2.10 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΥΦΑΛΟΠΡΑΝΟΥΣ ΚΑΙ ΟΡΙΟΥ ΒΑΘΙΑΣ ΥΦΑΛΟΚΡΗΠΙΔΑΣ	54
2.4.2.11 ΩΚΕΑΝΙΑ ΛΕΚΑΝΗ.....	56
2.4.2.12 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΩΚΕΑΝΙΑΣ ΛΕΚΑΝΗΣ.....	57
2.5 ΔΙΑΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ.....	59
2.5.1 ΠΟΡΩΔΕΣ ΔΙΑΓΕΝΕΣΗΣ.....	61
2.5.2 ΔΙΑΓΕΝΕΤΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ.....	62
2.5.3 ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ.....	65
2.5.4 ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ ΚΑΙ ΜΕΙΩΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ.....	68
2.5.5 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ.....	71
2.6 ΔΙΑΡΡΗΓΜΕΝΟΙ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ.....	72
2.6.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ.....	73
2.6.2 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ.....	74
2.6.3 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ.....	77
2.6.4 ΠΟΡΩΔΕΣ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ.....	78
2.6.5 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΙΑΡΡΗΓΜΕΝΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ.....	79
2.6.6 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΔΙΑΡΡΗΓΜΕΝΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΕΜΜΟΝΗΣ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ.....	82
3.ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ.....	84
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	84
3.2 ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΨΑΜΜΙΤΩΝ.....	84
3.2.1 ΠΡΩΤΟΓΕΝΕΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	86
3.2.1.1 ΣΥΝΘΕΣΗ.....	86
3.2.1.2 ΥΦΗ (TEXTURE).....	89
3.2.1.3 ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ.....	91
3.2.1.4 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ.....	92
3.2.2 ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	94
3.2.2.1 ΠΟΡΩΔΕΣ	94
3.2.2.2 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ.....	96
3.2.2.3 ΚΟΡΕΣΜΟΣ	98
3.3 ΑΠΟΘΕΤΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΨΑΜΜΙΤΗ.....	99
3.3.1 ΑΙΟΛΙΚΟΙ ΨΑΜΜΙΤΕΣ (EOLIAN).....	99
3.3.1.1 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΑΝΕΜΟΥ.....	100
3.3.1.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΘΙΝΩΝ.....	101
3.3.1.3 ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΑΜΜΟΥ.....	103
3.3.1.4 ΠΟΡΩΔΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΑΜΜΩΝ.....	104
3.3.2 ΠΟΤΑΜΙΟΙ ΨΑΜΜΙΤΕΣ (FLUVIAL).....	105
3.3.2.1 ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΑ ΡΙΠΙΔΙΑ.....	105
3.3.2.2 ΑΠΟΘΕΤΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΕ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΑ ΡΙΠΙΔΙΑ.....	106
3.3.2.3 ΙΖΗΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΩΝ ΡΙΠΙΔΙΩΝ.....	107
3.3.2.4 ΠΛΕΞΟΕΙΔΕΙΣ ΠΟΤΑΜΟΙ (BRAIDED STREAMS).....	108
3.3.2.5 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΕ ΠΛΕΞΟΕΙΔΕΙΣ ΠΟΤΑΜΟΥΣ.....	109
3.3.2.6 ΜΑΙΑΝΔΡΙΖΟΝΤΕΣ ΠΟΤΑΜΟΙ.....	111
3.3.2.7 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ ΜΑΙΑΝΔΡΩΝ.....	112
3.3.3 ΔΕΛΤΑΪΚΟΙ ΨΑΜΜΙΤΕΣ.....	113



3.3.3.1 ΔΕΛΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ.....	114
3.3.3.2 ΔΕΛΤΑΪΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ.....	116
3.3.4 ΠΑΡΑΘΑΛΑΣΣΙΟΙ ΨΑΜΜΙΤΕΣ (COASTAL).....	118
3.3.4.1 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΚΤΗΣ ΚΑΙ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗ.....	118
3.3.5 ΨΑΜΜΙΤΕΣ ΥΦΑΛΟΚΡΗΠΙΔΑΣ.....	122
3.3.5.1 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΦΑΛΟΚΡΗΠΙΔΑΣ ΚΑΙ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗ.....	122
3.3.6 ΨΑΜΜΙΤΕΣ ΒΑΘΙΑΣ ΛΕΚΑΝΗΣ.....	125
3.3.6.1 ΤΟΥΡΒΙΔΙΤΙΚΗ ΡΟΗ ΒΑΘΙΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ.....	126
3.3.6.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΡΙΠΙΔΙΟΥ.....	127
3.3.6.3 ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗ ΨΑΜΜΙΤΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΛΕΚΑΝΗΣ.....	128
3.4 ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ ΨΑΜΜΙΤΩΝ (ΕΙΣΑΓΩΓΗ).....	134
3.4.1 ΠΡΩΪΜΗ ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ.....	134
3.4.2 ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΒΙΟΓΕΝΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ.....	135
3.4.3. ΜΕΤΑΓΕΝΕΣΤΕΡΗ ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ (ΕΩΣ 2 ΚΜ, 8-100 °C).....	137
3.4.4 ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ ΣΕ ΒΑΘΟΣ 2-3,5 ΚΜ (80-150°C).....	138
3.4.5 ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ ΣΕ ΒΑΘΟΣ ΑΝΩ ΤΩΝ 3,5 ΚΜ (T>120°C).....	139
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	141
5. SUBSTRACT.....	143
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	145

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τους Ταμιευτήρες, ή όπως ονομάζονται στα Αγγλικά Reservoirs. Το πρώτο κεφάλαιο εστιάζει σε θεμελιώδεις, βασικές έννοιες της Γεωλογίας Πετρελαίου και τις πετροφυσικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν κάθε Πετρελαϊκό Σύστημα. Το δεύτερο κεφάλαιο αναλύει τους ανθρακικούς Ταμιευτήρες, ενώ το τρίτο αναφέρεται στους Ψαμμιτικούς ταμιευτήρες, καθώς επίσης και στις κύριες μεταξύ τους διαφορές

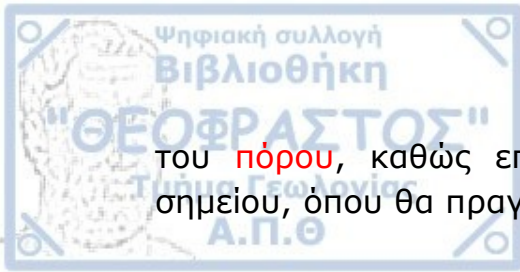
Η καταννόηση των βασικών εννοιών και της Γεωλογίας των αποθηκευτικών συστημάτων καθίσταται αναγκαία για κάθε επιστήμονα που επιθυμεί να ασχοληθεί με τον τομέα της Πετρελαϊκής Γεωλογίας. Είναι απαραίτητο να γνωρίζει το πως και που σχηματίζονται και να είναι σε θέση να συνδιάσει γνώσεις, οι οποίες προέρχονται από κλάδους, όπως η Στρωματογραφία, η Τεκτονική Γεωλογία, η Ιζηματολογία και η Γεωχημεία.

Οι δυο κατηγορίες Ταμιευτήρων που απαντώνται στη φύση είναι οι Κλαστικοί και οι Ανθρακικοί. Τα σώματα αυτά χαρακτηρίζονται από το πορώδες και την περατότητα τους, ιδιότητες που διαμορφώνονται κατά το σχηματισμό τους. Οι διαφορετικές φυσικές και χημικές διεργασίες που επενεργούν στα συστήματα αυτά, τα τροποποιούν και απαιτείται διαφορετική προσέγγιση για τα δύο αυτά σενάρια.

Η εξέταση του συστήματος, ανάλογα με τη μέθοδο, προσφέρει όγκο δεδομένων και πληροφοριών που οφείλει ο Γεωλόγος να αξιοποιήσει κατάλληλα, ώστε να μπορέσει να συσχετίσει το σενάριο που μελετά με κάποιο Γεωλογικό Μοντέλο.

Πρωταρχικός και κύριος στόχος ενός επιστήμονα-μελετητή αποτελεί η παραγωγική διαχείριση του Ταμιευτήρα. Προκειμένου να επιτυγχαστεί αυτό κρίνεται αναγκαίο να οπτικοποιήσει το σύστημα (συνήθως σε 3 διαστάσεις), κάτι που αποτελεί πολύτιμο εργαλείο για την εύρεση λύσεων και τη λήψη σημαντικών αποφάσεων.

Το κατασκευασμένο μοντέλο επιτρέπει τον καθορισμό της ανάπτυξης του συστήματος στο χώρο και την εκτίμηση του όγκου



του **πόρου**, καθώς επίσης και την επιλογή του πιο κατάλληλου σημείου, όπου θα πραγματοποιηθεί η γεώτρηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

1. ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Ο όρος Πετρελαϊκό σύστημα αποτελεί μία έννοια που ενοποιεί και περιλαμβάνει όλες τις διεργασίες και τα στοιχεία, τα οποία χαρακτηρίζουν και περιγράφουν τη Γεωλογία Πετρελαίου.

Τα σημαντικά στοιχεία από τα οποία απαρτίζεται ένα Σύστημα είναι επτά και πιο συγκεκριμένα είναι το **μητρικό πέτρωμα** (source), ο **ταμιευτήρας** (reservoir, που αποτελεί κεντρικό θέμα της εργασίας και θα αναλυθεί εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο), το **κάλυμμα-μονωτής** (seal) η **παγίδα** (trap), το **timing**, η **μετατροπή πετρελαίου** (maturation) και η **μετανάστευση** (migration). (Jon Gluyas και Swartbrick, 2004)

Το **μητρικό πέτρωμα** είναι το σώμα, το οποίο είναι πλούσιο σε οργανική ύλη και κατά τη βαθιά ταφή του μετατρέπεται το υλικό σε υδρογονάνθρακες. Οι υδρογονάνθρακες έπειτα από το σχηματισμό τους, **μεταναστεύουν** μέσω διακλάσεων και ρηγμάτων και αποθηκεύονται στον ταμιευτήρα, ο οποίος μονώνεται με το **κάλυμμα** και με τον τρόπο αυτό η συγκέντρωση αποθηκεύεται στη μονάδα.

Η **παγίδα** είναι υπεύθυνη για την τοπική συγκέντρωση του κοιτάσματος και απαγορεύει την μετανάστευση του προς την επιφάνεια του εδάφους. Τέλος, το **timing** απαιτεί οι διεργασίες που συμμετέχουν στο σχηματισμό και την αποθήκευση του πετρελαίου να πραγματοποιηθούν με καθορισμένη σειρά.

1.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

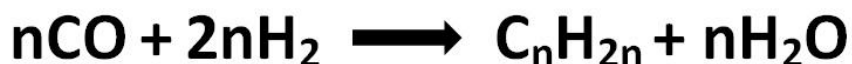
Α.Π.Θ. Πρώτου αναφερθεί οποιαδήποτε έννοια, σχετική με τα πετρελαϊκά συστήματα και τις ιδιότητες τους, είναι απαραίτητο να γνωρίζει κάποιος το πως σχηματίζονται οι υδρογονάνθρακες και τους μηχανισμούς που επενεργούν στο έργο αυτό.

Η αρχική άποψη που επικρατούσε το 19^ο αι. υποστήριζε πως το πετρέλαιο δεν συνδέεται με τη βιόσφαιρα. Υποστηρικτής της αντίθετης άποψης ήταν ο Mendeleev, ο οποίος ισχυρίστηκε ότι τα καρβίδια, μία ανόργανη μορφή του άνθρακα, δημιουργήσαν το πετρέλαιο. Αυτά σχηματίστηκαν στο εσωτερικό της Γης, σε μεγάλο βάθος και η αντίδραση τους με υδροθερμικά διαλύματα οδήγησε στη παραγωγή των υδρογονανθράκων.



Εικόνα 1.1α Αντιδράσεις δημιουργίας Ακετυλενίου (σύμφωνα με το Mendeleev)

Η θεωρία του Mendeleev αναφέρεται σε ανόργανη προέλευση των υδρογονανθράκων και στην επιστημονική κοινότητα υπήρξαν υποστηρικτές της άποψης αυτής. Οι Fischer & Tropsch απέδειξαν πως υδρογονάνθρακες σχηματίζονται κατά την αντίδραση του υδρογόνου με το Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO), στη θερμοκρασία των 150-300°C, παρουσία καταλύτη.



Εικόνα 1.1β Αντιδράση Fischer & Tropsch

Επόμενη σημαντική θεωρία αποτελεί αυτή του Robinson, ο οποίος το 1963 προτείνει ότι το πετρέλαιο αποτελεί μείγμα συστατικών, βιολογικής και αβιοτικής προέλευσης. Τα αβιοτικά σχηματίστηκαν από τα καρβίδια και αποτέλεσαν τροφή για οργανισμούς, οι οποίοι εξελίχθηκαν και συνέβαλαν στην παραγωγή των υδρογονανθράκων.

Είκοσι περίπου χρόνια αργότερα, αναπτύσσεται μία θεωρία από τον Thomas Gold, σύμφωνα με την οποία το φυσικό αέριο προέρχεται από το μεθάνιο. Το μεθάνιο υποστηρίζει πως εγκλωβίστηκε στο μανδύα της Γης, κατά τη δημιουργία της, απελευθερώνεται βαθμιαία και συγκεντρώνεται σε ζώνη του φλοιού. Με τον πολυμερισμό του μεθανίου, προσθέτει, σχηματίζεται το πετρέλαιο και ο άνθρακας.

Με την πάροδο των χρόνων παρατηρούμε πως οι απόψεις μεταβάλλονται, ενώ τα εργαλεία και οι μέθοδοι της εποχής επιτρέπουν να προχωρήσουμε ένα βήμα παραπάνω. Η αποδεκτή σήμερα θεωρία αναγνωρίζει το πετρέλαιο και τους υδρογονάνθρακες ως προϊόντα οργανικής προέλευσης. Η άνιση κατανομή του στο παγκόσμιο φλοιό και η παρουσία του αποκλειστικά σε ιζηματογενή πετρώματα αποδεικνύει ότι δεν προέρχεται από υλικά του μανδύα.

Πρωταρχικός παραγωγός του οργανικού άνθρακα, βιολογικής προέλευσης συνιστά το φυτοπλαγκτόν (θαλάσσιο, φωτοσυνθετικό φύκος), ενώ σημαντική είναι η συνεισφορά και χερσαίων φυκών. Ζώνες μέγιστης παραγωγικότητας είναι τα μέσα-ισημερινά γεωγραφικά πλάτη και τα επιφανειακά νερά, κάτι που δηλώνει πως η παραγωγικότητα συνδέεται άρρηκτα με το προσφερόμενο ηλιακό φως. Στη χέρσο το κλίμα ελέγχει την παραγωγή οργανικού άνθρακα, ενώ αξίζει να σημειωθεί πως η διαθεσιμη τροφή σε χερσαία και θαλάσσια φυτά αποτελεί, επίσης, σημαντικό ρυθμιστικό στοιχείο.

Τα ζωντανά οργανικά υλικά αποτελούνται από τέσσερις κύριες ομάδες χημικών συνθετικών :

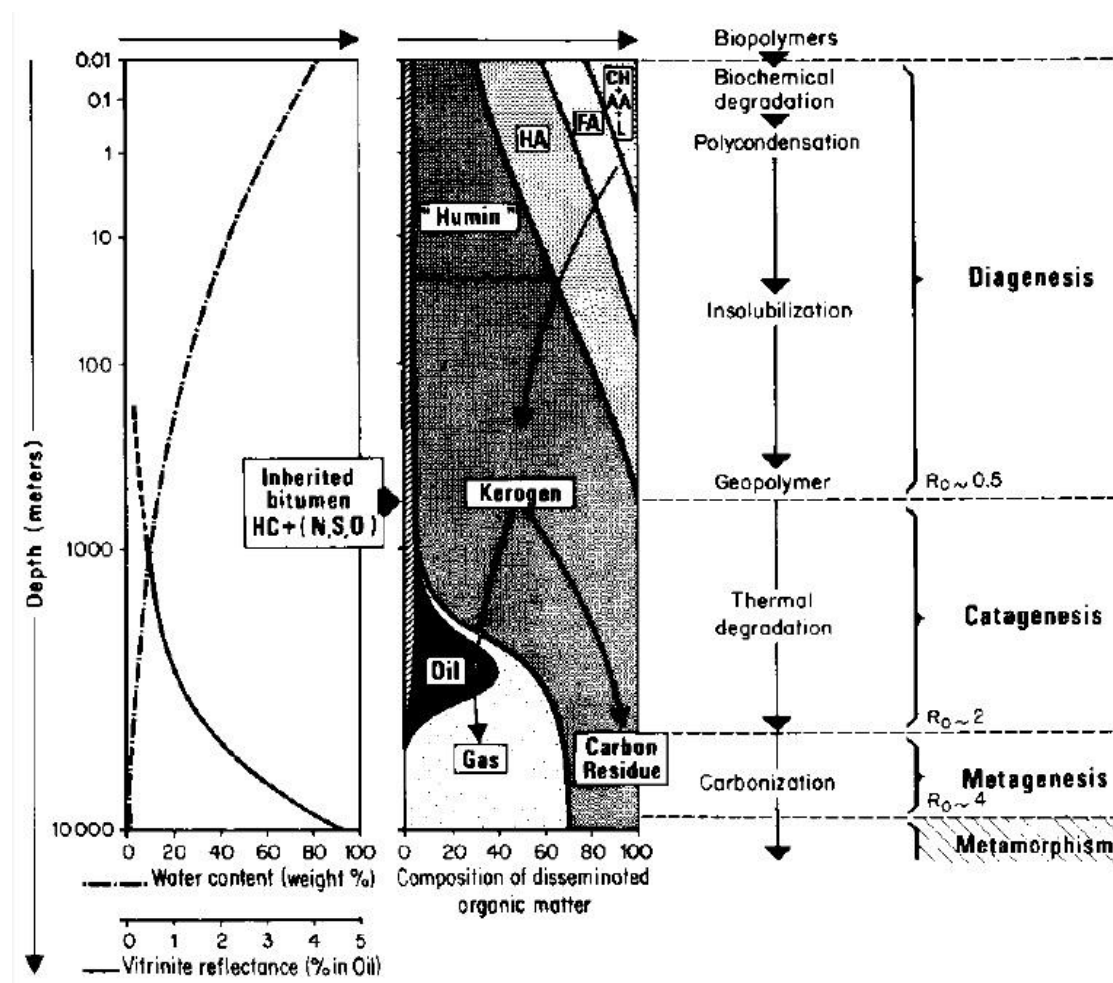
- Υδατάνθρακες (carbohydrates)
- Πρωτεΐνες (proteins)
- Λιπίδια (lipids)
- Ξυλίτες (lignin)

Τα λιπίδια και οι Ξυλίτες συνιστούν τις πιο ανθεκτικές μορφές, ικανές να διατηρηθούν και να ενσωματωθούν στο ίζημα και να ταφούν με επιτυχία. Τα Λιπίδια συναντώνται σε θαλάσσιους

οργανισμούς και σε τμήματα χερσαίων και το χημικό δυναμικό τους, σε συνδιασμό με την ποσότητα στην οποία απαντώνται, τα καθιστά ικανά να οδηγήσουν στο σχηματισμό του παγκόσμιου, πετρελαιοκού όγκου. Ο Ξυλίτης είναι παρών αποκλειστικά σε χερσαία φυτά και συνιστά σημαντική πηγή για αέριους υδρογονάνθρακες.

1.2 ΩΡΙΜΑΝΣΗ (MATURATION)

Οι υδρογονάνθρακες αποτελούν μία συγκέντρωση οργανικής ύλης, η οποία έπειτα από τη ταφή των νεκρών οργανισμών, έχει μετασχηματιστεί. Μόρια που συναντώνται στους υδρογονάνθρακες



Εικόνα 1.2α Μετασχηματισμός οργανικής ύλης, σε συνάρτηση με T και βάθος (B.P. Tissot & D.H. Welte Petroleum formation and occurrence)

δεν συναντώνται στους έμβιους οργανισμούς ή σε πρόσφατα ιζήματα, γεγονός που υποδεικνύει πως απαιτούνται διεργασίες, οι οποίες

διαφοροποιούν το οργανικό υλικό και του προσδίδουν τη τελική μορφή και δομή του. Οι διεργασίες αυτές είναι η διαγένεση, η καταγένεση και η μεταγένεση.

Η περιγραφή των διεργασιών βασίζεται στους B.P.Tissot και D.H.Welte (1984).

1.2.1 ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ

Το πρώτο στάδιο της μη αντιστρεπτής μεταβολής των οργανικών υπολειμάτων ονομάζεται **Διαγένεση**. Η μικροβιακή δράση είναι σημαντικό χαρακτηριστικό της φάσης αυτής, καθώς μετασχηματίζει την οργανική ύλη φυσικά, χημικά και βιολογικά.

Τα ιζήματα που έχουν αποτεθεί περιέχουν νερό, διάφορα ορυκτά, νεκρό οργανικό υλικό (αλλόχθονο/αυτόχθονο και επεξεργασμένο) και πληθώρα ζωντανών μικροοργανισμών. Ένα τέτοιο σύστημα περιλαμβάνει διαφορετικές μεταξύ τους φάσεις, οι οποίες συνυπάρχουν και το καθιστούν ασταθές.

Η **διαγένεση** επιτυγχάνει σε συνθήκες ταφής χαμηλού βάθους να προσεγγίσει μια πιο σταθερή κατάσταση, ενώ ταυτόχρονα συμπαγοποιεί τις χαλαρές, ασύνδετες αποθέσεις.

Η διεργασία αυτή, το πρώτο στάδιο της ωρίμανσης, πραγματοποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες και το τέλος της τίθεται στους 50-60° C. Στο σημείο αυτό κάθε οργανική ύλη έχει υποστεί μόνιμη μετατροπή και συναντάται με τη μορφή κηρογόνου, βιτουμενίου και αέριων υδρογονανθράκων.

Η δυναμική του μητρικού πετρώματος, του σώματος δηλαδή το οποίο πρόκειται να προσφέρει την πρώτη ύλη για την παραγωγή του πετρελαίου, καθορίζεται από την ποσότητα και την ποιότητα της οργανικής ύλης, που διατηρείται. Παράγοντες, όπως η παρουσία του οξυγόνου στα ιζήματα και το νερό, επενεργούν στο σύστημα και επηρεάζουν την παραγωγικότητα του. Επίσης, επηρεάζεται και ο ρυθμός διατήρησης οργανικής ύλης και ιζηματογένεσης.

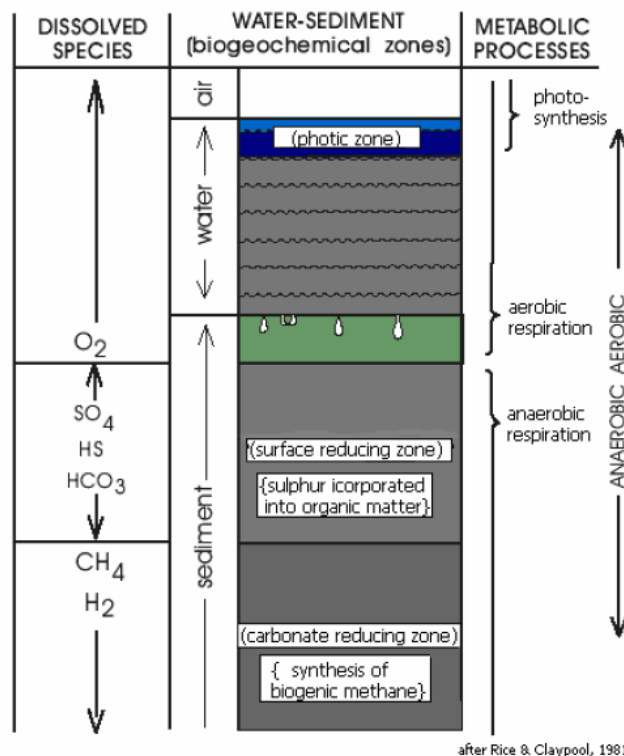
Κατά την αύξηση του βάθους ταφής συναντά κάποιος τρεις διαδοχικές ζώνες μικροβίων, στις οποίες παρατηρούνται γεωχημικές συνέπειες, λόγω της δράσης των οργανισμών αυτών. Πρώτη

συναντάται η αερόβια ζώνη, έπειτα η αναερόβια με αναγωγή θείου και τέλος η αναερόβια με αναγωγή άνθρακα.

Παρατηρεί κανείς πως η διατήρηση της οργανικής ύλης εξαρτάται από τις συνθήκες, που επικρατούν στο περιβάλλον απόθεσης, όχι από την ποσότητα που παράχθηκε από οργανισμούς. Η διάσπαση της οργανικής ύλης επιταχύνεται σε μικρότερα βάθη, τα οποία είναι πλούσια σε οξυγόνο και η κυκλοφορία του σε συνδιασμό με την υγρασία, ευνοούν την ανάπτυξη και δράση βακτηρίων.

Σε μεγαλύτερα βάθη, το οξυγόνο είναι περιορισμένο και η πρόσβαση των οργανισμών σε αυτό διαφέρει από τις πιο ρηχές περιοχές. Η διατηρημένη οργανική ύλη οξειδώνεται στη συνέχεια από αναερόβιους οργανισμούς, οι οποίοι δεν είναι όσο αποτελεσματικοί όσο οι αερόβιοι και η καταστροφή δεν είναι εκτεταμένη. Συνεπώς, σε υδάτινα περιβάλλοντα (υπό αναγωγικές συνθήκες), διατηρείται η οργανική ύλη και η κατανάλωση της είναι περιορισμένη.

Η έλλειψη των μετázων, πολυκυτταρικών αερόβιων οργανισμών, είναι εμφανής στον πυθμένα, καθώς και πολλών αερόβιων βακτηρίων. Οι οργανισμοί αυτοί απαιτούν σημαντική ποσότητα οξυγόνου στο περιβάλλον και αποδομούν την οργανική ύλη.



Εικόνα 1.2β Βιοχημικές ζώνες, σε σχέση με το βάθος (Lloyd R. Snowdon & Martin G. Fowler, Interpretation of organic geochemical data)

Αξιζει επίσης να σημειωθεί πως η δράση τους συνδέεται με αναμόχλευση του εδάφους και διαταραχή της εξασφαλισμένης ισορροπίας του οικοσυστήματος. Η διαταραχή αυτή εκθέτει την οργανική ύλη στο οξυγόνο, το οποίο έχει καταστρεπτική δράση και δεν επιτρέπει την διατήρηση της.

Προκύπτει, λοιπόν, πως απουσία μετάζων επιτρέπει την εξισορρόπηση του οικοσυστήματος, την διακοπή της αναμόχλευσης του εδάφους-πυθμένα και της αποδόμησης του ανθρακικού υλικού.

Η έλλειψη του οξυγόνου λειτουργεί ανασταλτικά και περιορίζει τη δράση πολλών βακτηρίων. Όταν επικρατούν αναερόβιες συνθήκες στο θαλάσσιο περιβάλλον, η αναγωγή του θειικού άλατος αποκτά ζωτική σημασία.

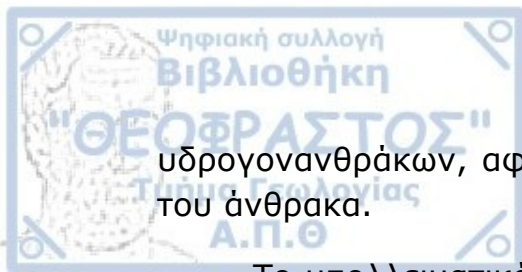
Το νερό είναι πλούσιο σε θειικό άλας και όταν εξαντληθεί, μεθανογονικά βακτήρια παράγουν μεθάνιο, με τη διαδικασία της ζύμωσης. Η αύξηση της δραστηριότητας και της παραγωγής μεθανίου, μειώνει το δυναμικό της ύλης για παραγωγή υδρογονανθράκων κατά την καταγένεση.

1.2.2 ΚΑΤΑΓΕΝΕΣΗ

Η διαρκής απόθεση ιζημάτων αυξάνει το βάρος των υπερκείμενων στρωμάτων και οδηγεί σε ταφή των υποκείμενων. Το βάθος ταφής είναι της τάξης χιλιομέτρων (μεγαλύτερο του 1km), ενώ η θερμοκρασία αυξάνεται, όπως και η πίεση. Η θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ των 50-150° C και η γεωστατική πίεση παίρνει τιμές από 300-1500 bars.

Οι μεταβολές αυτές, όπως είναι φυσικό, διαταράσσουν την ισορροπία του συστήματος και παρατηρούνται κάποιες διαφοροποιήσεις. Η θερμική διαδικασία προκαλεί διάσπαση των χημικών δεσμών, που υφίστανται έως το στάδιο αυτό, ενώ οι νέοι δεσμοί καθιστούν τις νέες μορφές ανθεκτικότερες θερμοδυναμικά. Η περατότητα και το πορώδες μειώνονται σημαντικά.

Η αναλογία Υδρογόνου-Άνθρακα (H/C) μειώνεται κατά το στάδιο αυτό, όπως και η ποσότητα οξυγόνου, η οποία παρουσιάζει σημαντική απώλεια. Η πτώση της αναλογίας μπορεί να εξηγηθεί από την αποσύνθεση του κηρογόνου και το σχηματισμό



υδρογονανθράκων, αφού προηγηθεί διάσπαση των χημικών δεσμών του άνθρακα.

Το υπολλειμματικό κηρογόνο γίνεται σταδιακά πιο αρωματικό, η περιεκτικότητα του βιτουμενίου αυξάνεται, όπως και το ποσοστό των υδρογονανθράκων σε σχέση με NSO ενώσεις. Οι ενώσεις αυτές περιλαμβάνουν ρητίνες, ασφαλτίνες (βιτουμίνες) και άλλα σύμπλοκα, τα οποία ανήκουν στις βιτουμίνες. Σε ρηχές βιτουμίνες το Οξυγόνο, το Νάτριο και το Θείο συναντώνται σε χαμηλότερο ποσοστό, σε σχέση με τις ρητίνες και τις ασφαλτίνες, ενώ η αύξηση του βάθους συνδέεται με μείωση των στοιχείων αυτών.

Τα τελευταία στάδια χαρακτηρίζονται από αύξηση ποσοστιαίας αναλογίας αερίου-πετρελαίου, καθώς οι προυπάρχοντες υδρογονάνθρακες διασπώνται και προκύπτουν μόρια, μικρότερα από το κηρογόνο. Με τον τρόπο αυτό, παράγονται το πετρέλαιο, τα συμψηκνώματα και το υγρό αέριο, με αυξημένη περιεκτικότητα σε μεθάνιο.

Η θερμοκρασία στην οποία παρατηρείται παραγωγή και εξαγωγή πετρελαίου από το μητρικό πέτρωμα ονομάζεται «Oil Window» και βρίσκεται μεταξύ των 60-120° C, σε βάθος περίπου 2-4km. Αντίστοιχα, το «Gas Window» συναντάται μεταξύ των 100-200° C, σε βάθος 3-6km.

Η αύξηση της θερμοκρασίας ευθύνεται για την διάσπαση των πρωταρχικών δεσμών του άνθρακα και τη μετατροπή του κηρογόνου σε υδρογονάνθρακα. Το μοριακό βάρος της πλειοψηφίας των υδρογονανθράκων αυτών είναι χαμηλό, ενώ δεν διαθέτουν χαρακτηριστική δομή. Η καταγένεση αναδιανέμει τα ποσοστά των στοιχείων του συστήματος, καθιστώντας το κηρογόνο φτωχότερο σε υδρογόνο, εμπλουτίζοντας παράλληλα τους υδρογονάνθρακες.

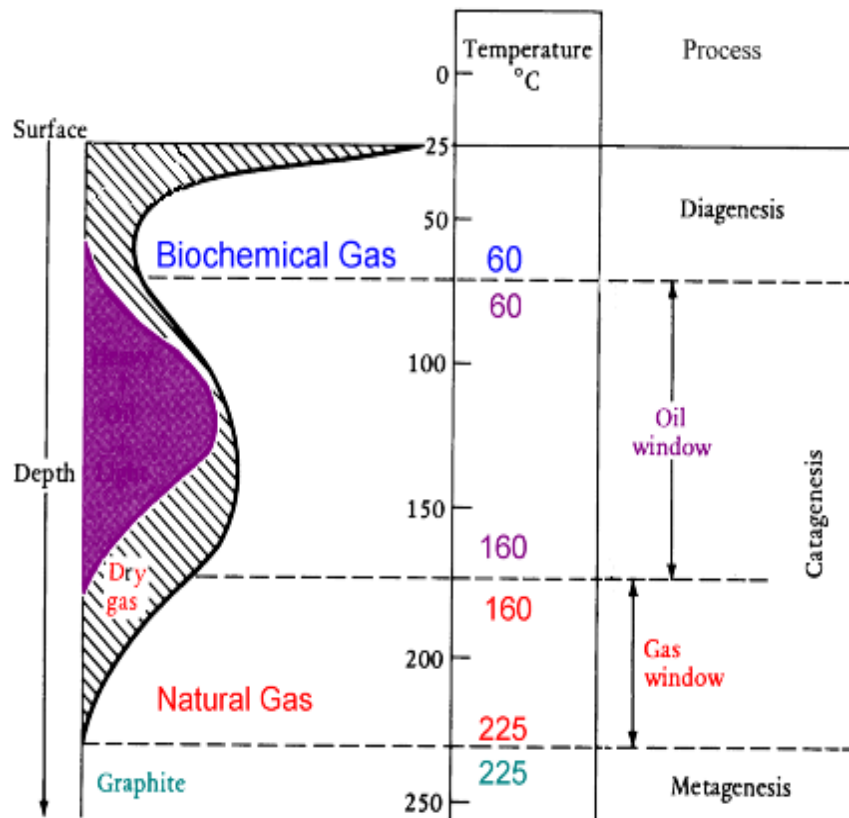
1.2.3 ΜΕΤΑΓΕΝΕΣΗ

Η μεταγένεση αποτελεί το τελευταίο στάδιο μετασχηματισμού της οργανικής ύλης. Επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 150-250° C, ενώ στο σύστημα επιδρούν μαγματικές φάσεις και υδροθερμικά φαινόμενα. Επίσης, παρατηρείται θερμική αλλοίωση του βιτουμενίου και του κηρογόνου, που παράχθηκαν κατά το στάδιο της καταγένεσης.

Η αποδόμηση του βιτουμενίου και του κηρογόνου οδηγεί στο σχηματισμό θερμοδυναμικά πιο σταθερών μορφών, όπως άνθρακα (γραφιτικός), CO₂, H₂O και μεθανίου, το οποίο αποτελεί το μοναδικό υδρογονάνθρακα της μεταγενετικής φάσης.

Η μεταγένεση τελειώνει πρώτου ξεκινήσει η διαδικασία της μεταμόρφωσης ορυκτών φάσεων, στη θερμοκρασία των 300° C. Ο σχηματισμός γραφίτη συνήθως σηματοδοτεί τη λήξη της μεταγένεσης, ενώ η θερμοχημική αναγωγή του θείου οδηγεί στο σχηματισμό όξινων αερίων, πλούσιων σε υδρόθειο.

Στο σημείο αυτό, οι υδρογονάνθρακες είναι αρκετά ώριμοι και ικανοί να μεταναστεύσουν.



Εικόνα 1.2γ Στάδια ωρίμανσης (παρουσία παραθύρων)

1.3 ΜΗΤΡΙΚΟ ΠΕΤΡΩΜΑ

Μητρικό πέτρωμα ονομάζεται κάθε λεπτόκοκκο ιζηματογενές σώμα, το οποίο κατά τη δημιουργία του απελευθερώνει σημαντικές ποσότητες υδρογονανθράκων, ικανές να σχηματίσουν συγκεντρώση πετρελαίου ή αερίου. Η ποσότητα αυτή πρέπει να είναι ικανή να

μετακινηθεί (ιδιότητα που συνδέεται με τη περατότητα), προκειμένου να είναι αξιοποιήσιμη.

Η συγκέντρωση, ωστόσο, δεν είναι πάντοτε εμπορικής σημασίας ή εκμεταλλεύσιμη, κάτι που επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως το κόστος εκμετάλλευσης, τη μέθοδο εξόρυξης, τις οικονομικές και πολιτικές συνθήκες που επικρατούν, καθώς επίσης και από τις ανάγκες της παγκόσμιας αγοράς.

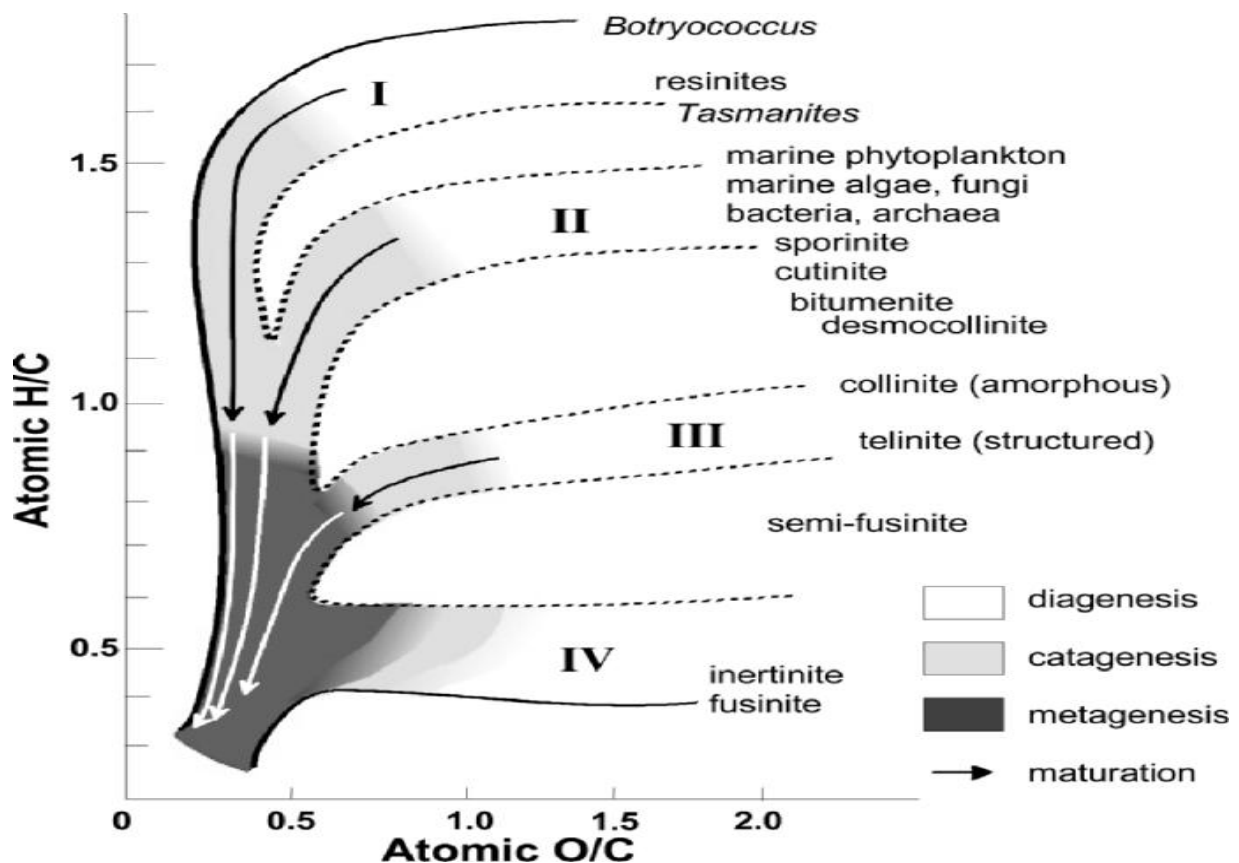
Κατά την ταφή και υπό την υψηλή θερμοκρασία που επικρατεί, το οργανικό υλικό υφίσταται μετασχηματισμούς και έπειτα από μια σειρά αντιδράσεων σχηματίζει γεωπολυμερή, τα Κηρογόνα. Το κηρογόνο δεν περιέχει υπολείμματα οργανικών συνθετικών και είναι αδιάλυτο σε οργανικούς διαλύτες (Peter K. Link, 1987). Με βάση τον τύπο του ταξινομούνται τα μητρικά πετρώματα σε 4 κύριες κατηγορίες:

1. Ο Τύπος I (λεπτινιτικός τύπος κηρογόνου) προέρχεται από λιποειδή συνθετικά φυκών, τα οποία έχουν υποστεί βακτηριακή δράση. Οι αποθέσεις πλούσιες σε αυτό τον τύπο κηρογόνου παρατηρούνται κυρίως σε λίμνες και λιμνοθάλασσες, ενώ ο τύπος I αποτελεί σημαντικό συστατικό και σε οργανικό υλικό θαλάσσιου περιβάλλοντος. Ο λόγος H/C είναι υψηλός, σε αντίθεση με το λόγο O/C, ο οποίος είναι χαμηλός, λόγω της παρουσίας μικρής ποσότητας οξυγόνου. Τα πετρώματα που είναι πλούσια σε αυτό τον τύπο Κηρογόνου έχουν καλή δυνατότητα να σχηματίσουν πετρέλαιο.

2. Ο Τύπος II (εξινιτικός τύπος κηρογόνου) προέρχεται από μεμβρανώδη φυτικά θραύσματα, συστατικά που δεν παράγονται μόνο στη χέρσο, αλλά και σε ωκεανούς. Το ποσοστό Υδρογόνου είναι υψηλό, ενώ το ποσοστό οξυγόνου μέτριο. Η αναλογία H/C είναι υψηλή και μέτρια η αναλογία O/C. Μητρικά πετρώματα πλούσια σε εξινιτικό κηρογόνο έχουν δυνατότητα να σχηματίσουν υγρό αέριο και πετρέλαιο.

3. Ο Τύπος III (βιτρινιτικός τύπος κηρογόνου) προέρχεται από τα ξυλώδη υλικά των φυτών και την κυταρίνη, τα οποία έχουν αποσυντεθεί. Το ποσοστό υδρογόνου είναι χαμηλό (χαμηλός λόγος H/C), ενώ ο λόγος O/C είναι υψηλός. Εμφανίζεται σε θαλάσσια και χερσαία ιζήματα, ενώ τα πετρώματα που περιέχουν κυρίως αυτό τον τύπο κηρογόνου έχουν δυνατότητα να οδηγήσουν σε γένεση αερίων, ωστόσο, η δυνατότητα γένεσης πετρελαίου και συμψηκνωμάτων είναι περιορισμένη.

4. Ο Τύπος IV (ιντετρινιτικός) αποτελεί αδιαφανή θραύσματα παλιού οργανικού υλικού, το οποίο υπέστη υψηλή μεταμόρφωση. Το ποσοστό H και η αναλογία H/C είναι χαμηλά, ενώ πετρώματα πλούσια σε ιντετρινίτη δεν έχουν δυνατότητα γένεσης πετρελαίου ή αερίου.



Εικόνα 1.3α Διάγραμμα Van Krevelen

Ο άνθρακας παράγεται από το οργανικό υλικό, καθώς αυτό καταναλώνει οξυγόνο και αποσυντίθεται και οξειδώνεται φυσικά. Αφού παραχθεί, η διατήρηση του απαιτεί αναερόβιες συνθήκες (μειωμένη παρουσία οξυγόνου), διότι η υψηλότερη από την επιθυμητή συγκέντρωση του ενισχύει τη δράση βακτηρίων και οργανισμών, που βρέθηκαν στο χώρο απόθεσης κατά την αναμόχλευση ή τη μεταφορά του υλικού .

Ο άνθρακας, ο οποίος δεν είναι ικανός να απομακρυνθεί από τη θέση συγκεντρώνεται και μετά από την πάροδο του χρόνου σχηματίζει σημαντικές συγκεντρώσεις.

Αξιίζει να σημειωθεί πως η διακοπή του κύκλου του άνθρακα είναι προσωρινή (εως να αποσπαστεί από τον άνθρωπο και να αναφλεχθεί), ενώ το τμήμα που δεν υπόκειται καύση και δεν απελευθερώνεται είναι μικρό.

Για το λόγο αυτό, τα ανοξικά περιβάλλοντα που επιτρέπουν την παραγωγή μεγάλων συγκεντρώσεων και την ανάπτυξη πετρελαϊκών μητρικών πετρωμάτων είναι σημαντικά και η οικονομική σημασία τους τα καθιστά προνομιακά (Emerson S., 1985).

Οι λίμνες, τα Δέλτα και Θαλάσσιες λεκάνες αποτελούν τις κύριες αποθετικές θέσεις μητρικών πετρωμάτων. Οι λίμνες είναι οι πιο σημαντικές θέσεις απόθεσης και πρέπει να είναι σταθερές, ώστε να σχηματιστούν ογκώδη μητρικά πετρώματα.

Η τάση του νερού στις αβαθείς και η τεκτονική στις βαθιές λίμνες είναι οι υπεύθυνες δυνάμεις για τη κυκλοφορία του οξυγόνου σε κάθε σημείο της στήλης του νερού, από την οροφή έως το πυθμένα και τα ιζήματα. Η στρωμάτωση στη συνέχεια του υδάτινου όγκου απαιτείται για την ανάπτυξη των ανοξικών συνθηκών.

Οι λίμνες σε ζεστά κλίματα περιέχουν θερμό νερό, το οποίο είναι λιγότερο πυκνό από το νερό ψυχρότερων περιοχών και δεν αναπτύσσει ροές, που επιτρέπουν τη μεταφορά υψηλής ποσότητας Οξυγόνου. Η ιδιότητα αυτή εξασφαλίζει εύκολη στρωμάτωση, αλλά η ανάμειξη των υδάτινων ζωνών και η ανταλλαγή οξυγόνου ανάμεσα τους καθίσταται δύσκολη.

Τα Δέλτα αποτελούν επίσης σημαντικές αποθετικές θέσεις και η συμπεριφορά τους διαφέρει, ανάλογα με τον τύπο τους και τη δομή τους. Δέλτα που χαρακτηρίζονται από συνθήκες χαμηλής ενέργειας στη δελταϊκή πλατφόρμα ευνοούν το σχηματισμό μητρικών πετρωμάτων, σε αντίθεση με Δελταϊκούς σχηματισμούς, οι οποίοι συνδέονται με μετανάστευση των φραγμών τους.

Οι θαλάσσιες λεκάνες είναι το τρίτο σημαντικό αποθετικό περιβάλλον και οι διαφορετικοί τύποι τους διέπονται από μηχανισμούς που διαφέρουν. Οι κλειστές λεκάνες χαρακτηρίζονται από στρωμάτωση του υδάτινου όγκου και τη μείωση του

παρεχόμενου οξυγόνου στο πυθμένα, ενώ σε ανοιχτές υφαλοκρηπίδες παρατηρείται ανοδικά κινούμενη ωκεάνια ροή.

1.4 ΚΑΛΥΜΜΑ (SEAL)

Τα καλύμματα συνιστούν φυσικό μηχανισμό, που περιορίζει την ελεύθερη ανοδική μετανάστευση των ορυκτών πόρων, έξω από την παγίδα, και εκτείνονται στην οροφή, στα πλευρά ή στον πυθμένα της. Είναι πορώδη πετρώματα, των οποίων η περατότητα είναι μηδενική έως πολύ χαμηλή, οδηγώντας σε πολλές περιπτώσεις σε μικρή διαρροή υδρογονανθράκων.

Το μέγεθος των πόρων του και η πυκνότητα των εμπεριεχόμενων υδρογονανθράκων και του νερού επηρεάζουν, επίσης, την ικανότητα συγκράτησης του πετρώματος-καλύμματος. Η πυκνότητα του πετρελαίου, αλλά και η πίεση πόρων (άνωση) που ασκεί διαφέρει από τις αντίστοιχες τιμές του αερίου και για το λόγο αυτό παρατηρείται κάποιες φορές μερική συγκράτηση των υδρογονανθράκων (διαρροή αερίων φάσεων, συγκράτηση υγρών).

Τα πιο γνωστά καλύμματα, που απαντώνται στη φύση είναι οι εβαπορίτες και οι σχιστόλιθοι.

Σειρά	Ορυκτό
1	Υδροξείδιο Fe,Al
2	Ασβεστίτης-Δολομίτης
3	Γύψος
4	Ανυδρίτης
5	Ρυθμοί Γύψου και Ανυδρίτη
6	Αλίτης
7	Άλατα Μαγνησίου

Εικόνα 1.4α Σειρά Ιζηματογένεσης Εβαποριτικής Λεκάνης (Ιζηματολογία, Αντώνιος και Άρης Ψιλοβίκος)

Οι εβαπορίτες είναι ιζηματογενείς σχηματισμοί, που προκύπτουν σε κλειστές ή ημί-κλειστες λεκάνες, σε κλιματικές ζώνες

που ενισχύεται η εξάτμιση των υδάτων. Ο αποκλεισμός (απομόνωση) της λεκάνης αποτελεί τη βασική συνθήκη, προκειμένου να περιοριστεί η κυκλοφορία του νερού σε αυτή, καθώς επίσης η τροφοδοσία σε νερό και υλικά. Η στάσιμη αυτή συνθήκη οδηγεί σε αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων, σε σταδιακή αύξηση της αλατότητας και στην απόθεση δύο ομάδων εβαποριτικών ορυκτών (Σουλφίδια-Ανυδρίτης, Γύψος και Χλωρίδια-Αλίτης).

Η εβαποριτίωση αποτελεί αργή διαδικασία και η σειρά ιζηματογένεσης δεν είναι πάντοτε τέλεια. Η ιζηματογένεση συνήθως διακόπτεται πρώτου ολοκληρωθεί και φθάνει έως το σημείο να παράγει ρυθμούς Ανυδρίτη και Γύψου. Σπανιότερα, παράγεται και Αλίτης, ο οποίος εναλλάσσεται με Γύψο, Ανυδρίτη ή/και κλαστικά υλικά

Όσον αφορά τις συνθήκες σχηματισμού των εβαποριτών, η Γύψος απαιτεί αλατότητα 32-36‰ και τελικό όγκο υδάτων ίσο με το 1/3 του αρχικού. Ο ανυδρίτης αποτελεί προϊόν αντικατάστασης και εμφανίζεται με τη μορφή κονδυλων. Τέλος, ο Αλίτης χρειάζεται αλατότητα που ξεπερνά την επταπλάσια του νερού της θαλάσσης και ο όγκος νερού που θα απομείνει, μετά την εξάτμιση, να είναι μόλις το 1/10 του αρχικού.

Ενώ οι εβαπορίτες αποτελούν λιγότερο από το 2% των ιζηματογενών σχηματισμών της Γης, λειτουργούν ως κάλυμμα σε πολλά κοιτάσματα πετρελαίου, όπως στο κοιτάσμα Ghawar (το μεγαλύτερων διαστάσεων στον κόσμο) και το κοιτάσμα Safaniya (το πιο σημαντικό υπεράκτιο κοιτάσμα).

Η πλευρική ανάπτυξη τους, σε συνδιασμό με τη χαμηλή τους περατότητα έχουν ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των διαρροών, είτε ο υδρογονάνθρακας είναι υγρής μορφής (πετρέλαιο) είτε αέριας (μεθάνιο). Παρουσιάζουν ελαστικότητα, μία ιδιότητα σημαντική για ένα πέτρωμα-κάλυμμα και είναι ανθεκτικοί σε ένα μεγάλο εύρος υπεδάφίων συνθηκών (πίεση και θερμοκρασία).

Τέλος, τα εβαποριτικά στρώματα έχουν την ικανότητα να διατηρούν την συμπαγή δομή τους, εκμεταλλευόμενα την ευαισθησία τους στη διάλυση, σε συνδιασμό με την ευκινησία των διαλυμένων ιόντων τους. Με τον τρόπο αυτό, το πλέγμα του NaCl υποχωρεί κατά θέσεις, λόγω των ισχυρών πιέσεων, όμως η κυκλοφορία του πλούσιου σε ιόντα νερού «επουλώνει» και ανανεώνει τον εβαπορίτη.

Οι τιμές περατότητας που περιγράφουν τα εβαποριτικά καλύμματα τα καθιστούν αποτελεσματικότερα και ιδανικότερα από τους σχιστολίθους. Πιο συγκεκριμένα, η περατότητα ενός σχιστολίθου κυμαίνεται μεταξύ 10^{-1} - 10^{-5} md, ενώ στρώματα Αλίτη παρουσιάζουν τιμές μικρότερες των 10^{-6} md. Πιο συμπαγοποιημένοι εβαποριτικοί σχηματισμοί φθάνουν τιμές της τάξης 10^{-7} - 10^{-9} md.

Η δεύτερη σημαντική κατηγορία πετρωμάτων-καλυμμάτων είναι οι άργιλοι.

Άργιλος ονομάζεται κάθε λεπτόκοκκος, ιζηματογενής σχηματισμός, ο οποίος αποτελείται από κλαστικά υλικά μεγέθους τάξης ιλύος και αργίλου. Πρόκειται για το αφθονότερο ιζηματογενές πέτρωμα του φλοιού, καθώς αποτελεί περίπου το 70% και σχηματίζεται σε περιοχές, όπου αποτίθεται υλικό με τη δράση ήπιων ρευμάτων. Οι λίμνες και η υφαλοκρηπίδες συνιστούν χαρακτηριστικά περιβάλλοντα απόθεσης αργίλου.

Οι άργιλοι αποτελούνται κυρίως από αργιλικά ορυκτά, όπως Ιλλίτη, Καολινίτη και Σμεκτίτη. Περιέχουν, επίσης, άλλες ορυκτολογικές φάσεις, όπως χαλαζία και αστρίους, οι οποίες συναντώνται σε μέγεθος αργίλου/ιλύος. Σε κάποιες περιπτώσεις, μπορεί να περιέχονται και άλλα υλικά (οργανικά ψήγματα, ανθρακικά ορυκτά, οξειδία Σιδήρου), τα οποία προέρχονται από το περιβάλλον απόθεσης και καθορίζουν ιδιότητες του σχηματισμού, όπως το χρώμα του.

Ο ρόλος των αργίλων σε ένα πετρελαϊκό σύστημα είναι πολύ σημαντικός. Το μικρό μέγεθος των πόρων τους και η συμπαγοποίηση, την οποία υπόκεινται τους καθιστά αδιαπέρατους και η διαφυγή των υδρογονανθράκων είναι πιθανή, μόνο εαν λόγω υψηλών πιέσεων παρουσιαστούν ασυνέχειες στο σχηματισμό. Η λειτουργία της αργίλου ως κάλυμμα είναι αποτελεσματικότερη, όταν περιέχεται πετρέλαιο, ενώ η ικανότητα συγκράτησης αερίου είναι χαμηλότερη.

Τέλος, ως μονωτής μπορεί να λειτουργήσει κάθε ιζηματογενής σχηματισμός, ο οποίος είναι συμπαγοποιημένος και πληρεί τις απαραίτητες προϋποθέσεις, που έχουν προαναφερθεί. Ψαμμίτες και ανθρακικά πετρώματα είναι ικανά να συγκρατήσουν υδρογονάνθρακες, ωστόσο, η στήλη είναι περιορισμένου ύψους. Ενδεικτικά, αμμώδη υλικά υψηλής συμπαγοποίησης μπορούν να

περιορίσουν στήλες έως 120 μέτρα, ενώ οι άργιλοι και οι εβαπορίτες συγκρατούν στήλες που ξεπερνούν το 1,5 χιλιόμετρο.

Πρέπει να τονισθεί πως οι πετρογραφικές ιδιότητες του μονωτή διαφοροποιούνται σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (μεταβολή βάθους) και διεργασίες, όπως η διαγένεση επιδρούν θετικά. Η συμπαγοποίηση, επίσης, μειώνει τον συνολικό όγκο των πόρων και η περατότητα μειώνεται σημαντικά. Με τον τρόπο αυτό, κάθε σχηματισμός βελτιώνεται και παρουσιάζει ικανότητα συγκράτησης μεγαλύτερης ποσότητας υδρογονανθράκων (πετρελαίου και αερίου).

1.5 ΠΑΓΙΔΑ (TRAP)

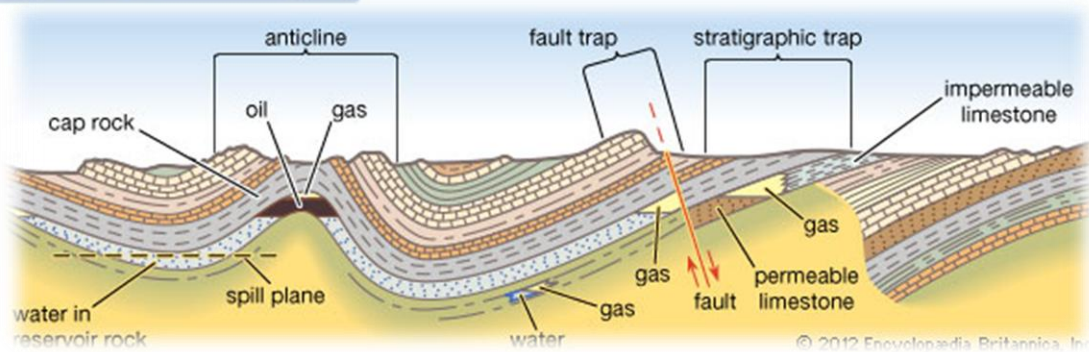
Παγίδα στην Γεωλογία Πετρελαίου ονομάζεται κάθε διάταξη πετρωμάτων, η οποία επιτρέπει σημαντική συγκέντρωση υδρογονανθράκων (πετρελαίο ή/και αέριο) στο υπέδαφος. Μια παγίδα δεν εμπεριέχει πάντοτε υδρογονάνθρακες και δεν είναι πάντοτε οικονομικά ωφέλιμη. Προκειμένου να μας απασχολήσει, πρέπει να διαθέτει δύο βασικά στοιχεία, ένα ταμιευτήρα και ένα μονωτή.

Οι ταμιευτήρες κατά κανόνα είναι ανθρακικά πετρώματα ή ψαμμίτες, ενώ θεωρητικά κάθε πέτρωμα που διαθέτει πορώδες σύστημα μπορεί να φιλοξενήσει υδρογονάνθρακες. Η συγκέντρωση αυτή είναι ευκίνητη και ικανή να διαφύγει μέσω ασυνεχιών, εκμεταλλευόμενη την περατότητα των σχηματισμών (R.C Selley και S.A. Sonnenberg, 2014).

Ο ταμιευτήρας σπάνια είναι ομογενής, καθώς συνήθως διαφοροποιείται στο χώρο, κάτι που σημαίνει πως η υδροδυναμικές ιδιότητες του μεταβάλλονται, δηλαδή η περατότητα και το πορώδες. Οι θέσεις αυτές είναι σημαντικές καθώς τα ρευστά συμπεριφέρονται διαφορετικά στις μεταβατικές ζώνες.

Ο μονωτής είναι το υπερκείμενο αδιαπέρατο πέτρωμα, το οποίο περιορίζει την κίνηση τους και τους εγκλωβίζει στο ταμιευτήρα. Εως να υπερνικήσει η πίεση που ασκεί η ρευστή φάση το όριο θραυσσιμότητας του μονωτή, η συγκέντρωση είναι εκμεταλλεύσιμη. Η μεταβολή της σύστασης του πλευρικά είναι ένας παράγοντας που επιτρέπει την διαφυγή υδρογονανθράκων και την εκτεταμένη διάρρηξη του.

Οι παγίδες διακρίνονται σε 2 κύριες κατηγορίες, τις Τεκτονικές και τις Στρωματογραφικές.

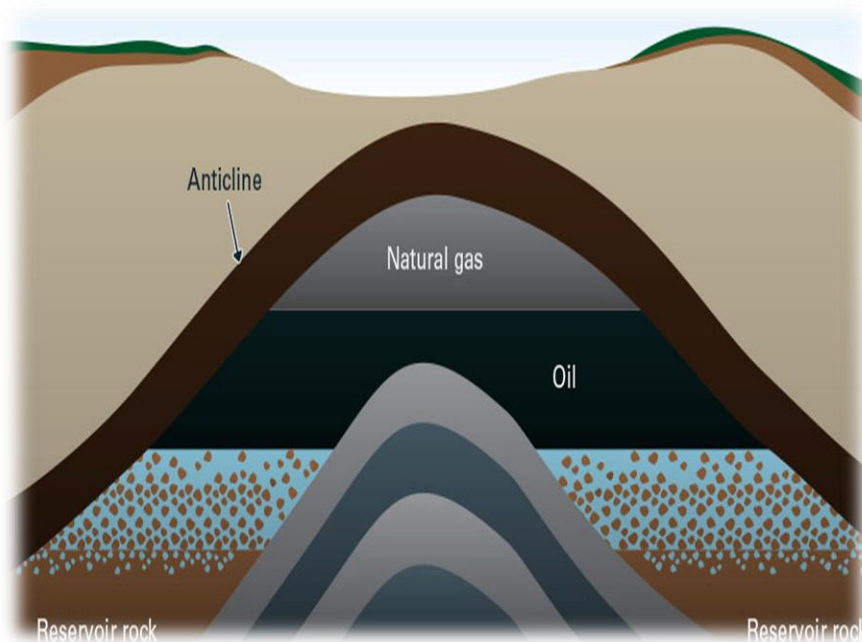


Εικόνα 1.5α Τύποι παγίδων (Πηγή: <https://www.britannica.com/science/petroleum-trap>)

Οι Τεκτονικές παγίδες είναι η σημαντικότερη κατηγορία και αυτή που συναντάται στα μεγαλύτερα κοιτάσματα πετρελαίου στο κόσμο. Η γένεση τους οφείλεται σε συναποθετικές ή/και μεταποθετικές διεργασίες (Διαπυρικές, βαρυτικές, τεκτονικές, συμπαγοποίηση), οι οποίες παραμορφώνουν τα στρώματα. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν οι διατάξεις, που επιτρέπουν τη συσσώρευση των υδρογονανθράκων στο υπέδαφος.

Στις τεκτονικές παγίδες περιλαμβάνονται τα Αντίκλινα, οι δόμοι άλλατος και οι παγίδες ρηγμάτων.

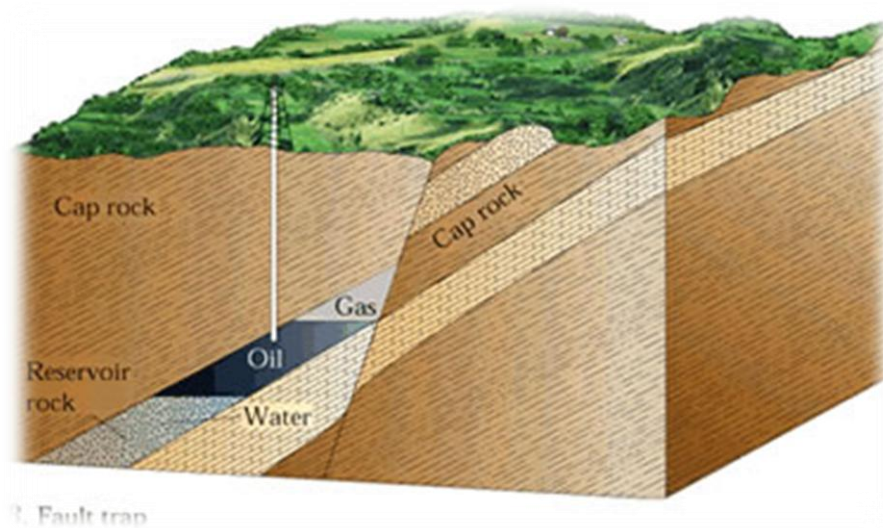
Τα αντίκλινα παρουσιάζουν μια κυκλική ή ελλειπτική εικόνα. Η στήλη των ρευστών φέρει στο ανώτερο τμήμα της το αέριο, το οποίο είναι το ελαφρύτερο και εφάπτεται στο μονωτή. Το πετρέλαιο



Εικόνα 1.5β Αντίκλινο (Πηγή: <http://www.uncoverenergy.com/img/portfolio/anticline-graphic>)

βρίσκεται στο μέσο της στήλης, ενώ το αλμυρό νερό, που συνήθως συναντάται στα κοιτάσματα πετρελαίου, καταλαμβάνει το κατώτερο τμήμα.

Η τεκτονική μπορεί να παραμορφώσει το αντίκλινο, ενώ παράλληλα να μεταβάλλει τις τιμές περατότητας και πορώδους. Στις περιπτώσεις αυτές η διαχείριση του συστήματος γίνεται πιο πολύπλοκη και οι μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για τους Μηχανικούς Πετρελαίου.



Εικόνα 1.5γ Παγίδα Ρήγματος (Πηγή: <http://www.uncoverenergy.com/img/portfolio/anticline>)

Οι παγίδες ρηγμάτων σχηματίζονται, όταν κατά μήκος μίας ρηξιγενούς επιφάνειας έρχονται σε επαφή περατά και αδιαπέρατα στρώματα. Όταν συμβαίνει αυτό, η μετανάστευση των υδρογονανθράκων διακόπτεται και δε διαφεύγουν προς τις διάφορες κατευθύνσεις. Ο κάθε τύπος ρηγμάτων (κανονικά, ανάστροφα και οριζόντιας μετατόπισης) διαμορφώνει την εικόνα του συστήματος με διαφορετικό τρόπο.

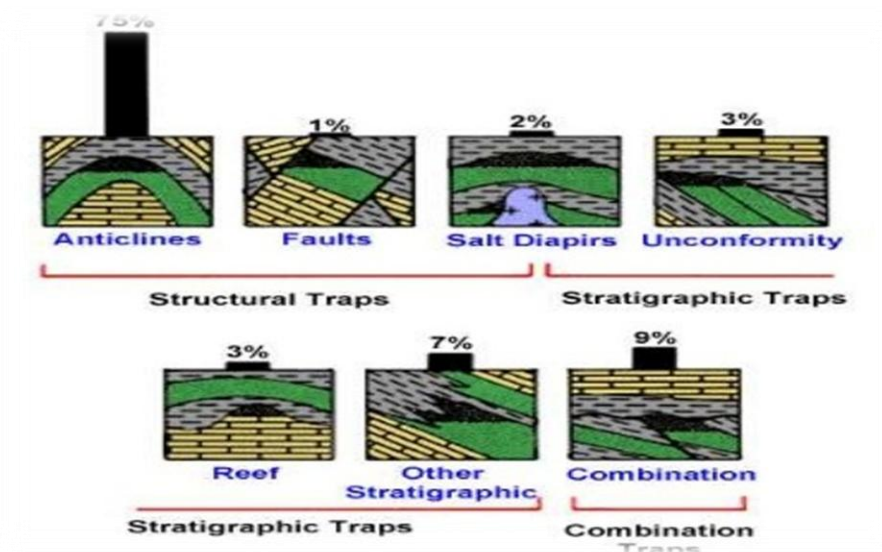
Οι δόμοι άλατος αποτελούν την τελευταία υποκατηγορία των τεκτονικών παγίδων. Όταν μία στήλη άλατος δέχεται ισχυρές πιέσεις, κινείται ανοδικά και εισσβάλλει στα κλαστικά πετρώματα. Το μη περατό αλάτι διακόπτει ένα περατό πέτρωμα, στο οποίο οι υδρογονάνθρακες μεταναστεύουν, και η διαφυγή αποτρέπεται με τον ίδιο τρόπο, όπως και στην περίπτωση των παγίδων ρηγμάτων.

Οι στρωματογραφικές παγίδες συνιστούν τη δεύτερη μεγάλη κατηγορία και είναι αποτέλεσμα της κατακόρυφης ή/και πλευρικής

μεταβολής της πυκνότητας, της λιθολογίας ή του πορώδους του ταμιευτήρα. Διακρίνονται σε πρωτογενείς και δευτερογενείς. Οι πρωτογενείς προκύπτουν από μεταβολές στις φάσεις κατά την ιζηματογένεση, ενώ οι δευτερογενείς από μεταβολές μετά την ιζηματογένεση, κυρίως κατά τη διαγένεση.

Στις στρωματογραφικές παγίδες ανήκουν οι ύφαλοι, οι παγίδες ασυμφωνιών και οι παγίδες αποσφήνωσης. Οι ύφαλοι, εκτός από την παρουσία υδρογονανθράκων, χαρακτηρίζονται συνήθως και από μεταλλοφορία (Pb και Zn), ενώ οι ασυμφωνίες προκύπτουν από εναλλαγή περιόδων ιζηματογένεσης και διάβρωσης. Τέλος, οι παγίδες αποσφήνωσης προκύπτουν όταν μειώνεται το πάχος του ταμιευτήρα πλευρικά, λόγω του υψηλού βάρους του υπερκείμενου όγκου

Να σημειωθεί πως οι αντικλινικές παγίδες αποτελούν τις πιο διαδεδομένες στη φύση, ξεπερνώντας το 70%, ενώ στη φύση κάποιες φορές συναντώνται συνδιασμοί των 2 κύριων κατηγοριών. Έτσι, προκύπτουν μοντέλα, όπου η τεκτονική και η διαφοροποίηση των στρωμάτων διαμορφώνουν την εικόνα του κοιτάσματος συνδιαστικά.



Εικόνα 1.56 Κατηγορίες Παγίδων (Πηγή: Presentation Traps and Its Classification)

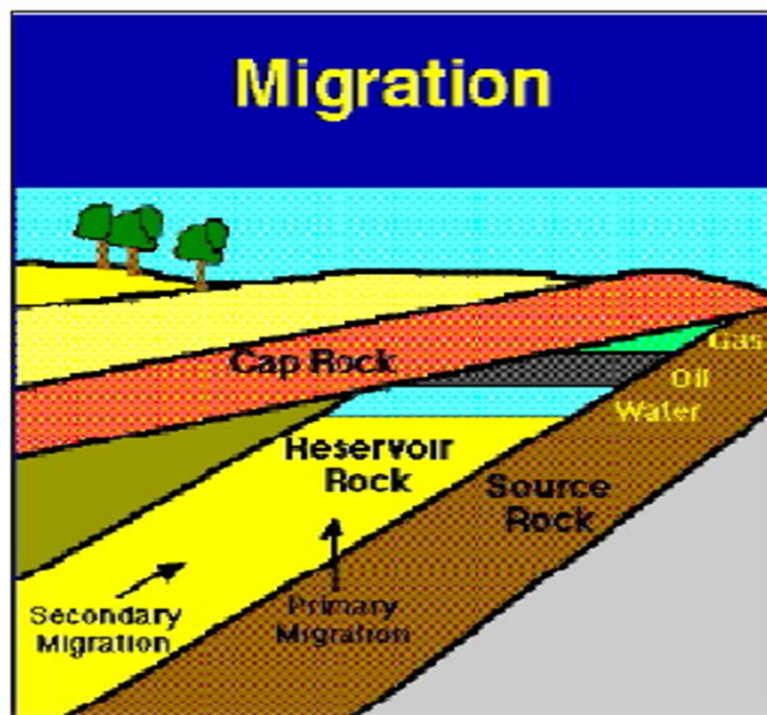
1.6 ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗ (MIGRATION)

Η παραγωγή υδρογονανθράκων αποτελεί μία διεργασία, η οποία χαρακτηρίζεται από αύξηση όγκου, καθώς το κηρογόνο καταλαμβάνει μικρότερο όγκο στο μητρικό πέτρωμα. Έτσι, αποβάλλονται από αυτό και κινούνται προς γειτονικούς

σχηματισμούς, οι οποίοι είναι κορεσμένοι σε νερό. Οι ελαφρύτεροι υδρογονάνθρακες δέχονται πιέσεις από το νερό και τείνουν να κινηθούν ανοδικά, μέσω του δικτύου των κόκκων. Η κίνηση αυτή ονομάζεται μετανάστευση. Η μετανάστευση διακρίνεται σε πρωτογενή και δευτερογενή.

Η πρωτογενής αναφέρεται στην απομάκρυνση των υδρογονανθράκων από το μητρικό πέτρωμα και την μετακίνησή τους σε γειτονικό περατό σχηματισμό. Η δευτερογενής αναφέρεται στην εσωτερική κίνηση των υδρογονανθράκων μέσα στο ταμιευτήρα (Γεωργακόπουλος, Κοιτασματολογία Πετρελαίου).

Η διαπερατότητα των διαφόρων στρωμάτων επηρεάζει την ταχύτητα μετανάστευσης, καθώς οι πιο συμπαγείς σχηματισμοί παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντιστάσεις. Όταν κάποιο στρώμα είναι αδιαπέρατο και δεν επιτρέπει τη ροή των ρευστών, η κίνηση πραγματοποιείται μέσω ασυνεχειών του πετρώματος (ρωγμές) ή τοπικών διαφοροποιήσεων της λιθολογίας.



Εικόνα 1.6α Μετανάστευση (Πηγή Κοιτασματολογία Πετρελαίου, Γεωργακόπουλος)

Σημαντικό είναι να σημειωθεί πως κατά τη μετανάστευση παρατηρούνται απώλειες. Οι υδρογονάνθρακες διαλύονται στο νερό, το οποίο συναντούν κατά την κίνηση τους, ενώ κατά τη διέλευση

τους μέσα από τους διάφορους σχηματισμούς, μικρή ποσότητα παγιδεύεται στους κόκκους.

1.7 ΠΟΡΩΔΕΣ (POROSITY)

Το πορώδες είναι μία από τις 2 σημαντικές ιδιότητες, που έχουν αναφερθεί και θα αναφερθούν ξανά στη συνέχεια στην παρούσα εργασία. Είναι σημαντική ιδιότητα, η οποία περιγράφει την αποθηκευτική ικανότητα του ταμιευτήρα.

Ως πορώδες ορίζεται ο λόγος του όγκου, που καταλαμβάνουν οι πόροι σε ένα σχηματισμό ή σε μία ιζηματογενή απόθεση, προς τον συνολικό όγκο του σχηματισμού ή της απόθεσης. Συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό επί τις εκατό (Choquette και Pray, 1970).

Όταν το πορώδες περιγράφει τον όγκο όλων των πόρων στο πέτρωμα, είτε επικοινωνούν μεταξύ τους είτε όχι, ονομάζεται ολικό ή απόλυτο. Εάν, όμως, ληφθούν υπόψη αποκλειστικά οι πόροι, που παρουσιάζουν επικοινωνία μεταξύ τους και εκφραστεί ο λόγος τους προς τον συνολικό όγκο της απόθεσης ή του σχηματισμού, τότε ορίζεται ως ενεργό πορώδες.

Το ενεργό πορώδες έχει σημαντική αξία στην Γεωλογία Πετρελαίου, καθώς επιτρέπει να εκτιμήσει κάποιος την ποσότητα των αποθηκευμένων ουσιών, που μπορεί να αποληφθεί. Ο όγκος των απομονωμένων πόρων, οι οποίοι δεν επικοινωνούν μεταξύ τους, προς το συνολικό όγκο του πετρώματος εκφράζουν το υπολλειματικό πορώδες.

Ενδεικτικά:

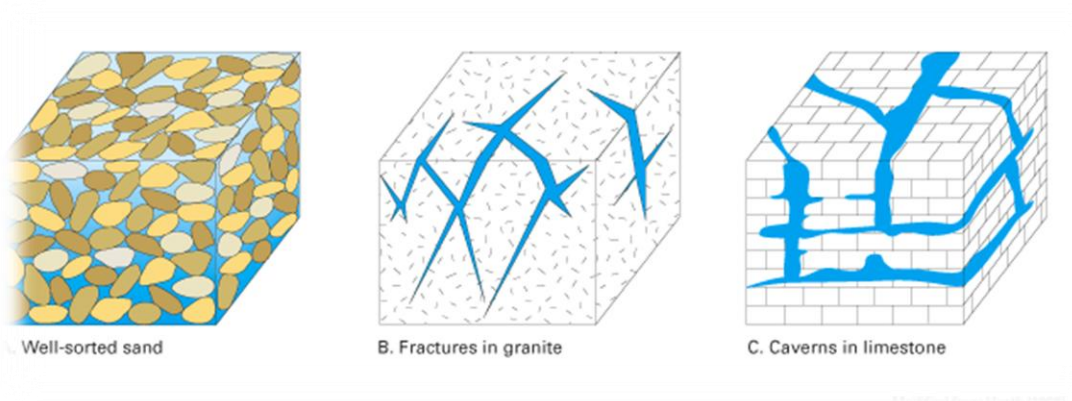
$$Pt \text{ (ολικό)} = \frac{V_p}{V_t} \times 100$$

V_p	ο συνολικός όγκος των πόρων
V_i	ο όγκος των πόρων που επικοινωνούν
V_t	ο ογκος του σχηματισμού

$$Pt \text{ (ολικό)} = \frac{V_i}{V_t} \times 100$$

Η προέλευση του πορώδους αποτελεί σημαντική παράμετρο και με βάση αυτή διακρίνεται σε 2 άλλες κατηγορίες, το πρωτογενές και το δευτερογενές.

Το πρωτογενές δημιουργείται κατά τη διαδικασία της ιζηματογένεσης και περιλαμβάνει τα διάκενα μεταξύ των κόκκων και τα διάκενα που υπάρχουν στην εσωτερική δομή των κόκκων. Το δευτερογενές πορώδες προκύπτει από διάφορες φυσικοχημικές και τεκτονικές διεργασίες, όταν αυτές καταστρέφουν μερικώς ή πλήρως την αρχική δομή των ιζημάτων. Στις διεργασίες αυτές περιλαμβάνεται η διάλυση και η ανακρυστάλλωση. Οι ανθρακικοί σχηματισμοί που αποτελούν ταμιευτήρες χαρακτηρίζονται αποκλειστικά από δευτερογενές πορώδες (αποκάρσωση, τεκτονισμός), ενώ οι ψαμμίτες από πρωτογενές (διάκενα μεταξύ των κόκκων-ιζημάτων)



Εικόνα 1.7 Πρωτογενές (α) και δευτερογενές (b,c) πορώδες (Πηγή: <https://pubs.usgs.gov/circ/2003/circ1262>)

1.8 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ (PERMEABILITY)

Η διαπερατότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα αποτελεί τη δεύτερη σημαντική ιδιότητα και περιγράφει την ικανότητα ενός πορώδους μέσου να επιτρέπει την κυκλοφορία ρευστών μέσω των πόρων του.

Η ικανότητα αυτή επηρεάζεται από τη μορφολογία των πόρων, δηλαδή το σχήμα και το μέγεθος τους, από το τρόπο που συνδέονται, αλλά και από το είδος του ρευστού. Το ιξώδες είναι σημαντική παράμετρος, καθώς επίσης και οι συνθήκες που ωθούν το ρευστό (πίεση κυρίως). Η

διαπερατότητα αυξάνεται με την αύξηση του πορώδους, ενώ η τσιμεντοποίηση, η συμπαγοποίηση, καθώς επίσης και άλλες σχετικές διεργασίες μειώνουν την περατότητα, όπως και το πορώδες.

Μαθηματικά εκφράζεται με το νόμο του Darcy:

$$Q = K \times \frac{A \times (P_2 - P_1)}{\mu \times L}$$

Q	Όγκος ρευστού που μετακινήθηκε-Παροχή (m ³ /s ή cm ³ /s)
K	Συντελεστής Διαπερατότητας (m/s ή cm/s)
P ₂ -P ₁	Διαφορά Πίεσης μεταξύ Ακραίων Σημείων (N/m ²)
A	Επιφάνεια Διατομής (m ² ή cm ²)
μ	Δυναμικό Ιξώδες (Kg/m s)
L	Μήκος κυλινδρικού Αγωγού (m ή cm)

Ο συντελεστής διαπερατότητας είναι ανεξάρτητος από τον τύπο του ρευστού, ενώ η επικρατέστερη μονάδα για την διαπερατότητα είναι το Darcy. Χρησιμοποιείται συνήθως το milidarcy, καθώς οι συμπαγείς δομές δεν παρουσιάζουν τιμές ίσες ή μεγαλύτερες από τη μονάδα.

<i>Πολύ χαμηλή, όταν</i>	<i>k < 1 mD</i>
<i>Χαμηλή</i>	<i>1 mD < k < 10 mD</i>
<i>Μέτρια</i>	<i>10 mD < k < 50 mD</i>
<i>Μέση</i>	<i>50 mD < k < 200 mD</i>
<i>Καλή</i>	<i>200 mD < k < 500 mD</i>
<i>Πολύ καλή</i>	<i>500 mD < k</i>

Εικόνα 1.8α Χαρακτηρισμός Υδροπερατότητας (Πηγή: Μηχανική Πετρελαίων Ε.Μ.Π)

Επίσης, χρησιμοποιείται ο όρος ενεργή διαπερατότητα, η οποία αναφέρεται στην ικανότητα ροής ενός ρευστού σε ένα μέσο, όταν αυτό είναι κορεσμένο σε περισσότερες από μία μη ανεμιγμένες φάσεις. Μία τιμή περιγράφει την ιδιότητα για το νερό (K_w), το αέριο (K_g), αλλά και για το πετρέλαιο (K_o). Ο λόγος μίας τιμής ενεργούς διαπερατότητας προς μία διαπερατότητα-αναφορά αποτελεί τη Σχετική Διαπερατότητα.

Η σημασία της διαπερατότητας είναι μεγάλη στη Γεωλογία πετρελαίου, διότι κάποια υλικά λειτουργούν ως φράγματα σε μία λεκάνη και δεν επιτρέπουν την μετακίνηση ρευστών. Πιο συγκεκριμένα, τα Φράγματα Διαπερατότητας, που εντοπίζονται με ηλεκτρικές μεθόδους, σημειώνουν τη θέση παγίδων και καλυμμάτων,

τα οποία αποτελούν παράγοντα σχηματισμού και διατήρησης των κοιτασμάτων υδρογονανθράκων.

1.9 ΚΟΡΕΣΜΟΣ (SATURATION)

Οι πόροι των σχηματισμών, που αποτελούν ταμιευτήρες είναι πάντοτε κορεσμένοι με ρευστά και ποτέ δεν υπάρχει κάποιο τμήμα τους που είναι απόλυτα κενό. Ο όγκος καταλαμβάνεται από συνδιασμό των παρακάτω ρευστών:

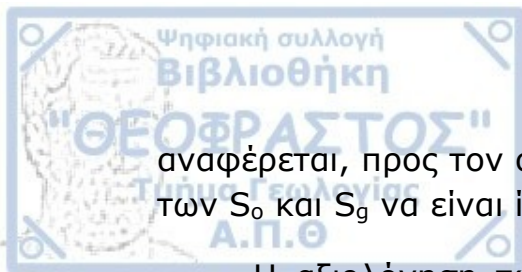
- Πετρέλαιο και προσμίξεις που το συνοδεύουν (υγρή φάση)
- Φυσικό αέριο και προσμίξεις που το συνοδεύουν (αέρια φάση)
- Νερό που παγιδεύτηκε στο σχηματισμό ή εισπιάστηκε σε αυτόν

Κατά την απόθεση των ιζημάτων, οι πόροι είναι κορεσμένοι σε νερό, καθώς η διαδικασία της ιζηματογένεσης πραγματοποιείται σε υδάτινες περιοχές. Στη συνέχεια, το πέτρωμα υπόκειται ταφή, φθάνει σε μεγάλα βάθη, συμπαγοποιείται και το νερό συνήθως αλλάζει σύσταση, ωστόσο, ο κορεσμός σε νερό παραμένει ίσος με τη μονάδα, εάν δεν εξέλθει νερό και δεν εισέλθουν υδρογονάνθρακες στο μέσο.

Οι υδρογονάνθρακες χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη τιμή πυκνότητας από το νερό και η άνωση ωθεί το αέριο και το πετρέλαιο προς τα πάνω. Εάν υπάρχει κάποια γεωμετρική διάταξη, που είναι ικανή να διακόψει την ανοδική αυτή κίνηση, μπορεί να προκύψει μία συγκέντρωση με οικονομική αξία.

Έτσι, στη νέα στήλη που προκύπτει, νερό βρίσκεται στο κατώτερο τμήμα, το αέριο καταλαμβάνει το ανώτερο τμήμα, ενώ το πετρέλαιο βρίσκεται στο μέσο. Σε κάθε περίπτωση, παραμένει τμήμα του νερού στο σύστημα και ο κορεσμός σε νερό διαφέρει πάντοτε από το 0.

Το άθροισμα των τιμών κορεσμού σε νερό (S_w), σε φυσικό αέριο (S_g) και σε πετρέλαιο (S_o) είναι ίσο με τη μονάδα. Η κάθε μία τιμή προκύπτει από διαίρεση του όγκου του ρευστού, στο οποίο



αναφέρεται, προς τον συνολικό όγκο των πόρων. Είναι πιθανό μία εκ των S_o και S_g να είναι ίσες με το 0.

Η αξιολόγηση των μετρήσεων κορεσμού είναι σημαντική και πληροφορεί για πιθανά σημεία επαφής μεταξύ των διαφόρων ρευστών φάσεων, καθώς μεταβάλλεται με το βάθος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκε ο όρος Πετρελαϊκό Σύστημα, που αποτελεί θεμελιώδη έννοια στη Γεωλογία Πετρελαίου. Η ερευνητική διαδικασία προϋποθέτει πλήρη κατανόηση του όρου και για το λόγο αυτό έγινε αναφορά στα στοιχεία που το απαρτίζουν. Κάθε στοιχείο είναι σημαντικό και η συμβολή τους είναι αυτή που οδηγεί στο σχηματισμό των Κοιτασμάτων Υδρογονανθράκων.

Στα 2^ο και 3^ο κεφάλαιο θα αναλυθεί η έννοια του Ταμιευτήρα (reservoir), η οποία συγκεντρώνει το οικονομικό ενδιαφέρον και αποτελεί το κύριο στόχο των ερευνών. Ως ταμιευτήρας στη Γεωλογία Πετρελαίου ορίζεται κάθε σχηματισμός-πέτρωμα, ο οποίος περιέχει υδρογονάνθρακες. Προκειμένου να είναι δυνατή η αποθήκευση των υδρογονανθράκων, ο ταμιευτήρας πρέπει να χαρακτηρίζεται από την παρουσία κενών (πορώδες-αποθηκευτική ικανότητα) και να επιτρέπει τη ροή ρευστών στους πόρους του (διαπερατότητα).

Οι ιδιότητες αυτές είναι απαραίτητες για ένα Ταμιευτήρα, ωστόσο, δε συνιστά τη μοναδική προϋπόθεση. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι υδρογονάνθρακες είναι ρευστά και η μετανάστευση τους αποτελεί το μείζον πρόβλημα ενός συστήματος. Η παρουσία ενός καλύματος είναι απαραίτητη, ενώ η γεωμετρία του συστήματος πρέπει να είναι ικανή να περιορίσει τη διαφυγή και να παγιδεύσει τη συγκέντρωση.

Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη της εξόρυξης, καθώς και η φάση παραγωγής βασίζονται στην έρευνα που έχει προηγηθεί. Η κατασκευή ενός μοντέλου στις 3 διαστάσεις και η οπτική αποτύπωση των ιδιοτήτων του ταμιευτήρα είναι απαραίτητη, προκειμένου να

ληφθούν σημαντικές αποφάσεις, ζωτικής πολλές φορές σημασίας για την επιχείρηση. Προκύπτει, συνεπώς, πως η πλήρης καταννόηση της Γεωλογίας του Ταμιευτήρα κρίνεται αναγκαία και συμβάλλει στην βέλτιστη λειτουργία και αξιοποίηση του κοιτάσματος.

Οι κύριες κατηγορίες, στις οποίες διακρίνονται οι ταμιευτήρες είναι 2, οι ανθρακικοί και οι ψαμμιτικοί. Οι ιδιότητες των δυο αυτών κατηγοριών διαφέρουν και η γεωλογία τους απαιτεί διαφορετική διαχείριση.

2.2 ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ (CARBONATE)

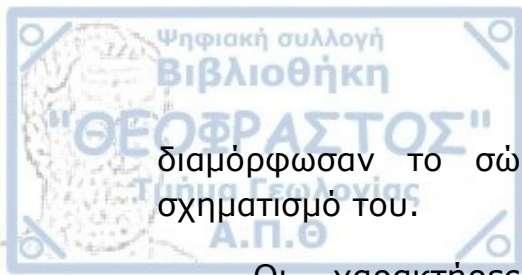
Οι ανθρακικές ενώσεις σχηματίζονται μεταξύ του ανθρακικού ιόντος (CO_3)⁻² και των δισθενών μεταλλικών κατιόντων που υπάρχουν στη φύση, όπως του Μαγνησίου (Mg), του σιδήρου (Fe) και του ασβεστίου (Ca). Ανθρακικά σύμπλοκα σχηματίζονται, ωστόσο, και με άλλα δισθενή μεταλλικά κατιόντα, όπως του Zn, Ba, Sr και του Cu.

Η βασική ιδιότητα που διακρίνει τους ανθρακίτες από τους μη ανθρακικούς σχηματισμούς είναι η διάλυση τους, όταν έρθουν σε επαφή με ιόντα υδρογόνου, παρουσία οξέος. Οι εσωτερικοί δεσμοί στο ανθρακικό ιόν αποδεικνύονται ισχυρότεροι από αυτόν μεταξύ ιόντος και μετάλλου και ως αποτέλεσμα προκύπτει ο σχηματισμός διοξειδίου του άνθρακα και νερού. Ακόμη, μέλη της ομάδας των ανθρακικών παρουσιάζουν διαφορετικό ρυθμό διάλυσης, γεγονός που έχει παρατηρηθεί και επιτρέπει τη διάκριση μελών της ομάδας.

Οι ανθρακικοί ταμιευτήρες αποτελούν ένα τρισδιάστατο σώμα, που απαρτίζεται από ορυκτολογικές φάσεις και ένα δίκτυο πόρων, που αποτελούν το δίκτυο ροής των ρευστών φάσεων. Ο προσδιορισμός της τρισδιάστατης δομής είναι σημαντικός, καθώς επιτρέπει τον προσδιορισμό της καταλληλότερης θέσης για γεώτρηση, τον υπολογισμό του όγκου των υδρογονανθράκων, αλλά και τη βέλτιστη διαχείριση του ταμιευτήρα.

2.3 ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

Τα χαρακτηριστικά των ανθρακικών σχηματισμών βοηθούν στην καταννόηση και περιγραφή της συμπεριφοράς τους ως Ταμιευτήρες. Η προέλευση των ιδιοτήτων τους αποδίδεται σε διάφορους μηχανισμούς και διεργασίες, οι οποίοι επέδρασαν και



διαμόρφωσαν το σώμα είτε σε πρώιμα στάδια είτε μετά το σχηματισμό του.

Οι χαρακτήρες που περιγράφουν τους σχηματισμούς διακρίνονται σε κύριους, δευτερεύοντες και τριτογενείς.

Οι κύριοι αποτελούν γενετικά γνωρίσματα και στην κατηγορία ανήκει ο τεκτονισμός, όπως και ιδιότητες που σχετίζονται με τη διαγένεση και την απόθεση. Ως δευτερεύοντες χαρακτήρες αναφέρονται εκείνοι, οι οποίοι προκύπτουν ως αποτέλεσμα μηχανισμών και εξαρτώνται από τους κύριους. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν η διαπερατότητα, το πορώδες, η πυκνότητα του σχηματισμού και η περιεκτικότητα σε ρευστά. Τέλος, οι τριτογενείς ιδιότητες εξαρτώνται από μη κύριους χαρακτήρες και μέλη της κατηγορίας αποτελούν η ειδική αντίσταση, η αγωγιμότητα και η φυσική ραδιενέργεια.

2.3.1 ΠΡΩΤΟΓΕΝΕΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Περιλαμβάνονται η υφή, ο ιστός, η σύνθεση και οι στρωματογραφικές δομές. Η υφή και ο ιστός δεν αποτελούν ταυτόσημες έννοιες.

Ως υφή ορίζεται το σχήμα, το μέγεθος και η ταξινόμηση των κόκκων στο σχηματισμό, ενώ ο όρος ιστός αναφέρεται στη χωρική ταξινόμηση και προσανατολισμό των κόκκων του πετρώματος. Η σύνθεση αναφέρεται στην ορυκτολογία, ενώ οι στρωματογραφικές δομές αποτελούν ένα χαρακτηριστικό που συναντάται στην διεπαφή μεταξύ ενός ρευστού και ενός ευκίνητου στρώματος. Μηχανισμοί που οδηγούν σε τέτοιου τύπου δομές αποτελούν η συμπαγοποίηση, η υποχώρηση πρανών και απομάκρυνση του ρευστού.

2.3.1.1 ΥΦΗ

Η κοκκομετρία ενός ιζηματογενούς σχηματισμού αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό του, καθώς το μέγεθος των κόκκων, σε συνδιασμό με τη μορφολογία τους μαρτυρά το περιβάλλον απόθεσης (παλαιοπεριβάλλον), αλλά και τις συνθήκες που επικρατούσαν στη περιοχή (τεκτονική, κλίμα).

Ο σχηματισμός ανθρακικών κόκκων, ωστόσο, παρατηρείται σε πλήθος περιβαλλόντων απόθεσης και για το λόγο αυτό δεν μπορεί να ληφθεί το μέγεθος των κόκκων ως ένδειξη περιβάλλοντος απόθεσης. Αντιθέτως, πρέπει να ληφθεί υπόψη η ταξινόμηση του υλικού, ο βαθμός καταπόνησης των κόκκων και η μηχανική αντοχή τους, ώστε να προσδιορίσουμε με ασφάλεια το παλαιοπεριβάλλον.

Οι διάφορες διεργασίες επιδρούν στην υφή του ανθρακικού σχηματισμού. Κόκκοι ανθρακικού υλικού σχηματίζονται και το μέγεθος τους αυξάνεται κατά τη τσιμεντοποίηση, η οποία σχηματίζει συσσωματώματα ανθρακικής σύστασης. Επίσης, το σχήμα τους μεταβάλλεται υπό την επίδραση πιέσεων. Η διαγένεση αποτελεί μία ακόμη σημαντική διεργασία που συμβάλλει στην βελτίωση της ταξινόμησης και συνοχής του ανθρακικού σώματος.

2.3.1.2 ΙΣΤΟΣ

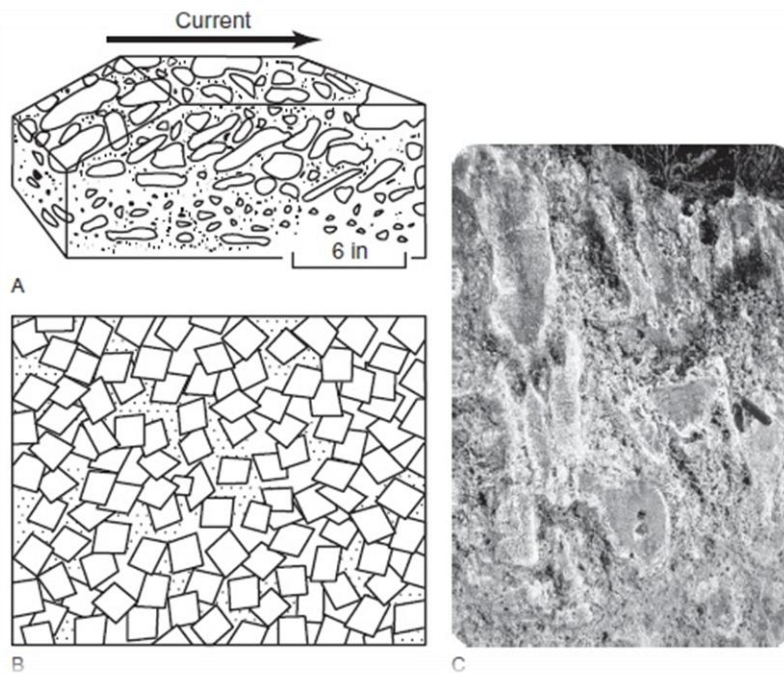
Ο ιστός των ανθρακικών σχηματισμών επηρεάζεται από τις αποθετικές, διαγενετικές και βιογενείς διεργασίες. Η τεκτονική αποτελεί, επίσης, μία σημαντική παράμετρο διαμόρφωσης του όγκου, καθώς περιλαμβάνει διεργασίες όπως την κατάκλαση και τη ρηγμάτωση. Ο ρόλος τους είναι σημαντικός, διότι συμβάλλουν στη διαμόρφωση της τελικής διαπερατότητας.

Ο αποθετικός ιστός προκύπτει από τη χωρική ταξινόμηση των κόκκων ενός κλαστικού πετρώματος. Τα παλαιορεύματα είναι υπεύθυνα για τον προσανατολισμό των κόκκων και κατ'επέκταση ρυθμίζουν την διαπερατότητα του ταμιευτήρα, δηλαδή τη λειτουργία του. Να σημειωθεί πως η αλλαγή της διεύθυνσης ροής του ρεύματος στο χρόνο οδηγεί σε διαφορετικού προσανατολισμού απόθεση.

Έτσι, στον σχηματισμό παρατηρούνται διευθύνσεις με υψηλότερες τιμές διαπερατότητας, ενώ άλλες παρουσιάζουν μικρότερες. Η παρουσία επιμήκων σκελετικών υλικών, όπως σπέκουλες και σκελετοί εχινοειδών, είναι συχνή στους ανθρακικούς ταμιευτήρες.

Ο διαγενετικός ιστός περιλαμβάνει εικόνες ανεπτυγμένων κρυστάλλων, που σχηματίστηκαν κατά τη τσιμεντοποίηση, την ανακρυστάλλωση ή την αντικατάσταση ανθρακικού υλικού. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και δομές που προκύπτουν από τη διάλυση των ανθρακικών αλάτων, όπως τα καρστικά έγκοιλα.

Ο βιογενής ιστός συνδέεται με την εσωτερική μικροδομή των σκελετικών υλικών και τους υφάλους. Η μικροδομή του σκελετικού υλικού πολλών οργανισμών είναι πορώδης και ευθύνεται για την διαπερατότητα του σχηματισμού. Πιο συγκεκριμένα, πόροι εμφανίζονται σε σπόγγους, βρυόζωα και κοράλια, τα οποία αποτελούν μέλη ενός ευρύτερου συστήματος-υφάλου. Η παρουσία τους είναι σημαντική, καθώς επηρεάζει τη γεωμετρία των πόρων και την κατανομή των διακένων, ενώ ευθύνεται για την ανάπτυξη υψηλότερων τιμών διαπερατότητας κατά διευθύνσεις.



Εικόνα 2.3α: Ιστοί ανθρακικών σχηματισμών (Α-αποθετικός, Β-διαγενετικός, Γ-βιογενής)
(ΠΗΓΗ: Geology of Carbonate Reservoirs)

2.3.1.3 ΣΥΝΘΕΣΗ

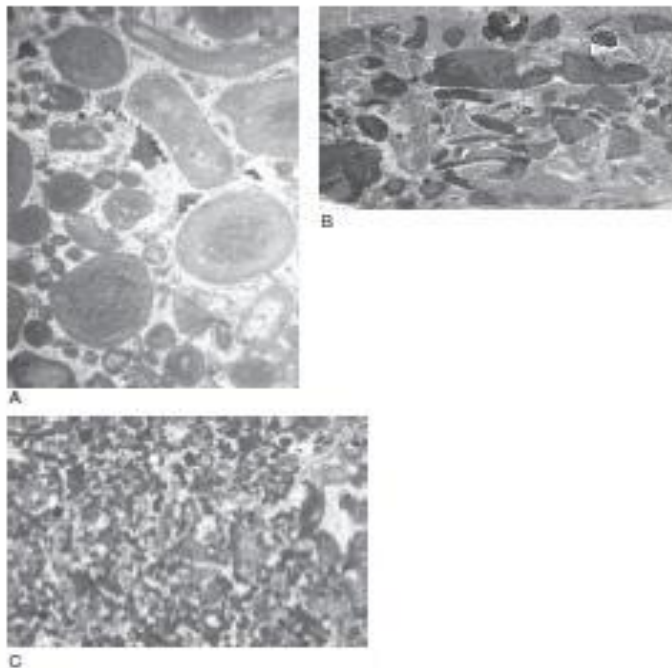
Η σύνθεση των ανθρακικών σχηματισμών αναφέρεται κυρίως στο τύπο των συστατικών, καθώς συχνά αποτελούν μονόμεικτα πετρώματα, ενώ όταν αποτελούνται από περισσότερες από μια ορυκτολογικές φάσεις, δεν αποτελεί στοιχείο που μαρτυρά περιβάλλον απόθεσης.

Οι κόκκοι διακρίνονται σε σκελετικοί και μη σκελετικοί. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν υπολείμματα, ολόκληρα ή μερικά, σκελετικού υλικού φυτών και ζώων (βιοκλάστες). Το σκελετικό υλικό

παρουσιάζει ορυκτολογική αστάθεια, λόγω της σύστασης τους (αραγωνίτης ή/και ασβεστίτης)

Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι επιφλοιωμένοι κόκκοι, τα πελοιειδή, συσσωματώματα κόκκων και κλάστες.

Οι επιφλοιωμένοι κόκκοι που προκύπτουν από χημικές διεργασίες ονομάζονται ωοειδή και πισοειδή και αποτελούν σφαιροειδείς κόκκους, με συγκεντρική ανάπτυξη γύρω από πυρήνα. Το υλικό συνήθως χαρακτηρίζεται ως ασβεστίτης ή αραγωνίτης. Οι κλάστες συνιστούν αποτέλεσμα μηχανικής φθοράς και προέρχονται από σύγχρονα πετρώματα ή παλαιότερα. Μαρτυρούν διάβρωση και αποσάθρωση ανθρακικών σχηματισμών και εκδήλωση νέας ιζηματογένεσης. Οι κλάστες ονομάζονται ενδοκλάστες, όταν τα θραύσματα είναι ημιλιθοποιημένα ανθρακικά ιζήματα, που επαναδιοργανώνονται μέσα στην ίδια περιοχή απόθεσης. Αντιθέτως, οι λιθοκλάστες αντιπροσωπεύουν ξένες λιθολογικές φάσεις, διαφορετικές της αποθετικής περιοχής των ιζημάτων.



Εικόνα 3.3β: Τύποι κόκκων (Α-Ωοειδή και Πισοειδή, Β-Ενδοκλάστες, Γ-Ενδοκλάστες και Πελοιειδή)
(Πηγή: Geology of Carbonate Rocks)

Τέλος, πελοιειδή ονομάζονται οι συγκεντρώσεις μικριτικού ανθρακικού υλικού, σφαιρικής ή ελλειψοειδούς συνήθως μορφής, ενώ το μέγεθος τους είναι παρόμοιο με της άμμου (100-500μm). Χαρακτηρίζουν κυρίως περιβάλλοντα χαμηλής ενέργειας, τα οποία

είναι περιορισμένα και η ύπαρξη τους συνδέεται με την παρουσία φυκιών ή κυανοβακτηρίων (χημική προέλευση).

2.3.1.4 ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ

Οι στρωματογραφικές δομές αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για τον καθορισμό του παλαιοπεριβάλλοντος, όπου πραγματοποιήθηκε η απόθεση. Η δομή διαμορφώνεται από διεργασίες, που επενεργούν στο σχηματισμό και η ποιότητα του ταμιευτήρα επηρεάζεται άμεσα από αυτές.

Η απόθεση σε περιβάλλοντα χαμηλής ενέργειας επιτρέπει το σχηματισμό οριζόντιων στρωμάτων (αύξηση διαπερατότητας στον οριζόντιο άξονα), ενώ σε περιοχές με μεταβαλλόμενο ρυθμό τροφοδοσίας παρατηρείται διασταυρωτή στρώση και διαφοροποίηση στο πορώδες και την διαπερατότητα (ανομοιογένεια).

Η συμπύκνωση οδηγεί στο σχηματισμό στυλολίθων, οι οποίοι λειτουργούν ως φράγματα και ευθύνονται για τη μείωση του πορώδους, ενώ η αποξήρανση προκαλεί ρωγματώσεις, αυξάνοντας το πορώδες. Ωστόσο, αυτό δεν εξασφαλίζει ένα δίκτυο με ανεπτυγμένη επικοινωνία και απαιτείται περαιτέρω μελέτη αυτού.



A



B

Εικόνα 2.3γ: Δομές (Α-Διασταυρωτή στρώση, Β- "Mudcracks" λόγω αποξήρανσης)

(Πηγή: <http://www.virtual-geology.info/studentpages> και <https://blogs.agu.org/mountainbeltway>)

2.3.2 ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Δευτερογενείς ιδιότητες αποτελούν το πορώδες, η διαπερατότητα και η φαινόμενη πυκνότητα, καθώς εξαρτώνται από πρωτογενείς χαρακτήρες. Ωστόσο, αποτελούν σημαντικές παραμέτρους, που καθορίζουν την ποιότητα του ταμιευτήρα και με τις κατάλληλες μεθόδους επιδιώκεται ο ακριβής προσδιορισμός τους.

2.3.2.1 ΠΟΡΩΔΕΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, το πορώδες αποτελεί μια σημαντική ιδιότητα του ταμιευτήρα και πιο συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον συγκεντρώνει το ενεργό πορώδες. Το συνολικό πορώδες προκύπτει από το άθροισμα ενεργού και υπολειματικού, δηλαδή του όγκου των πόρων που δεν αναπτύσσουν δίκτυο ροής ρευστών.

Το πορώδες μεταβάλλεται με την υφή, τον ιστό και τη γεωμετρία των ασυνεχειών. Στους κλαστικούς σχηματισμούς μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το σχήμα των κόκκων και τη ταξινόμηση τους, ενώ στους βιογενείς με μικροδομή των σκελετικών υλικών. Σε κατακερματισμένους σχηματισμούς, το πορώδες ρυθμίζεται από τη γεωμετρία των ρωγματώσεων, δηλαδή από το πλάτος τους, την εμμονή τους και τη μεταξύ τους απόσταση.

Οι σύγχρονοι ανθρακικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν τιμές πορώδους μεταξύ 40-70%, ενώ παλαιότεροι μόλις 5-15%. Η ραγδαία μείωση του συνδέεται, μεταξύ πολλών παραγόντων, με τη τσιμεντοποίηση, τη συμπαγοποίηση ή με συνδιασμό των 2. Το βάθος ταφής, επίσης, συμβάλλει στη ρύθμιση του πορώδους σε μεγαλύτερο βαθμό από τη διάρκεια ταφής.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως σύμφωνα με μελέτες η μείωση του πορώδους σε μικρά βάθη οφείλεται στη μηχανική συμπύκνωση, ενώ σε μεγάλα βάθη στο συνδιασμό μηχανικής και χημικής συμπύκνωσης.

Αυτό επιβεβαιώνεται από το γεγονός πως δολομίτες με βάθος ταφής μεγαλύτερο των 2000μ. παρουσιάζουν υψηλότερο πορώδες από ασβεστολίθους, που τάφηκαν στο ίδιο βάθος. Η αντοχή των δολομιτών σε χημικές και μηχανικές διεργασίες τους καθιστά πιο ανθεκτικούς.

2.3.2.2 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Η διαπερατότητα, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, αποτελεί μέτρο του όγκου νερού, που ρέει σε πορώδη σχηματισμό σε συνάρτηση με το χρόνο. Έχει παρουσιασθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο και θα αναλυθεί ξανά στη συνέχεια, σε σχέση με κάθε τύπο ανθρακικού ταμιευτήρα.

Να σημειωθεί μόνο πως η διαπερατότητα συνδέεται με τη γεωμετρία και τη μορφολογία των κόκκων και όχι με το μέγεθος των πόρων. Έτσι, καταννοούμε πως ένας διαπερατός σχηματισμός είναι πορώδης, αλλά ένας έντονα πορώδης σχηματισμός δεν χαρακτηρίζεται πάντοτε διαπερατός, ενώ είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τη σχέση μεταξύ των πόρων και το πως ορίζονται στο χώρο.

2.4 ΑΠΟΘΕΤΙΚΟΙ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ

Η ενότητα αυτή εστιάζει στα περιβάλλοντα απόθεσης, στο πορώδες (λόγω απόθεσης), αλλά και σε ιδιότητες των ανθρακικών ταμιευτήρων, που οφείλονται επίσης στη διεργασία της ιζηματογένεσης. Ακολουθίες σχηματίζονται στο χώρο, καθώς τα περιβάλλοντα, που είναι διακριτά μεταξύ τους, διαδέχονται το ένα το άλλο και χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ιδιότητες.

Οι αποθετικοί ταμιευτήρες χαρακτηρίζονται από πρωτογενές πορώδες, δηλαδή από πορώδες που αναπτύχθηκε αποκλειστικά κατά την ιζηματογένεση. Οι ταμιευτήρες αυτοί αποτελούν την εξαίρεση, καθώς συχνά τροποποιούνται από διαγενετικές και τεκτονικές διεργασίες. Έτσι, το πραγματικό πορώδες, που παρατηρεί κανείς, αποτελεί μία υβριδική φάση, μεταξύ των ακραίων αυτών μελών.

Στόχος αποτελεί πάντοτε η κατασκευή ενός πετρογραφικού μοντέλου. Η λήψη δεδομένων γίνεται μέσω γεωτρήσεων και απαιτείται ικανοποιητικός όγκος πληροφοριών, ώστε να είναι δυνατός ένας τρισδιάστατος συσχετισμός. Μέθοδοι γεωστατιστικές είναι διαθέσιμες για αυτό το σκοπό, αλλά δεν αποτελούν αντικείμενο της εργασίας.

Τα βήματα που ακολουθούνται για τη κατασκευή του μοντέλου προϋποθέτουν έναν αρχικό συσχετισμό μεταξύ ιστού και πετρογραφικών ιδιοτήτων. Έπειτα, πρέπει να αναγνωρισθούν οι διεργασίες που οδήγησαν στο τελικό αυτό γεωλογικό αποτέλεσμα και να κατασκευασθεί μία στρωματογραφική ακολουθία. Τα σώματα που

είναι σημαντικά από πετρογραφική άποψη, λαμβάνονται σοβαρά υπόψη.

Σημαντικό, συνεπώς, είναι να αναγνωρίζει κάποιος τους χαρακτήρες ενός ιζηματογενούς σχηματισμού, ο οποίος δεν έχει διαταραχθεί, όπως τον ιστό, την υφή και την ορυκτολογία του. Η ένταξη του σε μία από τις γενετικές κατηγορίες αποτελεί μία επιλογή που μπορεί να επηρεάσει την πορεία της πετρογραφικής μελέτης και να οδηγήσει στη λήψη λανθασμένων αποφάσεων.

2.4.1 ΠΟΡΩΔΕΣ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗΣ (ΑΠΟΘΕΣΗΣ)

Ως **ιζηματογένεση** ορίζεται η γεωλογική διεργασία, κατά την οποία υλικό μεταφέρεται, συσσωρεύεται και αφού μετασχηματισθεί, σχηματίζει συμπαγή, συνεκτικά πετρώματα.

Το υλικό που συσσωρεύεται μπορεί να αποτελείται από κόκκους αποσαθρωμένου σχηματισμού (κλάστες), καθιζήσεις κρυσταλλικής μορφής (πχ μικρίτης) ή υλικό βιογενούς προέλευσης, όπως σκελετικά τμήματα οργανισμών.

Από το υλικό ιζηματογένεσης προκύπτουν κλαστικοί, βιογενείς ή χημικοί ανθρακικοί σχηματισμοί. Οι κλαστικοί παρουσιάζουν δύο βασικούς τύπους πορώδους, το **διακοκκικό** ή περικρυσταλλικό και το **ενδοκοκκικό**.

Το **διακοκκικό** αναφέρεται στους πόρους μεταξύ των κόκκων και αναπτύσσεται σε κάθε ιζηματογενές πέτρωμα, κατά την απόθεση του. Εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων, τη διαλογή, τη καμψυλότητα και τη σφαιρικότητα του υλικού. Συνήθως, όπως θα αναφερθεί στην επόμενη ενότητα, μειώνεται κατά τη Διαγένεση.

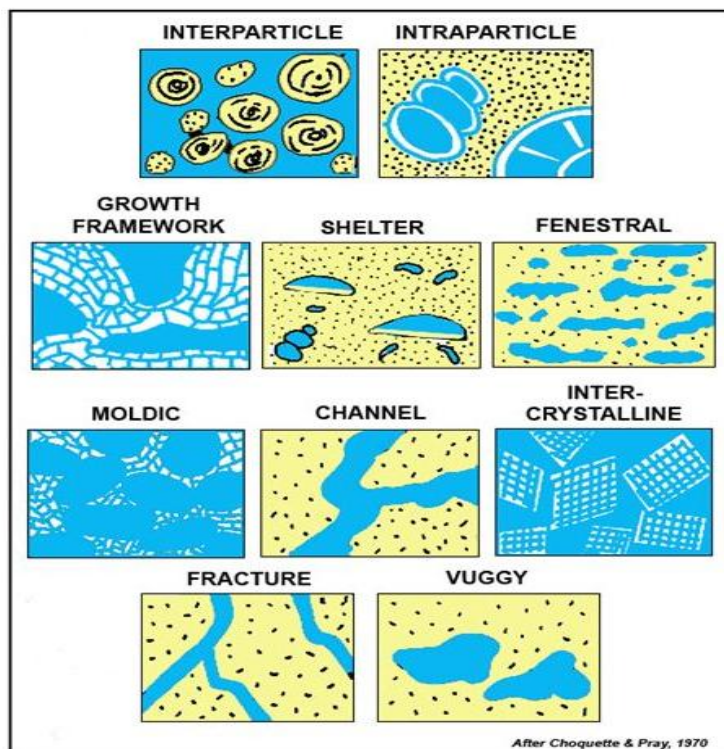
Το **ενδοκοκκικό** αναφέρεται στους πόρους εντός του υλικού, μπορεί να παρατηρηθεί σε σκελετικά υλικά οργανισμών ή διαγενετικά τροποποιημένους κόκκους. Τα βρυόζωα, τα κοράλλια, οι σπόγγοι, αλλά και πολλοί ακόμη οργανισμοί που ζουν σε υφάλους συνιστούν σκελετικό υλικό, με εσωτερικό πορώδες. Μαλάκια, όπως οι ρουδιστές, έχουν μεγάλες εσωτερικές κοιλότητες, που συνεισφέρουν δραματικά στο τελικό πορώδες, όχι όμως και στη διαπερατότητα.

Πιο σπάνιες μορφές αποτελούν τα **γεωπέταλα** ή προστατευτικό πορώδες και το **πορώδες ξήρανσης** ή birds-eye.

Τα **γεωπέταλα** δεν είναι τόσο συνηθισμένα στους κλαστικούς ανθρακικούς σχηματισμούς, ώστε να αποτελέσουν σημαντικό παράγοντα για το τελικό πορώδες. Τέτοιου τύπου πόροι αναπτύσσονται, όταν μεγαλύτεροι κόκκοι λειτουργούν ως «σκεπή» και δεν επιτρέπουν την πλήρωση του υποκείμενου τους χώρου με υλικό. Η δομή αυτή διατηρείται και αποτελεί.

Το **πορώδες ξήρανσης** προκύπτει, όταν η οργανική ύλη αποσυντίθεται και κατά τη διαδικασία αυτή εκλύει αέρια. Το μέγεθος τους είναι της τάξης μερικών χιλιοστών έως λίγων εκατοστών, εμφανίζονται επιμήκεις και αναπτύσσονται παράλληλα στη στρώση.

Σε περίπτωση που έρχονται μεταξύ τους σε επαφή και δεν έχουν πληρωθεί με εναποθέσεις ανθρακικού ασβεστίου, παρουσιάζουν υψηλή διαπερατότητα, παρόλο που το πορώδες είναι σχετικά χαμηλό.



Εικόνα 2.4α: Τύποι πορώδους ανθρακικών σχηματισμών. Στους ιζηματογενείς ανθρακικούς ταμιευτήρες συναντούμε το ενδοκοκκικό (intraparticle), το διακοκκικό (interparticle), τα γεωπέταλα (shelter) και τα birds-eye/fenestral. Οι άλλες μορφές εμφανίζονται σε διαγενετικούς και ρωγματωμένους ταμιευτήρες.

Πηγή: <http://www.sepmstrata.org/CMS/Images/PorosityChoquettePray70>

Συνεπώς, οι πετρογραφικές ιδιότητες των ανθρακικών ταμιευτήρων είναι πολυσύνθετες και απαιτείται μελέτη του κάθε ταμιευτήρα. Η συμμετοχή του σκελετικού υλικού επηρεάζει το πορώδες και η ανατομία του δεν επιτρέπει την ευρύτερη κατηγοριοποίηση των σχηματισμών.

Ο συνδιασμός της ανατομίας και του ιστού, που προκύπτει από την ιζηματογένεση, των κλαστικών υλικών καθορίζει την λειτουργία και την αποδοτικότητα του ταμιευτήρα.

2.4.2 ΑΠΟΘΕΤΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΚΑΙ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

Οι ανθρακικοί σχηματισμοί αποτίθενται κατά κανόνα σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Η διαφοροποίηση, ωστόσο, ανάμεσα σε ανθρακικά πετρώματα δημιουργεί την ανάγκη για αναγνώριση τομέων στο θαλάσσιο χώρο, δηλαδή υπο-περιβαλλόντων, με διακριτά χαρακτηριστικά και ιδιότητες. Οι παράκτιες θίνες συμπεριλαμβάνονται, καθώς εντοπίζονται στην παραλία, δηλαδή κοντά στα θαλάσσια περιβάλλοντα.

Οι λιμναίες ανθρακικές αποθέσεις, οι οποίες είναι αρκετά συνηθισμένες, δεν αποτελούν συνήθως ανθρακικούς ταμιευτήρες. Ωστόσο, να σημειωθεί πως μη θαλάσσιοι ανθρακικοί σχηματισμοί περιέχουν σε κάποιες περιπτώσεις μεγάλη ποσότητα υδρογονανθράκων, που χαρακτηρίζονται βιτουμενιούχοι (shale oil). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται όταν οι πλούσιοι σε κηρογόνο ανθρακίτες δε φθάσουν σε επίπεδο ωρίμανσης, που σχηματίζει υδρογονάνθρακες.

Οι τομείς διαχωρίζονται με βάση τις πετρογραφικές ιδιότητες τους. Κάθε τομέας διαδέχεται τον άλλο και σχηματίζεται μία συνεχής ακολουθία απόθεσης, ενώ τα όρια δεν είναι απόλυτα, καθώς οι μεταβολές παρατηρούνται βαθμιαία.

Ο ευρύτερος χώρος απόθεσης ανθρακικών ιζημάτων διακρίνεται σε επτά υποπεριβάλλοντα, σύμφωνα με τον Wayne M. Ahr (2008). Πιο συγκεκριμένα, διακρίνεται στα εξής περιβάλλοντα:

- **Παραλιακό περιβάλλον**, με πιθανή παρουσία θινών
- **Παλιρροιακό πεδίο**, που περιλαμβάνει τα διάφορα γειτονικά ύδατα λιμνών
- **Περιβάλλον λιμνοθάλασσας**, το οποίο βρίσκεται πριν τη συστάδα φραγματικών νησίδων
- **Νηριτικό Περιβάλλον**

- **Περιβάλλον ανώτερης κατωφέρειας** (slope break), που συναντάται στο όριο υφάλου και κατωφέρειας
- **Υφαλοπρανές** (slope) και **όριο βαθιάς υφαλοκρηπίδας** (toe of slope)
- **Ωκεάνια Λεκάνη**, που ανφέρεται σε μεγάλα βάθη και πελαγική κυρίως ιζηματογένεση

Οι ζώνες που αναφέρονται παραπάνω θα αναλυθούν μία προς μία και θα γίνει αναφορά στις πετρογραφικές ιδιότητές τους.

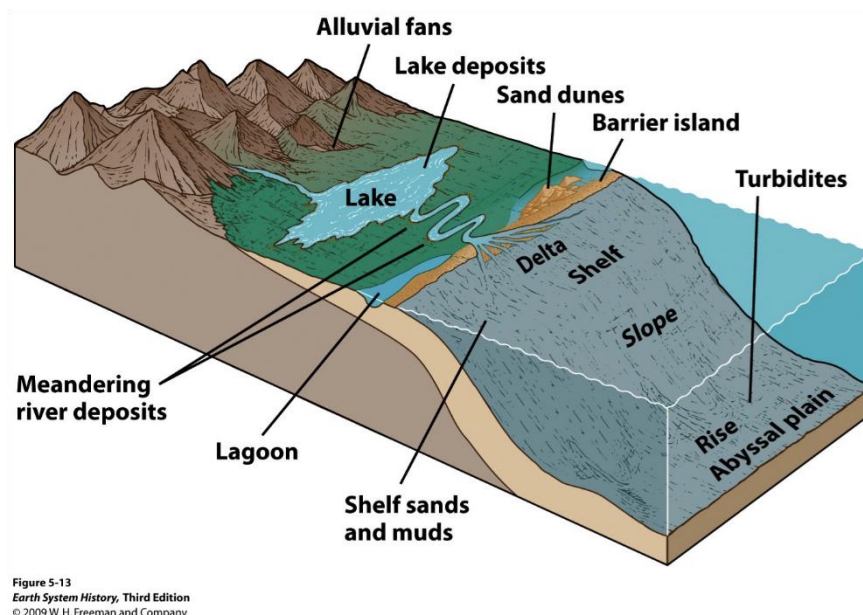


Figure 5-13
Earth System History, Third Edition
© 2009 W.H. Freeman and Company

Εικόνα 2.4β: Αποθετικά περιβάλλοντα (διακρίνονται τα ηπειρωτικά, τα μεταβατικά και τα θαλάσσια)
Πηγή: https://classconnection.s3.amazonaws.com/900/flashcards/2771900/png/depositional_envmnts1360714480033

2.4.2.1 ΠΑΡΑΛΙΑΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Η παραλία αποτελεί το όριο μεταξύ στεριάς και θάλασσας και εκτείνεται από τον αιγιαλό προς την ενδοχώρα. Οι παραλίες συνδέονται με την ενδοχώρα, όμως αρκετές φορές η σύνδεση διακόπτεται από την παρουσία μίας λίμνης, ένα φαινόμενο που οδηγεί στην ανάπτυξη των Συστάδων Φραγματικών Νησίδων (barrier islands). Οι θίνες απαιτούν επαρκή τροφοδοσία και δράση ισχυρών, ευνοϊκών ανέμων, που μεταφέρουν το υλικό και όταν οι προϋποθέσεις αυτές δε τηρούνται, δεν παρατηρείται ανάπτυξη αυτών των δομών.

Οι διεργασίες που οδηγούν στο σχηματισμό των παραλιών και των θινών, αλλά και στη διαμόρφωση των τελικών πετρογραφικών ιδιοτήτων έχουν μελετηθεί από πολλούς ερευνητές, μεταξύ αυτών από τους Abegg κ.α (2001)

Κύριος μηχανισμός, που ευθύνεται για τις ιζηματογενείς διεργασίες, συνιστούν τα **κύματα** του θαλάσσιου χώρου. Η γέννηση τους αποδίδεται στη μεταφορά ορμής από τον άνεμο προς το νερό κατά την πρόσκρουση του στην υδάτινη επιφάνεια. Το κλίμα της περιοχής, η ταχύτητα του ανέμου και η διάρκεια πνοής του ανέμου αποτελούν τους κύριους παράγοντες που καθορίζουν το μέγεθος των κυμάτων.

Το παραλιακό περιβάλλον διακρίνεται σε 3 ενότητες: την κατώτερη, τη μέση και την ανώτερη. Το κλίμα και το υδροδυναμικό καθεστώς καθορίζει τα χαρακτηριστικά της κάθε ενότητας.

Στην κατώτερη ενότητα παρατηρείται μεταφορά της άμμου από επιφανειακά κύματα σε βάθος περίπου ίσο με 10 μέτρα. Χαρακτηρίζεται από τη ταλαντευόμενη κίνηση των κυμάτων Airy

Η μέση ενότητα χαρακτηρίζεται από ρεύματα μίας κατεύθυνσης και όχι από κίνηση-ταλάντωση των κυμάτων. Τα παράκτια ρεύματα σχηματίζονται έμμεσα από λοξά θραυόμενους κυματισμούς και είναι παράλληλα προς την ακτή. Η εγκάρσια προς την ακτή ορμή του κυματισμού απορροφάται από τη θραύση, ενώ η παράλληλη προς την ακτή ορμή είναι εκείνη που διαμορφώνει το ρεύμα.

Η ανώτερη ενότητα είναι η ζώνη θραύσης των κυμάτων, όπου σχηματίζονται τα κεκλιμένα στρώματα της παραλίας. Κυρίαρχη φυσική διεργασία αποτελούν τα κύματα, που βρίσκονται στη ζώνη θραύσης και η έκπλυση, που παρατηρείται κατα μήκος της παραλίας, ανοδικά ή καθοδικά.

Στο σημείο αυτό να σημειωθεί πως οι ανθρακικές θίνες περιορίζονται σε παράκτιες ζώνες, που συνδέονται με παραλίες, καθώς αυτές αποτελούν τη πηγή τροφοδοσίας. Τα ανθρακικά σωματίδια δεν μεταφέρονται συνήθως σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ το πρωτογενές πορώδες στις παραλίες και τις θίνες είναι υψηλό. Είναι, ωστόσο, ιδιαίτερα ευαίσθητα στην πρώιμη συμπύκνωση, η οποία συνοδεύεται από μείωση πορώδους.

2.4.2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΛΙΑΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Οι βασικές πετρογραφικές ιδιότητες ενός σχηματισμού περιλαμβάνουν τον ιστό, τη σύσταση των κόκκων και την ύπαρξη απολιθομάτων (τύπο και ποικιλομορφία).

Οι ανθρακικής σύστασης παραλίες σε τροπικά περιβάλλοντα απαρτίζονται κυρίως από μη σκελετικό υλικό, όπως ωοειδή, κλάστες και πελοειδή, όμως σε πιο εύκρατες περιοχές αποτελούνται κυρίως από σκελετικό υλικό. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει πως το κλίμα καθορίζει την παραγωγή ανθρακικού ασβεστίου και την προέλευση του, δηλαδή αν είναι βιογενής, χημική ή κλαστική.

Οι ωολιθικές παραλίες είναι τυπικά λεπτοκρυσταλλικές έως μεσόκοκκες, ενώ οι θίνες που αποτελούνται από βιοκλάστες περιέχουν μεσόκοκκα υλικά έως κόκκους μεγέθους άμμου. Η ταξινόμηση στις παραλίες και τις θίνες χαρακτηρίζεται συνήθως πολύ καλή, ειδικά στην ανώτερη ενότητα της παραλίας και στις θίνες, όπου η δράση των κυμάτων συμβάλλει στη κατανομή του υλικού.

Οι θίνες και η ανώτερη παραλιακή ενότητα κατατάσσονται στους κοκκόλιθους (grainstone). Το αρχικό πορώδες διατηρείται, ως κόκκοι χαρακτηρίζονται τα τεμάχια με μέγεθος $>20\mu\text{m}$, ενώ οι μικρότεροι κρύσταλλοι αποτελούν το υλικό πλήρωσης (συνήθως πολύ μικρότεροι).

Το αρχικό πορώδες είναι μεταξύ 40-75%, ενώ δεν παρατηρείται το φαινόμενο της δολομιτίωσης. Η εμφάνιση των ταμιευτήρων αυτών είναι συνηθισμένη στο Μεσοζωικό και Τριτογενές της Βορείου Αφρικής (π.χ κοίτασμα Zelten).

Η μέση ενότητα αποτελεί μετάβαση στη νηριτική φάση και περιέχει κοκκόλιθους, αλλά και σωρολίθους, δηλαδή από κοκκοστηριζόμενους ασβεστολίθους, με μικρή συμμετοχή ιλύος. Η κατώτερη ενότητα είναι πλούσια σε ιλύ και χαρακτηρίζεται από **βακόλιθους** (wackestones) και **πηολίθους** (mudstones), ταμιευτήρες με ποσοστό συμμετοχής κόκκων μεγαλύτερο και μικρότερο του 10% αντίστοιχα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι κόκκοι σε συμπλέγματα παραλίας-θινών προέρχονται από σκελετικό υλικό, αλλά και κλάστες μη βιογενούς προέλευσης. Η πλειοψηφία των τροπικών παραλιών αποτελούνται από μη σκελετικές άμμους, πλούσιες σε αραγωνιτικό

υλικό, όπως Ωοειδή και Πελοειδή, ενώ οι πιο εύκρατες περιοχές από βιοκλαστικές άμμους, δίχως αραγωνιτικά υλικά.

Ο βιόκοσμος διαφοροποιείται στις παραλίες και καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το κλίμα. Η τροπική ζώνη παράγει αραγωνιτικό υλικό και περιλαμβάνει φωτότροφους οργανισμούς, ενώ οι πιο εύκρατες περιοχές παράγουν ασβεστιτικό υλικό και περιλαμβάνουν ετερότροφους οργανισμούς. Η ποικιλομορφία των παραλιακών συστημάτων επηρεάζεται από την αλμυρότητα του νερού, τη μορφολογία της παραλίας και τη θερμοκρασία των υδάτων.

Στις εύκρατες περιοχές παρατηρείται έντονη παρουσία φυκών, τα οποία απαρτίζουν ιδανικό περιβάλλον για μαλάκια, βρυζώα και άλλους οργανισμούς. Τα θραύσματα τους αποτελούν μεγάλο μέρος της παραλιακής άμμου και των θινών. Αντίθετα, στις τροπικές περιοχές τα αραγωνιτικά ωοειδή σχηματίζονται σε παράκτιο περιβάλλον και η μεταφορική ικανότητα του νερού οδηγεί το υλικό στον παράλιο χώρο. Ιχνοασπολιθώματα εμφανίζονται με τη μορφή πατημασιών, ενώ συχνά διατηρείται συχνά υλικό του ριζικού συστήματος των φυτικών οργανισμών.

Η ακολουθία παραλίας-θινών μπορεί να αποτελεί την επαφή ξηράς και θάλασσας, όμως είναι πιθανή η αποκοπή της παραλίας (συστάδες φραγματικών νησίδων). Κρίνεται σημαντικό να αναγνωρίσει ο ερευνητής τη περίπτωση, καθώς η παρουσία ελωδών ιζημάτων ή εβαποριτών μπορεί να λειτουργήσει ως μηχανισμός παγίδευσης. Πιο συγκεκριμένα, σε μη αποκομμένες παραλίες δεν είναι καλή η δυνατότητα παγίδευσης.

Η παρουσία θινών δεν ενισχύει τη δυνατότητα παγίδευσης, μπορεί όμως να δημιουργήσει προοπτικές ανάπτυξης ταμιευτήρα. Να σημειωθεί, ωστόσο, πως το πορώδες και η διαπερατότητα των θινών μειώνεται δραματικά κατά τη διαγένεση και σπάνια εμφανίζονται ως παραγωγικοί ταμιευτήρες.

Τέλος, τα παραλιακά πετρώματα μπορούν να υποστούν διαγένεση, λόγω της τοπικής υδρολογίας. Ο βαθμός κορεσμού των υδάτων ως προς κάθε ανθρακική φάση αποτελεί σημαντική παράμετρο και θα αναλυθεί στην ενότητα που αφορά τη διαγένεση.

2.4.2.3 ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΚΟ ΠΕΔΙΟ ΚΑΙ ΛΙΜΝΟΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ

Στο παλιρροιακό πεδίο επικρατεί η ιλύς, καθώς προστατεύεται από θαλάσσια ρεύματα και κύματα. Η τάξη μεγέθους του υλικού των πεδίων δε δημιουργεί προοπτική για ανάπτυξη πρωτογενούς πορώδους, ενώ σε περιοχές, που χαρακτηρίζονται από ξηρό κλίμα, είναι πιθανή η παρουσία εβαποριτών.

Το ενεργειακό επίπεδο των παλιρροιακών πεδίων είναι χαμηλό και η απουσία κυμάτων δεν ευνοεί συγκέντρωση πιο αδρόκοκκου υλικού. Έτσι, η ανάπτυξη πορώδους είναι τοπική, σε θέσεις σχετικά πιο αδρόκοκκες και σε ζώνες όπου αναπτύσσεται παραθυροειδές πορώδες (fenestral). Το παραθυροειδές πορώδες προκύπτει κατά τη ξήρανση των παλιρροιακών ιζημάτων, με αποτέλεσμα το σχηματισμό κοιλοτήτων. Η ταχεία πολλές φορές πλήρωση των κοιλοτήτων με ιζήματα περιορίζει το ποσοστό εμφάνισης του.

Το παλιρροιακό πεδίο διακρίνεται σε 3 ζώνες. Πιο συγκεκριμένα, διακρίνεται σε:

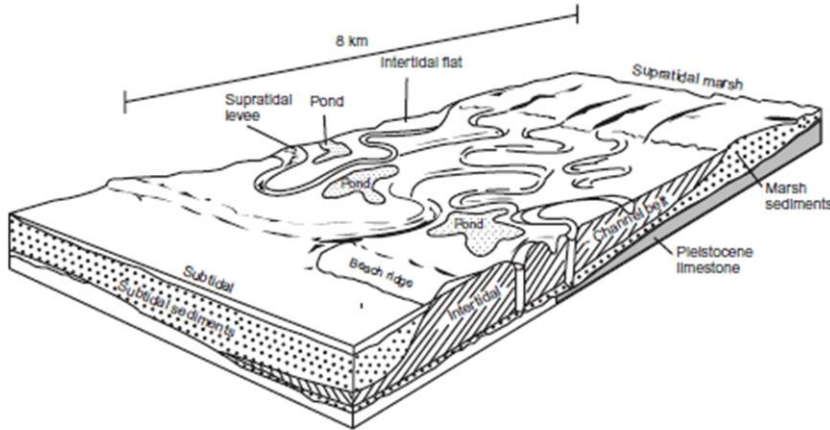
- Υγρή παλιρροιακή ζώνη ή υποπαλιρροιακή, που ταυτίζεται με τα λιμνοθαλάσσιο περιβάλλον ή θέσεις που επικοινωνούν με ωκεάνια ύδατα
- Περιοδικά υγρή ζώνη ή μεσοπαλιρροιακή, που έχει τη μορφή καναλιών μεταξύ ξηράς και θάλασσας
- Ξηρή ζώνη ή επιπαλιρροιακή, που βρίσκεται επάνω από τη συνήθη παλίρροια

Η **υποπαλιρροιακή ζώνη (subtidal zone)** μπορεί να αποτελέσει μία λιμνοθάλασσα ή κάποια ροή-είσοδος ωκεάνιων υδάτων στη ξηρά. Ο χαρακτήρας των ιζημάτων καθορίζεται από το κλίμα και τον όγκο του νερού, που ανταλλάσσεται μεταξύ ανοιχτής θάλασσας και ξηράς.

Η περιορισμένη κυκλοφορία νερού, σε συνδυασμό με πιο ξηρό κλίμα, οδηγεί σε απόθεση εβαποριτών και μειωμένη συγκέντρωση ιλύος. Σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από πιο υγρό κλίμα, αλλά και συνεχή κυκλοφορία νερού, ευνοείται η απόθεση ιλύος με ασβέστη, δηλαδή CaO (lime mud).

Η ζώνη αυτή διακρίνεται σε ρηχή και βαθιά. Στο ρηχό τμήμα της αφθονούν επιφλοιωτικοί οργανισμοί και ασβεστολιθιά φύκη, ενώ επιβιώνουν και μερικά ασπόνδυλα, όπως τρηματοφόρα, σκώληκες,

βρυόζωα. Αντίθετα, στο βαθύτερο τμήμα της συναντώνται βενθονικοί οργανισμοί, όπως και ασβεστολιθικά φύκη.



Εικόνα 2.4γ: Ιδεατό μοντέλο παλιρροιακού περιβάλλοντος στο Andros Island, Bahamas. Διακρίνονται τα κανάλια ροής, καθώς και οι λίμνες μεταξύ αυτών
(Πηγή: Geology of Carbonate Rocks, Ahr.W.M)

Τα ρεύματα που υποχωρούν μεταφέρουν την ασβεστιτική ιλύ στην **μεσοπαλιρροιακή ζώνη (intertidal zone)** μεταξύ υγρής και ξηρής ζώνης. Η κίνηση αυτή οδηγεί σε απόθεση ιλύος και αποστράγγιση της ζώνης, έως την επόμενη εισροή υδάτινου όγκου. Η μεταβατική αυτή ζώνη εκτίθεται σε αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες, σε ημερίσια σχεδόν βάση.

Το νερό κινείται εντός καναλιών και ο όγκος του καθορίζει το βάθος τους. Μεγάλοι όγκοι νερού και ρεύματα υψηλής σχετικά ταχύτητας υποσκάπτουν κανάλια βαθύτερα από 1 μέτρο. Το μέγεθος του καναλιού μειώνεται σημαντικά σε θέσεις, που είναι κοντά στη ξηρά.

Όσον αφορά την πανίδα της μεσοπαλιρροιακής ζώνης, αναπτύσσονται κυρίως κυανοβακτήρια και οργανισμοί, που προσαρμόζονται σε ακραίες περιβαλλοντικές μεταβολές, μεταξύ των οποίων τα γαστερόποδα, μερικά βενθονικά τρηματοφόρα, μαλάκια και ασβεστολιθικά φύκη. Η εναλλαγή μεταξύ αερόβιων και αναερόβιων συνθηκών προσδίδει στις αποθέσεις δομές ξήρανσης, ενώ εμφανίζονται συχνά ιλυώδεις επιφάνειες, που έχουν υποστεί βιοαναμόχλευση και βιοδιάτρηση.

Στην **επιπαλιρροιακή ζώνη (supratidal zone)**, η αφυδάτωση συνιστά την κύρια περιβαλλοντική διεργασία. Η

παρουσία υδάτων στη ζώνη αυτή είναι σπάνια και παρατηρείται συνήθως, λόγω καταιγίδων/ισχυρών βροχοπτώσεων ή πρωτοφανών σε μέγεθος παλινροιών.

Συχνά υπερβαίνει το επίπεδο κανονικής υψηλής παλίρροιας και χαρακτηρίζεται από χαμηλή βιοποικιλότητα, η οποία περιλαμβάνει λίγα μαλάκια, ελάχιστα τρηματοφόρα και κυανοβακτήρια.

Προϊόντα της ζώνης αυτής αποτελούν οι λασπορωγμές (mudcrack), οι παραθυροειδείς πόροι και οι στρωματόλιθοι. Η διάβρωση των ρωγμών οδηγεί σε σχηματισμό ενδοκλαστών, που διαθέτουν διακοκκικό πορώδες. Η εμφάνιση τους, όμως, δεν είναι εκτεταμένη και δε συγκεντρώνει ενδιαφέρον η αναζήτηση τους. Έχει παρατηρηθεί πως η πλειοψηφία των ταμιευτήρων, που προέρχονται από το περιβάλλον αυτό, έχει υποστεί διαγένεση.

Να σημειωθεί πως αναπτύσσεται συνήθως σε παράκτιες, αλμυρές λίμνες και σε περίπτωση που η περιοχή χαρακτηρίζεται από ξηρό-ημίξηρο κλίμα είναι πιθανός ο σχηματισμός εβαποριτών και η μετάπτωση της επιπαλίρροιακής ζώνης σε εβαποριτική.

2.4.2.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ-ΛΙΜΝΟΘΑΛΑΣΣΩΝ

Οι 3 ζώνες που διακρίνονται έχουν αναφερθεί στην προηγούμενη ενότητα. Οι ιζηματογενείς ακολουθίες διαφοροποιούνται στα διάφορα πεδία και επηρεάζονται από το κλίμα, τη γεωμορφολογία της περιοχής αλλά και από το υδρολογικό καθεστώς.

Στην **υγρή ζώνη** παρατηρείται ένα μείγμα αυτόχθονου θαλάσσιας προέλευσης υλικού και αλλόχθονων αλλοχημικών, με προέλευση από την ξηρή και περιοδικά υγρή ζώνη. Η υγρή ζώνη χαρακτηρίζεται από φρεατική διαγένεση, καθώς είναι πάντα ενυδατωμένη και υφή περιβάλλοντος χαμηλού ενεργειακού επιπέδου.

Όσον αφορά το ρυθμό ιζηματογένεσης, καθορίζεται από το ρυθμό παραγωγής υλικού και από το ρυθμό τροφοδοσίας από άλλες θέσεις. Η τροφοδοσία επηρεάζεται από τη συχνότητα εμφάνισης καταιγίδων, αλλά και από το υδρολογικό καθεστώς. Τα απολιθώματα μπορούν ποικίλλουν σε είδος και προέλευση, μιας και το υλικό που

εντοπίζεται προέρχεται είτε από τη θάλασσα είτε από τη περιοχή της ηπείρου.

Η **ενδιάμεση ζώνη** διαφοροποιείται προβλέψιμα. Ο αριθμός και οι διαστάσεις των καναλιών ροής ποικίλει, όμως χαρακτηρίζονται πάντα από τη διαβρωτική βάση και τις ανώτερες θέσεις, που πληρούνται με υλικό. Μεταξύ των καναλιών αναπτύσσονται λίμνες, που διαφοροποιούνται σε μέγεθος και σχήμα. Οι λίμνες αυτές συνήθως περιέχουν εκτεταμένες αποθέσεις μικρίτη και φύκη, ενώ σε περιοχές ξηρού κλίματος παρατηρείται απόθεση εβαποριτών στις λίμνες αυτές και οι αποθέσεις λειτουργούν ως φράγμα.

Η **ξηρή ζώνη** περιλαμβάνει αφυδατωμένα φύκια και ενδοκλάστες, που προέρχονται από τις λασπορωγμές. Επίσης, χαρακτηρίζεται από βιοαναμόχλευση, παραθυροειδές πορώδες και στρωματολίθους.

Σε περιοχές με ξηρό κλίμα η ζώνη είναι γνωστή ως sebkha και καλύπτεται μερικώς από πυριτική άμμο, που προέρχεται από την γειτονική έρημο. Η παρουσία εβαπορίτη στο όριο ενδιάμεσης και ξηρής ζώνης είναι πιθανή, ενώ η αύξηση του μεγέθους των ορυκτών του εβαπορίτη οδηγεί σε ανάπτυξη μίας δομής, που ονομάζεται «chicken-wire». Σε μικρότερα βάθη ο εβαπορίτης αποτελείται από τη σταθερή γύψο, σε αντίθεση με τους εβαπορίτες μεγάλου βάθους, όπου παρατηρείται ο αραγωνίτης. Σε πιο υγρό κλίμα απουσιάζουν οι αποθέσεις εβαποριτών.

2.4.2.5 ΝΗΡΗΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Το νηρητικό περιβάλλον εκτείνεται μέχρι το βάθος των 200 μέτρων, καλύπτει πλατφόρμες μεγάλης έκτασης και όπως είναι φυσικό, οι ιζηματογενείς ιδιότητες διαφοροποιούνται σημαντικά στο χώρο. Τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά, οι ιζηματογενείς σχηματισμοί και οι ιδιότητες τους εξαρτώνται από τη βαθυμετρία, το υδρολογικό καθεστώς και την παραγωγή ανθρακικού ασβεστίου.

Η διάκριση με βάση το βάθος δε βοηθάει στη μελέτη των ερευνητών, καθώς τα αυθαίρετα βάθη που ορίζονται ως όρια δεν περιγράφουν περιοχές με διακριτά χαρακτηριστικά. Οι περιοχές, άλλωστε, στο θαλάσσιο χώρο μεταβαίνουν βαθμιαία, με μερικούς χαρακτήρες να επανεμφανίζονται από τη μία ζώνη στην άλλη και να χάνονται σταδιακά.

Η ανθρακική ήπιας κλίσης πλατφόρμα (ramp) διακρίνεται σε εσωτερική, μέση και εξωτερική. Η διάκριση των 3 αυτών ζωνών δε λαμβάνει υπόψη το βάθος, όπως αναφέρεται παραπάνω, αλλά το βιόκοσμο και τις ιδιότητες των φάσεων. Ανάλογα με τη κλίση και την τοπική υδροδυναμική, το ρηχό, νηρητικό περιβάλλον μπορεί να περιλαμβάνει την εσωτερική, αλλά και μέρος ή ολόκληρη τη μέση ζώνη.

Η μέση ζώνη διαφοροποιείται από την **εσωτερική**, καθώς η δεύτερη χαρακτηρίζεται από μικρή ταξονομική ποικιλία και χαμηλό λόγο κόκκων προς ιλύ. Η **μέση** περιλαμβάνει συχνά οργανισμούς και ιζηματογενείς δομές, που συναντώνται σε ρηχά νερά και όχι σε κατωφέρεια ή μεγάλα βάθη. Επίσης, στη μέση ζώνη σημειώνεται δράση κυμάτων και ρευμάτων και παρατηρούνται φωτόζωα, κυρίως σε τροπικά περιβάλλοντα. Η ποικιλομορφία των οργανισμών αποτελεί ένα ακόμη χαρακτηριστικό της μέσης ζώνης. Η **εξωτερική** ζώνη συνιστά τη μετάβαση σε περιβάλλον λεκάνης.

Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την ιζηματογένεση στην ανθρακική πλατφόρμα και την υφαλοκρηπίδα είναι η αλατότητα, η θερμοκρασία και η καθαρότητα του νερού. Επίσης, σημαντική κρίνεται η ενεργειακή κατάσταση (υδροδυναμική) του περιβάλλοντος, δηλαδή η δράση των κυμάτων και/ή των ρευμάτων.

Στο νηρητικό περιβάλλον δεν παρατηρούνται συχνά ρεύματα πυκνότητας, ούτε τουρβιδιτικά ρεύματα. Ισχυρές καταιγίδες είναι ικανές να δημιουργήσουν ρεύματα μεταφοράς ιζημάτων και να οδηγήσουν σε αποσάθρωση κατά μήκος της ακτής. Οι κινήσεις αυτές μεταφέρουν το υλικό σε μεγαλύτερα βάθη, υπό μορφή ρευμάτων πυκνότητας και οι αποθέσεις εμφανίζονται ως ανωμαλίες στον ιστορικό χρόνο. Η αναγνώριση των ανωμαλιών είναι εύκολη, καθώς ο νηρητικός πυθμένας αποτελείται κυρίως από ιλύ.

Όσον αφορά την αλατότητα και τη θερμοκρασία, ρυθμίζονται από τα κύματα και τα ρεύματα στο χώρο της ανοικτής υφαλοκρηπίδας και της ανθρακικής πλατφόρμας. Η δράση τους οξυγονώνει τα ύδατα και καθιστά αυτά τα περιβάλλοντα ιδανικά για βιογενή απόθεση ανθρακικών ιζημάτων.

Η **ανθρακική παραγωγή** (carbonate factory) εκτείνεται σε τροπικές περιοχές από τα 10μέτρα βάθος έως τα 200 μέτρα περίπου. Σε εύκρατα ύδατα το μέγιστο βάθος παραγωγής περιορίζεται στα 100

μόλις μέτρα, λόγω των ετερόζωνων, στα οποία ανήκουν, μεταξύ άλλων, τα εχινόδερμα, τα βρυόζωα και τα μαλάκια.

Οι ανθρακίτες αυτοί χαρακτηρίζονται ως ανθρακικοί σχηματισμοί «ψυχρού νερού» ή «μη τροπικοί». Αντίθετα, τα φωτόζωα εμφανίζονται σε θερμά νερά, σε διαυγή ύδατα, που επιτρέπουν τη κυκλοφορία του φωτός του Ήλιου. Οι ανθρακικοί αυτοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται «τροπικοί».

Η μέγιστη παραγωγή παρατηρείται σε βάθη, όπου δρουν περισσότερα κύματα και επιθετικότερα ρεύματα. Σε πιο περιορισμένα περιβάλλοντα (υφαλοκρηπίδες με περιφερειακό φράγμα-rimmed shelves), οι οργανισμοί με αδυναμία προσαρμογής σε μεταβολή αλατότητας και θερμοκρασίας δεν επιβιώνουν.

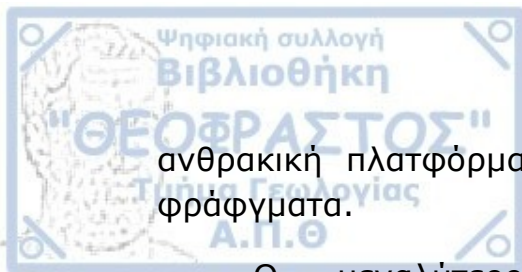
Με τον τρόπο αυτό η ποικιλομορφία είναι μειωμένη, όπως και το σκελετικό υλικό, ενώ η περιεκτικότητα σε ιλύ είναι υψηλή. Στην περίπτωση που το κλίμα είναι ξερό και η κυκλοφορία νερού παραμείνει περιορισμένη, πιθανή είναι η απόθεση εβαποριτών.

2.4.2.6 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΝΗΡΙΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Οι ιζηματογενείς φάσεις σε νηριτικά περιβάλλοντα καθορίζονται από την παραγωγικότητα και την αλληλεπίδραση των υδρολογικών παραγόντων. Επηρεάζουν τόσο τις ιζηματογενείς δομές, όσο τη ποικιλομορφία του έμβιου κόσμου και τη σύσταση των αποθέσεων.

Η υδρολογία περιλαμβάνει τους χαρακτήρες, που αναφέρονται παραπάνω, δηλαδή τη θερμοκρασία, την αλατότητα, τη δραστηριότητα κυμάτων και ρευμάτων και την περιεκτικότητα οξυγόνου. Ο βαθμός, στον οποίο η υδρολογία ευνοεί την παραγωγή ανθρακικών αποθέσεων, ορίζεται ως η ποιότητα του περιβάλλοντος.

Μονότονη παρουσιάζεται η βαθυμετρία, καθώς η μορφολογία του πυθμένα στη νηριτική ζώνη δεν παρουσιάζει εκπλήξεις. Μικρές κλίσεις, με τοπικά εξογκώματα πολύ μικρής γωνίας, μορφολογία που δεν προβάλλει αντίσταση στη κίνηση ρευμάτων και κυμάτων. Έτσι, οι πιο αδρομερείς αποθέσεις δε συγκεντρώνονται στην ανοικτή αυτή



ανθρακική πλατφόρμα, με εξαίρεση θέσεις, που λειτουργούν ως φράγματα.

Ο μεγαλύτερος όγκος των νηριτικών αποθέσεων χαρακτηρίζονται ως πηλόλιθοι και βακόλιθοι, δηλαδή υπερισχύει το υλικό πλήρωσης και οι λιγοστοί κόκκοι πλέουν σε αυτό. Οι λεπτοκρυσταλλικές ανθρακικές αυτές φάσεις περιέχουν κάποιες φορές, όταν επιτρέπεται από το ενεργειακό επίπεδο της περιοχής, ενστρώσεις βιοκλαστικών-λιθοκλαστικών σωρόλιθων.

Η δημιουργία εκτεταμένων ή μεμονομένων βιολιθιτών (patch reefs) είναι πιθανή, οι οποίοι αποτελούνται αποκλειστικά από οργανισμούς. Οι βιολιθίτες είναι ο σχηματισμός του νηριτικού περιβάλλοντος, που συγκεντρώνει τις περισσότερες πιθανότητες να αποτελέσει οικονομικής σημασίας ταμειυτήρα.

Στην ιζηματογένεση συμβάλλουν οι διάφοροι πελαγικοί οργανισμοί, αλλά και το λεπτομερές υλικό, με προέλευση από γειτονικές υφαλοκρηπίδες, μικρού βάθους. Η μεταφορά αυτή εξηγεί την ανάμειξη πελαγικών και βενθονικών οργανισμών, ταυτόχρονα με το κλαστικό υλικό.

Αξίζει να σημειωθεί πως ακραίες καιρικές συνθήκες, όπως ισχυροί άνεμοι και καταιγίδες, οδηγούν σε ανάπτυξη κυμάτων και ρευμάτων και απομάκρυνση του κλαστικού υλικού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η νότια Αυστραλία, όπου απουσιάζουν οι νηριτικές αποθέσεις στο χώρο της υφαλοκρηπίδας, λόγω των ακραίων φαινομένων που παρατηρήθηκαν τη δεκαετία του 40.

Η διαγένεση και η τεκτονική μπορεί να βελτιώσει τους ανθρακικούς ταμειυτήρες του περιβάλλοντος και να τους μετατρέψει σε ποιοτικούς, πορώδεις σχηματισμούς.

2.4.2.7 ΠΕΡΙΘΩΡΙΟ ΑΝΘΡΑΚΙΚΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ (SLOPE-BREAK)

Το όριο μεταξύ υφαλοκρηπίδας και κατωφέρειας παρουσιάζεται είτε ως επίπεδη, ήπια πλατφόρμα είτε ως πλατφόρμα με περιθώριο (rimmed shelf). Το περιθώριο αυτό αποτελεί ένα τοπικό φράγμα, που χαρακτηρίζεται από κεκλιμένη δυναμική και περιορίζει τη δύναμη των ερχόμενων κυμάτων και ρευμάτων, σε περιβάλλον όπου το ενεργειακό καθεστώς είναι υψηλό.

Τα περιθώρια της ανθρακικής πλατφόρμας αναπτύσσονται και η χρόνια ιζηματογένεση οδηγεί στην αύξηση του πάχους των αποθέσεων, σε σημείο που φθάνουν έως και την επιφάνεια της θάλασσας. Οι αποθέσεις λειτουργούν ως φράγμα και περιορίζουν τα κύματα και τα ρεύματα, με αποτέλεσμα μόνο οι πιο σταθερές δομές να διατηρούνται. Οι πιο ασταθείς συμπαρασύρονται από τα ύδατα που ρέουν και δεν εμφανίζονται στην έρευνα.

Η παραγωγικότητα ανθρακικού υλικού είναι υψηλή, ενώ παρατηρείται ποικιλομορφία στους οργανισμούς, λόγω των ευνοϊκών συνθηκών που αναπτύσσονται. Η μεταβολή των ιζηματογενών φάσεων πρωθοούν τη μετάβαση ιζηματογενών αλλοχημικών συστατικών σε ιζήματα, που συνδέονται γενετικά με αποικιακούς οργανισμούς.

Αξιζει να σημειωθεί πως τα περιθώρια δεν εμφανίζονται σε εύκρατες περιοχές, καθώς δεν επιβιώνουν οι κατάλληλοι οργανισμοί σε αυτές τις θέσεις και η καθίζηση αραγωνίτη δεν ευνοείται.

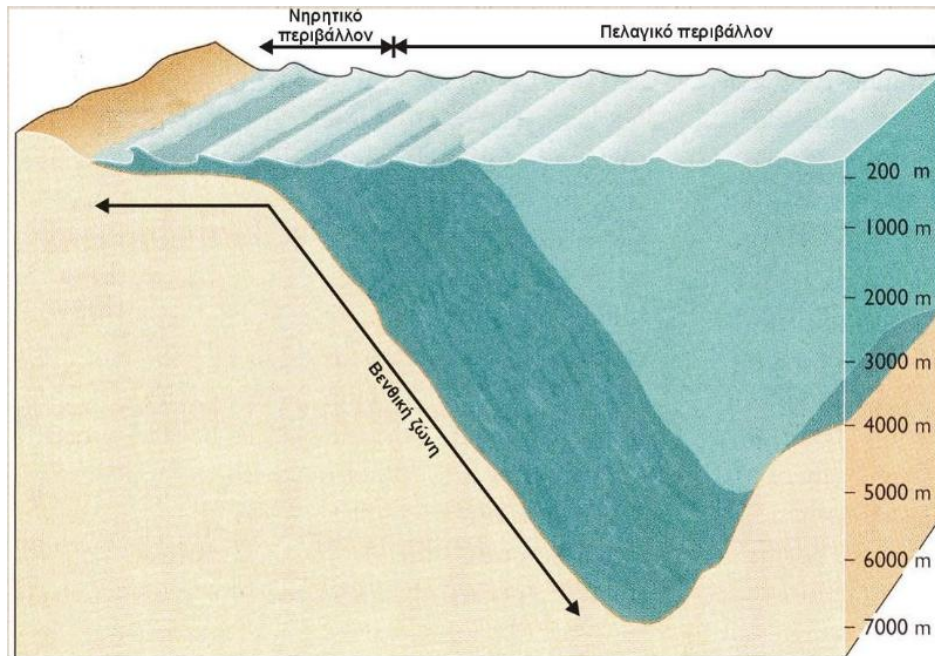
2.4.2.8 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΑΝΘΡΑΚΙΚΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ (SLOPE-BREAK)

Οι ιζηματογενείς ακολουθίες στα περιθώρια χαρακτηρίζονται ασυμμετρικές. Η πλευρά της ανοικτής θάλασσας χαρακτηρίζεται από κορκάλες και αδρομερές υλικό, λόγω υψηλής ενεργειακής κατάστασης. Αντίθετα, οι αποθέσεις χαμηλότερης ενεργειακής κατάστασης συγκεντρώνονται στην υπήνεμη πλευρά, ενώ σκελετικές μορφές, σημαντικών διαστάσεων αναπτύσσονται στην μη προστατευμένη από τον άνεμο πλευρά, μπροστά από τον ύφαλο.

Η ιζηματογένεση περιλαμβάνει βιοκλαστικούς κοκκόλιθους και σωρόλιθους, που συνδέονται γενετικά με τους βενθονικούς οργανισμούς της περιοχής ή με τη διάλυση των σκελετικών υλικών. Σε τροπικές περιοχές οι κλαστικοί κόκκοι παρουσιάζουν συχνά ωολιθική επιφλοΐωση.

Οι κοκκόλιθοι του περιθωρίου διαθέτουν διακοκκικό πορώδες (μεταξύ των κόκκων του κλαστικού υλικού) και ενδοκοκκικό πορώδες (εντός κυριώς του σκελετικού υλικού). Εκ των δυο, σημαντικότερο για την εξασφάλιση ενός ποιοτικού ταμιευτήρα κρίνεται το διακοκκικό, όμως είναι πιθανό να μειωθεί δραματικά κατά τη διαγένεση, λόγω τσιμεντοποίησης.

Καταστροφικά λειτουργεί, τέλος, η παρουσία αραγωνιτικού σκελετικού υλικού. Η διάλυση του ασταθούς αραγωνίτη εμπλουτίζει το νερό, το οποίο όταν κορεσθεί, εναποθέτει το ανθρακικό ασβέστιο και οδηγεί σε καταστροφή του πορώδους, κατά τη διαγένση.



Εικόνα 2.4δ: Νηρητικό περιβάλλον-Υφαλοπρανές-Πελαγικό Περιβάλλον (σε συνάρτηση με το βάθος)
(Πηγή:Μηχανική των Ωκεανών/ΓΕΟ304, Πανεπιστήμιο Πατρών)

2.4.2.9 ΥΦΑΛΟΠΡΑΝΕΣ (SLOPE) ΚΑΙ ΟΡΙΟ ΒΑΘΕΙΑΣ ΥΦΑΛΟΚΡΗΠΙΔΑΣ (TOE OF SLOPE)

Οι **ηπειρωτικές κατωφέρειες** (slopes) παρουσιάζουν βαθυμετρικά χαρακτηριστικά, που εξαρτώνται από τη γωνία κλίσης και τη μηχανική ευστάθεια τους. Το σχετικά μεγάλο βάθος, στο οποίο συναντάται, όπως και η ωκεάνια πεδιάδα, καθιστά δύσκολη την πρόσβαση και τη μελέτη του συγκεκριμένου χώρου. Εκτείνονται από το περιθώριο της ανθρακικής πλατφόρμας έως περίπου τα 2-3 χιλιόμετρα και χαρακτηρίζονται από πολυάριθμα υποθαλάσσια canyons (φαράγγια).

Η **κλίση** ενός ανθρακικού πρανούς διατηρείται σε υψηλά επίπεδα, φθάνοντας έως και τις 55°, σε αντίθεση με τα πυριτοκλαστικά πρανή, που είναι πιο ασταθή και ισορροπούν σε μικρότερες γωνίες. Η μεγάλη αύξηση στην κλίση συνοδεύεται από αλλαγή του κύριου μηχανισμού ιζηματογένεσης, καθώς τα τουρβιδιτικά ρεύματα διαδέχονται βαθμιαία τις ροές βαρύτητας. Η

αστοχία του πρανούς αποτελεί ένα χαρακτηριστικό μηχανισμό, που τροφοδοτεί τις χαμηλότερες θέσεις με υλικό ιζηματογένεσης.

Το **υφαλοπρανές** συναντάται κάτω από τη ζώνη κυματισμού και επάνω από το κατώτερο όριο του επιπέδου οξυγόνωσης. Η ανάπτυξη οργανισμών ευνοείται στο περιβάλλον αυτό και οι πελαγικοί οργανισμοί (όπως κοράλια και μαλάκια) αποτελούν υλικό ιζηματογένεσης, σε συνδιασμό με το λεπτοκρυσταλλικό κλαστικό υλικό.

Επικρατούν οι πιο λεπτομερείς ανθρακικές φάσεις (πηλόλιθοι και βακόλιθοι), ενώ εμφανίζονται ενδιάμεσες στρώσεις σωρολίθων, που αποτελούνται από βιοκλαστικό και λιθοκλαστικό υλικό. Το υλικό πολλές φορές προέρχεται και από τις γειτονικές υφαλοκρηπίδες και παρατηρείται ανάμειξη πελαγικών και βενθονικών οργανισμών.

2.4.2.10 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΥΦΑΛΟΠΡΑΝΟΥΣ (SLOPE) ΚΑΙ ΟΡΙΟΥ ΒΑΘΕΙΑΣ ΥΦΑΛΟΚΡΗΠΙΔΑΣ

Οι περιβαλλοντικές διεργασίες και η μηχανική που περιγράφει το πρανές αποτυπώνονται στις ιζηματογενείς φάσεις. Η μεγάλη κλίση οδηγεί σε συγκέντρωση του μεγαλύτερου μέρους του υλικού στη βάση, με μικρό μέρος να αποτίθεται στη κεκλιμένη επιφάνεια.

Από το όριο προς τη λεκάνη συναντούμε υλικό που κατολίσθησε, πλευρικά κορήματα και δεβριτικά ριπίδια, αποθέσεις που σχηματίζονται από τις μεγάλης πυκνότητας δεβριτικές ροές. Το ιξώδες των δεβριτικών ροών είναι μεγάλο και το υλικό δε μεταφέρεται σε μεγάλη απόσταση, αλλά σχηματίζει ριπίδια, στην επιφάνεια των οποίων παρατηρούνται κωνικές ή λοβοειδείς αποθέσεις. Σημαντική είναι και η παρουσία τουρβιδιτών.

Ο κύριος μηχανισμός που μεταφέρει το υλικό είναι η **βαρύτητα**, αφού πρώτα αστοχήσει μηχανικά το πρανές. Η παραγωγή ανθρακικού υλικού δεν χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο περιβάλλον, καθώς συναντάται κάτω από το κατώτερο όριο του "carbonate factory".

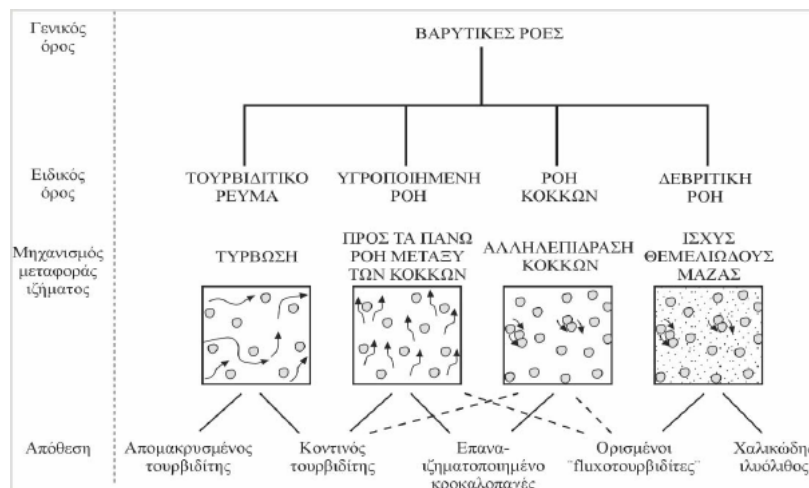
Οι **δεβριτικές ροές** αποθέτουν, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στη βάση του πρανούς υλικό με υψηλό ποσοστό λεπτομερούς υλικού (matrix). Έτσι, το διακοκκικό πορώδες είναι αρκετά χαμηλό, ενώ το ενδοκοκκικό μπορεί να είναι μέτριο και σχηματίζεται κατά τη διάλυση

του ανθρακικού ασβεστίου. Το πορώδες, ωστόσο, μειώνεται, λόγω τσιμεντοποίησης και πλήρωσης με λεπτοκρυσταλλικό υλικό και βελτιώνεται ή δημιουργείται συνήθως κατά τη διαγένεση βάθους (burial diagenesis).

Οι **τουρβιδίτες** και οι **ροές κόκκων**, όπου το ίζημα μεταφέρεται λόγω αλληλεπιδράσεων μεταξύ των κόκκων, χαρακτηρίζονται πιο λεπτοκρυσταλλικές από τις δεβριτικές ροές. Οι ροές κόκκων κινούνται, υπό την επίδραση της βαρύτητας, όμως διαφέρουν από τους τουρβιδίτες σημαντικά.

Πιο συγκεκριμένα, η **ροή κόκκων** περιλαμβάνει ένα κατώτερο στρώμα κόκκων, οι οποίοι ολισθαίνουν και ένα ανώτερο στρώμα κόκκων, οι οποίοι αλληλεπιδρούν με τους προηγούμενους και μεταφέρονται. Η ρευστή φάση λειτουργεί αποκλειστικά ως λιπαντικό, ενώ η κίνηση των ανώτερων κόκκων αναπτύσσει και ασκεί πίεση στους κατώτερους, αντίθετης φοράς με την κίνηση. Συνέπεια αυτής της πίεσης (πίεση διασποράς) είναι η απόθεση υλικού κατά την κίνηση του όγκου.

Αντίθετα, τα **τουρβιδιτικά ρεύματα** συνιστούν αιωρήσεις ιζημάτων, που διατηρείται λόγω της τύρβωσης σε αυτή την κατάσταση. Το υλικό δεν παρουσιάζει διαβάθμιση και αδρομερή υλικά αναμειγνύονται με λεπτομερή.



Εικόνα 2.4ε: Βαρυτικοί τύποι ροών (κατά Middleton & Hampton, 1976)

Η ταχύτητα που αναπτύσσουν (εως δεκάδες χιλιόμετρα την ώρα), σε συνδιασμό με την πυκνότητα τους προκαλεί εκτεταμένη διάβρωση στο υφαλοπρανές και σχηματίζει βαθιές χαραδρώσεις. Η

συνεχής τροφοδοσία εξασφαλίζει τη διατήρηση του ρεύματος, ενώ η διακοπή της οδηγεί σε απώλεια της μεταφορικής ικανότητας και σταδιακή απόθεση του υλικού που αιωρείται.

Οι ταμιευτήρες των τουρβιδιτών και των αποθέσεων των ρευμάτων κόκκων διαθέτουν σε πρώτη φάση περιορισμένο πορώδες, λόγω της φύσης του υλικού. Οι αποθέσεις είναι λεπτοκρυσταλλικές, οι πόροι είναι περιορισμένοι και το πορώδες εμφανίζεται μειωμένο.

Ο μηχανισμός που είναι ικανός να δημιουργήσει πόρους ή να τροποποιήσει και να βελτιώσει το ήδη υπάρχον σύστημα πόρων είναι η διαγένεση βάθους. Η διάλυση μπορεί να δημιουργήσει ασυνέχειες και να εξασφαλίσει ιδανικότερες συνθήκες για την ανάπτυξη του ταμιευτήρα.

2.4.2.11 ΩΚΕΑΝΙΑ ΛΕΚΑΝΗ

Η **ωκεάνια λεκάνη** ή πεδιάδα αποτελεί το τελευταίο τμήμα του θαλάσσιου χώρου, αλλά και το πιο βαθύ χώρο ιζηματογένεσης. Το βάθος της λεκάνης δεν είναι συγκεκριμένος αριθμός, ενώ δεν υπάρχει συγκεκριμένος ορισμός του χώρου αυτού. Ο σαφής καθορισμός είναι δύσκολος, καθώς το μέγιστο βάθος στο Περσικό Κόλπο φθάνει τα 200 μόλις μέτρα, τη στιγμή που στη Τάφρο των Μαριανών αγγίζει τα 11 χιλιόμετρα.

Η ωκεάνια πεδιάδα δεν αποτελεί την ιδανική ιζηματογενή περιοχή για ανθρακικούς σχηματισμούς.

Πιο συγκεκριμένα, η θερμοκρασία του νερού και η μερική πίεση του διοξειδίου του άνθρακα καθορίζουν το **Ασβεστοπτικό Βάθος Διάλυσης** (Carbon Compensation Depth/CCD), όπου ο ρυθμός διάλυσης του ασβεστίτη είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό σχηματισμού. Με τον τρόπο αυτό η συσσώρευση ασβεστίτη καθίσταται πιο δύσκολη, ενώ να σημειωθεί πως υφίσταται και **Αραγωνιτικό Βάθος Διάλυσης** (ACD), το οποίο συναντάται σε μικρότερο βάθος, μιας και ο αραγωνίτης είναι πιο ασταθής φάση από τον ασβεστίτη.

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η κύρια παραγωγή ασβεστίτη παρατηρείται από την στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας έως και τα 200 περίπου μέτρα. Ακόμη και σε εύκρατες

περιοχές, που συναντάται ετερότροφος βióκοσμος, η παραγωγή in situ ασβεστίτη σε μεγαλύτερα βάθη είναι περιορισμένη ή αμελητέα.

Η πελαγική ιζηματογένεση επικρατεί στις λεκάνες και διακόπτεται κατά θέσεις από τουρβιδίτες. Το όριο διάλυσης ασβεστολίθου που αναφέρθηκε αποτελεί μία ζώνη, κάτω από την οποία σχηματίζονται αργιλικά ιζήματα και ραδιολαρίτες. Οι ασβεστόλιθοι συχνά εναλλάσσονται με κερατολιθικές στρώσεις, καθώς το ανθρακικό ασβέστιο αντικαθίσταται από διοξείδιο του πυριτίου κατά την πρώιμη διαγένεση.

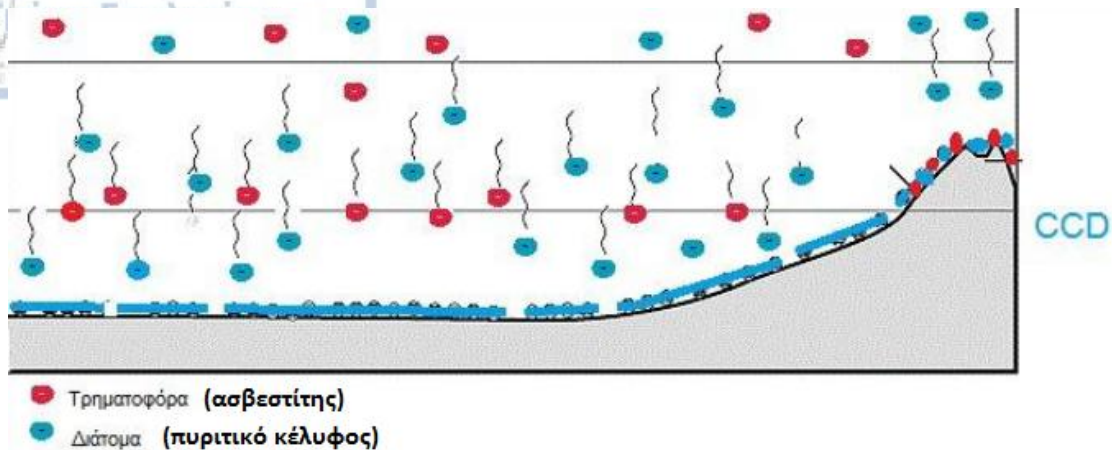
Στις περιθωριακές κρατονικές λεκάνες η ιζηματογένεση πραγματοποιείται κάτω από το όριο οξυγόνωσης και η αλμυρότητα είναι αυξημένη. Εκεί συναντώνται σκουρόχρωμοι ασβεστόλιθοι, εναλλασσόμενοι με αργιλικούς σχιστολίθους, ενώ πιθανή είναι η παρουσία και ανυδρίτη. Οι ασβεστόλιθοι παρουσιάζουν λεπτή, επίπεδη στρώση (τάξεως μερικών mm).

Οι οργανισμοί που επικρατούν είναι οι πλαγκτονικοί, ενώ σημαντική είναι και η παρουσία του μικρόκοσμου. Φύκη τρηματοφόρα, καλπιονελοειδή, διάτομα και ακτινόζωα αποτελούν τους κυριότερους μικροοργανισμούς των βαθιών λεκανών. Κυριότεροι μακροοργανισμοί συνιστούν οι αμμωνίτες, οι πυριτικοί σπόγγοι και τα κρινοειδή.

Είναι εμφανής η έντονη παρουσία πυριτικών φάσεων στο περιβάλλον της ωκεάνιας λεκάνης, καθώς αντικαθιστά το ανθρακικό ασβέστιο κατά τη πρώιμη διαγένεση και τα πυριτικά όστρακα είναι πιο ανθεκτικά στο περιβάλλον υψηλών πιέσεων. Για το λόγο αυτό, παρατηρούνται εκτεταμένες πυριτικές αποθέσεις στο χώρο των λεκανών, ενώ κάτω από το βάθος Διάλυσης του ασβεστίτη αποτίθενται αποκλειστικά πυριτικά ιζήματα (όπως φαίνεται στην εικόνα 2.4στ).

2.4.2.12 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΩΚΕΑΝΙΑΣ ΛΕΚΑΝΗΣ

Όπως αναφέρεται στην προηγούμενη ενότητα, οι αποθέσεις των λεκανών είναι συνήθως λεπτοκρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και πυροκλαστικές άμμοι, με πελαγικά μικροαπολιθώματα.



Εικόνα 2.4στ: Διαφοροποίηση της ιζηματογένεσης στις ωκεάνιες λεκάνες, επάνω και κάτω από το Ασβεστιτικό Αντισταθμιστικό Βάθος (CCD) (Πηγή: Μηχανική των Ωκεανών/ΓΕΟ304 Πανεπιστήμιο Πατρών)

Εαν η λεκάνη δεν δέχεται υλικά από τα γειτονικά υφαλοπρανή (κατωφέρεις), αλλά η τροφοδοσία είναι σχετικά συνεχής, οι ιζηματογενείς φάσεις που προκύπτουν ονομάζονται **Λαμινίτες**. Πρόκειται για σκουρόχρωμες αποθέσεις, που αποτελούνται από λεπτές, παράλληλες σχεδόν στρώσεις, πάχους μερικών χιλιοστών και είναι πλούσιοι σε οργανικό άνθρακα. Καθοριστικός παράγοντας για την παρουσία οργανικού άνθρακα συνιστά η χημεία του υδάτινου όγκου, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε ιζηματογένεση πλούσια σε άνθρακα, χαλκηδόνιο ή εβαπορίτες.

Οι λαμινίτες συχνά παρουσιάζουν διαβάθμιση υλικού (αδρομερής βάση και μείωση μεγέθους προς τα πάνω) και μπορούν να επαναλαμβάνονται κυκλικά, γεγονός που δείχνει ρυθμό τροφοδοσίας-απόθεσης και ήρεμες συνθήκες απόθεσης. Οι ρυθμικές αποθέσεις ονομάζονται και **ρυθμίτες**.

Σε περιβάλλον λεκάνης αποτίθεται και **κρητίδα (chalk)**, που αποτελείται κυρίως από ασβεστιτικά μικροαπολιθώματα, που ονομάζονται **κοκκόλιθοι** (coccoliths) και **αστερόλιθοι** (discoasters). Τα κοκκολιθοφόρα αντιπροσωπεύουν μία σημαντική ομάδα θαλάσσιου φυτοπλαγκτού και καλύπτουν σημαντικό ρόλο σε θαλάσσια οικοσυστήματα ως παραγωγοί.

Είναι μονοκύτταροι οργανισμοί με μαστίγια και κατά τη διάρκεια μίας ή περισσότερων φάσεων της ζωής τους παράγουν πλάκες σκελετικές, που ονομάζονται κοκκόλιθοι. Το κύτταρο πειβάλλεται μερικώς ή πλήρως από τον εξωσκελετό αυτό και η έκκριση των κοκκολιθών γίνεται κατά την πλαγκτονική (κινητήρια) φάση.

Η διάλυση των κοκκολίθων εξαρτάται κυρίως από το βάθος. Έτσι, σε ηπειρωτικές πλατφόρμες, με βάθος μικρότερο των 40 μέτρων, δε διατηρούνται, ενώ σε βάθος μεταξύ 40 και 200 μέτρων διατηρούνται και φθάνουν το 10%. Σε βάθη που βρίσκονται κάτω από τη ζώνη, την οποία ορίζει το Βάθος Διάλυσης Ασβεστίτη (CCD), διαλύονται εντελώς και μόνο πυριτικές φάσεις διατηρούνται. Συνεπώς, η κρητίδα δεν αποτελεί κατεξοχήν σχηματισμό λεκάνης, αλλά σχηματισμό νηρητικού περιβάλλοντος.

Η **αλμυρότητα** καθορίζει, επίσης, την παρουσία των κοκκολιθοφόρων. Τα περισσότερα προτιμούν τιμές αλμυρότητας που δεν ξεπερνούν το μέσο όρο της θάλασσας (35‰), όμως υπάρχουν είδη που μπορούν να βρεθούν σε αλμυρά έως υπερύαλα νερά, όπως τα ύδατα της Ερυθράς Θάλασσας (*Emiliana huxleyi*).

Η συμπύκνωση και η απώλεια πορώδους της κρητίδας συνδέεται άμεσα με την υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο, το μεγάλο βάθος ταφής (μεγαλύτερο των 2 χιλιομέτρων) και την απουσία υπερπίεσης. Το υψηλότερο πορώδες, που αγγίζει το 40%, παρουσιάζουν κρητίδες που επαναποτέθηκαν από τουρβιδιτικά ρεύματα, σχηματισμοί που δέχθηκαν υπερπιέσεις.

2.5 ΔΙΑΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ

Ο όρος **διαγένεση** αναφέρεται στις τροποποιήσεις που υπόκειται ένας ιζηματογενής σχηματισμός μετά την απόθεση του έως να φθάσει στο στάδιο της μεταμόρφωσης, η οποία δεν περιλαμβάνεται στη διαγένεση.

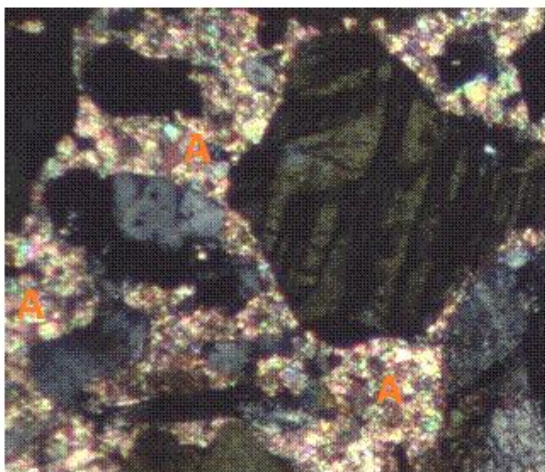
Οι διαγενετικοί μηχανισμοί είναι μηχανικής, βιολογικής ή χημικής φύσεως, ενώ δεν αποκλείονται και σύνθετης φύσεως μηχανισμοί. Στους ανθρακικούς ταμιευτήρες κυρίαρχο μηχανισμό συνιστά η χημική διαγένεση, ενώ η μηχανική συμπύκνωση αποτελεί επίσης σημαντικό τροποποιητικό παράγοντα.

Η **χημική διαγένεση** αποτελεί μία συνθήκη, κατά την οποία αλληλεπιδρούν νερό και ο σχηματισμός. Στους χημικούς μηχανισμούς περιλαμβάνεται η διάλυση, η αντικατάσταση, η εναπόθεση και η ανακρυστάλλωση.

Η **διάλυση** παρατηρείται όταν το σύστημα ύδατος- ανθρακικού σχηματισμού δεν βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας και επιδιώκει να μεταβεί σε αυτή, καθώς εμπλουτίζεται σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3). Η διάλυση συνεχίζει έως τη στιγμή που το νερό θα κορεστεί και θα ισορροπήσει το σύστημα, ενώ η είσορη μη κορεσμένου νερού στο σύστημα, θα διαταράξει εκ νέου την ισορροπία.

Η **εναπόθεση** (ή καθίζηση) αλάτων παρατηρείται όταν το νερό υπερκορεστεί σε ανθρακικό ασβέστιο και αποβάλλει το περίσσιο, σε μορφή κρυστάλλων. Οι ορυκτολογικές μορφές ποικίλλουν και τα ορυκτά κρυσταλλώνονται στο προβλεπόμενο κρυσταλλικό τους σύστημα. Παράδειγμα αποτελεί ο ασβεστίτης, ο οποίος αναπτύσσεται υπό μορφή σκαληνόεδρου, ενώ ο δολομίτης τυπικά κρυσταλλώνεται υπό μορφή ρομβόεδρου.

Η **ανακρυστάλλωση** (ή νεομορφισμός) αναφέρεται σε μορφολογικές μεταβολές των κρυστάλλων, δίχως αυτές να συνοδεύονται από σημαντικές αλλαγές στη σύσταση. Παράδειγμα ανακρυστάλλωσης συνιστούν οι κρύσταλλοι ασβεστίτη της τάξης μερικών χιλιοστών, που προκύπτουν από συσσωματώματα μικρίτη.



(α)



(β)

Εικόνα 2.5α: (α) Εναπόθεση ασβεστιτικού υλικού και (β) αντικατάσταση ανθρακικού σώματος από σουλφίδια (δράση υδροθερμικών ρευστών)

(Πηγή: <http://www.geo.mtu.edu/svl/pioneer/photomicrographs/wildcat.htm>)

<https://pangea.stanford.edu/research/ODEX/kurts-images/micrographs/skarnhand>)

Όσον αφορά το μηχανισμό της αντικατάστασης, προκύπτουν νέες ορυκτολογικές μορφές, οι οποίες εμφανίζονται στη θέση των

παλαιότερων. Συχνό φαινόμενο αποτελεί η αντικατάσταση του ασβεστίτη και του αραγωνίτη από τον Δολομίτη.

Σημαντικό αντικείμενο έρευνας αποτελεί ο καθορισμός της φύσης των πόρων και ο βαθμός επίδρασης από τις διαγενετικές διεργασίες, προκειμένου να αξιολογηθεί και να προβλεφθεί η αποδοτικότητα του ταμιευτήρα.

Στη μελέτη αυτή σημαντικό εργαλείο αποτελούν οι πυρήνες γεώτρησης, καθώς και τα σεισμικά δεδομένα, που επιτρέπουν τον καθορισμό του διαγενετικού περιβάλλοντος και των ζωνών που υπέστησαν τροποποιήσεις.

2.5.1 ΠΟΡΩΔΕΣ ΔΙΑΓΕΝΕΣΗΣ

Οι διαγενετικοί μηχανισμοί τροποποιούν τους ανθρακικούς σχηματισμούς, γεγονός που επηρεάζει το πορώδες που τους χαρακτηρίζει. (F. Jerry Lucia, 2007)

Η διάλυση είναι μία διεργασία που αυξάνει το μέγεθος των πόρων ή δημιουργεί νέες ασυνέχειες (πχ κάρστ), ενώ η αντικατάσταση συνοδεύεται επίσης από μεταβολή του πορώδους (πχ δολομιτίωση). Η επίδραση αυτών των διεργασιών μεταβάλλει, επίσης, τον ιστό του ανθρακικού σχηματισμού, ακόμη και την ορυκτολογία του.

Το νέο πορώδες μπορεί να αναπτυχθεί μεταξύ των κρυστάλλων και απαιτείται ο μηχανισμός της αντικατάστασης και της διάλυσης, ώστε να εξασφαλισθεί η αύξηση των κενών μεταξύ των κόκκων. Η αντικατάσταση του ασβεστίτη από δολομίτη μειώνει τον συνολικό όγκο έως και 13%, αλλά αυτό δεν οδηγεί σε άμεση αύξηση του πορώδους. Έχει παρατηρηθεί πως το πορώδες μειώνεται, μέχρι ο λόγος δολομίτη-ασβεστίτη να είναι ίσος με 1.

Όταν αυτό το σημείο αποτελέσει παρελθόν και το ποσοστό του δολομίτη γίνει μεγαλύτερο του 50%, τότε το πορώδες σταδιακά αυξάνεται. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πως η διάλυση του υπολείματικού μητρικού σχηματισμού (ασβεστίτη) συνδέεται με την αύξηση του πορώδους και της διαπερατότητας. Το γεγονός αυτό σε συνδιασμό με τη τετραεδρική γεωμετρία εξηγεί το γιατί οι δολομίτες με τιμές πορώδους ίσες με ασβεστολίθους παρουσιάζουν υψηλότερη διαπερατότητα.

Επίσης, οι δολομίτες παρουσιάζουν ομοιόμορφη κατανομή πορώδους και ιδιόμορφους κρυστάλλους και η διαπερατότητα των ταμιευτήρων αυτών είναι υψηλότερη των ασβεστολιθικών, με περίπου ίση τιμή πορώδους.

Ωστόσο, αν και οι δολομίτες πρακτικά παρουσιάζουν υψηλότερη διαπερατότητα από αντίστοιχους ασβεστολίθους, τα παραπάνω στοιχεία αποτελούν μελέτες σε συγκεκριμένους ταμιευτήρες και δεν συνιστούν απάντηση στο γιατί παρουσιάζεται αυτό ή σε πιο βαθμό.

Διαγενετικό πορώδες προκύπτει και από τη διάλυση του συγκολλητικού υλικού και των τοιχωμάτων των πόρων, όταν ρέει μη κορεσμένο σε ανθρακικά άλατα νερό. Η μορφολογία των εγκοίλων που προκύπτουν ποικίλλει, τόσο σε μέγεθος, αλλά και σε σχήμα. Με τη διαδικασία αυτή προκύπτουν τα γνωστά Σπήλαια, έγκοιλα μεγάλων διαστάσεων, εντός ανθρακικού σχηματισμού.

2.5.2 ΔΙΑΓΕΝΕΤΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ

Το διαγενετικό πορώδες δημιουργείται ή τροποποιείται σε 3 κύρια διαγενετικά περιβάλλοντα. Πιο συγκεκριμένα, οι ζώνες αυτές είναι η φρεατική μετεωρική, η θαλάσσια και η φρεατική μετεωρική. Κριτήριο για τη διάκριση των ζωνών αποτελεί η φύση και η χημεία της ρευστής φάσης των πόρων και η τοποθεσία τους σε σχέση με την επιφάνεια της Γης. (Clyde H. Moore, 2001)

Οι δυο πιο επιφανειακές ζώνες, η οξυγονούχος μετεωρική και η θαλάσσια, χαρακτηρίζονται από την παρουσία ενδοπορικών ρευστών, τα οποία διακρίνονται με σαφήνεια, Η τρίτη περίπτωση (υπόγεια περιβάλλοντα) χαρακτηρίζεται από ένα μείγμα θαλάσσιων-μετεωρικών υδάτων ή από σύνθετα αλμυρά νερά, με προέλευση από κάποια λεκάνη.

Ένα **φρεατικό μετεωρικό περιβάλλον** χαρακτηρίζεται από αερόβιες συνθήκες και υδάτινους όγκους, οι οποίοι παρουσιάζουν μεγάλο εύρος καταστάσεων κορεσμού σε ανθρακικά άλατα, από ακόρεστους όγκους έως υπερκορεσμένους.

Τα μετεωρικά νερά περνούν μέσα από την ακόρεστη, οξυγονούχο μετεωρική ζώνη (ζώνη μείγματος αέρα-νερού), είναι ακόρεστα, όσον αφορά τα ανθρακικά άλατα και συναντά το πλούσιο

σε διοξειδίο του άνθρακα χώμα. Εάν, λοιπόν, συνευρίσκεται αραγωνίτης με αυτά τα ακόρεστα, μετεωρικά νερά, το σύστημα θα επιδιώξει να βρεθεί σε κατάσταση ισορροπίας. Η διαφορά διαλυτότητας αραγωνίτη και ασβεσίτη οδηγεί σε διάλυση της ασταθούς ορυκτολογικής φάσης του αραγωνίτη και απόθεση χημικών ιζημάτων, ανθρακικής σύστασης.

Ο ρυθμός τροφοδοσίας του συστήματος με ακόρεστο νερό, μέσω της φρεατικής ζώνης, δημιουργεί προϋποθέσεις για σημαντική βελτίωση του πορώδους του ταμιευτήρα. Είναι σημαντική, λοιπόν, να κατανοήσει κανείς πως ένα μετεωρικό περιβάλλον διακρίνεται στην ανώτερη οξυγονούχο φάση, η οποία βρίσκεται επάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα και την φρεατική, που παρουσιάζει το κορεσμένο πορώδες. Και οι δυο, όμως, χαρακτηρίζονται από πιέσεις και θερμοκρασίες, με προέλευση από την επιφάνεια.

Στην περίπτωση των **θαλάσσιων περιοχών**, όπου παρατηρείται η απόθεση του μεγαλύτερου μέρους των ανθρακικών ιζημάτων, το θαλάσσιο νερό εμφανίζεται συνήθως υπερκορεσμένο στις περισσότερες ανθρακικές ορυκτολογικές φάσεις. Προκύπτει, λοιπόν, ως συμπέρασμα ότι σε αυτές τις περιοχές το πορώδες καταστρέφεται, λόγω καθίζησης του περίσσιου φορτίου.

Οι εναλλαγές, όμως, μεταξύ θερμών και παγετώδων περιόδων δεν είναι δυνατό να μην επηρεάσει τα συστήματα αυτά και κατ'επέκταση τους ανθρακικούς ταμιευτήρες. Έτσι, σε ψυχρές-παγετώδεις περιόδους, τα νερά χαρακτηρίζονται ως αραγωνιτικά, ενώ σε θερμές περιόδους παρουσιάζονται ακόρεστα σε αραγωνίτη και υπερκορεσμένα σε ασβεσίτη. Το γεγονός αυτό μαρτυρά πιθανή διάλυση του αραγωνίτη και σχηματισμό δευτερογενούς πορώδους στον ανθρακικό ταμιευτήρα.

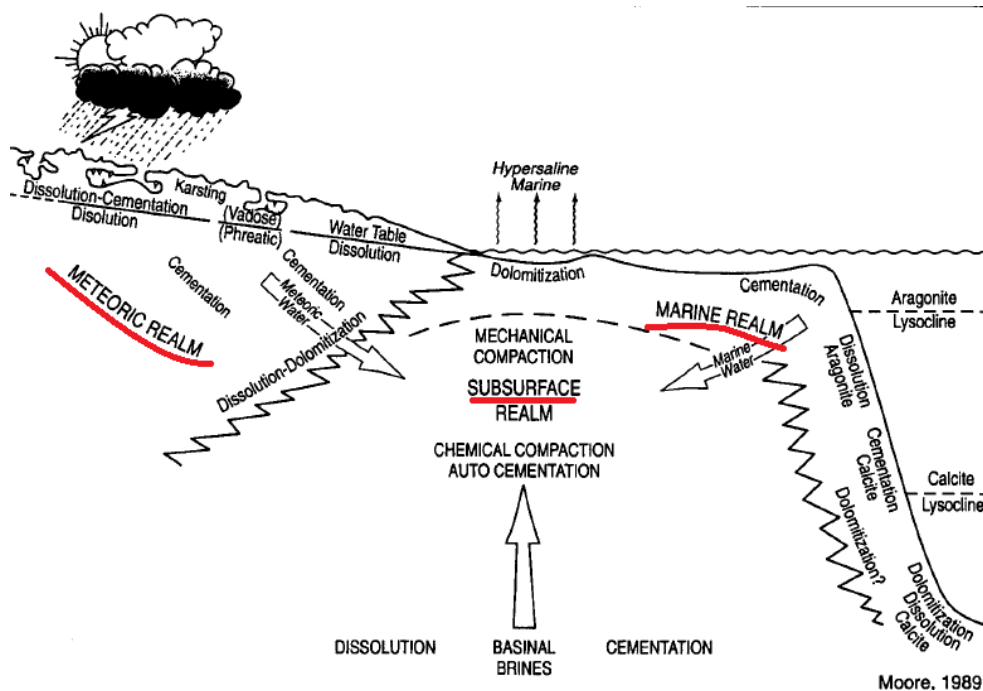
Η ρυθμός καθιζήσεων ελέγχεται από το ρυθμό με τον οποίο κινούνται τα ρευστά, εντός του συστήματος πόρων και επηρεάζεται δραματικά από το πορώδες και την διαπερατότητα των ιζημάτων της περιοχής, αλλά και τα ενεργειακά επίπεδα. Δεν αποτελεί, συνεπώς, μία ευρέως διαδεδομένη διεργασία στις θαλάσσιες περιοχές, αλλά σημειώνεται σε θέσεις με ευνοϊκές συνθήκες, πιο συγκεκριμένα σε παράκτιες περιοχές (επαφή στεριάς-υδάτων) και σε υφάλους.

Η δολομιτίωση και η ανάπτυξη δευτερογενούς πορώδους είναι επίσης συχνή σε θέσεις όπου παρατηρείται εξάτμιση υδάτινων όγκων

ή ακόμη και σε θέσεις όπου τα ύδατα εντός των ανθρακικών ιζημάτων συναντούς θερμά ρεύματα μεταφοράς.

Οι **υπόγειες θέσεις ή διαγενετικά περιβάλλοντα ταφής** αποτελούν το τρίτο κύριο διαγενετικό περιβάλλον, τα νερά των οποίων αποτελούν μείγμα θαλάσσιων-μετεωρικών υδάτων ή σύνθετης χημικής σύστασης ρευστά από λεκάνες. Η προέλευση των ρευστών αυτών αποδίδεται στη συνεχή αλληλεπίδραση μεταξύ πετρωμάτων και νερού, υπό σχετικά υψηλές τιμές πίεσης και θερμοκρασίας.

Τα ρευστά συνήθως είναι κορεσμένα σε κάθε σταθερή ανθρακική φάση, όπως δολομίτη και ασβεστίτη, ενώ υπό υψηλές πιέσεις, που επικρατούν σε μεγαλύτερα βάθη, λειτουργούν ως διαλύτες και καταστρέφουν το πορώδες των ανθρακικών σχηματισμών. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν θέσεις, στις οποίες η θερμική αποδόμηση των υδρογονανθράκων οδήγησε σε σχηματισμό ρευστών, που λόγω τοπικής έλλειψης κορεσμού, διέλυσαν το περιβάλλον και δημιουργήσαν δευτερογενές πορώδες.



Εικόνα 2.5β: Τα 3 κύρια διαγενετικά περιβάλλοντα (σημειώνονται με κόκκινο)

Πηγή: Carbonate Reservoirs (Clyde H. Moore)

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περιοχές βαθιάς ταφής δεν περιγράφονται από ταχείς διαγενετικές διεργασίες. Τα ρευστά κινούνται με χαμηλή ταχύτητα, υπό καθεστώς υψηλών πιέσεων,

όμως έπειτα από μακρές χρονικές περιόδους επιτυγχάνουν να τροποποιήσουν τον περιβάλλοντα σχηματισμό.

Είναι φανερό πως κάθε περιβάλλον χαρακτηρίζεται από ύδατα και ρευστά καθορισμένης φυσικοχημείας, η οποία καθορίζει τη μορφή της διαγενετικής δραστηριότητας και το ρυθμό ανάπτυξης ή καταστροφής του πορώδους. Σημαντική παράμετρος συνιστά ο κορεσμός των ρευστών, καθώς ακόρεστα ρευστά λειτουργούν ως διαλύτες και δημιουργούν πορώδες, ενώ κορεσμένες και υπερκορεσμένες σε ανθρακικό ασβέστιο φάσεις χαρακτηρίζονται από εναποθέσεις και μείωση πορώδους.

Τα περιβάλλοντα ταφής διαφέρουν πολύ από τα άλλα δυο, ενώ η θερμοκρασία και η πίεση αποτελούν τις πιο σημαντικές παραμέτρους, που καθορίζουν το ρυθμό μεταβολής του πορώδους. Το νερό σε μεγάλα βάθη αποτελεί σύνθετη φάση, μιας και προκύπτει από την αλληλεπίδραση των ενδοπορικών ρευστών και των σχηματισμών, αλλά και από τη θερμική αποδόμηση των υδρογονανθράκων.

2.5.3 ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ

Η μελέτη του συστήματος πόρων ενός ανθρακικού ταμιευτήρα είναι πολύ σημαντική. Η αναγνώριση των διαγενετικών πόρων και η χαρτογράφηση τους επιτρέπει τη χαρτογράφηση του συστήματος διακένων, τη σχέση τους στο χώρο και να κάνουμε σημαντικούς υπολογισμούς, σχετικούς με την απόδοση του ταμιευτήρα.

Η αύξηση/βελτίωση του πορώδους αποδίδεται στη διάλυση, την αντικατάσταση και την ανακρυστάλλωση.

Η **διάλυση** του ανθρακικού σχηματισμού οδηγεί σε σχηματισμό ασυνεχειών στο εσωτερικό του, δηλαδή στην ανάπτυξη εγκοίλων και κοιλοτήτων, οι οποίες σε περιπτώσεις αστοχούν. Κύρια προϋπόθεση αποτελεί η παρουσία ακόρεστων υδάτων σε ανθρακικό ασβέστιο και παρατηρείται συνήθως στην οροφή της φρεατικής μετεωρικής ζώνης και σε τμήματα της οξυγονούχου μετεωρικής. Φυσικά, δεν αποκλείονται και περιβάλλοντα ταφής, αρκεί ο σχηματισμός και το νερό να μην έχουν εξασφαλίσει κατάσταση ισορροπίας.

Το πορώδες, που σχηματίζεται (εικόνα 2.4α) από το μηχανισμό της διάλυσης, διαφοροποιείται σε μέγεθος αλλά και μορφή. Πιο συγκεκριμένα, περιλαμβάνονται οι εξής τύποι:

- Πορώδες από διάλυση κόκκων (moldic), το οποίο υποδεικνύει τη διαφορά διαλυτότητας μεταξύ διαφορετικών φάσεων
- Πορώδες μικρών κοιλοτήτων (vuggy), το οποίο χαρακτηρίζεται από πόρους, που είναι μεγαλύτεροι από τους περιβάλλοντες κόκκους
- Πορώδες καναλιών (channel)
- Πορώδες σπηλαίων (Cavern), το οποίο παρουσιάζει το μεγαλύτερο μέγεθος πόρων σε σύγκριση με τους άλλους τύπους

Στη μετεωρική ζώνη, το νερό προέρχεται από ανώτερες θέσεις (πχ βροχοπτώσεις). Οι πιο σύγχρονες ανθρακικές αποθέσεις, που βρίσκονται σε περιβάλλον οξυγόνου, η διάλυση είναι ταχύτερη, διότι υπάρχουν πολλές διαφορετικές ορυκτολογικές φάσεις. Θραύσματα κοραλλιών, γαστερόποδα και οόλιθοι μεταξύ των φάσεων αποτελούνται κυρίως από αραγωνίτη, ο οποίος είναι ευδιάλυτος και ο ρυθμός διάλυσης είναι ταχύς.

Αντίθετα, σε παλαιότερες αποθέσεις που έχουν εξασφαλίσει ισορροπία, η διάλυση είναι πολύ αργή, ενώ σε περίπτωση που το νερό είναι υπερκορεσμένο, το ανθρακικό ασβέστιο καθιζάνει και λειτουργεί καταστρεπτικά, μειώνοντας το πορώδες.

Στα περιβάλλοντα ταφής η ρευστή φάση είναι σύνθετη. Αποτελείται από νερό, που προέρχεται από τη λεκάνη απόθεσης ή που απελευθερώθηκε κατά την μετατροπή ορυκτών της αργίλου (πχ σμεκτίτης σε ιλλίτη). Ρευστά όμως παράγονται και κατά την οργανική διαγένεση, δηλαδή κατά την ωρίμανση της οργανικής ύλης και την αποδόμηση των υδρογονανθρακων και με τον τρόπο αυτό η ρευστή φάση εμπλουτίζεται με οργανικά οξέα, διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο.

Η διαλυτική ικανότητα αυτής της σύνθετης φάσης είναι αυξημένη, αλλά πρέπει να σημειωθεί πως τις περιόδους διάλυσης και αύξησης πορώδους διαδέχονται περίοδοι εναποθέσεων και σχηματισμού συγκολλητικής ύλης, που ευθύνονται για σχετική μείωση του.

Η **ανακρυστάλλωση** αποτελεί μία διεργασία, η οποία συνοδεύεται από αύξηση του μεγέθους των κόκκων. Η αντιδρούσα φάση και το τελικό προϊόν δε διαφέρουν δομικά, ενώ η σύσταση παραμένει σχεδόν ίδια. Στην περίπτωση αυτή, οι πολύ μικρού μεγέθους κρύσταλλοι ασβεστίτη αποδομούνται και καθιζάνουν ως μεγαλύτεροι πια, σπαρτικοί κρύσταλλοι.

Ο μηχανισμός δεν είναι απόλυτα κατανοητός, αλλά αποδίδεται με τα έως τώρα γνωστά στοιχεία στην εισροή υδάτων στον σχηματισμό, κατά την πρώιμο ενταφιασμό του. Τα νερά αυτά δεν βρίσκονται σε ισορροπία με τον αρχικό μαγνησιούχο ασβεστίτη και η δράση τους οδηγεί στο μετασχηματισμό των ασταθών κρυσταλλών και το σχηματισμό νέων, σταθερών μορφών.

Η τάξη μεγέθους των πόρων είναι μικρή (μικρόμετρα) και ταμιευτήρες με πορώδες, που αναπτύχθηκε με ανακρυστάλλωση δεν αποτελούν ταμιευτήρες πετρελαίου. Οι διαστάσεις των πόρων κρίνονται ακατάλληλες και οι τριχοειδείς πιέσεις που αναπτύσσονται παρεμποδίζουν την κίνηση των μορίων του πετρελαίου. Είναι, όμως, ικανοί να αποθηκεύσουν όγκους νερού και φυσικού αερίου, παρόλο που δεν αναπτύσσονται κοιλότητες μεγάλων διαστάσεων.

Η συχνότερη κατηγορία μορφή **αντικατάστασης** είναι η δολομιτίωση, η οποία χαρακτηρίζεται από σταδιακή αντικατάσταση του ασβεστολίθου από δολομίτη. Η υψηλή θερμοκρασία, που αναπτύσσεται κατά τον ενταφιασμό του ανθρακικού πετρώματος υποστηρίζεται πως αποτελεί ευνοϊκή και αναγκαία συνθήκη για το σχηματισμό δολομίτη. Έχει παρατηρηθεί, επίσης, πως η δολομιτίωση του αραγωνίτη είναι ταχύτερη από του ασβεστίτη και η περιεκτικότητα σε μαγνήσιο είναι ανάλογη του ρυθμού δολομιτίωσης. Τέλος, ιόντα, όπως το Li^2 , λειτουργούν ως καταλύτες και επιταχύνουν την αντικατάσταση, η παρουσία τους, ωστόσο, στα φυσικά νερά είναι σπάνια.

Οι μεγάλοι όγκοι δολομιτών παρατηρήθηκε πως δεν προέρχονται από ιζηματογένεση σε κάποια υδάτινη λεκάνη και ο διαγενετικός μηχανισμός σχηματισμού του συνιστά μία αποδεκτή από την επιστημονική κοινότητα θεωρία. Κατά την πρώιμη διαγένεση σχηματίζονται ρόμβοι δολομίτη, ενώ σε επόμενα στάδια αναπτύσσονται πόροι μεταξύ αυτών. Η αντικατάσταση αυτή των ασταθών ανθρακικών φάσεων από δολομίτη συνοδεύεται από μείωση όγκου, που μπορεί να φθάσει το 13%, αλλά και από βελτίωση του πορώδους του σχηματισμού. Η βελτίωση αυτή είναι σημαντική,

όμως, προκειμένου να διατηρηθεί, δεν πρέπει να προχωρήσει η δολομιτίωση και να φθάσει στο τελικό στάδιο της. Στην επόμενη ενότητα θα αναφερθεί η «καταστρεπτική» πτυχή.

2.5.4 ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ ΚΑΙ ΜΕΙΩΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ

Η μείωση πορώδους περιλαμβάνει τις διεργασίες της ανακρυστάλλωσης, την αντικατάστασης, οι οποίες λειτουργούν και ευεργετικά. Επίσης, περιλαμβάνει το μηχανισμό της εναπόθεσης/τσιμεντοποίησης και της συμπύκνωσης, που λειτουργούν αποκλειστικά καταστρεπτικά.

Η **μηχανική συμπύκνωση** προκαλείται από το βάρος των υπερκείμενων στρωμάτων, που ασκούν υψηλές πιέσεις στον ενταφιασμένο ανθρακικό σχηματισμό. Οι μελέτες δείχνουν πως η αύξηση του βάθους ταφής οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση του πορώδους και η συνδρομή του στην καταστροφή του συστήματος πόρων είναι μεγαλύτερη από αυτή της εναπόθεσης. Οι ισχυρές πιέσεις εξαναγκάζουν τους πόρους να έλθουν σε επαφή και η πύκνωση αυτή εξηγεί την ελλάτωση του χώρου που καταλαμβάνουν τα διάκενα.

Ο συνδιασμός διάλυσης και συμπύκνωσης οδηγεί στο σχηματισμό στυλολίθων, που αποτελούν ένδειξη της διαλυτοποίησης. Οι επιφάνειες αυτές έχουν τη μορφή ραφής και χαρακτηρίζονται από παρουσία υπολλειματικών αδιάλυτων αργιλικών ορυκτών και κηρογόνου κατά μήκος της επιφάνειας ραφής. Μεταγενετικές διεργασίες ίσως καταστρέψουν τις δομές αυτές και να προκύψει δευτερογενές πορώδες.

Να σημειωθεί πως οι στυλόλιθοι είναι πολύ σημαντικοί στη Γεωλογία Πετρελαίου, καθώς αποτελούν τοπικά φράγματα, ικανά να περιορίσουν τη ροή υδρογονανθράκων και η χαρτογράφηση τους μας δίνει πληροφορίες για τη κίνηση των ρευστών εντός του ταμειυτήρα.

Η **ανακρυστάλλωση**, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα μπορεί να αυξήσει το πορώδες. Στην πραγματικότητα, όμως, συχνό φαινόμενο αποτελεί η μείωση του, όταν συνδράμει η συγκεκριμένη διεργασία.

Η αρχική ορυκτολογία αποτελείται από κρυστάλλους μετασταθούς αραγωνίτη ή μαγνησιούχου ασβεστίτη, της τάξης μερικών μm. Ο νεομορφισμός, όμως, οδηγεί στη συγκεντρική ανάπτυξη νεόμορφων κρυστάλλων, γύρω από κάποιο πυρήνα και με τον τρόπο αυτό αναπτύσσονται πορφυροειδείς κρύσταλλοι. Έτσι, το πορώδες μεταξύ των κόκκων καταστρέφεται, αφού το νέο συσσωμάτωμα καταλαμβάνει μεγαλύτερη επιφάνεια και καλύπτει τα διάφορα διάκενα.

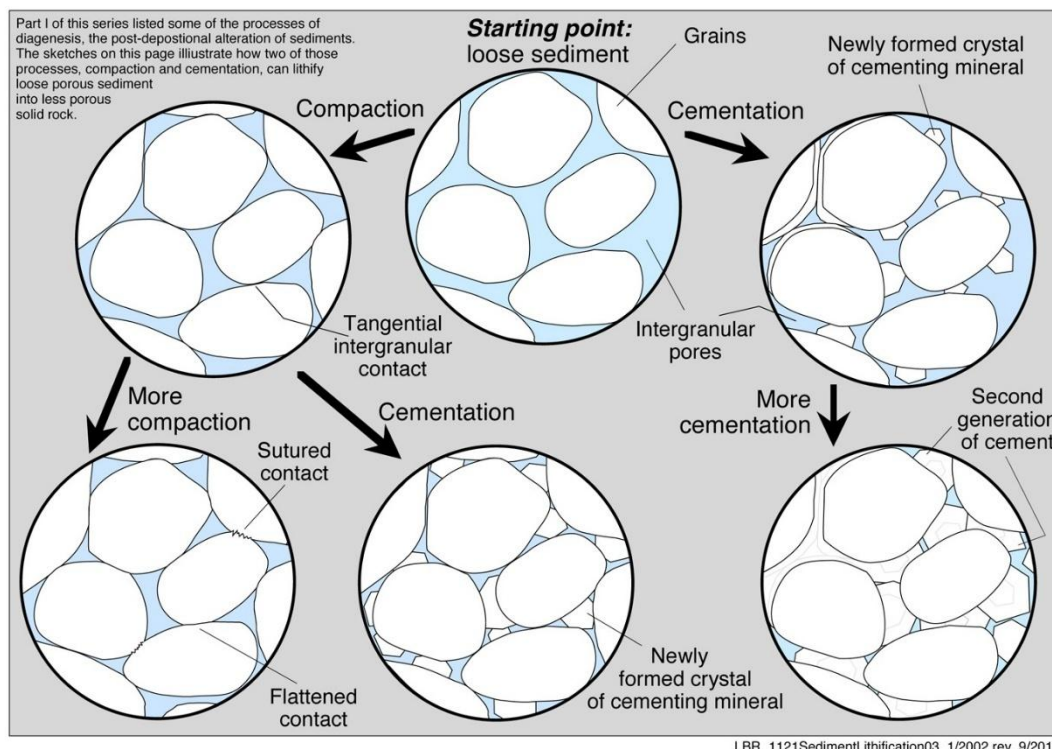
Η **αντικατάσταση** πρόδρομων ανθρακικών ορυκτών από ανυδρίτη, σουλφίδια (δράση υδροθερμικών διαλυμάτων) και δολομίτη συνοδεύεται από μείωση του πορώδους.

Ο ανυδρίτης αποτελεί σταθερή ανθρακική μορφή σε μεγάλα βάθη και εμφανίζεται με τη μορφή κονδύλων ή στρωμάτων μεγάλου πάχους. Μπορεί, επίσης, να εμφανιστεί στα τοιχώματα πόρων ή στις επαφές κόκκων. Η μαζώδης εμφάνιση ανυδρίτη προέρχεται από την αφυδάτωση γύψου, που μετασχηματίστηκε κατά την ταφή. Από την άλλη, η παρουσία του στα τοιχώματα ή στα κενά μεταξύ κόκκων εξηγείται από την καθίζηση του ανυδρίτη, που εμπεριέχεται στις ρευστές φάσεις του συστήματος.

Αξιίζει να αναφερθεί πως ο ανυδρίτης σχηματίζεται και κατά το τελευταίο στάδιο της δολομιτίωσης. Οι δολομίτες παρουσιάζουν επαυξήσεις και συνοδεύονται από ανυδρίτη, ο οποίος μηδενίζει το πορώδες του ταμιευτήρα κατά θέσεις.

Η παρουσία του είναι σημαντική, καθώς ρυθμίζει τη κυκλοφορία των ρευστών εντός του ταμιευτήρα και έτσι αυτά εξωθούνται να ακολουθήσουν συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αυτή η γραμμή, κατά μήκος της οποίας κινούνται μπορεί να οριοθετηθεί, να χαρτογραφηθεί και να αξιοποιηθεί με αποτελεσματικότητα ο ταμιευτήρας.

Lithification of sediments to form sedimentary rocks, Part II: Possible pathways



Εικόνα 2.5γ: Μεταβολή διάταξης κόκκων στο χώρο και πορώδους (συμπύκνωση και εναποθέσεις)
(Πηγή: <http://www.gly.uga.edu/railsback/Fundamentals/1121SedimentLithification03>)

Οι **εναποθέσεις** μπορούν να εμφανιστούν σε κάθε στάδιο της διαγενετικής ιστορίας του σχηματισμού. Εμφανίζονται στα θαλάσσια περιβάλλοντα, αμέσως μετά την απόθεση των ιζημάτων, αλλά παρατηρούνται ακόμη και στα περιβάλλοντα ταφής μεγάλου βάθους.

Η χημεία των καθιζήσεων επηρεάζεται σημαντικά από τον υδάτινο όγκο, που εμπεριέχεται στο σύστημα. Η χημική του σύσταση και η αλατότητα αποτελούν σημαντικές παραμέτρους, όπως φυσικά και το περιβάλλον, στο οποίο πραγματοποιείται η διαγένεση. Πιο συγκεκριμένα, σε μετεωρικά φρεατικά περιβάλλοντα οι εναποθέσεις αποτελούνται από Μαγνησιούχο ασβεστίτη ή αραγωνίτη, λόγω υψηλής παρουσίας των φάσεων στις περιοχές αυτές.

Σε μεγαλύτερα βάθη, καθώς προχωρά ο ενταφιασμός, η σύσταση του νερού μεταβάλλεται, άρα και το είδος των καθιζήσεων. Το ενδοπορικό νερό συναντά το νερό που σχηματίζεται κατά την θερμική ωρίμανση της οργανικής ύλης και παρατηρούνται εναποθέσεις ασβεστίτη και δολομίτη. Το μαγνήσιο έχει εξαντληθεί στο νερό ενταφιασμένων συστημάτων και οι ασβεστίτες είναι φτωχότεροι σε αυτό, ενώ είναι πλουσιότεροι σε σίδηρο.

Μη ανθρακικές εναποθέσεις παρατηρούνται σπάνια, όμως η παρουσία τους μειώνει δραματικά το πορώδες. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μία σημαντική μη ανθρακική φάση συνιστά ο ανυδρίτης. Ακόμη, ο Χαλκηδόνιος (πυριτική φάση) είναι ένα αρκετά σύνηθες ορυκτό, το οποίο μειώνει τους πόρους.

Η καταστροφή του πορώδους μειώνει την ποιότητα του ταμιευτήρα και ταπεινώνει την αποθηκευτική του ικανότητα. Η δράση ευεργετικών μηχανισμών, οι οποίοι αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, σε συνδυασμό με τη ρωγμάτωση του ανθρακικού σχηματισμού μπορεί να βελτιώσει εκ νέου το πορώδες και τη διαπερατότητα του.

2.5.5 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

Η **διαγένεση** αποτελεί μηχανισμό με ευεργετικές, αλλά και καταστρεπτικές δράσεις. Η δράση της αποτυπώνεται στο ταμιευτήρες και εντοπίζεται στους τροποποιημένους πόρους, οι οποίοι άλλοτε αυξάνονται σε μέγεθος, ενώ άλλες φορές μειώνονται.

Ο κανόνας προβλέπει παρουσία **πόρων-υβριδίων**, με μορφή που καθορίζεται από την ιζηματογένεση (απόθεση), αλλά και από την διαγένεση. Οι πληροφορίες προκύπτουν από σεισμικές μετρήσεις και πυρήνες γεωτρήσεων και αποτελούν τη βάση για την αξιολόγηση του ταμιευτήρα και τη βέλτιστη αξιοποίηση του.

Σε πρώτη φάση κρίνεται αναγκαίο να ταυτοποιηθεί η γενετική προέλευση των πόρων. Οι διαγενετικοί πόροι αποτελούν μικρό ποσοστό, ενώ το υπόλοιπο και μεγαλύτερο ποσοστό καταλαμβάνουν οι πόροι-υβρίδια, στους οποίους αρκετές φορές υπερισχύουν οι χαρακτήρες της διαγένεσης. Στη συνέχεια, πρέπει να προσδιορισθεί το διαγενετικό περιβάλλον και τα επεισόδια, που μετασχημάτισαν το πορώδες και του έδωσαν την σημερινή μορφή.

Σε επόμενα βήματα, πρέπει να μελετηθεί η γύρω περιοχή, στην οποία ανήκει ο ταμιευτήρας και να προσδιορισθεί η γεωμετρία που τη χαρακτηρίζει. Ο εντοπισμός πιθανών ασυνεχειών αποτελεί σημαντικό εύρημα και μπορεί να βοηθήσει να εντοπιστεί η κύρια ροή των ρευστών και να οριοθετηθεί η κίνηση τους.

Είναι σημαντικό, επίσης, να εντοπισθούν οι θέσεις που έχουν υποστεί διαγενετική τροποποίηση και να χρονολογηθούν (σχετικά)

τα διαδοχικά διαγενετικά επεισόδια. Η διαγένεση περιλαμβάνει πλήθος μηχανισμών, οι οποίοι ίσως βελτιώσουν την ποιότητα του ταμιευτήρα, αλλά ίσως να την υποβαθμίσουν. Η κατανόηση και ερμηνεία των πληροφοριών κρίνεται αναγκαία και επηρεάζει την έκβαση του εγχειρήματος.

Η χαρτογράφηση, τέλος, και η κατασκευή μοντέλου της περιοχής συνιστούν το αποτέλεσμα των ερευνών και μετά από το σημείο αυτό πρέπει να ληφθούν οι σημαντικές αποφάσεις, που αφορούν τη διαχείριση του κοιτάσματος.

2.6 ΔΙΑΡΡΗΓΜΕΝΟΙ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ

Η ενότητα 2.6 θα αναλύσει τους κατακερματισμένους ανθρακικούς ταμιευτήρες (fractured reservoirs) σε βάθος. Θα γίνει αναφορά στο πως και που σχηματίζονται, καθώς επίσης και πως διαφοροποιούνται από τις άλλες 2 κύριες γενετικές κατηγορίες, τους ιζηματογενείς και διαγενετικούς.

Οι **διακλάσεις** δε συνδέονται με τις διαγενετικές και ιζηματογενείς ιδιότητες των πετρωμάτων, μιας και οι μηχανικές πιέσεις που τις δημιουργούν αναπτύσσονται μετά τη λιθοποίηση. Συσχετίζονται με τεκτονικά χαρακτηριστικά, όπως ρήγματα και πτυχές ή ζώνες διαφορικής συμπύκνωσης και πρέπει να σημειωθεί πως το πορώδες που δημιουργείται από τις διαρρήξεις δεν είναι αποκλειστικά προϊόν μηχανικής καταπόνησης.

Οι πόροι συνήθως εμφανίζονται ως υβριδικές φάσεις, που συνδιάζουν τις αρχικές ιδιότητες του πετρώματος και την επίδραση των διαγενετικών διεργασιών. Η δράση των παραγόντων πολλές φορές πραγματοποιείται σε παραπάνω από μία γενιές και ο σχηματισμός υπόκειται πολλαπλά τροποποιητικά επεισόδια.

Έτσι, ο προσδιορισμός της φύσης των πόρων καθίσταται δύσκολος και πρέπει να μελετηθεί προσεκτικά το πετρελαϊκό σύστημα, ώστε να προσδιορισθεί με σαφήνεια η γενετική του προέλευση και να προβλεφθεί η συμπεριφορά του.

Να σημειωθεί πως οι διακλάσεις δεν αποτελούν απαραίτητα μηχανισμό βελτίωσης του πορώδους. Σαφώς, αποτελούν μία ασυνέχεια σε ένα ταμιευτήρα και επιτρέπουν την ελεύθερη διέλευση των ρευστών, δίχως να προβάλλουν σχετική αντίσταση. Ωστόσο, η

συμβολή τους στο συνολικό πορώδες και διαπερατότητα ίσως είναι προσωρινή, αφού μπορούν να πληρωθούν με συνδεδετική ύλη και να αποτελέσουν εμπόδιο.

2.6.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ

Ως ασυνέχεια ορίζονται τα επίπεδα ασυνεχειών ενός σχηματισμού, που προκύπτουν λόγω παραμορφώσεων ή φυσικής διαγένεσης.

Η ανάπτυξη διαφορικών πιέσεων σε ένα σχηματισμό έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση του. Η παραμόρφωση αυτή μπορεί να είναι **πλαστική** ή **θραυσιγενής**. Οι ασυνέχειες συνήθως αποτελούν προϊόν θραυσιγενούς παραμόρφωσης, καθώς δημιουργούνται κατά την αστοχία του πετρώματος, όταν αυτό υπερβεί το όριο ελαστικότητας και υποστεί ρήξη.

Ένας σχηματισμός διαρρηγνύεται συνήθως πιο ήπια, κατά τη σταδιακή εκταφή και ψύξη του και με πιο βίαιο τρόπο, κατά τη σεισμική δραστηριότητα. Βασική προϋπόθεση, σε κάθε περίπτωση, αποτελεί η μόνιμη, μη αντιστρεπτή θραύση του κρυσταλλικού πλέγματος, σε ατομικό επίπεδο. Οι διαρρήξεις είναι εντοπίσιμες χωρικά και μελετούνται εύκολα πειραματικά με εργαστηριακές δοκιμές, σε συνδυασμό πάντοτε με τις λεπτές τομές και τα δεδομένα από την ύπαιθρο.

Πετρώματα, όπως ο ψαμμίτης, ο δολομίτης, ο ασβεστόλιθος και η κρητίδα είναι εύθραυστα σε επιφανειακές συνθήκες. Η επίδραση τάσεων σε υψηλότερες θερμοκρασίες οδηγεί στην εκδήλωση πλαστικής παραμόρφωσης (πχ κάμψη σχηματισμού).

Οι ταμιευτήρες, που έχουν υποστεί θραυσιγενή παραμόρφωση ή προβλέπεται να έχουν υποστεί, παρουσιάζουν σημαντική διαφορά στην κινηματική των ρευστών. Η διαπερατότητα αυξάνεται και ο σχηματισμός λειτουργεί ανισότροπα ως προς τη συγκεκριμένη ιδιότητα.

Ο τύπος των διαρρήξεων καθορίζεται από δύο παράγοντες, τα χαρακτηριστικά των τάσεων και τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού.

Ως **τάση** ορίζεται η δύναμη που ασκείται σε μία επιφάνεια, ενώ ένας ακόμη σημαντικός όρος για τη μηχανική είναι η διαστροφική

παραμόρφωση (strain), που χαρακτηρίζει οποιαδήποτε μεταβολή στο σχήμα του σώματος. Η διαστροφική παραμόρφωση εκδηλώνεται είτε με μεταβολή του αρχικού σχήματος είτε με μεταβολή του μήκους γραμμών. Επίσης, εκδηλώνεται με περιστροφή γραμμών και επιπέδων, που απαρτίζουν το γεωλογικό σώμα και μεταβολή του όγκου. Αποτελεί μετρήσιμο μέγεθος και αποτελεί ορατή μεταβολή.

Όσον αφορά τις τάσεις, απεικονίζονται ως διανύσματα και περιγράφονται από ένταση και φορά, ενώ κοινή σύμβαση αποτελεί η αναγνώριση τριών κύριων τάσεων (μέγιστης σ_1 , ενδιάμεσης σ_2 , ελάχιστης σ_3).

Η ρήξη ενός σχηματισμού μπορεί να αποδοθεί στην ανάπτυξη διατμητικών, εφελκυστικών ή συμπιεστικών τάσεων. Οι εργαστηριακές δοκιμές αποτελούν χρήσιμο εργαλείο, στην προσπάθεια να προσδιορισθεί το πως ασκούνται οι τάσεις στο γεωλογικό σώμα και πως αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

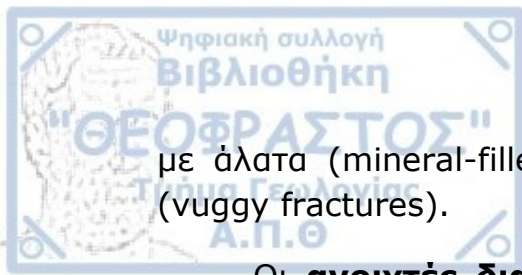
2.6.2 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ

Οι ταμιευτήρες, που έχουν υποστεί διάρρηξη, χαρακτηρίζονται από σύνθετο πορώδες και διαπερατότητα. Πιο συγκεκριμένα, η συμβολή της διακλάσης στο ολικό πορώδες και τη διαπερατότητα είναι σημαντική, ενώ στη τελική διαμόρφωση των ιδιοτήτων συνεισφέρουν και η μικροκρυσταλλική μάζα (matrix). Οι πληροφορίες που αναφέρονται στην παρούσα ενότητα έχουν ληφθεί από Nelson (2001).

Οι πιο χρήσιμοι πετροφυσικοί χαρακτήρες, με αύξουσα σειρά δυσκολίας υπολογισμού είναι:

- Η διαπερατότητα των διακλάσεων
- Το πορώδες των διακλάσεων
- Ο κορεσμός των ρευστών εντός των διακλάσεων
- Ο συντελεστής απόληψης (recovery factor)

Το πορώδες και η διαπερατότητα των διαρρηγμένων ταμιευτήρων επηρεάζονται σημαντικά από τη μορφολογία των διακλάσεων/ασυνεχειών. Διακρίνονται τέσσερις κατηγορίες, με βάση τη μορφολογία: (1) παραμορφωμένες διακλάσεις (deformed fractures), (2) ανοικτές διακλάσεις (open fractures), (3) πληρωμένες



με άλατα (mineral-filled fractures) και (4) κοιλότητες διακλάσεων (vuggy fractures).

Οι **ανοιχτές διακλάσεις** εμφανίζονται δίχως παραμόρφωση, ενώ ο χώρος τους δεν είναι πληρωμένος με κατακερματισμένο υλικό ή αποθέσεις αλάτων. Ο ιστός του σχηματισμού επηρεάζει τη μορφολογία των ρωγμών, δηλαδή το πλάτος και την τραχύτητα της επιφάνειας.

Το πλάτος και η τραχύτητα της διάρρηξης καθορίζουν τη διαπερατότητα, σε συνδυασμό με την κάθετη στο επίπεδο της ρωγμής τάση και διαμορφώνουν την λειτουργικότητα του ταμειυτήρα. Η διαπερατότητα βελτιώνεται σημαντικά στο επίπεδο που είναι παράλληλο στη διάρρηξη, όμως δεν παρατηρείται βελτίωση στα κάθετα, ως προς το σύστημα διαρρήξεων, επίπεδα.

Οι **παραμορφωμένες διακλάσεις** δημιουργούνται όταν ασκηθούν διατμητικές τάσεις σε μία ανοικτή ρωγμή ή σχηματίζονται σε ζώνες όλκιμης παραμόρφωσης, υπό την επίδραση διατμητικών τάσεων.

Οι δύο κύριες μορφολογίες που παρατηρούνται είναι οι κατοπτρικές επιφάνειες (λείες) και οι ταινίες παραμόρφωσης, που έχουν πληρωθεί με κατακερματισμένο υλικό.

Το **κατακερματισμένο υλικό** σχηματίζεται κατά την ολίσθηση 2 επιφανειών. Η σχετική κίνηση των δυο μη λείων επιφανειών οδηγεί σε ανάπτυξη τριβής και το υλικό που βρίσκεται στην επαφή κονιορτοποιείται. Στη συνέχεια, το υλικό γεμίζει μερικώς ή πλήρως τις ασυνέχειες και μειώνει τόσο την διαπερατότητα όσο και το πορώδες.

Να προστεθεί ότι η λεπτοκρυσταλλική δομή του κατακερματισμένου υλικού συνδέεται συνήθως με υψηλή τιμή κορεσμού σε νερό (Sw), που μειώνει τη σχετική διαπερατότητα, σε σχέση με τους υδρογονάνθρακες.

Οι **λείες επιφάνειες ή κατοπτρικές** αποτελούν επιφάνειες, σκεπασμένες με κατακερματισμένο υλικό, το οποίο έλωσε κατά την κατάκλαση ή κονιορτοποιήθηκε υπό την επίδραση τάσεων, συνδεδεμένων με τις ρηξιγενείς επιφάνειες. Οι λείες επιστρώσεις ποικίλλουν σε πάχος, το οποίο είναι της τάξης μερικών χιλιοστών, ενώ η διαπερατότητα μειώνεται κάθετα στη διεύθυνση της επιφάνειας ολίσθησης.

Οι **πληρωμένες με άλατα διακλάσεις** προκύπτουν από την εναπόθεση υλικού κατά τη διαγένεση. Η διαγένεση αποτελεί μηχανισμό που βελτιώνει ή καταστρέφει το πορώδες, σε συνθήκες επιφανειακές ή βάθους και μπορεί να εμφανιστεί πολλαπλές φορές (διαγενετικά επεισόδια).

Η λεπτοκρυσταλλική μάζα, που εμπεριέχεται στα κορεσμένα ύδατα και καθιζάνει, μειώνει σε πρώτη φάση το πορώδες, λειτουργώντας ως εμπόδιο-φραγμό. Όταν, όμως, το υλικό που αποτέθηκε είναι ευδιάλυτο, όπως ο ασβεστίτης, είναι πιθανή η διάλυση του, κατά τη διέλευση ακόρεστου ύδατος, που μέσω του συστήματος ρωγμών κινείται πιο εύκολα.

Στους ανθρακικούς ταμιευτήρες συχνά εμφανίζεται ως υλικό πλήρωσης ρωγμών σελλοειδής δολομίτης (saddle dolomite), του οποίου ο σχηματισμός συνδέεται με το τελικό στάδιο της διαγένεσης και υδροθερμική δραστηριότητα. Να σημειωθεί πως ο συγκεκριμένος τύπος δολομίτη συνδέεται με διακλάσεις, όμως συνδέεται, επίσης, με μεταλοφόρες φλέβες μεικτών θειούχων (μολύβδου-ψευδαργύρου).

Οι **κοιλότητες διακλάσεων** αποτελούν ρωγμές, οι οποίες αυξήθηκαν σε μέγεθος, λόγω δράσης ακόρεστων ρευστών. Τα ρευστά διαλύουν το πετρώμα και τη μικροκρυσταλλική ύλη, που επουλώνει τις διάφορες ασυνέχειες, προκειμένου να κορεστούν και να εξασφαλίσουν κατάσταση ισορροπίας.

Το μέγεθος των κοιλοτήτων επιτρέπει σημαντική βελτίωση του πορώδους, όμως απαιτείται καταννοηση της προέλευσης και του προσανατολισμού των ανοιχτών διαρρήξεων, ώστε να εκτιμηθεί το πραγματικό πορώδες. Η καταννόηση των διαγενετικών μηχανισμών είναι εξίσου σημαντική, μιας και διαμορφώνουν την ποιότητα του ταμιευτήρα.

Η παρουσία των κοιλοτήτων αποτελεί το πρώτο βήμα. Στη συνέχεια είναι σημαντικό να χρονολογηθούν σχετικά τα διαγενετικά επεισόδια, που διέλυσαν τα τοιχώματα των ρωγμών και να προσδιορισθεί το πως τροποποίησαν την ποιότητα και την αποδοτικότητα του ταμιευτήρα. Η μελέτη είναι πιο σύνθετη, όταν υπάρχουν περισσότερα από ένα συστήματα διακλάσεων.

Χαρακτηριστικά, αξίζει να αναφερθεί ότι οι ασυμφωνίες και οι καρστικές ζώνες είναι διακριτές σε διαγραφίες ακτινών γ και παρουσιάζονται ως spikes (κορυφές-αιχμές), με υψηλές θετικές ανωμαλίες.

Ακόμη, σύμφωνα με τους Lorenz κ.α (1997), οι δολομίτες και τα λεπτοκρυσταλλικά πετρώματα διαρρηγνύονται πιο εύκολα από τους ασβεστολίθους και τους αδρόκοκκους σχηματισμούς. Επίσης, πιο επιρρεπή παρουσιάζονται τα λεπτά στρώματα, έναντι των πιο παχιών, ενώ σημαντικός παράγοντας αποτελεί η στρωματογραφική θέση του σχηματισμού. Για παράδειγμα, στην κορυφογραμμή των πτυχών, όπου συγκεντρώνονται οι πιέσεις, η πιθανότητα θραυσιγενούς παραμόρφωσης είναι υψηλότερη, σε αντίθεση με τα πτερύγια της πτυχής, που είναι αισθητά μικρότερη.

2.6.3 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ

Το πορώδες σύστημα των λεπτοκρυσταλλικών αποθέσεων διαφέρει από το πορώδες σύστημα των διαρρήξεων, καθώς στη δεύτερη περίπτωση λαμβάνονται σοβαρά υπόψη το πλάτος των ρωγμών και την μεταξύ τους απόσταση.

Για τη περιγραφή της διαπερατότητας διακλάσεων αναπτύχθηκε η **θεωρία παράλληλων πλακών (parallel plate theory)**. Η θεωρία αυτή επιτρέπει τη μοντελοποίηση της ροής των ρευστών, με την υπόθεση πως η ροή παρατηρείται μεταξύ των δυο παράλληλων δίσκων, διανύοντας απόσταση ίση με e .

Η χρήση ρεομέτρων του τύπου αυτού επιτρέπει μετρήσεις ρεολογικών ιδιοτήτων και επιτρέπει τη μέτρηση γραμμικών ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων.

Η μαθηματική διατύπωση της ροής, που κινείται στο μέσο των πλακών παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\frac{Q}{A} = \frac{e^3}{12D} * \frac{dh}{dl} * \frac{\rho g}{\mu}$$

Όπου,

Q = ο μετακινούμενος όγκος ρευστού

A = επιφάνεια διατομής

D = απόσταση μεταξύ πλακών

Η εξίσωση περιορίζεται σε περιγραφή γραμμικών ροών σε παράλληλους δίσκους, με περιθώριο ελάχιστης, συμβολικής μεταβολής πάχους των ρωγμών.

Η περιγραφή της συνδιαστικής ροής, μέσω μικροκρυσταλλικής μάζας και διακλάσεων, αναπτύχθηκε από τον Parsons (1966). Πιο συγκεκριμένα, η εξίσωση που περιγράφει τη συνδιαστική ροή:

$$k_{fr} = k_r + \frac{e^3 \cos^2 a}{12D}$$

ενώ η ροή μέσω των διαρρήξεων (αποκλειστικά):

$$k_f = \frac{e^2}{12} * \frac{\rho g}{\mu}$$

Όπου,

k_{fr} = αθροιστική διαπερατότητα μικροκρυσταλλικής μάζας και διακλάσεων

k_f = διαπερατότητα διακλάσεων

k_r = διαπερατότητα μικροκρυσταλλικής μάζας (matrix)

a = γωνία μεταξύ επιπέδου διάκλασης και του άξονα κλίσης πίεσης (pressure gradient)

Να σημειωθεί ξανά πως η εξίσωση περιγράφει μόνο γραμμική ροή ρευστής φάσης και προϋποθέτει πως οι πλάκες είναι παράλληλες, αμετακίνητες και λείες. Αποτελεί, όμως, ένα εργαλείο που επιτρέπει μία πρώτη εκτίμηση της διαπερατότητας του ταμιευτήρα.

2.6.4 ΠΟΡΩΔΕΣ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ

Το πορώδες διακλάσεων υπολογίζεται με βάση την παρακάτω μαθηματική εξίσωση:

$$\varphi_f = \frac{e}{D+e} * 100$$

Όπου,

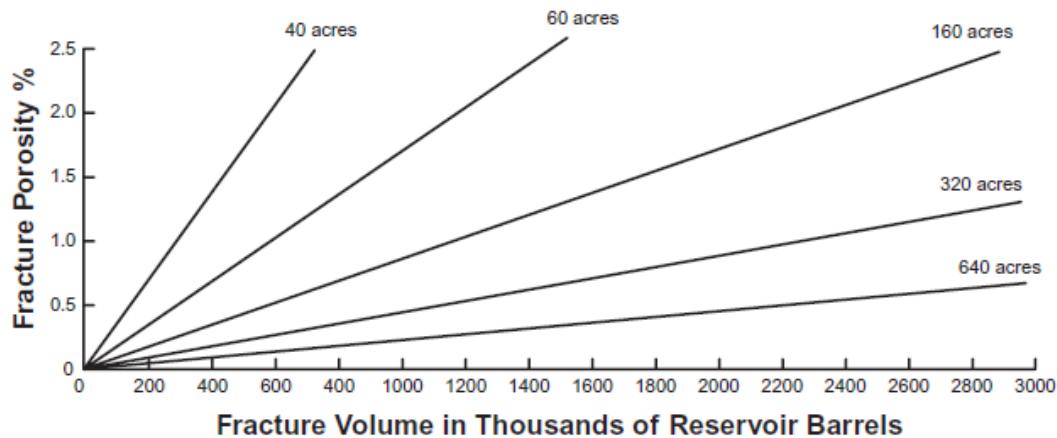
φ_f =πορώδες διάρρηξης

e = μέσο πλάτος διακλάσεων

D = μέση απόσταση μεταξύ παράλληλων διακλάσεων

Το πορώδες των ρωγμών ρυθμίζεται από την απόσταση μεταξύ των διαρρήξεων και εξαρτάται από την κλίμακα. Αυτό σημαίνει πως εαν μετρηθεί μία μικρή περιοχή, στην οποία συναντάται διάρρηξη το πορώδες που προκύπτει θα είναι υψηλό. Αντίθετα, εαν ληφθεί μία μεγαλύτερη περιοχή, με την ίδια διάρρηξη, το πορώδες δεν θα είναι τόσο υψηλό, καθώς η συμβολή της διάρρηξης δεν είναι τόσο εκτεταμένη.

Για το λόγο αυτό, πρέπει να επιλέγονται μεγάλες περιοχές μελέτης, ώστε να βρεθούν αρκετές διαρρήξεις και να βασιστεί η μελέτη σε μία αντιπροσωπευτική θέση του ταμιευτήρα. Επίσης, πρέπει να προσδιοριστεί ποιο ή ποια συστήματα διακλάσεων συνεισφέρουν στην βελτίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα.



Εικόνα 2.6α: Διάγραμμα, που συνδέει το πορώδες διακλάσεων, τον όγκο της διάκλασης και την περιοχή απόληψης (Πηγή: Nelson (2001))

Τέλος, να σημειωθεί πως το πορώδες των διακλάσεων αποτελεί ένα μικρό ποσοστό του συνολικού πορώδους. Ωστόσο, συνεισφέρει συχνά σε μεγάλο βαθμό στην ολική διαπερατότητα, καθώς οι διακλάσεις συχνά επικοινωνούν μεταξύ τους και επιτρέπουν την εύκολη μετανάστευση ρευστών μέσω αυτών.

2.6.5 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΙΑΡΡΗΓΜΕΝΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

Η ταξινόμηση των ταμιευτήρων που παρουσιάζεται στην ενότητα αυτή είναι σύμφωνα με τον Nelson (2001), όπου μελετάται εξονυχιστικά η γεωλογία των fractured reservoirs.

Οι κύριες κατηγορίες, στις οποίες διακρίνονται, είναι τέσσερις:

- ΤΥΠΟΣ I: Διακλάσεις που συμβάλλουν σημαντικά στο πορώδες και τη διαπερατότητα του ταμιευτήρα
- ΤΥΠΟΣ II: Διακλάσεις που παρέχουν σημαντική διαπερατότητα
- ΤΥΠΟΣ III: Διακλάσεις που συνεισφέρουν στη διαπερατότητα ενός ήδη ικανού να αξιοποιηθεί ταμιευτήρα
- ΤΥΠΟΣ IV: Διακλάσεις που δεν συμβάλλουν στη διαμόρφωση του πορώδους και της διαπερατότητας, όμως ευθύνονται για ανισοτροπίες εντός του ταμιευτήρα

Οι ταμειυτήρες του **τύπου I** δεν έχουν μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα και τα αποθέματα τους είναι σχετικά χαμηλά, καθώς το πορώδες της μικροκρυσταλλικής ύλης είναι πολύ μικρό. Να σημειωθεί πως η μικροκρυσταλλική ύλη αποτελεί το σημαντικότερο αποθηκευτικό χώρο στους ανθρακικούς ταμειυτήρες.

Στα θετικά των ταμειυτήρων τύπου I περιλαμβάνεται η υψηλή αρχική παροχή (Initial Potential) και η δυνατότητα παραγωγής από σχηματισμούς που δεν πληρούν τα σύνηθη πρότυπα ποιότητας (nonreservoir and nonstandard quality rocks). Επίσης, ο όγκος, που λαμβάνεται ανά γεώτρηση, είναι μεγάλος και δεν απαιτείται μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων, ώστε να αναπτυχθεί το εγχείρημα.

Στα αρνητικά περιλαμβάνεται η δυσκολία προσδιορισμού του μεγέθους και σχήματος της περιοχής απόληψης, δηλαδή των θέσεων του ταμειυτήρα, που εμπεριέχονται οι υδρογονάνθρακες. Συχνό πρόβλημα, ακόμη, αποτελεί η ταχεία μείωση του όγκου απόληψης σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Στον τύπο αυτό κρίνεται σημαντικός ο υπολογισμός του πορώδους και του όγκου των διακλάσεων και η συμβολή τους στην πετρογραφία του ταμειυτήρα. Οι υπολογισμοί επιτρέπουν μία αρχική εκτίμηση των αποθεμάτων και πρόβλεψη της πορείας απόληψης, εαν δηλαδή θα διατηρηθεί η παροχή ή θα υποχωρήσει. Επίσης, απαιτείται προσοχή κατά το σχεδιασμό των γεωτρήσεων και την παραγωγή τους, προκειμένου να διασφαλιστεί η βέλτιστη παραγωγή και ο περιορισμός της πιθανότητας αστοχίας.

Σημαντικό αντιπροσωπευτικό παράδειγμα του τύπου I βρίσκεται στο Amal Field της Λιβύης, με αποθέματα περίπου 1700 MMbbls (εκατομύρια βαρέλια). Ο ταμειυτήρας έχει πάχος περίπου 243 μέτρα (800 feet) και έκταση μεγαλύτερη των 100.000 acres (1 acre είναι περίπου ίσο με 4 στρέμματα).

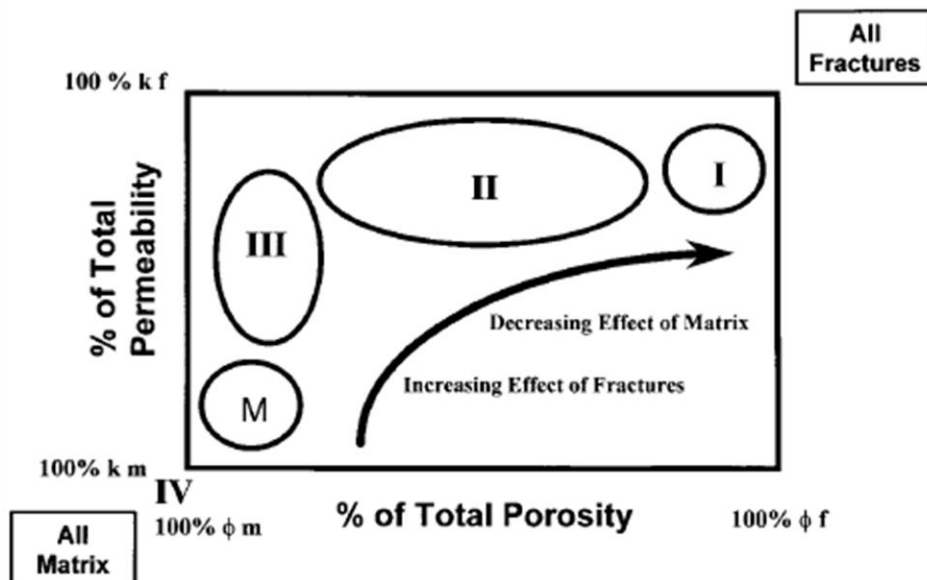
Οι ταμειυτήρες **τύπου II** χαρακτηρίζονται από αυξημένη αποθηκευτική ικανότητα. Τα αποθέματα είναι μεγαλύτερου όγκου από τον τύπο I, ενώ πολλές φορές η ροή των υδρογονανθράκων διευκολύνεται από την ύπαρξη των διακλάσεων (ρύθμιση παροχής).

Ο συντελεστής απόληψης δεν είναι εύκολο να προσδιορισθεί και μεταβάλλεται. Η ανάπτυξη δεν μπορεί να ακολουθήσει κάποιο μοντέλο, αλλά πρέπει να προσαρμοσθεί αποκλειστικά στο υπάρχον

μοντέλο της περιοχής, ενώ οι διακλάσεις είναι επιρρεπείς σε ανάπτυξη πιέσεων και ίσως κλείσουν.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ταμιευτήρα τύπου II αποτελεί το κοίτασμα στο Agha Jari Field του Ιραν, με αποθέματα που αγγίζουν τα 9500 MMbbl και το Spraberry trend στο Τέξας, με αποθέματα περίπου ίσα με 447 MMbbls (Nelson, 2001).

Οι ταμιευτήρες **τύπου III** αναπτύσσονται σε περιοχές, όπου η μικροκρυσταλλική μάζα και οι διακλάσεις επιτρέπουν σημαντικές ροές, αν και οι διακλάσεις συμβάλλουν συμβολικά μόνο στη διαπερατότητα. Η κατανομή των αποθεμάτων στο ταμιευτήρα είναι σχετικά ομογενής, ενώ στο χώρο επικρατούν οι ιδιότητες της μικροκρυσταλλικής μάζας.



Εικόνα 2.6β: Προβολή τύπων ταμιευτήρων και συμβολή (ποσοστό) μικροκρυσταλλικής μάζας και διακλάσεων στο πορώδες και τη διαπερατότητα (Πηγή: Nelson, 2001)

Ωστόσο, ο ταμιευτήρας παρουσιάζει ανισοτροπία ως προς τη διαπερατότητα του, ενώ η ανταπόκριση στην δευτερογενή ανάκτηση (secondary recovery) δεν είναι πάντοτε ίδια. Επίσης, να σημειωθεί πως ο συσχετισμός μεταξύ πυρηνών γεώτρησης και δοκιμαστικών ελέγχων φρεατίων (well test) συχνά είναι φτωχός.

Οι σημαντικότεροι ταμιευτήρες τύπου III βρίσκονται στο Kirkuk Field στο Ιράν (15,000 MMbbls) και στο Hassi Messaoud στην Αλγερία (6000 MMbbls).

Ο **τύπος IV** περιγράφει τους ταμιευτήρες, τους οποίους οι διακλάσεις συχνά διαμελίζουν, παράλληλα με τη συμβολή τους στη διαμόρφωση της ποιότητας τους.

Οι ταμιευτήρες του τύπου αυτού παρουσιάζονται διαμελισμένοι, ενώ οι γεωτρήσεις δεν αποδίδουν σύμφωνα με τις δυνατότητες της μικροκρυσταλλικής ύλης. Ο συντελεστής ανάκτησης μεταβάλλεται εντός του πετρελαϊκού πεδίου.

2.6.6 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΔΙΑΡΡΗΓΜΕΝΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΕΜΜΟΝΗΣ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ

Αφού κατανοήσει κανείς τις ιδιότητες και τους τύπους των διαρρηγμένων ανθρακικών ταμιευτήρων, στόχος αποτελεί ο εντοπισμός τους. Η σεισμολογία αποτελεί αξιόπιστη μέθοδο εντοπισμού, ενώ σημαντική είναι η βοήθεια που λαμβάνεται από ερευνητικές γεωτρήσεις, σε θέσεις που αναμένουμε εντοπισμό σχηματισμών που φέρουν διακλάσεις.

Στη σεισμολογία λαμβάνονται μετρήσεις σεισμικών κυμάτων, τα οποία χαρακτηρίζονται από μέγεθος, όπως η ένταση, η συχνότητα και η πολικότητα. Η ανάλυση AVO αποτελεί πολύτιμη τεχνική, που επιτρέπει τον προσδιορισμό του πάχους, της πυκνότητας και του πορώδους της λιθολογίας, όπως και το περιεχόμενό αυτής (ρευστά).

Η ανάλυση AVO χρησιμοποιείται κυρίως για μελέτη άμμων που περιέχουν αέρια (gas sands), όμως σε συγκεκριμένες περιπτώσεις μπορεί να γίνει χρήση της μεθόδου και σε ανθρακικούς σχηματισμούς.

Όσον αφορά την απόσταση μεταξύ των διακλάσεων και την εμμόνη τους, εξαρτώνται κυρίως από τη σύσταση του ανθρακικού σχηματισμού, το πάχος του στρώματος και τη σχέση μεταξύ της γεωμετρίας των ρηγμάτων και της διαρρηγμένης ζώνης.

Σύμφωνα με τους Stearns και Friedman (1972), πετρώματα που αποτελούνται κυρίως από εύθρυπτα υλικά παρουσιάζουν διακλάσεις με μικρότερες αποστάσεις μεταξύ τους έναντι των

λιγότερο εύθρυπτων σχηματισμών. Ο δολομίτης, ο κερατόλιθος και σε μερικές περιπτώσεις ο ασβεστίτης αποτελούν τις πιο εύθρυπτες ορυκτολογικές φάσεις των ανθρακικών ταμιευτήρων.

Η απόσταση των διακλάσεων επηρεάζεται, επίσης, από το πορώδες, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Εάν ένας σχηματισμός έχει χαμηλό πορώδες, χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη αντοχή και οι διακλάσεις είναι πιο κοντά μεταξύ τους, ενώ οι διακλάσεις εκτείνονται σημαντικά στο χώρο (εμμονή). Η μεταβολή της σύστασης και του ιστού στο γεωλογικό σώμα οδηγεί σε εκδήλωση διαφορετικών φαινομένων στις διάφορες θέσεις.

Το πάχος των σχηματισμών αποτελεί μία ακόμη σημαντική παράμετρο. Οι μικρού πάχους σχηματισμοί περιέχουν διακλάσεις, που δεν απέχουν πολύ μεταξύ τους, σε αντίθεση με τους σχηματισμούς μεγάλου πάχους. Η εμμονή των διακλάσεων δε διαφοροποιείται στις δυο υποκατηγορίες.

Η γεωμετρία της περιοχής, τέλος, επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την εμμονή των διακλάσεων και την απόστασή τους. Υψηλή εμμονή και μικρότερες ενδιάμεσες αποστάσεις περιγράφουν θέσεις των σχηματισμών που εντοπίζεται ο μεγαλύτερος ρυθμός μεταβολής της καμπυλότητας ή κλίσης ως προς τη μονάδα της οριζόντιας απόστασης.

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δεύτερη κύρια κατηγορία στην οποία διακρίνονται οι ταμιευτήρες είναι οι ψαμμιτικοί. Οι ψαμμίτες είναι σημαντικοί ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, αποτελώντας το 50% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής, μπορούν, όμως, να λειτουργήσουν και ως υδροφορείς και να χρησιμοποιηθούν για την άντληση νερού.

Η εκμετάλλευση τους δεν περιορίζεται στις παραπάνω περιπτώσεις, αφού είναι δυνατή η χρήση τους για αποθήκευση φυσικού αερίου και διάθεση λυμάτων.

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν οι ιδιότητες των ψαμμιτών, που επηρεάζουν την ποιότητα και τη λειτουργία του ταμιευτήρα. Πιο συγκεκριμένα, η μορφολογία καθορίζει την ποσότητα των ρευστών, που μπορούν να αποθηκευτούν, ενώ η δομή ελέγχει σημαντικά την παραγωγή τους.

Το περιβάλλον απόθεσης καθορίζει την αρχική σύνθεση του ταμιευτήρα, ενώ οι ιδιότητες του διαμορφώνονται σε επόμενα στάδια από τις διαγενετικές διεργασίες. Για το λόγο αυτό, η κατηγοριοποίηση των πυριτοκλαστικών ή ψαμμιτικών ταμιευτήρων θα γίνει με βάση το περιβάλλον απόθεσης.

Κρίνεται, λοιπόν, αναγκαία η κατανόηση των ιδιοτήτων που περιγράφουν τους ψαμμίτες, ώστε να μπορεί να προβλέψει κάποιος τη συμπεριφορά του ταμιευτήρα. Αποτελεί το πρώτο βήμα για τη βέλτιστη διαχείριση και εκμετάλλευση του ταμιευτήρα, ο οποίος απαιτεί λεπτομερή ανάλυση και μοντελοποίηση, πρώτου ληφθεί οποιαδήποτε απόφαση.

3.2 ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΨΑΜΜΙΤΩΝ

Η οικογένεια των ψαμμιτών (sandstones) περιλαμβάνει όλα τα κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα, των οποίων οι κόκκοι έχουν διάσταση που κυμαίνεται από 2-0.063mm.

Το χαλαρό υλικό απόθεσης (ίζημα), που υπόκειται διαγένεση και οδηγεί έπειτα από συμπαγοποίηση στο σχηματισμό ψαμμίτη, είναι η άμμος. Σαν πέτρωμα περιέχει πολλά ορυκτά, εκ των οποίων ο χαλαζίας επικρατεί συνήθως λόγω υψηλής σκληρότητας, ενώ ακολουθούν οι άστριοι, το υλικό πλήρωσης ή μικροκρυσταλλική μάζα (matrix) και τα θραύσματα.

Με βάση τη φάση το ορυκτό που επικρατεί διακρίνονται σε τέσσερις πετρογραφικούς τύπους: (1) τους χαλαζιακούς ψαμμίτες, (2) τις αρκόζες, (3) τους λιθαρενίτες και (4) τους γραουβάκες.

Οι **χαλαζιακοί ψαμμίτες** αποτελούνται σχεδόν αποκλειστικά από χαλαζία. Είναι ορυκτολογικά ώριμοι, ενώ η έντονη παρουσία πυριτικών ορυκτών στη συνδετική ύλη καθιστά το πέτρωμα συμπαγές. Δεν περιέχει απολιθώματα και εμφανίζει συχνά χαρακτηριστική διασταυρούμενη στρώση.

Στις **αρκόζες** επικρατούν οι άστριοι. Είναι αδρόκοκκοι ψαμμίτες, το χρώμα των οποίων καθορίζεται από βαθμός αλλοίωσης των αστρίων. Χαρακτηρίζονται από ανωριμότητα, ορυκτολογική και δυναμική, ενώ προέρχονται από αποσάθρωση κυρίως γνευσιακών και γρανιτικών πετρωμάτων. Απαιτείται ραγδαία αποσάθρωση, προκειμένου να διατηρηθούν οι άστριοι σε υψηλό ποσοστό.

Στους **λιθαρενίτες** επικρατούν θραύσματα πετρωμάτων, ιζηματογενών, πυριγενών ή μεταμορφωμένων. Μια περίπτωση ξεχωρίζει, των ασβεστολιθιτών, στην οποία παρατηρούνται θραύσματα ανθρακικής προέλευσης.

Τέλος, οι **γραουβάκες** αποτελούν σκουρόχρωμους, σκληρούς, αδρόκοκκους ψαμμίτες, με υποκογχοειδή θραυσμό. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η παρουσία θραυσμάτων μέσα στη μάζα του γεωλογικού σώματος, τα οποία προέρχονται από διάφορα πετρώματα. Ανθρακικά, πυριτικά, βασικά ηφαιστειακά πετρώματα αποτελούν μερικά από αυτά που συναντώνται υπό μορφή θραυσμάτων.

Αργιλικά ορυκτά αποτελούν το υλικό πλήρωσης, ενώ το συγκολλητικό υλικό είναι χαλαζιακής ή ασβεστιτικής προέλευσης. Συνιστούν ψαμμίτες θαλάσσιας προέλευσης και θεωρείται πως αποτίθενται από τουρβιδιτικά ρεύματα.

3.2.1 ΠΡΩΤΟΓΕΝΕΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Η μελέτη ενός ταμιευτήρα θέτει ως πρώτο στόχο τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων, που περιγράφουν τη δομή και τη συμπεριφορά του. Οι πρωτογενείς ή κύριες ιδιότητες ελέγχουν τη συμπεριφορά του ταμιευτήρα, σε μεγάλο βαθμό και διαμορφώνουν τις δευτερογενείς ιδιότητες.

Σύμφωνα με τον Berg (1986), στις πρωτογενείς ιδιότητες περιλαμβάνονται η ορυκτολογική σύνθεση, η υφή και οι ιζηματογενείς δομές κτου γεωλογικού σώματος.

3.2.1.1 ΣΥΝΘΕΣΗ

Οι ψαμμίτες συνιστούν ιζηματογενείς σχηματισμούς και προέρχονται από την απόθεση κλαστικού υλικού (κόκκους), το οποίο αποτελείται κυρίως από χαλαζία, αστρίους και θραύσματα πετρωμάτων. Μεταξύ των διαφόρων κόκκων βρίσκεται το υλικό πλήρωσης ή μικροκρυσταλλική μάζα (matrix).

Το συγκολλητικό υλικό (cement) αποτελεί ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο του συστήματος. Περιλαμβάνει κάθε ουσία που αποτέθηκε γύρω και ανάμεσα στους κόκκους κατά τη διαγένεση και μεταρέπει το χαλαρό ίζημα σε συμπαγή σχηματισμό. Η διαδικασία αυτή, κατά την οποία χαλαρές αποθέσεις μετατρέπονται σε συμπαγές πέτρωμα, ονομάζεται λιθοποίηση.

Η αποσάθρωση, η μεταφορά και η απόθεση του υλικού αποτελούν τις κύριες διεργασίες παραγωγής υλικού και συγκέντρωσης ιζημάτων στο χώρο απόθεσης. Μετά την απόθεση και τη ταφή παρατηρούνται φυσικοχημικές μεταβολές του κλαστικού υλικού, οι οποίες αποδίδονται στο μηχανισμό της διαγένεσης.

Ο **χαλαζίας**, όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, συνιστά το κύριο συστατικό των ψαμμιτών. Η υψηλή του σκληρότητα (7 στη κλίμακα Mohs) τον καθιστά ανθεκτικό στην αποσάθρωση και στη τριβή, που αναπτύσσεται κατά τη μεταφορά των κόκκων.

Οι κύριες μορφές χαλαζία που παρατηρούνται είναι ο μονοκρυσταλλικός και ο πολυκρυσταλλικός, ο οποίος κατατάσσεται συυχνά στα θραύσματα. Ο μονοκρυσταλλικός προέρχεται από πλουτονικά σώματα, τα οποία είναι πλούσια σε χαλαζία, όπως ο

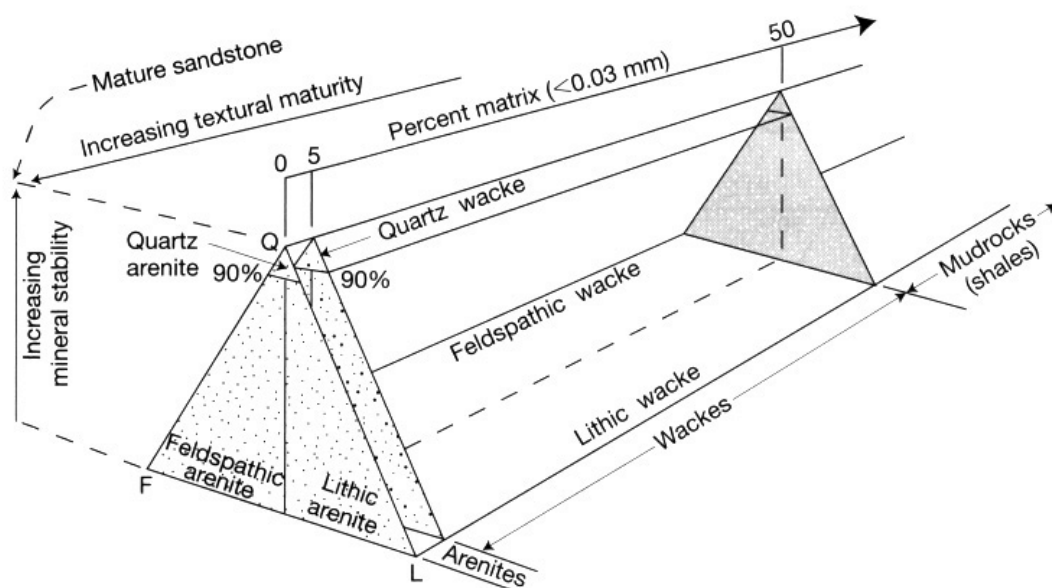
γρανίτης και είναι λιγότερο επιρρεπής στο διαμελισμό, σε αντίθεση με τον πολυκρυσταλλικό. απ

Ο πολυκρυσταλλικός χαλαζίας περιλαμβάνει πολλά όρια (μεταξύ των κόκκων που συγκροτούν το συσσωμάτωμα) και το γεγονός αυτό διευκολύνει το διαμελισμό του κατά τη μεταφορά του, όπου συγκρούεται με το περιβάλλον κλαστικό υλικό.

Οι **άστριοι** προέρχονται από την αποσάθρωση πυριγενών και μεταμορφωμένων σωμάτων, ενώ τα πιο συχνά μέλη αποτελούν τα πλαγιόκλαστα και το ορθόκλαστο.

Η σκληρότητα των αστρίων είναι χαμηλή, εξαλλοιώνονται εύκολα και ο συνδιασμός των παραγόντων αυτών ευθύνεται για το μικρό ποσοστό συμμετοχής των αστρίων στους ψαμμίτες. Το ορθόκλαστο και ο μικροκλινής (Καλλιούχοι Αστρίοι) είναι πιο ανθεκτικοί στην αποσάθρωση, ωστόσο, όπως όλοι οι άστριοι, αλλοιώνονται χημικά και δε διατηρούνται σε υψηλά ποσοστά.

Τα **θραύσματα** μαρτυρούν το περιβάλλον από το οποίο προέρχονται. Η παρουσία τους σε υψηλό ποσοστό υποδεικνύει μικρή απόσταση μεταφοράς του κλαστικού υλικού (χώρος απόθεσης κοντά στην πηγή τροφοδοσίας), όχι όμως πάντοτε. Θραύσματα ορυκτών, όπως ο χαλαζίας, είναι σκληρά, ανθεκτικά και διατηρούνται, ενώ άλλα θραύσματα (διαφορετικής ορυκτολογίας) έχουν διαμελισθεί και εξαφανισθεί.



Εικόνα 3.2α: Ταξινόμηση Ψαμμιτών (κατά Dott, 1964 τροποποιημένο από Pettijohn et al., 1972)
(Πηγή: <https://www.researchgate.net/figure>)

φύση των θραυσμάτων, επίσης, μαρτυρά το σχηματισμό, από τον οποίο προέρχονται. Τα λεπτοκρυσταλλικά θραύσματα, που είναι φυσικά και χημικά ασταθή, προέρχονται από σχιστολίθους και ηφαιστειακό γυαλί. Το ηφαιστειακό γυαλί είναι ιδιαίτερα ασταθές και κατά τη διαγένεση αργιλοποιείται και σχηματίζονται αργιλικά ορυκτά, με ταυτόχρονη μείωση του πορώδους.

Το **υλικό πλήρωσης (matrix)** συνίσταται κυρίως από αργιλικά ορυκτά, τα οποία συνήθως μετασχηματίζονται σημαντικά κατά τη διαγένεση.

Συνιθέστερα ορυκτά της αργίλου αποτελούν ο Καολινίτης, ο Ιλίτης και ο Μοντμοριλονίτης. Ο Καολινίτης προέρχεται από την αποσάθρωση πετρωμάτων, πλουσίων σε Καλιούχους αστρίους και είναι το πιο σταθερό, σε συνθηκες ταφής.

Όσον αφορά τον Μοντμοριλονίτη, παράγεται κυρίως κατά την αποσάθρωση λεπτοκρυσταλλικών ηφαιστειακών υλικών (πχ στάχτη). Το νερό, που εμπεριέχει, αφαιρείται κατά τη διαγένεση και σε θερμοκρασίες άνω των 100° C μετατρέπεται σε Ιλίτη. Τα υπόγεια ύδατα, επίσης, είναι ικανά να εξαλλοιώσουν τους αστρίους και να σχηματισεί καολινίτης.

Το **συγκολλητικό υλικό** συνήθως είναι πυριτικής ή ανθρακικής σύστασης. Οι πυριτικές καθιζήσεις παρατηρούνται αμέσως μετά την ταφή και συνεχίζονται με την αύξηση της θερμοκρασίας και του βάθους. Το ανθρακικό υλικό, πιο συχνά ασβεστίτης, εναποτίθεται νωρίς και γεμίζει τα κενά μεταξύ των κόκκων.

Πιθανή είναι η συμμετοχή ορυκτών, που κατά κανόνα δεν παρατηρούνται στο συγκολλητικό υλικό, όπως οι αυθυγενείς άστριοι. Το ργίλικό υλικό δεν θεωρείται συγκολλητική ύλη, καθώς η συνοχή της αργίλου είναι σχεδόν μηδενική και δεν είναι ικανή να συγκρατήσει τους κλάστες μεταξύ τους.

Δεν πρέπει να παραληφθεί η αναφορά σεορυκτών με χαμηλό ποσοστό συμμετοχής, όπως οι μαρμαρυγίες (πχ μοσχοβίτης, βιοτίτης). Ο μοσχοβίτης (καλλιούχος μαρμαρυγίας) διατηρείται σε μεγαλύτερο βαθμό από το βιοτίτη (σιδηρούχος μαρμαρυγίας) κατά την αποσάθρωση και τη μεταφορά του υλικού.

Βαρύτερα ορυκτά, όπως ο τουρμαλίνης και το ζirkόνιο, σπάνια μεταφέρονται στο χώρο απόθεσης και αποτελούν εξαιρετικά μικρό ποσοστό του σχηματισμού. Ακόμη σπανιότερη είναι η παρουσία ορυκτών, που αποσαθρώνονται εύκολα, όπως το επίδοτο και η κεροσίλβη.

3.2.1.2 ΥΦΗ (TEXTURE)

Ο όρος υφή αναφέρεται στη διάταξη των συστατικών στο χώρο και στα μακροσκοπικά γνωρίσματα ενός πετρώματος, δηλαδή στη γεωμετρία μεταξύ των κόκκων. Τα στοιχεία που περιλαμβάνει είναι το μέγεθος των κόκκων, η ταξινόμηση και η συνεκτικότητα (Berg, 1986).

Η **κοκκομετρία** ενός ψαμμίτη επιτρέπει την κατάταξη του, τον προσδιορισμό της πηγής προέλευσης, του μέσο μεταφοράς, αλλά και της μεταφορικής του ικανότητας. Στην ανάλυση αυτή σημαντικές παράμετροι αποτελούν η **διάμεσος (Median)** και ο **γραφικός μέσος (graphic mean)**.

Η **διάμεσος** το σημείο της αθροιστικής καμπύλης της κοκκομετρικής ανάλυσης, που βρίσκεται το 50%. Επάνω και κάτω από αυτό συναντώνται τα πιο λεπτομερή και τα πιο αδρόκοκκα υλικά αντίστοιχα. Ο **γραφικός μέσος** προτάθηκε από τον Folk, δίδεται από την εξίσωση ($\text{Mean} = \phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84} / 3$) και θεωρείται πως δίνει μία πιο ορθή εικόνα της κατανομής σε σχέση με τη διάμεσο, καθώς λειτουργεί με 3 σημεία αναφοράς.

Η **ταξινόμηση** αποτελεί ποιοτική περιγραφή της διασποράς των κόκκων, σε σύγκριση με τη διάμεσο ή τον αριθμητικό (ή γραφικό) μέσο. Ο ποσοτικός προσδιορισμός της διασποράς ονομάζεται **απόκλιση**.

Η παρουσία ενός ευρέος φάσματος μεγεθών υλικού χαρακτηρίζει ένα σχηματισμό με **φτωχή ταξινόμηση**, ενώ ένα μικρό φάσμα χαρακτηρίζει σχηματισμούς με **καλή ταξινόμηση**. Η διακύμανση στη ταχύτητα του μέσου μεταφοράς επηρεάζει τη μεταφορική ικανότητα του μέσου και ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό για τις αλλαγές στο μέγεθος των κόκκων.

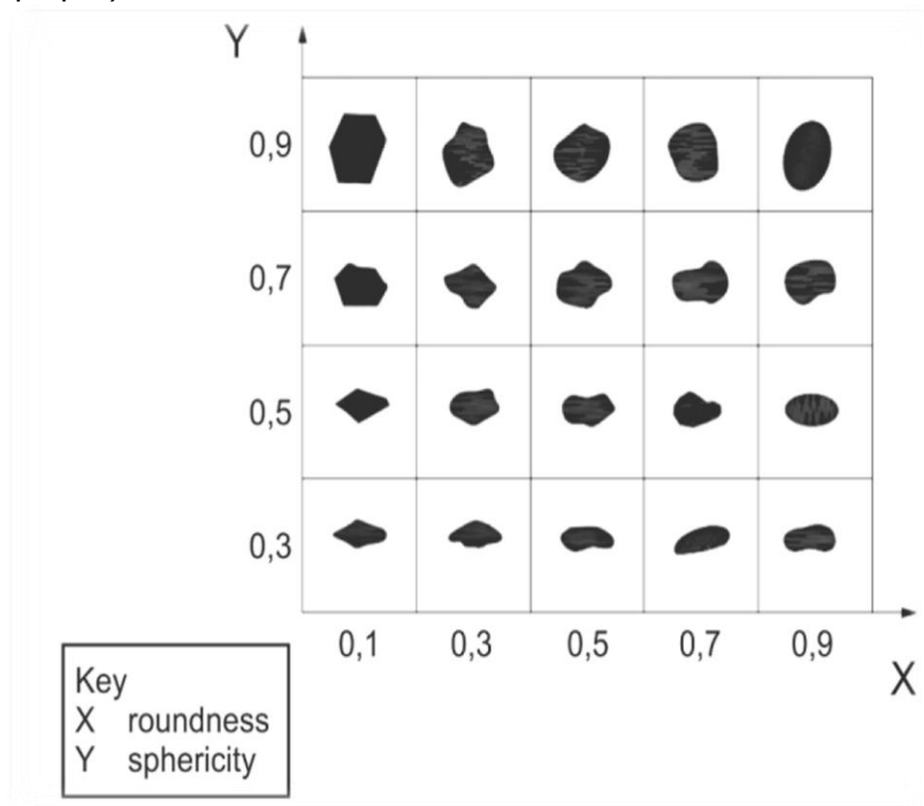
Αξίζει να σημειωθεί πως η βελτίωση της ταξινόμησης οδηγεί σε αύξηση του πορώδους. Η ομοιομορφία του υλικού εξασφαλίζει

υψηλές τιμές πορώδους, ενώ η προσθήκη πληθυσμών κόκκων διαφορετικού μεγέθους συνδέεται με ελάττωση της ιδιότητας.

Η **συνεκτικότητα (packing)** είναι σημαντική έννοια, προκειμένου να κατανοήσει κάποιος το πως σχηματίζεται το πορώδες.

Η συνεκτικότητα αναφέρεται στο τρόπο, με τον οποίο συγκρατούνται τα συστατικά στοιχεία του σχηματισμού και στο βαθμό που αλληλοστηρίζονται στο χώρο. Η αύξηση του βαθμού συνεκτικότητας συνδέεται με μείωση του όγκου της κυψελίδας και μείωση του κενού χώρου. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ερμηνευθεί η συμβολή της μηχανικής συμπύκνωσης στη μείωση του ολικού πορώδους, όταν οι διατάξεις των συστατικών περιορισθούν, λόγω ισχυρών πιέσεων.

Η **μορφή και το σχήμα**, τέλος, συνιστούν παραμέτρους, που περιλαμβάνονται στην υφή, αν και είναι δύσκολος ο προσδιορισμός και η μέτρηση τους. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα ανταποκρίνεται η **σφαιρικότητα**, που περιγράφει το πόσο πλησιάζει ο κόκκος το σχήμα της σφαίρας.



Εικόνα 3.2β: Εκτίμηση στρογγυλότητας (άξονας x) και σφαιρικότητας (άξονας y)
(Πηγή: <https://www.researchgate.net/figure>)

Από την άλλη, η **στρογγυλότητα** ανταποκρίνεται στη μορφή και εκφράζεται από τις γωνίες της εξωτερικής επιφάνειας των κόκκων. Η μικρή στρογγυλότητα περιγράφεται από απότομες, οξείες γωνίες, ενώ η μεγάλη στρογγυλότητα αντιπροσωπεύεται από κυρτές, ομαλές γωνίες.

3.2.1.3 ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ

Η **διαστρωμάτωση/στρώση** των ιζηματογενών πετρωμάτων αποτελεί το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό τους, που τους διακρίνει από τις άλλες κατηγορίες πετρωμάτων (πυριγενή και μεταμορφωμένα).

Οι ιζηματογενείς δομές προκύπτουν είτε ως αποτέλεσμα των ιζηματογενών διεργασιών είτε παράγονται φυσικοχημικών μεταβολών, που παρατηρούνται μετά την απόθεση. Σύμφωνα με τον Berg (1986), οι πρωτογενείς ιζηματογενείς δομές, οι οποίες συνδέονται με τις ιζηματογενείς διεργασίες, διακρίνονται ποιοτικά ή ποσοτικά.

Οι ποιοτικοί όροι λαμβάνουν ως βασική μονάδα στρώσης το **στρώμα**, το οποίο είναι συνήθως ένα ομογενές σώμα, που σχηματίζεται κατά την απόθεση υλικού. Πολλές φορές διακρίνονται με συγκεκριμένα λιθολογικά χαρακτηριστικά και στρωματογραφική θέση **ενότητες**, οι οποίες είναι σημαντικές για την έρευνα μιας περιοχής.

Το **μέλος** είναι τμήμα ενός σχηματισμού, το οποίο διακρίνεται από τον υπόλοιπο, λόγω ιδιαιτέρων χαρακτηριστικών. Δεν εκτείνεται πλευρικά όσο ο σχηματισμός, ενώ διακρίνεται σε γλώσσα (μέλος, του οποίου η προέκταση είναι σφηνοειδής) και σε φακούς (τα όρια του βρίσκονται στον ίδιο σχηματισμό).

Η **ομάδα** αποτελείται από διαδοχικούς σχηματισμούς, οι οποίοι έχουν ενιαία γενετικά ή λιθολογικά χαρακτηριστικά. Διαδοχικές ομάδες, που συνδέονται με κάποιο κοινό χαρακτηριστικό συγκροτούν μία **υπερομάδα**.

Ποιοτικά είναι δυνατός ο διαχωρισμός των στρωμάτων με βάση το πάχος τους. Πιο συγκεκριμένα, ένα **στρώμα** έχει πάχος από 1 cm (πολύ λεπτοστρωματώδες) και μπορεί να ξεπεράσει το μέτρο (πολύ παχυστρωματώδες). Αντίθετα, χρησιμοποιείται ο όρος **έλασμα**, όταν

το πάχος είναι μικρότερο του 1 cm. Η διάκριση αυτή είναι και ποσοτική, καθώς διακρίνει μαζώδεις, παχυστρωματώδεις σχηματισμούς από λεπτά στρώματα, με βάση το πάχος τους.

Οι **δευτερογενείς δομές** είτε εμφανίζονται ως αναδιπλώσεις του αρχικού στρώματος είτε ως διατμημένα στρώματα, που συνδέονται με κίνηση ιζημάτων κατά μήκος επίπεδης επιφάνειας.

Οι αναδιπλώσεις/πτυχώσεις συναντιούνται σε πιο λεπτόκοκκα ιζήματα, που διατηρούν σε υψηλό βαθμό την πλαστικότητα τους σε μικρά βάθη ταφής. Οι μετατοπίσεις, που παρατηρούνται σε διατμημένα στρώματα, μαρτυρούν ίσως τα αρχικά επίπεδα ιζηματογένεσης, όμως, είναι πιθανό να έχει μετατοπισθεί το υλικό, κατά μήκος άλλου επιπέδου.

Οποιαδήποτε δευτερογενή δομή εμφανίζεται συνήθως ως μη προσδωκόμενη εικόνα εντός του σχηματισμού. Η παραμόρφωση μπορεί να αποδοθεί σε μηχανικούς παράγοντες (πχ ρήγμα), όμως, συχνή είναι η συμβολή οργανισμών, που τροποποιούν τις πρωτογενείς δομές. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται βιοαναμόχλευση.

Η **βιοαναμόχλευση** αποτελεί ουσιαστικά μία επεξεργασία των ιζημάτων από ζώα ή φυτά. Οι οργανισμοί αυτοί υποσκάπτουν το υλικό, κάποιοι τρέφονται με το οργανικό υλικό, που περιέχεται μεταξύ των κόκκων, ενώ άλλοι μπορεί να ταφούν προσωρινά και να είναι σε θέση να διαταράξουν τα ιζήματα.

Τα ιζήματα αποτίθενται και με το τρόπο αυτό βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας. Η δράση, ωστόσο, των οργανισμών διαταράσσει την ισορροπία και επανεπεξεργάζεται τις αποθέσεις, μεταβάλλοντας την αρχική γεωμετρία.

3.2.1.4 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

Η **μορφολογία** αποτελεί μία ευρύτερη έννοια, που περιλαμβάνει το μέγεθος, ο σχήμα και την έκταση του ψαμμιτικού σώματος. Πρόκειται για μία σημαντική ιδιότητα, καθώς προσδιορίζει τον όγκο του ψαμμιτικού ταμιευτήρα, ο οποίος συγκεντρώνει το οικονομικό ενδιαφέρον.

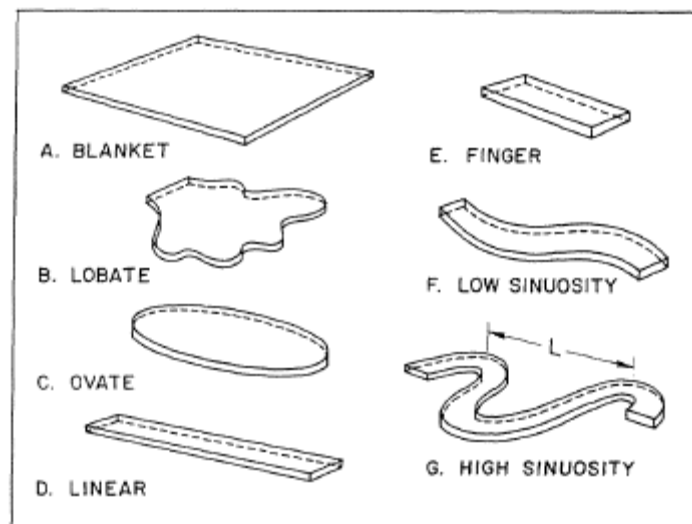
Με βάση τον Krynine (1948) και την τροποποίηση του Berg (1986) διακρίνονται διάφοροι τύποι ψαμμιτικών σωμάτων, με

διαφορετικά χαρακτηριστικά. Οι τύποι έχουν ληφθεί και αναφέρονται σύμφωνα με τη περιγραφή του συγγραφέα.

Τα **καλύμματα (blanket deposits)** αναφέρονται σε στρώματα, με μεγάλη έκταση, ενώ μήκος και πλάτος είναι ίσα μεταξύ τους και αρκετά μεγαλύτερα του πάχους. Εικόνα που πλησιάζει τον τύπο αυτό αποτελούν οι Θίνες, που σχηματίζονται από τη δράση του ανέμου (**Eolian Dunes**).

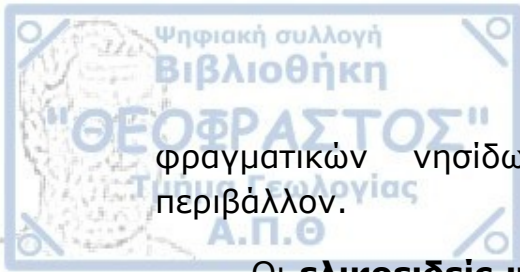
Οι **λοβωτοί ψαμμίτες (Lobate)** περιορίζονται σε έκταση, ενώ το πάχος είναι περίπου ίσο με το 100πλάσιο του μήκος ή του πλάτους, τα οποία είναι ίσα μεταξύ τους. Οι λοβοί παρατηρούνται σε ψαμμίτες αλουβιακών ριπιδίων ή υποθαλάσσιων ριπιδίων.

Οι **ωοειδείς ψαμμίτες (Ovate)** χαρακτηρίζονται από μήκος, το οποίο είναι μεγαλύτερο του πλάτους, ενώ και οι δύο διαστάσεις είναι τουλάχιστον 100 φορές περίπου μεγαλύτερες του πάχους. Οι αποθέσεις αυτές είναι απομονωμένες συνήθως, ενώ μορφολογία του τύπου αυτού χαρακτηρίζει ψαμμίτες ρηχού θαλάσσιου περιβάλλοντος.



Εικόνα 3.2γ: Μορφολογία ψαμμιτικών σωμάτων κατά Krypine (1948), τροποποίηση από Berg(1986)
Πηγή: Berg (1986)

Οι **γραμμικοί ψαμμίτες (Linear)** αναφέρονται σε τοπικές αποθέσεις, όπου το μήκος είναι πολύ μεγαλύτερο του πλάτους, ενώ το πλάτος είναι τουλάχιστον 300 φορές μεγαλύτερο του πάχους. Οι ψαμμίτες παράκτιου περιβάλλοντος, που αποτίθενται σε συστάδες



φραγματικών νησίδων (barrier islands) ή ρηχό θαλάσσιο περιβάλλον.

Οι **ελικοειδείς ψαμμίτες (sinuous)** περιγράφουν αποθέσεις, όπου το μήκος είναι αρκετά μεγαλύτερο του πλάτους ή του πάχους, όμως το πλάτος είναι πάντοτε μεγαλύτερο του πάχους (τουλάχιστον 100 φορές μεγαλύτερο). Καμπύλες γραμμές οριοθετούν το σώμα, ενώ η μορφολογία αυτή απαντάται σε ποτάμιους ψαμμίτες.

Μία τελευταία μορφολογία ψαμμίτη ονομάζεται **«finger type»** και περιγράφει γραμμικούς ψαμμίτες στενούς, μικρού μήκους. Η χρήση του όρου περιορίζεται κυρίως στο δέλτα του Μισισσιπή από τον Fisk (1961).

3.2.2 ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι δευτερογενείς ιδιότητες περιλαμβάνουν το πορώδες, τη διαπεραότητα και τον κορεσμό (saturation). Οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται και ελέγχονται σημαντικά από τις πρωτογενείς και γνώση των κύριων επιτρέπει μία πρώτη εκτίμηση των εξαρτώμενων χαρακτήρων.

3.2.2.1 ΠΟΡΩΔΕΣ

Το πορώδες αποτελεί μία δευτερογενή ιδιότητα και συνιστά τον εκατοστιαίο λόγο του όγκου των διακένων ενός γεωλογικού σώματος προς το συνολικό όγκο αυτού.

Η τιμή του πορώδους σε κλαστικούς σχηματισμούς καθορίζεται από το μέγεθος των κόκκων, τη συνεκτικότητα του, τη ταξινόμηση και την ποσότητα του συγκολλητικού υλικού και της μικροκρυσταλλικής μάζας (Beard και Weyl, 1973).

Ψαμμίτες σε χαμηλό βάθος ταφής παρουσιάζουν τιμές μεταξύ 30-40%, ενώ σε μεγαλύτερα βάθη παρατηρείται σημαντική ελάττωση του, με τιμές μεταξύ 10-25%. Οι ορθοχαλαζίτες έχουν το υψηλότερο πορώδες, σε αντίθεση με τους ιλυολίθους, που έχουν το χαμηλότερο. Οι ψαμμίτες, που περιέχουν αργιλικό υλικό σε σημαντικό ποσοστό, παρουσιάζουν τιμές πορώδους μεταξύ των ακραίων αυτών μελών.

Η μελέτη των ψαμμιτών περιγράφεται από 3 μορφές πορώδους. Ο πρώτος και κύριος τύπος που εντοπίζεται είναι το **διακοκκικό πορώδες**, που αναπτύσσεται μεταξύ των κλαστών-κόκκων.

Η δεύτερη μορφή, που εντοπίζεται σε ψαμμίτες είναι το **πορώδες διακλάσεων**, όπου το πορώδες του σχηματισμού βελτιώνεται, λόγω διακλάσεων. Οι διακλάσεις αυτές, εφόσον παραμένουν ανοιχτές, μπορούν να συνεισφέρουν θετικά στην ιδιότητα.

Το **δευτερογενές πορώδες** αποτελεί τον τρίτο τύπο πορώδους και στην πραγματικότητα περιγράφει πορώδη συστήματα, τα οποία έχουν τροποποιηθεί, λόγω διαγενετικών διεργασιών. Οι διεργασίες λειτουργούν κάποιες φορές ευεργετικά, ενώ άλλες φορές λειτουργούν καταστρεπτικά, μειώνοντας τον όγκο των διακένων, γεγονός που υποβαθμίζει την ποιότητα του ταμιευτήρα.

Οι διαγενετικές διεργασίες διακρίνονται σε φυσικές και χημικές. Οι **φυσικές** εκδηλώνονται με την ανάπτυξη πιέσεων, οι οποίες οδηγούν στη συμπύκνωση των αποθέσεων και το σχηματισμό ενός συμπαγούς γεωλογικού σώματος. Η συμπύκνωση συνοδεύεται από παραμόρφωση των ασταθών συστατικών (πχ ηφαιστειακό γυαλί), τα οποία στη συνέχεια γεμίζουν κενούς χώρους. Το βάθος, στο οποίο παρατηρείται η συμπύκνωση, είναι μικρό και μειώνει το πορώδες σε τιμές κάτω από 30%.

Οι **χημικές** οδηγούν σε στερεοποίηση των αποθέσεων και σχηματισμό ενός πιο συνεκτικού σώματος, μέσω αντιδράσεων μεταξύ ρευστών και αποθέσεων. Οι χημικές διαγενετικές διεργασίες περιλαμβάνουν την τσιμεντοποίηση, δηλαδή την εναπόθεση αλάτων μεταξύ των κόκκων.

Σε μικρά βάθη η εναπόθεση διακοκκικού ασβεστίτη είναι συνηθισμένη και λιθοποίηση οδηγεί σε μείωση του πορώδους. Μία άλλη μορφή χημικής διαγένεσης είναι η τροποποίηση ορυκτών και της μικροκρυσταλλικής ύλης, όπου άστριοι εξαλλοιώνονται και σχηματίζονται αργιλικά ορυκτά. Η μετατροπή αυτή οδηγεί, επίσης, σε μείωση του πορώδους.

Σε άλλες περιπτώσεις, αργιλικά ορυκτά, όπως ο καολινίτης και ο χλωρίτης, εναποτίθενται στους κόκκους. Τα άλατα περιέχονται στο νερό των πόρων και όταν αυτό κορεστεί σε ορισμένες φάσεις,

αποβάλλει το πλεόνασμα και σχηματίζονται οι εναποθέσεις, που μειώνουν το πορώδες.

Η χημική διαγένεση μπορεί να λειτουργήσει ευεργετικά, καθώς είναι πιθανή η διάλυση ορυκτών φάσεων και η ανάπτυξη νέων πόρων. Η διάλυση της ανθρακικής μικροκρυσταλλικής ύλης και των αστρίων είναι η συχνότερη μορφή διάλυσης και αποτέλεσμα αποτελεί η αύξηση του συνολικού όγκου των διακένων. Πρέπει, όμως, να σημειωθεί πως τα άλατα ίσως να αποβληθούν ξανά από το νερό, που λειτουργεί ως διαλύτης, όταν αυτό υπερκορεστεί ως προς τη συγκεκριμένη φάση.

Συνεπώς, το πορώδες αποτελεί μία σύνθετη ιδιότητα, η οποία διαμορφώνεται από την απόθεση, αλλά και τη διαγένεση. Η αρχική τιμή του συνήθως δεν εμφανίζεται αναλλοίωτη, καθώς το γεωλογικό καθεστώς είτε βελτιώνει τη τιμή του είτε το καταστρέφει.

Η παρουσία ρευστών αποτελεί μία σημαντική παράμετρο, όπως και ο βαθμός κορεσμού, μιας και καθορίζει το βαθμό διάλυσης και το βαθμό εναπόθεσης αλάτων. Τα αργιλικά ορυκτά είναι ευδιάλυτα, οι άστριοι εξαλλοιώνονται και μετατρέπονται σε αργιλικά ορυκτά, ενώ ασταθή θραύσματα, όπως το ηφαιστειακό γυαλί, μεταπίπτουν σε πιο σταθερές μορφές.

3.2.2.2 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Η διαπερατότητα αποτελεί μέτρο της ικανότητας ενός σχηματισμού να επιτρέπει την κίνηση ρευστών. Όπως έχει ειπωθεί, εξαρτάται σημαντικά από τη μορφολογία των πόρων, καθώς και από τα πλήθος των διακένων, τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους και σχηματίζουν το σύστημα, στο οποίο κυκλοφορούν τα ρευστά.

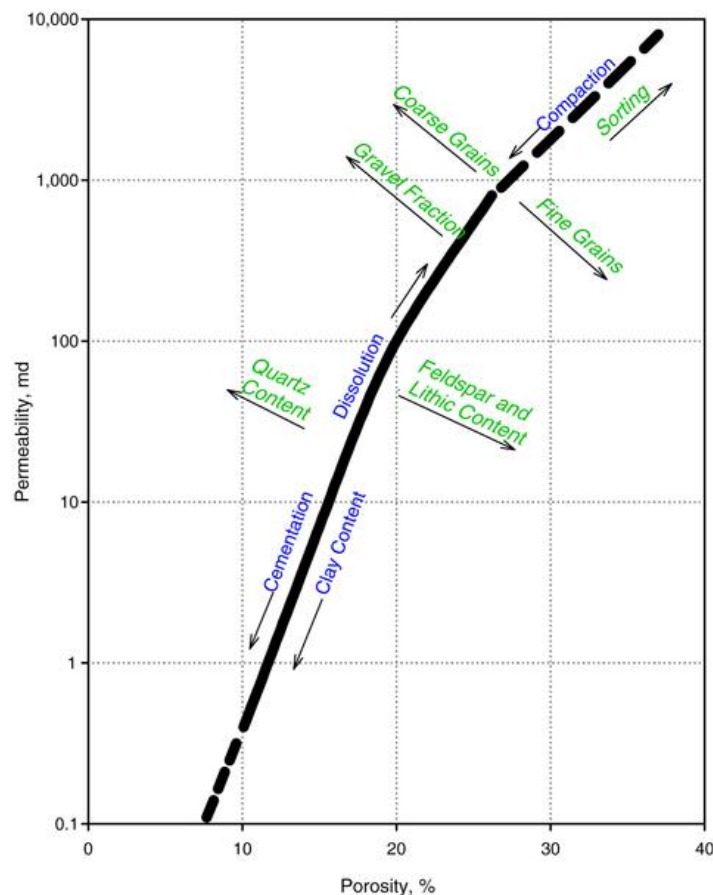
Η διαγένεση διαμορφώνει και μειώνει το πορώδες των ψαμμιτών, καθώς η συμπύκνωση ελαττώνει το μέγεθος των πόρων και επαναπροσδιορίζει την κατανομή τους στο χώρο. Η δράση των διαγενετικών παραγόντων είναι υπεύθυνη για τη νέα, τροποποιημένη γεωμετρία του ταμιευτήρα. Οι ψαμμίτες, με βάση το βαθμό διαγένεσης που έχουν υποστεί, διακρίνονται σε 4 κατηγορίες:

- Νέες αποθέσεις άμμου χαρακτηρίζονται από συντελεστή διαπερατότητας $k > 30$ darcies

- Μερικώς στερεοποιημένοι ψαμμίτες χαρακτηρίζονται από συντελεστή διαπερατότητας k μεταξύ 300-2.000 md
- Στερεοποιημένοι ψαμμίτες παρουσιάζουν τιμές συντελεστή διαπερατότητας μεταξύ 0,01-100 md
- Συνεκτικοί, συμπαγείς ψαμμίτες παρουσιάζουν τιμές συντελεστή διαπερατότητας μικρότερες από 0,01 md

Κατά την απόθεση των ιζημάτων παρατηρείται πως η διαπερατότητα είναι υψηλότερη και αυξάνεται με τη βελτίωση της ταξινόμησης του υλικού. Η ορυκτολογία, επίσης, επηρεάζει τη διαπερατότητα.

Πιο συγκεκριμένα, η υψηλή παρουσία αργιλικού υλικού μειώνει τη διαπερατότητα, δίχως να μειώνει πάντοτε το πορώδες. Η υψηλή παρουσία χαλαζία παράγει συστήματα με καλή διαπερατότητα, ακόμη και όταν αυτά έχουν χαμηλό πορώδες. Αντίθετα, η υψηλή περιεκτικότητα σε αστρίους μπορεί να οδηγήσει σε ανάπτυξη πορώδους, το οποίο, όμως, δεν παρουσιάζει ικανοποιητική διαπερατότητα.



Εικόνα 3.2δ: Επίδραση διαγενετικών διεργασιών στη τελική διαμόρφωση του πορώδους και της διαπερατότητας των ψαμμιτών
(Πηγή: <http://petrowiki.org>)

3.2.2.3 ΚΟΡΕΣΜΟΣ

Ο κορεσμός ορίζεται ως η ποσότητα των ρευστών που εμπεριέχεται σε ένα σχηματισμό. Οι μορφές κορεσμού και η σημασία του κορεσμού στη διαγένεση έχουν αναλυθεί παραπάνω. Στο σημείο αυτό θα προστεθούν κάποιες πληροφορίες, που αναφέρει ο Berg (1986).

Οι ταμιευτήρες περιέχουν ρευστά (αέριο ή πετρέλαιο) και νερό, το οποίο προέρχεται από το υδάτινο περιβάλλον, όπου αποτέθηκαν τα ιζήματα. Οι υδρογονάνθρακες, όμως, όταν μεταναστεύσουν στο γεωλογικό σώμα, δεν βρέχουν τους κόκκους επιφανειακά από την πρώτη στιγμή.

Όταν αργότερα, υπό υψηλή θερμοκρασία, μετατοπισθεί το νερό από την επιφάνεια των ορυκτών, το πετρέλαιο θα έλθει σε επαφή με επιφάνειες ορυκτών. Πολλά ορυκτά του ασβεστίου παρουσιάζουν υψηλή υγρασία σε πετρέλαιο, όμως οι ψαμμίτες είναι πλούσιοι σε χαλαζία και επικρατεί το νερό ως ρευστό στην επιφάνεια των κόκκων.

Η υψηλή παρουσία υδρογονανθράκων δεν αλλάζει πλήρως το γεγονός αυτό, καθώς το νερό παραμένει ως λεπτή ταινία, που περιβάλλει τους κόκκους. Οι παρατηρήσεις αυτές οδηγούν στο συμπέρασμα πως σε καλά ταξινομημένους ψαμμίτες ο κορεσμός σε νερό είναι αντιστρόφως ανάλογος με το πορώδες. 3

Είναι κατανοητό πως όταν είναι πιο συνεκτικό και συμπαγές το υλικό, η παρουσία του νερού γύρω από τους κόκκους γεμίζει τα περιορισμένα σε όγκο και πλήθος διάκενα.

Η **ειδική ηλεκτρική αντίσταση** αποτελεί ένα φυσικό μέγεθος, το οποίο επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη λιθολογία και τον προσδιορισμό της φύσης του ρευστού. Η τιμή της αντίστασης των ψαμμιτών είναι υψηλή, υψηλότερη από αυτή της αργίλου, και οι γεωφυσικές διαγραφείες επιτρέπουν διάκριση των σχηματισμών.

Όσον αφορά τις ρευστές φάσεις, στο **ανώτερο τμήμα** του ψαμμιτικού ταμιευτήρα η αντίσταση προβλέπεται να είναι υψηλή, γεγονός που προδίδει την παρουσία ρευστού υψηλής αντίστασης, δηλαδή πετρελαίου είτε αερίου. Σε **χαμηλότερες θέσεις** του ταμιευτήρα, όπου συναντάται η στήλη νερού, η αντίσταση είναι χαμηλή και υποδεικνύει ζώνη κορεσμένη σε αλμυρό νερό.

3.3 ΑΠΟΘΕΤΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΨΑΜΜΙΤΗ

Τα περιβάλλοντα απόθεσης καθορίζει τη μορφολογία, την πετρογραφία και τη λειτουργία του ταμιευτήρα. Κρίνεται αναγκαία η διάκριση των διαφορετικών περιβάλλοντων, προκειμένου να καταστεί πιο εύκολη η μελέτη των ψαμμιτικών ταμιευτήρων.

Σύμφωνα με τον Berg (1986) διακρίνονται τα παρακάτω είδη ψαμμιτών:

- Αιολικοί ψαμμίτες (eolian sandstones)
- Ποτάμιοι ψαμμίτες (fluvial sandstones)
- Δελταϊκοί ψαμμίτες (deltaic sandstones)
- Παράκτιοι ψαμμίτες (coastal sandstones)
- Ψαμμίτες υφαλοκρηπίδας (shelf sandstones)
- Ψαμμίτες βαθιάς λεκάνης (basin sandstones)

3.3.1 ΑΙΟΛΙΚΟΙ ΨΑΜΜΙΤΕΣ (EOLIAN)

Το αμμώδες υλικό, υπό ευνοϊκές συνθήκες και με τη δράση του ανέμου, μπορεί να σχηματίσει εκτεταμένες αποθέσεις. Οι αποθέσεις αυτές ονομάζονται θίνες.

Οι **θίνες** ορίζονται ως αναχώματα, λοφίσκοι ή ράχες από άμμο, που συγκεντρώνονται και σχηματίζονται από τη δράση του ανέμου, σύμφωνα με τους Ranwell και Boar (1986). Απαντώνται σε παραθαλάσσιες ακτές και σε ερήμους και οι διαστάσεις τους ποικίλλουν.

Κατά τη διάρκεια των καταιγιδών παγιδεύεται μεγάλος όγκος ιζημάτων από την φυτοκάλυψη της περιοχής. Σε άλλες περιοχές, όπου επικρατούν ισχυρότατοι άνεμοι, σχηματίζονται μεγάλων διαστάσεων θίνες, που μεταναστεύουν ως επιμήκη φράγματα εγκάρσιων θινών ή με παραβολική μορφή.

Ανεξάρτητα με τη θερμοκρασία της περιοχής, οι θίνες σχηματίζονται σε ξηρό-ημίξηρο κλίμα. Η σπάνια εκδήλωση βροχών εξασφαλίζει την έλλειψη συνοχής μεταξύ των κόκκων της άμμου και επιτρέπει τη μεταφορά της από τον άνεμο. Σε περιοχές, όπου περιοδικά παρατηρείται αυξημένη υγρασία και εποχική βλάστηση, παρεμποδίζεται η μεταφορά του υλικού και συγκεντρώνεται ένα παχύ στρώμα αμμωδών αποθέσεων.

Η διαδικασία αυτή είναι σημαντική και οδηγεί στη δημιουργία εμβρυικών θινών, οι οποίες διαβρώνονται από ισχυρούς ανέμους και το περιβάλλον επανέρχεται στην προηγούμενη κατάσταση του. Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται η εξέλιξη των εμπρόσθιων θινών, με αλληλεπίδραση μεταξύ των θινών και της παραλίας.

Η άμμος συγκεντρώνεται γύρω από τα φυτά και η ελάττωση της ενέργειας του ανέμου, όταν φθάνει κοντά στο έδαφος, προστατεύει τα ιζήματα από τον άνεμο. Η σταδιακή συγκέντρωση υλικού οδηγεί στην ανάπτυξη των θινών, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός φράχτη άμμου.

Να προστεθεί πως στη ζώνη των θινών το υλικό είναι σχεδόν ομοιόμορφο, η ταξινόμηση είναι καλή, ενώ σχηματίζονται συχνά σταυρωτές στρώσεις, με τις διευθύνσεις και τις κλίσεις να ποικίλλουν. Παρατηρούνται πολλά είδη θινών (εγκάρσιες, ημισελινοειδείς, παραβολικές κλπ) και οι δομές της άμμου παρουσιάζουν, επίσης, ποικιλία.

3.3.1.1 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΑΝΕΜΟΥ

Η αποσάθρωση και η μεταφορά της άμμου από τον άνεμο λειτουργεί δε διαφέρει σημαντικά από την αντίστοιχη δράση του νερού. Η κύρια διαφορά έγκειται στο γεγονός πως ο άνεμος είναι λιγότερο πυκνός από το νερό και απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα, σε σχέση με το νερό, για να είναι δυνατή η μεταφορά του υλικού.

Το υλικό μεταφέρεται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και η κίνηση του χαρακτηρίζεται αλματώδης, με τους κόκκους να ανυψώνονται σε μικρό βαθμό. Η αναπηδήσεις της άμμου οδηγεί συχνά σε σχηματισμό ενός νέφους, το οποίο μεταφέρει το υλικό, που θα αποτεθεί, όταν η μεταφορική ικανότητα του ανέμου μηδενισθεί.

Οι κόκκοι, που μεταφέρονται συνήθως, είναι μεταξύ 0,05-0,5 mm και κινούνται με άλματα, ενώ οι μεγαλύτεροι κόκκοι μεταξύ 0.5-1 mm μεταφέρονται με ολίσθηση στον πυθμένα. Το πιο λεπτόκοκκο υλικό (μικρότερο από 0.05 mm) αιωρείται και μεταφέρεται εντός του νέφους, που σχηματίζεται.

Μαθηματικά παρατηρήθηκε πως η πυκνότητα ενός θερμού ξηρού ανέμου είναι ίση με το 0.1% της πυκνότητας του νερού. Έτσι, προκύπτει ότι η ταχύτητα του ανέμου πρέπει να είναι 1000

μεγαλύτερη από του νερού, προκειμένου να μεταφερθεί ο ίδιος κόκκος και το ίδιο υλικό.

Η επίδραση των μικροοργανισμών (φυτικών και ζωικών) είναι σημαντική. Η παρουσία τους ενισχύεται από την παρουσία μικροποσοτήτων ιλύος και αργίλου και η δραστηριότητα τους δημιουργεί συσσωματώματα υλικού, τα οποία δεν μεταφέρονται με ευκολία. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται σταθερότητα στην επιφάνεια της άμμου.

3.3.1.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΘΙΝΩΝ

Σύμφωνα με τον McKee (1979) οι αποθέσεις άμμου σχηματίζουν συγκεκριμένες δομές, οι οποίες είναι διακριτές μεταξύ τους. Οι πιο εκτεταμένες αποθέσεις ονομάζονται **sheets**, οι οποίες δεν αποτελούν θίνες, σύμφωνα με τον αυστηρό ορισμό της έννοιας. Πρόκειται για επίπεδες επιφάνειες, όπου το υλικό είναι αδρόκοκκο και δεν είναι δυνατή η μεταφορά του από τον άνεμο.

Οι πιο χαρακτηριστικές μορφές θινών παρουσιάζουν ασυμμετρία. Οι **ημισελινοειδείς θίνες (barchan dunes)** είναι μικρές δομές με χαρακτηριστικό σχήμα, πυκνότερες στο κέντρο και λεπτές στο εξωτερικό τμήμα τους, γεγονός που μαρτυρά τη φορά του ανέμου, ο οποίος είναι σταθερής διεύθυνσης, αλλά μικρού δυναμικού. Αποτίθενται συνήθως σε σκληρό υπόβαθρο.

Οι **εγκάρσιες ράχες (transverse ridges)** αποτίθενται με το μορφολογικό άξονα κάθετο στη διεύθυνση του ανέμου και ο σχηματισμός τους προϋποθέτει μεγάλες ποσότητες άμμου. Επίσης, απαιτείται σταθερή διεύθυνση ανέμου, ενώ εμφανίζονται συχνά κατά μήκος των ακτών.

Οι **παραβολικές θίνες (parabolic dunes)** έχουν σχήμα παραβολής και κοίλη πλευρά τους είναι στραμμένη προς τη διεύθυνση του ανέμου που επικρατεί. Η βλάστηση ελέγχει σε ένα βαθμό το σχηματισμό των θινών αυτού του τύπου, ενώ απαιτείται υψηλή ταχύτητα ανέμου.

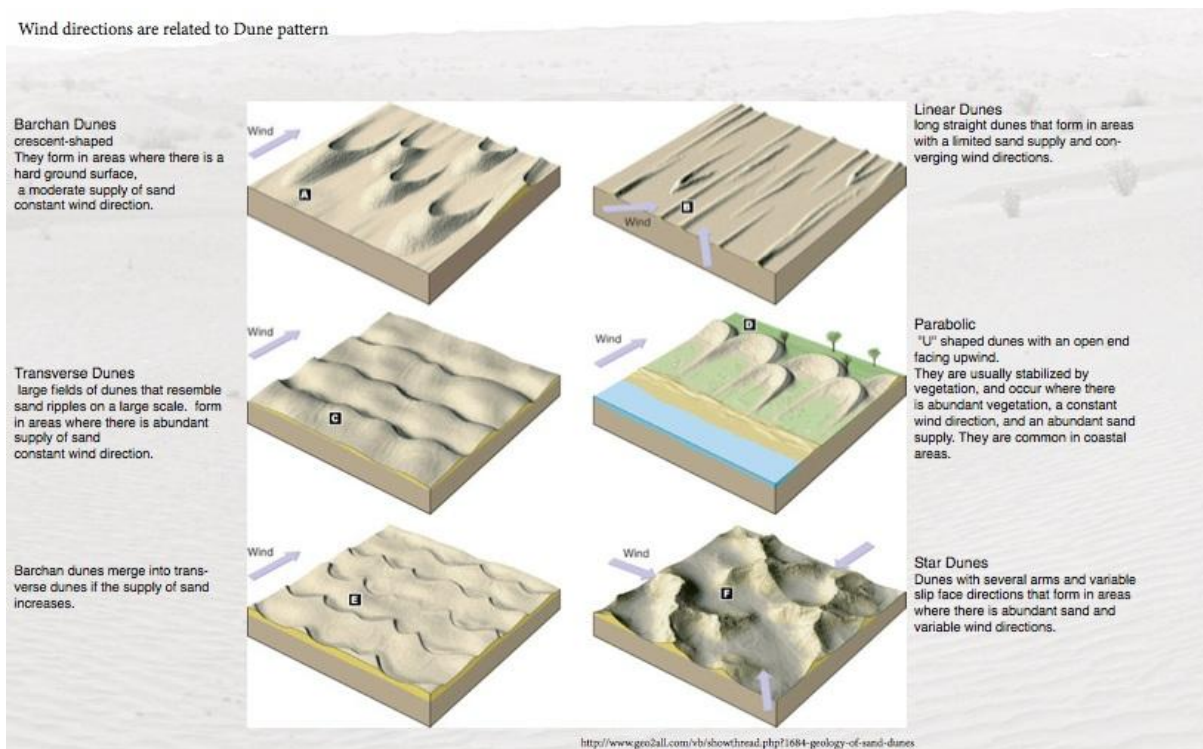
Οι **επιμήκειες θίνες (linear dunes ή seif)** αποτελούν μακριές, συμμετρικές ράχες και είναι παράλληλες προς τη διεύθυνση, που κινείται ο άνεμος. Αποτελούνται από δύο πρηνή και ο σχηματισμός τους αποδίδεται σε ισχυρούς ανέμους, με εποχική

αλλαγή της διεύθυνσης του. Η έκταση τους μπορεί να ξεπεράσει σε μήκος τα 160 χιλιόμετρα και είναι εμφανείς από δορυφορικές φωτογραφία.

Οι **ανεστραμμένες θίνες (reversing dunes)** αποτελούν ασύμμετρες ράχες, με ακανόνιστη μορφή και σχηματίζονται από ανέμους διπλής κατεύθυνσης, η οποία αλλάζει περιοδικά.

Οι **αστεροειδείς θίνες (star dunes)** παρουσιάζουν μία κεντρική κορυφή και τουλάχιστον τρία άκρα, που σχηματίζονται από ανέμους, των οποίων η φορά μεταβάλλεται.

Τέλος, τα **αιολικά έγκοιλα (blowout dune)** σχηματίζονται από την απομάκρυνση των ιζημάτων, λόγω του ανέμου. Εμφανίζονται σε παράκτιες, ξηρού κλίματος περιοχές, όπου ο άνεμος αποσαθρώνει τις παγιδευμένες σε βλάστηση αποθέσεις άμμου.



Εικόνα 3.3α: Ταξινόμηση θινών με βάση τη μορφολογία τους
(Πηγή: www.geo2all.com/vb/showthread.php?1684-geology-of-sand-dunes)

Τα αιολικά πεδία δεν περιγράφονται από μία μόνο μορφή θινών. Αποτελούν συχνά εκτεταμένες περιοχές, όπου εμφανίζονται πολλές μορφές, οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και πολλές φορές αλληλοκαλύπτονται. Για το λόγο αυτό, η μελέτη ταμιευτήρων

αιολικής προέλευσης αποτελεί μία δύσκολη διαδικασία, μιας και είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των διαφόρων μορφών και των ιδιοτήτων τους.

3.3.1.3 ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΑΜΜΟΥ

Η σύσταση και η υφή της άμμου καθορίζεται από την πηγή τροφοδοσίας. Σύμφωνα με τους Pye και Tsoar (2009) διακτρίνονται τέσσερις μεγάλες κατηγορίες υλικού.

Η **πρώτη ομάδα** περιλαμβάνει το ανόργανο κλαστικό υλικό, που προέρχεται από την αποσάθρωση ιζηματογενών, πυριγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Στην κατηγορία ανήκουν τα θραύσματα πετρωμάτων, ο χαλαζίας (είτε πολυκρυσταλλικός είτε μονοκρυσταλλικός), οι άστριοι, βαρέα ορυκτά (σπάνια και μικρό ποσοστό συμμετοχής) και πυριτικά ορυκτά (κυρίως μαρμαρυγίες).

Η **δεύτερη ομάδα** περιλαμβάνει ανόργανους κόκκους που απελευθερώνονται από την αποσάθρωση ανθρακικών σχηματισμών. Στην κατηγορία ανήκει ο ασβεστίτης, με τη μορφή θραύσματος ασβεστολίθου και ο δολομίτης, που συναντάται σε θραύσματα ασβεστολίθων και δολομιτών.

Η **Τρίτη ομάδα** περιλαμβάνει ανόργανους κόκκους που σχηματίζονται σε περιβάλλοντα, τα οποία είναι κοντά στην επιφάνεια και σχηματίζονται από φυσικοχημικές διεργασίες. Περιλαμβάνονται οι κρύσταλλοι γύψου, τα ανθρακικά ωειδή (κυρίως Mg-ούχος ασβεστίτης και αραγωνίτης) και πυροκλαστικά υλικά (θραύσματα ηφαιστειακού γυαλιού, αμφίβολοι και πυρόξενοι).

Η **τέταρτη ομάδα** περιλαμβάνει βιογενείς σκελετικούς ανθρακικούς κόκκους και θραύσματα κελύφων οργανισμών. Πηγή τροφοδοσίας αποτελούν οργανισμοί, όπως τα φύκη, τα γαστερόποδα, τα μαλάκια και τα εχινόδερμα, ενώ κατά την καθίζηση σχηματίζεται αραγωνίτης και Mg-ούχος ασβεστίτης.

Όσον αφορά τη μορφολογία των κόκκων, παλαιότερες μελέτες υποστηρίζουν πως οι κόκκοι των θινών είναι αποστρογγυλεμένοι και σχεδόν σφαιρικοί. Ωστόσο, οι νεότερες μελέτες υποστηρίζουν πως οι κόκκοι δεν είναι τόσο αποστρογγυλεμένοι, με εξαίρεση υλικό το οποίο έχει υποστεί επεξεργασία στο παρελθόν και επαναποτέθηκε.

Οι Goudie και Watson (1981) μελέτησαν άμμους από 108 δείγματα θινών προέκυψε πως μόλις το 8% των κόκκων είναι αποστρογγυλεμένο. Κόκκοι από την California εμφανίζονται κυρίως υπογωνιώδεις, ενώ κόκκοι από άλλες περιοχές υποστρογγυλεμένοι. Επικράτηση των αποστρογγυλεμένων κόκκων παρατηρείται μόνο σε δείγματα της Τυνησίας. Η παραπάνω μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα πως η μείωση του μεγέθους των κόκκων συνδέεται με αύξηση της γωνιότητας.

3.3.1.4 ΠΟΡΩΔΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΑΜΜΩΝ

Το πορώδες μη τσιμεντοποιημένων αιλικών άμμων υπολογίζεται μεταξύ 34-40%, αν και έχουν βρεθεί τιμές που βρίσκονται εκτός του εύρους αυτού, με κατώτερες τιμές κοντά στο 25% και μέγιστες που αγγίζουν το 50%. Η βελτιωμένη ταξινόμηση και η παρουσία λεπτόκοκκου υλικού εξασφαλίζει μεγαλύτερο πορώδες σε παράκτιες θίνες, σε αντίθεση με θίνες που σχηματίζονται σε ενδοηπειρωτικές θέσεις. (Pryor, 1973)

Η μη ταξινομημένες αμμώδεις αποθέσεις πολλές φορές σχηματίζουν φράγματα διαπερατότητας, ειδικά σε θέσεις που έχουν υποστεί πρώιμη διαγένεση και τσιμεντοποιήθηκαν, με εβαποριτικό ή ασβεστιτικό υλικό (Pye και Tsoar, 2009).

Η διαπερατότητα γενικά διαφοροποιείται οριζόντια και κατακόρυφα εντός του ταμιευτήρα, καθώς η μορφολογία των κόκκων, αλλά και οι συνθήκες ιζηματογένεσης επηρεάζουν την τελική της μορφή. Μεταβολή της διεύθυνσης πνοής του ανέμου, η διαδοχή ξηρών-υγρών περιόδων και η παρουσία βλάστησης καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη διαπερατότητα.

Γενικά, οι αιολικοί ψαμμίτες παρουσιάζουν έντονη ανομοιογένεια και είναι δύσκολος η πρόβλεψη των ιδιοτήτων, με βάση προϋπάρχοντα μοντέλα. Ακόμη και ο συντελεστής ανάκτησης (recovery factor) ποικίλλει σε αυτού του τύπου τους ψαμμίτες.

Σύμφωνα με τον Hiller (2003), ψαμμίτες της Δυτικής Ευρώπης (κοιτάσματα αερίου), που χρονολογούνται στο Πέρμιο, παρουσιάζουν εντυπωσιακό συντελεστή ανάκτησης, που αγγίζει το 91%. Η υψηλή αυτή τιμή δεν είναι συχνή, καθώς συνήθως

παρουσιάζουν πιο χαμηλές τιμές, ανάλογες τις ποιότητας του ταμιευτήρα.

3.3.2 ΠΟΤΑΜΙΟΙ ΨΑΜΜΙΤΕΣ (FLUVIAL)

Το ποτάμιο σύστημα ιζηματογένεσης έχει μελετηθεί από πολλούς επιστήμονες στο παρελθόν και η ανάπτυξη του στο χώρο παρουσιάζει ενδιαφέρον.

Η υφή και η ταξινόμηση των ποτάμιων ιζημάτων παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία, ενώ η πλειοψηφία των ψαμμιτών χαρακτηρίζεται από φτωχή ταξινόμηση. Ο τύπος, επίσης της στρώσης διαφοροποιείται σημαντικά πλευρικά και η διαφοροποίηση αυτή είναι έντονη ακόμη και σε μικρές αποστάσεις.

Εξαίρεση σε μερικές περιπτώσεις αποτελούν οι παράκτιοι ψαμμίτες, οι οποίοι κοντά στο επίπεδο της θάλασσας παρουσιάζουν βελτιωμένη ταξιθέτηση υλικού. Οι συγκεκριμένοι σχηματισμοί διαθέτουν υψηλή διαπερατότητα και πορώδες και συνιστούν εξαίρετους ταμιευτήρες πετρελαίου.

3.3.2.1 ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΑ ΡΙΠΙΔΙΑ

Οι χείμαρροι, καθώς κατέρχονται από περιοχή με απότομο ανάγλυφο (βουνό, λόφο), είναι πιθανό να συναντήσουν περιοχή με ομαλό ανάγλυφο (πεδιάδα)

Η απότομη μεταβολή της κλίσης της κοίτης και η μείωση της ταχύτητας των υδάτων οδηγεί σε ξαφνική μείωση της μεταφορικής τους ικανότητας. Αποτέλεσμα της απόσβεσης αποτελεί η απόθεση των υλικών, κατά την έξοδο στην πεδιάδα, μιας και δεν είναι δυνατή πλέον η μετακίνηση τους. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται εμφράξεις και σχηματίζονται ριπιδοειδείς σωροί, τα **αλλουβιακά ριπίδια**.

Αλλουβιακά ριπίδια σχηματίζονται σε ξηρό, αλλά και σε υγρό κλίμα, ενώ η κλίση και οι διαστάσεις τους ποικίλουν. Ριπίδια με κλίση μικρότερης της 1° μπορούν να σχηματιστούν, όπως και ριπίδια με κλίσεις που φθάνουν τις 15° (**αλλουβιακοί κώνοι**).

Τα ριπίδια είναι σπανιότερα σε υγρό, τροπικό κλίμα, καθώς το κλίμα ευνοεί την χημική διάβρωση, έναντι της μηχανικής παραγωγής κλαστών και η παρουσία πυκνής βλάστησης παρέχει στήριξη στα πρηνή.

Τέλος, να σημειωθεί πως από την κορυφή έως την περιφέρεια του διαφοροποιείται, επίσης, το μέγεθος του κλαστικού υλικού, η ταξιθέτηση του και ο τύπος της στρώσης.

3.3.2.2 ΑΠΟΘΕΤΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΕ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΑ ΡΙΠΙΔΙΑ

Οι αποθετικές διεργασίες που εκδηλώνονται στα αλλουβιακά ριπίδια έχουν μελετηθεί από τον Hooke (1968) και τον Bull (1972), μεταξύ άλλων.

Οι κύριες διεργασίες που αναγνωρίζονται είναι η δεβριτική ροή (debris flow) , τα καλύμματα πλημμύρας (sheetflood), τα ριπίδια ροής καναλιού (steam channel fan) και την επανεπεξεργασία από τον άνεμο.

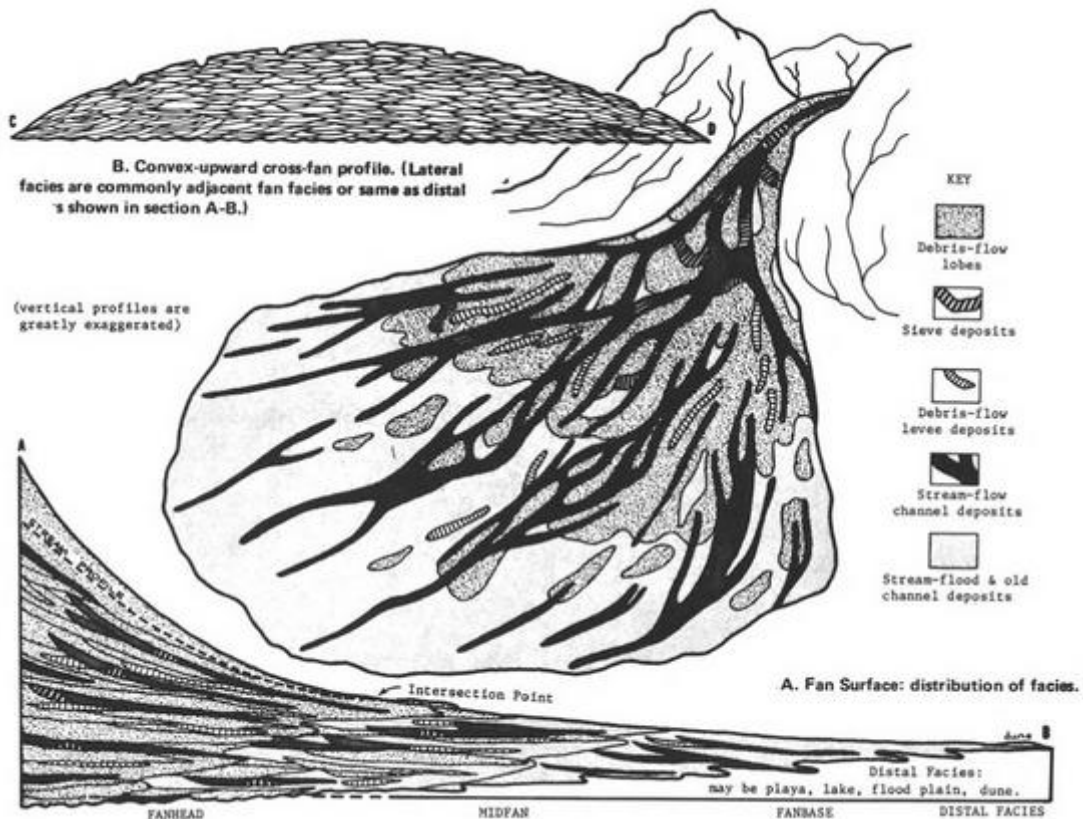
Οι **δεβριτικές ροές παρατηρούνται σε** περιοχή δίχως φυτικό κάλυμμα συνήθως και αποτελούν μία έντονη μορφή. Πρόκειται για αποθέσεις, που σχηματίζονται από ροές μεγάλης πυκνότητας, με υψηλό ιξώδες, οι οποίες μεταφέρονται σε μικρές αποστάσεις.

Συνδέονται με ισχυρές βροχές και πλημμύρες σε παλαιότερες κοίτες χειμάρρων, ενώ σχηματίζουν κωνικές αποθέσεις ή λοβούς στην επιφάνεια των ριπιδίων. Οι αποθέσεις τους χαρακτηρίζονται από φτωχή ταξινόμηση και είναι κατά κανόνα χαλίκια.

Τα **καλύμματα πλημμύρας** εκτείνονται σε τμήμα της επιφάνειας των ριπιδίων, με τις διαδικασίες της αιώρησης, της αναπίδησης και του ερπισμού. Οι αποθέσεις των καλυμμάτων είναι άμμοι και χαλίκια με στρωμάτωση.

Τα **ριπίδια ροής καναλιού** σχηματίζονται, καθώς τα κανάλια ροής αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου κατεύθυνση, επάνω στην επιφάνεια του ριπιδίου. Οι τυπικές αποθέσεις τους είναι αποθέσεις πλεξοειδούς ποταμού.

Η **επανεπεξεργασία** από τον άνεμο περιλαμβάνει την επαναπόθεση της λεπτοκρυσταλλικής άμμου, που μεταφέρεται από τον άνεμο και παρατηρείται συχνότερα σε ξηρά αλλουβιακά ριπίδια.



Εικόνα 3.3β: Ιζηματογενείς φάσεις και μορφολογικό προφίλ ενός ιδεατού αλλουβιακού ριπιδίου
Πηγή: Klein, Sandstone Depositional Models for Exploration for Fossil Fuels (1982)

3.3.2.3 ΙΖΗΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΩΝ ΡΙΠΙΔΙΩΝ

Τα ιζήματα των ριπιδίων παρουσιάζουν προοδευτική αλλαγή στην εσωτερική δομή και τη λιθολογία τους, προς τα χαμηλότερα σημεία (George DeVries Klein, 1974).

Το μέγεθος των κλαστών μειώνεται προς τις χαμηλότερες θέσεις. Το απώτερο σημείο των ριπιδίων περιγράφεται από μία μεταβολή του πρανούς, που συνοδεύεται από ελάττωση της μεταφορικής ενέργειας και επικράτηση των λεπτομερών κλαστών.

Διακρίνονται τρεις ζώνες στα αλλουβιακά ριπίδια, με βάση τη θέση τους στο χώρο της δομής και τις ιζηματογενείς φάσεις:

- Το **εγγύτατο τμήμα (proximal)** χαρακτηρίζεται από πρηνή μεγάλων γωνιών και συνιστά την κορυφαία θέση του ριπιδίου. Οι ροές κορημάτων/δεβριτικές αποτελούν την κύρια ιζηματογενή διεργασία και οι αποθέσεις είναι χαλίκια, με φτωχή ταξινόμηση, δίχως ιστό και στρωμάτωση.
- Το **μέσο τμήμα (medial)** συναντάται στο μέσο του ριπιδίου και χαρακτηρίζεται από απόθεση ιζημάτων, που μεταφέρονται από το νερό. Μικρή είναι η συμμετοχή των ιζημάτων των δεβριτικών ροών, τα οποία υπόκεινται μερική επανεπεξεργασία και βελτιώνεται η ταξιθέτηση τους. Οι τελικές αποθέσεις είναι κατά κανόνα χαλίκια με οριζόντια στρώση, ενώ αυξάνεται το ποσοστό της άμμου..
- Το **απώτερο τμήμα (distal)** ταυτίζεται με την άκρη του ριπιδίου (fan toe). Οι γωνίες των πρηνών στη ζώνη αυτή είναι χαμηλές και το νερό, το οποίο μεταφέρει ιζήματα, που αποτελεί σημαντικό παράγοντα ιζηματογένεσης. Οι κύριες δομές που αναπτύσσονται είναι αμμώδεις σχηματισμοί με διασταυρωτή στρώση και αποθέσεις λεκάνης, όπου εμφανίζονται χαλίκια. Η κυρίαρχη, όμως, λιθολογία είναι η άμμος.

Τα ριπίδια επηρεάζονται σημαντικά από τις διαγενετικές διεργασίες και όταν εμφανίζονται ως ταμιευτήρες, δεν είναι ιδιαίτερα παραγωγικοί. Σχηματισμοί που διαθέτουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα να αποτελέσουν αξιόλογους ταμιευτήρες, προέρχονται από το απώτερο τμήμα των ριπιδίων.

Στα ριπίδια δεν παρατηρείται κάποια οργάνωση. Οι διαπερατές, πορώδεις ζώνες συνεννώνονται με μη διαπερατές ζώνες που οφείλουν την ύπαρξη τους στις δεβριτικές ροές. Έτσι, είναι δύσκολη η ανάπτυξη ενός παραγωγικού, ποιοτικού ταμιευτήρα, ενώ να προστεθεί πως η επικοινωνία του συστήματος πόρων είναι φτωχή.

3.3.2.4 ΠΛΕΞΟΕΙΔΕΙΣ ΠΟΤΑΜΟΙ (BRAIDED STREAMS)

Οι πλεξοειδείς ποταμοί είναι πλατείς και ρηχοί και χωρίζονται σε κλάδους από ένα αριθμό ημισταθών ή ασταθών νησίδων, που λειτουργούν ως φράγματα. Σχηματίζουν με τον τρόπο αυτό περισσότερες από μία κοίτες, γύρω από τις αλλουβιακές νησίδες (Gregory H. S. Smith, 2006).

Όταν η ροή είναι χαμηλού επιπέδου, οι νησίδες είναι εκτεθειμένες, σε αντίθεση με τις περιόδους υψηλής ροής, που βυθίζονται. Σε κάθε περίπτωση, όμως, ο κύριος κλάδος ακολουθεί σταθερή πορεία, η οποία μεταβάλλεται υπό συγκεκριμένες συνθήκες μόνο, ενώ οι δευτερεύοντες κλάδοι αποτελούν ασταθείς μορφές και σε πλημμυρικά επεισόδια επανατοποθετούνται στο χώρο.

3.3.2.5 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΕ ΠΛΕΞΟΕΙΔΕΙΣ ΠΟΤΑΜΟΥΣ

Οι μηχανισμοί που διακρίνονται στο σχηματισμό των δικτύων είναι τέσσερις: **(1) επαύξηση ενδιάμεσων νησίδων (middle bar accretion), (2) εγκάρσιες νησίδες (transverse bars), (3) ανάπτυξη καναλιού αποκοπής (chute cutoff) και (4) διεμελισμός νησίδων (multiple bar dissection).**

Η ανάπτυξη των **ενδιάμεσων νησίδων**, σύμφωνα με τον Dey (2014), απαρτίζεται από την απόθεση στο μέσο του ποταμού και τη διάβρωση της όχθης. Το χαρακτηριστικό σχήμα των νησίδων είναι ρομβικό ή λοβωτό (ονομάζονται και γλωσσοειδείς), ενώ εμφανίζονται επιμήκεις παράλληλα στη φορά του ποταμού.

Η διάβρωση σε ένα μη πλεξοειδές ποτάμι εμφανίζεται, όταν μία τοπική, χαμηλής ταχύτητας ροή συγκλίνει και συναντά μία ταχεία ροή. Με τον τρόπο αυτό αποτίθεται ένα κάλυμμα πυθμένων ιζημάτων, που μεταβαίνει από τα πιο αδρόκοκκα στα πιο λεπτόκοκκα υλικά.

Το περιθώριο των νησίδων, που βρίσκεται προς τα ανάντη αποτελείται από τα αδρόκοκκα υλικά, τα οποία μεταφέρονται από το ποτάμι στο μέσο της κοίτης. Τα λεπτόκοκκα ιζήματα μεταφέρονται επάνω από τις νησίδες ή αποτίθενται επάνω σε αυτές, κατά την ανάπτυξη τριβής, η οποία συγκρατεί μέρος του φορτίου.

Ο μηχανισμός αυτός οδηγεί σε επαύξηση των νησίδων σε κάθε διάσταση και είναι ζωτικής σημασίας για τη δομή. Όταν αναπτυχθούν αρκετά, επηρεάζουν τα ρέματα και ευνοούν τη πλευρική διάβρωση και τη διεύρυνση της κοίτης. Η συνεχής απόθεση υλικού καθιστά τις νησίδες σταδιακά πιο σταθερές και η ανάπτυξη τους ευθύνεται για τη μορφή των πλεξοειδών ποταμών.

Οι **εγκάρσιες νησίδες (transverse bars)**, σύμφωνα με τον Ashmore (1991) είναι μία ακόμη εκτεταμένη διεργασία, που παρατηρείται, κατά την ανάπτυξη των πλεξοειδών ποταμών.

Η αρχική διάβρωση οδηγεί σε σχηματισμό μίας στενής κοίτης. Η διάβρωση του πυθμένα της συνεχίζεται, διότι ο όγκος νερού που ρέει εντός της κοίτης διαθέτει ενέργεια, και τα ιζήματα μεταφέρονται προς τα κατάντη. Καθώς η ροή αποκλίνει από τη κοίτη και ελαττώνεται η μεταφορική ενέργεια του ποταμού, σημαντική ποσότητα φορτίου αποτίθεται σε πρώτη φάση.

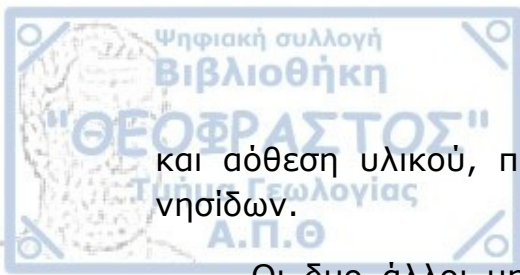
Η απόθεση συνεχίζεται, με τη μορφή στρώσεων και η νησίδα μεγαλώνει κατακόρυφα, αυξάνοντας τον όγκο της επιφάνειας της. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται ένα κεκλιμένο, απότομο μέτωπο και ιζήματα κατολισθαίνουν προς τη πλευρά της νησίδας, που βρίσκεται στα κατάντη.

Ο μηχανισμός των εγκάρσιων νησίδων περιγράφεται από την αρχική διάβρωση και την εκτεταμένη απόθεση ιζημάτων. Διαφέρει, συνεπώς, από το μηχανισμό των ενδιάμεσων νησίδων, όπου αποτίθεται μόνο το αδρόκοκκο φορτίο τοπικά και συγκρατεί μέρος του λεπτομερούς υλικού.



Εικόνα 3.3γ,δ: Ενδιάμεση νησίδα (αριστερά) , κανάλι αποκοπής (δεξιά)
Πηγή: Dey (2014)

Να προστεθεί πως εάν η διατμητική τάση της κοίτης είναι σημαντικά υψηλότερη από την οριακή τιμή, είναι πιθανή η διάβρωση



και αόθεση υλικού, που είναι απαραίτητο για το σχηματισμό των νησίδων.

Οι δυο άλλοι μηχανισμοί, που συμβάλλουν στη διαμόρφωση των πλεξοειδών ποταμών, συνιστούν διαβρωτικές διεργασίες. Τα **κανάλια αποκοπής** σχηματίζονται κατά την πλευρική διάβρωση της όχθης, όταν η διαβρωτική δράση του νερού οδηγεί τελικά σε αποκοπή τμήματος της όχθης.

Το κανάλι αποτελεί ένα τμήμα ευθυτενούς ροής και διαχωρίζει την όχθη από το τμήμα που αποκόπηκε, το οποίο εμφανίζεται ως νησίδα στο χώρο του ποταμού. Το μέγεθος του καναλιού διαφέρει, όμως είναι πιθανό να φθάσει το μέγεθος του κύριου κλάδου.

Οι ενδιάμεσες νησίδες, επίσης, είναι πιθανό να **διαμελιστούν** από μία ροή ή από πολλαπλές. Ο διαμελισμός των νησίδων προκύπτει, όταν παρατηρείται υψηλή ροή και το νερό κινείται επάνω από τη νησίδα, η οποία πλέον βυθίζεται και διαβρώνεται. Στο στάδιο χαμηλής ροής, εκτίθενται οι διαμελισμένες νησίδες και τα τμήματα της νησίδας εμφανίζονται.

3.3.2.6 ΜΑΙΑΝΔΡΙΖΟΝΤΕΣ ΠΟΤΑΜΟΙ

Ο **μαϊάνδρος** αποτελεί μία κλειστή στροφή ενός ποταμού και σχηματίζεται, όταν το ρεύμα διαβρώνει τις εξωτερικές του τράπεζες (διεύρυνση κοιλάδας) και αποθέτει τα υλικά στο εσωτερικό του τμήμα.

Οι μαϊάνδροι μεαβάλλουν τη κοίτη τους και κινούνται σε μία ζώνη, ορισμοένου πλάτους, τη **μαιανδρική ζώνη**. Η πορεία τους και οι διεργασίες διάβρωσης και απόθεσης στους μαιανδρικούς βρόγχους οδηγούν σε αποκοπή τμημάτων της κοίτης. Τα τμήματα αφήνονται ανενεργά και διαμορφώνονται βυθίσματα που ονομάζονται πεταλοειδείς λίμνες (oxbow lakes).

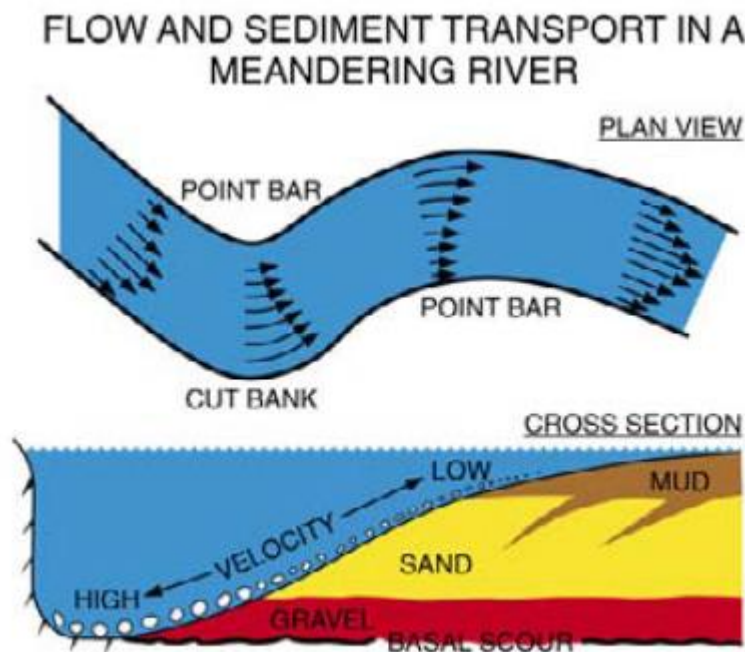
Το σχήμα ενός ποταμού σχετίζεται με την ηλικία του και ποταμοί στο στάδιο νεότητας παρουσιάζονται γραμμικοί. Αντίθετα, στο στάδιο γήρατος, όπου το χερσαίο ανάγλυφο είναι σχεδόν επίπεδο, ευνοείται ο σχηματισμός των οφιοειδών μαιάνδρων.

Να προστεθεί πως ένα μεανδρίζον ποτάμι μπορεί να σχηματιστεί είτε εντός μίας διαβρωμένης κατά βάθος κοιλάδας είτε σε πλημμυρικές πεδιάδες.

3.3.2.7 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ ΜΑΙΑΝΔΡΩΝ

Οι μαιάνδροι σχηματίζονται κατά κανόνα στις χαμηλότερες περιοχές του συστήματος απορροής του ποταμού, όπου η κλίση της τοπογραφίας είναι μικρή. Η μεταφορική και αποθετική ενέργεια σε μαιανδρίζοντες ποταμούς είναι μικρότερη από τους πλεξοειδείς και για το λόγο αυτό επικρατούν τα λεπτόκοκκα ιζήματα.

Κατά τη διάρκεια του χρόνου εμφανίζονται ως ήρεμες υδάτινες ροές, όμως κατά τη διάρκεια πλημμυρικών επεισοδίων γίνονται πολύ δυναμικοί ποταμοί. Τα αμώδη υλικά και τα χαλίκια μεταφέρονται στο πυθμένα, ενώ τα λεπτομερή βρίσκονται σε αιώρηση και αποτίθενται σε γειτονικές πλημμυρικές πεδιάδες.



Εικόνα 3.3ε: Κάτοψη (επάνω) και τομή (κάτω) ενός μαιάνδρου, όπου σημειώνονται οι ταχύτητες και τα επιμέρους τμήματα
Πηγή: Roger M. Slatt (2006)

Η ροή εντός του καναλιού δεν είναι ομοιόμορφη οριζόντια και κατακόρυφα. Εξωτερικά των ελιγμών του ποταμού η ταχύτητα είναι υψηλότερη και σημειώνεται διάβρωση, ενώ εσωτερικά η ταχύτητα είναι χαμηλότερη και αποτίθεται το υλικό. Ο χώρος αυτός, όπου πραγματοποιείται η απόθεση, ονομάζεται **ακραίος φραγμός (point bar)**.

Με την πάροδο του χρόνου μειώνονται τα ιζημάτα της εξωτερικής πλευράς και συσσωρεύονται στην εσωτερική. Εάν επιτραπεί από την ενεργειακή κατάσταση του ποταμού, είναι πιθανό ο ποταμός να περάσει επάνω από το point bar και την πεδιάδα πλημμυρών.

Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται ένα νέο κανάλι, ενώ το παλιό απενεργοποιείται και ο χώρος του πληρώνεται με ιζήματα και οργανική ύλη. Το σύστημα, λοιπόν, είναι σύνθετο και περιλαμβάνει εκτός από τις αμμώδεις αποθέσεις στον ακραίο φραγμό, αποθέσεις ιλύος στο παλιό κανάλι.

Το μέγεθος των κόκκων μειώνεται από τη βάση προς την κορυφή του φραγμού. Η μείωση αυτή οφείλεται σε συνδιασμό της χαμηλότερης ταχύτητας ροής σε υψηλότερα τμήματα της τομής του ποταμού και στη σταδιακή απομάκρυνση του φραγμού από το κανάλι του ποταμού.

Οι αμμώδεις αποθέσεις των **ακραίων φραγμών** αποτελούν ουσιαστικά τον ταμιευτήρα του μαιανδρίζοντος συστήματος. Η μείωση του μεγέθους του υλικού προς τα πάνω συνοδεύεται από μείωση της κατακόρυφης διαπερατότητας.

3.3.3 ΔΕΛΤΑΙΚΟΙ ΨΑΜΜΙΤΕΣ

Τα δέλτα συνιστούν τη λήξη του ποτάμιου συστήματος και προσφέρουν μεγάλες ποσότητες ιζημάτων στα θαλάσσια περιβάλλοντα. Τα ιζήματα αποτίθενται, σε πρώτη φάση πριν την έξοδο του ποταμού στη θάλασσα. Ωστόσο, οι ενεργές θαλάσσιες λεκάνες συνοδεύονται από φυσικές διεργασίες, οι οποίες τροποποιούν την αρχική ιζηματογενή δομή και το καθεστώς τροφοδοσίας.

Οι δελταϊκοί ψαμμίτες θεωρούνται σημαντικοί ταμιευτήρες πετρελαίου, όμως οφείλουν την ανάπτυξη και διαμόρφωση τους (σε μεγάλο βαθμό) σε μη δελταϊκές διεργασίες. Η δράση του ανέμου, ο κυματισμός και η ανάπτυξη ρευμάτων τροποποιούν τα ιζήματα και ο χαρακτήρας των ψαμμιτών δεν είναι μοναδικός στο περιβάλλον, μιας και φέρουν τη δράση θαλάσσιων παραγόντων.

3.3.3.1 ΔΕΛΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ

Ως δέλτα ορίζουμε τη μάζα αδρόκοκκων υλικών, που σχηματίζεται στο στόμιο του ποταμού, όταν αυτό συναντά μία λεκάνη στάσιμων υδάτων (πχ θάλασσα). Η περιγραφή του δελταϊκού περιβάλλοντος βασίζεται στους Α. και Α. Ψιλοβίκος (2010)

Ένα δέλτα αποτελείται από ένα τμήμα που συναντάται έξω από το νερό και ένα τμήμα, που βρίσκεται μέσα στο νερό. Στην περιοχή **εκτός νερού**, παρατηρείται σχηματισμός κοιτών διασποράς, οι οποίες διαρκώς αλλάζουν, ενώ ανάμεσα σε αυτές μικρές κοιλότητες αναπτύσσονται και προκύπτουν έλη και λίμνες.

Η περιοχή αυτή αποτελεί τη **Δελταϊκή Πλατφόρμα** και περιγράφεται από τη πολύπλοκη αυτή ποτάμια δραστηριότητα. Είναι δυνατή η διάκριση 2 υποπεριβαλλόντων, ενός ανώτερου, στο οποίο δεν συμμετέχει το θαλάσσιο νερό και ένα κατώτερο, που παρατηρείται περιοδική είσοδος της θάλασσας (παλίρροια).

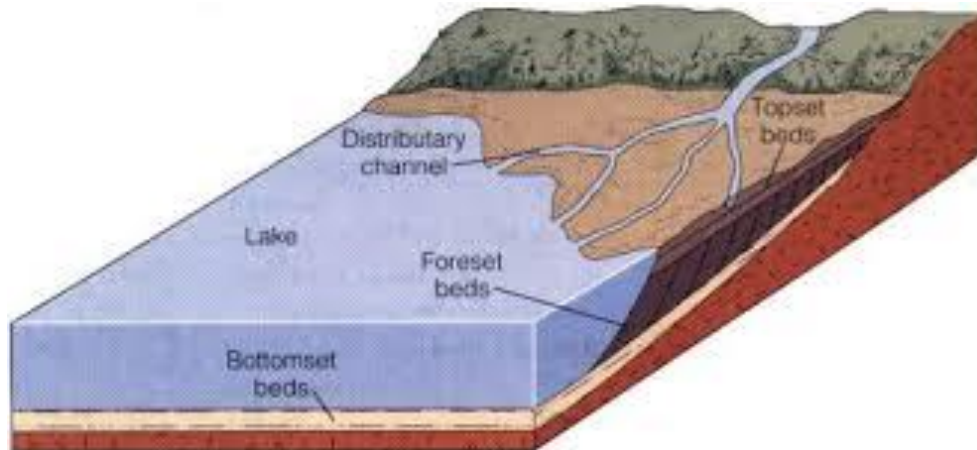
Εντός του νερού, ορίζονται ζώνες, όπου αναπτύσσονται φραγμοί, κάθετα ή παράλληλα στη κύρια κίνηση του νερού και του υλικού. Η περιοχή αυτή ονομάζεται **Προδελταϊκή πλατφόρμα** και συνδέεται με παρουσία ήρεμων υδάτων.

Οι αποθέσεις των δέλτα σχηματίζονται κάτω από πολύπλοκες συνθήκες και διακρίνονται, με βάση το περιβάλλον, οι εξής κατηγορίες: **(1) τα κορυφαία στρώματα (topsets), (2) τα μετωπικά στρώματα (foresets) και (3) τα βασικά στρώματα (bottomset).**

Τα **κορυφαία στρώματα** αποτελούνται από αδρόκοκκες αποθέσεις σε κοίτες και χαρακτηρίζονται από σταυρωτή στρώση και διαβάθμισμένα στρώματα. Πλευρικά ή καταόρυφα συνδέονται με λεπτόκοκκο υλικό (ιλύ- άργιλο), ενώ παρεμβολές άμμου και οργανικών κόκκων είναι πιθανές στα στρώματα αυτά είναι πιθανές.

Οι φυτικοί οργανισμοί των ελών, των λιμνών και αυτά που προέρχονται από τη λεκάνη απορροής συνιστούν το υλικό, που θα μετασχηματιστεί σε υδρογονάνθρακες, έπειτα από τη θερμική διάσπαση. Στο σχηματισμό των κοιτασμάτων συμβάλλει η ταχεία κάλυψη από υλικά, η απομόνωση από τον αέρα και η αναερόβια αποσύνθεση τους.

Όπως είναι κατανοητό, η περιοχή αυτή διαμορφώνεται από ποτάμιες διεργασίες, ενώ είναι πιθανή η τοπική ανάπτυξη ελώδων και λιμναίων σχηματισμών. Συνεπώς, η ιζηματογένεση στη ζώνη είναι πολύπλοκη και η αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών υποπεριβαλλόντων διαμορφώνει το ταμιευτήρα, ο οποίος περιγράφεται από σύνθετους χαρακτήρες.



Εικόνα 3.3στ: Ζώνες δελταϊκού περιβάλλοντος

Πηγή: <http://blank005.tripod.com/geology/runningwater.html>

Τα **μετωπικά στρώματα** αποτελούνται από αμμόδεις αποθέσεις, ενός των οποίων συνανόνται φακοί από κροκάλες. Η αποάκρυνση από την εκβολή του ποταμού συνδέεται με μείωση του μεγέθους της άμμου και αναμειγνύεται με ιλύ. Τα στρώματα εμφανίζονται κεκλιμένα (γωνίες που μπορούν να φθάσουν τις 30 μοίρες).

Τα **βασικά στρώματα** αποτελούνται από λεπόκκοκη άμμο, ιλύ και άργιλο, που διατάσσονται σε οριζόντιες, παράλληλες στρώσεις. Το περιβάλλον απόθεσης είναι ήρεμο και το υλικό καθιζάνει, αφού αιωρηθεί αρχικά στην επιφάνεια του νερού.

Με τον τρόπο αυτό σχημαίζονται οι προδελταϊκές αργιλικές στρώσεις, ενώ όταν η απόσταση από την εκβολή είναι μεγάλη, οι αποθέσεις εναλάσσονται με θαλάσσια, αργιλικά ιζήματα. Να σημειωθεί πως το κατώτερο αυτό τμήμα επηρεάζεται σημαντικά από το θαλάσσιο περιβάλλον και η ποτάμιες διεργασίες δεν καθορίζουν αποκλειστικά τη φύση και τη μορφή των αποθέσεων.

Οι υψηλές τιμές πορώδους και διαπερατότητας συνδέονται με τα ιζήματα των ρευμάτων μεταφοράς, ενώ οι ταχείς πλευρικές

μεταβολές στην δελταϊκή ακολουθία δεν επιτρέπει ασφαλείς προβλέψεις σχετικές με την παρουσία ταμιευτήρα στην περιοχή.

3.3.3.2 ΔΕΛΤΑΪΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ

Τα δελταϊκά συστήματα μπορούν να διακριθούν με βάση την επικρατούσα διεργασία, που τα διαμορφώνει. Με βάση, λοιπόν, τις διεργασίες διακρίνονται σε: (1) ποτάμια δέλτα, (2) δέλτα κυματικής δράσης και (3) παλιρροιακά δέλτα.

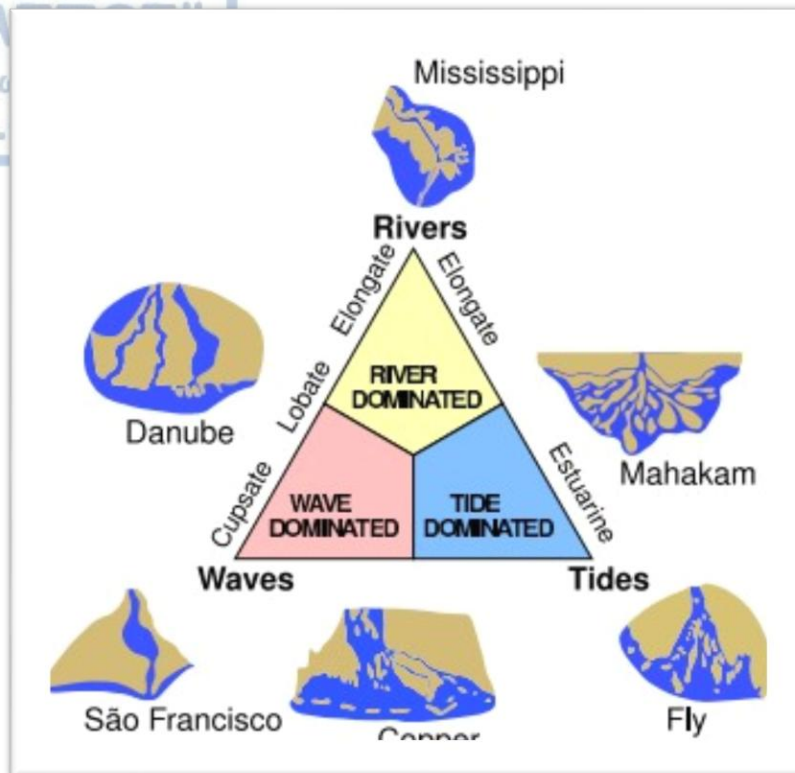
Τα **ποτάμια δέλτα (fluvially dominated deltas)** απαρτίζονται από πολυάριθμους δευτερεύοντες κλάδους, συχνά με τοπικά κανάλια αναχωμάτων (crevasse splays). Η άμμος που αποτίθεται εντός του καναλιού παρουσιάζει διαβάθμιση (υλικό γίνεται πιο λεπτομερές προς τα πάνω) και ίσως έχει υψηλό ποσοστό αργιλικών κλαστών.

Αποτελούν δέλτα περιβάλλοντος υψηλής ενέργειας και στις λίμνες παρατηρείται είσοδος ποτάμιας ροής, η οποία οδηγεί σε απόθεση γλωσσοειδούς διάταξης. Στις θάλασσες, με την ποάμια συμπεριφορά να επικρατεί, σχηματίζονται φράγματα στις άκρες της όχθης και μπροστά στο στόμιο ένας κώνος κλαστικών υλικών. Η κορυφή του φράγματος περιλαμβάνει τα αδρόκοκκα υλικά, ενώ η βάση τα λεπτόκοκκα.

Ως κάλυμμα λειτουργούν οι υπερόχθιες αποθέσεις, όμως, λόγω των αργιλικών ενστρώσεων παρατηρείται ετερογένεια εντός του ταμιευτήρα. Η ταξινόμηση της άμμου είναι καλή, ενώ η διαπερατότητα και το πορώδες επιτρέπουν τη λειτουργία του αμμώδους σχηματισμού ως ταμιευτήρα.

Τα **δέλτα κυματικής δράσης** παράγουν εκτεταμένα πλευρικά σώματα άμμου, τα οποία είναι καλά ταξινομημένα και παρουσιάζουν συνέχεια, τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια. Η ποιότητα κάλυψης είναι φτωχή, εκτός και εάν ταφούν οι αποθέσεις και καλυφθούν από θαλάσσιες αργίλους.

Το περιβάλλον είναι χαμηλής ενέργειας και προκύπτουν **τοξοειδή δέλτα**, που φέρουν εγκάρσια φράγματα άμμου και πλευρικούς λοβούς, μεγάλου μεγέθους.



Εικόνα 3.3ζ: Διάγραμμα δελταϊκής μορφολογίας
Πηγή: Galloway, W. D. (1975)

Τα **παλιρροιακά δέλτα** είναι χαμηλότερης ποιότητας ταμιευτήρες. Το παλιρροιακό επίπεδο χαρακτηρίζεται από εναλλαγές υδροδυναμικού καθεστώτος, με περιόδους ισχυρών ρευμάτων να διαδέχονται περιόδους στάσιμων υδάτων. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν λεπτοί φακοί άμμου, με αργιλικό συγκολλητικό υλικό (θαλάσσια προέλευση), γεγονός που εξηγεί το χαμηλό πορώδες και τη χαμηλή διαπερατότητα.

Οι εκβολές, ωστόσο, μπορεί να πληρωθούν με καλά ταξινομημένη άμμο, που παρουσιάζει διαβάθμιση. Υποπαλιρροιακές αμμώδεις ράχες, που αποτίθενται από παλιρροιακά ρεύματα αποτελούν, επίσης, ιζηματογενή φάση, που μπορούν να αποτελέσουν πιθανούς ταμιευτήρες.

Γενικότερα, τα δελταϊκά συστήματα είναι πλούσια σε οργανική ύλη. Στη χέρσο παράγεται κηρογόνο τύπου III από τους φυτικούς οργανισμούς της περιοχής. Σε παραλιακό και θαλάσσιο περιβάλλον, η οργανική ύλη που μπορεί να δώσει υδρογονάνθρακες είναι άφθονη και παρουσιάζεται τοπικά δυνατότητα ανάπτυξης μητρικών πετρωμάτων.

3.3.4 ΠΑΡΑΘΑΛΑΣΣΙΟΙ ΨΑΜΜΙΤΕΣ (COASTAL)

Το παραθαλάσσιο περιβάλλον περιλαμβάνει την παραθαλάσσια ζώνη, τα περιβάλλοντα εισόδου αλμυρού στη χέρσο και την παράκτια ζώνη. Αποτελεί ουσιαστικά ένα μεταβατικό χώρο, μεταξύ χερσαίας και θαλάσσιας ιζηματογένεσης.

Η παραλία και το μέτωπο ακτής αποτελούν τις πιο σημαντικές αποθέσεις, ενώ η κυματική δράση συνιστά την πιο σημαντική διεργασία. Με το παραθαλάσσιο περιβάλλον συνδέονται και αμμώδεις αποθέσεις σε κόλπους, λιμνοθάλασσες και εκβολές ποταμών, δηλαδή όλες οι γειτονικές, αμμώδεις αποθέσεις της ακτής.

Είναι ένα πολύπλοκο σύστημα και εξελισσόμενο δυναμικά, που υπόκειται σε αιολικές, θαλάσσιες και χερσαίες διεργασίες, ενώ στη διαμόρφωση του επιδρά και η βιόσφαιρα.

3.3.4.1 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΚΤΗΣ ΚΑΙ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η κυματική δράση αποτελεί το σημαντικότερο μηχανισμό του παραθαλάσσιου περιβάλλοντος.

Τα κύματα, που φθάνουν ορμώμενα στην ακτή, μεταφέρουν μεγάλο όγκο νερού και άμμου. Επίσης, ευθύνονται για την ανάπτυξη των **παράκτιων ρευμάτων** (littoral currents), που μεταφέρουν την άμμο παράλληλα στην ακτή.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι, με τους οποίους η ακτή τροφοδοτείται με ιζήματα. Ένα παράδειγμα αποτελούν οι αποθέσεις στις **εκβολές** των ποταμών, οι οποίες αποτίθενται προσωρινά στο στόμιο του ποταμού και μεταφέρονται στην ακτή, με κύματα ή ρεύματα.

Υλικό, επίσης, μπορεί να **αποξυνθεί** από τον πυθμένα, όταν ο κυματισμός έχει επαρκή ενέργεια. Αναπτύσσεται αρχικά τριβή, ο πυθμένας διαταράσσεται, το υλικό πλέον αιωρείται και το κύμα μεταφέρει τις αποθέσεις στο χώρο της ακτής.

Η ισχύς των κυμάτων ελαττώνεται σημαντικά όταν κινούνται από την ανοιχτή θάλασσα στην ακτή. Η μείωση του βάθους της υδάτινης στήλης προκαλεί μείωση της ταχύτητας του κατώτερου τμήματος του κύματος και αυτό σταδιακά αποσβένει.

Με τον τρόπο αυτό τα ογκώδη κύματα καταλήγουν να έχουν τη μορφή των μεμονομένων μικρών κυματισμών, που φθάνουν στην ακτή με σαφώς χαμηλότερη ενέργεια. Σημαντική είναι, όμως, η συμβολή του **ανέμου**, ο οποίος βοηθά στο σχηματισμό των κυμάτων.

Σημαντικός είναι, επίσης, ο ρόλος της παλίρροιας στην παράκτια ιζηματογένεση. Συχνά σχηματίζονται τα **παλιρροιακά δέλτα πλήμμης (Flood-Tidal Deltas)**, που δημιουργούνται από ρεύματα πλήμμης και συναντώνται στην πλευρά μίας παλιρροιακής εισόδου, κοντά στη χέρσο (Hayes M. O, 1980).

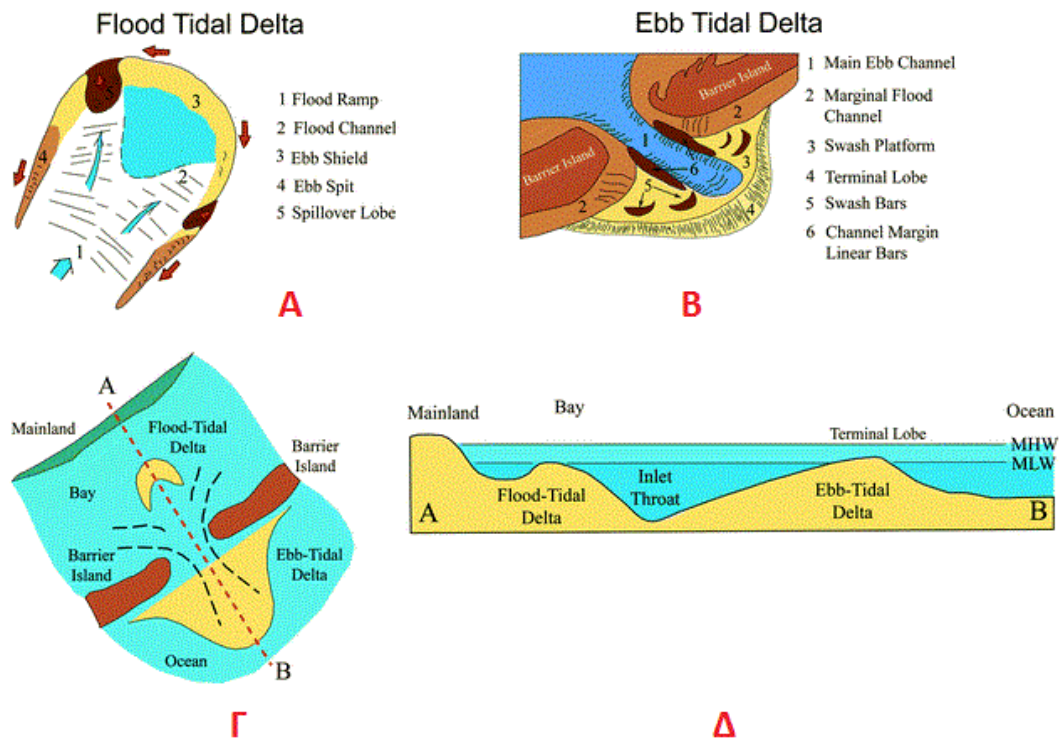
Εμφανίζονται σε περιοχές, όπου το εύρος της παλίρροιας είναι μέτριο έως υψηλό (1-3 m) και σχηματίζονται από την απόθεση της άμμου προς τη χέρσο. Αποτελούνται από 5 κύρια μορφολογικά χαρακτηριστικά, σύμφωνα με τον Robert W. Dalrymple (2012):

- **Επίπεδο πλήμμης (flood ramp)**, που περιλαμβάνει ένα ρηχό, κεκλιμένο κανάλι. Κυριαρχούν ισχυρά ρεύματα πλήμμης και κύματα μεταφοράς άμμου προς τη χέρσο.
- **Κανάλια πλήμμης (flood channels)**, τα οποία ανα 2 απαρτίζουν το επίπεδο πλήμμης. Στα κανάλια επικρατούν ισχυρά ρεύματα πλήμμης και ρυτίδες άμμου, ενώ η μεταφορά της άμμου προς το δέλτα ακολουθεί τα κανάλια.
- **Ασπίδα άμπωτης (ebb shield)**, που αποτελεί το πιο υψηλό και κοντινό στη ξηρά τμήμα του δέλτα και καλύπτεται συχνά από βλάστηση. Οι ασπίδες προστατεύουν την περιοχή του δέλτα από τα παλιρροιακά ρεύματα.
- **Βέλη άμπωτης (ebb spits)**, που εκτείνονται από την ασπίδα έως την είσοδο και σχηματίζονται από αμμώδες υλικό, που διαβρώνεται και μεταφέρεται από τα ρεύματα άμπωτης.
- **Λοβοί υπερχείλισης (spillover lobes)**, που αποτελούν λοβούς άμμου, οι οποίοι σχηματίζονται στο εσωτερικό των δέλτα. Αποτίθενται όταν τα ρεύματα άμπωτης διακόπτονται από την ασπίδα ή τα βέλη άμπωτης.

Η απώλεια της μεταφορικής ικανότητας μπορεί να οδηγήσει και σε αποθέσεις άμμου προς τη θάλασσα. Οι αποθέσεις αυτές σχηματίζουν τα **παλιρροιακά δέλτα άμπωτης (Tidal-Ebb Deltas)**, που χαρακτηρίζονται από ισχυρότερα ρεύματα κατά την άμπωτη, σε σχέση με την πλήμμη.

Ο συνδιασμός ρευμάτων παλίρροιας και κυματικής δράσης τροποποιούν τις αμμώδεις αποθέσεις και μεταβάλλουν το σχήμα τους, όπως και το συνολικό τους όγκο. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι τα εξής:

- **Κύριο κανάλι άμπωτης (main ebb channel)**, που αποτελεί το ρηχό κανάλι προς τη μεριά της θάλασσας, εντός του οποίου μεταφέρεται η άμμος. Κυριαρχούν τα παλίρροιακά ρεύματα άμπωτης.
- **Τερματικός λοβός (terminal lobe)** ονομάζεται η μορφή των αποθέσεων άμμου, που μεταφέρονται μέσω του κύριου καναλιού. Προς τη θάλασσα εμφανίζονται με μεγαλύτερη κλίση, ενώ η εξωτερική γραμμή των λοβών καθορίζεται από τις θραύσεις των κυμάτων.



Εικόνα 3.3η: (Α) Παλίρροιακό δέλτα πλήμνης (Β) Παλίρροιακό δέλτα άμπωτης
(Γ,Δ) Μορφολογική τομή του ευρύτερου χώρου Πηγή: Robert W. Dalrymple (2012)

- **Επίπεδο διαβρωχής (swash platform)**, που αποτελούν πλατιά, ρηχά επίπεδα άμμου, που συναντώνται και στις δύο πλευρές του κύριου καναλιού. Προσδιορίζει, επίσης, την επέκταση των δέλτα άμπωτης.

- **Περιφερειακά γραμμικά φράγματα καναλιού (channel margin linear bars)**, που συνιστούν υφάλους που συνορεύουν με το κύριο κανάλι. Ελαττώνουν τη ροή της άμπωτης και σε περιόδους χαμηλών παλιρροιών συναντώνται επάνω από τη θάλασσα.
- **Φραγμοί διαβρωχής (swash bars)**, που σχηματίζουν τοξοειδείς υφάλους, που κινούνται προς την ακτή και έχουν μήκος που φθάνει τα 150 μέτρα.
- **Περιθωριακά κανάλια πλήμνης (marginal-flood channels)**, που βρίσκονται μεταξύ των γραμμικών φραγμάτων και των ακτών. Κυριαρχούν ενός των καναλιών ρεύματα πλήμνης.

Το βάθος του νερού αυξάνεται σταδιακά προς την ανοικτή θάλασσα και το μέγεθος των κόκκων του υλικού μειώνεται. Κοντά στο μέτωπο της ακτής το ενεργειακό επίπεδο είναι υψηλό και οι αποθέσεις είναι καλά ταξινομημένες άμμοι.

Η συμμετοχή, όμως, της άμμου και το μέγεθος των κόκκων μειώνεται κατά τη μετάβαση σε περιβάλλον υφαλοκρηπίδας. Η αλλαγή του ενεργειακού καθεστώτος αποτυπώνεται στις ιζηματογενείς δομές και στους οργανισμούς, που διαφοροποιούνται μεταξύ ρηχής, παράκτιας ζώνης και ζώνης βαθύτερων υδάτων.

Όσον αφορά τη σύσταση του υλικού, το περιεχόμενο μονοκρυσταλλικού χαλαζία αυξάνεται σημαντικά, φθάνοντας το 60%, ενώ στο μέτωπο της ακτής, που έχει υποστεί βιοαναμόχλευση, μπορεί να το ξεπεράσει. Οι άστριοι μειώνονται σταδιακά, καθώς εξαλλοιώνονται εύκολα και τα θραύσματα έχουν μειωθεί, επειδή η μεγάλη απόσταση που έχουν διανύσει, ευνοεί την ανάπτυξη συγκρούσεων μεταξύ κλαστών και μείωση του μεγέθους.

Οι αμμόδεις αποθέσεις της παραλίας και του ανώτερου μετώπου ακτής παρουσιάζουν τα υψηλότερα ποσοστά χαλαζία, που φθάνουν το 87%. Το μέσο μέτωπο ακτής παρουσιάζει ποσοστό χαλαζία που φθάνει το 75% και μέρος του συνόλου συνιστούν οι άστριοι και τα λίγα σε αριθμό θραύσματα.

Το κατώτερο τμήμα του μετώπου περιλαμβάνει άμμους με μειωμένο ποσοστό χαλαζία και αυξημένο ποσοστό αργιλικού μικροκρυσταλλικού υλικού. Συνεπώς, η παρουσία χαλαζία αποδίδεται στη κυματική δράση, που εξαλλοιώνει τους αστρίους, αφαιρεί την

αργίλική μάζα και διαλύει τα θραύσματα, μειώνοντας το ποσοστό τους.

3.3.5 ΨΑΜΜΙΤΕΣ ΥΦΑΛΟΚΡΗΠΙΔΑΣ

Η **υφαλοκρηπίδα**, που έχει αναφερθεί και στα ανθρακικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης, εκτείνεται από το κατώτερο μέτωπο της ακτής (5-6 m) έως το εξωτερικό περιθώριο της υφαλοκρηπίδας (200 m).

Αποτέλεσμα της παραπάνω σύνθετης δραστηριότητας αποτελούν αμμώδεις αποθέσεις, η μορφή των οποίων ποικίλλει. Πιο συνηθισμένη μορφή συνιστούν οι **ράχες**, που καθιστούν πιο σύνθετη τη μορφολογία του πυθμένα και απαιτείται μελέτη, για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Οι ψαμμίτες της υφαλοκρηπίδας είναι σημαντικοί ταμιευτήρες πετρελαίου και αερίου. Η μελέτη των ψαμμιτών υποδεικνύει πως σχηματίστηκαν αμμώδεις ράχες στο παλαιοπεριβάλλον, οι οποίες ήταν ήπια αναχώματα. Οι ταμιευτήρες που προκύπτουν διαφοροποιούνται σε μέγεθος και εσωτερικούς χαρακτήρες.

3.3.5.1 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΦΑΛΟΚΡΗΠΙΔΑΣ ΚΑΙ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗ

Οι ωκεανοί συνιστούν δυναμικά συστήματα και χαρακτηρίζονται από διαρκή κίνηση. Εσωτερικά και επιφανειακά κύματα, σε συνδυασμό με τα ρεύματα που αναπτύσσονται ανακινούν τα ιζήματα και τα μεταφέρουν σε άλλες θέσεις.

Η ηλιακή ακτινοβολία και η βαρυτική έλξη συνιστούν **αστρονομικές δυνάμεις** (astronomical forces). Η εφαρμογή τους προκαλεί παλίρροια, παλιρροιακά ρεύματα και ηλιακή θέρμανση των υδάτων, που παράγει ρεύματα πυκνότητας (density currents).

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται και ωστικές δυνάμεις, που προέρχονται από το εσωτερικό της Γης, λόγω εκτόνωσης. Τσουνάμι μπορούν να προκληθούν από σεισμική δραστηριότητα και υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, ενώ πιθανή είναι η πρόκληση ρευμάτων πυκνότητας. Το αιωρούμενο λεπτόκοκκο υλικό τότε μεταφέρεται με τουρβιδιτική ροή.

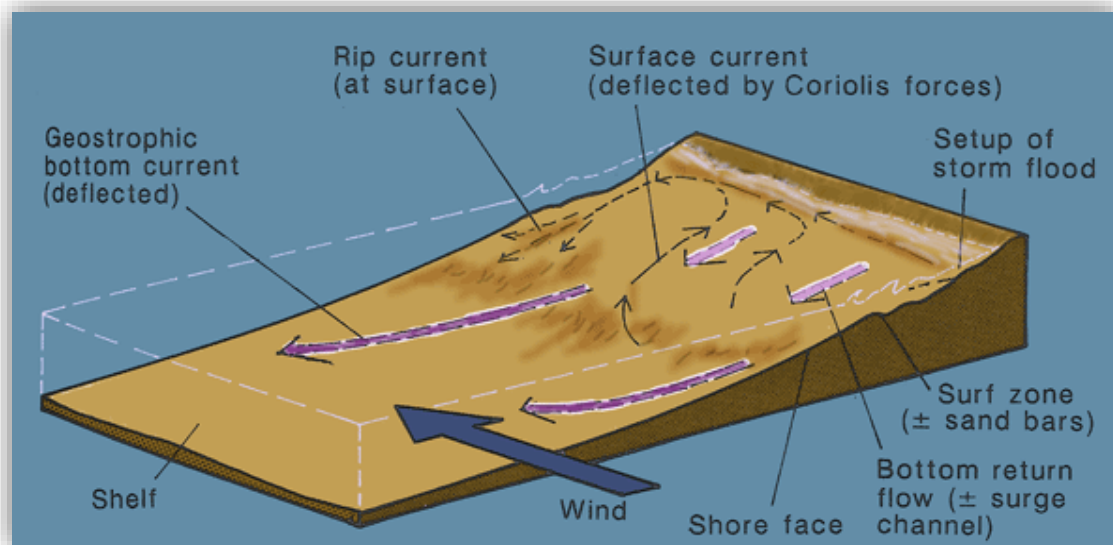
Η εφαρμογή των **μετεωρολογικών δυνάμεων** (meteorological forces) οδηγεί στην ανάπτυξη κυμάτων και

ρευμάτων, που συνδέονται με τον άνεμο. Επίσης, η διαφοροποίηση της πίεσης σε διάφορες θέσεις ευνοεί την ανάπτυξη **μετεωρολογικής παλίρροιας / κυμάτων θύελας** (storm surge).

Η συμβολή των ρευστών, που διαμορφώνουν την ιζηματογένεση είναι καθοριστική στις υφαλοκρηπίδες, αλλά και σε βαθιές λεκάνες.

Το θαλάσσιο αυτό περιβάλλον χαρακτηρίζεται από διαλείπουσα κυματική δράση. Στις κύριες διεργασίες, που ανακινούν τα ιζήματα, περιλαμβάνονται, επίσης, τα **παλίρροιακά ρεύματα** (tidal currents), τα **τουρβιδιτικά ρεύματα** (turbidity currents) και τα **βαρομετρικά ρεύματα** (storm currents).

Τα **κύματα** επιδρούν στα ιζήματα του πυθμένα, ακόμη και σε βαθύτερες θέσεις. Η κίνηση των κυμάτων σε ρηχές θέσεις συνοδεύεται από απόσβεση της ταχύτητας τους, καθώς αναπτύσσονται τριβές μεταξύ των μορίων νερού και των κλαστών. Εάν είναι επαρκής η οριζόντια ταχύτητα, η ροή μπορεί να διαβρώσει τον αμώδη πυθμένα και το υλικό θα αιωρηθεί.



Εικόνα 3.30: Διεργασίες υφαλοκρηπίδας (διακρίνονται τα βαρομετρικά ρεύματα και η επίδραση των κυμάτων)
Πηγή: Einsele (1998)

Η **παλίρροια** αποτελεί τη διαδοχική εναλλαγή ανυψώσεων και πτώσεων του επιπέδου της θάλασσας, σε σχέση με την ξηρά. Προκαλείται από τη βαρυτική έλξη της Σελήνης και του Ήλιου, ενώ το εύρος και το ύψος της παλίρροιας καθορίζεται και από άλλους, η αστρονομικούς παράγοντες.

Στο παλίρροιακό ελλειψοειδές παρατηρείται συσσώρευση νερού στα σημεία του άξονα, που ορίζουν η Γη και η Σελήνη, ενώ στα σημεία που βρίσκονται κάθετα σε αυτόν παρατηρείται έλλειψη νερού. Η άνοδος της στάθμης του νερού συνοδεύεται από οριζόντια, λοιπόν, κίνηση νερού, τα **παλίρροιακά ρεύματα**.

Τα ρεύματα αυτά δεν αποτελούν συνεχή ροή, ενώ η διεύθυνση τους αλλάζει κάθε φορά που η παλίρροια μεταβαίνει από υψηλή σε χαμηλή. Η παρουσία τους δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον ανοικτό ωκεανό, όμως μπορούν να αναπτύξουν ταχύτητες, που επιτρέπουν τη μεταφορά υλικού.

Η δράση τους επηρεάζει, επίσης, το βιόκοσμο και μεταφέρει εκτός από αμμόδες, κλαστικό υλικό και οργανικό υλικό. Η άμμος που μεταφέρεται από τα ρεύματα αυτά αιωρείται και ανάλογα με τη ταχύτητα μπορεί να φθάσει και να αποτεθεί σε μεγάλες αποστάσεις.

Να σημειωθεί πως η κίνηση εντοπίζεται στον οριζόντιο άξονα και η μεταφορά μπορεί να γίνει προς την υφαλοκρηπίδα, αλλά και προς την ξηρά. Το στάδιο της παλίρροιας καθορίζει τη φορά της κίνησης και την ενεργειακή κατάσταση του ρευστού.

Ένας ακόμη σημαντικός μηχανισμός διάβρωσης και μεταφοράς αμμόδους υλικού αποτελούν τα **βαρομερικά ρεύματα**, που γεννούνται κατά κανόνα εν μέσω καταιγίδας. Η επιστροφή της ροής (αλλαγή κατεύθυνσης) δημιουργεί στον πυθμένα ρεύματα υψηλών σχεικά ταχυτήτων.

Η μεταφορά του υλικού περιγράφεται από την αλλαγή κατεύθυνσης της ροής. Ο άνεμος κινείται προς τον παράλλιο χώρο και ωθεί προς την κατεύθυνση αυτή το ρευστό, το οποίο όμως προσκρούει στο μέτωπο της ακτής και επιστρέφει με μειωμένη ταχύτητα. Η στροβιλώδης αυτή ροή διαβρώνει το ρηχό πυθμένα και μεταποθέτει την άμμο σε άλλες θέσεις.

Έχει υπολογισθεί πως ανάπτυξη ανεμοστρόβιλου, με ταχύτητα περίπου ίση με 120 km/hr μπορεί να οδηγήσει σε ροή, που κατά την επιστροφή κινείται με 1,68 m/sec. Ακόμη μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου μπορεί να επιτρέψει μεταφορά υλικού σε βαθύτερες θέσεις, σε πιο βαθιά νερά από την υφαλοκρηπίδα.

Η βαρομετρική ροή, που διαβρώνει το υλικό που έχει καθιζήσει στο πυθμένα ευνοεί, επίσης, την ανάπτυξη **τουρβιδιτικών ρευμάτων**. Τα ρεύματα πυκνότητας οφείλονται στο αιωρούμενο φορτίο και οι αποθέσεις είναι λεπτόκοκκες (άμμος και ίλυς), που διαβαθμίζονται προς τα πάνω σε ίλυ και άργιλο.

Αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μηχανισμό μεταφοράς άμμου στην υφαλοκρηπίδα και η συχνή ανάπτυξη ισχυρών καταγιγίδων ή ανεμοστρόβιλων οδηγεί σε απόθεση μεγάλων ποσοτήτων.

Με τους παραπάνω μηχανισμούς, λοιπόν, μεταφέρεται και αποτίθεται άμμος στο χώρο της υφαλοκρηπίδας. Ενώ ο χώρος αυτός αποτελεί περιβάλλον, όπου επικρατεί η ίλυς, οι ράχες και τα αναχώματα αμμώδους υλικού είναι συχνές δομές.

Η απόθεση άμμου επάνω στις αμμώδεις δομές είναι σημαντική, καθώς προστατεύει τις μη συνεκτικές αποθέσεις από πιθανή διάβρωση. Η **βιοαναμόχλευση**, εαν είναι παρούσα, μπορεί να μειώσει τη διαπερατότητα (κατακόρυφα και οριζόντια), ειδικά στις περιπτώσεις, όπου σχηματίζονται ενστροφές ιλύος.

Εκτός από την επανατοποθέτηση των ιζημάτων στο χώρο, πιθανός είναι ο σχηματισμός συγκολλητικού υλικού. Πιο συγκεκριμένα, τα θραύσματα των ασβεστιτικών κελύφων διασπώνται και οδηγούν σε σχηματισμό ανθρακικού συγκολλητικού υλικού, το οποίο τοπικά ελαττώνει το πορώδες και τη διαπερατότητα.

Δεν είναι ο σημαντικότερος χώρος προέλευσης ψαμμιτικών ταμιευτήρων, όμως είναι πιθανό να περιέχουν μεγάλες ποσότητες υδρογονανθράκων. Είναι επιρρεπείς στη διαγενετική αποδόμηση (σχηματισμός αργιλικών ορυκτών, όπως γλαυκοφανίτη), ενώ η άφθονη οργανική ύλη ευνοεί και το σχηματισμό μητρικών πετρωμάτων, με κηρογόνο τύπου I και II.

3.3.6 ΨΑΜΜΙΤΕΣ ΒΑΘΙΑΣ ΛΕΚΑΝΗΣ (BASINAL)

Το ιζηματογενές σύστημα λεκανών μεγάλου βάθους (θαλάσσιες πεδιάδες) έχει μελετηθεί με δυσκολία. Η δυσκολία προσέγγισης και παρατήρησης επιτρέπει τη μελέτη κυρίως με τηλεσκοπικές μεθόδους, που παρέχουν πληροφορίες τμήματος και όχι ολόκληρης λεκάνης.

Ο όρος βαθιά λεκάνη στη Γεωλογία αναφέρεται σε περιοχές, όπου η μεταφορά ιζημάτων γίνεται με **ροές βαρύτητας**. Η ζώνη αυτή βρίσκεται κάτω από τη ζώνη κυματισμού και ανάπτυξης καταγιγίδων και εκτείνεται από το όριο υφαλοκρηπίδας-κατωφέρειας ως τον πυθμένα της θαλάσσιας πεδιάδας.

Το κλαστικό υλικό μεταφέρεται με τις ροές πυκνότητας, οι οποίες όταν είναι πυκνότερες του θαλάσσιου νερού ονομάζονται **τουρβιδιτικές ροές**. Οι αποθέσεις των ροών αυτών αναφέρονται ως

τουρβιδίτες και ευθύνονται για την απόθεση ασβεστολίθων και ψαμμιτών στο περιβάλλον αυτό.

Να σημειωθεί, πως όπως έχει αναφερθεί νωρίτερα, οι τουρβιδίτες δεν χαρακτηρίζουν αποκλειστικά βαθιές λεκάνες. Ωστόσο, αποτελούν τον κύριο τύπο ψαμμιτικών ταμιευτήρων και η μορφολογία τους καθορίζει την πιθανή παρουσία πετρελαίου και αερίου σε μία περιοχή.

Στη **μηχανική** ο όρος αναφέρεται σε ταμιευτήρες, για τους οποίους έχει πραγματοποιηθεί γεώτρηση που ξεπερνά τα 500 μέτρα. Το ύψος της υδάτινης στήλης ανήκει στο συνολικό βάθος διάτρησης και αποτελεί το χώρο που συναντά το γεωτρύπανο, πριν τον πυθμένα.

3.3.6.1 ΤΟΥΡΒΙΔΙΤΙΚΗ ΡΟΗ ΒΑΘΙΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ

Το βαθύ θαλάσσιο περιβάλλον, σύμφωνα με τον Slatt (2006), βρίσκεται κάτω από το μέγιστο βάθος, που εντοπίζεται η κυματική δράση.

Τα ύδατα μεγάλου βάθους δέχονται την επίδραση περιστασιακών ρευμάτων μέτριας ταχύτητας, που επιτρέπουν τη μεταφορά μικρών ποσοτήτων ιζημάτων. Ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς είναι **οι τουρβιδιτικές ροές**, ικανές να μεταφέρουν σημαντικές ποσότητες υλικού.

Οι τουρβιδιτικές ροές ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των **ροών βαρύτητας** και κινούνται υπό την επίδραση της βαρύτητας. Το πυκνό ρεύμα αποτελείται από ανακατεμένα αδρόκοκκα και λεπτόκοκκα υλικά, τα οποία διατηρούνται σε αιώρηση μέσα στη μάζα ιξώδους ρευστού.

Η στροβιλοειδής ροή επιτρέπει το σώμα να κινείται στον πυθμένα, τον οποίο μπορεί να διαβρώσει και να σχηματίσει χαραδρώσεις «**canyons**». Διακρίνονται από το νερό, όπου κινούνται, απαιτείται διαρκής τροφοδοσία, ώστε να διατηρηθούν οι χαρακτήρες του σώματος και αποθέουν όταν χάσουν τη μεταφορική τους ικανότητα.

Η πυκνότητα του σώματος, που ρέει στο πυθμένα, είναι μικρότερη της πυκνότητας του φρέσκου νερού και για το λόγο αυτό

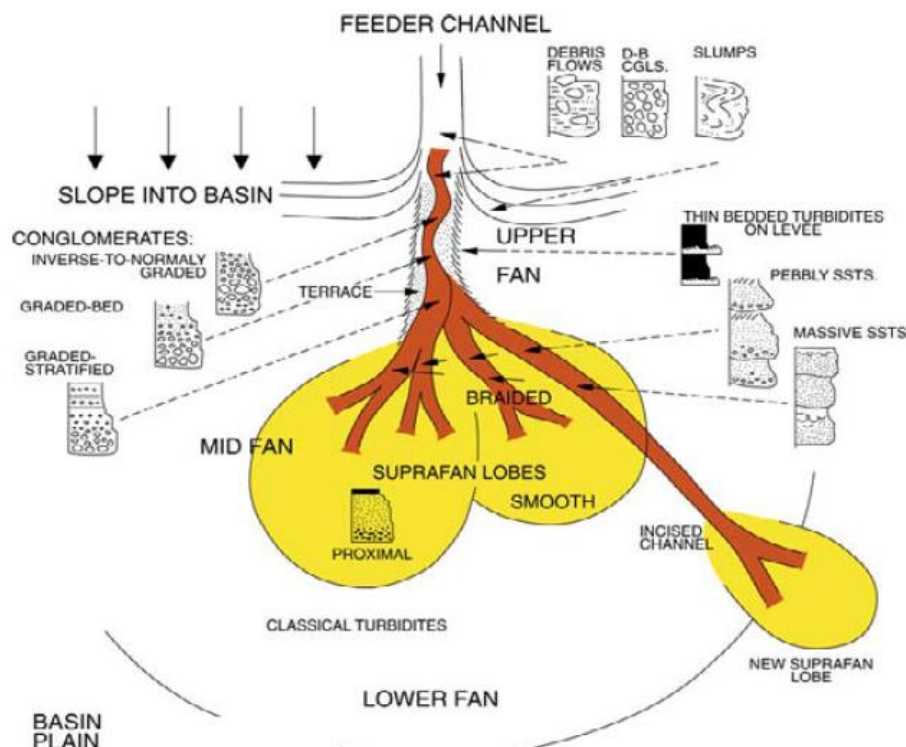
δεν αποτίθενται όλοι οι κόκκοι ταυτόχρονα. Το υλικό διασκορπίζεται σταδιακά, καθώς κινείται το σώμα και αποθέτει υλικό στη διαδρομή.

3.3.6.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΡΙΠΙΔΙΟΥ

Ο Walker (1978) συνδίασε τα μοντέλα υποθαλάσσιων ριπιδίων και κατασκεύασε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο **υποθαλάσσιου ριπιδίου**, που απαρτίζεται από:

- Το **κανάλι τροφοδοσίας (feeder canyon)**
- Τους **εγγύτατους λοβούς ριπιδίου (proximal fan lobes)**
- Τους **απώτερους περιθωριακούς λοβούς (distal lobe fringe)**

Τα στοιχεία αυτά βρίσκονται στο επίπεδο της λεκάνης και σύμφωνα με το μοντέλο το μέγεθος του υλικού μειώνεται προς τη θάλασσα. Το γεγονός αυτό δηλώνει πως η πιθανότητα για ταμειυτήρες υδρογονανθράκων ελαττώνεται σημαντικά, καθώς δεν δημιουργούνται προϋποθέσεις, λόγω εσωτερικής γεωμετρίας και μορφολογίας.



Εικόνα 3.3ι: Μοντέλο υποθαλάσσιου ριπιδίου
Πηγή: Walker (1978)

Τα υποθαλάσσια ριπίδια είναι σώματα μεγάλων διαστάσεων και χαρακτηρίζονται από εναλλαγές ψαμμίτη και αργιλικού υλικού, που ευθύνονται για τη κατακόρυφη (κυρίως) ετερογένεια.

Τα **υφαλοπρανή (slopes)** συνιστούν ιλυώδη συστήματα και η παρουσία των καναλιών (στο χώρο τους) επιτρέπει τη μεταφορά της άμμου στο πυθμένα της θαλάσσιας πεδιάδας. Η κίνηση του υλικού οδηγεί σε ανάπτυξη τριβών και αδρόκοκκες αποθέσεις συνυπάρχουν με λεπτόκοκκες αποθέσεις. Στο σύστημα αυτό το μέγεθος δε μειώνεται προοδευτικά.

3.3.6.3 ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗ ΨΑΜΜΙΤΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΛΕΚΑΝΗΣ

Ο Chapin κ.α (1994) παρουσίασε τις 3 επικρατέστερες μορφές ταμιευτήρων της βαθιάς λεκάνης: (1) τα **καλύμματα (sheets)**, (2) οι **αύλακες (channels)** και τα **στρώματα σε αποθέσεις αναχωμάτων (thin beds in levee sediments)**.

ΚΑΛΥΜΜΑΤΑ

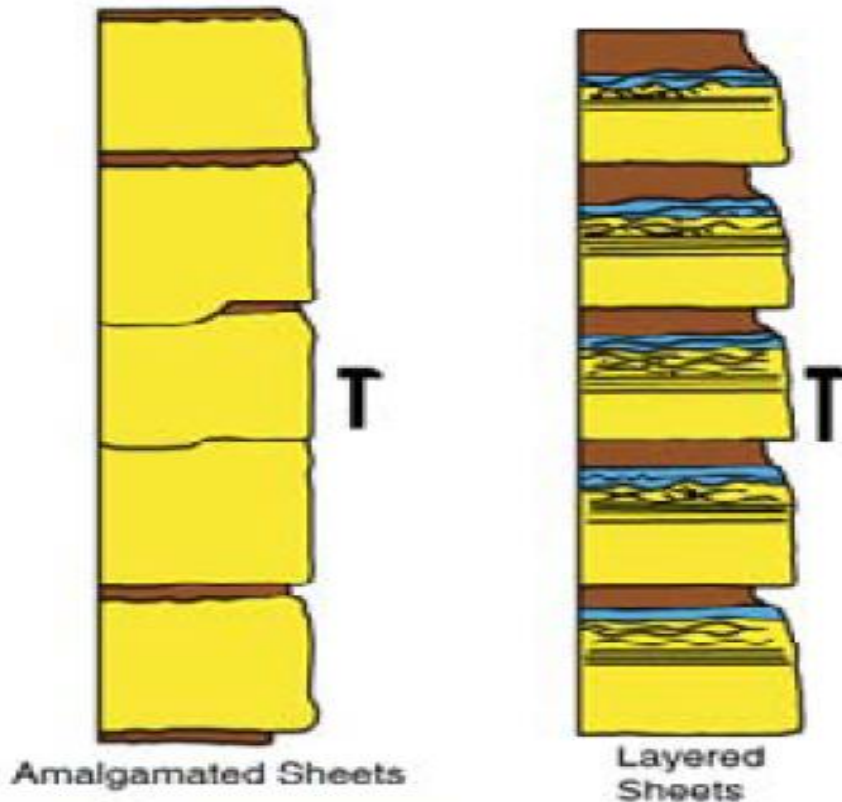
Οι ψαμμίτες με τη μορφή **καλυμμάτων** θεωρούνται ταμιευτήρες **HRHU (High-rate, High-Ultimate-Recovery)**. Ο όρος εισήχθη από τους γεωεπιστήμονες της Shell και αναφέρεται σε *deewater* (μεγάλου βάθους) ταμιευτήρες, σε βάθη άνω των 500 μέτρων που:

- Έχουν υψηλό ρυθμό παραγωγής κατά τα πρώτα στάδια ανάπτυξης (ταχύτερη απόσβεση επένδυσης)
- Επιτρέπουν να ανακτηθεί μεγάλη ποσότητα υδρογονανθράκων, γεγονός που δικαιώνει την επένδυση

Η γεωμετρία των καλυμμάτων είναι απλή. Η πλευρική συνέχεια τους είναι καλή, έχουν υψηλή αναλογία πλάτους-πυκνότητας, το μέγεθος των υλικών παρουσιάζει μικρό εύρος και τα φαινόμενα διάβρωσης είναι λίγα.

Τα καλύμματα αποτίθενται από τις επιβραδυνόμενες ροές στο τέρμα των καναλιών και το υλικό αντικατοπτρίζει το περιβάλλον που διένυσε (φέρει τμήματα που διέβρωσε). Σε αντίθεση με τους άλλους τύπους ταμιευτήρα των βαθιών υδάτων, η έκταση τους είναι μεγάλη και συχνά είναι μεγαλύτερη της περιοχής παγίδευσης.

Διακρίνονται δύο τύποι καλυμμάτων, τα **καλύμματα συγχώνευσης (amalgamated)** και τα **καλύμματα με διαστρωμάτωση (layered)**.



Εικόνα 3.3ια: Σχηματική απεικόνιση των μορφών καλυμμάτων
Πηγή: Slatt (2006)

Τα καλύμματα συγχώνευσης έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε άμμο και συσσωματώματα κόκκων άμμου. Αντίθετα, τα καλύμματα με διαστρωμάτωση έχουν σχετικά χαμηλό περιεχόμενο άμμου και χαρακτηρίζονται από εναλλαγές ψαμμίτη και αργίλου.

Ίσως τα καλύμματα είναι πλευρικά συνεχείς ταμιευτήρες, παρουσιάζουν, όμως, και μερικά προβλήματα στη διαδικασία παραγωγής υδρογονανθράκων.

Πιο συγκεκριμένα:

- Τα καλύμματα διακόπτονται από κανάλια, που πολλές φορές γεμίζουν με ίλυ. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει εσωτερική ανομοιογένεια στο σώμα του ταμιευτήρα.
- Η εξωτερική μορφή των καλυμμάτων ποικίλλει και εξαρτάται από τη τοπογραφία του πυθμένα, όπου αποτέθηκε

Οι **αύλακες**, που βρίσκονται σε βαθιά νερά, πληρώνονται από υλικό και διακρίνεται σε 3 κατηγορίες, σύμφωνα με τους Clark και Pickering (1996). Η **πρώτη** κατηγορία περιλαμβάνει το υλικό που προκύπτει από διάβρωση του υποβάθρου και των γειτονικών αναχωμάτων.

Η **δεύτερη** περιλαμβάνει το υλικό, που προέρχονται από τις προσχώσεις των αναχώματα υπερχειλίσης του καναλιού. Μια ενδιάμεση κατάθλιψη στο χώρο μπορεί να χρησιμεύσει ως κανάλι μεταφοράς υλικού (άμμου και ιλύος).

Η **τρίτη** περιλαμβάνει υλικό που προέκυψε από συνδυασμό διαβρωτικών και αποθετικών μηχανισμών. Η δράση των μηχανισμών μπορεί να είναι ταυτόχρονη είτε κατά επεισόδια να διαδέχονται η μία την άλλη.

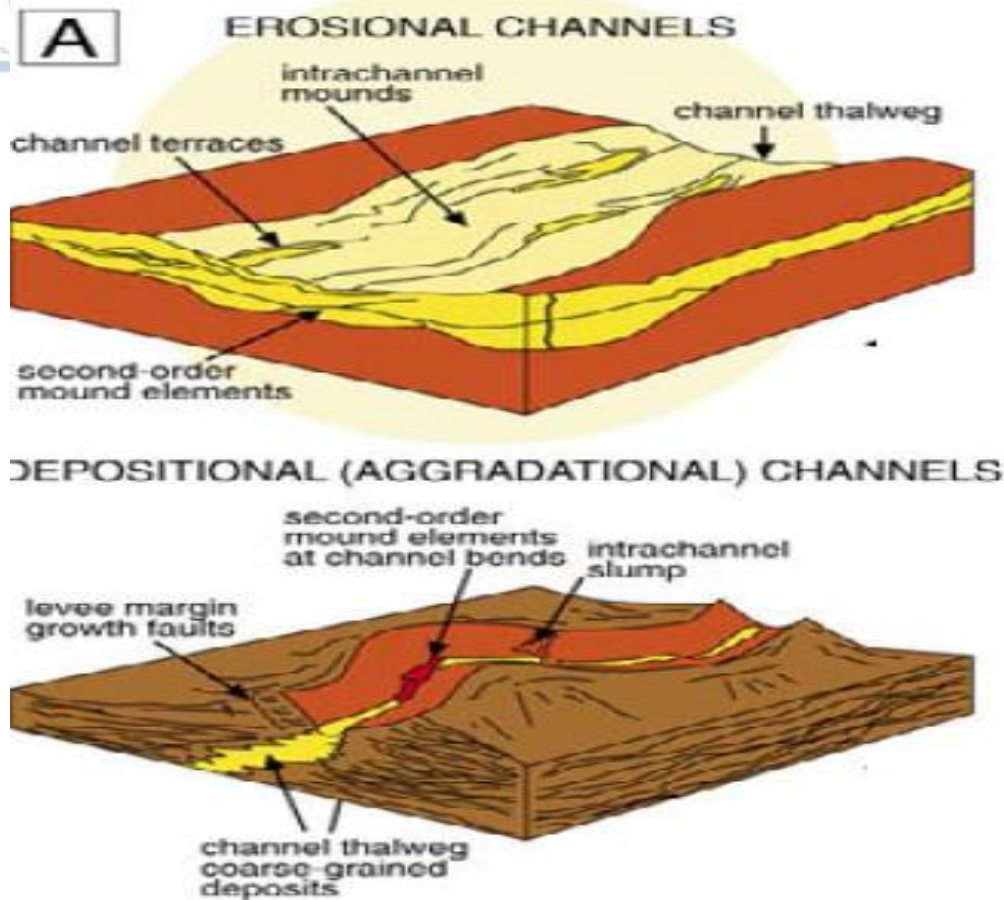
Οι αύλακες, με βάση το μηχανισμό γένεσης, διακρίνονται σε 2 κατηγορίες. Οι **αύλακες διάβρωσης (erosional)** σχηματίζονται από ροές βαρύτητας, που μεταφέρουν αμμόδες υλικό, ενώ τα μεγαλύτερα σε διαστάσεις φαράγγια από ολίσθησεις σε ιλυώδη πρηνή.

Υπάρχουν, όμως και οι **αύλακες απόθεσης (aggradational)**, που σχηματίζονται από την μακροχρόνια απόθεση υλικού, παράλληλα και γειτονικά στην ανάπτυξη της αύλακας-καναλιού.

Οι κατολισθήσεις μπορούν να σχηματίσουν κανάλια, που επιτρέπουν μεταφορά του υλικού. Η σεισμική δραστηριότητα μιας περιοχής, αλλά και η αστάθεια ενός πρηνούς οδηγού, επίσης, σε ταχεία ιζηματογένεση, δηλαδή σε παροχή μεγάλης ποσότητας σε μικρό χρόνο.

Το σχήμα των καναλιών διαφέρει και εμφανίζεται άλλοτε σχεδόν γραμμικό, ενώ άλλες φορές ελικοειδές. Αν και δεν έχει ακόμη κατανοηθεί απόλυτα, οι επιστήμονες ισχυρίζονται πως η μορφή του καναλιού συνδέεται αντιστρόφως ανάλογα με την κλίση του πρηνούς.

Επίσης, οι λεπτοκρυσταλλικές, χαμηλής ενέργειας **πληρώσεις καναλιών (channel fills)** τείνουν να αποκτήσουν ελικοειδές σχήμα, σε αντίθεση με το πιο αδρόκοκκο υλικό, υψηλότερης ενέργειας.



Εικόνα 3.3ιβ: Γενετικοί τύποι αυλάκων-καναλιών: Διάβρωσης (επάνω) Απόθεσης (κάτω)
Πηγή: Slatt (2006)

Οι πληρώσεις καναλιών διαφέρουν ως προς τη σύσταση. Οι αποθέσεις περιλαμβάνουν άμμο, χαλίκια, ίλυ, ανάλογα με τη τεκτονική, το κλίμα και την παροχή υλικού. Μπορούν να αποτελούνται από ιζήματα ρών βαρύτητας, από τουρβιδίτες έως δεβριτικών ρών, ενώ το μέγεθος του υλικού πλήρωσης μειώνεται προς τα πάνω (διαβάθμιση)

ΣΤΡΩΜΑΤΑ ΣΕ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ ΑΝΑΧΩΜΑΤΩΝ

Οι αποθέσεις των υπερόχθειων αναχωμάτων (levee-overbank) αποτελούνται κυρίως από ιλύ και ελάσματα ή λεπτές στρώσεις άμμου. Σχηματίζονται γειτονικά σε ελικοειδή κανάλια και παρουσιάζουν αρκετές φορές υψηλό πορώδες και διαπερατότητα.

Το μοντέλο, που έχει κατασκευαστεί για τους φαρμίτες του συστήματος καναλιού-αναχωμάτων περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

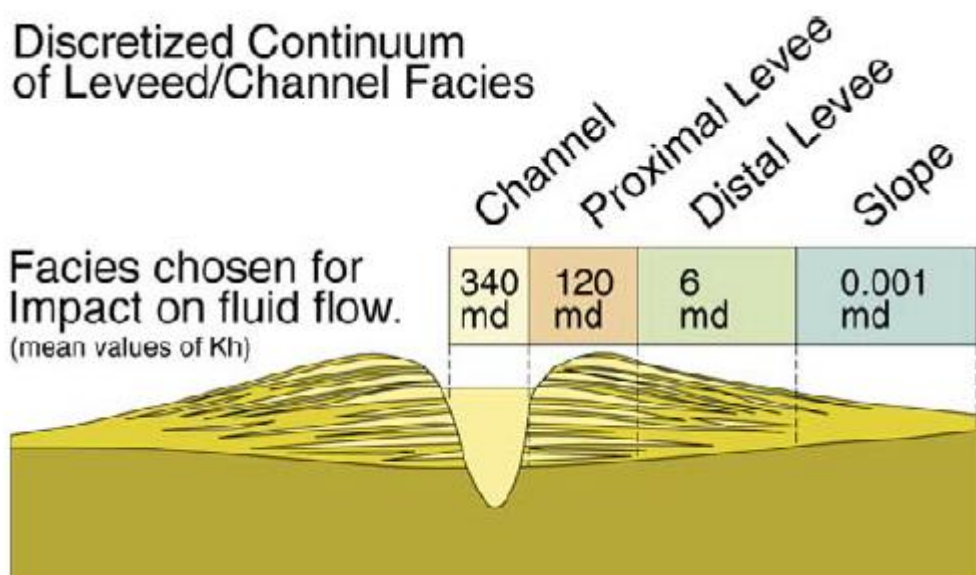
- **Υλικό πλήρωσης του καναλιού** (channel fill)
- **Εγγύτατο ανάχωμα** (proximal levee)
- **Απώτερο ανάχωμα-υπερόχθιο** (distal levee-overbank)
- **Αποθέσεις υπερχείλησης** (crevasse splays)

Από τα παραπάνω, ταμειυτήρες μπορούν να αποτελέσουν τα εγγύτατα αναχώματα, οι αποθέσεις υπερχείλησης και το υλικό πλήρωσης του καναλιού. Οι αποθέσεις διαφοροποιούνται και κάθε τύπος έχει δικά του χαρακτηριστικά γνωρίσματα.

Το **υλικό πλήρωσης καναλιών** παρουσιάζει μείωση προς τα επάνω της κλίσης των στρωμάτων. Τα **εγγύτατα αναχώματα** χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε άμμο και καλή κατακόρυφη συνδεσιμότητα (μεταξύ λεπτών στρωμάτων φαρμίτη).

Τα **απώτερα αναχώματα** χαρακτηρίζονται από χαμηλή περιεκτικότητα σε άμμο και εξαιρετική πλευρική συνέχεια, όμως η κατακόρυφη συνδεσιμότητα των λεπτών στρωμάτων δεν είναι καλή.

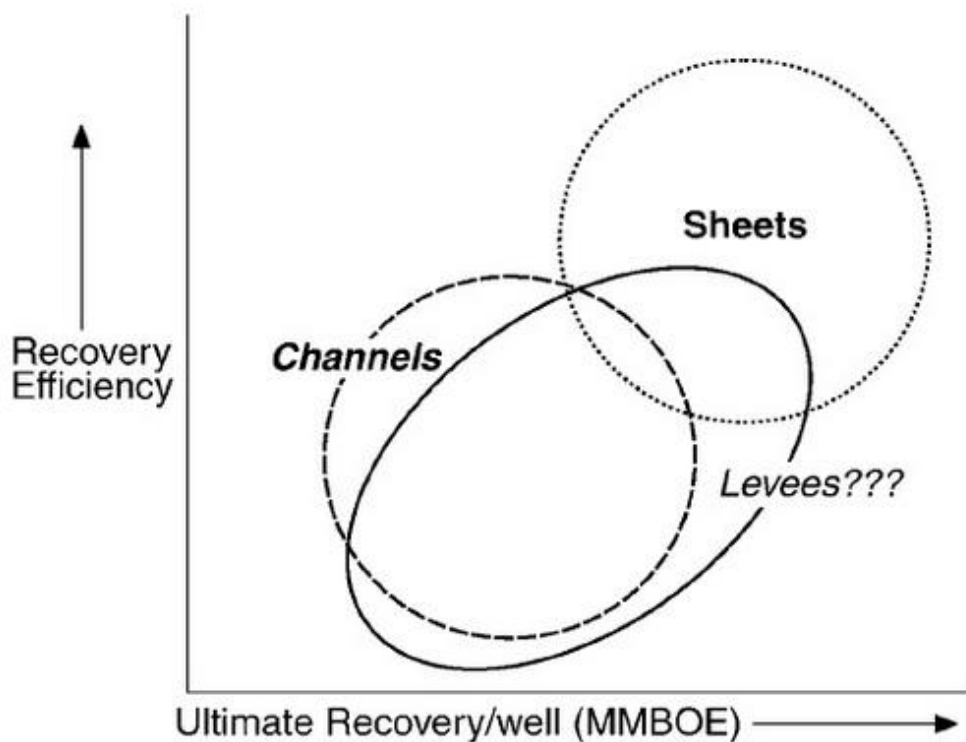
Η **κίνηση** της ροής βαρύτητας καθορίζει τη μορφή του ιζηματογενούς σώματος. Όταν η ροή κινείται και μέρος της βρίσκεται εκτός του καναλιού (**υπερχείλιση**), τότε σχηματίζονται τα **αναχώματα** στον υπερόχθιο χώρο.



Εικόνα 3.3ιγ: Σχηματική απεικόνιση της πλευρικής μεταβολής της διαπερατότητας
Πηγή: Slatt (2006)

Εάν η ταχύτητα της ροής είναι υψηλή, τότε δεν είναι δυνατό να ακολουθήσει την ελικοειδή μορφή του καναλιού και σχηματίζονται οι **αποθέσεις υπερχειλήσης** (crevasse splays).

Στον υπερόχθιο χώρο αποτίθενται τα λεπτομερέστερα υλικά, ενώ τα αδρόκοκκα στο στόμιο του καναλιού. Η ταχύτητα των ροών συνήθως δεν επαρκεί, ώστε να μπορέσει όλη η ποσότητα ιζημάτων να βρεθεί εκτός καναλιού και για το λόγο αυτό παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο.



Εικόνα 3.3ιδ: Σχήματική απεικόνιση της απόδοσης ανάκτησης (recovery efficiency) και της απόλυτης ανάκτησης ανά αγωγό
Πηγή: Slatt (2006)

Κλείνοντας, να σημειωθεί πως η αρχιτεκτονική του ταμιευτήρα επηρεάζει σημαντικά τον όγκο των υδρογονανθράκων και το βαθμό ανάκτησης τους. Οι διάφορες γεωμετρίες και δομές καθιστούν τους ταμιευτήρες σύνθετους και χρειάζεται περαιτέρω μελέτη στο μέλλον, προκειμένου να κατανοήσουμε τους ψαμμίτες των λεκανών.

3.4 ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ ΨΑΜΜΙΤΩΝ (ΕΙΣΑΓΩΓΗ)

Η διαμόρφωση ενός ταμιευτήρα αποτελεί μία δυναμική κατάσταση, καθώς συνεχώς σημειώνονται μεταβολές. Από τη στιγμή της απόθεσης των ιζημάτων επενεργεί στο σύστημα ένας συνδυασμός φυσικών και χημικών διεργασιών, που ευθύνεται για την τελική μορφή του ταμιευτήρα.

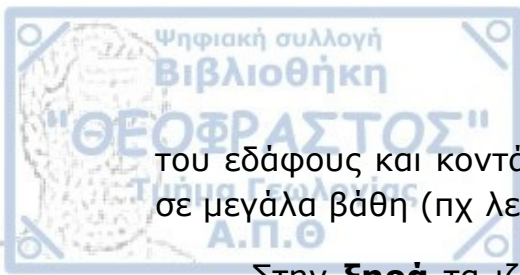
Καθοριστικός παράγοντας στη διαγένεση συνιστά η αρχική σύνθεση (ορυκτολογία) του ψαμμίτη και το αποθετικό περιβάλλον. Για το λόγο αυτό, κάθε διαγενετικό μοντέλο συνδέεται με την αποσάθρωση, το μέσο μεταφοράς και το κλίμα, καθώς επηρεάζουν το χαρακτήρα των κλαστών.

Οι πιο σημαντικές διαγενετικές διεργασίες που σημειώνονται είναι οι εξής:

- Διαγένεση κοντά στην επιφάνεια, όπου αντιδρούν τα γεωλογικά σώματα με το νερό του εδάφους. Πιθανή η τσιμεντοποίηση της άμμου με ανθρακικά άλατα.
- Μείωση πορώδους και αύξηση συνοχής, λόγω **μηχανικής συμπίκνωσης**. Συνδέεται με περιβάλλον, που ασκούνται τάσεις και εξασφαλίζεται μηχανική σταθερότητα του σχηματισμού.
- Η **χημική διαγένεση**, κατά την οποία διαλύονται άμορφες φάσεις και ασταθή ορυκτά. Επιδιώκεται εξασφάλιση θερμοδυναμικής ισορροπίας (πιο σταθερή παραγένεση), ενώ η κινητική καθορίζει τη ταχύτητα των αντιδράσεων (για πυριτικές ενώσεις είναι χαμηλές οι ταχύτητες, σημαντικός ο ρόλος της θερμοκρασίας).
- Η **εναπόθεση συγκολλητικού υλικού** (πχ χαλαζία) και βελτίωση μηχανικής σταθερότητας του δικτύου κόκκων. Η αντοχή ενάντια στη μηχανική συμπίκνωση αυξάνεται και ο βαθμός συμπίκνωσης θα εξαρτηθεί από το ρυθμό διάλυσης.

3.4.1 ΠΡΩΙΜΗ ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ

Η σύνθεση των ιζημάτων αρχίζει να διαμορφώνεται από τη στιγμή της απόθεσης. Σε βάθη μικρά, από 1-10 m, τα ιζήματα αντιδρούν με το νερό του εδάφους ή την ατμόσφαιρα, λόγω της ροής ρευστών και διάχυσης. Το περιβάλλον κοντά στην επιφάνεια



του εδάφους και κοντά στο θαλάσσιο πυθμένα είναι οξειδωτικό, ενώ σε μεγάλα βάθη (πχ λεκάνες) αναγωγικό.

Στην **ξηρά** τα ιζήματα αντιδρούν με τον αέρα και το φρέσκο, μετεωρικό νερό και με τον τρόπο αυτό αποσαθρώνονται και υπόκεινται διάλυση. Το αρχικώς ακόρεστο νερό λειτουργεί ως διαλύτης, όταν έρχεται σε επαφή με φάσεις, ως προς τις οποίες δεν είναι κορεσμένο.

Σε **θαλάσσιο περιβάλλον** παρατηρείται οξειδωτικό δυναμικό κοντά στον πυθμένα, ενώ αναγωγικό συναντάται σε ζώνες της θάλασσας, όπου είναι περιορισμένη η κυκλοφορία οξυγόνου. Η οξείδωση-αποδόμηση της οργανικής ύλης απαιτεί μεγάλες ποσότητες οξυγόνου και περιορίζει τη ζώνη οξείδωσης, η οποία εκτείνεται μόλις μερικά εκατοστά εντός των ιζημάτων.

Η οργανική ύλη αποτελείται από οργανισμούς του πυθμένα, αλλά και πελαγικούς, που μεταφέρθηκαν στο χώρο απόθεσης. Επίσης, περιλαμβάνονται τμήματα φυτικών οργανισμών, τα οποία συγκεντρώνονται στον πυθμένα, μαζί με τα κλαστικά ιζήματα.

Σε περιβάλλοντα, όπου οι βροχοπτώσεις είναι σπάνιες και δεν είναι έντονη η παρουσία του νερού του εδάφους (πχ **ερήμους**), ο εμπλουτισμό των υδάτων γίνεται μέσω εβαποριτίωσης. Οξείδια του σιδήρου και της αργίλου επικαλύπτουν τις άμμους και καθυστερούν ή παρεμποδίζουν την εναπόθεση χαλαζία.

3.4.2 ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΒΙΟΓΕΝΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Το όριο οξειδοαναγωγής συναντάται συνήθως μερικά εκατοστά επάνω από τον πυθμένα και χαρακτηρίζεται από ισορροπία. Αυτό σημαίνει πως ο ρυθμός τροφοδοσίας (μέσω διάχυσης) και κατανάλωσης (λόγω οξείδωσης οργανικού υλικού) οξυγόνου είναι μεταξύ τους ίσοι.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως η παρουσία του οξυγόνου μειώνεται ταχύτατα κάτω από τη διεπιφάνεια, που χωρίζει υδάτινη στήλη και ιζήματα. Στις αποθέσεις άμμου παρατηρείται πως το οξειδοαναγωγικό όριο βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος, σε αντίθεση με τις αποθέσεις ιλύος.

Το μεγαλύτερο μέρος του οξυγόνου καταναλώνεται από την αποδόμηση της οργανικής ύλης, ενώ ένα μικρό μέρος καταναλώνεται

κατά την οξειδωση στοιχείων (πχ Fe και Mn). Για το λόγο αυτό δεν εμφανίζονται συχνά ιζηματογενείς σχηματισμοί με ερυθρό χρώμα, οι οποίοι προέρχονται από τη θάλασσα.

Εξαιρέση αποτελούν υδάτινες περιοχές, στις οποίες συναντάται μικρή ποσότητα οργανικής ύλης και αργός ρυθμός ιζηματογένεσης. Οι προϋποθέσεις αυτές εξασφαλίζουν την οξείδωση μεγάλου μέρους των κλαστών και επιτρέπει την αναπλήρωση του οξυγόνου, που καταναλώθηκε.

Η σύνθεση των κλαστικών ιζημάτων έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα. Πρέπει, όμως, να προστεθούν τα συστατικά που σχηματίζονται τοπικά:

- Αυθιγενή ορυκτά, που καθιζάνουν τοπικά (ορυκτά σιδήρου, μαγγανίου, καθώς επίσης και ανθρακικά)
- Βιογενείς ανθρακικές φάσεις
- Καολινίτης, που καθιζάνει μετά την έκπλυση μαρμαρυγιών και αστρίων (συστατικά των ψαμμιτικών άμμων)

Ειδική αναφορά πρέπει να γίνει στη **βιογενή δραστηριότητα**, η οποία διαμορφώνει, επίσης, τα ιζήματα του πυθμένα. Η βιοαναμόχλευση περιλαμβάνει οργανισμούς που καταναλώνουν ιλύ και με τον τρόπο αυτό οξειδώνεται το οργανικό υλικό, διαταράσσοντας την αρχική στρωμάτωση.

Επίσης, μειώνεται το πορώδες και η διαπερατότητα της καθαρής ψαμμιτικής άμμου, διότι αναμειγνύεται με αργιλικό υλικό. Είναι, όμως, πιθανή η βελτίωση της κατακόρυφης διαπερατότητας, γεγονός που αναβαθμίζει το ταμιευτήρα.

Η παρουσία βιογενούς υλικού σε κλαστικές αποθέσεις είναι συχνή και σημαντική για την εξέλιξη των ιζημάτων. Πιο συγκεκριμένα, οι πυριτικοί και ασβεστίτικοι οργανισμοί αποτελούν πηγή τροφοδοσίας για το σχηματισμό ανθρακικού ή/και πυριτικού συγκολλητικού υλικού (cement).

Το ανθρακικό υλικό προκύπτει από η διάλυση των βιογενών υλικών, αλλά και από τη διάλυση του αραγωνίτη (ασταθής στις παρούσες συνθήκες). Έπειτα, το νερό εμπλουτίζεται και μόλις κορεστεί ως προς τη συγκεκριμένη φάση, εναποθέτει το ανθρακικό άλας, που διαθέτει ως πλεόνασμα.

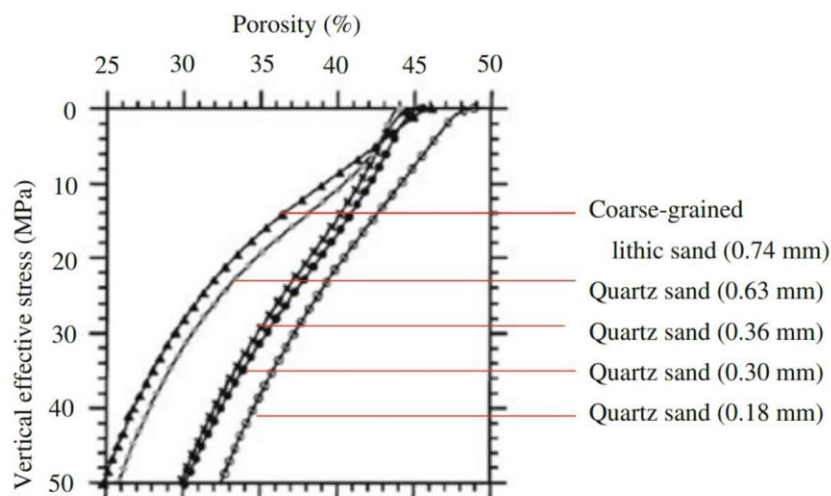
Να σημειωθεί, τέλος, πως, αρχικά, η παραγωγή του ανθρακικού υλικού περιοριζόταν στους βενθονικούς οργανισμούς των ρηχών θέσεων. Μετά την εξέλιξη των πελαγικών πλαγκτονικών οργανισμών στο Μεσοζωικό ο ρυθμός ιζηματογένεσης ασβεστιτικού υλικού αυξήθηκε σημαντικά και εντοπίζεται η διαφορά, κατά τη σύγκριση προγενέστερων και μεταγενέστερων σχηματισμών.

3.4.3 ΜΕΤΑΓΕΝΕΣΤΕΡΗ ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ (ΕΩΣ 2 ΚΜ, 80-100°C)

Καθώς προχωρά η διαγένεση, η άμμος δεν έχει ακόμη εξασφαλίσει συνοχή, αν και έχει ταξινομηθεί σε μεγάλο βαθμό. Η μηχανική συμπίκνωση εμφανίζεται στο σημείο αυτό και αμμώδεις αποθέσεις με αρχικό πορώδες 40-45% παρουσιάζουν δραματική μείωση, φθάνοντας το 25-35%.

Η παρουσία χαλαζία, με τη μορφή συγκολλητικής ύλης, εξασφαλίζει συνοχή του δικτύου κόκκων και παρεμποδίζει την πιο εκτεταμένη επίδραση της μηχανικής συμπίκνωσης.

Σε μεγαλύτερα βάθη, η συμπίκνωση δε συνδέεται με τις ενεργές τάσεις, αλλά με τη θερμοκρασία. Έτσι, σε ψυχρές λεκάνες ιζηματογένεσης, η εναπόθεση χαλαζία ξεκινά σε μεγαλύτερο βάθος (4-6 km) και η μείωση του πορώδους θα προκύψει από τη μηχανική συμπίκνωση και τη παραμόρφωση των κόκκων. Οι πιέσεις που αναπτύσσονται φθάνουν έως και τα 50MPa.



Εικόνα 3.4α: Ελάττωση πορώδους, σε συνάρτηση με το μέγεθος της ενεργούς τάσης και το μέγεθος κόκκων
Πηγή: Chuhan κ.α (2007)

3.4.4 ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ ΣΕ ΒΑΘΟΣ 2-3,5 ΚΜ (80-150° C)

Α.Ταμιευτήρες λεκανών, οι οποίες καθιζάνουν συνεχώς, δεν έχουν συμπυκνωθεί και δε διαθέτουν συνοχή, εάν έχουν ταφεί σε βάθη 2-2,5 μόλις χιλιομέτρων. Το μεγάλο βάθος ιζηματογένεσης δε διαφέρει πολύ από το βάθος ταφής και έτσι δεν παρατηρούνται δραματικές αλλαγές στο σχηματισμό. Εξαιρέση αποτελούν περιοχές με υψηλή **θερμοβαθμίδα**, ή θέσεις που εμφανίζεται ανθρακικό συγκολλητικό υλικό (cement).

Η συμπύκνωση επιδρά σε μεγαλύτερο βαθμό σε αμμώδεις αποθέσεις, όπου οι κόκκοι επανατοποθετούνται στο χώρο και συνθλίβονται πολλές φορές. Οι πιο λεπτόκοκκες αποθέσεις δεν συμπυκνώνονται σε τόσο μεγάλο βαθμό, συγκριτικά με τα πιο αδρομερή υλικά.

Σε θερμοκρασίες που φθάνουν τους 100-120° C παρατηρείται ανακρυστάλλωση του καολινίτη και σχηματίζεται ο Δικίτης. Ο δικίτης έχει την ίδια χημική σύσταση και εμφανίζεται με τη μορφή κρυστάλλων, με ελαφριά αύξηση του πάχους.

Στα 3 km περίπου παρατηρείται αντικατάσταση των K-αστρίων και του πλαγιοκλάστου από **αλβίτη**, ο οποίος αποτελεί την πλέον πιο σταθερή μορφή. Η αντικατάσταση αυτή είναι μερική, επηρεάζοντας τμήμα των κόκκων και δεν επιδρά σημαντικά στην ποιότητα του ταμιευτήρα.

Ένα ακόμη ορυκτό που συναντάται σε ψαμμίτες είναι ο **σμεκτίτης**. Κυρίως συναντάται σε ιλυώδεις και ηφαιστειοκλαστικούς ψαμμίτες και σε θερμοκρασία περίπου 80° C διαλύεται και αντικαθίσταται από ιλλίτη (Heald και Larese, 1974). Οι ταμιευτήρες-ψαμμίτες που περιέχουν σμεκτίτη είναι συνήθως χαμηλής ποιότητας.

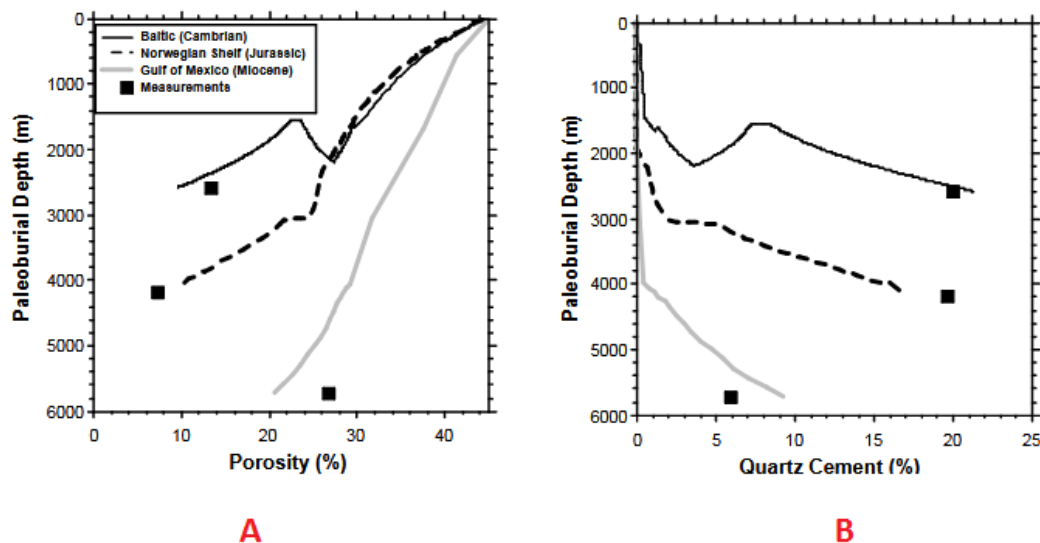
Η διάλυση του σμεκτίτη και η απόθεση ιλλίτη και χαλαζία οδηγούν σε απότομη αύξηση των σεισμικών κυμάτων. Είναι σημαντική η λεπτομερής ανάλυση της θέσης, μιας και μπορεί να παρερμηνευθεί ως επαφή ρευστών (water-oil contact ή gas-oil contact), σύμφωνα με τους Thyberg κ.ά. 2009)

3.4.5 ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ ΣΕ ΒΑΘΟΣ ΑΝΩ ΤΩΝ 3,5 KM ($T > 120^\circ \text{C}$)

Η εναπόθεση χαλαζία (πυριτικού cement) συνεχίζει να μειώνει τον όγκο των διακένων, δηλαδή το πορώδες. Σύμφωνα με τους Aase κ.α (1996). Η διαδικασία δεν διακόπτεται, παρά μόνο με πτώση της θερμοκρασίας στους $70-80^\circ \text{C}$, όπως έχει ειπωθεί παραπάνω (όριο σχηματισμού πυριτικής μικροκρυσταλλικής μάζας).

Σημαντική μείωση της διαπερατότητας και του πορώδους των ψαμμιτικών ταμιευτήρων σημειώνεται σε βάθη μεταξύ 3 και 4,5 χιλιομέτρων, με θερμοκρασία που κυμαίνεται μεταξύ 120 και 160°C . Στη σημαντική αυτή μείωση συμβάλλει η καθίζηση διαγενετικού ιλλίτη και χαλαζία.

Η καθίζηση χαλαζιακού υλικού συνδέεται με το βάθος και τη θερμοκρασία και σύμφωνα με τον Walderhaug (1996), αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10°C οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή καθίζησης κατά 1,7.



Εικόνα 3.4β: (Α) Μεταβολή πορώδους % σε συνάρτηση με το βάθος ταφής (Β) Μεταβολή χαλαζιακού cement σε συνάρτηση με το βάθος ταφής (Πηγή: Lander και Walderhaug, 1999)

Σε θερμοκρασίες μεταξύ **$100-140^\circ \text{C}$** αυξάνει σημαντικά η απόθεση χαλαζιακής συγκολλητικής ύλης, ενώ οι ενεργές τάσεις αυξάνονται γραμμικά με το βάθος. Έτσι, η αύξηση των τάσεων είναι ίσης με 30-40% , κατά την μετάβαση από τα 3 km στα 4 km. Συνεπώς, η θερμοκρασία αποτελεί μία πιο καθοριστική παράμετρο.

Παρατηρείται, επίσης, διάλυση στις επαφές των κόκκων, η οποία, προκειμένου να πραγματοποιηθεί, απαιτεί την παρουσία τάσεων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **Διάλυση πίεσης (pressure solution)**. Η διάλυση πίεσης είναι πιο έντονη στις επαφές μαρμαρυγιών, ενώ συχνά εμφανίζεται στην επαφή μεταξύ χαλαζία και ιλλιτικής αργίλου.

Ένας παράγοντας που πρέπει να σημειωθεί είναι η **παρουσία επίστρωσης (coating)** στην επιφάνεια των κόκκων. Η παρουσία επίστρωσης στην επιφάνεια των κόκκων του ψαμμίτη (όπως βιτουμένιο και πετρέλαιο) είναι ικανή να καθυστερήσει ή να σταματήσει για κάποιο διάστημα το σχηματισμό χαλαζιακής συγκολλητικής ύλης.

Η τσιμεντοποίηση των ψαμμιτών με κόκκους, που φέρουν επίστρωση, μπορεί να αναβληθεί σε βάθη μεγαλύτερα των 4 χιλιομέτρων. Στο σημείο αυτό αναπτύσσονται υψηλές πιέσεις, που φθάνουν τα 50 MPa και οι κόκκοι συνθλίβονται, γεγονός που οδηγεί σε συμπύκνωση.

Προκύπτει από τα παραπάνω πως οι καθαροί, καλά ταξινομημένοι ψαμμίτες διατηρούν το υψηλό τους πορώδες μέχρι το βάθος των 3,5-4 km. Στη συνέχεια, ο ταχύς σχηματισμός χαλαζιακής συγκολλητικής ύλης μειώνει το πορώδες και υποβαθμίζει την ποιότητα του ταμιευτήρα.

Οι ψαμμίτες, που περιέχουν αργιλικό υλικό (σε σημαντικό ποσοστό), χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη απώλεια πορώδους, σε σύγκριση με τους καθαρούς αμμώδεις ψαμμίτες.

Οι ταμιευτήρες (reservoir rocks) αποτελούν πορώδεις, διαπερατούς σχηματισμούς, που επιτρέπουν τη μετανάστευση και την αποθήκευση υδρογονανθράκων.

Η αποθηκευτική τους ικανότητα συγκεντρώνει το οικονομικό ενδιαφέρον εταιρειών και ερευνητών. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των σωμάτων αυτών και η μοντελοποίηση τους αποτελεί το πρώτο και σημαντικότερο βήμα. Αφού κατανοηθεί η σύνθετη γεωμετρία του ταμιευτήρα, είναι δυνατή η βέλτιστη διαχείριση και εκμετάλλευση του κοιτάσματος.

Όπως έχει αναλυθεί παραπάνω, οι δύο μεγάλες κατηγορίες συμβατικών ταμιευτήρων είναι οι ανθρακικοί και οι ψαμμιτικοί. Οι διαφορές των δύο κατηγοριών είναι σημαντικές και απαιτείται διαφορετική προσέγγιση το κάθε σύστημα.

Οι **ανθρακικοί** σχηματισμοί σχηματίζονται με χημική, βιογενή ή κλαστική ιζηματογένεση. Η σύσταση τους δεν εξαρτάται από το μητρικό πέτρωμα, που διαβρώθηκε και τροφοδότησε τη λεκάνη με υλικό, καθώς το μεγαλύτερο μέρος τους συνίσταται από **σκελετικό υλικό**. Τα **χημικά** συστατικά περιλαμβάνουν κόκκους με επίστρωση, όπως ωοειδή και πισοειδή, ενώ οι κλάστες εμφανίζονται ως **ενδοκλάστες** (λιθοποιημένο ίζημα) ή **λιθοκλάστες** (ανακατεργασμένο υλικό πετρωμάτων).

Οι ανθρακικοί σχηματισμοί εξαρτώνται σημαντικά από τη **βιολογική δραστηριότητα**, όπου οργανισμοί της λεκάνης διαμορφώνουν τους κόκκους σε μέγεθος και σχήμα. Επίσης, είναι ευάλωτοι στις **διαγενετικές** διεργασίες και το ανθρακικό υλικό διαλύεται και ανακρυσταλλώνεται.

Αντίθετα, η **σύσταση** των ψαμμιτών καθορίζεται από την πηγή τροφοδοσίας τους, δηλαδή το μητρικό πέτρωμα, που διαβρώνεται και παρέχει τους κλάστες. Δεν σχηματίζονται από βιογενή ή χημική δραστηριότητα και ταξινομούνται με βάση τη συμμετοχή: (1)χαλαζία, (2) αστρίων, (3) θραυσμάτων και (4) μικροκρυσταλλικής μάζας.

Η **διαγένεση** στους ψαμμίτες τροποποιεί την υφή του σχηματισμού, τον ιστό και το πορώδες έπειτα από εκτεταμένη ταφή.

Είναι πιο σταθεροί σχηματισμοί και δεν είναι επιρρεπείς στη διαγένεση, σε αντίθεση με τους ανθρακικούς ταμιευτήρες.

Οι διαρρηγμένοι ψαμμιτικοί ταμιευτήρες είναι σπάνιοι και δεν αναφέρονται συχνά, ενώ οι ανθρακικοί ταμιευτήρες είναι σημαντική κατηγορία, με χαρακτηριστικά, αντιπροσωπευτικά παραδείγματα.

Οι διαφορές των δύο ταμιευτήρων είναι αρκετές ακόμη. Πιο συγκεκριμένα, το **αρχικό πορώδες** των ψαμμιτών κυμαίνεται μεταξύ 25-40%, το οποίο ελαττώνεται στη συνέχεια, με αποτέλεσμα το πρωτογενές πορώδες να είναι περίπου ίσο με 15-30%. Κυρίως είναι **διασωματικό** (interparticle), ενώ η μορφή των πόρων διαμορφώνεται κατά την απόθεση.

Οι ανθρακικοί σχηματισμοί, από την άλλη, έχουν υψηλότερο **αρχικό πορώδες**, που κυμαίνεται μεταξύ 40-70%, το οποίο όμως μειώνεται σημαντικά και παίρνει τιμές μεταξύ 5-15%. Το πορώδες είναι **διακοκκικό**, αλλά και **ενδοκοκκικό** (πορώδες σκελετικών υλικών), ενώ η μορφή των πόρων διαφοροποιείται σημαντικά. Μεταξύ αυτών, περιλαμβάνεται το πορώδες μικρών κοιλοτήτων (vuggy), το πορώδες σπηλαίων (cavern) και το πορώδες διάλυσης (moldic).

Η επίδραση των διαγενετικών μηχανισμών δεν είναι σημαντική στους ψαμμιτικούς ταμιευτήρες. Δεν ισχύει το ίδιο για τους ανθρακικούς ταμιευτήρες, των οποίων το πορώδες διαφοροποιείται σημαντικά κατά τη διαγένεση.

Η διάλυση είναι ικανή να βελτιώσει το πορώδες, ενώ η τσιμεντοποίηση καταστρέφει τους πόρους. Η ανακρυστάλλωση μπορεί σε περιπτώσεις να λειτουργήσει ευεργετικά, ενώ σε άλλες περιπτώσεις (πχ **προχωρημένη δολομιτίωση**) καταστρεπτικά.

Κλείνοντας, να σημειωθεί πως η γεωλογία των ταμιευτήρων είναι σύνθετη και η παρούσα εργασία αποτελεί θεωρητική προσέγγιση. Οι ταμιευτήρες στη φύση σπάνια παρουσιάζουν ομοιογένεια και διαφοροποιήσεις εντοπίζονται μεταξύ διαφορετικών στρωμάτων, αλλά ακόμη και εντός του ίδιου στρώματος.

Ο προσδιορισμός της γεωλογίας και της γεωμετρίας είναι μία δύσκολη περίοδος και απαιτεί ακρίβεια στις μετρήσεις, αλλά και στην ερμηνεία αυτών. Για το λόγο αυτό, είναι πρωταρχικής σημασίας η πλήρη κατανόηση και αφομοίωση του θεωρητικού αυτού υποβάθρου.

ABSTRACT

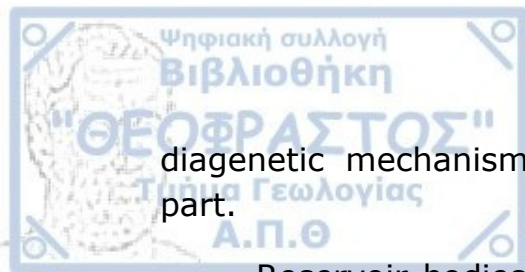
The present study, entitled "Reservoir Geology", examines the fundamentals of a Petroleum System. A Petroleum System consists of some basic elements and these are: (1) the source rock, (2) the seal, (3) the trap, (4) hydrocarbon migration, (5) hydrocarbon maturation and (6) the reservoir rock.

These elements are examined thoroughly and understanding the meaning and the role of each one is important. It is the first step for optimal management and exploitation of the hydrocarbon deposit. After possessing the theoretical foundation of Petroleum Geology, methods of exploration and analysis are used and interpreting research data correctly can lead in positive results. Otherwise, it can cause many problems in the investment and lead in failure.

The study mainly deals with the Geology of Reservoir Rocks. Reservoirs are porous, permeable rocks that allow hydrocarbons to migrate and act as hydrocarbon storages. Two main categories of conventional reservoir rocks are distinguished: Carbonate rocks and Sandstone rocks. Each category is characterized by its own geometry and properties and their geology determines the methods that will be used, in order to examine and exploit the hydrocarbon deposit.

Carbonates form by chemical, biogenic and detrital processes and mainly consist of skeletal remains, that originate from the marine environment. Clastic grains are also a constituent of carbonates, along with chemically produced constituents, including coated grains and cement. Their primary porosity is often high, but diagenesis is the main mechanism that drastically reduces it. Their constituents are prone to dissolution and vary in shape and size.

In contrast, sandstones form by detrital processes and mainly consist of clastic grains. Quartz prevails in siliclastic rocks, while feldspars, rock fragments and matrix make up the remaining part. Diagenesis requires extensive burial, in order to alter the main properties of sandstones and the main characters that are affected are porosity, texture and fabric. Their primary porosity is lower than carbonates' porosity, but since sandstones are more resistant to



diagenetic mechanisms, they manage to maintain a rather high part.

Reservoir bodies differ and rarely appear to be homogenous. It is important to examine each reservoir in detail, because geometry diversifies vertically and/or horizontally. Also, examining can minimize the risk factor of the investment and prevent unexpected behaviour of hydrocarbons.

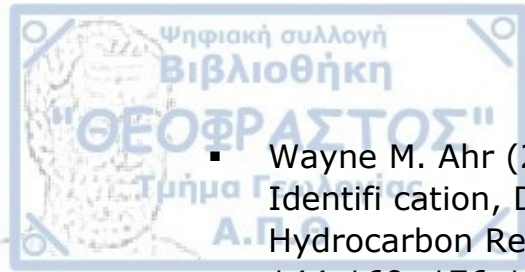
ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- Ανδρέας Γεωργακόπουλος. Κοιτασματολογία Πετρελαίου. pp. 1-145
- Αντώνιος Ψιλοβίκος και Άρης Ψιλοβίκος (2010). Ιζηματολογία. pp. 97-119, 130-187

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

- Aase, N.E., Bjørkum, P.A. and Nadeau, P.H. (1996). The effect of grain coating microquartz on preservation of porosity. *AAPG Bulletin* 80. pp. 1654–1673
- Abegg, F.E., Loope, D. B., and Harris, P. M. (2001). Deposition and diagenesis of Carbonate Eolianites. In: *Modern and Ancient Carbonate Eolianites: Sedimentology, Sequence Stratigraphy and Diagenesis*. SEPM Special Publication No. 71, pp. 17 – 32
- B.P. Tissot, D.H. Welte (1985). *Petroleum Formation and Occurrence*, Second Revised and Enlarged Edition. pp. 69-74, 131-159, 325-356
- Choquette, P. W. and Pray, L. C. (1970). Geological nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *AAPG Bull.no* 54: 207 – 250 .
- Clark, J.D., Pickering, K.T. (1996). *Submarine Channels: Processes and Architecture.*, pp. 231
- Clyde H. Moore (2001). *Carbonate Reservoirs: Porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework.* pp. 61-77
- Emerson S. (1985), *Organic carbon preservation in marine sediments*, American Geophysical Union, Geophysical Monograph 32, Washington D.C., p. 78-86.
- F. Jerry Lucia (2007). *Carbonate Reservoir Characterization: An Integrated Approach*, 2nd ed., pp. 181-194, 218-233
- George deVries Klein (1974). *Sandstone Depositional Models for Exploration for Fossil Fuels.* pp. 5-31, 93-107, 120-135
- Gregory H. S. Smith (2006). *Braided Rivers: Process, Deposits, Ecology and Management.* pp. 51-74
- Hayes, M. O. (1980). *General morphology and Sediment Patterns in Tidal Inlets*, *Sedimentary Geology*, Vol.26. pp. 139-156

- Heald, M.T. and Larese, R.E.(1974). Influence of coatings on quartz cementation. *Journal of Sedimentary Petrology* 44. pp. 1269–1274.
- John H. Barwis, John G. McPherson and Joseph R.J. Studlick (1990). *Sandstone Petroleum Reservoirs*. pp. 583
- Jon Gluyas and Richard Swartbrick (2004). *Petroleum Geoscience*. pp. 2-16
- Kenneth Pye, Haim Tsoar (2009). *Aeolian Sand and Sand Dunes*. pp. 458
- Knut Bjørlykke (2010). *Petroleum Geoscience: From Sedimentary Environments to Rock Physics*. pp. 113-201
- Nelson R. A. (2001). *Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs*. pp. 32-81, 101-123
- Peter K. Link (1987). *Basic Petroleum Geology*. pp. 53-98, 221-225, 275-294
- R. H. Lander, O. Walderhauh (1999) Predicting Porosity through Simulating Sandstone Compaction and Quartz Cementation, *AAPG*.pp. 433-447
- R.C.Selley, S.A. Sonnenberg (2014). *Elements of Petroleum Geology*, 3rd ed. pp. 255-308
- Ranwell, D. S.; Rosalind, Boar. 1986 Coastal dune management guide. *Abbots Ripton, Huntingdon, Institute of Terrestrial Ecology*, 105pp.
- Richard A. Davis Jr., Robert W. Dalrymple (2011). *Principles of Tidal Sedimentology*. pp. 301-333
- Robert A. (2003) *River processes: an introduction to fluvial dynamics*. pp. 214
- Robert R. Berg (1986) *Reservoir Sandstones*. pp. 104-112, 129-144, 201- 213, 272-284, 334-342, 400-407
- Roger M. Slatt (2004) *Petroleum Systems of Deepwater Settings*. pp.490
- Roger M. Slatt (2006). *Stratigraphic Reservoir Characterization for Petroleum Geologists, Geophysicists and Engineers: Handbook of Petroleum Exploration and production* 6. pp. 203-377
- S. Dey, *Fluvial Hydrodynamics* (2014). pp. 529-559
- Walderhaug, O. and Bjørkum, P.A. (1998). Calcite cement in shallow marine sandstones: Growth mechanisms and geometry, special publication 26. pp. 179-192
- Walker, R.G. (1978). Deep-water sandstone and facies and ancient fans, models for exploration for stratigraphic traps: *AAPG Bulletin*, v.62, no.6, pp.932-966
- Walker, R.G., and Posamentier, H. (2006) *Facies Models revisited*, *SEPM Special Publication*, v. 84, p.237-292



- Wayne M. Ahr (2008). Geology of Carbonate Reservoirs: The Identification, Description, and Characterization of Hydrocarbon Reservoirs in Carbonate Rocks. pp 106-133, 144-169, 176-191