

# Ιζηματολογία – Περιβάλλοντα Ιζηματογένεσης

Χαρά Ντρίνια  
Πάυλος Αβραμίδης





ΧΑΡΑ ΝΤΡΙΝΙΑ  
Καθηγήτρια Παλαιοοικολογίας-  
Στρωματογραφίας Ιζηματογενών Ακολουθιών-Ιζηματολογίας

ΠΑΥΛΟΣ ΑΒΡΑΜΙΔΗΣ  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ιζηματολογίας

***Ιζηματολογία -  
Περιβάλλοντα Ιζηματογένεσης***







# Ιζηματολογία - Περιβάλλοντα Ιζηματογένεσης

## *Συγγραφή*

Χαρά Ντρίνια

Πάυλος Αβραμίδης

## *Συντελεστές έκδοσης*

Γλωσσική Επιμέλεια: Ελένη Ελισσάβητ Όξενκιουν

Γραφιστική Επιμέλεια: Σοφία Μακρινού

## *Κεντρική Ομάδα Υποστήριξης*

Γραφιστικός Έλεγχος: Χρήστος Κεντρωτής

Βιβλιοθηκονομική Επεξεργασία: Μαρία Καπνίζου

Copyright © 2023, ΚΑΛΛΙΠΟΣ, ΑΝΟΙΚΤΕΣ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ  
(ΣΕΑΒ + ΕΛΚΕ-ΕΜΠ)



Το παρόν έργο αδειοδοτείται υπό τους όρους της άδειας Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Παρόμοια Διανομή 4.0. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής επισκεφτείτε τον ιστότοπο <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.el>

Αν τυχόν κάποιο τμήμα του έργου διατίθεται με διαφορετικό καθεστώς αδειοδότησης, αυτό αναφέρεται ρητά και ειδικώς στην οικεία θέση.

ΚΑΛΛΙΠΟΣ

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου

[www.kallipos.gr](http://www.kallipos.gr)

ISBN: 978-618-228-011-9

**Βιβλιογραφική Αναφορά:** Ντρίνια, Χ., & Αβραμίδης, Π. (2023). *Ιζηματολογία - Περιβάλλοντα Ιζηματογένεσης* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <http://dx.doi.org/10.57713/kallipos-240>

*Σε όλους τους φοιτητές μας, προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς,  
και σε όσους αγαπούν τις Γεωεπιστήμες!*





# Περιεχόμενα

Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνυμίων .....	15
Πρόλογος.....	17
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	19
1.1 Εισαγωγή.....	19
Ενδεικτική Βιβλιογραφία .....	23
Κεφάλαιο 2 Φυσική Ιζηματολογία – κατάταξη χερσογενών κλαστικών ιζημάτων και ιζηματογενών πετρωμάτων.....	25
2.1 Εισαγωγή.....	25
2.2 Κατάταξη ιζημάτων και Ιζηματογενών Πετρωμάτων.....	25
2.2.1 Μη κλαστικά – Χερσογενή – Αλλόχθονα ιζήματα και Ιζηματογενή πετρώματα.....	26
2.2.2 Ιστολογικά χαρακτηριστικά Ιζημάτων και Ιζηματογενών Πετρωμάτων .....	26
2.2.2.1 Κοκκομετρικό μέγεθος.....	27
2.2.2.2 Σφαιρικότητα.....	33
2.2.2.3 Στρογγυλότητα .....	34
2.2.2.4 Ανάγλυφο κλαστικών θραυσμάτων .....	35
2.2.2.5 Συνεκτικότητα .....	36
2.2.2.6 Ιστολογική Δομική ωριμότητα Ιζηματογενών Πετρωμάτων .....	36
2.2.2.7 Προσανατολισμός και Μεταφορά των κόκκων .....	37
Βιβλιογραφία/Αναφορές .....	40
Κεφάλαιο 3 Ιζηματογενείς Δομές .....	41
3.1 Εισαγωγή.....	41
3.2 Ανόργανες Πρωτογενείς Ιζηματογενείς Δομές.....	41
3.2.1 Εσωτερικές ή συναποθετικές Δομές .....	42
3.2.2 Επιφανειακές και μεταποθετικές Δομές.....	48
3.2.3 Δομές βάσης ή πυθμένα (sole marks) ή προαποθετικές δομές .....	54
3.2.3.1 Δομές παραμόρφωσης μαλακών ιζημάτων .....	57
3.2.4 Βιογενείς Ιζηματογενείς Δομές .....	59
3.2.4.1 Χρησιμότητα των Ιχνοαπολιθωμάτων .....	60
3.2.4.2 Βιοαναμόγλευση .....	60
3.2.4.3 Ηθολογική Ταξινόμηση Ιχνοαπολιθωμάτων.....	61
3.2.4.4 Τοπωνυμική ταξινόμηση των ιχνοαπολιθωμάτων .....	62
3.2.4.5 Τα ιχνοαπολιθώματα ως δείκτες παλαιοπεριβαλλόντων.....	62
3.2.4.6 Στρωματολίθοι.....	64
Βιβλιογραφία/Αναφορές .....	67

Κεφάλαιο 4 Περιβάλλοντα ιζηματογένεσης και ιζηματογενείς φάσεις.....	69
4.1 Εισαγωγή στα Ιζηματογενή Περιβάλλοντα.....	69
4.2 Παράγοντες που διαμορφώνουν τα ιζηματογενή περιβάλλοντα.....	70
4.2.1 Ταξινόμηση ιζηματογενών περιβαλλόντων .....	71
4.3 Ιζηματογενής Φάση - Ορισμός.....	73
4.3.1 Εννοιολογικό πλαίσιο.....	75
4.3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη φύση και κατανομή των φάσεων .....	77
4.3.3 Νόμος του Walther.....	78
4.3.4 Μεταβολές φάσεων .....	80
Βιβλιογραφία/Αναφορές .....	82
Κεφάλαιο 5 Ηπειρωτικά Περιβάλλοντα Ιζηματογένεσης.....	83
5.1 Εισαγωγή.....	83
5.2 Αλλουβιακά Ριπίδια .....	84
5.2.1 Παράγοντες ελέγχου σχηματισμού αλλουβιακών ριπιδίων .....	86
5.2.2 Διαδικασίες και τύποι απόθεσης αλλουβιακών ριπιδίων .....	87
5.3 Ποτάμιες αποθέσεις.....	89
5.3.1 Τύποι καναλιών - Διαδικασίες μεταφοράς και απόθεσης .....	90
5.3.2 Ποτάμια περιβάλλοντα ιζηματογένεσης .....	91
5.4 Ερημικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης .....	92
5.4.1 Διαδικασίες μεταφοράς και απόθεσης σε ερήμους .....	93
5.4.2 Σύγχρονα ερημικά περιβάλλοντα.....	94
5.5 Λιμναία Περιβάλλοντα Ιζηματογένεσης.....	95
5.5.1 Προέλευση και μέγεθος λιμνών .....	95
5.5.2 Παράγοντες που ελέγχουν τη λιμναία ιζηματογένεση .....	97
5.5.2.1 Φυσικές Διεργασίες.....	98
5.5.2.2 Χημικές διεργασίες.....	98
5.5.2.3 Βιολογικές Διεργασίες.....	99
5.5.3 Κατάταξη των λιμνών και τρόπος σχηματισμού των λιμνών .....	99
5.5.4 Λιμναία ιζήματα.....	101
5.6 Παγετώδη Περιβάλλοντα .....	103
5.6.1 Μεταφορά και απόθεση σε παγετώδη περιβάλλοντα.....	104
5.6.2 Παγετώδεις αποθέσεις.....	106
5.6.3 Η γενεσιουργός αιτία δημιουργίας των παγετόνων και το κλίμα .....	106
Βιβλιογραφία/Αναφορές .....	108
Κεφάλαιο 6 Περιθωριακά θαλάσσια / μεταβατικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης.....	109
6.1 Εισαγωγή.....	109
6.2 Δελταϊκά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης.....	110
6.2.1 Διαδικασίες ιζηματογένεσης και κατάταξης των δέλτα .....	111

6.2.2 Φυσιογεωγραφικά χαρακτηριστικά των δέλτα .....	114
6.2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη ενός Δέλτα.....	115
6.2.4 Τα μεγαλύτερα δέλτα στον Ελληνικό χώρο και τα χαρακτηριστικά τους .....	115
6.3 Λιμνοθαλάσσια περιβάλλοντα ιζηματογένεσης.....	116
6.3.1 Μορφολογικά Χαρακτηριστικά Λιμνοθαλασσών.....	118
6.4 Φραγματοειδείς νησίδες – νησιωτικοί φραγμοί και βραχίονες.....	120
6.5 Παλιρροϊκές πεδιάδες (tidal flats) .....	122
6.6 Παράκτια έλη (coastal marshes).....	124
6.7 Ποταμόκολποι (estuaries).....	126
6.7.1 Φυσικογεωγραφικά, υδρολογικά και ιζηματολογικά χαρακτηριστικά .....	126
6.8 Μεταβατικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης και κλιματική αλλαγή .....	129
Βιβλιογραφία/Αναφορές .....	132
Κεφάλαιο 7 Θαλάσσια περιβάλλοντα ιζηματογένεσης.....	133
7.1 Εισαγωγή .....	133
7.2 Θαλάσσια ιζήματα – Ταξινόμηση.....	134
7.3 Μορφολογία - γεωμορφολογία του θαλάσσιου πυθμένα .....	135
7.4 Αβαθή θαλάσσια περιβάλλοντα .....	138
7.4.1 Παράκτιο περιβάλλον.....	138
7.4.1.1 Παραλία (beach).....	138
7.4.1.2 Ακτή (coast).....	141
7.4.2 Ταξινόμηση παράκτιων περιβαλλόντων .....	141
7.4.3 Μορφολογία της παράκτιας ζώνης.....	142
7.4.4 Ταξινόμηση παράκτιων ιζημάτων.....	146
7.5 Ηπειρωτική κρηπίδα.....	147
7.5.1 Ιζηματογένεση κρηπίδας .....	148
7.6 Περιβάλλοντα βαθιάς θάλασσας .....	150
7.6.1 Διαδικασίες απόθεσης και φάσεις .....	151
7.6.1.1 Αποθέσεις ροών κορημάτων και τουρβιδίτες .....	152
7.6.1.2 Πελαγική και ημιπελαγική ιζηματογένεση .....	154
7.6.1.3 Υποθαλάσσια ριπίδια .....	157
7.6.1.4 Βαθιές λεκάνες .....	159
Βιβλιογραφία/Αναφορές .....	160
Κεφάλαιο 8 Ηφαιστειοκλαστική Ιζηματογένεση.....	163
8.1 Εισαγωγή .....	163
8.2 Ταξινόμηση ηφαιστειοκλαστικών ιζημάτων.....	164
8.3 Περιβάλλοντα ηφαιστειακής δραστηριότητας.....	168
8.4 Διεργασίες μεταφοράς και απόθεσης σε περιβάλλοντα βαθιάς θάλασσας .....	169
8.4.1 Βαρυτική καθίζηση – πτώση.....	169

8.4.2 Βαρυτικές ροές ιζημάτων.....	170
8.4.2.1 Υποθαλάσσιες πυροκλαστικές ροές.....	170
8.4.2.2 Ηφαιστειοκλαστικοί τουρβιδίτες.....	170
8.4.2.3 Ροές ηφαιστειακών κορημάτων.....	171
8.4.2.4 Υποθαλάσσιες «χιονοστιβάδες» ηφαιστειακών θραυσμάτων.....	171
8.5 Ηφαιστειοκλαστική ιζηματογένεση και φάσεις.....	171
8.5.1 Στρωματογραφία ηφαιστειοκλαστικών αποθέσεων.....	172
8.5.2 Ακολουθίες πυροκλαστικών ροών.....	173
8.5.3 Ιγνιμβριτικές αποθέσεις.....	173
8.5.4 Αποθέσεις τέφρας.....	175
8.5.4.1 Συσχέτιση των αποθέσεων τέφρας – τεφροχρονολόγηση.....	176
8.5.4.2 Αποθέσεις τέφρας.....	176
Βιβλιογραφία/Αναφορές.....	178
Κεφάλαιο 9 Ανθρακική ιζηματογένεση.....	181
9.1 Εισαγωγή.....	181
9.2 Αρχές ανθρακικής ιζηματογένεσης.....	183
9.3 Σύγχρονα περιβάλλοντα ανθρακικής ιζηματογένεσης.....	185
9.3.1 Μη-θαλάσσια περιβάλλοντα.....	185
9.3.2 Θαλάσσια περιβάλλοντα ανθρακικής ιζηματογένεσης.....	186
9.3.2.1 Ανθρακικές πλατφόρμες και κρηπίδες.....	187
9.3.2.2 Ύφαλοι.....	188
9.3.2.3 Λιμνοθάλασσες ανθρακικών πετρωμάτων.....	191
9.4 Θαλάσσια εργοστάσια παραγωγής ανθρακικού υλικού (marine carbonate factories).....	192
9.5 Μικροφασική ανάλυση ανθρακικών πετρωμάτων.....	193
9.5.1 Μικροφάσεις, τύποι μικροφάσεων και τυποποιημένοι τύποι μικροφάσεων.....	194
Βιβλιογραφία/Αναφορές.....	197
Κεφάλαιο 10 Βασικές Αρχές Στρωματογραφίας Ακολουθιών.....	199
10.1 Εισαγωγή.....	199
10.2 Ιστορική αναδρομή.....	200
10.3 Βασικές αρχές και κύρια συστατικά της Στρωματογραφίας Ακολουθιών.....	203
10.4 Παράγοντες που επιδρούν στη διαμόρφωση ακολουθιών.....	204
10.5 Ιεραρχία ακολουθίας.....	206
10.5.1 Υποακολουθία πτωτικής στάθμης της θάλασσας και σχηματισμού ορίων ακολουθίας (Falling Stage Systems Tract and Sequence Boundary Formation-FSST).....	208
10.5.2 Υποακολουθία χαμηλής στάθμης (Lowstand Systems Tracts-LST).....	208
10.5.3 Επικλυσιγενής υποακολουθία (Transgressive systems tracts-TST).....	209
10.5.4 Υποακολουθία υψηλής στάθμης (Highstand systems tracts – HST).....	210
10.5.5 Παρακολουθία.....	210



10.6 Εφαρμογή .....	213
Βιβλιογραφία/Αναφορές .....	214
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Εργαστηριακές Ασκήσεις.....	217
I.1 Άσκηση 1 – Ταξινόμηση Ιζημάτων .....	217
I.2 Άσκηση 2 – Στατιστικές παράμετροι κοκκομετρικής κατανομής ιζημάτων .....	219
I.3 Άσκηση 3 – Κοκκομετρική ανάλυση-Ταξινόμηση Ιζημάτων .....	221
I.4 Άσκηση 4 – Τριγωνικά διαγράμματα/περιβάλλοντα ιζηματογένεσης .....	224
I.5 Άσκηση 5 – Παλαιορευματική ανάλυση .....	226
I.6 Άσκηση 6 – Παλαιορευματική ανάλυση .....	231
I.7 Άσκηση 7 – Μητρώο γεώτρησης/Ιζηματολογικές φάσεις.....	233
I.8 Άσκηση 8 – Ιζηματολογικές φάσεις/Στρωματογραφικές ακολουθίες .....	235
I.9 Άσκηση 9 – Μέθοδοι χρονολόγησης ιζημάτων και υπολογισμός ρυθμού ιζηματογένεσης.....	237
I.10 Άσκηση 10 – Στατιστική επεξεργασία δεδομένων .....	241
I.11 Άσκηση 11 – Γεωχημικοί δείκτες ιζημάτων.....	245
I.12 Άσκηση 12 – Ισοπαχείς και φασικοί χάρτες.....	249
Ξενόγλωσσοι όροι.....	253



## Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνυμίων

AD	Anno Domini
AGI	American Geosciences Institute
AMS	Accelerator Mass Spectrometry
ASL	Absolute Sea Level
BC	Before Christ
BCE	Before Common Era
BP	Before Present
CCD	Carbonate Compensate Depth
CE	Common Era
CR	Clastic Ratio
ELST	Early Lowstand Systems Tract
ER	Evaporate ratio
FSST	Falling Stage Systems Tract and Sequence Boundary Formation
FZ	Standard Facies Zones
HST	Highstand systems tracts
IPCC	Intergovernmental Panel for Climatic Change
LST	Lowstand Systems Tracts
my	million years
NACSN	North American Commission on Stratigraphic Nomenclature
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
RTR	Relative Tide Range
TR	Spring Tide Range
TS	Transgressive Surface
TST	Transgressive systems tracts





## Πρόλογος

Η *Ιζηματολογία* είναι η μελέτη των διαδικασιών σχηματισμού, μεταφοράς και απόθεσης υλικών που συσσωρεύονται ως ιζήματα, σε ηπειρωτικά και θαλάσσια περιβάλλοντα και τελικά σχηματίζουν *ιζηματογενή πετρώματα*. Το αντικείμενο της Ιζηματολογίας αποτελεί τη θεμελιώδη βάση δεδομένων για την κατανόηση της εξέλιξης της ζωής, της τεκτονικής των πλακών και της παγκόσμιας κλιματικής κρίσης, αφού μελετά τη φύση και την προέλευση τόσο των σημερινών όσο και των παλαιών ιζηματογενών αποθέσεων. Περιλαμβάνει την *πετρογραφία ιζηματογενών πετρωμάτων* (περιγραφή της σύστασης και της υφής τους) και συνδέεται στενά με τη *Στρωματογραφία*, και ειδικότερα, με την πιο πρόσφατη ανάπτυξή της, τη *Στρωματογραφία Ακολουθιών*, μέσω της οποίας μπορεί να αναπτυχθεί μια δυναμική άποψη της εξελισσόμενης *Παλαιογεωγραφίας*.

Κάνοντας μια ιστορική αναδρομή στη διδασκαλία του μαθήματος της Ιζηματολογίας στα ελληνικά πανεπιστήμια, φαίνεται ότι η ένταξή του στα προγράμματα σπουδών γίνεται μετά το '80. Στην Ελλάδα οι γεωλογικές επιστήμες διδάσκονταν ως μέρος του προγράμματος σπουδών των Φυσιογνωστικών Τμημάτων των Φυσικομαθηματικών Σχολών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης. Μέχρι την κατάργηση των Τμημάτων αυτών, η γνώση για τα ιζήματα και τα ιζηματογενή πετρώματα προερχόταν από τα μαθήματα της Φυσικής Γεωγραφίας και της Πετρολογίας. Εντούτοις, το βιογενές περιεχόμενο των ιζημάτων, δηλαδή τα απολιθώματα, αποτελούσαν στα πλαίσια των μαθημάτων της Στρωματογραφίας και της Παλαιοντολογίας και Ιστορικής Γεωλογίας, τον κεντρικό πυρήνα της διδασκαλίας των γεωεπιστημών στα Φυσιογνωστικά Τμήματα. Η Ιζηματολογία ως εφαρμοσμένος κλάδος των γεωεπιστημών απουσίαζε από το πρόγραμμα σπουδών των Τμημάτων αυτών. Εντούτοις, η Ιζηματολογία έχει ήδη καθιερωθεί διεθνώς από τις αρχές του 20ού αιώνα ως εφαρμοσμένος κλάδος των γεωεπιστημών στο πλαίσιο της αναγνώρισης στρωματογραφικών παγίδων και μητρικών πετρωμάτων, για την αναζήτηση κοιτασμάτων υδρογονανθράκων.

Η κατάργηση των Φυσιογνωστικών Τμημάτων και η ίδρυση Γεωλογικών Τμημάτων στα Πανεπιστήμια Αθήνας και Θεσσαλονίκης στις αρχές της δεκαετίας του '70 και του Γεωλογικού Τμήματος της Πάτρας, στα τέλη της δεκαετίας του '70, επιτρέπουν την έναρξη και την ανάπτυξη της Ιζηματολογίας ως ενός αυτόνομου κλάδου των γεωεπιστημών. Ο αείμνηστος Καθηγητής και Ακαδημαϊκός Αθ. Πανάγος, Τακτικός Καθηγητής της Έδρας της Γεωλογίας της Φυσικομαθηματικής Σχολής (1969) του Πανεπιστημίου Πατρών, είναι ένθερμος υποστηρικτής της Ιζηματολογίας και παρακινεί τα μέλη της Έδρας της Γεωλογίας να ασχοληθούν ερευνητικά με αυτήν. Το 1973, η Έδρα της Γεωλογίας αρχίζει να συνεργάζεται με τον νεαρό τότε διδάκτορα της Ιζηματολογίας και Θαλάσσιας Γεωλογίας του Cambridge, David Piper, και αργότερα Καθηγητή στο Πανεπιστήμιο Dalhousie (Καναδά), Emeritus Scientist στη Γεωλογική Εταιρεία του Καναδά και Επίτιμο Διδάκτορα των Πανεπιστημίων Αθηνών και Πατρών. Με αφετηρία το Πανεπιστήμιο Πατρών, ο ομότιμος σήμερα Καθηγητής και ιδρυτής του Εργαστηρίου Ιζηματολογίας του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Ν. Κοντόπουλος, βοηθός τότε της Έδρας της Γεωλογίας, ολοκληρώνει τη διδακτορική του διατριβή στο αντικείμενο της αναγνώρισης των περιβαλλόντων ιζηματογένεσης, ενώ παράλληλα άλλοι ερευνητές αναπτύσσουν τα αντικείμενα της γεωλογίας των αργίλων, την αναζήτηση υδρογονανθράκων και τη γεωχημεία των ιζημάτων και των ιζηματογενών πετρωμάτων. Από το 1975, ξεκινούν από την Έδρα της Γεωλογίας οι πρώτες δημοσιεύσεις στο αντικείμενο της Κλαστικής Ιζηματολογίας. Στις αρχές της δεκαετίας του '80, αρχίζει να λειτουργεί το Εργαστήριο Ιζηματολογίας στο Τμήμα Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών για την άσκηση των φοιτητών, ενώ τα προπτυχιακά προγράμματα και των τριών Γεωλογικών Τμημάτων εισάγουν τη διδασκαλία του μαθήματος Ιζηματολογίας. Στις επόμενες δεκαετίες, ακολούθησε ένας μεγάλος αριθμός επιστημονικών δημοσιεύσεων, διδακτορικών, μεταπτυχιακών και προπτυχιακών διπλωματικών εργασιών στο αντικείμενο της Ιζηματολογίας. Ωστόσο, για πρώτη φορά στο 8ο Διεθνές Συνέδριο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας το 1998, που διεξήχθη στο Πανεπιστήμιο Πατρών, η Ιζηματολογία εμφανίζεται ως ιδιαίτερη ενότητα επιστημονικών ανακοινώσεων. Το 2002 ιδρύεται η Ελληνική Ιζηματολογική Ένωση, ενώ αρκετά μέλη της αποτελούν μέλη της Διεθνούς Ένωσης Ιζηματολόγων (International Association of Sedimentologists).

Το βιβλίο αυτό έχει γραφτεί για προπτυχιακούς φοιτητές των γεωεπιστημών, των περιβαλλοντικών επιστημών και της φυσικής γεωγραφίας, καθώς και για μεταπτυχιακούς φοιτητές στις γεωεπιστήμες και τις περιβαλλοντικές επιστήμες, με ενδιαφέρον για τα σύγχρονα συστήματα ιζημάτων. Κύριος στόχος είναι να τους εισαγάγει, αρχικά, σε βασικές έννοιες της Ιζηματολογίας. Ευελπιστούμε ότι το κείμενο θα είναι προσίτο σε αυτούς που είναι εντελώς νέοι στο αντικείμενο και ότι θα παρέχει επίσης ένα υπόβαθρο σε έννοιες και ορολογία που χρησιμοποιούνται σε πιο προηγμένες μελέτες. Η προσέγγιση είναι σε μεγάλο βαθμό περιγραφική και

προορίζεται να συμπληρώσει την πιο αναλυτική επεξεργασία των ήδη υπαρχόντων ιζηματολογικών συγγραμμάτων.

Οι *ιζηματογενείς διεργασίες*, καθώς και η περιγραφή – ανάλυση των ιζηματογενών περιβαλλόντων και των φάσεων καλύπτονται λεπτομερέστερα μέσα από δέκα κεφάλαια. Το βιβλίο ολοκληρώνεται με ένα κεφάλαιο που περιλαμβάνει δώδεκα εργαστηριακές ασκήσεις για τους φοιτητές, οι οποίες καλύπτουν την ύλη του βιβλίου.

Οι αναφορές που παρατίθενται αποτελούν απλώς μια επιλογή των πιο ενδεικτικών δημοσιεύσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σημείο εκκίνησης για περαιτέρω πληροφορίες. Παλαιές πηγές παρατίθενται όταν αυτές παρέχουν σημαντικές πρωτογενείς αναφορές για ένα θέμα. Στο τέλος κάθε κεφαλαίου υπάρχει ένας κατάλογος προτεινόμενου υλικού περαιτέρω ανάγνωσης: πρόκειται κυρίως για πρόσφατα εγχειρίδια, συλλογές άρθρων σε ειδικές εκδόσεις και βασικές εργασίες ανασκόπησης, και προορίζονται ως σημείο εκκίνησης για περαιτέρω γενικές πληροφορίες ή/και πληροφορίες σχετικά με τα θέματα που καλύπτονται στο κεφάλαιο.

Η πλειονότητα των εικόνων, φωτογραφιών και χαρτών προέρχεται από το προσωπικό αρχείο των δύο συγγραφέων από το ερευνητικό τους έργο, οι οποίοι ανέλαβαν και τη γραφιστική επιμέλειά τους.

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### Σύνοψη

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κύρια εισαγωγικά στοιχεία και βασικές έννοιες της Ιζηματολογίας, μια ιστορική αναδρομή της εξέλιξης του αντικειμένου σε σχέση με τους άλλους κλάδους των γεωεπιστημών, καθώς και οι βασικές αρχές και εφαρμογές της, στη βιομηχανική χρήση των ιζημάτων και των ιζηματογενών πετρωμάτων. Επιπλέον, γίνεται συνοπτική περιγραφή των κεφαλαίων του συγγράμματος.

### Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται γνώσεις γενικής γεωλογίας και φυσικής γεωγραφίας.

## 1.1 Εισαγωγή

Η προσπάθεια της ερμηνείας της ύπαρξης και του σχηματισμού των πετρωμάτων με όρους σύγχρονων διεργασιών χρονολογείται από τον 18ο και 19ο αιώνα με τη διατύπωση ότι «το παρόν είναι το κλειδί του παρελθόντος». Η διατύπωση αυτή περιγράφει συνοπτικά την αρχή της «ομοιομορφίας». Ο *ομοιομορφισμός* είναι μια γεωλογική θεωρία που περιγράφει τις διαδικασίες που διαμορφώνουν τη Γη και το Σύμπαν. Δηλώνει ότι οι αλλαγές στον φλοιό της Γης σε όλη την ιστορία έχουν προκύψει από τη δράση ομοιόμορφων, συνεχών διεργασιών που συμβαίνουν ακόμη και σήμερα. Αν και η διατύπωση αυτή είναι εξαιρετικά απλή αποτελεί μια ισχυρή θεωρία, την οποία η Ιζηματολογία αξιοποίησε ερμηνεύοντας ότι οι διεργασίες που συμβαίνουν σήμερα έχουν λειτουργήσει καθ' όλη τη διάρκεια του μεγαλύτερου μέρους της ιστορίας της Γης, όπως, για παράδειγμα, ένας ψαμμίτης που σχηματίστηκε ακριβώς όπως σχηματίζεται σήμερα η άμμος μιας παραλίας από τη σταδιακή απόθεση επί πολλά χρόνια άμμου που μεταφέρεται από το νερό. Η αρχή αυτή είναι ένας από τους βασικούς κανόνες για την κατανόηση του σχηματισμού των ιζηματογενών πετρωμάτων.

Τα τελευταία 200 χρόνια, η εξέλιξη του γνωστικού αντικειμένου της Ιζηματολογίας είναι εκρηκτική. Τον 19ο αιώνα, τα ιζήματα και τα ιζηματογενή πετρώματα θεωρούνταν ως το «σπίτι» των απολιθωμάτων, των οποίων η μελέτη, στο μέτρο που ήταν εφικτή, συνδεόταν κυρίως με την κατανόηση της στρωματογραφίας. Τα ιζηματογενή πετρώματα είχαν σαφώς αποθεθεί με κάποιο τρόπο, αλλά το πώς ακριβώς, δεν ήταν γνωστό. Υπήρχε μια γενική εκτίμηση της ιδέας ότι οι παλαιές διεργασίες και συνθήκες απόθεσης ήταν πιθανώς παρόμοιες με εκείνες που επικρατούν σήμερα (*πραγματισμός* και *ομοιομορφία*), αλλά, με λίγες σημαντικές εξαιρέσεις, η λεπτομερής μελέτη επικεντρωνόταν στην περιγραφή των πετρωμάτων ως υλικά και όχι ως προϊόντα δυναμικών διεργασιών και περιβαλλόντων. Η στάση αυτή επικράτησε μέχρι τα μέσα του εικοστού αιώνα, αν και πρωτοποριακές μελέτες είχαν, μέχρι τότε, χρησιμοποιήσει τις ιζηματογενείς δομές ως δείκτες της οροφής και της βάσης (way-up) στρωμάτων σε ανεστραμμένες ακολουθίες και ως μέσο εξαγωγής συμπερασμάτων για τις διευθύνσεις των παλαιορευμάτων.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η Ιζηματολογία είναι ο κλάδος εκείνος των γεωλογικών επιστημών που ασχολείται με τη γεωλογία των ιζημάτων. Ο όρος *ιζήμα* παράγεται από το λατινικό *sedimentum* που σημαίνει κατακάθι και προέρχεται από τη λέξη *sedeō* – κάθομαι. Υπό αυτή την έννοια, μια ιζηματογενής απόθεση είναι ένα κατακάθι μιας χαλαρής συγκέντρωσης από στερεά υλικά που καθιζάνουν μέσα από ένα ρευστό το οποίο μπορεί να είναι ο αέρας ή το νερό. Το ιζηματογενές πέτρωμα είναι το προϊόν μετασχηματισμού μιας ιζηματογενούς απόθεσης εξαιτίας του ενταφιασμού του από υπερκείμενες αποθέσεις που έχουν ως αποτέλεσμα τη συνεκτικοποίηση και συμπαγοποίηση της χαλαρής απόθεσης και τη μετατροπή της σε συμπαγές και συνεκτικό πέτρωμα. Η διαδικασία αυτή του μετασχηματισμού καλείται διαγένεση και αποτελεί ένα ιδιαίτερο αντικείμενο της πετρογραφίας των ιζηματογενών πετρωμάτων.

Μια *ιζηματογενής απόθεση* ποικίλλει πολύ σε προέλευση, μέγεθος, σχήμα και σύνθεση. Σωματίδια όπως κόκκοι από άμμο και χαλίκια μπορεί να προέρχονται από τη διάβρωση παλαιότερων πετρωμάτων ή απευθείας από ηφαίστεια. Οι οργανισμοί αποτελούν μια πολύ σημαντική πηγή ιζηματογενούς υλικού, που κυμαίνεται από μικροβιακά νημάτια επικαλυμμένα με ανθρακικό ασβέστιο έως ολόκληρα ή σπασμένα κελύφη, κοραλλιογενείς υφάλους, οστά και φυτικά υπολείμματα. Επιπλέον, οι ιζηματογενείς αποθέσεις μπορεί να προέρχονται από την άμεση κατακρήμνιση ορυκτών από διαλυμένα συστατικά.

Ο σχηματισμός ιζήματος περιλαμβάνει είτε τη μεταφορά σωματιδίων στη θέση εναπόθεσης με τη βαρύτητα, το νερό, τον αέρα, τον πάγο ή τις ροές μάζας είτε τη χημική ή βιολογική ανάπτυξη του υλικού στη

θέση του. Η συσσώρευση ιζημάτων στη θέση τους επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη χημεία, τη θερμοκρασία και τον βιολογικό χαρακτήρα του περιβάλλοντος απόθεσης. Οι διαδικασίες μεταφοράς και εναπόθεσης μπορούν να προσδιοριστούν εξετάζοντας μεμονωμένα ιζηματογενή στρώματα ή ακολουθίες ιζημάτων. Το μέγεθος, το σχήμα και η κατανομή των σωματιδίων παρέχουν στοιχεία και πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο μεταφέρθηκε και εναποτέθηκε το υλικό. Υποθέτοντας ότι οι νόμοι που διέπουν τις φυσικές και χημικές διεργασίες δεν έχουν αλλάξει με την πάροδο του γεωλογικού χρόνου, η διατύπωση ότι το παρόν είναι το κλειδί του παρελθόντος αποτέλεσε στην Ιζηματολογία το βασικό εργαλείο της ερμηνείας των παλαιών ιζηματογενών ακολουθιών. Μέσα από τη μελέτη των σύγχρονων συνθηκών ιζηματογένεσης στον χερσαίο, παράκτιο και θαλάσσιο χώρο, οι ιζηματολόγοι ανέπτυξαν τεχνικές και μεθοδολογίες για την αναγνώριση και ερμηνεία παλαιών περιβαλλόντων ιζηματογένεσης.

Η Ιζηματολογία υπάρχει ως ξεχωριστός κλάδος των γεωλογικών επιστημών για λίγες μόνο δεκαετίες (τελευταία 80 χρόνια). Αναπτύχθηκε κυρίως εξαιτίας του γεγονότος ότι οι απλές αρχικά παρατηρήσεις της στρωματογραφίας, έπρεπε να γίνουν πιο ποσοτικές και θα έπρεπε να μεταβούμε από την απλή παρατήρηση των στρωμάτων και των ακολουθιών στην ερμηνεία και κατανόηση του τρόπου δημιουργίας τους, ως προς τις φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που τα σχημάτισαν αλλά και να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της βιομηχανίας. Υπό αυτό το πρίσμα, η Ιζηματολογία αναπτύχθηκε προκειμένου να ερμηνεύσει τις διαδικασίες μεταφοράς (τρόπο και μέσο μεταφοράς), τις συνθήκες απόθεσης, τα περιβάλλοντα ιζηματογένεσης και κατ' επέκταση το φυσικοχημικό και χωρικό πλαίσιο του σχηματισμού των ιζημάτων και των ιζηματογενών πετρωμάτων. Η καταγραφή και η αναγνώριση των ιζηματογενών ακολουθιών μέσα από τις τεχνικές της στρωματογραφίας αποτελούν σημαντικά εργαλεία για τους γεωλόγους στην αναγνώριση τεκτονικών, κλιματικών και περιβαλλοντικών μεταβολών σε τοπικό επίπεδο αλλά και σε παγκόσμια κλίμακα.

Οι εξελίξεις αυτές, οι οποίες αρχικά καθοδηγήθηκαν, σε κάποιο βαθμό, από τις ανάγκες της πετρελαϊκής βιομηχανίας για την εξερεύνηση κοιτασμάτων υδρογονανθράκων, οδήγησαν σε πολύ πιο λεπτομερή γνώση των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών γένεσης, μεταφοράς και απόθεσης των ιζηματογενών υλικών. Οδήγησαν, επίσης, σε μεγαλύτερη κατανόηση των περιβαλλόντων, στα οποία αποτίθενται τα ιζήματα και στην ανάπτυξη μοντέλων (facies models) για τον χαρακτηρισμό και την πρόβλεψη της οργάνωσης των ιζηματογενών ακολουθιών, που δημιουργούνται σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Ταυτόχρονα, οι επιδράσεις του έμβιου κόσμου (ζώα και φυτά) στα διάφορα ιζήματα και ο ρόλος των χημικών αντιδράσεων στις οποίες συμμετέχουν τα ιζηματογενή σωματίδια και τα περιβάλλοντα τους ύδατα των πόρων, μελετήθηκαν με μεγάλη λεπτομέρεια.

Τη δεκαετία του 1980, οι δύο κλάδοι της Ιζηματολογίας και της Στρωματογραφίας ενοποιούνται δημιουργώντας την υποειδικότητα της Στρωματογραφίας Ακολουθιών. Η επιστήμη αυτή προσπαθεί να εξηγήσει τις ιζηματογενείς ακολουθίες με όρους ελέγχου μεγαλύτερης κλίμακας, με την ανάπτυξη των ιδεών της *σχετικής στάθμης της θάλασσας* και του *χώρου υποδοχής ιζημάτων*. Επιπλέον, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στον εντοπισμό και αναγνώριση «επιφανειών» που αντιπροσωπεύουν *επίκλυση* (υποχώρηση της ακτογραμμής προς την ξηρά) που συνδέεται με την *εμβάθυνση*, ή *απόσυρση* (μετατόπιση της ακτογραμμής προς τη θάλασσα), καθώς και στα κάθετα πρότυπα συσσώρευσης ιζημάτων.

Πλέον, ζούμε σε μια εποχή στην οποία η πλήρης ενσωμάτωση των ιζηματολογικών και στρωματογραφικών δεδομένων μπορεί να αποδώσει σπουδαίες γνώσεις για την ιστορία των ιζηματογενών ακολουθιών σε όλες τις κλίμακες, από τη λεκάνη μέχρι τα διάκενα των ιζηματογενών πόρων.

Επιπλέον, η Ιζηματολογία αντλεί και συνεισφέρει στους επιμέρους κλάδους της γεωλογίας, όπως είναι η Γεωχημεία, η Γεωφυσική, η Ορυκτολογία, η Παλαιοντολογία και η Τεκτονική, καθώς και σε επιστήμες, όπως είναι η Βιολογία, η Φυσική, η Χημεία, η Κλιματολογία, η Δυναμική των ρευστών, η Γεωμορφολογία, η Ωκεανογραφία και η Εδαφολογία.

Το παρόν σύγγραμμα σκοπό έχει να εισαγάγει τους προπτυχιακούς φοιτητές στις βασικές αρχές της Ιζηματολογίας και των περιβαλλόντων ιζηματογένεσης και να αποτελέσει ένα προπτυχιακό εγχειρίδιο για την κάλυψη των διδακτικών αναγκών στα ανωτέρω αντικείμενα. Ειδικότερα, το περιεχόμενο των κεφαλαίων του συγγράμματος πέραν του πρώτου εισαγωγικού κεφαλαίου διαμορφώνονται ως ακολούθως:

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις ιδιότητες των ιζηματογενών κόκκων, στις μεθόδους κατασκευής των κοκκομετρικών κατανομών, στη χρήση βασικών εννοιών περιγραφικής στατιστικής, στην επεξεργασία και αξιολόγηση των στατιστικών παραμέτρων των κοκκομετρικών καμπυλών και στην ταξινόμηση των ιζημάτων. Επιπλέον, εξετάζονται οι τρόποι μεταφοράς των ιζημάτων και η πηγή προέλευσης των διαφόρων κόκκων και γίνεται προσπάθεια κατανόησης του τρόπου μεταφοράς και απόθεσής τους. Παράλληλα αναφέρονται οι βασικοί τύποι απόθεσης και οι βασικές αρχές που διέπουν τις κοκκομετρικές κατανομές, καθώς και η σχέση τους με την περιβαλλοντική ανάλυση.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στις βασικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα για τον σχηματισμό των ιζηματογενών δομών, ανόργανων και βιογενών (ιχνοφάσεις), καθώς επίσης μέσω φωτογραφικών απεικονίσεων και γραφημάτων αναπτύσσονται τεχνικές και δεξιότητες στην αναγνώρισή τους κατά την εργασία πεδίου. Περιγράφονται ο τρόπος και οι διεργασίες σχηματισμού των ανόργανων δομών (α) προαποθετικών/διαβρωσιγενών, (β) συναποθετικών και (γ) μεταποθετικών δομών και η χρήση τους στην ερμηνεία των υδραυλικών χαρακτηριστικών και του περιβάλλοντος απόθεσης. Αναλύονται ως προς τον τρόπο σχηματισμού τους οι ιζηματογενείς δομές όπως εμφανίζονται σε ιλύ και ιλυολίθους, σε άμμους και ψαμμίτες, σε χαλίκια/κροκάλες και κροκαλοπαγή. Τέλος, γίνεται αναφορά σε δομές ως αποτέλεσμα των χημικών και βιολογικών διεργασιών, καθώς και των δομών πλαστικής παραμόρφωσης. Με την ολοκλήρωση της περιγραφής και της ερμηνείας του τρόπου σχηματισμού τους γίνεται άμεση συσχέτιση αυτών με τα περιβάλλοντα ιζηματογένεσης και τις διαδικασίες απόθεσης αυτών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα περιβάλλοντα ιζηματογένεσης και τις ιζηματογενείς φάσεις, όπως καθορίζονται με βάση τις φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες οι οποίες λαμβάνουν χώρα κατά τον σχηματισμό, τη μεταφορά και την απόθεση των ιζημάτων. Με τον όρο «περιβάλλον ιζηματογένεσης και ιζηματογενής φάση» αναφερόμαστε στο σύνολο των χαρακτηριστικών τα οποία περιλαμβάνουν τη γεωμετρία, τις ιζηματογενείς δομές, το κοκκομετρικό μέγεθος, το χρώμα, το βιογενές υλικό και τη γεωγραφική εξάπλωση μιας ιζηματογενούς ακολουθίας. Μέσω της περιβαλλοντικής και φασικής ανάλυσης, η οποία θα περιλαμβάνει επιμέρους την αναγνώριση των λιθοφάσεων, των βιοφάσεων και των ιχνοφάσεων, ο γεωλόγος μπορεί να ερμηνεύσει τις διαδικασίες σχηματισμού και απόθεσης των ιζημάτων, να τις συσχετίσει με τις κλιματικές και τεκτονικές μεταβολές στο πέρασμα του γεωλογικού χρόνου και να τις συγκρίνει με σύγχρονα ανάλογα περιβάλλοντα και φάσεις ιζηματογένεσης. Επιπλέον, στο κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνονται οι τεχνικές και οι μέθοδοι της περιγραφής και ερμηνείας των περιβαλλόντων ιζηματογένεσης και των ιζηματογενών φάσεων και πώς αυτά μεταβάλλονται χωροχρονικά.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται και περιγράφονται τα ακόλουθα ηπειρωτικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης: (α) παγετώδη, (β) αιολικά, (γ) αλλουβιακά (δ) ποτάμια και (ε) λιμναία. Εξετάζονται η χωρική εξάπλωση των παγετωδών και αιολικών αποθέσεων, η σχέση τους με το κλίμα και τη γεωμορφολογία της περιοχής, ο τρόπος κίνησης και μεταφοράς τους και οι παραγόμενες ιζηματογενείς αποθέσεις. Γίνεται αναφορά στη γεωγραφική κατανομή των παγετωδών περιβαλλόντων ιζηματογένεσης μέσα στο πέρασμα του γεωλογικού χρόνου και στη σχέση τους με την τεκτονική και την ισοστασία, ενώ δίνονται σύγχρονα παραδείγματα παγετωδών και αιολικών αποθέσεων από όλο τον κόσμο και παραδείγματα μικρής κλίμακας από τον Ελλαδικό χώρο. Ένα από τα συνηθέστερα και πιο σημαντικά χερσαία περιβάλλοντα ιζηματογένεσης είναι τα αλλουβιακά ριπίδια. Ειδικότερα γίνεται εκτενής αναφορά στα μορφολογικά χαρακτηριστικά των αλλουβιακών ριπιδίων, στον τρόπο και τις προϋποθέσεις ανάπτυξής τους, καθώς και στα διαγνωστικά κριτήρια αναγνώρισης παλιών αποθέσεων αλλουβιακών ριπιδίων στην ύπαιθρο. Επιπλέον, στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται τα στάδια ανάπτυξης και εξέλιξης ενός ποταμού, οι βασικοί τύποι καναλιών, τα χαρακτηριστικά τους και η ταξινόμησή τους, καθώς και οι βασικές αρχές που διέπουν τη δημιουργία του κάθε τύπου. Περιγράφονται οι συνθήκες σχηματισμού των ποταμών δικτυωτού και μαιανδρικού τύπου, καθώς και οι αποθέσεις των διαφόρων υποπεριβαλλόντων τους (αποθέσεις κοίτης, πεδιάδα πλημμύρας, φραγματικών νησίδων κ.λπ.). Στο ίδιο κεφάλαιο γίνονται αναφορά και περιγραφή στα βασικά χαρακτηριστικά των λιμναίων περιβαλλόντων ιζηματογένεσης, καθώς και ταξινόμηση των λιμνών σύμφωνα με υδρολογικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά. Παρουσιάζονται οι φυσικοχημικές ιδιότητες των υδάτων των λιμναίων συστημάτων, η κατανομή της θερμοκρασίας, του διαλυμένου οξυγόνου, της ενεργούς οξύτητας και του δυναμικού οξειδοαναγωγής με το βάθος και πώς οι φυσικοχημικές αυτές παράμετροι ελέγχουν τις λιμναίες διεργασίες ιζηματογένεσης. Αναφορά και περιγραφή γίνονται στις συνηθέστερες κατηγορίες λιμναίων ιζηματογενών πετρωμάτων και σε παραδείγματα σύγχρονων λιμναίων αποθέσεων από τις μεγαλύτερες λίμνες στον κόσμο και τον ελλαδικό χώρο.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα περιθωριακά των θαλασσών ή μεταβατικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης τα οποία αναπτύσσονται στην παράκτια ζώνη και αποτελούν τη μετάβαση ανάμεσα στα χερσογενή και τα θαλάσσια αποθετικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης. Στην κατηγορία των περιθωριακών/μεταβατικών περιβαλλόντων ανήκουν (α) τα δέλτα, (β) οι λιμνοθάλασσες, (γ) τα παράκτια έλη, (δ) οι φραγματοειδείς νησίδες, (ε) τα παλιρροϊκά πεδία, (στ) οι εστούρες/ποταμόκολλοι και (ζ) τα παράκτια έλη. Περιγράφονται οι τρόποι σχηματισμού και εξέλιξης των παράκτιων αυτών περιβαλλόντων, η επίδραση σε αυτά του κλίματος, της τεκτονικής και της γεωμορφολογικής εξέλιξης της περιοχής. Καθώς είναι ευαίσθητα περιβαλλοντικά οικοσυστήματα και στις περισσότερες περιπτώσεις προστατευόμενα από διεθνείς συνθήκες, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στην επίδραση της ανθρώπινης δραστηριότητας και της κλιματικής αλλαγής σε αυτά.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα περιβάλλοντα ιζηματογένεσης που αναπτύσσονται σε ρηχό θαλάσσιο περιβάλλον και στη βαθιά ανοιχτή θάλασσα τα οποία επιμέρους μπορούν να διακριθούν σε αποθέσεις κρηπίδας, υποθαλάσσια ριπίδια και πελαγικά περιβάλλοντα απόθεσης. Τα ρηχά θαλάσσια περιβάλλοντα εξετάζονται ως προς την πηγή τροφοδοσίας τους, τις διεργασίες που κυριαρχούν και διαμορφώνουν τις αποθέσεις τους (παλίρροια, κυματική δράση, καταιγίδες, ωκεάνια ρεύματα κ.λπ.) και πώς αυτές επηρεάζουν την ανθρακική ιζηματογένεση, η οποία είναι η πιο διαδεδομένη σε αυτό το περιβάλλον. Το ρηχό θαλάσσιο περιβάλλον χαρακτηρίζεται από κλαστική και ανθρακική κυρίως ιζηματογένεσης και είναι ευαίσθητο στις μεταβολές της στάθμης της θάλασσας, οι οποίες εξετάζονται ως προς την επίδραση τους στα αποθετικά υποπεριβάλλοντα της ρηχής θάλασσας. Οι ωκεανοί αποτελούν ένα περιβάλλον με μεγάλη δυναμική ιζηματο/συσσώρευση από κλαστικά ιζήματα αλλά και χημικά ή βιοχημικά ιζήματα. Στα περιβάλλοντα βαθιάς θάλασσας εξετάζονται οι διαδικασίες απόθεσης των υποθαλάσσιων ριπιδίων και οι φάσεις αυτών, οι κοντουρίτες (contourites), η πελαγική και ημιπελαγική ιζηματογένεση, ενώ γίνεται αναφορά στο επίπεδο διαλυτοποίησης των ανθρακικών αλάτων (CCD – Carbonate Compensate Depth) στους ωκεανούς.

Στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα και στην ταξινόμησή τους, στις πυροκλαστικές ροές και στους υπεύθυνους μηχανισμούς δημιουργίας τους, στις ακολουθίες που σχηματίζουν, στις ιγνιμβριτικές αποθέσεις και στις δομές που σχηματίζουν.

Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παράγοντες που ελέγχουν την ανθρακική ιζηματογένεση (π.χ. το γεωτεκτονικό περιβάλλον και το κλίμα), καθώς και τα συστατικά, η ταξινόμηση και η μικροφασική ανάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στις διαδικασίες δημιουργίας ανθρακικών ακολουθιών και στα περιβάλλοντα ανθρακικής ιζηματογένεσης: νηριτικά ανθρακικά περιβάλλοντα (ανθρακικές πλατφόρμες ήπιας κλίσης, περιπαλιρροιακά περιβάλλοντα, υποπαλιρροιακά περιβάλλοντα, κρηπίδα, ύφαλοι και υφαλώδεις συγκεντρώσεις), πελαγικό ανθρακικό περιβάλλον. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται παραδείγματα νηριτικών και πελαγικών περιβαλλόντων, σε παγκόσμια κλίμακα αλλά και από τη Μεσόγειο.

Το δέκατο κεφάλαιο αφορά την ορολογία και τις μεθόδους που υιοθετούνται για την εφαρμογή της Στρωματογραφίας Ακολουθιών. Αναφέρονται οι Αρχές της Στρωματογραφίας Ακολουθιών και δίνεται έμφαση στην επίδραση του ευστατισμού, της τεκτονικής και της ιζηματογένεσης στην κατανομή των ιζημάτων σε μια λεκάνη. Αναλύεται ο τρόπος δημιουργίας και διευθέτησης της ακολουθίας, της υποακολουθίας και της παρακολουθίας, καθώς και των επιφανειών που τις οριοθετούν.

Μετά τα δέκα πρώτα κεφάλαια παρατίθεται το Παράρτημα, το οποίο περιλαμβάνει δώδεκα εργαστηριακές ασκήσεις για τους φοιτητές, οι οποίες καλύπτουν την ύλη του βιβλίου.

## Ενδεικτική Βιβλιογραφία

### Ξενόγλωσση

Leeder, M. (2011). *Sedimentology and sedimentary basins from turbulence to tectonics* (2nd edition). Chichester, West Sussex, UK: Wiley-Blackwell. Nichols, G. (2009). *Sedimentology and stratigraphy*. (2nd edition). Blackwell Publishing.

Perry, C., & Taylor, K. (Eds.) (2006). *Environmental Sedimentology* (2nd edition). Wiley-Blackwell 452 Pages.

Reading, H.G. (Ed.) (1996). *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy* (3rd edition). Blackwell Science, Oxford.

### Ελληνόγλωσση

Κοντόπουλος, Ν. (1999). *Ιζηματολογία*. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Πανεπιστημίου Πατρών.

Ψιλοβίκος, Αν., & Ψιλοβίκος, Αρ. (2019). *Ιζηματολογία* (2η έκδοση). Εκδόσεις Τζιόλα.





## Κεφάλαιο 2

# Φυσική Ιζηματολογία – κατάταξη χερσογενών κλαστικών ιζημάτων και ιζηματογενών πετρωμάτων

### Σύνοψη

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται η κατάταξη των χερσογενών κλαστικών ιζημάτων, οι μέθοδοι κατασκευής κοκκομετρικών κατανομών, η χρήση βασικών εννοιών περιγραφικής στατιστικής στην κοκκομετρική ανάλυση, η επεξεργασία και η αξιολόγηση των στατιστικών παραμέτρων των κοκκομετρικών καμπυλών. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στα βασικά μορφομετρικά και ιστολογικά χαρακτηριστικά των ιζημάτων / ιζηματογενών πετρωμάτων, όπως στο σχήμα, στη στρογγύλωση, στη σφαιρικότητα των κόκκων, στο επιφανειακό ανάγλυφο, στη συνεκτικότητα, και τέλος παρουσιάζονται ο προσανατολισμός, οι διαδικασίες και ο τρόπος μεταφοράς των κόκκων.

### Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται γνώσεις γενικής γεωλογίας και φυσικής γεωγραφίας.

## 2.1 Εισαγωγή

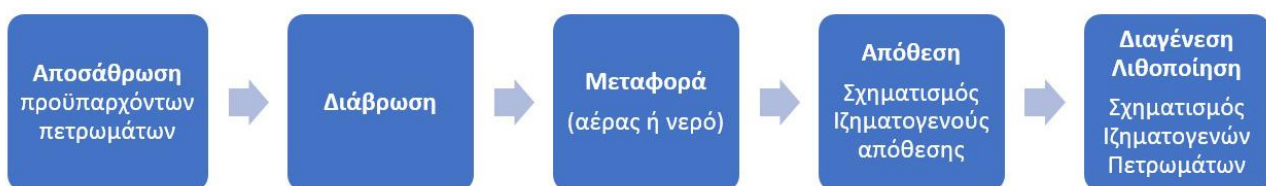
Ένα ίζημα ή μια ιζηματογενής απόθεση είναι μια χαλαρή συγκέντρωση από στερεούς κόκκους ασύνδετους ή ελαφριά συνδεδεμένους μεταξύ τους, οι οποίοι αποτίθενται ή καθιζάνουν μέσα από ένα ρευστό όπως ο αέρας ή το νερό. Οι κόκκοι μπορεί να μεταφέρονται με σύρση, με κύλιση, με αναπήδηση, εν αιωρήσει ή εν διαλύσει και αποτίθενται στην επιφάνεια του στερεού φλοιού σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών και πιέσεων, σχηματίζοντας τις χαλαρές ιζηματογενείς αποθέσεις, τα *ιζήματα*. Οι χαλαρές αποθέσεις των ιζημάτων με το πέρασμα του γεωλογικού χρόνου, μέσω του ενταφιασμού τους, της πίεσης που δέχονται από τα υπερκείμενα πετρώματα και των ιστολογικών και δομικών μεταβολών που υφίστανται, μεταπίπτουν σε συνεκτικές συμπαγείς αποθέσεις, τα *ιζηματογενή πετρώματα*. Το σύνολο των φυσικών, χημικών και μηχανικών διεργασιών μετασχηματισμού των ιζημάτων σε ιζηματογενή πετρώματα ονομάζεται *διαγένεση*.

Ένας από τους κύριους στόχους της ιζηματολογίας είναι η κατάταξη των ιζημάτων και των ιζηματογενών πετρωμάτων. Οι βασικότεροι τρόποι κατάταξης των ιζημάτων και των ιζηματογενών πετρωμάτων είναι δύο:

(α) με βάση τις διεργασίες σχηματισμού τους και απόθεσης και

(β) με τη μέθοδο της κοκκομετρικής ανάλυσης όπου λαμβάνει χώρα ο διαχωρισμός μιας ιζηματογενούς απόθεσης σε κλάσεις σύμφωνα με το κοκκομετρικό τους μέγεθος.

Οι διεργασίες που περιγράφουν τον σχηματισμό των ιζημάτων και ιζηματογενών πετρωμάτων παρουσιάζονται συνοπτικά στην Εικόνα 2.1.

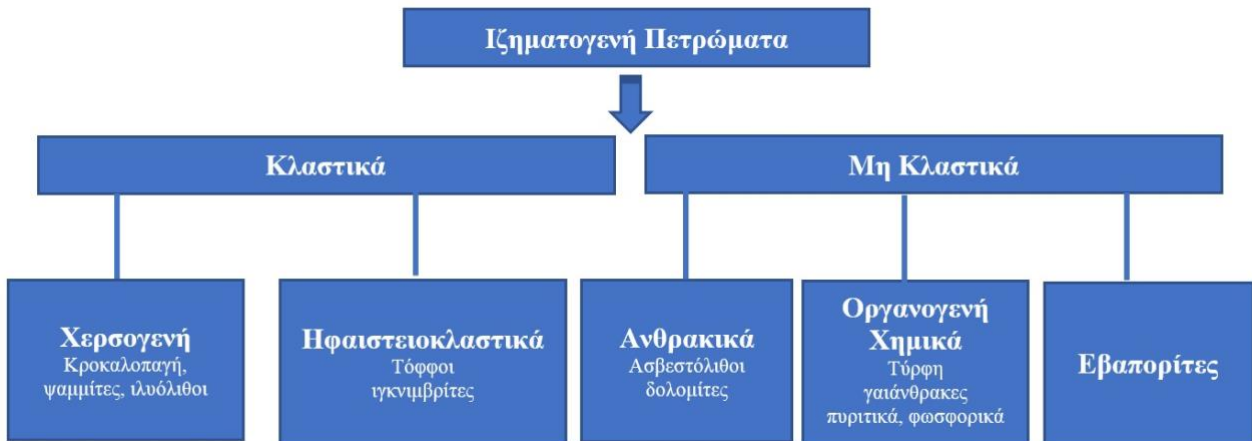


Εικόνα 2.1 Συνοπτική περιγραφή των διεργασιών σχηματισμού ιζημάτων και ιζηματογενών πετρωμάτων.

## 2.2 Κατάταξη ιζημάτων και Ιζηματογενών Πετρωμάτων

Οι δύο κύριες κατηγορίες ιζημάτων και ιζηματογενών πετρωμάτων (Εικόνα 2.2), όπως αυτές διαχωρίζονται με βάση τον τρόπο μεταφοράς και απόθεσης αλλά και τις φυσικές και χημικές διεργασίες σχηματισμού τους, είναι:

- τα Κλαστικά Ιζήματα/ιζηματογενή πετρώματα ή Χερσογενή ή Άλλόχθονα,
- τα Μη Κλαστικά ιζήματα/ιζηματογενή πετρώματα ή Χημικά και Οργανικά ή Αυτόχθονα.



Εικόνα 2.2 Συνοπτική διαγραμματική παρουσίαση των κύριων κατηγοριών των ιζηματογενών πετρωμάτων.

### 2.2.1 Μη κλαστικά – Χερσογενή – Αλλόχθονα ιζήματα και Ιζηματογενή πετρώματα

Τα μη κλαστικά ιζήματα και τα ιζηματογενή πετρώματα αποτελούνται από θραύσματα ανόργανων κόκκων που προκύπτουν από τις διεργασίες της αποσάθρωσης και της διάβρωσης παλαιότερων πετρωμάτων, τη μεταφορά τους μέσω ενός ρευστού μέσου (αέρα ή νερό) και την τελική τους απόθεση. Ταξινομούνται σύμφωνα με το μέγεθος των κόκκων τους και την ορυκτολογική σύσταση αυτών.

Σύμφωνα με το κοκκομετρικό μέγεθος διακρίνουμε τέσσερις κύριες κατηγορίες ιζημάτων κατά την κλίμακα Udden–Wentworth:

- Χάλικες και Κροκάλες (gravel) >2mm
- Άμμος (sand) 0,063mm έως 2mm
- Ιλύς (silt) 0,0039mm έως 0,063mm
- Άργιλος (clay) <0,0039mm

Στην ιζηματολογία τα όρια μεγέθους της διαμέτρου των κόκκων περιγράφονται με τη χρήση της κλίμακας ( $\phi$ ) την οποία πρώτος εισήγαγε ο Krumbein το 1934 και η οποία ορίζεται από τον τύπο:

$$\phi = -\log_2(\text{διάμετρος σε mm})$$

Ο λόγος για τον οποίο οι ιζηματολόγοι και οι γεωλόγοι χρησιμοποιούν την κλίμακα  $\phi$  είναι γιατί τους παρέχει το πλεονέκτημα τα κύρια όρια των κλάσεων πάνω στην κλίμακα Udden-Wentworth να γίνονται ακέραιοι αριθμοί αντί κλασμάτων (Εικόνα 2.3). Επιπλέον η κλίμακα του Udden-Wentworth αντιστράφηκε, έτσι ώστε τα μεγαλύτερα μεγέθη γίνονται αρνητικά και τα μικρότερα μεγέθη αποκτούν θετικούς αριθμούς πάνω στην κλίμακα  $\phi$ . Άλλες μέθοδοι κατάταξης των ιζημάτων ορίζουν ως όριο διαχωρισμού της αργίλου από την ιλύ τα 0.002 mm. Για αυτό τον λόγο, η οποιαδήποτε αναφορά στο μέγεθος και την κοκκομετρική ανάλυση των ιζημάτων πρέπει να συνοδεύεται από το σύστημα κατάταξης που χρησιμοποιούμε.

### 2.2.2 Ιστολογικά χαρακτηριστικά Ιζημάτων και Ιζηματογενών Πετρωμάτων

Με τον όρο ιστολογικά χαρακτηριστικά των ιζημάτων και των ιζηματογενών πετρωμάτων ορίζουμε το σύνολο των ιδιοτήτων οι οποίες περιγράφουν το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων των ιζημάτων, τον βαθμό ταξιθέτησής τους, την ομοιομορφία τους, το ανάγλυφό τους και το ποσοστό του συνδετικού υλικού, καθώς και τη δομική τους ωριμότητα. Για την περιγραφή του ιστού ενός ιζήματος ή ιζηματογενούς πετρώματος απαιτείται να μελετήσουμε τις ακόλουθες ιδιότητες:

- το κοκκομετρικό μέγεθος (particle size),
- τη σφαιρικότητα (sphericity),

- τη στρογγυλότητα (roundness),
- το επιφανειακό ανάγλυφο (surface texture),
- τη συνεκτικότητα (packing),
- τον προσανατολισμό των κόκκων (orientation).

### 2.2.2.1 Κοκκομετρικό μέγεθος

Η ποσοτική εκτίμηση των ποσοστών των διαφορετικών μεγεθών κόκκων σε κλαστικά ιζήματα και ιζηματογενή πετρώματα ονομάζεται *κοκκομετρική ανάλυση*. Η κοκκομετρική ανάλυση των ιζημάτων και των ιζηματογενών πετρωμάτων χρησιμοποιείται για την κατάταξή τους, την εκτίμηση της πηγής προέλευσης, τον προσδιορισμό του μέσου και του τρόπου μεταφοράς, καθώς και τη μεταφορική τους ικανότητα.

Το μέγεθος των θραυσμάτων αποτελεί τη βάση της κατάταξης για να χαρακτηριστεί το γεωυλικό με βάση τις τέσσερις κύριες κατηγορίες ως (α) *χαλίκια – κροκαλοπαγές* (gravel – conglomerates), (β) *άμμος - ψαμμίτης* (sand – sandstone), (γ) *ιλύς – ιλύολίθος* (silt – siltstone) και (δ) *άργιλος - αργιλόλιθος* (clay – claystone) (Εικόνα 2.3). Συγχρόνως, το μέγεθος των κλαστικών υλικών μας δίνει πληροφορίες ως προς το πόσο μακριά ή κοντά βρίσκεται η απόθεση από την πηγή προέλευσής της. Ως εκ τούτου αποθέσεις με πολύ χονδρόκοκκο υλικό δείχνουν σχετική εγγύτητα με την πηγή τροφοδοσίας. Το μέγεθος και η *ταξιθέτηση/ομοιομορφία* των κόκκων των θραυσμάτων του κλαστικού ιζήματος δείχνουν το μέσο και τον τρόπο μεταφοράς. Αυτό διότι συγκεκριμένα μέσα και τρόποι μεταφοράς παράγουν αποθέσεις στις οποίες το μέγεθος και η ταξιθέτηση έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

mm	Φ	Όνομα		
256	-8	Ογκόλιθοι	Χάλικες	Κροκαλοπαγές
128	-7			
64	-6			
32	-5	Κροκάλες		
16	-4			
8	-3	Χαλίκια		
4	-2	Ψηφίδες		
2	-1			
1	0	Πολύ χονδρόκοκκη άμμος	Άμμος	Ψαμμίτης
0.5	1	Χονδρόκοκκη άμμος		
0.25	2	Μεσόκοκκη άμμος		
0.125	3	Λεπτόκοκκη άμμος		
0.063	4	Πολύ λεπτόκοκκη άμμος		
0.031	5	Χονδρόκοκκη ιλύς	Πηλός	Πηλίτης
0.0156	6	Μεσόκοκκη ιλύς		
0.0078	7	Λεπτόκοκκη ιλύς		
0.0039	8	Πολύ λεπτόκοκκη ιλύς		
		Αργίλος		

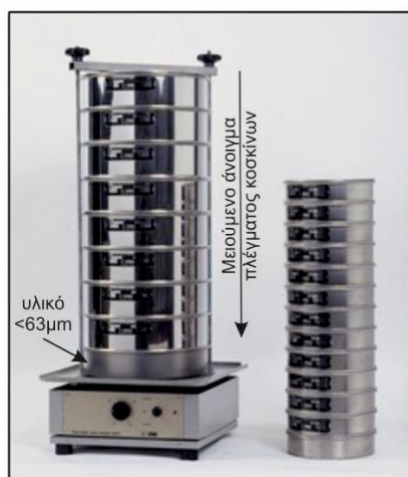
**Εικόνα 2.3** Διαχωρισμός και ονοματολογία κλαστικών ιζημάτων και ιζηματογενών πετρωμάτων και τα αντίστοιχα όρια σύμφωνα με τη διάμετρο των κόκκων σε Φ και mm κατά Udden-Wentworth.

Για την ιζηματολογική ανάλυση ενός κλαστικού ιζήματος είναι απαραίτητο να ληφθεί ένα δείγμα που να είναι αντιπροσωπευτικό ως προς τον εξεταζόμενο σχηματισμό, έτσι ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την ανάλυση του δείγματος για κάποια ιδιότητα να έχουν στατιστική αξιοπιστία για ολόκληρο τον πληθυσμό του ιζήματος. Ο τρόπος λήψης ενός τέτοιου δείγματος καλείται *δειγματοληψία* (sampling). Η διαδικασία ανάλυσης του αδρομερούς κλάσματος γίνεται με κόσκινα ενώ του λεπτόκοκκου κλάσματος με τη μέθοδο του σιφωνίου και πυκνόμετρου ή με αναλυτικές συσκευές όπως με τη μέθοδο της σκέδασης με λέιζερ (Εικόνα 2.4 και 2.5). Τα γραφικά ή αριθμητικά αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης παρέχουν την κοκκομετρική κατανομή (size distribution) του ιζήματος.

Σχεδόν όλες οι μέθοδοι ανάλυσης ξεκινούν με ένα προζυγισμένο δείγμα και καταλήγουν στον προσδιορισμό των επιμέρους βαρών για συγκεκριμένα διαστήματα διαμέτρου (είτε σε mm είτε σε  $\varphi$ ). Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι που χρησιμοποιούμε για την κοκκομετρική ανάλυση των ιζημάτων είναι οι ακόλουθες:

#### *Ξηρή Κοσκίνιση*

Χρησιμοποιούμε κόσκινα με πλέγμα συγκεκριμένου ανοίγματος το οποίο συνήθως αντιστοιχεί στα όρια των διαφορετικών κλασματικών μεγεθών που αναφέρθηκαν (κροκάλες, άμμος, ιλύς άργιλος) (Εικόνα 2.4). Αρχικά, απαραίτητη είναι η ξήρανση του δείγματος το οποίο θα αναλυθεί, στους 75-80°C, για 24-48 ώρες. Με το τέλος της ξήρανσης, υπολογίζεται η μάζα του δείγματος με ζυγό ακριβείας. Στη συνέχεια, το δείγμα τοποθετείται σε σειρά κοσκίνων και σε μηχανισμό δόνησης για περίπου 15 λεπτά. Τα επιμέρους κλάσματα τα οποία έχουν διαχωριστεί ξαναζυγίζονται και γίνεται αναγωγή στο επί τοις εκατό μέγεθος της κάθε κλάσης. Από τα αποτελέσματα, κατασκευάζονται οι καμπύλες συχνότητας και ιστογράμματα κατανομής μεγεθών.



**Εικόνα 2.4** Διάταξη κοσκίνων για ξηρή κοσκίνιση δείγματος.

#### *Μέθοδος Σιφωνίου και πυκνομέτρου*

Βασίζεται στο γεγονός ότι, μέσα σε ένα ρευστό, κόκκοι με διαφορετικό μέγεθος έχουν διαφορετικές ταχύτητες καθίζησης. Βασικός κανόνας πίσω από τη μέθοδο αυτή είναι ότι οι μικροί κόκκοι που καθιζάνουν μέσα σε ένα υγρό αποκτούν μια σταθερή ταχύτητα καθίζησης μόλις η αντίσταση του υγρού, που ασκείται στον κόκκο, εξισωθεί με τη δύναμη καθίζησης που ενεργεί στον κόκκο αυτό (νόμος του Stoke).

#### *Κοκκομετρική Ανάλυση με Συσκευή Διάθλασης Λέιζερ*

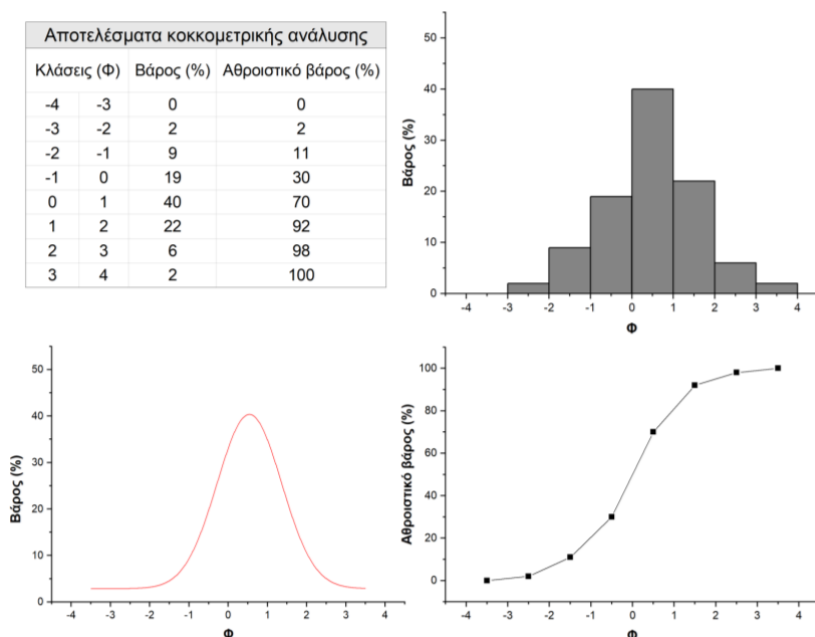
Η τεχνική της περίθλασης με λέιζερ βασίζεται στην αρχή ότι τα σωματίδια που διέρχονται από μια δέσμη λέιζερ θα σκεδάσουν το φως σε γωνία που έχει άμεση σχέση με το μέγεθός τους (Εικόνα 2.5). Το εύρος μεγεθών κατά τη διάρκεια της μέτρησης είναι άμεσα συνδεδεμένο με το εύρος της γωνίας σκέδασης. Καθώς το μέγεθος των κόκκων μειώνεται, η γωνία σκέδασης αυξάνεται λογαριθμικά. Η ένταση της σκέδασης εξαρτάται επίσης από το μέγεθος των σωματιδίων και μειώνεται σε σχέση με τα σωματίδια της εγκάρσιας διατομής. Μεγάλα σωματίδια, επομένως, σκεδάζουν το φως σε μικρές γωνίες με υψηλή ένταση, ενώ τα μικρά σωματίδια σκεδάζουν σε ευρύτερες οπτικές γωνίες, αλλά με χαμηλή ένταση. Το φως που προκαλεί η περίθλαση παράγεται από ένα ευρύ φάσμα υπό γωνίες, μετρίεται από 52 αισθητήρες και τελικά συσσωρεύεται σε 100 μέρη διαφορετικής κλάσης μεγεθών (Εικόνα 2.5).



**Εικόνα 2.5** Παράδειγμα συσκευής κοσκίνισης του λεπτόκοκκου κλάσματος με τη μέθοδο της σκέδασης.

Η διαδικασία ανάλυσης του αδρομερούς και του λεπτόκοκκου κλάσματος και ο διαχωρισμός τους σε επιμέρους κλάσεις μεγθών διαμέτρου των κόκκων καλείται *κοκκομετρική ανάλυση* (grain size analysis). Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης γίνεται γραφικά ή αριθμητικά και το σύνολο των αποτελεσμάτων κάθε δείγματος παρέχουν την κοκκομετρική κατανομή (size distribution) του ιζήματος.

Το σύνολο των κόκκων που αντιπροσωπεύει ένα δείγμα, μπορεί να θεωρηθεί ως ένας πληθυσμός, δηλαδή μια ομάδα στοιχείων με διαφορετικά χαρακτηριστικά (στη συγκεκριμένη περίπτωση τη διάμετρο). Για την προβολή αυτού του πληθυσμού/συνόλου, χρησιμοποιούνται ιστογράμματα κατανομής και κατασκευάζονται οι αθροιστικές % καμπύλες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6, όπου στον άξονα X προβάλλονται τα όρια (σε κλίμακα Φ) για τις διαμέτρους των κόκκων και στον άξονα Y το επί τοις εκατό (%) ποσοστό για την κάθε ομάδα/κλάση.

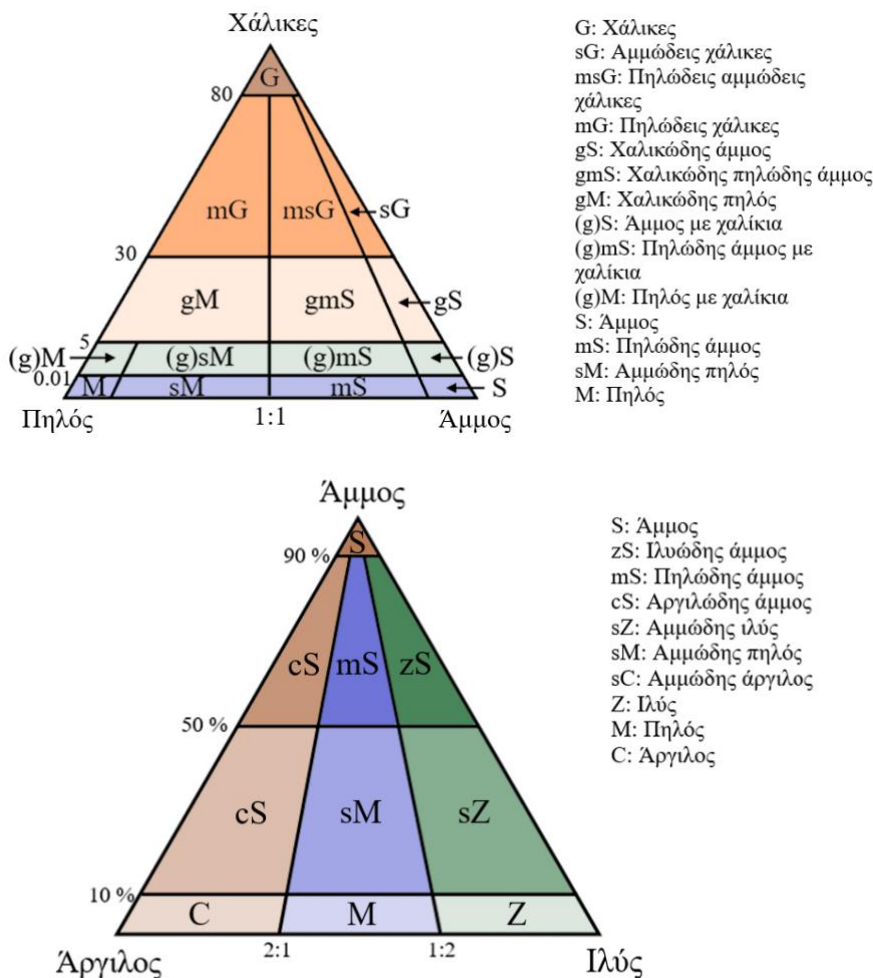


**Εικόνα 2.6** Παράδειγμα παρουσίασης αποτελεσμάτων κοκκομετρικής ανάλυσης (α) πίνακας δεδομένων, (β) ιστόγραμμα εκατοστιαίας συχνότητας εμφάνισης, (γ) καμπύλη κατανομής εκατοστιαίας συχνότητας εμφάνισης και (δ) αθροιστική % κατά βάρος καμπύλης.

Με την ολοκλήρωση της κοκκομετρικής ανάλυσης και τον προσδιορισμό του % ποσοστού συμμετοχής της κάθε κλάσης χαλικιών/άμμου/ιλύος/αργίλου, προσδιορίζεται η κατάταξη/ονομασία του ιζήματος. Η κατάταξη του κάθε δείγματος γίνεται με τη χρήση των τριγωνικών διαγραμμάτων κατάταξης που έχουν αναπτυχθεί από ιζηματολόγους εκ των οποίων η πιο ευρεία αποδεκτή είναι η κατάταξη κατά Folk (1957). Σύμφωνα με την



κατάταξη αυτή και εφόσον το ποσοστό των χαλικιών είναι μεγαλύτερο από 10% χρησιμοποιείται το τριγωνικό διάγραμμα Χαλικιών – Άμμου – Πηλός και εφόσον το ποσοστό είναι μικρότερο από 10% χρησιμοποιείται το τριγωνικό διάγραμμα Άμμου – Ιλύς – Αργίλου (Εικόνα 2.7).



**Εικόνα 2.7** Τριγωνικά διαγράμματα κατάταξης κατά Folk (α) για το αδρομερές χονδρόκοκκο κλάσμα και (β) για το λεπτόκοκκο κλάσμα.

Από τη στιγμή που οι κόκκοι ενός δείγματος αποτελούν έναν πληθυσμό/σύνολο, μπορούν να οριστούν για αυτούς στατιστικές παράμετροι, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της κάθε ομάδας μεγέθους. Η χρησιμότητα των στατιστικών αυτών παραμέτρων στην εφαρμοσμένη έρευνα είναι μεγάλη, διότι μπορούν να χαρακτηρίσουν ένα περιβάλλον απόθεσης. Αναλυτικότερα οι στατιστικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην ιζηματολογία είναι οι ακόλουθες:

*Επικρατούσα τιμή (Mode)*

Η επικρατούσα τιμή δηλώνει τη διάμετρο εκείνη που παρουσιάζει την πιο μεγάλη συχνότητα εμφάνισης. Αντιστοιχεί στο πιο απότομο σημείο της αθροιστικής καμπύλης και στο υψηλότερο σημείο πάνω στην καμπύλη συχνοτήτων.

*Διάμεσος (Median, Md)*

Η διάμεσος (Md) είναι η διάμετρος της αθροιστικής καμπύλης που αντιστοιχεί στο 50% και μπορεί να εκφραστεί σε τιμές Φ ή σε mm. Η διάμεσος μας υποδεικνύει το μέγεθος της διαμέτρου (σε φ ή σε mm) όπου το 50% κατά βάρος των κόκκων είναι χονδρότερα από τη διάμεσο και το 50% κατά βάρος λεπτότερα από αυτή. Ο εύκολος και γρήγορος προσδιορισμός αυτής της παραμέτρου την καθιστά και την πιο κοινά χρησιμοποιούμενη στην κοκκομετρική ανάλυση. Η διάμεσος δεν επηρεάζεται από τα άκρα της κατανομής μας και ως αποτέλεσμα δεν εκφράζει ικανοποιητικά όλο το εύρος των μεγεθών του δείγματος. Ειδικά σε περιπτώσεις ιζημάτων με ασύμμετρες κατανομές και για ιζήματα με δύο κυρίαρχους τύπους κατανομών (bimodal) η διάμεσος πιθανά δεν έχει καμία αξία.

#### Αριθμητικός μέσος (Mean size)

Ο γραφικός μέσος κατά Folk & Ward (1957) (Mz) υπολογίζει τον αριθμητικό μέσο ο οποίος εκφράζει και περιγράφει καλύτερα στατιστικά την κοκκομετρική μας κατανομή σε σχέση με τη διάμεσο (Md), καθώς ο υπολογισμός λαμβάνει υπόψη όχι μόνο το μέγεθος που αντιστοιχεί στο 50% (Φ50) όπως η διάμεσος αλλά και τα άκρα της κατανομής μας 25% (Φ25) και 75% (Φ75) (Πίνακας 2.1) (Εικόνα 2.8).

#### Σταθερή ή τυπική απόκλιση (Standard Deviation)

Η σταθερή ή τυπική απόκλιση εκφράζει την ομοιομορφία ή ταξιθέτηση (sorting) των ιζημάτων. Η τυπική απόκλιση περιγράφει τον βαθμό ομοιομορφίας (ταξιθέτησης) των κόκκων ενός ιζήματος και μας δείχνει τον βαθμό διασποράς που έχει η κατανομή μας από το μέσο μέγεθος. Όσο μικρότερη είναι η τυπική απόκλιση τόσο πιο ομοιόμορφου μεγέθους κόκκους έχει το δείγμα. Μικρή τυπική απόκλιση συνεπάγεται καλύτερη ομοιομορφία μεγεθών και καλύτερη ταξιθέτηση του δείγματος. Υπολογίζεται από τον τύπο του Πίνακα 2.1 και γραφικά οι ποσότητες του τυπολογίου υπολογίζονται σύμφωνα με τη διαδικασία που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.8.

#### Ασυμμετρία (Asymmetry)

Όταν οι τιμές μιας μεταβλητής δεν απέχουν ίσα από το σημείο της μέγιστης συχνότητας εμφάνισης και πάντα από τη μια πλευρά του σημείου μέγιστης συχνότητας υπάρχει μεγαλύτερος αριθμός συχνοτήτων σε σχέση προς την άλλη πλευρά του, τότε η καμπύλη χαρακτηρίζεται ως ασύμμετρη. Σε μια ασύμμετρη καμπύλη υπάρχουν πάντα προς τη μια πλευρά της μέγιστης συχνότητας εμφάνισης περισσότερες απομακρυσμένες τιμές από αυτή από ό,τι στην άλλη πλευρά του. Έτσι έχουμε τις ασύμμετρες καμπύλες με τη θετική και την αρνητική συμμετρία. Ο υπολογισμός της ασυμμετρίας γίνεται μέσω του τυπολογίου του Πίνακα 2.1 και οι ποσότητες για τον υπολογισμό της παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.8.

#### Κύρτωση (Kurtosis)

Η κύρτωση είναι η ποσοτική μέτρηση που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την απόκλιση από την κανονική κατανομή. Η κύρτωση εκφράζει την αναλογία μεταξύ της διασποράς των τιμών στα άκρα και της διασποράς των τιμών στην κεντρική περιοχή της κατανομής. Δηλαδή αναφέρεται στον βαθμό συγκέντρωσης των τιμών της μεταβλητής γύρω από το μέσον και τα άκρα της κατανομής.

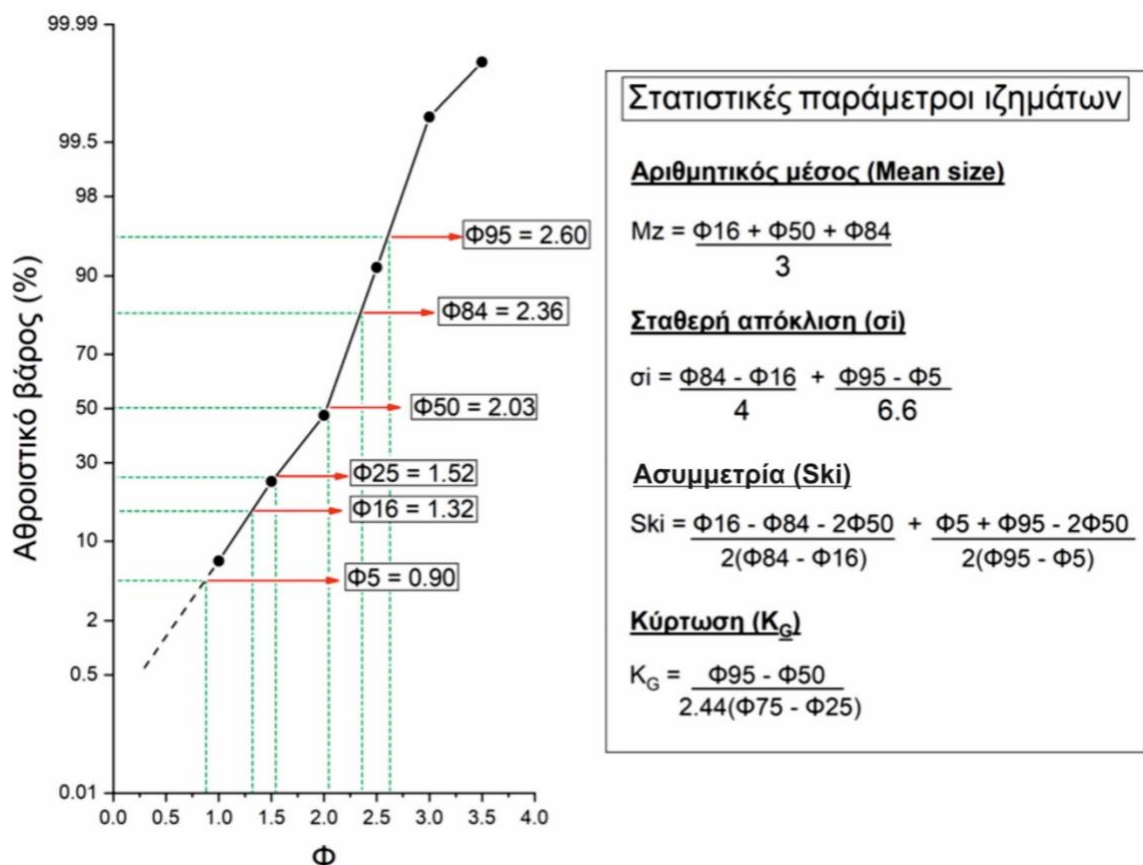
Οι μαθηματικοί τύποι από τους οποίους υπολογίζουμε στην ιζηματολογία τις στατιστικές παραμέτρους των ιζημάτων δίνονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 2.1).

**Πίνακας 2.1** Υπολογισμός στατιστικών παραμέτρων με τη γραφική μέθοδο κατά Folk and Ward (1957).

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΥΠΟΣ
Αριθμητικός Μέσος (Mean Size)	$Mz = \frac{\Phi 16 + \Phi 50 + \Phi 84}{3}$
Σταθερή Απόκλιση (σi)	$\sigma_i = \frac{\Phi 84 - \Phi 16}{4} + \frac{\Phi 95 - \Phi 5}{6.6}$
Ασυμμετρία (Ski)	$(Ski) = \frac{\Phi 16 - \Phi 84 - 2\Phi 50}{2(\Phi 84 - \Phi 16)} + \frac{\Phi 5 + \Phi 95 - 2\Phi 50}{2(\Phi 95 - \Phi 5)}$
Κύρτωση (Kg)	$K_G = \frac{\Phi 95 - \Phi 50}{2.44(\Phi 75 - \Phi 25)}$

Στην ιζηματολογία έχει επικρατήσει οι στατιστικές παράμετροι να υπολογίζονται με τη γραφική μέθοδο έναντι της αριθμητικής μεθόδου, μέσα από το διάγραμμα της αθροιστικής % καμπύλης της κατανομής των μεγεθών των κόκκων. Ο προσδιορισμός γίνεται μετά την ολοκλήρωση όλων των σταδίων της κοκκομετρικής ανάλυσης και την κατασκευή της αθροιστικής % κατανομής με τη χρήση εντύπου κατανομής πιθανοτήτων (probability). Σύμφωνα με τη γραφική μέθοδο οι ποσότητες των τυπολογίων των στατιστικών παραμέτρων του Πίνακα 2.1 (Φ<sub>5</sub>, Φ<sub>16</sub>, Φ<sub>50</sub> κ.λπ.) προσδιορίζονται μέσω της αθροιστικής κατανομής όπως συνοπτικά παρουσιάζεται στο παράδειγμα της Εικόνας 2.8.

Ανάλογα με την τιμή των στατιστικών παραμέτρων από την οποία ορίζεται το κάθε δείγμα, δίνεται και η περιγραφική ταξινόμηση, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.2.



Εικόνα 2.8 Παρουσίαση προσδιορισμού των στατιστικών παραμέτρων με τη γραφική μέθοδο.

Πίνακας 2.2 Στατιστικές παράμετροι ιζημάτων με τα όρια της κλίμακας Φ και τον χαρακτηρισμό τους.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΟΡΙΑ (Φ)	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ
Σταθερή Απόκλιση (σ <sub>i</sub> )	<0,35	πολύ καλά ταξιθετημένα
	0,35-0,50	καλά ταξιθετημένα
	0,50-0,71	μέτρια καλά ταξιθετημένα
	0,71-1,00	μέτρια ταξιθετημένα
	1,00-2,00	φτωχά ταξιθετημένα
	2,00-4,00	Πολύ φτωχά ταξιθετημένα
	>4,00	εξαιρετικά φτωχά ταξιθετημένα
Ασυμμετρία (Ski)	1,00-0,30	Πολύ θετική ασυμμετρία
	0,30-0,10	θετική ασυμμετρία
	0,10-(-0,10)	σχεδόν κανονική ασυμμετρία
	(-0,10)-(-0,30)	αρνητική ασυμμετρία
	(-0,30)-(-1,00)	πολύ αρνητική ασυμμετρία
Κύρτωση (K <sub>G</sub> )	<0,67	πολύ πλατύκυρτη
	0,67-0,90	πλατύκυρτη
	0,90-1,11	μεσόκυρτη
	1,11-1,50	λεπτόκυρτη
	1,50-3,00	Πολύ λεπτόκυρτη
>3,00	εξαιρετικά λεπτόκυρτη	



### 2.2.2.2 Σφαιρικότητα

Η *σφαιρικότητα* (sphericity) είναι η ιδιότητα εκείνη που μετρά τον βαθμό προσέγγισης ενός κλαστικού κομματιού στο σχήμα μιας σφαίρας και τον βαθμό με τον οποίο προσομοιάζει θεωρητικά μια σφαίρα. Μας δίνει πληροφορία κατά πόσο ίσες είναι οι τρεις διαστάσεις ενός κλαστικού κομματιού που είναι κάθετες μεταξύ τους ή πόσο ισοδιαμετρικό είναι το κλαστικό κομμάτι. Η σφαιρικότητα των κόκκων σχετίζεται με τον τρόπο μεταφοράς του και την απόσταση από την πηγή τροφοδοσίας. Η σφαιρικότητα προσδιορίζεται με τη μέτρηση των τριών διαστάσεων ενός κόκκου και προκύπτει από τις ακόλουθες εξισώσεις:

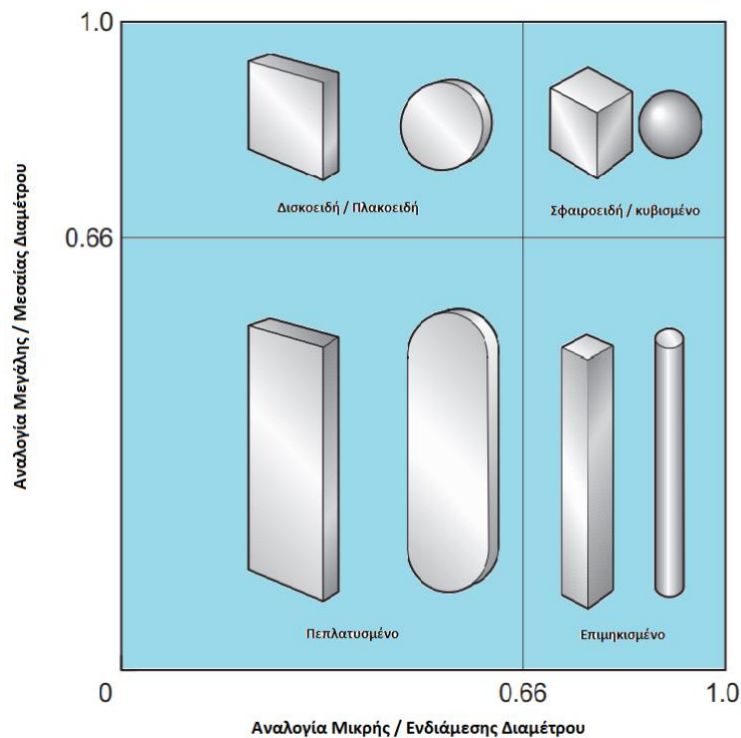
$$(α) \quad \text{σφαιρικότητα} = \frac{\sqrt[3]{LIS}}{L^2}$$

ή

$$(β) \quad \text{σφαιρικότητα} = \frac{\sqrt[3]{S^2}}{LI}$$

όπου L η μέγιστη διάμετρος, I η ενδιάμεση διάμετρος και S η μικρότερη διάμετρος.

Με βάση τις τιμές των τριών διαστάσεων των κροκαλών, μήκος, πλάτος και πάχος, έχουν προταθεί από τους ερευνητές πεδία διακρίσεών τους σε σφαιροειδείς, δισκοειδείς, πεπλατυσμένες και επιμήκεις (Εικόνα 2.9). Η μέτρηση των τριών διαστάσεων των κροκαλών γίνεται με παχύμετρο και οι μετρήσεις εκφράζονται σε mm ή cm (Εικόνα 2.10).



**Εικόνα 2.9** Προσδιορισμός του σχήματος των κόκκων με βάση τον λόγο των τριών διαμέτρων του.



**Εικόνα 2.10** Μέτρηση των τριών διαστάσεων των κροκαλών.













### 2.2.2.3 Στρογγυλότητα

Κατά τη μεταφορά των ιζημάτων τα μεμονωμένα θραύσματα και οι κόκκοι έρχονται επανειλημμένα σε επαφή μεταξύ τους και με το υπόστρωμα πάνω στο οποίο μεταφέρονται, έχοντας ως αποτέλεσμα οι αιχμηρές άκρες τους να τείνουν να θρυμματίζονται πρώτα και μέσω της τριβής να λειαίνεται η επιφάνεια του θραύσματος. Αυτό οδηγεί σε μια προοδευτική βαθμιαία *στρογγυλοποίηση* των γωνιών των κόκκων η οποία μετατρέπει τα γωνιώδη ακανόνιστα θραύσματα σε ολότελα καλύτερα στρογγυλοποιημένους κόκκους, προσδίδοντάς τους σχήμα το οποίο ιδεατά μπορεί να αποκτήσει κυκλική μορφή. Με τη *στρογγυλότητα* προσπαθούμε να περιγράψουμε τον βαθμό στον οποίο ένα φυσικό γεωλογικό θραύσμα προσομοιάζει ιδεατά το σχήμα ενός κύκλου.

Η στρογγυλότητα σε κροκάλες και ψηφίτες συνήθως εκτιμάται οπτικά στο πεδίο με τη χρήση πρότυπων διαγραμμάτων (Εικόνα 2.11) όπου γίνεται η εκτίμηση της στρογγυλότητας και της ενδιάμεσης σφαιρικότητας μέσω του δείκτη στρογγυλότητας του Wadell και σύμφωνα πάντα με τη σχέση:

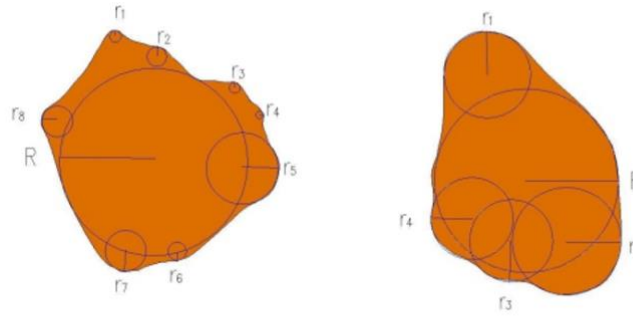
$$\text{roundness index} = \frac{r}{R}$$

Όπου:  $r$  η μικρότερη ακτίνα η οποία εσωκλείει το περίγραμμα του κόκκου και  
 $R$  η ακτίνα του κύκλου που περιβάλλει το περίγραμμα του κόκκου

Κατηγορίες Στρογγυλότητας Κροκάλων - Κόκκων	Πολύ Γωνιώδεις	Γωνιώδεις	Υπο Γωνιώδεις	Υπο Στρόγγυλες	Στρογγυλές	Πολύ Στρογγυλές
Υψηλή Σφαιρικότητα						
Χαμηλή σφαιρικότητα						
Δείκτης Στρογγυλότητας	0.12 to 0.17	0.17 to 0.25	0.25 to 0.35	0.35 to 0.49	0.49 to 0.70	0.70 to 1.00

**Εικόνα 2.11** Πρότυπο διάγραμμα εκτίμησης του δείκτη στρογγυλότητας και της σφαιρικότητας με οπτική παρατήρηση στην ύπαιθρο.

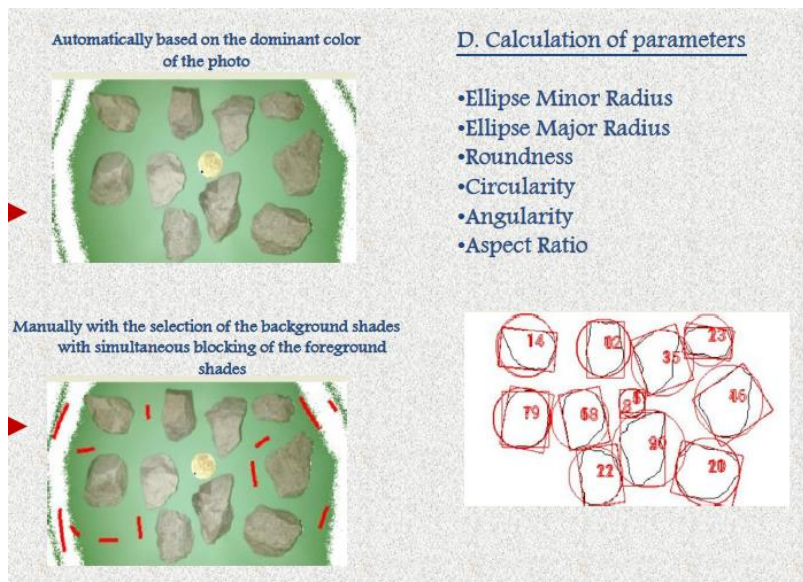
Με ακρίβεια η στρογγυλότητα των κροκάλων και των κόκκων των ιζημάτων και των ιζηματογενών πετρωμάτων γίνεται μέσω των εξισώσεων (Εικόνα 2.12) και τη χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων (Εικόνα 2.13).



$$\text{Roundness} = \frac{r_1 + r_2 + \dots + r_n}{R}$$

όπου:  $r_1 \dots r_n$  οι ακτίνες καμπυλότητας των αιχμών του κόκκου και  
 $R$  η ακτίνα του μέγιστου κύκλου ο οποίος περιβάλλεται από το περίγραμμα του κόκκου.

**Εικόνα 2.12** Εξισώσεις και μέθοδος υπολογισμού της στρογγυλότητας.



**Εικόνα 2.13** Φωτογραφική υπολογιστική εφαρμογή για τον προσδιορισμό της στρογγυλότητας και της σφαιρικότητας των κόκκων (Avramidis and Fountas, 2016).

Ο υπολογισμός της στρογγυλότητας και της σφαιρικότητας των κόκκων απαιτεί χρόνο και μεταφορά του συλλεχθέντος υλικού στο εργαστήριο κάτι το οποίο για κροκαλοπαγή και ψηφίδες καθιστά τις μετρήσεις πάρα πολύ δύσκολες. Για τον λόγο αυτό στο μεν πεδίο γίνεται συγκριτική οπτική παρατήρηση με τα πρότυπα σχήματα κόκκων (Εικόνα 2.12), ενώ στο εργαστήριο γίνεται επεξεργασία εικόνας με εφαρμογές που έχουν κατά καιρούς αναπτυχθεί (Εικόνα 2.13).

#### 2.2.2.4 Ανάγλυφο κλαστικών θραυσμάτων

Το επιφανειακό ανάγλυφο των κλαστικών θραυσμάτων αποτελεί έναν ιστολογικό χαρακτήρα πάνω στην επιφάνεια του κόκκου το οποίο είναι ανεξάρτητο του κοκκομετρικού μεγέθους, της σφαιρικότητας και της στρογγυλότητας. Τα κύρια χαρακτηριστικά που περιγράφουν το επιφανειακό ανάγλυφο των θραυσμάτων είναι:

- η στυλπνότητα,
- το θάμπωμα,
- οι γραμμώσεις.

Μερικές από τις δομές του επιφανειακού ανάγλυφου μπορεί να είναι ορατές με γυμνό μάτι, άλλες να διακρίνονται μόνο κάτω από το στερεοσκόπιο και αρκετές μόνο με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Αρκετοί από τους χαρακτήρες που εκφράζουν το επιφανειακό ανάγλυφο πιστεύεται ότι έχουν γενετική προέλευση. Οι γραμμώσεις πάνω σε λιθάκια (cobble) παγετώδους μεταφοράς αποτελούν συγχρόνως και στοιχεία που απεικονίζουν την προέλευσή τους. Το θάμπωμα που δείχνουν κόκκοι άμμου αποδίδεται στην αιολική δράση. Οι χαρακτήρες του επιφανειακού ανάγλυφου είναι ποικίλοι αλλά μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες ομάδες. Η μια ομάδα αφορά τη στιλπνότητα (γυαλάδα) και το θάμπωμα ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει τα διάφορα σημάδια πάνω στην επιφάνεια, όπως οι γραμμώσεις.

Οι αιτίες που παράγουν τη στιλπνότητα και τη γυαλάδα πιθανά να οφείλονται σε μηχανικά αίτια και να παράγεται από μια ασθενή τριβή ή φθορά από λεπτόκοκκα υλικά. Ως αποτέλεσμα μιας τέτοιας διαδικασίας νοείται η στιλπνότητα που αποκτούν χαλαζιακοί άμμοι μεταφερόμενοι από τον άνεμο (αμμόλοφοι και αμμοθίνες). Οι γραμμώσεις είναι χαραγές στενές, ευθύγραμμες ή σχεδόν ευθύγραμμες που χαράσσουν την επιφάνεια στην οποία εμφανίζονται. Οι γραμμώσεις είναι προϊόν κύρια της δράσης του παγετώνα και είναι ορατές με γυμνό μάτι πάνω στις κροκάλες και τα λιθάκια. Οι γραμμώσεις σχηματίζονται επίσης κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης ενός ιζηματογενούς πετρώματος κάτω από καθεστώς πίεσης. Το θάμπωμα των θραυσμάτων πιθανά να οφείλεται στο μικροανάγλυφο των κόκκων και στην τριβή, ενώ ενδέχεται να συσχετίζεται με χημικές διεργασίες.

### 2.2.2.5 Συνεκτικότητα

Τα ιζήματα και τα ιζηματογενή πετρώματα είναι πολυφασικά υλικά που αποτελούνται από στερεούς κόκκους, από τα κενά (πόρους) που δημιουργούνται μεταξύ των κόκκων και πιθανά να περιέχουν νερό ή/και αέρα. Ως *συνεκτικότητα* έχει οριστεί η αποτελεσματική χρήση του χώρου με αμοιβαία διάταξη των συστατικών, των κόκκων ενός κλαστικού υλικού. Η αποτελεσματική διάταξη στον χώρο διέπεται τόσο από τα χαρακτηριστικά των κόκκων (εύρος μεγέθους, ομοιομορφία κόκκων, σχήμα κ.λπ.) ενός κλαστικού ιζήματος όσο και από τον τρόπο μεταφοράς και απόθεσης. Ως εκ τούτου η συνεκτικότητα περιγράφει τη διάταξη των θραυσμάτων στον χώρο με τέτοιο τρόπο ώστε να καταλαμβάνουν τον μικρότερο δυνατό χώρο και εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

1. μέγεθος των κόκκων,
2. ομοιομορφία,
3. σχήμα και στρογγυλότητα και
4. τρόπο απόθεσης.

Ως μέτρο της συνεκτικότητας αποτελεί το κλάσμα του όγκου των κόκκων προς τον όγκο ή το εμβαδόν των κόκκων προς το εξεταζόμενο εμβαδόν, το οποίο μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί πειραματικά. Κατά αυτή την έννοια, με τον όρο *συνεκτικότητα* αναφερόμαστε στον τρόπο με τον οποίο οι κόκκοι των ιζηματογενών πετρωμάτων διατάσσονται κατά τρόπο με τον οποίο τα συστατικά στοιχεία ενός κλαστικού ιστού, οι κλάστες έρχονται σε σημειακή ή επαπτομενική επαφή ο ένας με τον άλλο. Η συνεκτικότητα εκφράζει τον βαθμό εγγύτητας και επαφών των κόκκων μεταξύ τους με αποτέλεσμα τη μείωση των κενών (πορώδους) και την παρεμβολή συνδετικού υλικού.

### 2.2.2.6 Ιστολογική Δομική ωριμότητα Ιζηματογενών Πετρωμάτων

Ένα κλαστικό ίζημα ή ιζηματογενές πέτρωμα μπορεί να περιγραφεί με όρους *ιστολογικής/δομικής ωριμότητας*. Η ιστολογική ωριμότητα αναφέρεται στον βαθμό στον οποίο το κλαστικό υλικό έχει αλλάξει σε σύγκριση με το μητρικό πέτρωμα από το οποίο προήλθε. Η ωριμότητα μπορεί να μετρηθεί με όρους υφής και μεγέθους των κόκκων. Ένα δομικά ώριμο ιζηματογενές πέτρωμα αντανακλά ένα υλικό το οποίο έχει προέλθει από ένα περιβάλλον όπου υπάρχει παρατεταμένη μεταφορά και τριβή των κόκκων από τη δράση για παράδειγμα του νερού.

Η υφή του ιζήματος ή του ιζηματογενούς πετρώματος χρησιμοποιείται για να συσχετιστεί με τις διαδικασίες της διάβρωσης, της μεταφοράς και απόθεσης ενός ιζήματος. Ο προσδιορισμός της *ιστολογικής ωριμότητας* ενός ιζήματος ή ιζηματογενούς πετρώματος αναπαρίσταται στο διάγραμμα της Εικόνας 2.14.



Εικόνα 2.14 Διαγραμματική παρουσίαση προσδιορισμού ωριμότητας ιζηματογενών πετρωμάτων.

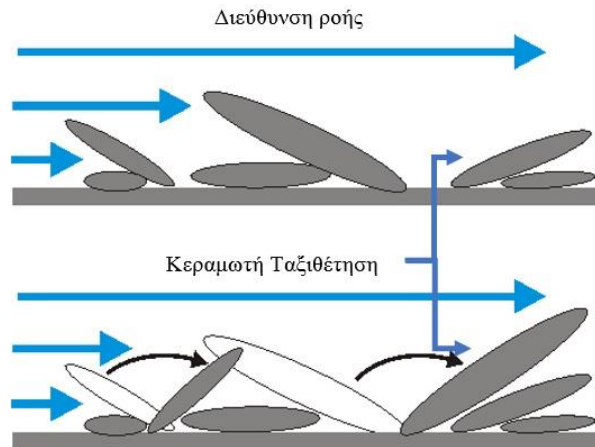
### 2.2.2.7 Προσανατολισμός και Μεταφορά των κόκκων

Ο προσανατολισμός των κόκκων ενός ιζηματογενούς πετρώματος μας δίνει πληροφορίες ως προς την παλαιορευματική διεύθυνση ροής αλλά και πληροφορίες ως προς τον τρόπο μεταφοράς και απόθεσης. Έχει διαπιστωθεί ότι οι κροκάλες εκείνες που μεταφέρονται, ενώ βρίσκονται συνεχώς σε επαφή με το υπόστρωμα που προκαλεί τριβές, τείνουν να ακινητοποιούνται με τους μεγάλους άξονες εγκάρσια προς τη διεύθυνση της ροής. Αντίθετα, οι κροκάλες εκείνες που βυθίζονται (κολυμπάνε) μέσα στο μέσο μεταφοράς, όπως σε έναν κινούμενο παγετώνα (glacial ice) ή όπως στην ιλυροροή (mud flow) κ.λπ., τείνουν να προσανατολίζουν τους μεγάλους άξονες παράλληλα προς τη διεύθυνση της ροής (της κίνησης) εξαιτίας της διατμητικής τάσης του κινούμενου μέσου. Γενικά οι επιμηκυμένοι κόκκοι άμμου τείνουν να αποκτούν έναν ιδιαίτερο προσανατολισμό (ο μεγάλος άξονας L) παράλληλα προς τη διεύθυνση της ροής.

Όταν οι δισκοειδείς κλάστες μετακινούνται σε ροή νερού έχουν επιλεκτικό προσανατολισμό και διατάσσονται στον χώρο με τη μορφή γνωστή ως κεραμωτή ταξιθέτηση (Εικόνα 2.15). Ο επιλεκτικός αυτός προσανατολισμός των κροκαλών προσφέρει τη μικρότερη αντίσταση στη ροή, και με αυτόν τον προσανατολισμό το νερό μπορεί να ρέει πιο εύκολα στην ανάντη πλευρά του κλάστη. Με βάση τον προσανατολισμό διακρίνουμε τρεις κύριους μηχανισμούς μεταφοράς των υλικών:

- Προσανατολισμός του μέγιστου άξονα κροκαλών εγκάρσια στη διεύθυνση ροής ως αποτέλεσμα της μεταφοράς των κροκαλών με κύλιση απουσία λεπτόκοκκου υλικού. Τη δομή αυτή τη συναντάμε στα ορθοκροκαλοπαγή όπου *απουσιάζει το συνδετικό υλικό* και οι κροκάλες έρχονται σε επαφή μεταξύ τους απευθείας ή μια με την άλλη χωρίς να μεσολαβεί συνδετικό υλικό. Είναι δηλαδή κοκκοστηριζόμενες (clast supported).
- Προσανατολισμός του μέγιστου άξονα παράλληλα με τη διεύθυνση ροής ως αποτέλεσμα του *υψηλού ιξώδους* της ροής και την παρουσία συνδετικού λεπτόκοκκου υλικού. Οι κροκάλες δεν έρχονται σε επαφή ή μια με την άλλη καθώς μεσολαβεί λεπτόκοκκο συνδετικό υλικό.
- Στην περίπτωση όπου οι κροκάλες δεν έχουν κανέναν προσανατολισμό και συμμετέχει σε υψηλό ποσοστό το συνδετικό υλικό τότε η απόθεση είναι το αποτέλεσμα μιας υψηλού ιξώδους πυκνότητας ροής όπου οι κροκάλες δεν έρχονται σε επαφή ή μια με την άλλη, δεν μεταφέρονται από το νερό, αλλά μεταφέρονται μέσω του πυκνού ρευστού, ενώ το προϊόν της απόθεσης είναι πολύ φτωχά ταξιθετημένο και κυριαρχεί το συνδετικό υλικό (πηλοστηριζόμενο ή matrix supported).



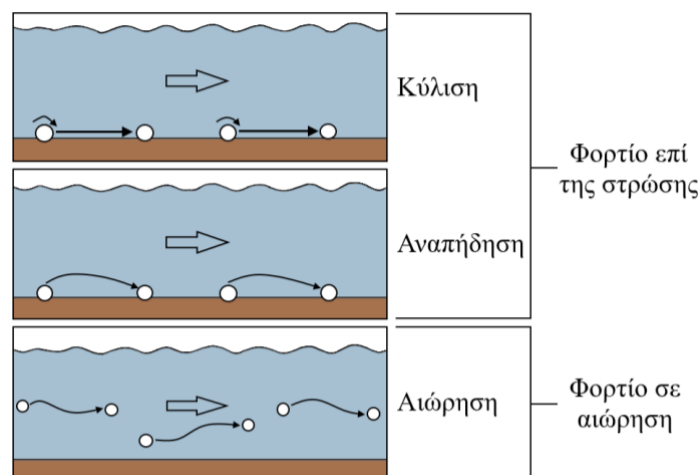


**Εικόνα 2.15** Επιλεκτικός προσανατολισμός κροκαλών σχηματίζοντας την κεραμωτή ταξιθέτηση (τροποποιήθηκε από J. Hutton, 2010, πηγή: <http://all-geo.org/highlyallochthonous/imbrication/>).

Ο τρόπος μεταφοράς των υλικών έχει άμεση σχέση με το μέγεθος των κόκκων αλλά και τα χαρακτηριστικά του ρευστού. Οι κόκκοι σε ένα ρευστό μεταφέρονται με τρεις κυρίως τρόπους:

- με σύρσιμο/κύλιση,
- με αναπήδηση,
- με αιώρηση.

Η μεταφορά με σύρσιμο και κύλιση πραγματοποιείται όταν η ταχύτητα της ροής είναι μικρή και τα μεγέθη των κόκκων μεγάλα. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν και μεταφέρονται οι κροκάλες. Όσο μεγαλώνει η κινητική ενέργεια πολλά από τα θραύσματα περνάνε σε ένα καθεστώς αναπήδησης. Όσο η ταχύτητα αυξάνεται και η ροή από γραμμική γίνεται τυρβώδης, κόκκοι με μεγαλύτερη μάζα αναπηδούν και αιωρούνται. Γενικότερα η αναπήδηση παρατηρείται στο αδρομερές κλάσμα, χαρακτηρίζει κυρίως τα υλικά μεγέθους όπως οι ψηφίδες και οι άμμοι ενώ η μεταφορά σε αιώρηση κυριαρχεί στο λεπτόκοκκο κλάσμα όπως η ιλύς. Ειδικότερα τα αργιλικά ορυκτά τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη ειδική επιφάνεια, αιωρούνται και μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις και καθιζάνουν σε πάρα πολύ μικρές ταχύτητες ροής (Εικόνα 2.16). Οι αδρομερείς κόκκοι οι οποίοι μεταφέρονται με κύλιση και αναπήδηση και βρίσκονται σε συνεχή επαφή με το υποκείμενο στρώμα (πυθμένα ή κοίτη κ.λπ.) κατά τη μεταφορά τους αποτελούν το μεταφερόμενο ιζηματογενές φορτίο επί της στρώσεως (bed load). Οι λεπτόκοκκοι κόκκοι οι οποίοι μεταφέρονται με συνεχή αιώρηση αποτελούν το μεταφερόμενο ιζηματογενές φορτίο εν αιωρήσει (suspended load) (Εικόνα 2.16).

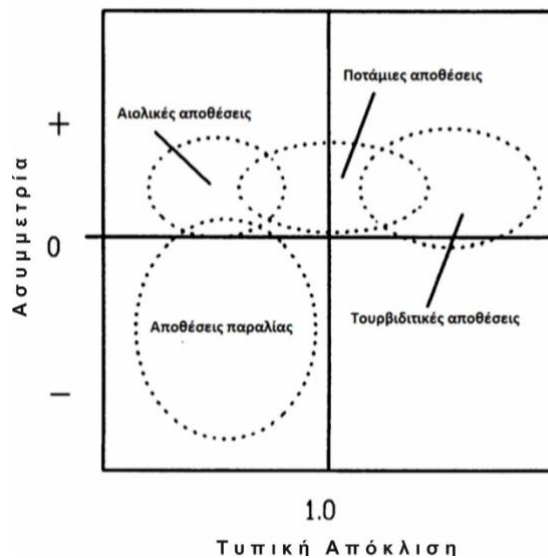


**Εικόνα 2.16** Γραφική απεικόνιση των τριών κύριων τρόπων μεταφοράς των κόκκων με βάση το μέγεθός τους.

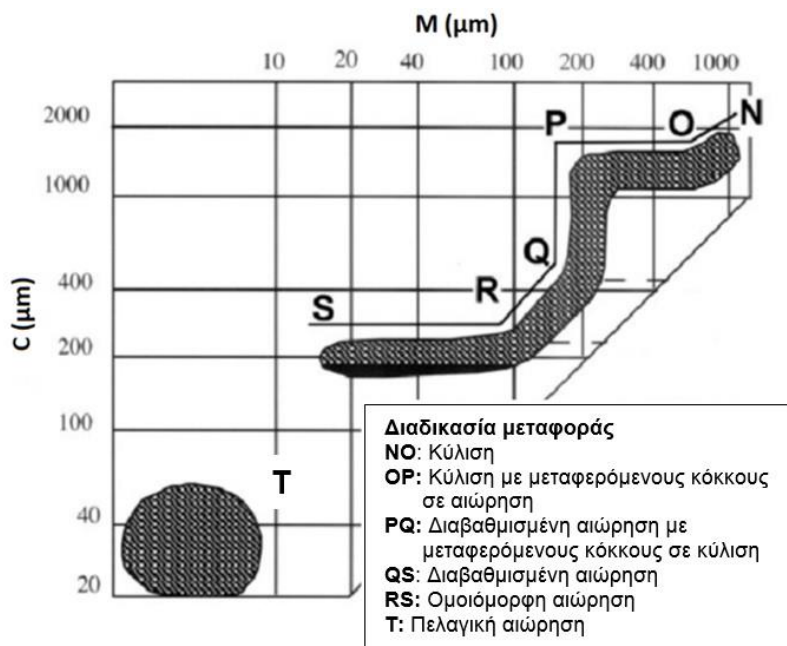
Αδρομερή υλικά όπως ψηφίδες και κροκάλες που μεταφέρονται από τα ποτάμια εμφανίζουν μια ελάττωση του κοκκομετρικού μεγέθους κατά τη διεύθυνση της ροής και απομακρυνόμενοι από την πηγή τροφοδοσίας.

Συγχρόνως, απομακρυνόμενοι από την πηγή τροφοδοσίας οι επιφάνειες των μεγαλύτερων θραυσμάτων στρογγυλώνονται και λειαινούνται αυξάνοντας βαθμιαία τη στρογγυλότητά τους και τη σφαιρικότητά τους, ενώ το παραγόμενο προϊόν έχει χαρακτηριστικά καλύτερης ταξιθέτησης/ομοιομορφίας. Οι κοκκομετρικές κατανομές των ιζημάτων αποτελούν ένα μείγμα δύο ή περισσότερων υποπληθυσμών κόκκων που σχετίζονται με διαφορετικούς τρόπους και διαδικασίες μεταφοράς του ιζήματος και με το υδροδυναμικό καθεστώς του μέσου.

Πολλοί είναι οι ερευνητές όπου μέσα από τις στατιστικές παραμέτρους των κοκκομετρικών κατανομών των ιζημάτων προσπάθησαν να ερμηνεύσουν τις διαδικασίες και τον τρόπο μεταφοράς αυτών (Εικόνα 2.17). Η πιο διαδεδομένη και ευρύτατα αποδεκτή μέθοδος είναι με τη χρήση του διαγράμματος CM κατά Passega (1957). Βάσει της μεθόδου αυτής προβάλλεται η διάμετρος των κόκκων που αντιστοιχεί στο 1% στην αθροιστική καμπύλη και αντιπροσωπεύει το C εκφρασμένο σε μm της διαμέτρου, με το διάμεσο M εκφρασμένο σε μm. Το διάγραμμα CM εκφράζει το μέσον απόθεσης ή τη διαδικασία απόθεσης καθώς διαχωρίζει μια τουρβιδιτική από μια γραμμική ροή ρευματικής δράσης και τις διαδικασίες μεταφοράς όπως κύλιση και αιώρηση των κόκκων (Εικόνα 2.18).



**Εικόνα 2.17** Διάκριση περιβάλλοντος απόθεσης άμμων από την προβολή της τυπικής απόκλισης και της ασυμμετρίας κατά Bjorlykke (1984).



**Εικόνα 2.18** Διάγραμμα CM κατά Passega και η διάκριση των διαδικασιών μεταφοράς (Passega, 1964).

## Βιβλιογραφία/Αναφορές

### Ξενόγλωσση

- Avramidis, P., & Foundas P. (2017). An android mobile application for the particle shape determination of coarse sediments in the field. *33rd International meeting of Sedimentology 2017 in Toulouse*.
- Bjørlykke, K. (1989). *Sedimentology and Petroleum Geology* (B. Wahl, Trans., 1984). Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong: Springer-Verlag.
- Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). *Brazos River bar: a study in the significance of grain-size parameters*. *Sed. Petrol.* 27, 3-26.
- Folk, R.L. (1974). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill, Austin, Texas.
- Krumbein, W.C., & Pettijohn, F.J. (1938). *Manual of Sedimentary Petrography*. Appleton-Century-Crofts, New York. Reprinted by Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Reprint Series 18, Tulsa.
- Krumbein, W.C., & Sloss, L.L. (1951). *Stratigraphy and Sedimentation*. Freeman, San Francisco, 497 pp.
- Nichols, G. (2001). *Sedimentology and Stratigraphy*. Blackwell Science, Oxford.
- Passega, R. (1964). Grain size representation by CM patterns as a geological tool. *Jour. Sediment. Petrol.*, 34, pp.830-847.
- Reading, H.G. (Ed.) (1996). *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy* (3rd edition). Blackwell Science, Oxford.
- Pettijohn, F.J. (1975). *Sedimentary Rocks*. 2nd Edition, Harper and Row Publishers, New York, 628 p.
- Udden, J.A. (1914). Mechanical composition of clastic sediments. *Geological Society of America Bulletin*, 25, 655–744.
- Wentworth, C.K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30, 377–394.

### Ελληνόγλωσση

- Κοντόπουλος, Ν. (1999). *Ιζηματολογία*. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Πανεπιστημίου Πατρών.



## Κεφάλαιο 3

### Ιζηματογενείς Δομές

#### Σύνοψη

Οι στόχοι αυτού του κεφαλαίου είναι η περιγραφή των διαφόρων τύπων ιζηματογενών δομών, η κατανόηση του τρόπου σχηματισμού τους και η χρήση τους στην αναγνώριση και ερμηνεία των ιζηματογενών περιβαλλόντων.

#### Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται γνώσεις φυσικής ιζηματολογίας (ιδιότητες ιζηματογενών κόκκων, τρόποι μεταφοράς ιζημάτων, πηγή προέλευσης των διαφόρων κόκκων, κατανόηση του τρόπου μεταφοράς και απόθεσής τους).

### 3.1 Εισαγωγή

Τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα ιζήματα δεν κατανέμονται τυχαία στον χώρο, αλλά παρουσιάζουν μια εσωτερική οργάνωση, ή αλλιώς δομή. Οι ιζηματογενείς δομές αποτελούν χαρακτηριστικά όλων των κατηγοριών ιζηματογενών πετρωμάτων.

Η πλειονότητα των δομών οφείλεται σε φυσικές διεργασίες, πριν, κατά τη διάρκεια και μετά από την ιζηματογένεση, ενώ μερικές προκύπτουν από οργανικές και χημικές διεργασίες.

Οι δομές των ιζημάτων, ανάλογα με τους μηχανισμούς και τους παράγοντες που τις διαμορφώνουν, διακρίνονται σε ανόργανες – όταν οφείλονται σε φυσικούς ή και χημικούς παράγοντες – και βιογενείς – όταν οφείλονται στη δράση του βιοκόσμου. Επιπλέον, ανάλογα με τον χρόνο ανάπτυξής τους σε σχέση με τον χρόνο απόθεσής τους, διακρίνονται σε πρωτογενείς και δευτερογενείς.

Οι ιζηματογενείς δομές, ιδίως αυτές που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της ιζηματογένεσης, παρέχουν πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για:

- ερμηνεία του περιβάλλοντος απόθεσης σε σχέση με τις διεργασίες που συντελέστηκαν, το βάθος του νερού, τη δύναμη του αέρα κ.λπ.,
- προσδιορισμό της διάταξης των στρωμάτων (ποιο στρώμα αποτέθηκε πάνω σε ποιο) σε μια ακολουθία πετρωμάτων που έχει υποστεί έντονη και πολυσύνθετη πτύχωση,
- εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη διεύθυνση των παλαιορευμάτων και την παλαιογεωγραφία.

Οι ιζηματογενείς δομές μπορούν να παρατηρηθούν σε κλίμακες που κυμαίνονται από λιγότερο από 1 mm (παρατήρηση λεπτών τομών) έως 100-1.000 μέτρα (μεγάλες επιφανειακές εμφανίσεις). Παραδοσιακά, έχει δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στην κλίμακα του στρώματος. Μια διάκρισή τους, λοιπόν, ανάλογα με την κλίμακα εμφάνισής τους, είναι:

- Μικροδομές (π.χ. ρυτιδώσεις),
- Μεσοδομές (π.χ. θίνες),
- Μακροδομές (π.χ. ράβδοι άμμου).

### 3.2 Ανόργανες Πρωτογενείς Ιζηματογενείς Δομές

Οι πρωτογενείς ιζηματογενείς δομές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες επειδή η αφθονία και το μέγεθός τους υποδηλώνουν τους πιθανούς παράγοντες μεταφοράς και απόθεσης. Οι δομές αυτές δημιουργούνται και διαμορφώνονται από φυσικούς παράγοντες όπως είναι οι διεργασίες μεταφοράς ιζήματος, οι επικρατούσες συνθήκες απόθεσης κ.λπ.

Μια πρώτη, συνοπτική ταξινόμηση των ανόργανων πρωτογενών ιζηματογενών δομών, ανάλογα με τη θέση που σχηματίζονται, είναι εσωτερικές, επιφανειακές και βάσης.

Επιπλέον, ανάλογα με τον χρόνο σχηματισμού, οι ανόργανες ιζηματογενείς δομές μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

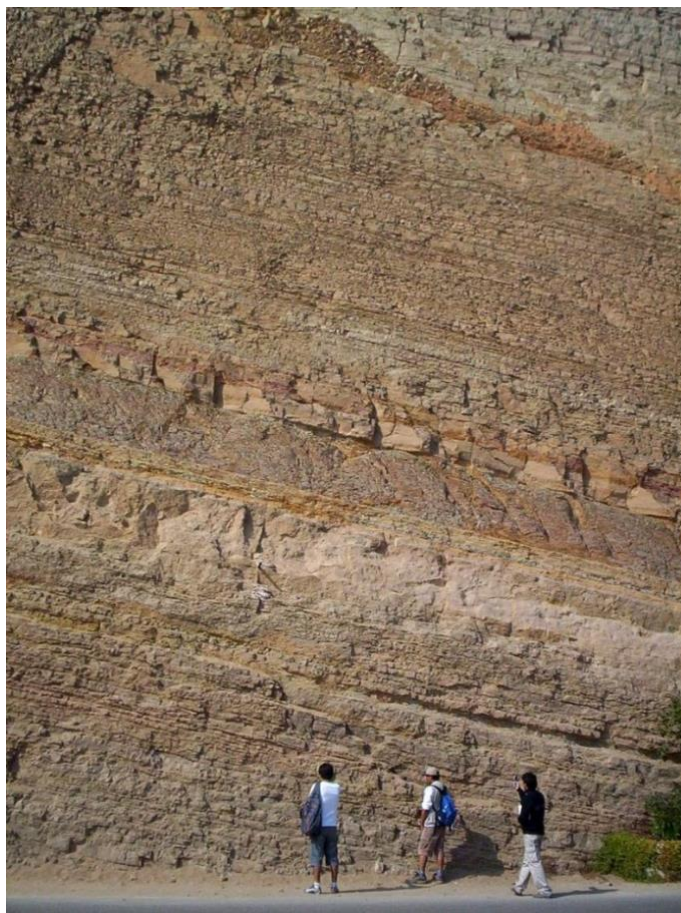
- *Δομές από διάβρωση* (διαβρωσιγενείς ή προαποθετικές): αυτές σχηματίζονται πριν από την απόθεση των υλικών και είναι αποκλειστικά αποτέλεσμα των διαδικασιών διάβρωσης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι δομές του πυθμένα ή βασικές δομές.
- *Δομές από απόθεση* (συναποθετικές): αυτές σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της απόθεσης και περιλαμβάνουν τις εσωτερικές δομές.
- *Δομές μετά την απόθεση* (μεταποθετικές): σχηματίζονται από παράγοντες που επιδρούν στο ίζημα μετά την απόθεσή του και περιλαμβάνουν τις επιφανειακές δομές.

### 3.2.1 Εσωτερικές ή συναποθετικές Δομές

Η διάταξη των υλικών σε στρώματα αποτελεί την πιο συνηθισμένη μορφή οργάνωσης στα ιζήματα. Ένα *στρώμα* είναι μια ιζηματολογική μονάδα που σχηματίζεται κάτω από ομοιόμορφες και σταθερές φυσικές συνθήκες (Εικόνα 3.1).

Σύμφωνα με το άρθρο 8 του κώδικα στρωματογραφικής ονοματολογίας, ένα *στρώμα* είναι η μικρότερη επίσημη μονάδα στην ιεραρχία των ιζηματογενών λιθοστρωματογραφικών μονάδων π.χ. ενιαίο στρώμα που λιθολογικά διακρίνεται από τους άλλους ορίζοντες που το περιβάλλουν. Συνήθως μόνο διακριτά στρώματα (στρώματα κλειδιά, στρώματα marker) που είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για στρωματογραφικούς σκοπούς, τους δίνονται ονόματα και θεωρούνται επίσημες λιθοστρωματογραφικές μονάδες. Τα στρώματα δομούνται από ιζήματα. Η λιθολογική σύσταση των στρωμάτων, η γεωμετρία τους, η αρχιτεκτονική τους, οι πλευρικές προεκτάσεις τους, η συσσώρευσή τους, η ιεραρχική διευθέτησή τους, αποτελούν στοιχεία για την ερμηνεία του περιβάλλοντος απόθεσής τους. Τα στρώματα μπορεί να είναι το αποτέλεσμα μιας αργής εξελισσόμενης διεργασίας διάρκειας μερικών χιλιάδων ή εκατομμυρίων ετών ή μιας σύντομης διαδικασίας διάρκειας λίγων ωρών ή ημερών.

Συνεπώς, το στρώμα ορίζεται σαν ένα τριδιάστατο σώμα πετρώματος που ιχνηλατείται πλευρικά, και το οποίο απαρτίζεται από μια ποικιλία γενετικά συνδεδεμένων, συχνά μέσω μιας παρόμοιας γεωλογικής πιθανώς και βιολογικής διεργασίας, υλικών, που η διάταξή τους οφείλεται στο επικρατούν υδροδυναμικό καθεστώς (McKee and Weir, 1953).



**Εικόνα 3.1** Γεωλογική στρωματοποίηση ιζηματογενούς σχηματισμού, ηλικίας περίπου 140 εκατομμυρίων ετών, της Morro Solar. Αίμα, Περού (πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24903214>).

Βασικό χαρακτηριστικό των στρωμάτων είναι η ύπαρξη *οριακών επιφανειών στρώσης* (bedding plane) – μιας ανώτερης και μιας κατώτερης - που τα περιβάλλουν και προσδιορίζουν το σχήμα τους. Οι οριακές επιφάνειες στρώσης οριοθετούν ένα στρώμα και χρησιμεύουν για τον προσδιορισμό της σειράς και σχετικής ή απόλυτης ηλικίας απόθεσης. Η δημιουργία τους οφείλεται στην αλλαγή στον τρόπο ιζηματογένεσης, στην αλλαγή στη σύσταση του ιζήματος, στην αλλαγή στο μέγεθος του κόκκου. Επιπλέον, ο χαρακτήρας τους συνήθως επηρεάζεται από μεταβολές που οφείλονται στη διάβρωση, διαγένεση/τσιμεντοποίηση, διάτρηση, και όλα τα χαρακτηριστικά τους συμβάλλουν στην ερμηνεία-απόδοση του περιβάλλοντος ιζηματογένεσης και του τρόπου σχηματισμού των στρωμάτων.

Οι οριακές επιφάνειες στρώσης μπορεί να είναι μεταβατικές ή απότομες. Όπου οι οριακές αυτές επιφάνειες είναι μεταβατικές, τότε ο προσδιορισμός των στρωμάτων είναι λιγότερο ακριβής. Η ανάπτυξη των οριακών επιφανειών ενός στρώματος αντανακλά τον μηχανισμό απόθεσης του στρώματος και την προσφορά και υφή του ιζήματος σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Ένα στρώμα θεωρείται *συμπαγές* όταν δεν υπάρχει δομή στο ιζήμα, η οποία μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες. Η έλλειψη δομής επικρατεί σε λεπτόκοκκα ιζήματα, αργίλους και μάργες που έχουν αποθεθεί σε ήρεμα, χαμηλής ενέργειας περιβάλλοντα. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως σε ασβεστόλιθους και δολομίτες, η έλλειψη δομής οφείλεται είτε σε οργανική δράση που καταστρέφει το αρχικό στρώμα είτε σε διαδικασίες ανακρυστάλλωσης.

Τα στρώματα θεωρούνται ότι, όταν έχουν πάχος μεταξύ 1-3 cm είναι πολύ μικρού πάχους, 3-10 cm μικρού πάχους, 10-30 cm μεσαίου πάχους, 30-100 cm μεγάλου πάχους και μεγαλύτερου από 100 cm, πολύ μεγάλου πάχους.

Ένα στρώμα μπορεί να αποτελείται από ομοιογενή ή ετερογενή υλικά. Τα υλικά αυτά μερικές φορές παρουσιάζουν μια διάταξη σε λεπτότερα επίπεδα ή ορίζοντες που είναι γνωστά ως στρώσεις. Η *στρώση* οφείλεται σε συνδυασμό πολλών παραγόντων, κυρίως της σύστασης των κόκκων και της υφής τους (κοκκομετρία, σχήμα, διάταξη). Η *στρώση* αποτελεί το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός ιζηματογενούς πετρώματος.

Μια στρώση είναι συνήθως >1εκατ. Όταν οι διακριτοί ορίζοντες έχουν πάχος μικρότερο από 1 εκατοστό ονομάζονται *λεπιδώσεις ή ελασματώσεις ή ελασματοειδείς στρώσεις* και αντιστοιχούν στα μικρότερα ορατά μέλη ενός στρώματος. Η στρώση έχει κάποια χαρακτηριστικά όπως είναι τα εξής:

- Ομοιομορφία στη σύσταση και στη διάταξη των κόκκων.
- Δεν διακρίνονται μικρότερες στρώσεις.
- Έχει περιορισμένη έκταση.
- Σχηματίζεται ταχύτερα από το στρώμα που την περικλείει.

Επιπλέον, η στρώση μπορεί να είναι:

- παράλληλη,
- διαβαθμισμένη,
- διασταυρούμενη ή σταυρωτή,
- ετερολιθική:
  - παρεμβαλλόμενη,
  - φακοειδής,
  - κυματοειδής.

Η *παράλληλη στρώση* συχνά αναφέρεται ως *επίπεδη ελασματοειδής ανάπτυξη* (planar lamination). Διακρίνεται από τις παραλλαγές στο χρώμα, στη σύσταση, στο μέγεθος κόκκου και στις επίπεδες επιφάνειες στρώσης, παράλληλες στις οριακές επιφάνειες του στρώματος.

Προκύπτει από:

- απόθεση από υψηλής ταχύτητας ροή (π.χ. ζώνη παφλασμού του ύδατος μιας παραλίας),
- απόθεση από μια στάσιμη υδάτινη μάζα με πολύ χαμηλή ταχύτητα π.χ. βάρβες, πελαγικοί ρυθμίτες.

Η *διαβαθμισμένη στρώση* (Εικόνα 3.2) χαρακτηρίζεται από τη βαθμιαία μείωση στο μέγεθος των κόκκων μέσα σε ένα στρώμα, από το κατώτερο προς το ανώτερο τμήμα του ή το αντίστροφο.

Υπάρχουν τρεις τύποι διαβαθμισμένης στρώσης:

- κανονική ταξινόμηση κόκκων (βαθμιαία ελάττωση ενέργειας),
- κανονική ταξινόμηση κόκκων με διεσπαρμένο λεπτόκοκκο υλικό σε όλη τη μάζα (π.χ. τουρβιδίτες),
- αντίστροφη ταξινόμηση κόκκων (βαθμιαία αύξηση ενέργειας).

Γενικά, η διαβαθμισμένη στρώση είναι συχνή στις αποθέσεις τουρβιδιτικών ρευμάτων οι οποίες σχηματίζονται όταν το ίζημα και το νερό αναμειγνύονται και ρέουν κατά μήκος του πυθμένα. Καθώς η ροή επιβραδύνει, αποτίθενται πρώτα οι αδρομερέστεροι κόκκοι και μετά οι λεπτομερέστεροι. Το φαινόμενο μπορεί να επαναληφθεί για τη δημιουργία διαδοχικών στρωμάτων αυτού του τύπου, με χονδρόκοκκο υλικό στον πυθμένα και λεπτόκοκκο υλικό στην κορυφή. Όταν βλέπουμε ένα μοτίβο διαβαθμισμένων στρωμάτων σε μια γεωλογική σειρά, αυτό σημαίνει ότι η γεωλογική σειρά βρίσκεται στην κανονική της θέση. Στην εξιδανικευμένη ακολουθία Bouma, πολλοί ερευνητές απέδωσαν την προέλευση της διαβαθμισμένης στρώσης, σε ρεύματα πυκνότητας (density currents).

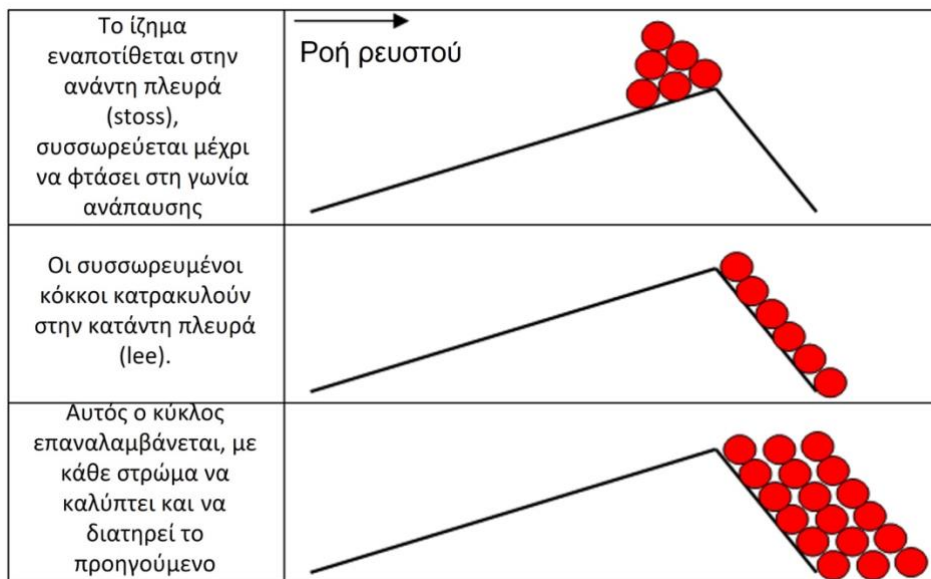


**Εικόνα 3.2** Διαβαθμισμένη στρώση από το Προκάμβριο του Tennessee, ΗΠΑ  
(πηγή: <https://flickr.com/photos/47445767@N05/40920536724>).

Η *διασταυρούμενη στρώση* είναι ένας γενικός όρος για την εσωτερική δομή στρώματος άμμου που παράγεται με την κίνηση του αέρα ή του νερού. Ένα διασταυρούμενο στρώμα είναι ένα στρώμα που αποτελείται εσωτερικά από λεπτές στρώσεις με γωνία στην επιφάνεια πάνω στην οποία έχουν συγκεντρωθεί. Οι στρώσεις κλίνουν προς την κατεύθυνση του επικρατούντος ρεύματος και υποδεικνύουν παλαιές διευθύνσεις ρευμάτων (παλαιορεύματα). Ένα διασταυρούμενο στρώμα διαδέχεται ένα άλλο με μια οριακή επιφάνεια διάβρωσης ή απόθεσης ή απότομης αλλαγής.

Η διασταυρούμενη στρώση δημιουργείται από την κατάντη μετανάστευση δομών όπως είναι οι συνιζηματογενείς ρυτιδώσεις ή οι θίνες (Boggs, 2006) σε ένα ρέον ρευστό. Η ροή του ρευστού αναγκάζει τους κόκκους άμμου σε αναπήδηση στην οπίσθια (ανοδική) πλευρά της δομής και τελικά σε συγκέντρωση στην κορυφή μέχρι να επιτευχθεί η «γωνία ανάπαυσης». Σε κάποιο κρίσιμο σημείο όπου η συσσώρευση των κόκκων υπερβαίνει τη δύναμη του κινούμενου νερού, αυτοί κατακυλούν στην υπήνεμη (κατάντη) πλευρά της θίνας. Οι επαναλαμβανόμενες μετακινήσεις θα σχηματίσουν τελικά την ιζηματογενή δομή γνωστή ως διασταυρούμενη στρώση, με τη δομή να κλίνει προς την κατεύθυνση του παλαιορεύματος (Εικόνα 3.3).





**Εικόνα 3.3** Τρόπος σχηματισμού διασταιρούμενης στρώσης.

Η διασταιρούμενη στρώση διατηρείται μόνο όταν το στρώμα που τη φιλοξενεί δεν διαβρώνεται εξολοκλήρου από το επόμενο στρώμα (Εικόνα 3.4).

Δύο βασικοί τύποι διασταιρούμενης στρώσης υπάρχουν:

- Η *πινακοειδής (tabular)* η οποία αποτελείται από επίπεδα στρώματα τα οποία έχουν γωνιώδη επαφή με τη βασική επιφάνεια και μια γωνία κλίσης  $30^\circ$  ή και περισσότερο και δημιουργείται από τη μετανάστευση διδιάστατων δομών.
- Η *σκαφοειδής (trough)* η οποία έχει σχήμα μεγάλης κουτάλας, με εφαπτόμενες βάσεις και γωνία κλίσης  $25-30^\circ$  και δημιουργείται από τη μετανάστευση τριδιάστατων δομών.



**Εικόνα 3.4** Διασταιρούμενη στρώση σε ψαμίτιη (Mt. Carmel road, Zion Canyon, Γιούτα των ΗΠΑ) (πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17954251>).



Παραδείγματα διασταυρούμενης στρώσης είναι και η *δομή ψαροκόκκαλου (herring bone)* (Εικόνα 3.5), η οποία είναι ένας τύπος ιζηματογενούς δομής που αποτελείται από διασταυρούμενες στρώσεις με αντίθετες διευθύνσεις οι οποίες δημιουργούνται από τη δράση παλιρροιακών ρευμάτων, και η *λοφοειδής (hummocky) διασταυρούμενη στρώση* (Εικόνα 3.6), η οποία αποτελεί μία από τις πιο αιγιματικές πρωτογενείς ιζηματογενείς δομές τις τελευταίες δεκαετίες. Η παρουσία της λοφοειδούς διασταυρούμενης στρώσης αποτελεί γενικά βασικό κριτήριο για την αναγνώριση αβαθών θαλάσσιων περιβαλλόντων με ιζηματογένεση υπό καθεστώς θύελλας. Ωστόσο, η αξιοπιστία της δομής ως αναμφισβήτητο κριτήριο για το περιβάλλον αυτό είναι πλέον αβέβαιη.



**Εικόνα 3.5** Διασταυρούμενη στρώση ψαροκόκκαλου (herringbone), Ηόκαινο, Delmar Formation, Torrey Pines State Park, California (πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=102509840>).



**Εικόνα 3.6** Λοφοειδής διασταυρούμενη στρώση (πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=19208572>).



Η *ετερολιθική στρωματοποίηση* χαρακτηρίζεται από εναλλαγές ελασματοειδών στρώσεων ή στρωμάτων άμμου και αργίλου. Διακρίνεται σε φακοειδή, κυματοειδή και παρεμβαλλόμενη.

Η *φακοειδής* στρώση (Εικόνα 3.7) δημιουργείται όταν στην κυματοειδή επιφάνεια ιζήματος που αποτελείται από αργιλικό υλικό, συγκεντρώνεται άμμος στα κοιλώματα. Στην *κυματοειδή* στρώση (Εικόνα 3.8) υπάρχει ίση ανάμειξη μικρών φακών άμμου και αργίλου, ενώ η *παρεμβαλλόμενη* στρώση (Εικόνα 3.9) δημιουργείται όταν σε μια κυματοειδή επιφάνεια ιζήματος που αποτελείται από άμμο, αργιλικά υλικά συγκεντρώνονται στα κοιλώματα ή πιο σπάνια στα κυρτώματα.

Η ετερολιθική στρώση δείχνει ότι άμμος και αργίλος είναι διαθέσιμα και ότι περίοδοι τουλάχιστον με μέτριας δραστηριότητας ρεύματα (απόθεση άμμου) εναλλάσσονται με περιόδους ηρεμίας (απόθεση αργίλου). Αυτές οι συνθήκες είναι χαρακτηριστικές των υποπαλιρροιακών και ενδοπαλιρροιακών περιοχών.



**Εικόνα 3.7** Φακοειδής (*lenticular*) στρώση (πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6523742>).



**Εικόνα 3.8** Κυματοειδής (*wavy*) στρώση (πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11230859>).



Εικόνα 3.9 Παρεμβλλόμενη (flaser) στρώση (πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=13624901>).

### 3.2.2 Επιφανειακές και μεταποθετικές Δομές

Πρόκειται για δομές που δημιουργούνται στην επιφάνεια του ιζηματογενούς στρώματος. Κατά τη διάρκεια του σχηματισμού τους, η «επιφάνεια του στρώματος» είναι ισοδύναμη με τον πυθμένα της θάλασσας ή τον πυθμένα μιας λίμνης ή ενός ποταμού, ανάλογα με το πού σχηματίζονται. Η δημιουργία αυτών των δομών απαιτεί ορισμένες προϋποθέσεις:

- Η άμμος πρέπει να είναι χαλαρή, χωρίς συνοχή (δηλαδή οι κόκκοι να μην κολλάνε μεταξύ τους).
- Η ροή στην επιφάνεια του ιζήματος πρέπει να υπερνικά τις δυνάμεις της βαρύτητας και της τριβής.
- Επιπλέον, πρέπει να υπάρχει μια κρίσιμη ταχύτητα ροής με την οποία θα ξεκινήσει η κίνηση των κόκκων. Αυτό εξαρτάται επίσης από τη μάζα των μεμονωμένων κόκκων, και σε κάποιο βαθμό, από το σχήμα τους.

Υπάρχει μια συγκεκριμένη ακολουθία δομών που δημιουργείται με την αύξηση του μεγέθους των κόκκων και την αύξηση της ταχύτητας της ροής. Η ακολουθία αυτή απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.10) της μέσης ταχύτητας ροής σε σχέση με το μέγεθος των κόκκων. Αυτή η διάκριση των δομών χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή ενός υδραυλικού μοντέλου που δημοσιεύτηκε για πρώτη φορά στην κλασική, πλέον, εργασία του 1965, από τους J.C. Harms & R.K. Fahnestock και χρησιμοποιείται ευρέως από τότε.

Το υδραυλικό μοντέλο καθεστώτος ροής λαμβάνει υπόψη του τρεις θεμελιωδώς διαφορετικές καταστάσεις ροής:

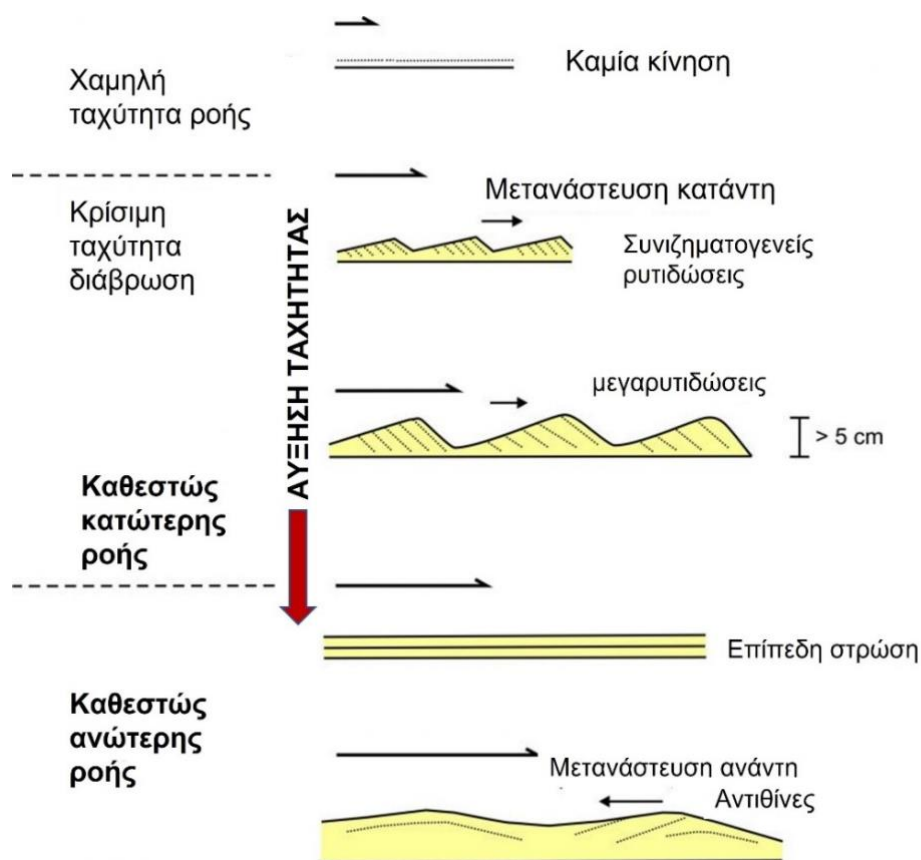
- Καμία κίνηση και ελάχιστη ενέργεια.
- Καθεστώς κατώτερης ροής στο οποίο αναπτύσσονται διάφορες δομές ξεκινώντας από το επίπεδο στρώμα (βασικά παράλληλο με επίπεδα ελάσματα χωρίς κυματισμούς). Το μέγεθος των δομών αυξάνεται από ρυτιδώσεις σε μεγάλες θίνες, σε συνάρτηση με την ταχύτητα ροής.
- Καθεστώς ανώτερης ροής όπου η ισχύς της ροής του ρεύματος ισοπεδώνει τις ρυτιδώσεις και τις θίνες, αντικαθιστώντας τις με επίπεδες στρώσεις, αντιθίνες και διαβρωτικές αύλακες και ράχες (chute and pool).

Οι ρυτίδες και οι θίνες σχηματίζονται στην κατώτερη κατάσταση ροής, όταν δηλαδή η τιμή του αριθμού Froude<sup>1</sup> είναι μικρότερη από τη μονάδα, ουσιαστικά μικρότερη από 0,8. Στην κατάσταση αυτή, οι τιμές της ταχύτητας ροής του ρευστού και η μεταφορά κόκκων είναι μικρές, η μετακίνηση γίνεται από την ομαλή προς την απότομη

<sup>1</sup> Ο αριθμός Froude είναι ένας αριθμός χωρίς διαστάσεις που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη συμπεριφορά ενός ρευστού που ρέει σε ένα ανοικτό κανάλι ή γύρω από ένα αντικείμενο μέσα σε ένα ρευστό. Ο αριθμός Froude ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας της ροής προς τις βαρυτικές δυνάμεις. Ο αριθμός Froude είναι σημαντικός επειδή συμβάλλει στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ρευστορευμάτων, όπως ο σχηματισμός κυμάτων ή η εμφάνιση τυρβώδους ροής. Για παράδειγμα, εάν ο αριθμός Froude είναι μικρότερος από 1, η ροή λέγεται ότι είναι υπο-κρίσιμη και ομαλή, ενώ ένας αριθμός Froude μεγαλύτερος από 1 υποδηλώνει μια υπερκρίσιμη ροή που είναι πιο πιθανό να σχηματίσει κύματα ή στροβιλισμούς.



πλευρά με κύλιση κατά το μεγαλύτερο μέρος και σχηματίζονται διασταυρούμενες στρώσεις. Μεγαλύτερη αύξηση της ταχύτητας ροής του ρευστού προκαλεί τον σχηματισμό επίπεδων στρωμάτων.



**Εικόνα 3.10** Σχηματική απεικόνιση των δομών που δημιουργούνται ανάλογα με το καθεστώς ροής που επικρατεί κατά την ιζηματογένεση (πηγή: <https://geologyistheway.com/sedimentary/bedforms-ripple-marks-and-dunes/>, τροποποιημένο από τους συγγραφείς).

Νέα αύξηση της ταχύτητας ροής προκαλεί κυματώσεις στα επίπεδα στρώματα. Οι κυματώσεις αυτές είναι γνωστές με τον όρο *στάσιμα κύματα*, γιατί ενώ οι κόκκοι μετακινούνται γρήγορα οι μορφές που δημιουργούνται παραμένουν στη θέση τους, χωρίς να αποκλείεται η μετακίνησή τους προς ή αντίθετα από τη διεύθυνση ροής των ρευμάτων. Τα στάσιμα κύματα έχουν ομαλή-ήρεμη μορφή, συμπίπτουν με την επιφάνεια του ρευστού, αλλά οι κόκκοι τώρα παίρνουν μια διάταξη σε οριζόντιες ή ελαφρά σταυρωτές στρώσεις με φορά αντίθετη προς τη φορά της ροής.

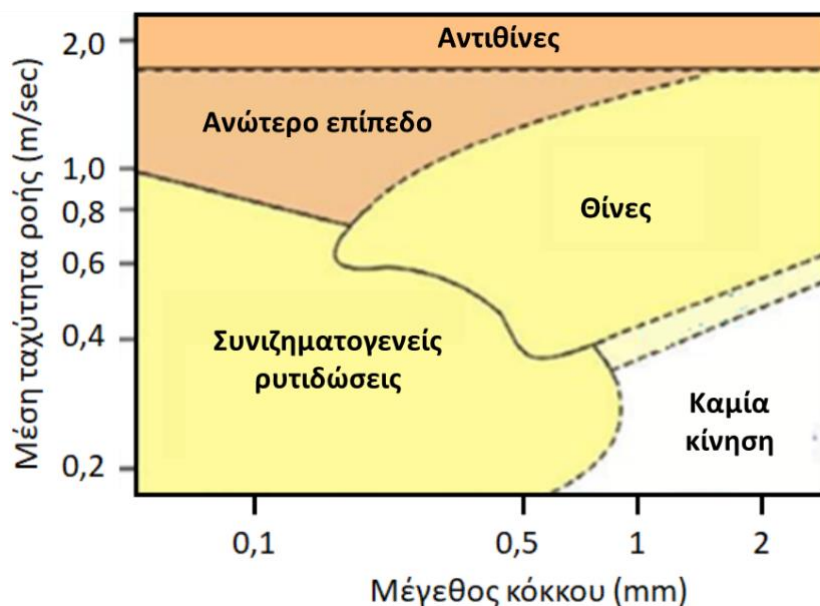
Ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της ταχύτητας του ρευστού προκαλεί τον σχηματισμό αντιθινών. Τα στάσιμα κύματα και οι αντιθίνες σχηματίζονται στην ανώτερη κατάσταση ροής, όταν οι τιμές του αριθμού  $F$  είναι μεγαλύτερες της μονάδας.

Εκτός από τις μεγάλες ταχύτητες ροής η κατάσταση αυτή χαρακτηρίζεται από έντονη μεταφορά μεγάλων υλικών (κροκάλες) με ταχύτητες περίπου  $\frac{1}{2}$  της ταχύτητας ροής ενώ δεν παρατηρείται ταξινόμηση μεγέθους, όπως συμβαίνει στην κατώτερη κατάσταση ροής.

Συγκεκριμένα, εργαστηριακά πειράματα έδειξαν ότι υπάρχει μια προβλέψιμη ακολουθία επιφανειακών δομών που εξαρτάται από την ταχύτητα, το μέγεθος κόκκου, το βάθος της ροής. Έτσι, λοιπόν, σε άμμο λεπτομερέστερη από 0,7 mm, η πρώτη χαρακτηριστική δομή που δημιουργείται είναι οι *συνιζηματογενείς ρυτιδώσεις*. Καθώς η ταχύτητα ροής αυξάνεται, οι ρυτιδώσεις μεγαλώνουν μέχρι να σχηματιστούν *θίνες*. Με την αύξηση της ταχύτητας ροής, οι θίνες καταστρέφονται, η τυρβώδης ροή μετατρέπεται σε φυλλοειδή και σχηματίζεται *επίπεδη στρώση*. Σε υψηλότερες ταχύτητες, οι επίπεδες στρώσεις αντικαθίστανται από *αντιθίνες* και τελικά σε δομές διαβρωτικές, *αύλακες* και *ράχες* (*chute* και *pools*).

Το παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.11) απεικονίζει δομές που προκαλούνται από ρεύματα και τις συνθήκες ροής. Έτσι, όταν η ταχύτητα ροής είναι μικρή μετακινούνται οι κόκκοι που έχουν μικρή διάμετρο και όσο αυξάνει η ταχύτητα, μετακινούνται οι κόκκοι που έχουν μεγαλύτερο μέγεθος. Στη φύση, όμως, αποδείχθηκε ότι οι κόκκοι της άμμου που έχουν διάμετρο 0,1-0,5 mm μετακινούνται από ρεύματα μικρότερης

ταχύτητας από ό,τι μετακινούνται οι κόκκοι της ιλύος και της αργίλου, που έχουν διάμετρο μικρότερη από 0,1 mm. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως *φαινόμενο Hjulstrom*<sup>2</sup>. Όταν η ταχύτητα ροής είναι μικρή, αλλά ικανή να αρχίσει τη μετακίνηση των κόκκων άμμου στον πυθμένα, τότε στην επαφή ρευστού/ιζήματος δημιουργούνται μικρές ρυτίδες.

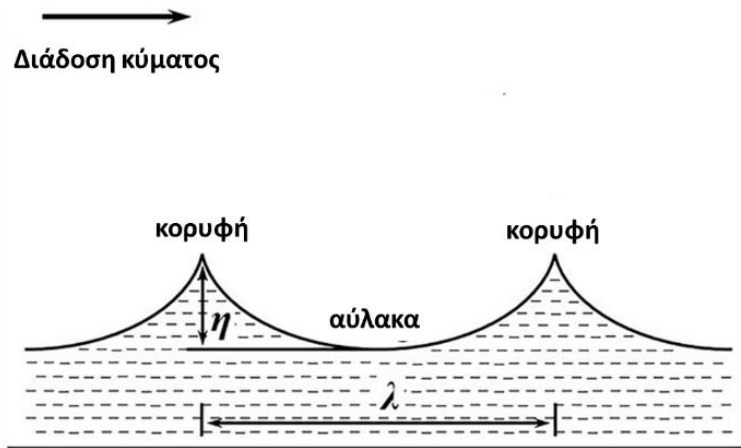


**Εικόνα 3.11** Διάγραμμα των πειραματικά προσδιορισμένων πεδίων σταθερότητας στρώσεων ως συνάρτηση του μεγέθους των κόκκων και της ταχύτητας ροής. Οι μεταβάσεις μεταξύ των πεδίων σταθερότητας υποδεικνύονται ως απότομες ή σταδιακές (προσωπικό αρχείο συγγραφέων τροποποιημένο από Southard and Boguchwal, 1990 και Ashley, 1990).

Οι *συνιζηματογενείς ρυτιδώσεις (ripples)* είναι κυματοειδείς μορφές της επιφανείας του ιζήματος, οι οποίες δημιουργούνται καθώς ο αέρας ή το νερό μετακινεί την άμμο. Μικρής κλίμακας εναλλασσόμενες ράχες και αλύακες γνωστές ως *συνιζηματογενείς ρυτιδώσεις* είναι συχνές στις επιφάνειες στρωμάτων, κυρίως των ψαμμιτών. Ανάλογα με το είδος της ροής που τις προκαλεί, υπάρχουν δύο είδη συνιζηματογενών ρυτιδώσεων. Οι *συνιζηματογενείς ρυτιδώσεις από ρεύματα* ή οι *ασύμμετρες ρυτιδώσεις* δημιουργούνται από την επίδραση ρευμάτων του αέρα ή του νερού μιας κατεύθυνσης και έχουν ασύμμετρο προφίλ επιτρέποντας τον καθορισμό της διεύθυνσης των παλιορευμάτων. Οι *συνιζηματογενείς ρυτιδώσεις από κύματα* ή οι *συμμετρικές ρυτιδώσεις* προκύπτουν από την παλίνδρομη κίνηση των κυμάτων.

Τα ψηλότερα σημεία των ρυτιδώσεων καλούνται *κορυφές (crests)* ενώ τα χαμηλότερα σημεία *αλύακες (troughs)*. Το *ύψος της ρυτιδώσης (η)* ορίζεται από την κάθετο απόσταση μεταξύ αλύακας και κορυφής. Το *μήκος κύματος της ρυτιδώσης (λ)* ορίζεται ως η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή αλύακων (Εικόνα 3.12).

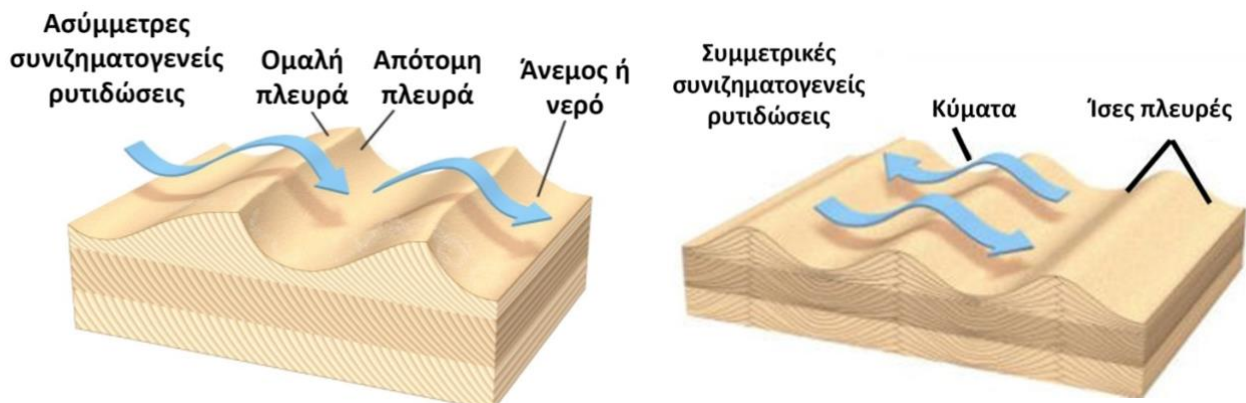
<sup>2</sup> Το φαινόμενο Hjulstrom, επίσης γνωστό ως καμπύλη Hjulstrom, είναι μια σχέση μεταξύ της ταχύτητας του νερού και του μεγέθους των σωματιδίων ιζήματος που μπορούν να μεταφερθούν από το νερό. Το φαινόμενο Hjulstrom είναι σημαντικό επειδή βοηθά στην εξήγηση των διαδικασιών διάβρωσης και ιζηματογένεσης σε ποταμούς και χείμαρρους. Το φαινόμενο περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο σωματίδια ιζήματος διαφορετικών μεγεθών μεταφέρονται από το ρέον νερό, με βάση την ταχύτητα του νερού. Η καμπύλη Hjulstrom δείχνει ότι τα μικρότερα σωματίδια ιζήματος απαιτούν μικρότερη ταχύτητα νερού για να μεταφερθούν, ενώ τα μεγαλύτερα σωματίδια απαιτούν υψηλότερες ταχύτητες. Όταν η ταχύτητα του νερού είναι πολύ χαμηλή, τα σωματίδια ιζήματος καθιζάνουν έξω από το νερό και αποτίθενται στην κοίτη του ποταμού. Όταν η ταχύτητα είναι πολύ υψηλή, ακόμη και τα μεγαλύτερα σωματίδια παρασύρονται από το νερό. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ένα βέλτιστο εύρος ταχυτήτων για τη μεταφορά σωματιδίων ιζήματος διαφορετικών μεγεθών. Η καμπύλη Hjulstrom δείχνει επίσης ότι η ταχύτητα που απαιτείται για την έναρξη της κίνησης των σωματιδίων ιζήματος είναι πολύ υψηλότερη από την ταχύτητα που απαιτείται για τη διατήρησή τους σε κίνηση όταν αυτά έχουν αρχίσει να κινούνται. Αυτό είναι γνωστό ως κρίσιμη ταχύτητα ή ταχύτητα κατωφλίου και αποτελεί σημαντική έννοια στη μηχανική και τη διαχείριση των ποταμών.



**Εικόνα 3.12** Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας των συνιζηματογενών ρυτιδώσεων. Το μήκος της ρυτιδώσης ( $\lambda$ ) μετριέται από κορυφή σε κορυφή. Το ύψος της ρυτιδώσης ( $\eta$ ) μετριέται από την κορυφή μέχρι την αύλακα.

Σε εγκάρσια τομή, η μορφή των ρυτιδώσεων -είτε είναι συμμετρικές ή ασύμμετρες- είναι τριγωνική και υποδεικνύει τη διεύθυνση του κυρίαρχου ρεύματος που τις διαμόρφωσε. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο προσανατολισμός των κορυφών των ρυτιδώσεων είναι κάθετος στην κατεύθυνση του ρεύματος που τις παρήγαγε. Σε κάτοψη, η μορφή των ρυτιδώσεων δίνει σημαντικές πληροφορίες για την ταχύτητα των ροών που τις διαμόρφωσαν.

Ειδικότερα, οι ασύμμετρες ρυτιδώσεις είναι στρώσεις που προσανατολίζονται προς τη φορά του ρεύματος το οποίο έχει μια και μοναδική διεύθυνση (π.χ. ποτάμια ρεύματα). Ο σχηματισμός τους εξαρτάται από την ταχύτητα του ρεύματος και το μέγεθος του κόκκου. Εμφανίζονται στα ποτάμια, στα δέλτα και στην αβαθή κρηπίδα. Σε τομή, παράλληλη προς τη διεύθυνση κίνησης του ρεύματος, μια ρυτιδωση συνίσταται από μια ασθενούς κλίσεως πλευρά, που εκτίθεται σε διάβρωση και κλίνει προς τα ανάντη του ποταμού (*stoss side*) και από μια απότομης κλίσεως πλευρά, που είναι θέση απόθεσης και κλίνει προς τα κατάντη της ροής (*lee side*). (Εικόνα 3.13)



**Εικόνα 3.13** Ασύμμετρες και συμμετρικές συνιζηματογενείς ρυτιδώσεις  
(πηγή: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/22/Sym\\_ripple.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/22/Sym_ripple.jpg) και <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12229540>).

Οι κόκκοι κινούνται με ομαλή κύλιση από την πίσω, ομαλή πλευρά των ρυτιδώσεων και όταν φτάσουν στην κορυφή, κατακυλούν στο μέτωπο της απότομης μπροστινής πλευράς. Η ταχύτητα ροής είναι λίγο μεγαλύτερη από 20 cm/sec. Οι ρυτιδώσεις δεν μένουν σταθερές αλλά μετακινούνται προς τη διεύθυνση ροής καθώς οι κόκκοι φεύγουν από την πίσω πλευρά και καταλήγουν στην μπροστινή πλευρά.

Γενικά, οι συνιζηματογενείς ρυτιδώσεις αποτελούν δομές που δημιουργούνται όταν επικρατούν χαμηλές ταχύτητες ρευμάτων. Το μήκος κύματος των ρυτιδών κυμαίνεται από 5 μέχρι 40 εκατ., το ύψος τους από 0,6 μέχρι 3 εκατ. και δεν σχηματίζονται σε κόκκους που δεν έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από 0,7 mm.

Το σχήμα των ρυτιδώσεων παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία ανάλογα με την ταχύτητα ροής των ρευμάτων. Με βάση την κάτοψή τους και έχοντας υπόψη το γεγονός ότι αυξάνει η πολυπλοκότητα όσο πιο ρηχό είναι το νερό και όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα, διακρίνονται σε ευθύγραμμες, μαιανδρικές, αλυσοειδείς,



γλωσσοειδείς, ημισεληνοειδείς. Υπάρχουν και οι κυματοειδείς ρυτιδώσεις οι οποίες αποτελούν ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ των χαμηλής ενέργειας ρυτιδώσεων και των υψηλής ενέργειας γλωσσοειδών ρυτιδώσεων.

Οι ρυτιδώσεις από κύματα ή αλλιώς οι συμμετρικές ρυτιδώσεις δημιουργούνται σε αβαθές νερό, θαλάσσιο, και διαμορφώνονται από την ταλάντωση του ύδατος, δηλαδή από την παλινδρομική κίνηση των κυμάτων. Η τροχιακή κίνηση του νερού είναι πιο επίπεδη κοντά στην επιφάνεια του ιζήματος, όπου σχηματίζονται καλά αναπτυγμένες συμμετρικές μορφές. Στα βαθιά νερά, η ταλάντωση «σβήνει» όσο αυξάνεται το βάθος, λόγω εσωτερικής τριβής. Στα ρηχά νερά, αντίθετα, η ταλάντωση γίνεται οριζόντια και στους κόκκους της άμμου δημιουργούνται ρυτιδώσεις.

Στην πραγματικότητα, είναι δύσκολο να βρεθούν ιδανικές συμμετρικές ρυτιδώσεις, λόγω επίδρασης δευτερευόντων ρευμάτων. Στην ακτή, παρατηρούνται ρυτιδώσεις διαφόρων προσανατολισμών, εξαιτίας των διαφορετικών και ποικίλων διευθύνσεων κύματος και ρεύματος. Μια ασυμμετρία μπορεί να παρατηρηθεί και στις ρυτιδώσεις από κύματα όταν οι δυνάμεις της ταλάντωσης του ύδατος δεν είναι ομοιόμορφες. Αυτό οδηγεί στη διακλάδωση των κορυφών.

Μια ιδιαίτερη μορφή συνιζηματογενών ρυτιδώσεων που παρατηρείται κυρίως στους ψαμμίτες είναι οι *κλιμακωτές ή αναρριχόμενες συνιζηματογενείς ρυτιδώσεις* (Εικόνα 3.14). Οι ρυτιδώσεις αυτές εμφανίζονται πάντα σε σύνολα και παράγονται από τον ενεργό ρυθμό ιζηματογένεσης, ο οποίος επιτρέπει την υπέρθεση των συνιζηματογενών ρυτιδώσεων, καταγράφοντας τόσο πλευρική μετανάστευση όσο και κατακόρυφη προσαύξηση του στρώματος που τις φιλοξενεί. Η γωνία αναρρίχησης είναι ανάλογη του ρυθμού ιζηματογένεσης. Οι διαφορετικές γωνίες αναρρίχησης αντιπροσωπεύουν διαφορετικούς λόγους μετανάστευσης και επαύξησης. Οι κλιμακωτές ρυτιδώσεις παρατηρούνται συχνότερα στις αποθέσεις ρεύματος ενός ποταμού και ρευμάτων θολερότητας, που σταδιακά επιβραδύνουν, συνήθως σε υπο-περιβάλλοντα.



**Εικόνα 3.14** Κλιμακωτές ή αναρριχόμενες συνιζηματογενείς ρυτιδώσεις  
(πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=19290013>).

Η γεωλογική καταγραφή των συνιζηματογενών ρυτιδώσεων είναι η *διασταυρούμενη ελασματοειδής στρώση*. Οι ρυτιδώσεις δίνουν μια ποιοτική εκτίμηση της ταχύτητας της υπεύθυνης ροής, αλλά δεν είναι ακόμα εφικτός ο συσχετισμός των ρυτιδώσεων με ποσοτικές παραμέτρους αφού οι μορφές αυτών εξαρτώνται από ποικίλους παράγοντες πέρα από την ταχύτητα της ροής, όπως:

- το μέγεθος του κόκκου του ιζήματος,
- την πυκνότητα και το ιξώδες του ρευστού,
- τη διάρκεια ροής,
- την παροχή ιζήματος.

Οι ρυτιδώσεις δίνουν επιπρόσθετες πληροφορίες για τον προσανατολισμό των στρωμάτων (οροφή και βάση). Μία από τις πιο σημαντικές χρησιμότητες των ρυτιδώσεων είναι ότι παρέχουν πληροφορίες για παλαιορεύματα. Στις ασύμμετρες ρυτιδώσεις, η κλίση του πρόσθιου συνόλου ελασμάτων είναι σχεδόν παράλληλη με τη ροή που ευθύνεται για τη δημιουργία τους, επομένως μπορούμε να πάρουμε αυτό το στοιχείο ως δείκτη της διεύθυνσης του παλαιορεύματος. Στις συμμετρικές ρυτιδώσεις, οι κορυφογραμμές των ρυτιδώσεων δίνουν πληροφορίες για τον άξονα της κίνησης των κυμάτων, αλλά όχι για τη φορά.

Όταν η ταχύτητα ροής του ρευστού γίνει περίπου 50 cm/sec αρχίζουν να σχηματίζονται κυματοειδείς μορφές μεγαλύτερες από τις ρυτιδώσεις, ακόμα και σε κόκκους με διάμετρο μεγαλύτερη από 0,7 mm. Οι μορφές αυτές είναι γνωστές με τον όρο *θίνες*.

Οι *θίνες* είναι μορφές ιζηματογενών στρωμάτων, γεωμετρικώς παρόμοιες με τις συνιζηματογενείς ρυτιδώσεις, αλλά σημαντικών διαστάσεων και διαφορετικών υδραυλικών συνθηκών. Δημιουργούνται υπό καθεστώς υψηλών ταχυτήτων και τυπικά κυμαίνονται από 10 εκατ. μέχρι δεκάδες μέτρα ύψος. Η δημιουργία των θινών συνδέεται άμεσα και με την ταυτόχρονη δημιουργία συνιζηματογενών ρυτιδώσεων στην υπήνεμη πλευρά τους. Οι θίνες σχετίζονται με τη διασταυρούμενη στρώση και δημιουργούνται σε μέγεθος κόκκου και ενεργειακές συνθήκες διαφορετικές από αυτές των ρυτιδώσεων.

Οι *αντιθίνες* είναι μια μορφή στρώσης που τη συναντάμε σε ποτάμια και σε άλλα εγκυβωτισμένα (καναλοειδή) περιβάλλοντα. Εμφανίζονται σε καθεστώς ανώτερης ροής, που σημαίνει ότι ο αριθμός Froude είναι μεγαλύτερος από 1,0 ή η ταχύτητα ροής υπερβαίνει την ταχύτητα κύματος. Οι κόκκοι μεταφέρονται κατά τη διεύθυνση ροής αλλά στην κορυφή των αντιθινών γυρνούν πίσω, από στροβίλους των κυμάτων των ρευστών που σπάζουν προς τα πίσω, και σχηματίζουν σταυρωτές στρώσεις με αντίθετη φορά. Στις αντιθίνες, το ίζημα εναποτίθεται στην ανάντη (*stoss*) πλευρά και διαβρώνεται από την κατάντη (*lee*) πλευρά, Ως αποτέλεσμα, οι αντιθίνες μεταναστεύουν σε ανοδική κατεύθυνση, σε αντίθεση με την τρέχουσα ροή.

Τα *mudcracks* ή *δομές ξήρανσης* ή *αργιλικές ρωγμές* είναι πολυγωνικές ρωγμές που δημιουργούνται στην επιφάνεια λεπτόκοκκων αργιλικών ιζημάτων (Εικόνα 3.15). Η απώλεια νερού από το αργιλικό ίζημα με την εξάτμιση, το αναγκάζει να συρρικνωθεί με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών, συνήθως εξαγωνικών. Αργιλικές ρωγμές μπορεί να δημιουργηθούν επίσης από τη δράση παγετού στην επιφάνεια του εδάφους σε περιβάλλοντα όπου επικρατεί ψυχρό κλίμα. Χαρακτηριστικό των ρωγμών αυτών είναι ότι εσωτερικά μέσα στο ίζημα έχουν σχήμα V και μπορεί να φτάσουν σε μεγάλο βάθος. Μεταγενέστερα, οι ρωγμές αυτές πληρώνονται από ίζημα. Τα αργιλικά πολύγωνα μεταξύ των ρωγμών μπορούν να χωριστούν αργότερα από τη μετακίνηση ύδατος, και να συμπεριφερθούν σαν *ενδοκλάστες* κυρίως σε ασβεστολιθικά ιζήματα.

Για να δημιουργηθούν οι αργιλικές ρωγμές, απαιτείται απώλεια του νερού που βρίσκεται μέσα στους πόρους της αργίλου, κατά μήκος λιμναίων παρόχθιων περιβαλλόντων, ή σε ποτάμιας πλημμυρικές πεδιάδες, ή όπου η άργιλος εκτίθεται σε περιβάλλοντα χαμηλής παλίρροιας.



Εικόνα 3.15 Αργιλικές ρωγμές σε παλίρροιακά πεδία  
(πηγή: <https://www.flickr.com/photos/37103729@N02/4896839180>).

Τα εντυπώματα βροχής (*rain drops*) αποτελούν επιφανειακή ιζηματογενή δομή που χαρακτηρίζεται από μικρούς λάκκους με κρατήρα, με ελαφρώς ανυψωμένες άκρες που είναι το αποτέλεσμα της επίδρασης των επιπτώσεων της σταγόνας βροχής σε μαλακές επιφάνειες ιζημάτων. Τα εντυπώματα βροχής είναι σπάνιες, αλλά εξαιρετικά διαγνωστικές ιζηματογενείς δομές. Αποδεικνύουν, με βεβαιότητα, ότι ένα συγκεκριμένο στρώμα εκτέθηκε σε χερσαίο περιβάλλον. Μπορεί να σχετίζονται με αργιλικές ρωγμές και χερσαία απολιθώματα (όπως απολιθωμένες φτέρες).

### 3.2.3 Δομές βάσης ή πυθμένα (*sole marks*) ή προαποθετικές δομές

Οι βάσεις των ψαμμιτικών στρωμάτων, σε ιζηματογενείς ακολουθίες βαθέων υδάτων, είναι συνήθως «διακοσμημένες» με δομές βάσης ή πυθμένα (Kuenen, 1957), ανόργανης προέλευσης, που δημιουργούνται από την πλήρωση διαβρωτικών μορφών που δημιουργούνται στο υποκείμενο λεπτόκοκκο υπόστρωμα. Οι δομές αυτές διατηρούνται στις κατώτερες - βασικές επιφάνειες των στρωμάτων. Πρόκειται για έναν ευρύ όρο που περιγράφει πολλές διαφορετικές ιζηματογενείς δομές που εμφανίζονται ως αποτυπώματα ή αυλακώσεις στο ίζημα, με πιο κοινές και αντιπροσωπευτικές τα *flute casts*, *tool marks*, *groove marks*, και *load casts*. Προκύπτουν γενικά από την πλήρωση διαφόρων μορφών κοιλωμάτων που γίνονται στην επιφάνεια μαλακής αργίλου από τη διαβρωτική δράση ενός ρεύματος, ή από τις επιδράσεις διαφόρων αντικειμένων που μεταφέρονται από το ρεύμα. Εάν άμμος αποτεθεί αργότερα πάνω από την αργίλο, τότε θα πληρώσει αυτά τα κοιλώματα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία και διατήρηση δομών στη βάση του ψαμμίτη. Μετά τη δημιουργία των δομών πυθμένα, αυτές ενταφιάζονται κάτω από ιζήματα και στη συνέχεια, μέσω τεκτονικών κινήσεων και διάβρωσης, αποκαλύπτονται.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες δομών πυθμένα: *δομές τριβής* (*scour marks*) όπως είναι τα εκμαγεία αυλού (*flute casts*) που σχηματίζονται από τυρβώδεις ροές, και *δομές εργαλείων* (*tool marks*) που σχηματίζονται από αντικείμενα (εργαλεία), εντός της ροής (Dzulfynski & Sanders, 1962a; Collinson et al., 2006), οι οποίες διακρίνονται περαιτέρω σε συνεχείς δομές (για παράδειγμα, αυλακώσεις - *grooves* και δομές *chevron*) και ασυνεχείς δομές (για παράδειγμα, *prod*, *bounce*, *skip and roll marks*) (Dzulfynski & Sanders, 1962a).

Ειδικότερα, τα εκμαγεία αυλού (*flute casts*) και οι *δομές εργαλείων* χρησιμοποιούνται ευρέως ως δείκτες παλαιορευμάτων (Hall, 1843), αλλά, αντίθετα με τις περισσότερες ιζηματογενείς δομές, δεν χρησιμοποιούνται στην αναπαράσταση των παλαιοϋδραυλικών συνθηκών ή στην πρόβλεψη της χωρικής κατανομής των ιζημάτων. Επιπλέον, οι δομές αυτές συνδέονται με τα τουρβιδιτικά ρεύματα, και με την τυπική ακολουθία Bouma.

Λεπτομερείς μελέτες πεδίου, στη δεκαετία του 1960 και στις αρχές της δεκαετίας του 1970, έδειξαν ότι τα εκμαγεία αυλού (*flute casts*) συνδέονται συνήθως με μεγάλου πάχους, εγγύτερα στρώματα, ενώ τα *tool marks* γενικά επικρατούν σε λεπτότερα, πιο απομακρυσμένα στρώματα. Επιπλέον, τα εκμαγεία αυλού (*flute casts*) και οι δομές εργαλείων (*tool marks*) σπάνια παρατηρούνται στις ίδιες επιφάνειες, ενώ τα *flute casts* φαίνεται να αλλάζουν κατάντη από μεγαλύτερες, φαρδύτερες παραβολικές μορφές σε μικρότερες, στενότερες ατρακτοειδείς μορφές. Πάντως και οι δύο δομές αποτελούν προϊόντα ενός ευρέος φάσματος ροών βαρύτητας ιζημάτων, από τυρβώδεις ροές, μέσω μεταβατικών ροών πλούσιων σε άργιλο, έως ροές κορημάτων (*debris flows*). Αντίθετα τα *groove marks* φαίνεται ότι σχηματίζονται από ροές κορημάτων, κατολισθήσεις και ολισθήσεις, και όχι από τουρβιδιτικά ρεύματα.

Τα εκμαγεία αυλού (*flute casts*) είναι κοινές δομές που δημιουργούνται από τουρβιδιτικά ρεύματα. Η κίνηση του ιζήματος μοιάζει με χιονοστιβάδα, κάτω από το νερό, η οποία υποσκάπτει τον πυθμένα, δημιουργώντας επιμήκη εντυπώματα. Πρόκειται για λοβοειδείς μορφές οι οποίες αποτελούνται από ένα στρογγυλεμένο, διογκωμένο άκρο το οποίο εξομαλύνεται κατά τη φορά του ρεύματος (Εικόνες 3.16 και 3.17).





**Εικόνα 3.16** Μεγάλα εκμαγεία αυλού (από Brian Romans με άδεια χρήσης CC BY-NC 2.0 <https://www.flickr.com/photos/bromans/5548975408/>).



**Εικόνα 3.17** Εκμαγεία αυλού στη βάση ψαμμιτικού στρώματος από τον σχηματισμό Inverness (Πενσυλβανία), δυτικό ακρωτήριο Breton, Νέα Σκωτία. Τα εκμαγεία αυλού είναι βολβώδη στην ανάντη πλευρά και κωνικά στην κατόντη πλευρά. Στην εικόνα καταγράφεται διεύθυνση παλαιορεύματος από δεξιά προς τα αριστερά (Rygel, M.C. 2006, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11029673> )

Οι *δομές εργαλείων* (tool marks) δημιουργούνται όταν ένα αντικείμενο, όπως ένα ραβδί, σύρεται κατά μήκος του ιζήματος από ένα ρεύμα και αφήνει πίσω του ίχνη που μοιάζουν με γρατσουνιές πάνω στο μαλακό ίζημα. Οι επιμήκειες γρατσουνιές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένδειξη του παλαιορεύματος.

Οι *αυλακώσεις* (groove casts) είναι ανυψωμένες παράλληλες ράχες οι οποίες απέχουν πολύ μεταξύ τους, συχνά εμφανίζονται σε σετ των 2 και 3 (Εικόνες 3.18 και 3.19), αλλά δεν εμφανίζονται η μια πάνω στην άλλη όπως συμβαίνει στα εκμαγεία αυλού (flute casts).

Η ερμηνεία της φοράς του παλαιορεύματος από αυτές τις δομές είναι αρκετά δύσκολη εξαιτίας της συμμετρίας που παρουσιάζουν και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κι άλλα αποδεικτικά στοιχεία.





**Εικόνα 3.18** Αυλακώσεις. Το κίτρινο βέλος υποδεικνύει την κατεύθυνση μετακίνησης. Αυτό το βέλος έχει διπλό άκρο, καθώς δεν υπάρχει ένδειξη εάν το νερό κυλούσε πάνω ή κάτω στον ποταμό (πηγή: Brian Ricketts, <https://www.geological-digressions.com/wp-content/uploads/2019/02/paleocurrent-grooves.jpg>).



**Εικόνα 3.19** Αυλακώσεις σε διάφορους προσανατολισμούς στη βάση ενός ψαμμιτικού τουρβιδίτη, Laga Basin, Ιταλία (Από Mikenorton, 2006, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4066216>).

Οι δομές *chevron* (Dunbar & Rodgers, 1957) αποτελούνται από μια σειρά ανοιχτών και συνεχών ραβδώσεων σε σχήμα V ή σχήματος U που είναι ευθυγραμμισμένες σε μια δεδομένη κατεύθυνση (Εικόνα 3.20). Έχει αποδειχθεί ότι αυτές οι δομές κλίνουν προς την κατάντη κατεύθυνση (Craig & Walton, 1962).





Εικόνα 3.20 Δομές Chevron (North Cornwall, UK) (πηγή: CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2999287>).

### 3.2.3.1 Δομές παραμόρφωσης μαλακών ιζημάτων

Οι δομές παραμόρφωσης μαλακών ιζημάτων αποτελούν το πιο κοινό φαινόμενο που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια ή λίγο μετά την απόθεση του ιζήματος. Για να συμβεί αυτή η παραμόρφωση, τα ιζήματα θα πρέπει να είναι σε ρευστή ή μη-λιθοποιημένη μορφή. Τα πιο συνηθισμένα περιβάλλοντα που ευνοούν τη δημιουργία παραμορφώσεων στα μαλακά ιζήματα είναι λεκάνες βαθέων υδάτων όπου επικρατούν τουρβιδιτικά ρεύματα, ποτάμια, δέλτα και ρηχές θαλάσσιες περιοχές, όπου επικρατούν συνθήκες θύελλας. Εξαιτίας του υψηλού ρυθμού ιζηματογένεσης που χαρακτηρίζουν αυτά τα περιβάλλοντα, τα ιζήματα δεν προλαβαίνουν να λιθοποιηθούν και βρίσκονται σε χαλαρή μορφή. Κύριο χαρακτηριστικό των δομών παραμόρφωσης σε μαλακό ιζημα είναι ότι αυτές περιορίζονται από μη παραμορφωμένα στρώματα του ίδιου σχηματισμού.

Οι δομές παραμόρφωσης μαλακών ιζημάτων οφείλονται, κατά κύριο λόγο, στη διαφορετική πυκνότητα που υφίσταται μεταξύ γειτονικών πετρωμάτων, καθώς και στις διαφορετικές φυσικομηχανικές τους ιδιότητες και, κύρια, στην πλαστικότητα που δείχνουν.

Οι *δομές διαπειρισμού* είναι δομές που δημιουργούνται από ανοδικές κινήσεις των στρωμάτων, ιδιαίτερα των υποκείμενων λεπτόρρευστων προς τα υπερκείμενα παχύρρευστα. Η κίνηση αυτή δημιουργεί σωληνοειδείς ή σφηνοειδείς διεισδύσεις υλικού (αργίλου μέσα σε άμμο, εβαποριτών μέσα σε κλαστικό υλικό κ.λπ.) που οι διαστάσεις τους ποικίλλουν από λίγα εκατοστά μέχρι εκατοντάδες μέτρα. Το φαινόμενο παρατηρείται κοντά στα στρώματα της επιφάνειας και όχι σε βάθος και σχηματίζει *αργιλικές μπάλες (clay lumps)* ή *αργιλικές φλόγες (clay flames)*.

Μία από τις πιο χαρακτηριστικές ιζηματογενείς δομές αυτής της κατηγορίας είναι οι *φλογοδομές (flame structures)*. Πρόκειται για ιζηματογενείς δομές που παρατηρούνται συχνά στην επαφή μεταξύ δύο στρωμάτων και είναι χρήσιμες καθώς, μεταξύ άλλων, δείχνουν την κατεύθυνση του ρεύματος και την παραμόρφωση των ιζημάτων μετά την απόθεση. Η φλογοδομή είναι ένας τύπος παραμόρφωσης μαλακών ιζημάτων που δεν έχουν ακόμη μετατραπεί σε πέτρωμα. Το βάρος ενός υπερκείμενου σχηματισμού, με τη μορφή στρώματος, προκαλεί την ώθηση του υποκείμενου σχηματισμού, προς τα πάνω, μέσω του υπερκείμενου σχηματισμού, γενικά όταν και τα δύο στρώματα είναι κορεσμένα με νερό. Η προκύπτουσα μορφή (σε διατομή) μπορεί να μοιάζει με φλόγες (Εικόνα 3.21). Για να εμφανιστεί εικόνα φλόγας, το υπερκείμενο στρώμα πρέπει να έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το υποκείμενο στρώμα ή πρέπει να υπάρχουν διαφορικές πιέσεις στο ανώτερο στρώμα. Ουσιαστικά, για να μπορέσουν να εμφανιστούν φλογοδομές, τα στρώματα πρέπει να είναι ασταθή, υπό πίεση, και στη συνέχεια να υποβληθούν σε πρόσθετες τάσεις, που φαίνεται να προκαλούνται από σεισμούς. Μεγάλες πλημμύρες (εκατοντάδων έως χιλιάδων τετραγωνικών χιλιομέτρων) μπορούν να προκληθούν από σεισμούς, με



μεγέθη μεγαλύτερα από 6R, αλλά τέτοιες ιζηματογενείς δομές μπορούν επίσης να προκληθούν από επαναλαμβανόμενη ισχυρή κυματική δράση.



**Εικόνα 3.21** Φλογοδομές (πηγή: <https://www.flickr.com/photos/zeesstof/14568549476/in/photostream/>)

Οι δομές βύθισης ή φορτίου είναι δομές που δημιουργούνται από τη διαφορετική τοπική υπερφόρτωση στρωμάτων με υδροπλαστικότητα (αργιλικών) και στη συνέχεια την, κατά θέσεις, βύθιση του υπερκείμενου – βαρύτερου υλικού μέσα στο υποκείμενο ελαφρύτερο και πιο μαλακό υλικό (Εικόνα 3.22). Παρουσιάζονται σε περιπτώσεις όπου ψαμμιτικό υλικό μεταφέρεται γρήγορα πάνω σε ήρεμο αργιλικό υλικό (εκβολές ποταμών). Αν η βύθιση της άμμου μέσα στο αργιλικό υλικό είναι μικρή, τότε σχηματίζονται μικρά ελλειψοειδή ή σφαιροειδή εκμαγεία φορτίου (*load casts*).



**Εικόνα 3.22** Δομές φορτίου (πηγή: <https://www.flickr.com/photos/16964471@N00/2366664515>).

Οι συνεζηματογενείς πτυχώσεις (*slumps*) γενικά απαντώνται σε αμμώδεις ιλυόλιθους και αργιλόλιθους, αλλά και σε ασβεστόλιθους, ψαμμίτες και εβαπορίτες. Το πάχος αυτών των δομών κυμαίνεται μεταξύ 90 cm και 130 cm. Το σχήμα τους είναι ίδιο με αυτό των πτυχώσεων. Οι άξονες αυτών των πτυχών είναι οριζόντιοι ή σχεδόν οριζόντιοι (κεκλιμένοι). Είναι αποτέλεσμα της μετατόπισης και μετακίνησης μη στερεοποιημένων ιζημάτων σε



περιοχές με απότομες κλίσεις και γρήγορους ρυθμούς ιζηματογένεσης. Οι συνιζηματογενείς πτυχώσεις σχετίζονται με την τεκτονική δραστηριότητα.

Οι δομές παραμόρφωσης μαλακών ιζημάτων που σχετίζονται με σεισμικά επαγόμενη ρευστοποίηση ονομάζονται *σεισμίτες*. Οι σεισμίτες είναι ένας τύπος παραμόρφωσης μαλακών ιζημάτων που είναι αποδεδειγμένα αποτέλεσμα σεισμικών δονήσεων. Η μελέτη των σεισμιτών αποκαλύπτει τη σεισμική ιστορία μιας περιοχής (Εικόνα 3.23).



Εικόνα 3.23 Σεισμίτες του Ανωτέρου Ορδοβισίου (Β. Κεντάκν) (πηγή: <https://flic.kr/p/2cbAMAaw>).

### 3.2.4 Βιογενείς Ιζηματογενείς Δομές

Μια μεγάλη ποικιλία δομών στα ιζηματογενή πετρώματα μπορεί να αποδοθεί στη δραστηριότητα των οργανισμών. Οι δομές αυτές καλούνται *βιογενείς* σε αντίθεση προς τις ανόργανες ιζηματογενείς δομές. Οι βιογενείς δομές περιλαμβάνουν αποτυπώματα από ρίζες φυτών (plant rootlet), πατημασιές μεμονωμένες σπονδυλωτών (vertebrate foot prints) (tracks), ίχνη συνεχούς μετακίνησης (trails), οπές (στοές) που έχουν διανοιχθεί μέσα σε χαλαρό ίζημα (burrows), και οπές (στοές) που έχουν διανοιχθεί μέσα σε σκληρό υπόστρωμα (borings). Οι δομές αυτές ονομάζονται, συνολικά, *ιχνοαπολιθώματα* (trace fossils) και η μελέτη τους χαρακτηρίζεται ως Ιχνολογία (Ichnology). Η Ιχνολογία, διακρίνεται στην Παλαιοϊχνολογία και στη Νεοϊχνολογία, τη μελέτη των ιχνοαπολιθωμάτων και των σύγχρονων ιχνών αντίστοιχα.

Βιογενείς ιζηματογενείς δομές ή ιχνοαπολιθώματα απαντώνται τόσο σε θαλάσσια όσο και σε λιμναία και χερσαία ιζηματογενή πετρώματα, που η γεωλογική τους ηλικία κυμαίνεται από το Προκάμβριο μέχρι και σήμερα.

Ο Seilacher (1970) υποστήριξε ότι στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν ή δεν έχουν βρεθεί απολιθωμένοι οργανισμοί τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ιχνοαπολιθώματα για τον προσδιορισμό της σχετικής ηλικίας των αντίστοιχων στρωμάτων, ακόμη όμως και για στρωματογραφικούς συσχετισμούς.

Ποικιλία ιχνοαπολιθωμάτων παρατηρείται στα ιζήματα του φλύσχη, που έχουν ως γνωστόν παγκόσμιο χαρακτήρα και σχηματίζονται στο τέλος κάθε ορογενετικού κύκλου. Η ρυθμική εναλλαγή των λιθολογικών φάσεων (κυκλοθέματα) που παρατηρείται στα στρώματα του φλύσχη, αποτελεί ευνοϊκή προϋπόθεση για τη διατήρηση ιχνοαπολιθωμάτων, που αποτελούν τη μόνη, σχεδόν, παλαιοντολογική μαρτυρία, καθόσον, όπως είναι γνωστό, στον φλύσχη τα σωματικά απολιθώματα είναι σχετικώς σπάνια.

Εξάλλου σε πετρώματα που αποτέθηκαν σε μη θαλάσσιο περιβάλλον, διατηρούνται επίσης ιχνοαπολιθώματα, εντούτοις ο αριθμός και η ποικιλία των μορφών τους είναι περιορισμένος.

Με τον όρο *βιογενής δομή* εννοούμε τη δομή που δημιουργείται μέσα στις ιζηματογενείς αποθέσεις από τη δράση του βιόκοσμου και όχι τις αποθέσεις ιζηματογενών κόκκων που έχουν βιογενή προέλευση (κελύφη, σκελετικά στοιχεία, πέλετες, ωόλιθοι, πισσόλιθοι κ.λπ.). Οι βιογενείς ιζηματογενείς δομές είναι χαρακτηριστικά του ιζήματος που δημιουργούνται από τη βιολογική δραστηριότητα. Δηλαδή δημιουργούνται από κάποιους

οργανισμούς που είναι ακόμα εν ζωή και διαφέρουν από τις δομές που δημιουργούνται από τους νεκρούς οργανισμούς (π.χ. εκμαγεία). Ο όρος περιλαμβάνει επίσης τα απολιθωμένα λείψανα οργανικών υλικών που παράγονται από έναν οργανισμό, όπως τους κοπρόλιθους (απολιθωμένα κόπρανα), ή ιζηματολογικές δομές που παράγονται με βιολογικές διαδικασίες όπως είναι οι στρωματολίθοι. Τα ιχνοαπολιθώματα διατηρούνται καλύτερα σε ψαμμίτη αφού το μέγεθος του κόκκου και τα χαρακτηριστικά αποθέσεων του συμβάλλουν σε αυτό. Μπορούν επίσης να βρεθούν σε σχιστόλιθους και ασβεστόλιθους.

#### 3.2.4.1 Χρησιμότητα των Ιχνοαπολιθωμάτων

Οι ανοργάνου προελεύσεως ιζηματογενείς δομές, δηλαδή αυτές που οφείλονται στην επενέργεια φυσικών δυνάμεων και ακολουθούν φυσικές διαδικασίες, αλλοιώνονται ή και καταστρέφονται από τη δράση των βενθονικών οργανισμών οι οποίοι διαβιούν επάνω ή μέσα στα ιζήματα, τα αναδεύουν ή έρπουν πάνω σε αυτά. Αυτές οι βιολογικές διαδικασίες έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ιζηματοδομών που έχουν περιγραφεί και χαρακτηριστεί ως *βιοανάδευση* (bioturbation) ή *βιογενείς ιζηματοδομές* (biogenic sedimentary structures). Γενικά, ανάμεσα στην ιζηματογένεση και στη διαμόρφωση ιχνοαπολιθωμάτων υπάρχει μια αλληλοεπίδραση. Συχνά η ταχεία ή αργή ιζηματογένεση, η διακοπή ή επανάληψη της ιζηματογένεσης ή οι μεταβολές στις συνθήκες της ιζηματογένεσης προσδιορίζεται με τη μελέτη των ιχνοαπολιθωμάτων. Η παλαιοϊχνολογία όμως των θαλασσιών ιζημάτων πρέπει απαραίτητα να στηρίζεται σε λεπτομερείς γνώσεις των σχέσεων που υπάρχουν ανάμεσα στις σημερινές μορφές του βένθους και στα αντίστοιχα πρόσφατα ιζήματα.

Οι βενθονικοί οργανισμοί, ή ακριβέστερα ένα μέρος από αυτούς διαβιούν σε ένα ορισμένο βάθος, μέσα στα ιζήματα. Όταν λοιπόν συσσωρεύονται νέα ιζήματα πάνω στα σχετικά παλαιότερα, τότε οι παραπάνω οργανισμοί προσπαθούν να ανεβούν προς τα πάνω για να φθάσουν στο ευνοϊκό για αυτούς βάθος διαβίωσης μέσα στα ιζήματα. Στην προσπάθειά τους αυτή δημιουργούν μικρές στοές, που χαρακτηρίζονται ως *δομές διαφυγής* (escape structures) και επιπλέον, μετατοπίζουν ή και κάμπτουν τα ιζηματογενή στρώματα, που βρίσκονται πάνω και κάτω από αυτές τις δομές διαφυγής και έτσι δημιουργούνται οι βιογενείς ιζηματογενείς δομές.

Επίσης, η υποθαλάσσια διάβρωση αναγκάζει τις ενδοβενθονικές μορφές να μεταναστεύσουν και να μετακινηθούν προς τα κάτω για να βρουν το κατάλληλο βάθος που είναι ευνοϊκό για τη διαβίωσή τους. Αυτό παρατηρείται ιδιαίτερα στα ελασματοβράγχια τα οποία δημιουργούν έτσι δομές βιοανάδευσης.

Μερικές φορές σε εξαιρετικά συμπαγή ιζήματα έχει εξαφανιστεί η αρχική στρώση τους, λόγω έντονης βιοανάδευσης. Αυτό συμβαίνει ιδίως όταν η ιζηματογένεση είναι χαμηλού ρυθμού ή δεν υπάρχει ενώ, αντίθετα, η ενδοπανίδα είναι αρκετά πλούσια και επιπλέον έχει αρκετό χρόνο να επιδράσει στη διαμόρφωση ιζηματοδομών.

Γενικά, τα ιχνοαπολιθώματα και ιδιαίτερα των ενδοβενθονικών οργανισμών συμβάλλουν στην αποσαφήνιση ιζηματολογικών προβλημάτων και στην ερμηνεία των συνθηκών απόθεσης πολλών ιζημάτων.

#### 3.2.4.2 Βιοαναμόχλευση

*Βιοαναμόχλευση* είναι η διαταραχή και ανάμειξη των ιζημάτων εξαιτίας βιολογικής δραστηριότητας η οποία μπορεί να εξαλείψει πλήρως τις παλαιότερες φυσικές δομές.

Η βιοαναμόχλευση είναι η βιογενής μεταφορά κόκκων ιζήματος και νερού πόρων, η οποία καταστρέφει τη στρωματογραφία των ιζημάτων, αλλοιώνει τα χημικά προφίλ, μεταβάλλει τον ρυθμό των χημικών αντιδράσεων και την ανταλλαγή ιζήματος-νερού και τροποποιεί τις φυσικές ιδιότητες των ιζημάτων, όπως το μέγεθος των κόκκων, το πορώδες και τη διαπερατότητα.

Σαν παράδειγμα αναφέρουμε ένα burrow (λαγούμι) που είναι μια οπή ή μια σήραγγα που ανασκάπτεται στο έδαφος από έναν οργανισμό για να δημιουργήσει ένα χώρο κατάλληλο για κατοίκηση, προσωρινό καταφύγιο ή ως υποπροϊόν της μετακίνησής του.

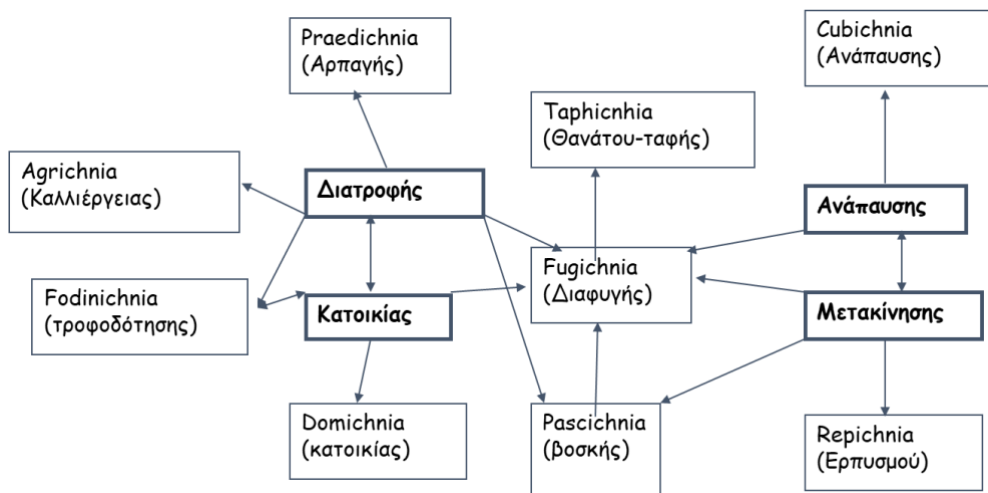
Πολλοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να ποσοτικοποιήσουν τη βιογενή διαταραχή των ιζημάτων σε μια δεδομένη στρωματογραφική ακολουθία. Τα περισσότερα συστήματα ταξινόμησης χρησιμοποιούν τον δείκτη βιοαναμόχλευσης ο οποίος στηρίζεται σε ημιποσοτικά δεδομένα. Οι κατηγορίες αυτές είναι υποδιαίρεσεις μεταξύ δύο άκρων: από 0% βιοαναμόχλευση έως 100% βιοαναμόχλευση. Κατηγορίες μεταξύ αυτών των δύο άκρων, στο συνεχές φάσμα της βιοαναμόχλευσης θα μπορούσε να είναι εύρη βιογενούς διαταραχής, όπως 1-10% βιοαναμόχλευσης, 10-40%, 60-90% και ούτω καθεξής. Ονόματα έχουν δοθεί σε αυτές τις κατηγορίες αντανακλώντας κάποια τακτική κλίμακα («δείκτης ιχνοδομής 2», «δείκτης ιχνοδομής 3») ή γενική περιγραφή που δείχνει τη σχετική εξέλιξη της βιοαναμόχλευσης («πολύ ελαφρώς βιοαναμοχλευμένα», «ελαφρώς βιοαναμοχλευμένα»).

### 3.2.4.3 Ηθολογική Ταξινόμηση Ιχνοαπολιθωμάτων

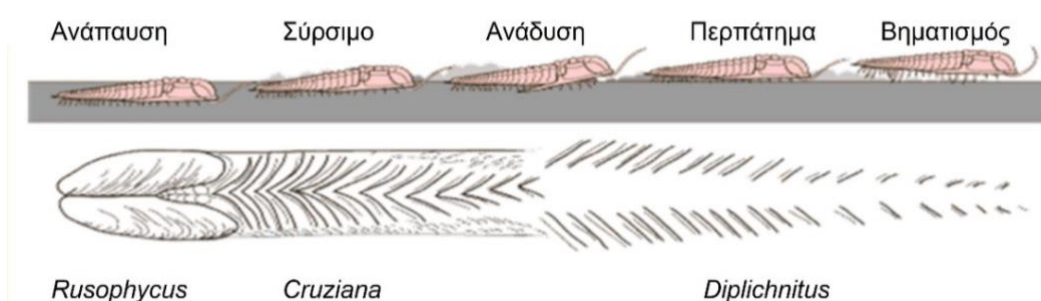
Τα ιχνοαπολιθώματα ταξινομούνται με διάφορους τρόπους, για διαφορετικούς σκοπούς. Τα ίχνη μπορούν να ταξινομηθούν *ταξινομικά* (με βάση τη μορφολογία τους), *ηθολογικά* (με βάση τη συμπεριφορά που αντιπροσωπεύουν) και *τοπωνυμικά*, (με βάση τη σχέση τους με τα περιβάλλοντα ιζηματογενή στρώματα). Εκτός από τις σπάνιες περιπτώσεις όπου ο αρχικός οργανισμός που ευθύνεται για τα ιχνοαπολιθώματα μπορεί να αναγνωριστεί με σιγουριά, η φυλογενετική ταξινόμηση των ιχνοαπολιθωμάτων είναι μια παράλογη πρόταση.

Είναι από δύσκολο ως αδύνατο να αποδοθεί κάποιο ιχνοαπολιθώμα σε έναν συγκεκριμένο οργανισμό, καθώς τα περισσότερα ίχνη αντανακλούν τη συμπεριφορά και όχι τη βιολογική συγγένεια των δημιουργών τους. Περαιτέρω, εντελώς διαφορετικοί οργανισμοί μπορούν να παράγουν όμοια ίχνη. Ως εκ τούτου η συμβατική ταξινόμηση δεν έχει εφαρμογή, αλλά κατηγοριοποιούνται μορφολογικά, με βάση το σχήμα και την εμφάνισή τους, στα εξής ιχνοαπολιθώματα (Εικόνα 3.24 και 3.25):

- *Cubichnia*: Ίχνη ανάπαυσης
- *Repichnia*: Ίχνη ερπυσμού
- *Pascichnia*: Ίχνη βόσκησης
- *Fodinichnia*: Ίχνη σίτισης
- *Domichnia*: Ίχνη στέγασης
- *Agrichnia*: Ίχνη καλλιέργειας
- *Praedichnia*: Ίχνη θήρευσης
- *Equilibrichnia*: Ίχνη ισορροπίας
- *Fugichnia*: Ίχνη διαφυγής



Εικόνα 3.24 Ηθολογική ταξινόμηση των ιχνοαπολιθωμάτων κατά Seilacher (1953). Προσωπικό αρχείο συγγραφέως.



Εικόνα 3.25 Διαφορετικά ίχνη που αφήνει ένας τριλοβίτης όταν αναπαύεται, όταν σέρνεται μέσα στο υπόστρωμα και δημιουργεί αυλακώσεις, όταν αναδύεται από το υπόστρωμα, όταν περπατά κι όταν κάνει βηματισμό.

Σε κάθε περίπτωση το ιχνοαπολιθώμα που αφήνει είναι διαφορετικό κι ως εκ τούτου έχει και διαφορετικό όνομα (Προσαρμοσμένο διάγραμμα - πηγή: © Dr. S. M. Gon III, A Guide to the Orders of trilobites <http://www.trilobites.info>).

#### 3.2.4.4 Τοπωνυμική ταξινόμηση των ιχνοαπολιθωμάτων

Αυτή η ταξινόμηση ιχνοαπολιθωμάτων βασίζεται στη σχέση τους με το ιζημα προέλευσης.

Ο Martinsson έδωσε την πλέον ευρέως αποδεκτή τοπωνυμική ταξινόμηση, προσδιορίζοντας τέσσερις διακριτές κατηγορίες:

- *Endichnia*: βρίσκονται εξ ολοκλήρου εντός του ιζήματος, και ως εκ τούτου δημιουργούνται μόνο από ενδοπανιδικούς οργανισμούς.
- *Erichnia*: βρίσκονται στις κορυφές των στρωμάτων προέλευσης, και αποτελούνται από κορυφογραμμές και αυλακώσεις που σχηματίζονται από βενθονικούς οργανισμούς ή ενδοπανιδικά burrows που έχουν εκτεθεί στη διάβρωση.
- *Exichnia*: ίχνη κατασκευασμένα από υλικό διαφορετικό από το περιβάλλον μέσο, αφού έχουν πληρωθεί είτε ενεργά από έναν οργανισμό ή διαβρωθεί και εκ νέου πληρωθεί από γειτονικά ιζήματα.
- *Hyrichnia*: κορυφογραμμές και αυλακώσεις στις βασικές επιφάνειες των στρωμάτων προέλευσης στις διεπαφές τους με άλλα στρώματα. Αντιπροσωπεύουν το αντίθετο των *Erichnia*.

#### 3.2.4.5 Τα ιχνοαπολιθώματα ως δείκτες παλαιοπεριβαλλόντων

Τα ιχνοαπολιθώματα είναι εργαλεία που χρησιμοποιούνται ως ιζηματολογικοί και παλαιοντολογικοί δείκτες για τον εντοπισμό και ερμηνεία των επιφανειών ασυνέχειας στη στρωματογραφία ιζηματογενών ακολουθιών. Επιπλέον, λόγω του γεγονότος ότι οι οργανισμοί που δημιουργούν τις δομές αυτές είναι αυτόχθονοι, μπορούν να αποτελέσουν δείκτη διαφόρων παραμέτρων όπως το παλαιοβάθος, περιεκτικότητα του νερού σε οξυγόνο, αλατότητα κ.ά. Έτσι, αποτελούν έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για την παλαιοοικολογική αναδόμηση των μελετηθέντων ιζημάτων υποθαλάσσιων ριπιδίων.

Οι ιχνοφάσεις αποτελούν ιδέα του Adolph Seilacher από το Πανεπιστήμιο του Tubingen, ο οποίος αναζητούσε ένα εργαλείο για την ανάλυση των συναθροίσεων των ιχνοαπολιθωμάτων για την ερμηνεία των ιζηματογενών φάσεων και του καθεστώτος ιζηματογένεσης. Ο Seilacher, με συγκριτικές έρευνες που πραγματοποίησε σε παγκόσμια κλίμακα, σε ιχνοκοινότητες που βρίσκονται σε θαλάσσια ιζήματα διαφορετικών ηλικιών, παρατήρησε ότι σε πολλές θέσεις απαντώνται παρόμοιες ιχνοκοινότητες σε διαφορετικής ηλικίας ιζήματα. Καθεμία τέτοια ιχνοκοινότητα ανταποκρίνεται σε ένα ειδικό κάθε φορά θαλάσσιο περιβάλλον και αποτελεί ξεχωριστή ιχνοφάση. Το περιβάλλον χαρακτηρίζεται από τη λιθολογική σύνθεση και υφή του αντίστοιχου ιζήματος και από ωκεανογραφικούς παράγοντες όπως π.χ. το βάθος των υδάτων, την αλμυρότητα, την κυκλοφορία των υδάτων κ.λπ.

Συνεπώς, οι ιχνοφάσεις ορίζονται από τις επαναλαμβανόμενες συναθροίσεις που σχετίζονται με διάφορες περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως είναι το βάθος του νερού, η δυναμική των ιζημάτων, η συνοχή, η αλατότητα του νερού, τα επίπεδα οξυγόνου και η θήρευση και παίρνουν το όνομά τους από το επικρατέστερο ιχνοαπολιθώμα της συνάθροισης. Μέχρι στιγμής έχουν διακριθεί εννέα ιχνοφάσεις. Αυτές είναι, σύμφωνα με τους Pemberton et al.(1992), οι ακόλουθες:

- *Trypanites* – λιθοποιημένα θαλάσσια υποστρώματα.
- *Teredolites* – θαλάσσια ή περιθωριακά θαλάσσια δασώδη υποστρώματα.
- *Scoyenia* – μη θαλάσσια υποστρώματα. Συνήθως απαντάται σε ερυθρόχρωμα στρώματα.
- *Skolithos* – παράκτια. Συνδέεται με γρήγορο ρυθμό ιζηματογένεσης, υψηλής ενέργειας, αβαθή θαλάσσια υποστρώματα.
- *Cruziana* – ανταποκρίνεται στα βαθύτερα τμήματα των αβαθών υδάτων, χαμηλότερα από την πραγματική παράκτια ζώνη, χαμηλής ενέργειας, περιπαράκτια θαλάσσια υποστρώματα.
- *Glossifungites* – παράκτια, σταθερά (αλλά μη λιθοποιημένα) θαλάσσια υποστρώματα. Οι επιφάνειες διαβρώσεως περιορίζονται στα επίπεδα στρώσεως.
- *Psilonichnus* – υπερπαράκτια, μέσης έως χαμηλής ενέργειας.
- *Zoophycos* – αντιπροσωπεύει μεταβατική φάση από την περιπαράκτια στη βαθύαλη ζώνη, χαμηλής ενέργειας, θαλάσσια υποστρώματα.
- *Nereites* – βαθύαλη έως αβυσσική ζώνη, χαμηλής ενέργειας, θαλάσσια υποστρώματα, απαντάται σε πελαγικά ιζήματα και σε τουρβιδίτες.



Οι ιχνοφάσεις *Trypanites*, *Teredolites*, *Glossifungites* και *Psilonichnus* θεωρούνται ιχνοφάσεις σκληρού υποστρώματος, ενώ οι ιχνοφάσεις *Skolithos*, *Cruziana*, *Zoophycos* και *Nereites* θεωρούνται ιχνοφάσεις μαλακού υποστρώματος.

Επιπλέον, ορισμένες συναθροίσεις ιχνοαπολιθωμάτων είναι αντιπροσωπευτικές των περιβαλλόντων:

- Θαλάσσιο μαλακό υπόστρωμα:
  - *Psilonichnus*: λιμνοθαλάσσιο.
  - *Skolithos*: μέτωπο ακτής, ενδοπαλιρροιακό, παράκτια ζώνη - Υψηλή ενέργεια.
  - *Cruziana*: υποπαλιρροιακή ζώνη (MLT – 300m) - Μέτρια ενέργεια.
  - *Zoophycus*: βαθύαλη ζώνη (300 – 2.000m) - Μέτρια ενέργεια.
  - *Nereites*: αβυσσική ζώνη (>2.000m) - Χαμηλή ενέργεια.
- Θαλάσσιο συμπαγοποιημένο υπόστρωμα & hardground:
  - *Glossifungites*: συμπαγοποιημένο στρώμα.
  - *Trypanites*: hardground.
- Γλυκά νερά/χερσαίο:
  - *Scoyenia*.
- Ξυλώδες υπόστρωμα:
  - *Teredolites*.

Η παρουσία ιχνοαπολιθωμάτων «ρηχών υδάτων» σε βαθιά ύδατα και το αντίθετο δεν είναι ασυνήθιστο φαινόμενο. Αυτό συμβαίνει γιατί η κατανομή των ιχνοαπολιθωμάτων ελέγχεται από τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος και τη διαθέσιμη τροφή παρά από τη βαθυμετρία, αν και σε περιβάλλοντα βαθέων υδάτων στα οποία εμφανίζονται ιχνοαπολιθώματα «ρηχών υδάτων», η αναλογία ιχνοαπολιθωμάτων ρηχών υδάτων προς βαθέων υδάτων ελαττώνεται με την αύξηση του βάθους.

Σε ένα υποθαλάσσιο ριπίδιο παρατηρούνται διαφορές στην κατανομή των ιχνοαπολιθωμάτων ρηχών και βαθέων υδάτων ανάλογα με το εκάστοτε περιβάλλον ιζηματογένεσης και απόθεσης. Έτσι, σε περιβάλλον υποθαλάσσιου φαραγγιού και στο εσωτερικό ριπίδιο, συνήθως περιέχεται μικρή ποικιλία ιχνοαπολιθωμάτων με επικράτηση των ειδών των ρηχών υδάτων, σε περιβάλλον μεσαίου ριπιδίου παρατηρείται ένα μείγμα ιχνοαπολιθωμάτων ρηχών και βαθέων υδάτων, ενώ σε περιβάλλον εξωτερικού ριπιδίου σπάνια παρατηρούνται ιχνοαπολιθώματα ρηχών υδάτων, αλλά υπάρχουν σε μεγάλη ποικιλία και αφθονία τα ιχνοαπολιθώματα βαθέων υδάτων.

Οι πλέον χερσαίες ιχνοφάσεις συνίστανται κυρίως από πατήματα σπονδυλωτών. Περιλαμβάνουν πατήματα πτηνών και χερσαίων ζώων. Αποτυπώματα από δεινόσαυρους είναι τα πιο καλά μελετημένα παραδείγματα. Η δυναμική διατήρησης τέτοιων αποτυπωμάτων είναι χαμηλή. Αυτά απαντώνται πολύ πιο συχνά πάνω σε στρώματα αποξηραμένων λιμνών, σε ποτάμιους πυθμένες και παλιρροιακές πεδιάδες.

Σε υπο - παλιρροιακά (subtidal) και αβαθή θαλάσσια περιβάλλοντα, επικρατούν οι ιχνοφάσεις *Cruziana* και *Zoophycus*. Στη ζώνη αυτή, όπου η θαλάσσια δράση είναι λιγότερο καταστρεπτική, τα ασπόνδυλα κολυμπούν πάνω από το θαλάσσιο πυθμένα για να τραφούν σε αβαθείς κοιλότητες. Επίσης, κατασκευάζουν λαγούμια (burrows), τα οποία είναι αβαθή, πλάγια διευθετημένα ή σχεδόν οριζόντια.

Πηγαίνοντας σε βαθειά ήσυχα νερά, απαντάται μια χαρακτηριστική ιχνοφάση που καλείται *Nereites*. Σε αυτό το περιβάλλον ασπόνδυλοι οργανισμοί ζουν πάνω παρά μέσα στο ιζηματογενές υπόστρωμα. Τα burrows είναι σχεδόν απόντα και κυριαρχούν τα συρσίματα (trails). Χαρακτηριστικά μαιανδρικά ιχνοαπολιθώματα περιλαμβάνονται εδώ όπως είναι τα *Nereites*, *Helminthoida* και *Cosmorhaphe*.

Πολυγωνικά δικτυωτά ίχνη, όπως το *Paleodictyon*, είναι χαρακτηριστικά ιχνοαπολιθώματα. Σε αυτά επίσης τα βάθη θα πρέπει να τονιστεί ότι η εντατική παραγωγή από burrows που καλείται βιοαναμόλυνση (bioturbation) οδηγεί προοδευτικά στην καταστροφή της στρώσης και στη δημιουργία τελικά μιας ομοιόμορφα διάστικτης άμμου.

Η ιχνοφάση *Trypanites* αναπτύσσεται σε πλήρως λιθοποιημένα υποστρώματα όπως hardgrounds, ύφαλοι, βραχώδεις ακτές, beach rocks και άλλες επιφάνειες. Η ανάπτυξη αυτών των ιχνοαπολιθωμάτων μπορεί να αντιστοιχεί σε ασυνέχειες που έχουν μεγάλη σημασία στη στρωματογραφία ιζηματογενών ακολουθιών. Σε αντίθεση με την ιχνοφάση *Glossifungites*, τα τοιχώματα των διαύλων που δημιουργούνται κόβουν τους κόκκους του υποστρώματος, αντί να τους παρακάμπτουν.

Η ιχνοφάση *Glossifungites* αναπτύσσεται μόνο σε σταθερά, μη λιθοποιημένα υποστρώματα που υποδηλώνουν επιφάνειες ασυνέχειας.

Η *ιχνοφάση Psilonichnus* έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί αποτελεσματικό δείκτης παλαιοπεριβάλλοντος, ειδικά σε μελέτες της στρωματογραφίας ακολουθιών. Εμφανίζει λαγούμια σε απλά σχήματα Y-, J-, και I-, κατακόρυφα ή ελαφρώς κεκλιμένα, που αποδίδονται σε καρκινοειδή δεκάποδα. Χαρακτηρίζουν μεταβατικά στρώματα από ποτάμια-εκβολές-μέτωπο ακτής.

Η ενδοπαλιρροιακή ζώνη είναι μια υψηλή ενεργειακή ζώνη με ποικιλία υποστρωμάτων που κυμαίνονται από βραχώδη αιγιαλό και καλά ταξινομημένες μετατοπιζόμενες άμμους σε λασπώδη ιλύ και χαρακτηρίζεται από την παρουσία της *Ιχνοφάσης Skolithos (Sk)*, με τα γένη *Skolithos*, *Ophiomorpha* και *Diplocraterion*, η οποία συναντάται σε αβαθή θαλάσσια περιβάλλοντα (π.χ. παράκτια), όπου ο ρυθμός ιζηματογένεσης είναι σχετικά υψηλός και τα θραύσματα τροφής διατηρούνται σε αιώρηση λόγω των ρευμάτων.

Η υποπαλιρροιακή ζώνη, η οποία είναι μια περιοχή μέτριας έως χαμηλής ενέργειας, χαρακτηρίζεται από την παρουσία της *Ιχνοφάσης Cruziana (Cr)* με τα γένη *Cruziana*, *Thalassinoides*, *Asteriacites* και *Rhizocorallium*. Η ιχνοφάση αυτή εμφανίζεται σε μεγαλύτερα βάθη (π.χ. περιοχές υφαλοκρηπίδας), όπου η ρευματική δράση είναι λιγότερο έντονη από την παράκτια ζώνη και η τροφή καθιζάνει στον πυθμένα.

Η βαθύαλη ζώνη, η οποία είναι η ηπειρωτική καταφέρεια χαμηλής ενέργειας με χαμηλό οργανικό υλικό και χαμηλή οξυγόνωση, φιλοξενεί την *Ιχνοφάση Zoophycus (Z)*.

Τέλος, η *Ιχνοφάση Nereites (N)* παρατηρείται σε μεγαλύτερα βάθη (βαθιάς θάλασσας και αβυσσαλέα βάθη) και απόσταση από τις ζώνες παραγωγής της τροφής.

### 3.2.4.6 Στρωματόλιθοι

Τα στρωματοειδούς μορφής αυτά πετρώματα που στην ουσία είναι απολιθωμένοι σχηματισμοί στρωμάτων κυανοβακτηρίων και ιζήματος χρονολογούνται από το Προκάμβριο. Οι αρχαιότεροι απολιθωμένοι στρωματόλιθοι που καταγράφηκαν, χρονολογούνται πριν από 3,5 δισεκατομμύρια χρόνια. Από μετρήσεις ισοτόπων του άνθρακα σε αυτά τα απολιθώματα, διατυπώθηκε η άποψη ότι την περίοδο αυτή υπήρχαν αυτότροφοι μικροοργανισμοί. Επειδή όμως το οξυγόνο στην ατμόσφαιρα της Γης έκανε την εμφάνισή του πριν 2,3 δισεκατομμύρια χρόνια, φαίνεται ότι οι μικροοργανισμοί αυτοί ήταν μάλλον χημειοαυτότροφοι που χρησιμοποιούσαν CO<sub>2</sub> ως πηγή οξυγόνου, παρά φωτοαυτότροφοι.

Κατά τον Πρωτεροζωικό, οι στρωματόλιθοι ήταν σε μεγάλη αφθονία και καταλάμβαναν όλα τα υδάτινα οικοσυστήματα της εποχής αυτής. Τα περισσότερα πετρώματα που χρονολογούνται από την εποχή αυτή (ασβεστόλιθοι, δολομίτες, μαγνησίτες ακόμα και φωσφορίτες) περιέχουν στρωματόλιθους. Είναι γνωστό ότι οι πρωτεροζωικοί στρωματόλιθοι σχηματίστηκαν από τη βιολογική δραστηριότητα των κυανοβακτηρίων όπως συμβαίνει και με τους σύγχρονους. Το μέγιστο της εξάπλωσής τους αλλά και της βιομάζας τους συνέβη προς το τέλος της Πρωτεροζωικής περιόδου και έκτοτε διαπιστώθηκε μια απότομη μείωση. Η αιτία για τη μείωση αποδίδεται στα μετάζωα που εμφανίστηκαν στη Γη την εποχή εκείνη, και χρησιμοποιούσαν ως τροφή κυανοβακτήρια περιορίζοντας τελικά την εξάπλωσή τους. Συν τω χρόνω η εξάπλωση των κυανοβακτηρίων περιορίστηκε δραστικά και τελικά αυτά κατέληξαν να υπάρχουν μόνο σε περιβάλλοντα με ακραίες συνθήκες όπου τα μετάζωα δεν μπορούν να επιβιώσουν.

Στη σημερινή εποχή, καλά στρωματοποιημένες δομές κυανοβακτηρίων, οι οποίες εξακολουθούν να αναπτύσσονται επιφανειακά και να απολιθώνονται στις κατώτερες στιβάδες, είναι αρκετά σπάνιες. Τέτοιοι σχηματισμοί έχουν αναφερθεί στην περιοχή Exuma Cays στις Μπαχάμες νήσους (Reid and Brown, 1991; Pinckney et al., 1995), καθώς και στην περιοχή Shark Bay της Αυστραλίας που είναι και η περιοχή που παρατηρήθηκαν για πρώτη φορά το 1961.

Οι στρωματόλιθοι είναι επίπεδα πετρώματα, η προέλευση των οποίων αποδίδεται σαφώς στη δραστηριότητα μικροβιακών κοινωνιών οι οποίες λόγω της μορφολογίας, της φυσιολογίας και της διευθέτησής τους χρονικά και χωρικά αλληλεπιδρούν με το φυσικό και το χημικό περιβάλλον ώστε να δημιουργήσουν επίπεδους και στρωτούς σχηματισμούς οι οποίοι διατηρούνται στην τελική μορφή του πετρώματος.

Ο ορισμός αυτός περιλαμβάνει τόσο απολιθωμένους όσο και σύγχρονους σχηματισμούς, ωστόσο σύγχρονοι στρωματόλιθοι που να ανταποκρίνονται στον παραπάνω ορισμό είναι πολύ σπάνιοι.

Ένας άλλος ορισμός λέει: Στρωματόλιθοι είναι οργανοϊζηματογενείς δομές που σχηματίζονται από παγίδευση, συγκόλληση ή/και καθίζηση ιζήματος λόγω της ανάπτυξης και μεταβολικής δραστηριότητας μικροοργανισμών κυρίως κυανοβακτηρίων.

Ο δεύτερος αυτός ορισμός είναι πιο γενικός καθώς περιλαμβάνει απολιθωμένους και σύγχρονους συνεκτικούς στρωματόλιθους αλλά επίσης και σύγχρονους μη συνεκτικούς στρωματόλιθους.

Τα σημερινά στρώματα κυανοβακτηρίων έχουν αξιοσημείωτες ομοιότητες στη δομή τους με τους απολιθωμένους στρωματόλιθους, παρουσιάζουν όμως μια σημαντική διαφορά: Η συντριπτική πλειονότητα των συγχρόνων στρωμάτων κυανοβακτηρίων (algae mat) δεν σχηματίζει πετρώματα υπό μορφή απολιθωμάτων.

Σε θαλάσσια περιβάλλοντα με αβαθή ήρεμα και θερμά νερά παρατηρούνται οργανοϊζηματογενείς δομές με στρωματοειδή μορφή. Οι δομές αυτές που αποτελούνται από επάλληλες στρώσεις πάχους από 0,2 mm έως 3 mm η κάθε μια και είναι εύκολα ορατές με γυμνό οφθαλμό, αποδίδονται σε παγίδευση ή/και συγκόλληση καθιζάνοντος λεπτόκοκκου υλικού λόγω της ανάπτυξης και μεταβολικής δραστηριότητας φωτοσυνθετικών μικροοργανισμών, κυρίως κυανοβακτηρίων (ή κυανοφυκών). Σε αρκετές περιπτώσεις οι επάλληλες αυτές στρώσεις μπορούν εύκολα να αποχωριστούν από την επιφάνεια του ιζήματος ως συνεκτικό κομμάτι.

Πρόκειται για μεγάλη ποικιλία μορφών στην επιφάνεια απόθεσης που μοιάζουν με δόμους, κυλίνδρους, στύλους, πολύγωνα κ.ά. Εσωτερικά αποτελούνται από εναλλασσόμενες λεπτές στρώσεις υλικών όπως μαύρη-σκούρα άργιλο και λευκό ανθρακικό ασβέστιο (ή πυριτικό). Δηλαδή πρόκειται για εναλλαγές κλαστικού υλικού και υλικού βιογενούς προέλευσης που οφείλεται σε αύξηση στον μεταβολισμό και στον θάνατο φυκών. Η ταινιωτή ανάπτυξη δείχνει έναν ρυθμό, που σχετίζεται με τον ρυθμό των παλιρροιών στη ρηχή ζώνη των θαλασσών ή στις μεταβολές της στάθμης των λιμνών.

Παρόμοιες δομές σε απολιθωμένες καταγραφές είναι γνωστές ως στρωματόλιθοι (stromatolites) ενώ παγίδευση και συγκόλληση ανόργανου υλικού σε σύγχρονες μικροβιακές κοινωνίες με επικαλύψεις φυκών αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως «σύγχρονοι στρωματόλιθοι», «επίπεδες αναπτύξεις φυκών» ή «ταπέτα φυκών» (recent stromatolites, algal mats ή tappis algal).

Προκειμένου να δημιουργηθεί στρωματόλιθος, πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα να διατηρηθεί χρονικά η δομή του, δηλαδή να απολιθωθεί. Στη σύγχρονη εποχή υπάρχουν πολλά περιβάλλοντα στα οποία αναπτύσσονται μη συνεκτικά στρώματα κυανοβακτηρίων δηλαδή μικροβιακά συστήματα που δεν έχουν τη δυνατότητα να διατηρήσουν τη δομή τους χρονικά. Ο Krumbein (1983) έδωσε τον εξής ορισμό για τις δομές αυτές: Μη συνεκτικά στρωματοειδή συστήματα τα οποία σχετίζονται σαφώς με τη δραστηριότητα μικροβιακών συστημάτων και τα οποία συχνά καλούνται σύγχρονοι στρωματόλιθοι ή ζώντες στρωματόλιθοι ορίζονται ως εν δυνάμει στρωματόλιθοι. Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό του Krumbein, εν δυνάμει στρωματόλιθοι σχηματίζονται μέχρι και σήμερα.

Τα κυανοβακτήρια είναι φωτοαυτότροφοι προκαρυωτικοί, μονοκύτταροι, αποικιακοί ή νηματοειδείς μικροοργανισμοί. Παρά την προκαρυωτική τους δομή θεωρούνται φύκη, καθώς έχουν τη δυνατότητα αερόβιας φωτοσύνθεσης, μέσω της χλωροφύλλης-α που διαθέτουν. Τα κύτταρά τους περιβάλλονται από ζελατινώδες υλικό πολυσακχαρώδους υφής, που στις σφαιρικές και αποικιακές μορφές ονομάζεται θήκη και στις νηματοειδείς κολέδες.



**Εικόνα 3.26** Σύγχρονοι Στρωματόλιθοι - Hamelin Pool Marine Nature Reserve, Shark Bay, Δυτική Αυστραλία  
(πηγή: Paul Harrison - <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=714512>).





**Εικόνα 3.27** Απολιθωμένοι στρωματόλιθοι, πριν από 425 εκατομμύρια χρόνια, *Soeginina Beds - Raadla Formation, Ludlow, Silurian, Kõibassaare, Estonia* (πηγή: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SoegininaStromatolitesEstonia.jpg>).



**Εικόνα 3.28** Απολιθωμένοι στρωματόλιθοι - *Hoyt Limestone (Κάμβριο), Lester Park, Saratoga Springs, New York* (πηγή: Rygel, M.C. - CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11232727>).

## Βιβλιογραφία/Αναφορές

### Ξενόγλωσση

- Ashley, G.M. (1990). Classification of large-scale subaqueous bedforms: A new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Petrology*, 60, p. 160-172.
- Boggs, S. (2006). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy* (4th ed.). Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Collinson, J., Mountney, N., & Thompson, D. (2006). *Sedimentary Structures*. Harpenden, U.K., Terra Publishing, 292 pp.
- Craig, G.Y. & Walton, E.K. (1962). Sedimentary structures and palaeocurrent directions from the Silurian rocks of Kirkcudbrightshire. *Trans. Edinb. Geol. Soc.*, 19, 100–119.
- Dunbar, C.O., & Rodgers, J. (1957). *Principles of Stratigraphy*. Wiley, New York.
- Dzuluński, S., & Sanders, J.E. (1962a). Current marks on firm mud bottoms. *Trans. Connecticut Acad. Arts Sci.*, 42, 57–96.
- Hall, J. (1843). *Geology of New York, Part 4, Comprising the Survey of the Fourth Geological District*. Charles Van Benthuysen and Sons, Albany, 683 PP.
- Harms, J.C., & Fahnestock, R.K. (1965). *Stratification, bed forms, and flow phenomena (with an example from the Rio Grande)*. S.E.P.M. Special Publication 12, p. 84-115.
- Kuenen, P. (1957). Sole markings of graded greywacke beds. *J. Geol.*, 65, 231–258.
- McKee, E.D., & Weir, G.W. (1953). Terminology for stratification and cross-stratification in sedimentary rocks. *Geol. Soc. America Bulletin*, 64(4), 381-389.
- Pemberton, S.G., MacEachern, J.A., & Frey, R.W. (1992). Trace fossil facies models: environmental and allostratigraphic significance. In: R.G. Walker & N.P. James (Eds.), *Facies Models: Response to Sea Level Change*. Geol. Ass. Can., St. John's, Geotext 1, pp. 47–72.
- Pinckney, J., Paerl, H.W., Reid, R.P., & Bebout, B. (1995). Ecophysiology of stromatolitic microbial mats. Stocking Island, Exuma Cays, Bahamas. *Microb Ecol.*, 29, 19-37.
- Reid, R.P., & Browne, K.M. (1991). *Intertidal stromatolites in a fringing Holocene reef complex*. Bahamas. *Geology*, 19, p. 15- 18.
- Seilacher, A. (1953). Studien zur Palichnologie. 11. Die fossilen Ruhespuren (Cubichnia). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen*, 98, 87-124.
- Seilacher, A. (1970). Begriff und Bedeutung der Fossil-Lagerstätten (Concept and meaning of fossil lagerstätten). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, 1970, p. 34-39.
- Southard, J.B., & Boguchwal, L.A. (1990). Bed configurations in steady unidirectional water flows. Part 2. synthesis of flume data. *Journal of Sed. Petr.*, 60, 658-679.





## Κεφάλαιο 4

# Περιβάλλοντα ιζηματογένεσης και ιζηματογενείς φάσεις

### Σύνοψη

Αυτό το κεφάλαιο εστιάζεται στις έννοιες «περιβάλλον ιζηματογένεσης», «ιζηματογενής φάση» και «μοντέλο ιζηματογένεσης». Αυτές οι έννοιες είναι άρρηκτα συνδεδεμένες μεταξύ τους και συνεισφέρουν στην κατανόηση για την προέλευση των ιζηματογενών πετρωμάτων και τη δημιουργία των αποθετικών συστημάτων.

### Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται βασικές γνώσης Φυσικής Ιζηματολογίας και κατάταξης ιζημάτων (Κεφάλαιο 2), καθώς και γνώσεις για τους μηχανισμούς δημιουργίας των ιζηματογενών δομών.

## 4.1 Εισαγωγή στα Ιζηματογενή Περιβάλλοντα

Το περιβάλλον είναι ένα δυναμικό σύστημα, το οποίο εξελίσσεται και προσαρμόζεται συνεχώς στις μεταβαλλόμενες επιδράσεις και αντιδράσεις μεταξύ των βιοτικών και αβιοτικών παραγόντων από τους οποίους αποτελείται.

Η λέξη «περιβάλλον» χρησιμοποιείται ευρέως στη γεωλογία με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- το περιβάλλον ως σύνολο ή σύμπλεγμα φυσικών ή/και χημικών ή/και βιολογικών συνθηκών που υπάρχουν ή επικρατούν σε ένα δεδομένο σημείο ή σε μια δεδομένη τοπική περιοχή, σε μια δεδομένη χρονική στιγμή ή για μια χρονική περίοδο και
- το περιβάλλον ως μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, καλά οριοθετημένη, που χαρακτηρίζεται από ένα συγκεκριμένο σύνολο φυσικών ή/και χημικών ή/και βιολογικών συνθηκών.

Ένα ιζηματογενές περιβάλλον (sedimentary environment) είναι μια περιοχή της επιφάνειας της Γης όπου αποτίθενται ιζήματα. Μπορεί να διακριθεί από άλλες γειτονικές περιοχές με βάση τα φυσικά, χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του. Συνεπώς, μπορεί να οριστεί σαν ένα τμήμα της επιφάνειας της Γης το οποίο σε όρους φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς είναι διαφορετικό (ξεχωρίζει) από τις γειτονικές (παρακείμενες) περιοχές (Selley, 1970). Ως παραδείγματα τέτοιων, διαφορετικών μεταξύ τους, ιζηματογενών περιβαλλόντων αναφέρονται η έρημος, το ποτάμιο δέλτα, το υποθαλάσσιο ριπίδιο κ.λπ.

Η διαδικασία απόθεσης καθορίζει τις παραμέτρους της συμπεριφοράς του ιζήματος τη στιγμή της απόθεσής του. Η υφή των ιζηματογενών πετρωμάτων και οι σχετικές ιζηματογενείς δομές αποτελούν το άμεσο αποτέλεσμα της διαδικασίας απόθεσης και του μέσου απόθεσης που υπήρχε τη στιγμή της απόθεσης (Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1 Σχέση διαδικασίας απόθεσης ιζημάτων και ιζηματογενών περιβαλλόντων και δημιουργίας ιζηματογενούς φάσης.

Ένα σύστημα απόθεσης ή αποθετικό σύστημα είναι ένα τριδιάστατο σύνολο ιζημάτων ή λιθοφάσεων που σχηματίζονται μέσα σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον (Galloway, 1998). Τα αποθετικά συστήματα ποικίλλουν ανάλογα με τους τύπους ιζημάτων που είναι διαθέσιμα κατά την απόθεση, καθώς και με τις αποθετικές διαδικασίες και τα περιβάλλοντα μέσα στα οποία αποτίθενται. Παραδείγματα αποθετικών συστημάτων είναι το αλλουβιακό, το ποτάμιο, το δελταϊκό, το θαλάσσιο, το λιμναίο, το αιολικό (Klein, 1985).

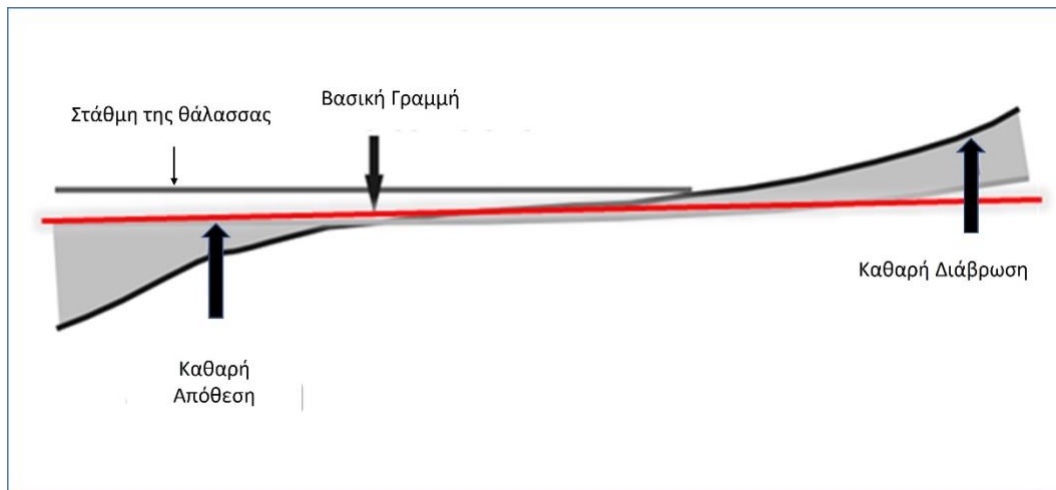
Ένα αποθετικό σύστημα χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη γεωμετρία και συγκεκριμένες διαδικασίες μεταφοράς ιζημάτων που σχετίζονται με αυτό. Τα αποθετικά συστήματα αποτελούν περιγραφές των αλληλεπιδράσεων της μορφής και των φυσικών, χημικών ή βιολογικών διεργασιών που εμπλέκονται στην ανάπτυξη στρωματογραφικών ακολουθιών. Τα περιβάλλοντα απόθεσης, από την άλλη, είναι οι τοποθεσίες, οι γεωγραφικές περιοχές, όπου έχουν αποθεθεί συσσωρεύσεις ιζημάτων είτε με μηχανικές είτε με χημικές διεργασίες.

## 4.2 Παράγοντες που διαμορφώνουν τα ιζηματογενή περιβάλλοντα

Προτού γίνουν η ταξινόμηση και η μελέτη των ιζηματογενών περιβαλλόντων, κρίνεται σκόπιμο να εξεταστεί πότε γίνεται απόθεση και ποιοι παράγοντες την ρυθμίζουν.

Ο πρώτος βασικός παράγοντας που διαμορφώνει ένα περιβάλλον ιζηματογένεσης είναι η *σχετική στάθμη της θάλασσας*, εννοώντας τη θέση και το ύψος της θάλασσας, σχετικά με την ξηρά, και γενικότερα τη θέση της ακτογραμμής, και κατ' επέκταση του *βασικού επιπέδου* (ή επίπεδο βάσης).

Το *βασικό επίπεδο* είναι μια εικονική επιφάνεια που αντιπροσωπεύει την ισορροπία μεταξύ της διάβρωσης και της ιζηματογένεσης, που σημαίνει ότι το ανάγλυφο που βρίσκεται πάνω από το βασικό επίπεδο θα υποστεί διάβρωση μέχρις ότου φτάσει το βασικό επίπεδο, ενώ ο χώρος κάτω από το βασικό επίπεδο θα συγκεντρώσει ίζημα μέχρις ότου «κτιστεί» ως το βασικό επίπεδο. Στη γεωλογία και τη γεωμορφολογία, το βασικό επίπεδο είναι το κατώτερο όριο για μια διαδικασία διάβρωσης. Η γραμμή όπου το βασικό επίπεδο συναντά την επιφάνεια της Γης ονομάζεται «*βασική γραμμή*» (Εικόνα 4.2). Ο σύγχρονος όρος εισήχθη από τον John Wesley Powell το 1875. Ο όρος στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε από τον William Morris Davis που τον χρησιμοποίησε στον κύκλο της *θεωρίας της διάβρωσης*.



**Εικόνα 4.2** Σχηματική απεικόνιση του βασικού επιπέδου και της βασικής γραμμής που αντιπροσωπεύει την ισορροπία μεταξύ της διάβρωσης και της ιζηματογένεσης.

Ο δεύτερος παράγοντας είναι ο *ρυθμός απόθεσης ή ιζηματογένεσης*, ο οποίος ορίζεται ως ο όγκος των ιζημάτων που αποτίθεται στη μονάδα του χρόνου και συνήθως μετριέται σε cm/kyr. Ο ρυθμός ιζηματογένεσης εξαρτάται κυρίως από τις κλιματικές συνθήκες και το ανάγλυφο. Ειδικότερα, ο ρυθμός ιζηματογένεσης, κατά μήκος των ηπειρωτικών περιθωρίων, εξαρτάται κυρίως από τη στάθμη της θάλασσας, την απόσταση από το σημείο εισροής του ποταμού και την ακτή, το πλάτος της ηπειρωτικής κρηπίδας, τα επιφανειακά ρεύματα, το βάθος του νερού, την κατεύθυνση του ανέμου και τις φυσικοχημικές και βιολογικές συνθήκες, ιδιαίτερα την παραγωγικότητα, και την τοπική τεκτονική (Swift, 1974; Hill et al., 2007).

Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω παραγόντων (σχετικής στάθμης της θάλασσας και ρυθμού απόθεσης ή ιζηματογένεσης) μπορεί να καθορίσει τις συνθήκες που καταλήγουν σε *διάβρωση*, *ισορροπία* και *απόθεση* ιζημάτων, ορίζοντας και τα αντίστοιχα περιβάλλοντα:

Τα *περιβάλλοντα καθαρής διάβρωσης* (environments of net erosion) περιλαμβάνουν τυπικά χερσαία περιβάλλοντα σε ορεινές περιοχές της Γης. Ένα περιβάλλον καθαρής διάβρωσης χαρακτηρίζεται από διεργασίες απογύμνωσης. Όταν λαμβάνει χώρα ιζηματογένεση, αυτή έχει τοπικό και εφήμερο χαρακτήρα και οφείλεται, κυρίως, σε λασποροές ή ξαφνικές πλημμύρες.

Τα *περιβάλλοντα καθαρής απόθεσης* (environments of net deposition) περιλαμβάνουν θαλάσσιες λεκάνες, λίμνες, ακτές. Αυτό που ενδιαφέρει στα ιζηματογενή περιβάλλοντα απόθεσης είναι υπό ποιες υδροδυναμικές, βιολογικές και χημικές συνθήκες αποτέθηκε ένα συγκεκριμένο ιζηματογενές πέτρωμα. Ειδικότερα, για τα κλαστικά ιζήματα, το περιβάλλον ιζηματογένεσης είναι ο χώρος που καταλήγουν, μετά τη μεταφορά τους. Αυτό το περιβάλλον διαμορφώνει την υφή, τη δομή και τη γεωμετρία των ιζημάτων, ενώ η σύστασή τους καθορίζεται από το ανάγλυφο, τη λιθολογία και το κλίμα που επικρατεί στη μητρική πηγή. Όσον αφορά τα χημικά ιζήματα, το περιβάλλον ιζηματογένεσης αποτελεί τον χώρο, όπου γίνονται όλες οι διεργασίες που καταλήγουν στον σχηματισμό των χημικών πετρωμάτων.

Τέλος, υπάρχει και μια τρίτη κατηγορία, τα *περιβάλλοντα ισορροπίας* (environments of equilibrium) στα οποία περιλαμβάνονται περιοχές στις οποίες για μακρό χρονικό διάστημα δεν επικρατεί ούτε διάβρωση ούτε απόθεση. Λόγω της σταθερότητάς τους, τα περιβάλλοντα αυτά υφίστανται συχνά έντονη χημική εξαλλοίωση. Στην ξηρά, τα περιβάλλοντα ισορροπίας αντιπροσωπεύονται από μεγάλα πανεπίπεδα στο εσωτερικό των ηπείρων (King, 1962), λατερίτες και βωξίτες καθώς και συμπυκνωμένους ορίζοντες «hard grounds».

Στο γεωλογικό αρχείο, το περιβάλλον απόθεσης είναι αυτό που αφήνει πίσω του τα αποτυπώματά του στο ιζήμα και δημιουργεί ιζηματογενείς ακολουθίες. Έτσι, ως γεωλόγοι, ενδιαφερόμαστε περισσότερο για το περιβάλλον απόθεσης παρά για το περιβάλλον διάβρωσης των ιζημάτων.

Επιπλέον, ο συνδυασμός των προαναφερθέντων παραγόντων (σχετικής στάθμης της θάλασσας και ρυθμού απόθεσης ή ιζηματογένεσης) μας φέρνει αντιμέτωπους με τους όρους «*επίκλυση*» και «*απόσυρση*».

Η *επίκλυση* μπορεί πολύ απλά να οριστεί ως η διεργασία μετανάστευσης της ακτογραμμής προς την ξηρά, ενώ η *απόσυρση* είναι η αντίθετη διεργασία. Τα αποτελέσματα επίκλυσης ή απόσυρσης μπορεί να είναι τοπικά ή παγκόσμια κλίμακα και μπορεί να οφείλονται σε μια ποικιλία αιτιών. Η μετακίνηση της ακτογραμμής σε συνδυασμό με άλλα φαινόμενα όπως είναι η βύθιση, προκαλεί μια σειρά αποθετικών σχηματισμών. Η απόσυρση είναι το αποτέλεσμα της πτώσης του θαλάσσιου επιπέδου ή/και του υψηλού βαθμού απόθεσης ενώ η επίκλυση προκαλείται από την ανύψωση του θαλάσσιου επιπέδου και τον χαμηλό ρυθμό ιζηματογένεσης. Όταν η στάθμη της θάλασσας παραμένει σταθερή, δηλ. δεν έχουμε καθαρή απόθεση ή διάβρωση, η ακτογραμμή παραμένει γεωγραφικώς στη θέση της.

Επιπλέον, οι σχετικές θέσεις της θαλάσσιας στάθμης επηρεάζονται είτε από την τεκτονική ανύψωση ή ταπεινώση της ξηράς είτε από την ανύψωση ή πτώση του θαλάσσιου επιπέδου. Η πρώτη διεργασία συνήθως έχει τεκτονική προέλευση και είναι τοπικού χαρακτήρα. Αντίθετα, η δεύτερη διεργασία έχει ευστατικό χαρακτήρα εάν έχει παγκόσμια εξάπλωση και δημιουργείται από την ανάπτυξη ή την καταστροφή των μεσοωκεάνιων ράχων ή των πολικών καλυμμάτων πάγου.

#### 4.2.1 Ταξινόμηση ιζηματογενών περιβαλλόντων

Κατά καιρούς, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι τύποι ταξινόμησης ιζηματογενών περιβαλλόντων. Ενδεικτικά αναφέρουμε των Barrell (1906), Twenhofel (1950), Dunbar & Rodgers (1957), Pettijohn (1975) και Selley (1970).

Απόλυτος διαχωρισμός ανάμεσα σε δύο γειτονικά περιβάλλοντα δεν μπορεί να γίνει στη φύση και για αυτόν τον λόγο προκύπτουν μεικτοί τύποι που είναι πολύ δύσκολο να ταξινομηθούν. Αν λάβουμε υπόψη και τους τοπικούς παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό απόθεσης, τότε είναι δύσκολος ο καθορισμός τύπων περιβαλλόντων όπως αυτά ορίστηκαν αρχικά.

Γενικά, όμως, γίνεται διάκριση σε δύο μεγάλες κατηγορίες περιβαλλόντων: το *ηπειρωτικό* που βρίσκεται στον χώρο της ξηράς και το *θαλάσσιο*, που βρίσκεται στον χώρο της θάλασσας. Οι δύο αυτές κατηγορίες περιβαλλόντων οριοθετούνται από τη ζώνη της ακτής που ανήκει κατά ένα μέρος στο ηπειρωτικό και κατά ένα μέρος στο θαλάσσιο περιβάλλον. Επειδή, μάλιστα, το πλάτος αυτής της ζώνης είναι, πολλές φορές, σημαντικό και γίνονται μέσα σε αυτή ποικίλες διεργασίες, θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει μια μεταβατική κατάσταση και χαρακτηρίζεται ως *μεταβατικό περιβάλλον*.

Έτσι λοιπόν, οι κύριες κατηγορίες περιβαλλόντων αντιστοιχούν γενικά σε *ηπειρωτικά, θαλάσσια και ενδιάμεσα, μεικτά ή μεταβατικά περιβάλλοντα* (στα όρια μεταξύ ξηράς και θάλασσας). Καθεμία από αυτές τις τρεις κατηγορίες υποδιαιρείται με τη σειρά της, σύμφωνα με κριτήρια που εξαρτώνται από τη μορφολογία του ιζηματογενούς χώρου αλλά και από το κλίμα (Εικόνα 4.3).

Εξυπακούεται, ότι σε καθέναν από αυτούς τους τύπους περιβάλλοντος, η ιζηματογένεση εξαρτάται, σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό, ανάλογα με την περίπτωση, από:

- *φυσικούς παράγοντες* (ταχύτητα, διεύθυνση, μεταβολή ανέμων, κυμάτων, τρεχούμενου νερού, κλίμα, καιρός του περιβάλλοντος σε όλες τις αμυδρές μεταβολές της θερμοκρασίας, βροχόπτωσης, χιονόπτωσης και υγρασίας),
- *χημικούς παράγοντες* (σύσταση των νερών που καλύπτουν ένα υποθαλάσσιο ιζηματογενές περιβάλλον και γεωχημεία των πετρωμάτων της λεκάνης απορροής ενός χερσαίου περιβάλλοντος),
- *βιολογικούς παράγοντες* (πανίδα και χλωρίδα) και
- *γεωλογικούς και γεωγραφικούς χαρακτήρες* των γειτονικών χώρων αλλά και του ίδιου χώρου απόθεσης, εννοώντας τα εμφανιζόμενα πετρώματα, την ενδεχόμενη τεκτονο-ορογενετική αστάθεια, το ανάγλυφο, το υψόμετρο κ.λπ.

Ειδικότερα, τα *ηπειρωτικά περιβάλλοντα* χαρακτηρίζονται από την απουσία της θάλασσας και της άμεσης επίδρασής της και διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

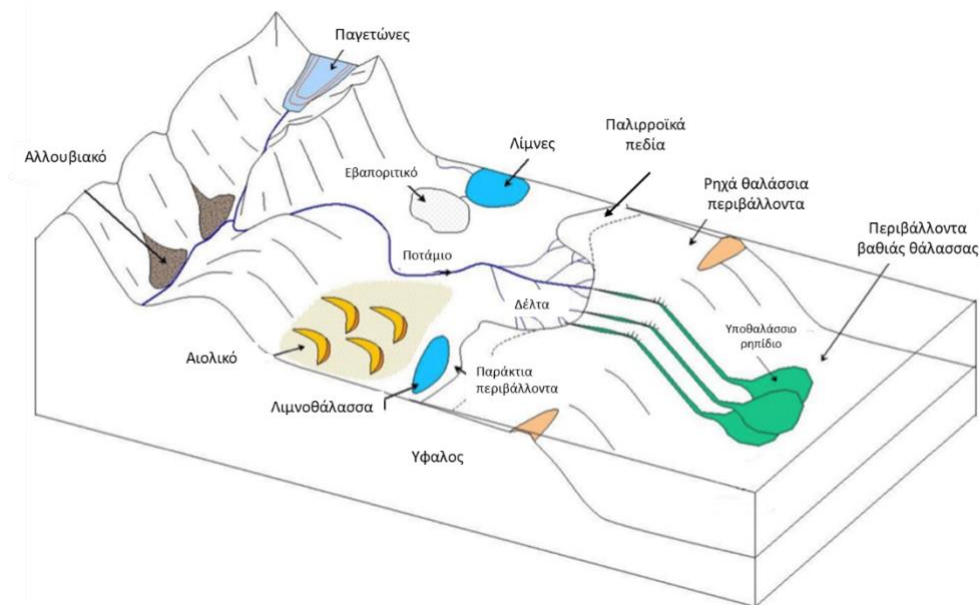
- *Χερσαία περιβάλλοντα* στα οποία η ιζηματογένεση πραγματοποιείται σε ξηρό περιβάλλον ή τουλάχιστον χωρίς συνεχή παρέμβαση του ύδατος, όπως για παράδειγμα το ερημικό περιβάλλον.
- *Υδρόβια ή υδάτινα περιβάλλοντα* στα οποία η ιζηματογένεση ελέγχεται κυρίως από την παρουσία του ύδατος και από την ανάλογη κινητικότητά του. Τα περιβάλλοντα αυτά διακρίνονται σε αλλουβιακά ή ποτάμια, λιμναία και ελώδη.
- *Παγετώδη περιβάλλοντα* τα οποία χαρακτηρίζονται από την επίδραση της στερεάς κατάστασης του ύδατος.

Τα *μεικτά ή μεταβατικά περιβάλλοντα* παρατηρούνται στα όρια ξηράς και θάλασσας όπου παρεμβαίνουν πολυάριθμοι παράγοντες, οι οποίοι εξαρτώνται κυρίως τόσο από τον τύπο της ακτής όσο και από τον τύπο της θάλασσας. Π.χ. όταν η ακτή είναι χαμηλή συναντάμε σε αυτή τις γνωστές ακρογιαλιές (με θίνες), ή λιμνοθάλασσες. Αντίθετα, όταν η ακτή είναι ρηγματωμένη, επικρατούν κυρίως οι κρημνοί. Σε αυτά τα περιβάλλοντα κυρίαρχο ρόλο έχουν οι παλίρροιες. Όταν αυτές απουσιάζουν, το μεικτό περιβάλλον είναι πολύ περιορισμένο. Αντίθετα, όταν επικρατούν παλίρροιες, τότε το μεταβατικό περιβάλλον επεκτείνεται και μπερδεύεται με τη ζώνη παλιρροιακής δράσης.

Τα *θαλάσσια περιβάλλοντα* περιλαμβάνουν την παράκτια περιοχή και την παρακείμενη σε αυτή θαλάσσια ζώνη, τις εκβολές των ποταμών, το τμήμα της ανοιχτής θάλασσας, τον θαλάσσιο πυθμένα και τέλος, όλα τα θαλάσσια οικοσυστήματα.

Τα ιζηματογενή περιβάλλοντα ερμηνεύονται με βάση τα παρακάτω χαρακτηριστικά πετρωμάτων:

- υφή,
- ιζηματογενείς δομές,
- χρώμα,
- απολιθώματα.



**Εικόνα 4.3** Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τους κύριους τύπους ιζηματογενών περιβαλλόντων (πηγή: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SedimentaryEnvironment.jpg> Mikenorton, άδεια χρήσης CC BY-SA 3.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>, via Wikimedia Commons).

Η παραπάνω ταξινόμηση παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς στη χρήση της σε εξειδικευμένες ιζηματολογικές μελέτες, εξαιτίας της παράλειψης ενός σημαντικού αριθμού περιβαλλόντων όπως είναι τα σπήλαια και τα αβυσσικά περιβάλλοντα. Επιπλέον η συγκεκριμένη ταξινόμηση εφαρμόζεται δύσκολα στις αποθέσεις βαθιάς θάλασσας αφού είναι δύσκολο να βρεθεί το βάθος του νερού από το οποίο προήλθαν οι θαλάσσιες αποθέσεις και για αυτόν τον λόγο αυτές ενσωματώνονται και μελετώνται με τα αβαθή θαλάσσια περιβάλλοντα.

### 4.3 Ιζηματογενής Φάση - Ορισμός

Η έννοια της λέξης «φάση» συζητείται ευρέως στη γεωλογία και χρησιμοποιείται επίσης ευρέως στην ιζηματολογία και για τον λόγο αυτό μπορεί να προκαλέσει σύγχυση.

Ο όρος «φάση» πρωτοεμφανίστηκε και χρησιμοποιήθηκε στην ηπειρωτική Ευρώπη, κατά τον δέκατο ένατο αιώνα από τον Gressly (1838) ο οποίος την χρησιμοποίησε για να περιλάβει όλα τα λιθολογικά και παλαιοντολογικά χαρακτηριστικά μιας στρωματογραφικής ενότητας. Ευρέως, όμως, άρχισε να χρησιμοποιείται από τη δεκαετία του 1930.

Από τότε ο όρος έχει αποτελέσει αντικείμενο σημαντικής συζήτησης και η σημασία του κατά καιρούς αλλάζει και προσαρμόζεται σε νέα δεδομένα (Moore 1949; Teichert 1958; Weller 1960; Krumbein & Sloss 1963).

Στις 11 Νοεμβρίου 1948, οργανώθηκε ένα συνέδριο από τη Γεωλογική Εταιρεία της Αμερικής, στη Νέα Υόρκη, με κύριο αντικείμενο τις «*ιζηματογενείς φάσεις στη διάρκεια του γεωλογικού χρόνου*». Το συνέδριο αυτό αποτέλεσε ένα γεγονός ορόσημο, το αποτέλεσμα του οποίου ήταν δημοσιεύσεις της Γεωλογικής Εταιρείας της Αμερικής (Longwell, 1949) που σηματοδότησαν τις απαρχές αρκετών σημαντικών εξελίξεων. Σημαντική είναι η δημοσίευση του Moore (1949), ο οποίος περιγράφει και απεικονίζει, με τη χρήση ενός τριδιάστατου διαγράμματος, τις διάφορες φάσεις που υπάρχουν σε ένα σύγχρονο συγκρότημα ανθρακικών υφάλων στην Ιάβα, από το οποίο προέκυψε ο ακόλουθος ορισμός:

*«Οι ιζηματογενείς φάσεις είναι, στην πραγματικότητα, ανεξάρτητα μέρη διαφορετικής φύσης, που ανήκουν σε οποιοδήποτε γενετικά σχετιζόμενο σώμα ιζηματογενών αποθέσεων».*

Ο Ρώσος ιζηματολόγος Рухин στο εγχειρίδιό του «*Αρχές της πετρολογίας ιζηματογενών πετρωμάτων*», το 1953, αναφέρει ότι: «*με τον όρο «φάση» εννοούμε την τακτική διεύθυνση ιζημάτων που μπορούν να εκφράσουν τα λιθολογικά και παλαιοντολογικά χαρακτηριστικά τους. Ως εκ τούτου, οι φάσεις είναι η υλική έκφραση των συνθηκών σχηματισμού ιζημάτων*».

Μία δεκαετία αργότερα, ο Teichert (1958) αναφέρει:



«Η λέξη «φάση» είναι μια λατινική λέξη που σημαίνει πρόσωπο, σχήμα, εμφάνιση, όψη, κατάσταση. Πρόκειται όχι τόσο για κάτι συγκεκριμένο, όσο για μια αφηρημένη έννοια. Η λέξη εισήχθη στη γεωλογική βιβλιογραφία από τον Nicolaus Steno (1669, σελ. 68–75) για ολόκληρη την έκταση ενός μέρους της επιφάνειας της Γης κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου διαστήματος του γεωλογικού χρόνου».

Ο ίδιος ο Teichert δίνει για τη «φάση» τον ακόλουθο συνοπτικό ορισμό:

«...πρόκειται για το άθροισμα των λιθολογικών και παλαιοντολογικών χαρακτηριστικών ενός ιζηματογενούς πετρώματος από το οποίο μπορεί να συναχθεί η προέλευση και το περιβάλλον σχηματισμού του».

Σύμφωνα με τον ορισμό του American Geosciences Institute-AGI (1984), «φάση ονομάζεται η όψη, η εμφάνιση και τα χαρακτηριστικά ενός πετρώματος, που συνήθως αντικατοπτρίζουν τις συνθήκες προέλευσής του και το διαφοροποιούν από παρακείμενες ή συναφείς μονάδες πετρώματος».

Ο Boggs (2001) αναφέρει ότι «φάση ονομάζεται το σύνολο των χαρακτηριστικών ενός ιζηματογενούς σώματος (χρώμα, σύσταση, στρώση, υφή, απολιθώματα, ιζηματογενείς δομές) που προκύπτει από την επίδραση συγκεκριμένων φυσικών, χημικών και βιολογικών παραμέτρων ούτως ώστε να παραχθεί ιζηματογενές σώμα με συγκεκριμένη υφή, δομή, και σύσταση», ενώ ο Nichols (2001) δηλώνει: «η φύση του υλικού που έχει αποτεθεί σε έναν συγκεκριμένο χώρο, καθορίζεται από τις φυσικές, χημικές ή βιολογικές διεργασίες που έλαβαν χώρα κατά τον σχηματισμό, τη μεταφορά και απόθεση των ιζημάτων. Αυτές οι διεργασίες καθορίζουν επίσης το περιβάλλον απόθεσης». Με λίγα λόγια με τον όρο «φάση» εννοούμε τα συνολικά χαρακτηριστικά υφής, σύστασης και δομής μιας ιζηματογενούς απόθεσης που προκύπτουν από τη συσσώρευση και μετέπειτα τροποποίηση σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον.

Ο όρος «φάση» είναι σημαντικός για την περιγραφή των ιζηματογενών πετρωμάτων. Επιπλέον, η μελέτη των φάσεων και η διάταξη ή η συσχέτισή τους πλευρικά και κατακόρυφα είναι ο μόνος τρόπος για να προσδιοριστεί και τεκμηριωθεί ένα περιβάλλον απόθεσης και να ανακατασκευαστεί η παλαιογεωγραφία.

Η λέξη «φάση» έχει περιγραφική αλλά και ερμηνευτική έννοια, και η ίδια η λέξη μπορεί να έχει είτε ένα μοναδικό είτε πολλαπλό νόημα. Ωστόσο, όπως ανέφερε ο Διεθνής Οδηγός Στρωματογραφίας - International Stratigraphic Guide (1976): «Ο γενικός όρος «φάση» έχει καταπονηθεί πολύ. [...] Εάν χρησιμοποιείται ο όρος, είναι επιθυμητό να διευκρινιστεί το συγκεκριμένο είδος φάσης στο οποίο γίνεται αναφορά». Το Γλωσσάρι της Γεωλογίας, που επιμελήθηκαν οι Bates και Jackson (1987), υποδιαίρει τις φάσεις σε τύπους:

- *Λιθοφάση* - η όψη, η εμφάνιση και τα χαρακτηριστικά μιας μονάδας πετρώματος, που συνήθως αντικατοπτρίζουν τις συνθήκες προέλευσής της.
- *Βιοφάση* - Ένα πέτρωμα που διακρίνεται με βάση το περιεχόμενό του σε απολιθώματα.
- *Ιζηματογενής Φάση* - Ένα χαρτογραφούμενο, τοπικά περιορισμένο τμήμα ενός λιθοστρωματογραφικού σώματος, που διαφέρει ως προς τη λιθολογία, την ιζηματογενή δομή ή το περιεχόμενο απολιθωμάτων από άλλα στρώματα που έχουν αποτεθεί ταυτόχρονα και σε λιθολογική συνέχεια.
- *Περιβαλλοντική Φάση* - Το περιβάλλον ή η περιοχή στην οποία σχηματίστηκε ένα πέτρωμα.
- *Πετρογραφική Φάση* - Ένας συγκεκριμένος τύπος πετρώματος, που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον ή τρόπο προέλευσης.
- *Παλαιογεωγραφική Φάση* - Πετρώματα που ορίζονται με βάση την παλαιογεωγραφική τους θέση.

Έτσι λοιπόν, χρησιμοποιούμε όρους όπως «αμμώδεις φάσεις», «αλυδώδεις φάσεις», «ανθρακικές φάσεις» όταν περιγράφουμε ιδιότητες των πετρωμάτων, που μπορούν να παρατηρηθούν ή να αναλυθούν αντικειμενικά. Χρησιμοποιούμε όρους όπως «φάσεις ριγών νερών», «φάσεις βαθιών νερών», «τουρβιδιτικές φάσεις», «δελταϊκές φάσεις», «παλιρροιακές φάσεις», «αιολικές φάσεις», «φάσεις υφάλου» κ.λπ., ανάλογα με το περιβάλλον που αντιπροσωπεύουν τα πετρώματα. Το ίδιο το πέτρωμα μπορεί να περιγραφεί σύμφωνα με διάφορα είδη φάσεων.

Σε αυτά τα παραδείγματα, η λέξη «φάση» αντιπροσωπεύει μια ερμηνεία και επομένως δεν είναι πολύ κατάλληλη για την αντικειμενική περιγραφή ιζηματογενών πετρωμάτων. Για τον λόγο αυτό είναι σημαντικό να καθορίσουμε τα αντικειμενικά κριτήρια (παρατηρήσεις) στα οποία βασίζουμε τις ερμηνείες μας. Οι παράμετροι, λοιπόν, που καθορίζουν μια φάση είναι οι ακόλουθες:

- η γεωμετρία, η οποία αφορά τα μορφολογικά χαρακτηριστικά μιας ιζηματογενούς απόθεσης, όπως αυτά καθορίζονται από τεκτονικά δεδομένα της λεκάνης ιζηματογένεσης,

- η παλαιοντολογία, η οποία αφορά τα χαρακτηριστικά των οργανισμών που υπάρχουν μέσα στα ιζήματα και αποκαλύπτουν το φυσικό, χημικό και βιολογικό περιβάλλον της λεκάνης ιζηματογένεσης,
- η λιθολογία, η πετρολογική-ορυκτολογική σύσταση των ιζηματογενών αποθέσεων μιας λεκάνης,
- η υφή και η δομή,
- τα παλαιορεύματα.

Η ερμηνεία μιας φάσης σε σχέση με το περιβάλλον απόθεσης είναι συχνά πολύ δύσκολη, καθώς λίγα κριτήρια είναι σαφώς διαγνωστικά για ένα συγκεκριμένο περιβάλλον. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι χρήσιμη η χρήση στατιστικών μεθόδων για τη διάκριση μεταξύ διαφορετικών φάσεων και για την περιγραφή ακολουθιών φάσεων.

### 4.3.1 Εννοιολογικό πλαίσιο

*Ανάλυση φάσεων* είναι η ερμηνεία των στρωμάτων σε σχέση με τα αποθετικά περιβάλλοντα (ή αποθετικά συστήματα), η οποία βασίζεται κυρίως σε ένα ευρύ φάσμα παρατηρήσεων. Η ανάλυση φάσεων αποσκοπεί στην ερμηνεία των πετρωμάτων και των ιζημάτων με στόχο τη διερεύνηση και ανακατασκευή των διεργασιών που ευθύνονται για την αρχική απόθεση. Πρόκειται για μια πολυδιάστατη προσέγγιση που εμπλέκει όλες τις παραμέτρους (φυσικές, χημικές και βιολογικές).

Με τον όρο *συγκέντρωση φάσεων* εννοούμε μια συλλογή από πολλαπλές, γενετικά σχετιζόμενες φάσεις που σχηματίζονται μέσα σε ένα συγκεκριμένο αποθετικό σύστημα. Οι συγκεντρώσεις φάσεων βοηθούν στην ερμηνεία περιβαλλόντων περισσότερο από τη μεμονωμένη εξέταση κάθε φάσης χωριστά. Ορισμένες συγκεντρώσεις φάσεων απαντώνται επαναλαμβανόμενα στο στρωματογραφικό αρχείο και, ως εκ τούτου, έχουν λάβει άτυπα ονόματα όπως π.χ. «η ακολουθία Bouma».

Η συγκέντρωση φάσεων αποτελείται από φάσεις οι οποίες εμφανίζονται σε συνδυασμό, και τυπικά αντιπροσωπεύουν ένα αποθετικό περιβάλλον (πολύ λίγες μεμονωμένες φάσεις είναι διαγνωστικές ενός συγκεκριμένου περιβάλλοντος). Τα περιβάλλοντα απόθεσης αποτελούνται γενικά από πολλαπλά υποπεριβάλλοντα. Οι φάσεις ποικίλουν σε όλο το περιβάλλον για να αντικατοπτρίζουν τη μετάβαση μεταξύ των υποπεριβαλλόντων. Γειτονικές φάσεις αντιπροσωπεύουν γειτονικά περιβάλλοντα. Ο συνδυασμός (η συγκέντρωση) ορισμένων φάσεων είναι χαρακτηριστική συγκεκριμένων περιβαλλόντων απόθεσης. Η κατανόηση αυτών των συσχετίσεων καταλήγει στη δημιουργία μοντέλων φάσεων.

Οι *ακολουθίες φάσεων* είναι επαναλαμβανόμενες (στο γεωλογικό αρχείο) συγκεντρώσεις φάσεων που εμφανίζονται με μια συγκεκριμένη σειρά, λόγω της εγγενούς χρονικής μεταβολής των συνθηκών απόθεσης συγκεκριμένων ιζηματογενών περιβαλλόντων. Πρόκειται για μια σειρά φάσεων στην οποία η κάθε φάση περνά σταδιακά στην επόμενη. Η ακολουθία μπορεί να οριοθετείται στην κορυφή και στη βάση της από μια απότομη ή διαβρωσιγενή επιφάνεια ή από ένα hiatus το οποίο αντιπροσωπεύεται από την απόθεση hardground. Μια ακολουθία μπορεί να υπάρχει μόνο μια φορά ή και να επαναλαμβάνεται (κυκλική).

Στα κλαστικά περιβάλλοντα, δύο κύριοι τύποι ακολουθιών υπάρχουν (Εικόνα 4.4) (α) ακολουθίες στις οποίες το μέγεθος των κόκκων αυξάνει (*θετική ακολουθία*) πάνω από μια απότομη ή διαβρωσιγενή βάση και (β) ακολουθίες όπου το μέγεθος των κόκκων ελαττώνεται προς τα πάνω (*αρνητική ακολουθία*) έως ότου συναντήσει μια απότομη ή διαβρωσιγενή επιφάνεια.



**Εικόνα 4.4** Θετική ακολουθία φάσεων Mancos Shale, Ανώτερο Κρητιδικό, San Juan County, New Mexico, USA  
(πηγή: James St. John, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=84516044> ).

Το μέγεθος των κόκκων αποτελεί ένα πολύ απλό μέτρο για την εκτίμηση της δύναμης της ροής την ώρα της απόθεσης. Έτσι λοιπόν μια θετική ακολουθία δείχνει συνήθως μια αύξηση της δύναμης της ροής.

Οι ακολουθίες φάσεων οφείλονται:

- σε ιζηματολογικούς παράγοντες όπως είναι οι τοπικές μεταβολές στο περιβάλλον (π.χ. πλευρική μετατόπιση ποταμών),
- σε εξωτερικούς παράγοντες όπως είναι οι παλινδρομήσεις της στάθμης της θάλασσας, αλλαγές κλίματος ή τεκτονικές κινήσεις, οι οποίοι επηρεάζουν την τροφοδοσία ιζήματος.

Θετικές και αρνητικές ακολουθίες μπορεί να συμβαίνουν σε διάφορες κλίμακες ακόμα και στην κλίμακα ενός μοναδικού στρώματος, όπως π.χ. τα διαβαθμισμένα τουρβιδιτικά στρώματα.

Συχνά ορισμένα τμήματα μιας ακολουθίας λείπουν. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε σε μη-απόθεση υλικού ή σε διάβρωση αιολική, παγετώδη, ή από ποτάμια ή από κύματα, π.χ. οι ασβεστόλιθοι και οι εβαπορίτες διαλυτοποιούνται σχετικά εύκολα.

Τα μοντέλα φάσεων είναι σχηματικές, τριδιάστατες αναπαραστάσεις συγκεκριμένων αποθετικών περιβαλλόντων οι οποίες χρησιμοποιούνται σαν πρότυπα για ερμηνεία και πρόβλεψη. Γενικά, το μοντέλο φάσεων ή φασικό μοντέλο λειτουργεί σαν μια περίληψη του αποθετικού περιβάλλοντος και των παραγώνων του και χρησιμοποιείται σαν ένα όργανο σύγκρισης των διαφόρων περιβαλλόντων καθώς και για βοήθημα σε μελλοντικές παρατηρήσεις.

Τα μοντέλα φάσεων είναι στατικά, με την έννοια ότι εστιάζουν πολύ στις αυτογενείς διεργασίες και αποθέσεις, ακολουθώντας τον νόμο του Walther. Θεωρούνται ως πρότυπα σε περιπτώσεις σύγκρισης περιβαλλόντων, ως πλαίσιο και οδηγός για μελλοντικές παρατηρήσεις, ως προάγγελος νέων γεωλογικών συνθηκών, και συνιστούν μια ολοκληρωμένη βάση ερμηνείας του συστήματος που εκπροσωπούν. Βασίζονται στις αρχές ότι οι φυσικές διεργασίες παραμένουν σταθερές στη διάρκεια του χρόνου και ότι υπάρχει περιορισμένος αριθμός αποθετικών συστημάτων.

Σύμφωνα με τον Walker (1984), τα μοντέλα φάσεων πρέπει να πληρούν 4 λειτουργίες:

- πρέπει να ενεργούν ως πρότυπα, για σκοπούς σύγκρισης,
- πρέπει να ενεργούν ως δομή και οδηγός για μελλοντικές παρατηρήσεις,
- πρέπει να ενεργούν ως ένας πρόλογος σε νέες γεωλογικές θέσεις,
- πρέπει να ενεργούν ως βάση για την ερμηνεία των περιβαλλόντων.

Όπως συμβαίνει σε όλα τα μοντέλα, η χρήση χωρίς κριτικό έλεγχο μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια πληροφοριών ή στην ελλιπή ερμηνεία. Να σημειώσουμε, επίσης, ότι πολλά από τα μοντέλα φάσεων επηρεάζονται κι από άλλους παράγοντες όπως είναι οι κλιματικές και τεκτονικές διαφοροποιήσεις, οι οποίες θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να διερευνηθούν.

Οι μηχανισμοί ή αλλιώς οι διεργασίες που εμπλέκονται στη δημιουργία φάσεων κατηγοριοποιούνται ως εξής:

*Αλλογενείς (αλλοκυκλικοί) μηχανισμοί* είναι οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούν δυνατή επιρροή στις αποθετικές διεργασίες. Περιλαμβάνουν μεταβολές της θαλάσσιας στάθμης, κλιματικές μεταβολές που επηρεάζουν την παροχή ιζήματος και τεκτονικές κινήσεις.

*Αυτογενείς (αυτοκυκλικοί) μηχανισμοί* λειτουργούν μέσα σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον απόθεσης και προκαλούν μεταβολές παρόλο που οι αλλογενείς μηχανισμοί μπορεί να παραμένουν σταθεροί.

Τις τελευταίες δεκαετίες μεγάλη έμφαση δίνεται στους αλλογενείς μηχανισμούς.

Μέσα στον γενικό όρο «φάση» εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως δύο στρωματογραφικοί όροι του 19ου αιώνα που έχουν μια γενικευμένη έννοια που περιλαμβάνει τα λιθολογικά χαρακτηριστικά, το περιβάλλον απόθεσης και το τεκτονικό καθεστώς, η φάση φλύσχη και η φάση μόλασσας.

*Φάση Φλύσχη* νοούνται θαλάσσια ιζήματα, τυπικά τουρβιδίτες και άλλες αποθέσεις ροής βαρύτητας ιζημάτων, που σχηματίζονται σε τεκτονικά ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια.

*Φάση Μόλασσας* συνιστούν τα μη θαλάσσια και αβαθή θαλάσσια ιζήματα, κυρίως ψαμμίτες και κροκαλοπαγή. Διακρίνεται σε μόλασσα υψηλής αλμυρότητας, υφάλμυρη και γλυκών υδάτων, καθώς και μόλασσα που δημιουργήθηκε σε χερσαίο περιβάλλον.

Και οι δύο αυτοί τύποι φάσης αποτελούν μεγάλες στρωματογραφικές μονάδες πολύ μεγάλου πάχους (εκατοντάδων χιλιάδων μέτρων) και έκτασης εκατοντάδων ή χιλιάδων χιλιομέτρων. Παρόλα αυτά, η χρήση των όρων «φλύσχη» και «μόλασσα» θεωρείται στις μέρες μας ξεπερασμένη διότι εγείρει ποικίλες ασάφειες.

### 4.3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη φύση και κατανομή των φάσεων

Η κατανομή των φάσεων εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων, όπως είναι οι εξής:

- ιζηματογενείς διεργασίες,
- παροχή ιζήματος,
- κλίμα,
- τεκτονική,
- αλλαγές της στάθμης της θάλασσας,
- βιολογική δραστηριότητα,
- χημισμός υδάτων,
- ηφαιστειότητα.

Από αυτούς τους παράγοντες, οι πιο σημαντικοί είναι το κλίμα και η τεκτονική.

Το κλίμα θεωρείται ένας σπουδαίος και ανεξάρτητος παράγοντας που ελέγχει την αποσάθρωση, τη διάβρωση και την παροχή ιζήματος. Οι μεταβολές στο ποσοστό παροχής κλαστικού υλικού μπορεί να οφείλονται στις μεταβολές των κλιματικών συνθηκών, με την έννοια των εναλλαγών σχετικώς πιο υγρών και πιο ξηρών περιόδων, με αποτέλεσμα τις μεταβολές στην ένταση εκφόρτωσης και αποσάθρωσης υλικού (Ντρίνια, 1998). Η μεταβολή του κλίματος από υγρό σε πιο θερμό-ξηρό, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη μετατροπή της επικρατούσας κλαστικής ιζηματογένεσης (π.χ. ποταμοχειμάριας αποθέσεις – δελταϊκά συστήματα) σε μη κλαστική ιζηματογένεση (σχηματισμός ρηχής θάλασσας ανθρακικής πλατφόρμας). Γενικά το κλίμα είναι κρίσιμο στα ηπειρωτικά και ρηχής θάλασσας περιβάλλοντα, ενώ δεν επηρεάζει τόσο άμεσα τις λεκάνες βαθιάς θάλασσας. Επιπλέον, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο και αποτελεί κύριο παράγοντα στην εναέρια αποσάθρωση και διάβρωση κι έχει άμεση σχέση με τη σύσταση των χερσαίων κλαστικών ιζημάτων. Το κλίμα είναι καθοδηγητικός παράγοντας για τον σχηματισμό ορισμένων λιθολογιών, όπως π.χ. εβαπορίτες και ασβεστόλιθοι.

Η τεκτονική είναι πιο σημαντική στα ηπειρωτικά και περιβάλλοντα βαθιάς θάλασσας. Ο τεκτονισμός έχει μεγάλη σημασία από τη στιγμή που καθορίζει το καθεστώς απόθεσης, εάν δηλ. αυτό αποτελεί μια σταθερή κρατονική λεκάνη ή ένα γεωσύγκλινο. Γενικά, ο τεκτονισμός ερμηνεύεται με μοντέλα τεκτονικής πλακών, έτσι μπορούμε να συμπεράνουμε εάν η απόθεση έλαβε χώρα σε ηπειρωτικό περιθώριο, ωκεάνιο πυθμένα ή σε τόξο. Ο ρυθμός καταβύθισης ή ανύψωσης, η σεισμική δραστηριότητα και η εμφάνιση των ηφαιστειών, εξαρτώνται από τον τεκτονισμό και αντανακλάται στο αποτεθειμένο ιζημα.

Αναφορικά με τους υπόλοιπους παράγοντες που επιδρούν στην κατανομή των φάσεων, οι ιζηματογενείς διεργασίες αποτυπώνονται περισσότερο στα δελταϊκά και στα ποτάμια περιβάλλοντα. Τα ιζήματα αποτίθενται

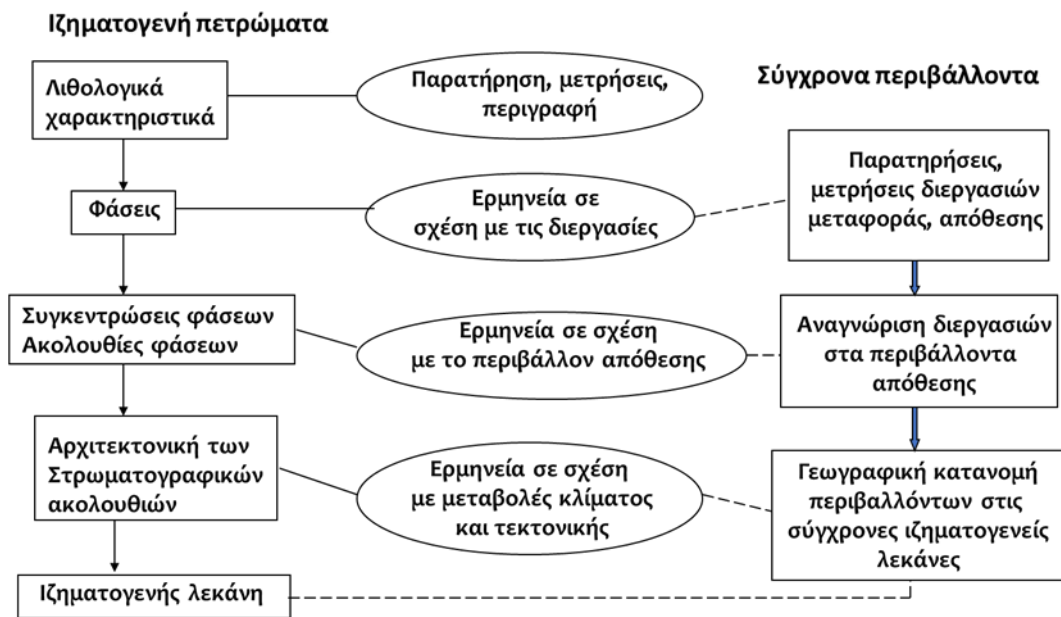
εξαιτίας του ανέμου, της ροής του νερού, παλιρροιακών ρευμάτων και ρευμάτων θυέλλης, κυμάτων, ροών ιζήματος και νερού όπως τα τουρβιδιτικά ρεύματα και ροών κορημάτων κ.λπ. Όλες αυτές οι διεργασίες απόθεσης αφήνουν τα ίχνη τους στο ιζημα με τη μορφή ιζηματογενών δομών και υφών. Ορισμένες διεργασίες είναι τυπικές ενός περιβάλλοντος, ενώ άλλες εμφανίζονται σε περισσότερα από ένα περιβάλλοντα.

Το βάθος του νερού, ο βαθμός αναταραχής και η αλμυρότητα είναι σπουδαίες φυσικές ιδιότητες υποθαλασσιών περιβαλλόντων που επηρεάζουν κι ελέγχουν τους οργανισμούς που ζουν πάνω ή μέσα στο ιζημα ή σχηματίζουν ιζημα. Χημικοί παράγοντες όπως το Eh και το pH της επιφανείας και του νερού των πόρων επηρεάζουν τους οργανισμούς κι ελέγχουν τον ορυκτό διαποτισμό.

Η παροχή ιζήματος και η οργανική παραγωγικότητα ελέγχονται άμεσα από το κλίμα και τον τεκτονισμό. Χαμηλή παροχή ιζήματος ευνοεί τον σχηματισμό ασβεστολίθων, εβαποριτών κ.λπ., ενώ υψηλά επίπεδα οργανικής παραγωγικότητας ευνοούν τον σχηματισμό κερατολίθων, ασβεστολίθων, ανθράκων κ.λπ.

Συνοψίζοντας, πολλά χαρακτηριστικά μιας φάσης αντιπροσωπεύουν τις διαδικασίες απόθεσης και το περιβάλλον. Υπάρχει ένας πεπερασμένος αριθμός περιβαλλόντων στα οποία παρόμοιες φάσεις και συγκεντρώσεις φάσεων μπορούν να βρεθούν οπουδήποτε και σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή στο γεωλογικό αρχείο. Γενικευμένα μοντέλα φάσεων που δείχνουν πλευρικές και κάθετες σχέσεις μεταξύ φάσεων έχουν προταθεί με βάση μελέτες σύγχρονων και παλαιότερων ιζηματογενών περιβαλλόντων, διεργασιών και φάσεων. Με άλλα λόγια, τα μοντέλα είναι εξειδικευμένες απλουστεύσεις που βοηθούν στην κατανόηση πολύπλοκων φυσικών φαινομένων και διεργασιών.

Γενικά, για τη δημιουργία των μοντέλων φάσεων, πρέπει να ακολουθηθούν κάποια συγκεκριμένα στάδια στη μελέτη παλαιών ιζηματογενών πετρωμάτων, όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής της Εικόνας 4.5.



Εικόνα 4.5 Διάγραμμα ροής που απεικονίζει τα στάδια μελέτης για την ανασύσταση ενός ιζηματογενούς περιβάλλοντος.

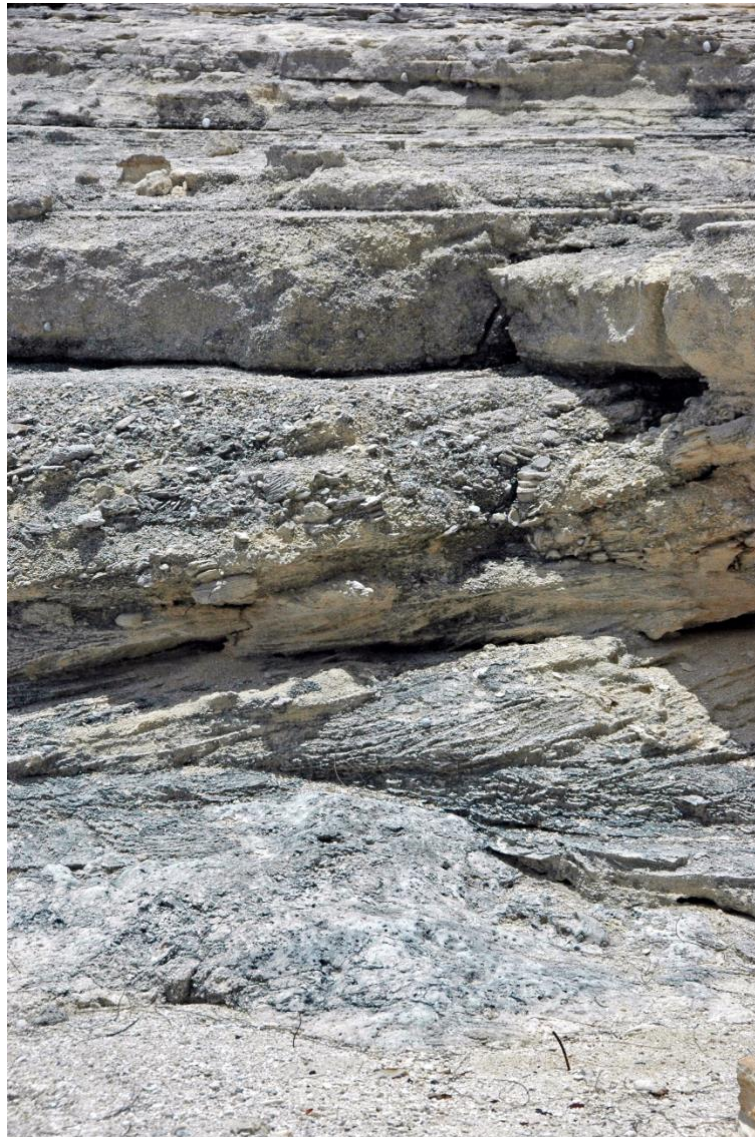
### 4.3.3 Νόμος του Walther

Τα ιζηματογενή περιβάλλοντα εξαρτώνται από την παροχή ιζήματος, την υποβύθιση και τη μεταβολή της θαλάσσιας στάθμης. Οι συνθήκες (τεκτονική ή κλίμα) συνήθως αλλάζουν με τον χρόνο. Σε κάθε χρονική στιγμή υπάρχουν στην επιφάνεια της Γης διαφορετικά γειτονικά αποθετικά περιβάλλοντα, μέσα στα οποία γίνεται απόθεση διαφορετικού τύπου ιζημάτων (ίδιος χρόνος - διαφορετικό περιβάλλον - διαφορετικό ιζημα). Παραδείγματος χάρη, σε μια ηπειρωτική κρηπίδα, η άμμος συγκεντρώνεται σε υψηλής ενέργειας παράκτιο περιβάλλον, ενώ την ίδια χρονική στιγμή ιλύς και ανθρακικά υλικά αποτίθενται σε ένα ανοιχτής θάλασσας, χαμηλής ενέργειας περιβάλλον.

Ο Walther ήταν ο πρώτος που παρατήρησε τη σχέση αυτή και διατύπωσε τον ομώνυμο νόμο ως εξής: «μια κατακόρυφη σύμφωνη ακολουθία ιζηματογενών αποθέσεων (και φάσεων) γεννιέται από μια συνεχή πλευρική ακολουθία περιβαλλόντων απόθεσης». Ο νόμος του Walther (1894) δηλώνει ότι δύο διαφορετικές φάσεις οι οποίες βρίσκονται η μια πάνω στην άλλη και δεν χωρίζονται από μια ασυμφωνία, πρέπει να έχουν αποτεθεί



κοντά η μια με την άλλη σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Με λίγα λόγια, βαθμιαία (κάθετη) μετάβαση από τη μια φάση στην άλλη δείχνει αρχική γειννίαση και γενετική σχέση κατά τη διάρκεια του σχηματισμού (Εικόνα 4.6). Έτσι, τα όρια των φάσεων μπορεί να μετατοπιστούν έτσι ώστε οι αποθέσεις ενός παρακείμενου περιβάλλοντος να μπορούν να βρίσκονται ακριβώς πάνω από εκείνες ενός πλευρικά σχετικού περιβάλλοντος.



**Εικόνα 4.6** Νόμος του Walther: η παραπάνω εικόνα δείχνει μια αποσυρσιγενή ακολουθία τριών αραγωνιτικών ασβεστολιθικών φάσεων που αποτέθηκαν καθώς η στάθμη της θάλασσας έπεφτε στο τέλος της υψηλής στάθμης του υποσταδίου MIS5e, το οποίο καλύπτει την τελευταία μεγάλη μεσοπαγετώδη περίοδο πριν από το Ολόκαινο, η οποία εκτείνεται μέχρι σήμερα. Η κατώτερη ενότητα αποτελείται από μη στρωματοποιημένους, κακώς ταξινομημένους, χονδρόκοκκους, ρηχής υποπαλίρροιας, απολιθωματοφόρους κοκκοστηριζόμενους και κοραλλιογενείς ασβεστολίθους. Η μεσαία ενότητα περιλαμβάνει καλκαρενίτες με διασταυρούμενη στρώση και απολιθωμένα κελύφη μαλακίων, οι οποίοι αποτέθηκαν σε πολύ ρηχά υποπαλιρροιακά περιβάλλοντα. Η ανώτερη ενότητα έχει υποεπίπεδους καλκαρενίτες με διαχωριστικές γραμμώσεις που αντιπροσωπεύουν αποθέσεις στη ζώνη διαβροχής και υπερπαλίρροιας. Αυτές οι τρεις ενότητες βρίσκονται σε σύμφωνη επαφή και εμφανίζουν μια σταδιακή μετάβαση από την υποπαλιρροιακή ζώνη στην υπερπαλιρροιακή ζώνη (πηγή: James St. John, <https://flic.kr/p/qNgStx>).

Ο νόμος δεν ισχύει σε περίπτωση που εντοπίζονται ασυμφωνίες μέσα στην ακολουθία, γιατί αυτές προκύπτουν από διακοπές της φυσικής εξέλιξης της ιζηματογένεσης. Απότομες/διαβρωσιγενείς επαφές μεταξύ των φάσεων δεν παρέχουν στοιχεία για ταυτόχρονη γενετική σχέση των περιβαλλόντων απόθεσης.

Ο νόμος του Walther αποτελεί μια σημαντική αρχή με την οποία εξηγείται η προέλευση των κατακόρυφων διαδοχών των πετρωμάτων. Τα ιζήματα εναποτίθενται σε περιβάλλοντα που αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου ως αποτέλεσμα των σχετικών διακυμάνσεων της στάθμης της θάλασσας. Καθώς αλλάζουν

τα περιβάλλοντα, αλλάζει και η φύση των ιζημάτων που εναποτίθενται σε οποιαδήποτε θέση. Η κατακόρυφη διαδοχή καταγράφει έτσι τις πλευρικές αλλαγές στα περιβάλλοντα με την πάροδο του χρόνου.

Καθώς τα πλευρικά γειτονικά ιζηματογενή περιβάλλοντα μετατοπίζονται εμπρός και πίσω με την πάροδο του χρόνου, ως αποτέλεσμα της αλλαγής της στάθμης της θάλασσας, τα όρια των φάσεων μετακινούνται επίσης εμπρός και πίσω. Με δεδομένο αρκετό χρόνο, οι φάσεις που κάποτε ήταν πλευρικά γειτονικά θα μετατοπιστούν έτσι ώστε οι αποθέσεις ενός περιβάλλοντος να υπερκαλύπτουν αυτές ενός γειτονικού περιβάλλοντος. Στην πραγματικότητα, έτσι σχηματίστηκαν πολλές (αν όχι οι περισσότερες) κάθετες ακολουθίες ιζηματογενών πετρωμάτων. Αυτή η έννοια διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τον Johannes Walther το 1894 και ονομάζεται νόμος του Walther.

Ο νόμος του Walther εφαρμόζεται στην ερμηνεία των μεταβολών των φάσεων και στις θαλάσσιες επικλύσεις και αποσύρσεις.

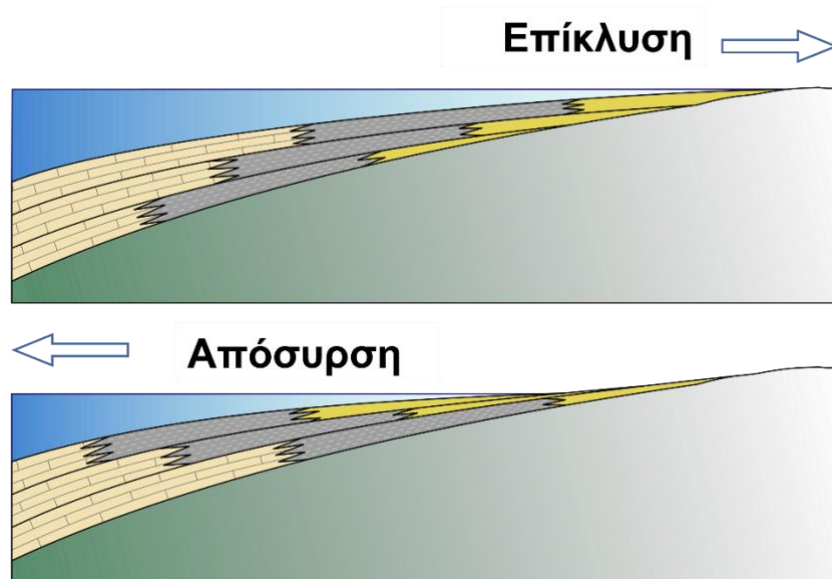
#### 4.3.4 Μεταβολές φάσεων

Ανά πάσα στιγμή, διάφοροι τύποι ιζημάτων αποτίθενται σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Η άμμος αποτίθεται στην παραλία, η ιλύς αποτίθεται στα ανοιχτά, η άργιλος αποτίθεται σε βαθύτερα νερά και το ανθρακικό ίζημα αποτίθεται μακριά από την ακτή (ή όπου υπάρχει ελάχιστη ή καθόλου εισροή χερσογενούς ιζήματος). Τα ιζηματογενή περιβάλλοντα (και οι φάσεις τους) κινούνται καθώς αλλάζει η στάθμη της θάλασσας ή καθώς μια λεκάνη γεμίζει με ίζημα.

Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας ονομάζεται *επίκλυση*. Η επίκλυση της θάλασσας δημιουργεί μια κατακόρυφη ακολουθία φάσεων που αντιπροσωπεύουν προοδευτικά βαθύτερα υδάτινα περιβάλλοντα (μια ακολουθία που βαθαίνει προς τα πάνω). Ως αποτέλεσμα, μια *επικλυσιογενής ακολουθία* θα έχει λεπτόκοκκες φάσεις που θα υπερκαλύπτουν χονδρόκοκκες φάσεις (π.χ. από την άμμο στο κάτω μέρος, στην ιλύ και στην άργιλο). Οι επικλύσεις μπορεί να προκληθούν από την τήξη των πολικών πάγων, τη μετατόπιση του νερού των ωκεανών από υποθαλάσσιο ηφαιστειακό φαινόμενο ή από τοπική βύθιση ή καθίζηση της γης σε παράκτιες περιοχές.

Η πτώση της στάθμης της θάλασσας ονομάζεται *απόσυρση*. Μια απόσυρση της θάλασσας θα δημιουργήσει μια ακολουθία φάσεων που αντιπροσωπεύει προοδευτικά ρηχότερα υδάτινα περιβάλλοντα (ακολουθία που ρηχαίνει προς τα πάνω). Ως αποτέλεσμα, μια *αποσυρσιογενής ακολουθία* θα έχει χονδρόκοκκη φάση πάνω σε λεπτόκοκκη φάση (αδρομερέστερη προς τα πάνω). Η απόσυρση μπορεί να προκληθεί από συσσώρευση πάγου στα πολικά καλύμματα πάγου ή εντοπισμένη ανύψωση της γης σε παράκτιες περιοχές.

Οι φάσεις μπορούν επίσης να παρέχουν πληροφορίες για τις αλλαγές στο επίπεδο της θάλασσας με την πάροδο του χρόνου (Εικόνα 4.7). Για παράδειγμα, καθώς η ακτογραμμή υποχωρεί προς τη στεριά λόγω της ανόδου της στάθμης της θάλασσας, οι θαλάσσιες υπεράκτιες φάσεις κινούνται προς τις παράκτιες φάσεις. Αυτή η συγκεκριμένη αλλαγή στις φάσεις είναι γνωστή ως επίκλυση και μπορεί να αποτελεί ένδειξη γεγονότων όπως υποβύθιση-καθίζηση ή πλημμύρα. Όταν η στρωματογραφική καταγραφή υποδεικνύει ότι η ακτογραμμή απομακρύνεται από την ξηρά, τότε λαμβάνει χώρα απόσυρση. Η απόσυρση συμβαίνει όταν υπάρχει υπερβολική παροχή ιζήματος από τη στεριά, η οποία προκαλεί τη μετακίνηση της ακτογραμμής προς τα ανοιχτά της θάλασσα. Η απόσυρση συνδέεται συχνά με περιόδους τεκτονικής ανύψωσης.



**Εικόνα 4.7** Δύο διαγράμματα που απεικονίζουν τη μετατόπιση των ιζηματογενών φάσεων κατά τη διάρκεια επίκλυσης και κατά τη διάρκεια απόσυρσης (πηγή: Woudloper – άδεια χρήσης, CC BY-SA 1.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6487133>).

Επικλυσιογενή (*transgressive*) και αποσυρσιογενή (*regressive*) αποθετικά συστήματα μπορούν να προσδιοριστούν με την παρατήρηση των φάσεων και των λιθολογικών αλλαγών στο πέτρωμα/ίζημα.

Στα επικλυσιογενή συστήματα τα ιζήματα γίνονται λεπτομερέστερα ως προς το μέγεθος του κόκκου προς τα πάνω και αντιπροσωπεύουν μετάβαση σε περιβάλλοντα βαθύτερων υδάτων. Αντίθετα, στα αποσυρσιογενή συστήματα τα ιζήματα γίνονται αδρομερέστερα ως προς το μέγεθος του κόκκου προς τα πάνω και αντιπροσωπεύουν την επίδραση της ρήχυνσης. Πράγματι, αν θεωρήσουμε ότι η στάθμη της θάλασσας υποχωρεί, τότε θα παρατηρήσουμε μια πλευρική μετατόπιση των περιβαλλόντων απόθεσης προς την κατεύθυνση της ταπείνωσης και σχηματισμό αντίστοιχων ιζημάτων στις νέες θέσεις. Κατά αυτό τον τρόπο οι αποθέσεις νέων αλλουβιακών ιζημάτων θα γίνονται πάνω στις πρώην ποτάμιες ή λιμναίες αποθέσεις, των νέων ποτάμιων αποθέσεων πάνω στις πρώην δελταϊκές, των νέων δελταϊκών πάνω στις πρώην υφαλοκρηπίδες κ.λπ.

Από μια μετατόπιση της θαλάσσιας στάθμης προκαλείται μετατόπιση των περιβαλλόντων απόθεσης και δημιουργείται μια κατακόρυφη ακολουθία αποθέσεων η οποία γίνεται αδρομερέστερη και πιο ρηχή προς τα επάνω.

Συνεπώς, τα πετρώματα κάθε φάσης γίνονται νεότερα σε μια κατεύθυνση προς την ξηρά κατά τη διάρκεια της θαλάσσιας επίκλυσης. Η θαλάσσια απόσυρση είναι το αντίθετο της θαλάσσιας επίκλυσης. Παράγει μια κάθετη ακολουθία με τις παράκτιες φάσεις να υπέρκεινται των φάσεων ανοιχτής θάλασσας και τα πετρώματα να είναι νεότερα προς την κατεύθυνση της θάλασσας.

Από το Ανώτερο Προκάμβριο, έχουν λάβει χώρα έξι μεγάλες θαλάσσιες επικλύσεις ακολουθούμενες από αποσύρσεις στη Βόρεια Αμερική. Αυτές δημιούργησαν ιζηματογενείς ακολουθίες, οι οποίες οριοθετούνται από ασυμφωνίες, και οι οποίες παρέχουν τη δομή και τη γεωλογική ιστορία της Β. Αμερικής κατά τον Παλαιozoϊκό και Μεσοζωϊκό.

## Βιβλιογραφία/Αναφορές

### Ξενόγλωσση

- Barrell, J. (1906). Relative geological importance of continental, littoral, and marine sedimentation. *Journal of Geology*, 14, 316–356.
- Bates, R.L., & Jackson, J.A. (1987). *Glossary of Geology* (3rd ed.). American Geological Institute, Alexandria, 788 p.
- Boggs, S. (2001). *Principles of sedimentology and stratigraphy* (3rd ed.). Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall. Chicago / Turabian.
- Dunbar, C.O., & Rodgers, J. (1957). *Principles of stratigraphy*; John Wiley and Sons, New York, 356 p.
- Galloway, W.E. (1998). Clastic depositional systems and sequences: Applications to reservoir prediction, delineation, and characterization. *The Leading Edge*, 17, 173-180. <https://doi.org/10.1190/1.1437934>
- Gressly, A. (1838). Observations géologiques sur le Jura Soleurois. *Neue Denkschriften der allgemeinen Schweizerischen Gesellschaft für die gesammten Naturwissenschaften*, 2, 1-112.
- Hill, P. S, et al. (2007). *Sediment delivery to the seabed on continental margins*. Continental Margin Sedimentation: Transport to Sequence, Special Publication Number 37 of the International Association of Sedimentologists, edited by C. A. Nittrouer, J. A. Austin, M. E. Field, J. H. Kravitz, J. P. M. Syvitski and P. L. Wiberg, Blackwell/IAS. pp. 49-99.
- King, L. C. (1962). *Morphology of the Earth*. Oliver & Boyd, Edinburgh. 699 pp.
- Klein, G.D. (1985). Intertidal flats and intertidal sandbodies. In: R.A.Jr. Davis (Ed.), *Coastal Sedimentary Environments*. Springer-Verlag, New York, p. 187–224.
- Krumbein, W.C., & Sloss, L.L. (1963). *Stratigraphy and Sedimentation* (2nd ed.). San Francisco and London: W.H. Freeman & Co, 660 pp.
- Longwell, C.R. (1949). Sedimentary facies in geologic history. *Geological Society of America Memoir*, 39, 171.
- Moore, R.C. (1949). Meaning of facies. *Memoir Geological Society of America*, 39, 1-34.
- Nichols, G. (2001). *Sedimentology and Stratigraphy*. Blackwell Science, Oxford.
- Pettijohn, F.J. (1975). *Sedimentary Rocks* (2nd ed.). Harper and Row Publishers, New York, 628 p.
- Рухин, Л.Б. (1953). Translated by Zhang Jietao et al. (1955). *основы литологии (Principles of Sedimentary Petrology)*, 2. Geological Publishing House, Beijing, 1–174 (in Chinese).
- Selley, R.C. (1970). Ancient Sedimentary Environments. *Geological Magazine*, 108(6), 551-552.
- Swift, D. J. P. (1974). Continental shelf sedimentation. In C. A. Burk & C. L. Drake (Eds.), *The geology of continental margins* (117–35). Berlin: Springer.
- Teichert, C. (1958). Concept of facies. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 42, 2718-2744.
- Twenhofel, W.H. (1950). Coral and other organic reefs in geologic column. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 34, 182–202.
- Walker, R.G. (Ed.) (1984a). *Facies models* (2nd ed.). Geoscience Canada Reprint Series 1, 317 p.
- Walther, J. (1894). Einleitung in die Geologie als historische Wissenschaft. In *Lithogenesis der Gegenwart*. Jena: G. Fischer, Bd. 3, pp. 535-1055.
- Weller, J.M. (1960). *Stratigraphic Principles and Practice*. New York: Haroer & Row, 727 pp.

### Ελληνόγλωσση

- Ντρίνια, Χ. (1998). *Ιζηματογένεση στον Ανώτερο Καινοζωικό της Δυτικής Κρήτης - η Λεκάνη των Αποστόλων, Ρέθυμνο* (Διδακτορική Διατριβή), Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών 1996, Γαία, 4, Δημοσιεύματα Τμήματος Γεωλογίας, σ.221.



## Κεφάλαιο 5

# Ηπειρωτικά Περιβάλλοντα Ιζηματογένεσης

### Σύνοψη

Στο κεφάλαιο 5 αναλύονται και περιγράφονται τα ακόλουθα ηπειρωτικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης: (α) αλλουβιακά, (β) ποτάμια, (γ) λιμναία (δ) παγετώδη και (ε) αιολικά-ερημικά. Ένα από τα συνηθέστερα και πιο σημαντικά χερσαία περιβάλλοντα ιζηματογένεσης είναι τα αλλουβιακά ριπίδια. Ειδικότερα γίνεται εκτενής αναφορά στα μορφολογικά χαρακτηριστικά των αλλουβιακών ριπιδίων, στον τρόπο και τις προϋποθέσεις ανάπτυξής τους καθώς και στα διαγνωστικά κριτήρια αναγνώρισης παλιών αποθέσεων αλλουβιακών ριπιδίων στην ύπαιθρο. Επιπλέον, στο κεφάλαιο 5 περιγράφονται τα στάδια ανάπτυξης και εξέλιξης ενός ποταμού, οι βασικοί τύποι καναλιών, τα χαρακτηριστικά τους και η ταξινόμησή τους, καθώς και οι βασικές αρχές που διέπουν τη δημιουργία του κάθε τύπου. Περιγράφονται οι συνθήκες σχηματισμού των ποταμών δικτυωτού και μαιανδρικού τύπου καθώς και η περιγραφή των αποθέσεων των διαφόρων υποπεριβαλλόντων τους (αποθέσεις κοίτης, πεδιάδα πλημμύρας, φραγματικών νησίδων κ.λπ.). Στο ίδιο κεφάλαιο γίνονται αναφορά και περιγραφή στα βασικά χαρακτηριστικά των λιμναίων περιβαλλόντων ιζηματογένεσης και παρουσιάζεται η ταξινόμηση των λιμνών σύμφωνα με υδρολογικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά. Παρουσιάζονται οι φυσικοχημικές ιδιότητες των υδάτων των λιμναίων συστημάτων, η κατανομή της θερμοκρασίας, του διαλυμένου οξυγόνου, της ενεργούς οξύτητας και του δυναμικού οξειδοαναγωγής με το βάθος και πώς οι φυσικοχημικές αυτές παράμετροι ελέγχουν τις λιμναίες διεργασίες ιζηματογένεσης. Αναφορά και περιγραφή γίνονται στις συνηθέστερες κατηγορίες λιμναίων ιζηματογενών πετρωμάτων και σε παραδείγματα σύγχρονων λιμναίων αποθέσεων από τις μεγαλύτερες λίμνες στον κόσμο. Εξετάζονται η χωρική εξάπλωση των παγετωδών και αιολικών αποθέσεων, η σχέση τους με το κλίμα και τη γεωμορφολογία της περιοχής, ο τρόπος κίνησης και μεταφοράς τους και οι παραγόμενες ιζηματογενείς αποθέσεις. Γίνεται αναφορά στη γεωγραφική κατανομή των παγετωδών περιβαλλόντων ιζηματογένεσης μέσα στο πέρασ του γεωλογικού χρόνου και παρουσιάζεται η σχέση τους με την τεκτονική και την ισοστασία.

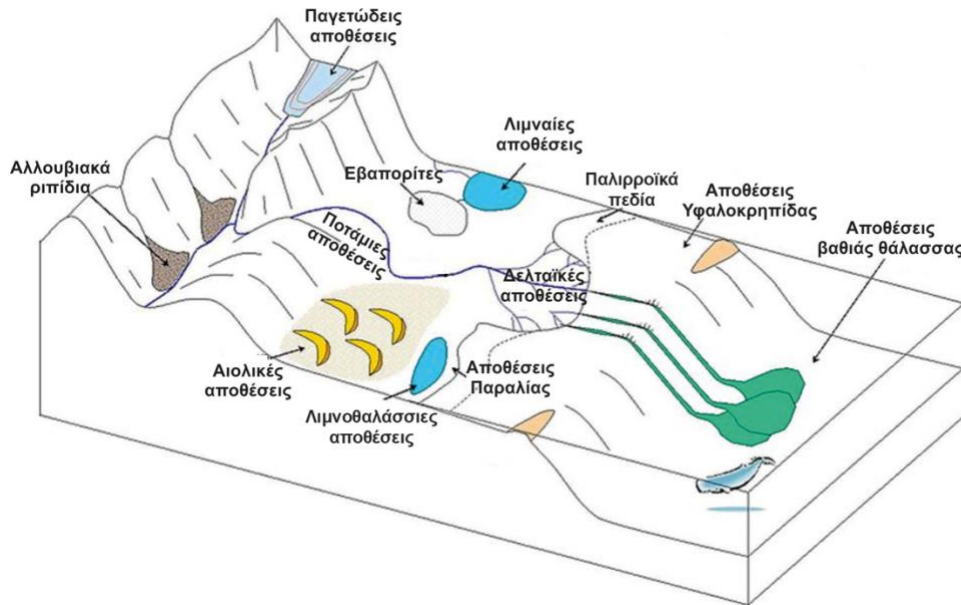
### Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται γνώσεις γενικής γεωλογίας και φυσικής γεωγραφίας.

## 5.1 Εισαγωγή

Οι γεωλόγοι και οι ιζηματολόγοι με τον όρο ηπειρωτικά ή χερσογενή περιβάλλοντα ιζηματογένεσης αναγνωρίζουν πέντε κύρια είδη απόθεσης: (α) τα αλλουβιακά ριπίδια, (β) τα ποτάμια, (γ) τα λιμναία, (δ) τα παγετώδη και (ε) τα αιολικά/ερημικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης (Εικόνα 5.1.). Η διάκριση των πέντε αυτών κυρίων περιβαλλόντων ιζηματογένεσης δεν αποκλείει τον σχηματισμό ιζημάτων σε περισσότερα από ένα περιβάλλοντα ιζηματογένεσης. Οι φάσεις των ηπειρωτικών περιβαλλόντων ιζηματογένεσης χαρακτηρίζονται κυρίως από κλαστικά ιζήματα, με σπάνια παρουσία απολιθωμάτων και πλήρη απουσία θαλάσσιων απολιθωμάτων. Μη κλαστικά ιζήματα, όπως ασβεστόλιθοι λιμναίων περιβαλλόντων και εβαπορίτες, εμφανίζονται επίσης σε ηπειρωτικά περιβάλλοντα, αλλά είναι σαφώς υποδεέστερα σε έκταση εμφάνισης των κλαστικών αποθέσεων. Τα ηπειρωτικά ιζηματογενή πετρώματα είναι λιγότερο άφθονα συνολικά από ό,τι είναι τα θαλάσσια και μεταβατικά/παράκτια ιζήματα, αλλά παρόλα αυτά αποτελούν σημαντικό μέρος του γεωλογικού αρχείου. Πολλά από τα ηπειρωτικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης έχουν μεγάλη οικονομική σημασία καθώς μπορεί να περιέχουν σημαντικές ποσότητες φυσικού αερίου και πετρελαίου, άνθρακα, σχιστολιθικού πετρελαίου και ουρανίου.





**Εικόνα 5.1** Γεωγραφική κατανομή των χερσαίων περιβαλλόντων ιζηματογένεσης έναντι των μεταβατικών και των θαλάσσιων

(πηγή: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/66/Main\\_depositional\\_environments.svg/480px-Main\\_depositional\\_environments.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/66/Main_depositional_environments.svg/480px-Main_depositional_environments.svg.png)).

## 5.2 Αλλουβιακά Ριπίδια

Τα αλλουβιακά ριπίδια είναι κωνικές, ακτινικές αποθέσεις ιζημάτων οι οποίες αναπτύσσονται σε θέση διακριτής και απότομης αλλαγής του ανάγλυφου, στο σημείο όπου λαμβάνει χώρα το άνοιγμα μιας ορεινής κοιλάδας και συνήθως εξαιτίας της ύπαρξης ενός ρήγματος. Ροές ιζημάτων και νερού, από το *κανάλι τροφοδοσίας* (feeder canyon) μέσα από την ορεινή κοιλάδα, με την απότομη μείωση της κλίσης του ανάγλυφου, διασκορπίζονται ακτινικά χάνοντας την ενέργειά τους και αποτίθενται. Η απόθεσή τους οφείλεται στην απότομη μείωση της κλίσης του ανάγλυφου κατά την οποία το κανάλι τροφοδοσίας εγκαταλείπει την ορεινή περιοχή έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση της κινητικής ενέργειας του συστήματος και την απόθεση του μεταφερόμενου ιζηματογενούς φορτίου του καναλιού (Boggs, 2006; Leeder, 2011).

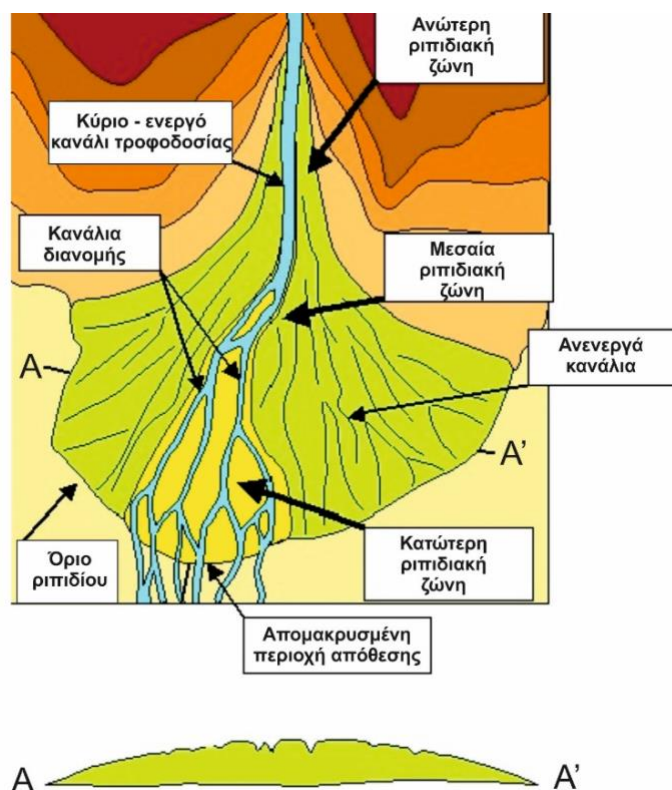
Αν και ο όρος χρησιμοποιείται και συγγέεται με τις ποτάμιες αποθέσεις, το χαρακτηριστικό ακτινικό σχήμα των αποθέσεων αυτών, η συσχέτισή τους με την παρουσία ρηγμάτων και η παρουσία τους κυρίως σε ξηρές και ημίξηρες κλιματικές συνθήκες, αποτελούν τα βασικά γνωρίσματα αυτών.

Τα αλλουβιακά ριπίδια αναπτύσσονται σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές με λίγη φυτοκάλυψη, με σποραδικές αλλά ισχυρές βροχοπτώσεις και υψηλό ρυθμό διάβρωσης. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα αποθέσεων αλλουβιακών ριπιδίων αποτελούν οι αποθέσεις στην Κοιλάδα του Θανάτου στην Καλιφόρνια (Εικόνα 5.2) (Blair, 1999). Αλλουβιακές αποθέσεις σύμφωνα με τη βιβλιογραφία αλλά και τη μελέτη παλαιότερων αποθέσεων έχουν παρατηρηθεί σε υγρές και θερμές κλιματικές συνθήκες, όμως ο διαχωρισμός τους από τις ποτάμιες αποθέσεις είναι δύσκολος.



**Εικόνα 5.2** Χαρακτηριστική ακτινική απόθεση αλλουβιακού ριπιδίου από την Κοιλιάδα του Θανάτου (NASA Death Valley National Park πηγή: <https://www.marlimillerphoto.com/images/Dep-03.jpg>).

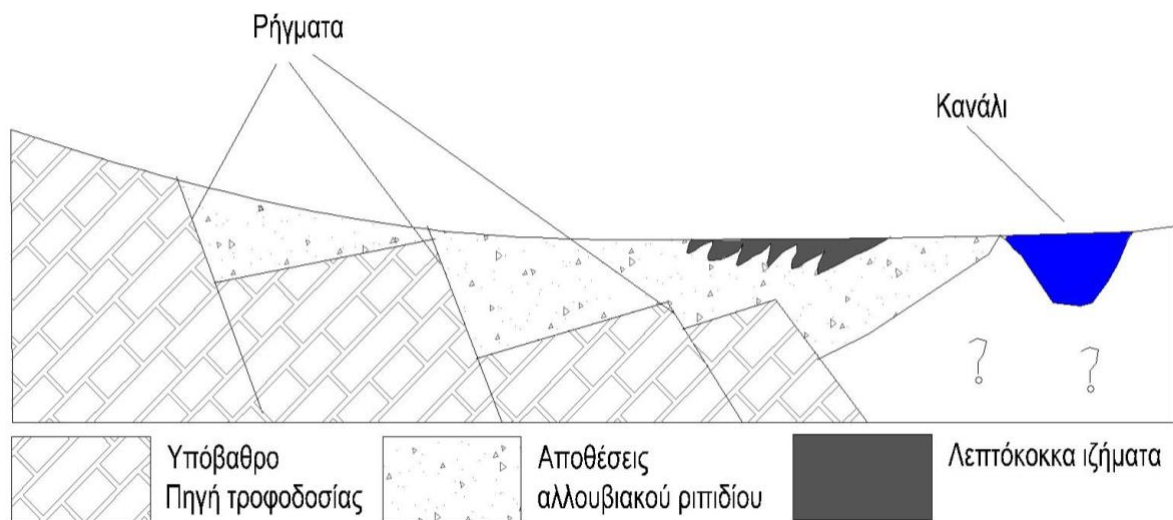
Από άποψη γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών, ένα τυπικό παράδειγμα αλλουβιακού ριπιδίου αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα: (α) το κανάλι τροφοδοσίας ή διανομής (feeder canyon), (β) την κορυφή του (fan apex), (γ) την κεφαλή ή ανώτερη ριπιδιακή ζώνη (fan head) και (δ) την άκρη του ριπιδίου ή κατώτερη ριπιδιακή ζώνη (toe fan). Στο εγγύτατο τμήμα του ριπιδίου οι κλίσεις είναι μεγάλες ( $>15^\circ$ ), ενώ μειώνονται βαθμιαία σε  $5^\circ$  φτάνοντας στο απομακρυσμένο τμήμα από την πηγή τροφοδοσίας να είναι σχεδόν οριζόντια  $1-2^\circ$ . Η ακτίνα ενός αλλουβιακού ριπιδίου ποικίλλει από μερικές εκατοντάδες μέτρα έως μερικά χιλιόμετρα.



**Εικόνα 5.3** Χωρική κατανομή υποπεριβαλλόντων αλλουβιακού ριπιδίου και διατομή AA' εγκάρσια στην κύρια διεύθυνση ανάπτυξης του ριπιδίου (πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alluvial\\_fan\\_scheme.PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alluvial_fan_scheme.PNG)).

### 5.2.1 Παράγοντες ελέγχου σχηματισμού αλλουβιακών ριπιδίων

Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την ανάπτυξη και τη γεωμετρία ενός αλλουβιακού ριπιδίου είναι: (α) το κλίμα, (β) η τεκτονική και (γ) τα χαρακτηριστικά του υποβάθρου μιας περιοχής. Το κλίμα και ειδικότερα οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις ελέγχουν τον τρόπο μεταφοράς αλλά και της ακτινικής διασποράς των μεταφερόμενων ιζημάτων. Αν το ύψος της βροχόπτωσης είναι υψηλό και έντονο τότε τα μεταφερόμενα υλικά διασκορπίζονται διαμορφώνοντας ηπιότερες κλίσεις έναντι των πιο ξηρών κλιματικών περιοχών όπου η διασπορά και η απόσταση από το εγγύτατο τμήμα του ριπιδίου είναι μικρότερες. Η τεκτονική και η ύπαρξη ενός ρήγματος συνήθως συνοδεύουν την ανάπτυξη των αλλουβιακών αποθέσεων καθώς είναι ο παράγοντας εκείνος που διαμορφώνει το ανάγλυφο και δημιουργεί τον χώρο - κενό απόθεσης των μεταφερόμενων υλικών. Συνήθως τα κανονικά ρήγματα είναι αυτά που συνδέονται άμεσα και ελέγχουν την ανάπτυξη των αλλουβιακών ριπιδίων (Εικόνα 5.4). Επιπλέον, τα λιθολογικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της μητρικής περιοχής του υποβάθρου (σκληρότητα, αντοχή, αποσάθρωση κ.λπ.) καθορίζουν τη γεωμετρία του αλλουβιακού ριπιδίου καθώς και τον τρόπο διασποράς των ιζημάτων.



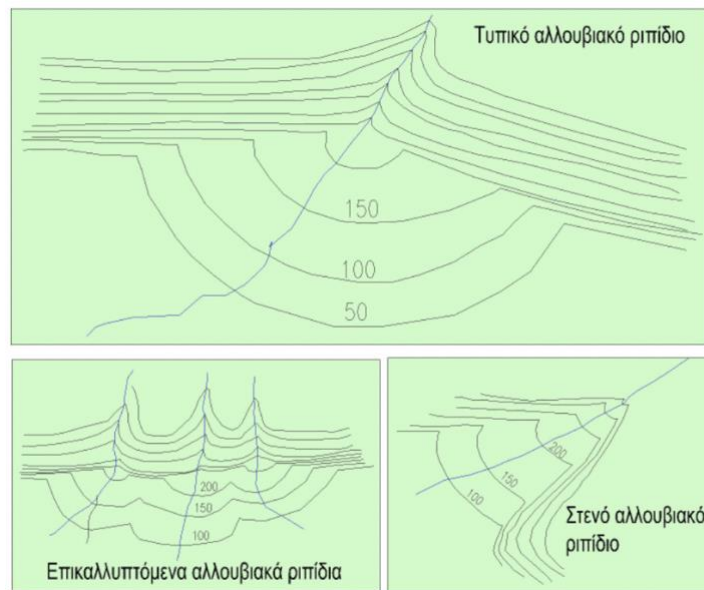
Εικόνα 5.4 Δημιουργία αποθέσεων αλλουβιακών ριπιδίων σε καθεστώς εφελκυσμού.

Η απόθεση των ιζημάτων ενός αλλουβιακού ριπιδίου κατά την εγκατάλειψη της ορεινής κοιλάδας, σχετίζεται με τη μείωση της παροχетеυτικής ικανότητας του συστήματος λόγω των αλλαγών του εμβαδού της διατομής και του βάθους του καναλιού μεταφοράς των ιζημάτων. Το υδραυλικό φορτίο/παροχή ( $Q$ ) ενός καναλιού εκφράζεται ως το φορτίο που μεταφέρεται στη μονάδα του χρόνου και ισούται με το γινόμενο του πλάτους του καναλιού ( $w$ ), του βάθους ( $d$ ) επί την ταχύτητα ( $V$ )

$$Q = w \text{ (m)} d \text{ (m)} V \text{ (m/sec)} = \text{m}^3/\text{sec}$$

Αν θεωρήσουμε ότι η παροχή παραμένει σχετικά σταθερή, κατά την έξοδο από τη στενή ορεινή κοιλάδα η αλλαγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του καναλιού με τη μεγάλη αύξηση του πλάτους και τη μείωση της κλίσης του ανάγλυφου συνεπάγεται απότομη μείωση της ταχύτητας ροής με επακόλουθο την απόθεση των ιζημάτων. Συγχρόνως μια μεγάλη ποσότητα του νερού διηθείται κατά τη διέλευσή του από το ξηρό ριπίδιο μειώνοντας περαιτέρω την παροχетеυτική ικανότητα του συστήματος. Η μορφολογία της περιοχής ανάπτυξης των αλλουβιακών ριπιδίων σε συνδυασμό με όλους τους παράγοντες που αναφέραμε διαμορφώνουν τρεις κύριες μορφολογικές κατηγορίες ριπιδίων, τα οποία είναι τα εξής: (α) ακτινικά μεμονωμένα, (β) επικαλυπτόμενα και (γ) στενά και επιμηκυσμένα (Εικόνα 5.5).





Εικόνα 5.5 Οι τρεις κύριες κατηγορίες ανάπτυξης των αλλουβιακών ριπιδίων με βάση την τοπογραφία της περιοχής.

### 5.2.2 Διαδικασίες και τύποι απόθεσης αλλουβιακών ριπιδίων

Τρεις είναι οι κύριοι τύποι αποθέσεων στα αλλουβιακά ριπίδια: (Α) οι δεβριτικές αποθέσεις, (Β) οι αποθέσεις καλυμμάτων και (Γ) οι αποθέσεις αυλάκων.

(Α) Οι δεβριτικές αποθέσεις είναι αποτέλεσμα των δεβριτικών ροών (debris flow) οι οποίες χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή συγκέντρωση ιζήματος μέσα στο μέσο μεταφοράς που είναι το νερό. Το ρευστό αυτό χαρακτηρίζεται από υψηλή πυκνότητα και μεγάλο ιξώδες και παρουσιάζει μια πλαστική συμπεριφορά κινούμενο ως μη Νευτώνειο ρευστό. Ως αποτέλεσμα σε μια δεβριτική ροή το ιζήμα ωθεί το νερό και μετακινούνται ως ένα ενιαίο σύστημα ιζήματος και νερού. Μια δεβριτική απόθεση μπορεί να αποτελείται από διαφορετικού μεγέθους θραύσματα συμπεριλαμβανομένων και ογκολίθων, έχει άσχημο βαθμό ταξίθεσης, δεν παρατηρείται προσανατολισμός των κόκκων και η παρουσία τους ευνοείται από έντονες βροχοπτώσεις και έντονες κλίσεις του ανάγλυφου. Στην κατηγορία των δεβριτικών ροών ανήκουν και οι ιλυοροές (mud flows) των οποίων τα θραύσματα είναι μεγέθους μικρότερου του μεγέθους της άμμου.

Οι δεβριτικές αποθέσεις χαρακτηρίζονται από τυχαίο προσανατολισμό των κλαστικών κόκκων, πολύ φτωχή ταξίθεση, τα αδρομερή στρώματα έχουν ιστό υποστηριζόμενο από το λεπτόκοκκο κλάσμα (matrix supported), δεν παρατηρούνται ιζηματογενείς δομές (χαοτική δομή), μέσα στις ροές αυτές μπορεί να παρατηρούνται και υπερμεγέθη θραύσματα, ενώ το πάχος τους μπορεί να κυμαίνεται από δεκάδες εκατοστά έως δεκάδες μέτρα. Οι δεβριτικές αποθέσεις παρατηρούνται πλησίον της κορυφής του ριπιδίου.

(Β) Οι αποθέσεις καλυμμάτων πλημμύρας δημιουργούνται κατά τις περιόδους στις οποίες η απορροή είναι μεγάλη λόγω έντονων βροχοπτώσεων και το αδρομερές κλαστικό υλικό μεταφέρεται ως φορτίο επί της στρώσης ενώ το λεπτόκοκκο υλικό ως φορτίο εν αιωρήσει. Το μεταφερόμενο αυτό φορτίο πλημμύρας διασκορπίζεται στο αλλουβιακό ριπίδιο καλύπτοντας το ριπίδιο, ως ένα κάλυμμα. Το πάχος των αποθέσεων καλυμμάτων των αλλουβιακών ριπιδίων μπορεί να είναι από μερικές δεκάδες εκατοστά έως και μερικά μέτρα, αποτελούνται κυρίως από χονδρόκοκκο υλικό και σχεδόν απουσιάζει το λεπτόκοκκο υλικό το οποίο έχει μεταφερθεί εκτός του ριπιδίου, τα στρώματα που σχηματίζονται διακρίνονται από κανονική διαβάθμιση, ενώ παρατηρείται κεραμωτή ταξίθεση και διασταυρούμενη στρώση. Ο ιστός του χονδρόκοκκου αυτού υλικού χαρακτηρίζεται από την απουσία του λεπτόκοκκου κλάσματος και την επαφή των κροκάλων μεταξύ τους (clast supported). Οι αποθέσεις καλυμμάτων συναντώνται από την κεφαλή του ριπιδίου έως την άκρη του ριπιδίου με σταδιακή μείωση του κοκκομετρικού μεγέθους προς το κατώτερο όριο του ριπιδίου, την άκρη του.

(Γ) Οι αποθέσεις αυλάκων αναπτύσσουν ένα δίκτυο διακλαδιζόμενων αβαθών καναλιών (δευτερεύοντα ή κανάλια διανομής) πάνω στο ριπίδιο και χαρακτηρίζονται από αδρομερές υλικό, το οποίο είναι φτωχότερα ταξίθετημένο έναντι των αποθέσεων των καλυμμάτων.

Η κυριαρχία των κροκαλοπαγών είναι χαρακτηριστική στα αλλουβιακά ριπίδια και διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: (α) τα ορθοκροκαλοπαγή και (β) τα παρακροκαλοπαγή.

Στα ορθοκροκαλοπαγή οι κροκάλες έρχονται σε επαφή μεταξύ τους και το ποσοστό της θεμελιώδους μάζας, του λεπτόκοκκου συνδετικού υλικού, είναι σε ποσοστό συνήθως μικρότερο από το 15% της επιφάνειας εμφάνισης του ιζηματογενούς στρώματος. Τα ορθοκροκαλοπαγή ανάλογα με τη λιθολογική σύσταση των κροκαλών διακρίνονται σε ολιγόμεικτα όπου οι κλάστες αποτελούνται από μία κυρίως λιθολογία (π.χ. ασβεστόλιθος), και σε πολύμεικτα κροκαλοπαγή όπου οι κλάστες αποτελούνται από δύο ή και περισσότερες λιθολογίες (π.χ. ασβεστόλιθος, κερατόλιθος, ψαμμίτες). Στα παρακροκαλοπαγή οι κροκάλες δεν έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, καθώς παρεμβάλλεται λεπτόκοκκο συνδετικό υλικό σε ποσοστό το οποίο ξεπερνά την εμφάνιση των θραυσμάτων της εξεταζόμενης επιφάνειας του στρώματος.

Αν και οι αποθέσεις των αλλουβιακών ριπιδίων δεν είναι οι πιο διαδεδομένες ως προς τον όγκο τους, στις ιζηματογενείς ακολουθίες είναι σημαντικά αποθετικά περιβάλλοντα καθώς εξαρτώνται άμεσα από την τεκτονική και τις κλιματικές συνθήκες. Τα παρατηρούμε στα περιθώρια των ιζηματογενών λεκανών, η αναγνώρισή τους συνδέεται με ρηξιγενείς ζώνες και μέσα από την αναγνώριση διαδοχικών επαναλαμβανόμενων αποθέσεων διακρίνονται γεγονότα τεκτονικής δραστηριότητας και ειδικότερα ανύψωσης μιας περιοχής (uplift). Επιπλέον, το πάχος και το κοκκομετρικό μέγεθος των αποθέσεων αυτών συνδέονται με τις κλιματικές μεταβολές, με τις αποθέσεις καλυμμάτων να κυριαρχούν σε περιόδους με έντονες βροχοπτώσεις.



**Εικόνα 5.6** Παράδειγμα πολύμεικτου κροκαλοπαγούς  
(πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Conglomerate\\_core\\_section.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Conglomerate_core_section.jpg)).

Για την αναγνώριση των παλαιών αποθέσεων αλλουβιακών ριπιδίων χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα διαγνωστικά ιζηματολογικά κριτήρια.

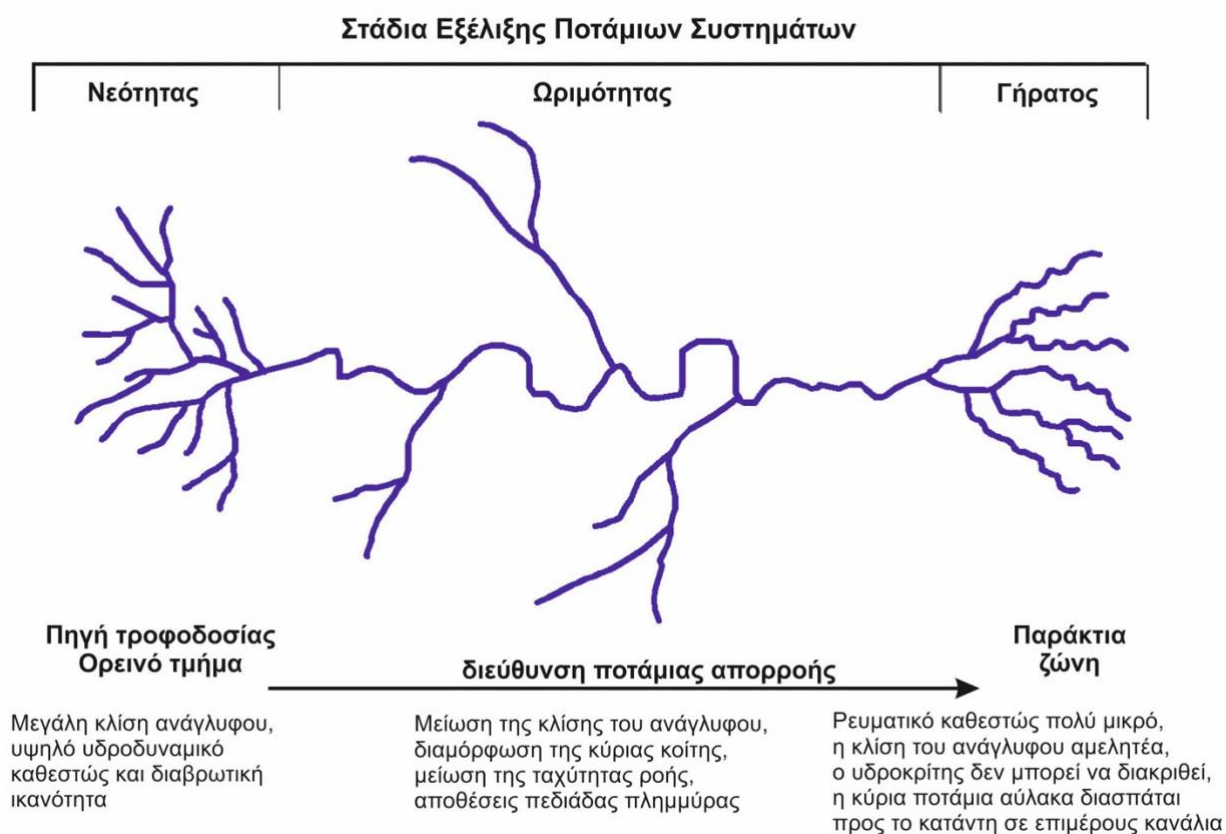
1. Οι αλλουβιακές αποθέσεις είναι χερσαίες ακολουθίες ιζημάτων οι οποίες εκτίθενται στον αέρα και έχουν χαρακτηριστικό ερυθροκάστανο χρώμα, ένδειξη της οξειδώσεως.
2. Η παρουσία του οργανικού άνθρακα στις αποθέσεις αυτές είναι ελάχιστη ενώ τις περισσότερες φορές απουσιάζει ολοκληρωτικά.
3. Στην οριζοντιογραφική κατανομή του κοκκομετρικού μεγέθους παρατηρείται μια σταδιακή μείωσή του από το εγγύτατο του τμήμα (proximal part), από την κεφαλή του ριπιδίου και προς την κατάντη πλευρά (distal part), άκρη του ριπιδίου.
4. Οι κύριες αποθέσεις των αλλουβιακών ριπιδίων διακρίνονται σε δεβριτικές αποθέσεις, καλυμμάτων και αποθέσεις άυλακας. Η παρουσία των δεβριτικών ριπιδίων κυριαρχεί πλησίον της κεφαλής του ριπιδίου, ενώ οι δεβριτικές αποθέσεις μειώνονται απομακρυνόμενες από την πηγή τροφοδοσίας.
5. Αποτελούν αποθέσεις με άσχημο έως μέτριο βαθμό ταξιθέτησης.
6. Παρατηρούνται στα περιθώρια των ιζηματογενών λεκανών συνδεόμενες με ρηξιγενείς επιφάνειες, κυρίως κανονικά ρήγματα.



### 5.3 Ποτάμιες αποθέσεις

Τα ποτάμια συστήματα αποτελούν διαχρονικά τον σημαντικότερο τρόπο μεταφοράς του αποσθρωμένου υλικού και των ιζημάτων στους ωκεανούς και τις λίμνες λειτουργώντας ως οι κύριοι αγωγοί τροφοδοσίας. Πέρα όμως από την τελική απόθεση των υλικών που μεταφέρουν στη θάλασσα και στις λίμνες, σε λεκάνες απόληξης αυτών, κατά τη διάρκεια του ρου τους αποθέτουν ιζήματα αλλάζοντας τη γεωμορφολογία της περιοχής και δημιουργούν ακολουθίες ιζηματογενών ποτάμιων αποθέσεων. Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε τις διαδικασίες απόθεσης και τις ιζηματογενείς ακολουθίες αυτών είναι χρήσιμο να εξετάσουμε τα μορφολογικά χαρακτηριστικά και τις αποθέσεις σύγχρονων ποτάμιων συστημάτων. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που ελέγχουν τις ποτάμιες αποθέσεις είναι το μέγεθος της λεκάνης απορροής του ποτάμιου συστήματος. Ως *λεκάνη απορροής ενός ποτάμιου υδρογραφικού δικτύου* ορίζουμε την έκταση όπου μέσω του δικτύου χειμάρρων και παραποτάμων αποστραγγίζεται μια περιοχή και οριοθετείται από τον υδροκρίτη. Ο υδροκρίτης είναι η νοητή γραμμή η οποία οριοθετεί μια λεκάνη απορροής, ενώνοντας τα σημεία με το μεγαλύτερο υψόμετρο και καταδεικνύοντας προς ποια πλευρά θα κατευθυνθούν τα νερά της βροχής σε μια βροχόπτωση. Από τις διεργασίες που παρατηρούνται σε μια λεκάνη απορροής σπουδαιότερες είναι η δημιουργία της απορροής από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (και οι μεταβολές της, τοπικά και χρονικά), η διάβρωση του εδάφους, οι γεωλιθθήσεις και γεωκατακρημνίσεις, η στερεομεταφορά των υδατορευμάτων κ.λπ. Οι διεργασίες αυτές επηρεάζονται από τα γεωμορφολογικά και μορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και επομένως η πλήρης κατανόηση και μελέτη αυτών των διεργασιών είναι απαραίτητες.

Τα σύγχρονα ποτάμια συστήματα μπορούν να διακριθούν σε τρία κυρίως εξελικτικά τμήματα και γεωμορφολογικά στάδια: (α) το *στάδιο νεότητας*, (β) το *στάδιο ωριμότητας* και (γ) το *στάδιο γήρατος*.



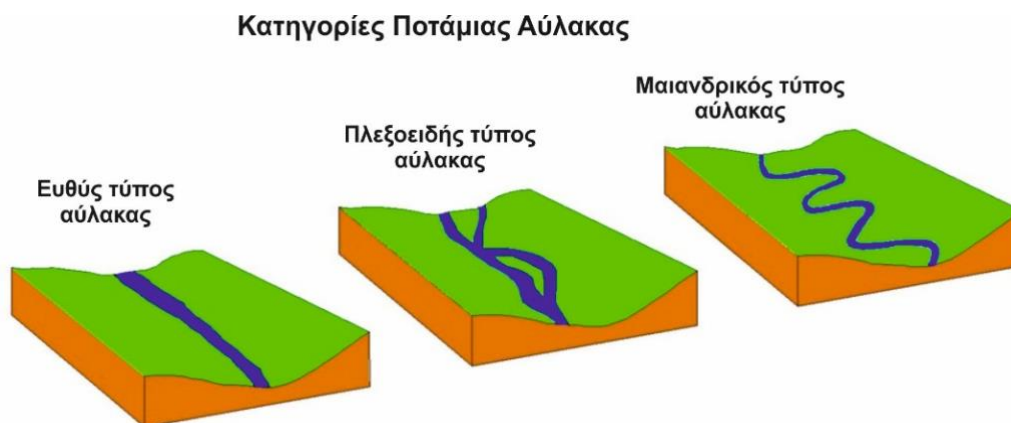
**Εικόνα 5.7** Απλοποιημένο διάγραμμα των σταδίων εξέλιξης ενός ποτάμιου συστήματος.

Το στάδιο νεότητας ενός ποτάμιου συστήματος συναντάται στο ορεινό τμήμα, στις περιοχές όπου πηγάζουν και αναπτύσσονται τα πρώτα ρεύματα, χείμαρροι και παραπόταμοι, των οποίων η συνένωση στο κατάντη θα δημιουργήσει το κύριο ποτάμιο σύστημα και το στάδιο πλέον ωριμότητας του ποταμού. Στο στάδιο της νεότητας έχουμε τις μεγαλύτερες κλίσεις στο ποτάμιο σύστημα, το υδροδυναμικό καθεστώς του ποταμού και η διαβρωτική του ικανότητα είναι η μεγαλύτερη. Σταδιακά μεταβαίνοντας στο στάδιο της ωριμότητας παρατηρούμε μείωση της κλίσης του ανάγλυφου, διαμόρφωση της κύριας κοίτης του ποταμού και μείωση της

ταχύτητας ροής σε σχέση με το στάδιο της νεότητας. Στο στάδιο της ωριμότητας εμφανίζονται αποθέσεις της πεδιάδας πλημμύρας του ποταμού καθώς και πλευρικής μετατόπισης της κύριας κοίτης του ποταμού. Το στάδιο του γήρατος συναντάται πλησίον της ακτογραμμής, το ρευματικό καθεστώς είναι πολύ μικρό, η κλίση του ανάγλυφου αμελητέα και ο υδροκρίτης δεν μπορεί να διακριθεί. Κατά το στάδιο του γήρατος, η κύρια ποτάμια αύλακα διασπάται προς το κατάντη σε επιμέρους κανάλια διανομής, σε αντίθεση με το στάδιο νεότητας όπου χείμαρροι συνενώνονται για να σχηματιστεί η κύρια αύλακα του ποταμίου συστήματος. Τα στάδια ωριμότητας και γήρατος έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς είναι τα κύρια αποθετικά τμήματα των ποτάμιων συστημάτων, σε αντίθεση με το στάδιο της νεότητας όπου κυριαρχεί ο μηχανισμός της διάβρωσης.

### 5.3.1 Τύποι καναλιών - Διαδικασίες μεταφοράς και απόθεσης

Η διάκριση των τύπων των καναλιών βασίζεται στο σχήμα και στα μορφομετρικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα ποτάμια συστήματα σε κάτοψη/οριζοντιογραφικά. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή, διακρίνονται τρεις τύποι ποτάμιας αύλακας (α) ο ευθύς / ευθύγραμμος (straight), (β) ο πλεξοειδής ή δικτυωτός (braided) και (γ) ο μαιανδρικός (meandering) (Εικόνα 5.8) (Miall, 1978). Μέσα από τις φυσικές διεργασίες που υφίσταται ένα ποτάμιο σύστημα κατά το πέρασμα του γεωλογικού χρόνου, μπορεί να μεταβαίνει από τον ένα τύπο καναλιού στον άλλον ανάλογα με το ιζηματογενές φορτίο και την ποσότητα του νερού. Ο ευθύς τύπος καναλιού δείχνει μια μικρή κυμάτωση, ο πλεξοειδής τύπος χαρακτηρίζεται από τη δημιουργία φραγμών ροής, τη διαίρεση της ροής σε δευτερεύοντα κανάλια και την επανασύνδεση αυτών, ενώ ο μαιανδρικός τύπος από τη χαρακτηριστική ελικοειδή μαιανδρική μορφή και τον βαθμιαίο σχηματισμό πεταλοειδών λιμνών εξαιτίας της αποκοπής των μαιάνδρων από την κύρια κοίτη του ποταμού (Εικόνα 5.9).



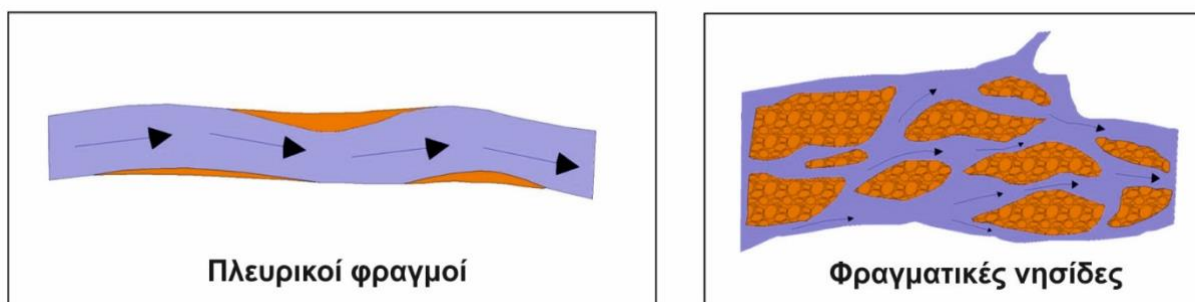
**Εικόνα 5.8** Απλοποιημένο διάγραμμα ταξινόμησης των τύπων ποτάμιας αύλακας.



**Εικόνα 5.9** Στάδια σχηματισμού μαιάνδρου και πεταλοειδούς λίμνης και παράδειγμα μαιανδρικού τύπου ποταμού (Nowitna River Αλάσκα,) (πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Nowitna\\_river.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Nowitna_river.jpg)).

Κατά μήκος της κοίτης των καναλιών (channel) και στα τμήματα με τη μεγαλύτερη κλίση λαμβάνουν χώρα η διάβρωση και η κύρια μεταφορά των ιζημάτων των ποτάμιων συστημάτων. Οι κοίτες των ποτάμιων

συστημάτων οριοθετούνται πλευρικά από τους *φραγμούς* (*point bars*) οι οποίοι συνδέονται με τις όχθες του ποταμού. Οι πλευρικοί φραγμοί είναι χαρακτηριστικοί στους *μαιανδρικούς τύπους ποταμών* (*meander river*). Το υδροδυναμικό καθεστώς στους μαιάνδρους οδηγεί σε διάβρωση των εξωτερικών τμημάτων του ελικοειδούς μαιάνδρου και εναπόθεση στην εσωτερική πλευρά στον φραγμό (*point bar*) (Εικόνα 5.10). Η συνεχής μεταφορά ιζήματος από τη διάβρωση της εξωτερικής πλευράς του ελικοειδούς, της κοίτης του ποταμού και η απόθεσή του στην εσωτερική πλευρά δημιουργεί *πλευρική προσαύξηση* (*lateral accretion*) του φραγμού. Οι αποθέσεις του φραγμού χαρακτηρίζονται από διασταυρούμενη στρώση και μείωση του κοκκομετρικού μεγέθους προς τα ανώτερα στρωματογραφικά σημεία. Στους *πλεξοειδείς* τύπους ποταμών (*braided river*), οι φραγμοί αναπτύσσονται εντός της κοίτης του ποταμού και μπορεί να θεωρηθεί ότι αναπτύσσονται και από τις δύο πλευρές καθώς η ροή διαχωρίζεται στο ανάντη τμήμα του φραγμού και συνενώνεται ξανά στο κατάντη. Οι φραγμοί αυτοί εντός της κοίτης του πλεξοειδούς τύπου ποταμού μπορεί να καταστρέφονται και να αναδημιουργούνται, να μεταναστεύουν προς το κατάντη, ενώ σε περιπτώσεις όπου αναπτύσσεται βλάστηση πάνω σε αυτούς, σταθεροποιούνται και δημιουργούνται *φραγματικές νησίδες* εντός της κοίτης (*barrier islands*) (Εικόνα 5.10) (Bridge, 2006).



**Εικόνα 5.10** Ανάπτυξη πλευρικών φραγμών και δημιουργία πλευρικής προσαύξησης αυτών και φραγματικές νησίδες σε πλεξοειδούς τύπου ποταμό.

### 5.3.2 Ποτάμια περιβάλλοντα ιζηματογένεσης

Τα ποτάμια περιβάλλοντα ιζηματογένεσης διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες αποθέσεων (Nichols, 2009):

- (α) αποθέσεις ποτάμιας *αύλακας* (*channel deposits*),
- (β) αποθέσεις στις *όχθες των καναλιών* (*bank deposits*),
- (γ) αποθέσεις *πεδιάδας πλημμύρας* (*flood plain ή overbank deposits*).

(α) Οι ποτάμιες *αύλακες* μεταφέρουν ιζήματα εντός της κοίτης του καναλιού από μια πληθώρα μεγεθών κόκκων ανάλογα το υδροδυναμικό καθεστώς του ποτάμιου συστήματος. Υπό αυτήν την έννοια παρατηρούμε στις αποθέσεις πυθμένα της *αύλακας* το αδρομερές κλάσμα των μεταφερόμενων υλικών (κροκάλες, λιθάρια ή άμμο) το οποίο μεταφέρεται εντός της κοίτης με σύρση/κύλιση και αναπήδηση ως φορτίο επί της στρώσης (*bed load*). Το λεπτόκοκκο υλικό, ιλύς και άργιλος, μεταφέρεται εν αιωρήσει με μεγαλύτερες ταχύτητες και αποτίθεται τις περισσότερες φορές στις *πεδιάδες πλημμύρας* του ποταμού (*overbank deposits*). Οι αποθέσεις του πυθμένα της *αύλακας* χαρακτηρίζονται από αδρομερές υλικό το οποίο σχηματίζει φακοειδείς λωρίδες στα βαθύτερα τμήματα της *αύλακας* οι οποίες χαρακτηρίζονται ως υπολειμματικές αποθέσεις *αύλακας*. Οι αποθέσεις *αύλακας* δεν έχουν μεγάλη *πλευρική εξάπλωση*, είναι φακοειδείς και δεν τις συναντάμε ως μεγάλου πάχους αποθέσεις ενώ αντιπροσωπεύουν το βαθύτερο τμήμα της κοίτης του καναλιού.

Εντός της ποτάμιας *αύλακας* αναπτύσσονται τα υποπεριβάλλοντα του ακραίου φραγμού (*point bar*) τα οποία έχουν ιδιαίτερη σημασία στους *μαιανδρικούς* τύπους ποταμών καθώς ελέγχουν τον ρυθμό μετανάστευσής τους. Οι αποθέσεις των ακραίων φραγμών χαρακτηρίζονται από λεπτότερο υλικό έναντι των αποθέσεων του πυθμένα της ποτάμιας *αύλακας*, με τη βάση τους να αποτελείται από ψηφίδα και χονδρόκοκκη άμμο, μεταβαίνοντας προς τα πάνω, σε μεσόκοκκη έως λεπτόκοκκη άμμο με διασταυρούμενη στρώση και στα ανώτερα τμήματα με την πιο λεπτόκοκκη αμμόδη ιλύ και ιλύ με ελασματώσεις (*laminations*). Οι ακραίοι φραγμοί χαρακτηρίζονται από κεκλιμένα στρώματα τα οποία σε καθεστώς υψηλής ροής μεταναστεύουν προς τις αποθέσεις του πυθμένα της *αύλακας*, ενώ η απόθεση πάνω στους ακραίους φραγμούς στους *μαιανδρικούς*

τύπους ποταμών, είναι το αποτέλεσμα της πλευρικής τους εξάπλωσης. Το πάχος τους μπορεί να είναι όσο το βάθος του ποταμού και εξαρτάται από το μέγεθος του ποταμού.

(β) Το κύριο υποπεριβάλλον απόθεσης των ιζημάτων όχθων των ποταμών είναι το φυσικό ανάχωμα (natural levee) ενώ σε περιόδους πλημμύρας παρατηρούμε σπάσιμο της όχθης και διεύρυνση της κοίτης του καναλιού δημιουργώντας τις αποθέσεις διάρρηξης (crevasse-splay). Το φυσικό ανάχωμα είναι αυτό το οποίο οριοθετεί το κανάλι του ποταμού και οι αποθέσεις του παρουσιάζουν μικρή κλίση προς την πεδιάδα πλημμύρας του ποταμού (flood plain). Το φυσικό ανάχωμα έρχεται σε επαφή με τον ακραίο φραγμό και σε μικρούς ποταμούς πολλές φορές η διάκριση των δύο αυτών υποπεριβαλλόντων είναι δύσκολη. Η κύρια διαδικασία σχηματισμού του φυσικού αναχώματος είναι σε περιόδους πλημμύρας, δηλαδή όταν η υψηλή ροή του ποταμού υπερβεί σε ύψος τις όχθες του ποταμού τότε αποτίθεται υλικό το οποίο μεταφέρεται, με το αδρομερές να αποτίθεται πλησίον της κοίτης και το πιο λεπτόκοκκο να μεταφέρεται σε μεγαλύτερη απόσταση. Καθώς η απόθεση του φυσικού αναχώματος είναι το αποτέλεσμα των πλημμυρικών γεγονότων ενός ποταμού, το ύψος τους καταγράφει το ύψος του νερού σε καθεστώς πλημμύρας του ποταμού. Τα ιζήματα του φυσικού αναχώματος ανάλογα το μέγεθος του ποταμού μπορεί να είναι είτε αδρομερή είτε λεπτόκοκκα και χαρακτηρίζονται από διασταυρούμενη στρώση, ρυτίδωση και ελασμάτωση.

Οι αποθέσεις διάρρηξης (crevasse-splay) σχηματίζονται σε καθεστώς έντονης πλημμύρας, όπου η ενέργεια του νερού έχει τη δύναμη να διαρρήξει/σπάσει το φυσικό ανάχωμα κυρίως στην κοίλη εξωτερική πλευρά του ποταμού. Οι αποθέσεις αυτές εξαιτίας του τρόπου σχηματισμού τους δεν είναι ομοιόμορφες και δεν είναι συνεχείς. Ουσιαστικά οι αποθέσεις διάρρηξης έχουν το σχήμα ενός ριπιδίου όπου αποτίθεται μέρος από το ιζηματογενές φορτίο το οποίο μεταφέρει ο ποταμός σε καθεστώς πλημμύρας.

(γ) Οι αποθέσεις πεδιάδας πλημμύρας απαντώνται κυρίως σε περιοχές χαμηλών υψομέτρων και απουσιάζουν στις ορεινές περιοχές με μεγάλες κλίσεις και βαθιές κοιλάδες ποταμών. Καθώς είναι αποθέσεις οι οποίες σχηματίζονται σε καθεστώς πλημμύρας, η έκτασή τους και το πάχος τους ελέγχονται από το ύψος της υψηλής ροής του ποταμού σε καθεστώς πλημμύρας και το ύψος του νερού υπό κανονικές συνθήκες ροής. Επειδή τα πλημμυρικά γεγονότα ενός ποταμού εμφανίζονται περιοδικά κατά τη διάρκεια του έτους, οι μεγάλοι πάχους αποθέσεις πεδιάδας πλημμύρας καταγράφουν μια σειρά από πλημμυρικά γεγονότα μέσα στον γεωλογικό χρόνο. Αν λάβουμε υπόψη μας ότι σε μια περίοδο πλημμύρας το μέγιστο πάχος απόθεσης μπορεί να είναι μερικά εκατοστά, δεν διακρίνουμε εύκολα μεγάλους πάχους αποθέσεις πεδιάδας πλημμύρας. Σε καθεστώς πλημμύρας, οι διαφορετικού μεγέθους μεταφερόμενοι κόκκοι καθιζάνουν ανάλογα με τη μείωση της ταχύτητας ροής της πλημμύρας, αποθέτοντας πρώτα το αδρομερές υλικό και μετέπειτα το λεπτόκοκκο, δημιουργώντας δομές κανονικής διαβάθμισης η οποία αντιπροσωπεύει και τη μείωση της μεταφορικής ικανότητας. Τα ιζήματα της πεδιάδας πλημμύρας είναι κυρίως λεπτόκοκκη άμμος έως άργιλος και η κύρια δομή τους είναι η οριζόντια στρώση και η ελασμάτωση. Λόγω των κύκλων διαβροχής και ξήρανσης των περιοχών της πεδιάδας πλημμύρας και της παρουσίας του λεπτόκοκκου ιλυοαργιλώδους υλικού διακρίνουμε και πολυγωνικές δομές ρωγμών στην επιφάνειά τους (mud cracks).

## 5.4 Ερημικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης

Τα ερημικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης καλύπτουν ευρείες περιοχές σε παγκόσμια κλίμακα, ιδιαίτερα εντός των γεωγραφικών ζωνών περίπου 10°-30° βόρεια και νότια του ισημερινού, όπου ξηρές, κατερχόμενες μάζες αέρα δημιουργούν κυρίαρχα αιολικά συστήματα που επηρεάζουν τις περιοχές προς τον ισημερινό. Ερημικά περιβάλλοντα συναντάμε επίσης στο εσωτερικό των ηπείρων και σε ξηρές περιοχές μεγάλων οροσειρών όπου αποκόπτονται από την υγρασία των ωκεανών. Τα ερημικά περιβάλλοντα είναι περιοχές στις οποίες οι πιθανοί ρυθμοί εξάτμισης υπερβαίνουν κατά πολύ τους ρυθμούς βροχοπτώσεων. Καλύπτουν περίπου το 20-25% της σημερινής επιφάνειας της Γης.

Λόγω των γενικά χαμηλών βροχοπτώσεων τους, με ετήσιο ύψος βροχόπτωσης συνήθως μικρότερο από 25 cm/y, τείνουμε να θεωρούμε τα ερημικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης ως εξαιρετικά ξηρές περιοχές όπου κυριαρχεί η δραστηριότητα του ανέμου και οι περιοχές καλύπτονται κυρίως από άμμο. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν διάφορα υποπεριβάλλοντα μέσα στις ερήμους, όπως αλλουβιακές αποθέσεις, εφήμερα ρέματα που αναπτύσσονται κατά διαστήματα ως απορροή των περιστασιακών βροχοπτώσεων, εφήμερες υπεράλυμες λίμνες, που ονομάζονται *playa* και *sabkhas*, πεδία αμμόλοφων, ενδιάμεσες περιοχές που καλύπτονται από ιζήματα και πετρώματα του υποβάθρου και περιοχές γύρω από το περιθώριο των ερήμων όπου συσσωρεύεται σκόνη από τον άνεμο (loess). Μεγάλες περιοχές των ερημικών περιβαλλόντων μπορεί πράγματι να καλύπτονται από απέραντες εκτάσεις αιολικής άμμου (Εικόνα 5.11). Τέτοιες περιοχές που καλύπτουν πάνω από περίπου 125



km<sup>2</sup> ονομάζονται μεταφορικά *θάλασσες άμμου* (sand seas). Οι μικρότερες περιοχές ονομάζονται *αμμόλοφοι* (sand dunes). Και οι δύο αυτές κατηγορίες καλύπτουν περίπου το 20% των σύγχρονων ερημικών περιβαλλόντων ιζηματογένεσης και περίπου το 6% της παγκόσμιας επιφάνειας της Γης. Οι υπόλοιπες περιοχές των ερημικών περιβαλλόντων καλύπτονται από διαβρωμένες ορεινές περιοχές, βραχώδεις περιοχές και ερημικά πεδία. Η μεγαλύτερη έρημος στον κόσμο είναι η έρημος Σαχάρα με έκταση 7.000.000 km<sup>2</sup>.



**Εικόνα 5.11** Χαρακτηριστικό παράδειγμα αμμόλοφων στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα  
(πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dune#/media/File:Rub\\_al\\_Khali\\_002.JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/Dune#/media/File:Rub_al_Khali_002.JPG)).

#### 5.4.1 Διαδικασίες μεταφοράς και απόθεσης σε ερήμους

Οι περισσότερες έρημοι χαρακτηρίζονται από ακραίες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και του ανέμου, τόσο σε καθημερινή όσο και σε εποχιακή βάση. Τα ποσοστά βροχοπτώσεων είναι χαμηλά, όπως αναφέρθηκε, και οι βροχές είναι πολύ σποραδικές. Η βλάστηση είναι γενικά εξαιρετικά αραιή. Οι απότομες βροχοπτώσεις τείνουν, λόγω της έλλειψης φυτικής κάλυψης, να δημιουργούν ξαφνικές πλημμύρες. Το νερό της βροχής συνήθως αποστραγγίζεται προς τα κεντρικά τμήματα των λεκανών της ερήμου, όπου δημιουργούνται εφήμερες λίμνες playa και sabkhas στις οποίες αποτίθενται εβαποριτικά ορυκτά. Η μεταφορά των ιζημάτων μέσω του νερού πραγματοποιείται σπάνια και μόνο από τις παροδικές έντονες βροχοπτώσεις όπου δημιουργούνται δεβριτικές ροές και ιλυοροές. Τον περισσότερο καιρό το νερό διαδραματίζει μικρό ρόλο στη μεταφορά και απόθεση των ιζημάτων καθώς το κυρίαρχο μέσο είναι ο άνεμος (Pye and Lancaster, 1993).

Ο άνεμος ως παράγοντας διάβρωσης είναι πολύ λιγότερο αποτελεσματικός από το νερό, αλλά είναι ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό μέσο μεταφοράς χαλαρής ασύνδετης άμμου και λεπτόκοκκων ιζημάτων. Ο άνεμος δεν μεταφέρει μόνο τεράστιες ποσότητες άμμου στις ερήμους, αλλά είναι επίσης υπεύθυνος για τη μεταφορά ιζημάτων σε παγετώδη περιβάλλοντα, σε πεδιάδες πλημμύρας ποταμών και κατά μήκος πολλών παράκτιων περιοχών. Οι αποθέσεις άμμου των προηγούμενων περιβαλλόντων είναι αρκετά μικρές σε σύγκριση με τις θάλασσες της άμμου των περιοχών της ερήμου. Οι ανεμοθύελλες ή οι καταιγίδες σκόνης, μπορεί επίσης να μεταφέρουν ήλι και άργιλο σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή τροφοδοσίας και είναι υπεύθυνες για τη μεταφορά μεγάλου μέρους λεπτόκοκκου ιζήματος στις βαθιές λεκάνες των ωκεανών. Ανάλογα με τη φορά και τη διεύθυνση του ανέμου σχηματίζονται αμμόλοφοι και θίνες, (α) *επιμήκεις* (παράλληλα στη φορά του ανέμου), (β) *εγκάρσιοι* (κάθετα στη φορά του ανέμου) και (γ) *παραβολικοί/πεταλοειδείς* (Εικόνα 5.12) (Pye and Lancaster, 1993).

Ο άνεμος μεταφέρει το ίζημα με τον ίδιο σχεδόν τρόπο όπως το νερό, διαχωρίζοντας το ίζημα σε τρεις πληθυσμούς μεταφοράς: σύρση/κύλιση, αναπήδηση και αιώρηση. Η μεταφορά των κόκκων με τον άνεμο ξεκινά όταν η ισχύς του ανέμου ξεπεράσει το όριο των δυνάμεων συνοχής, τριβής και αλληλεπίδρασης των κόκκων μεταξύ τους. Η ταχύτητα με την οποία οι κόκκοι απομακρύνονται από την πηγή τροφοδοσίας εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων, το σχήμα, τη διαλογή και τη συσκευασία.

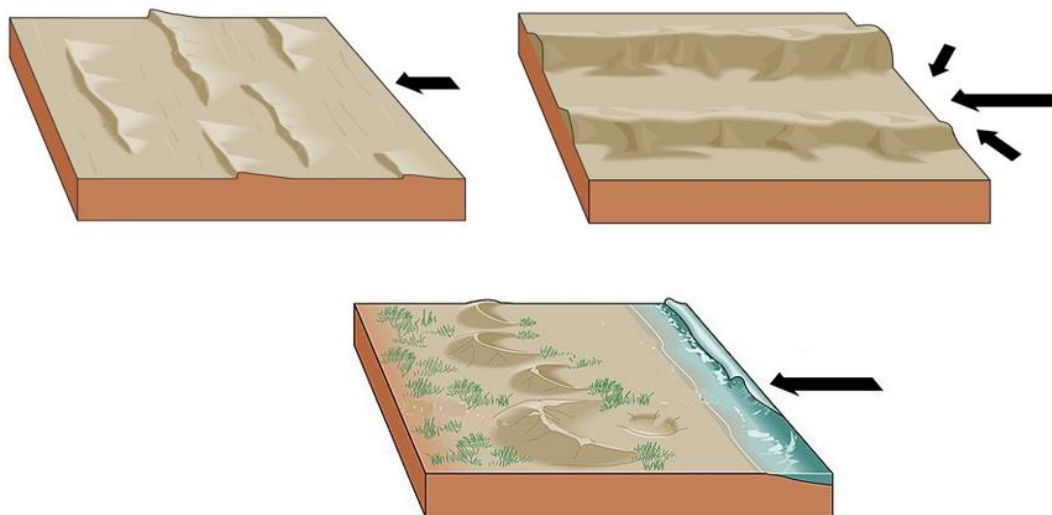
Ο άνεμος διαχωρίζει αποτελεσματικά το λεπτότερο ίζημα, σε μέγεθος 0,05 mm, από το πιο αδρομερές ίζημα και το μεταφέρει σε μεγάλες αποστάσεις σε αιώρηση. Εκτός από τις ασυνήθιστα υψηλές ταχύτητες του ανέμου, τα αδρομερέστερα μεγέθη κόκκων ταξιδεύουν με σύρση/κύλιση και αναπήδηση κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Η αναπήδηση είναι ένας ιδιαίτερα σημαντικός τρόπος αιολικής μεταφοράς, υποβοηθούμενος από



την ολίσθηση των κόκκων λόγω της επίδρασης των κόκκων που αναπηδούν καθώς προσκρούουν στο έδαφος. Ο άνεμος φαίνεται να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός στη μεταφορά μεσόκοκκης έως λεπτόκοκκης άμμου, αλλά τα αδρομερή σωματίδια (έως 2 mm ή και μεγαλύτερα) μπορεί επίσης να μεταφερθούν με κύλιση και να συρθούν στην επιφάνεια του εδάφους υπό υψηλή ταχύτητα.

Η μεταφορά μέσω του ανέμου και ο μηχανισμός διαλογής των κόκκων τείνουν να παράγουν τρία είδη αποθέσεων: (α) αποθέσεις σκόνης (ασβεστόχως πηλός), που μερικές φορές αναφέρονται ως loess, που συνήθως συσσωρεύονται μακριά από την πηγή τροφοδοσίας, (β) αποθέσεις άμμου, οι οποίες συνήθως χαρακτηρίζονται από πολύ καλό βαθμό ταξιθέτησης και (γ) υπολειμματικές αποθέσεις, που αποτελούνται από σωματίδια μεγέθους χαλικιού που είναι πολύ μεγάλα για να μεταφερθούν από τον άνεμο.

Η αιολική μεταφορά και η απόθεση δημιουργούν ιζηματογενείς δομές, όπως ρυτιδώσεις, αμμόλοφους και διασταυρούμενη στρώση, όμοιες με αυτές που παράγονται από τη μεταφορά των υλικών μέσω του νερού. Οι ιζηματογενείς δομές που παράγονται από τον άνεμο μπορεί να είναι ρυτιδώσεις μερικών χιλιοστών έως αμμόλοφοι μήκους 500-600 m και ύψους 100 m. Το μήκος κύματος των ρυτιδώσεων και θινών, των κεκλιμένων στρωμάτων που μεταφέρονται από τον άνεμο, αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και το ύψος κύματος τείνει να αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους των κόκκων. Κάτω από ένα δεδομένο σύνολο συνθηκών μεγέθους κόκκου και ταχύτητας ανέμου, μπορεί να συνυπάρχουν όλες οι ανωτέρω δομές.



**Εικόνα 5.12** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σχηματισμού αμμολόφων και αμμοθινών σε σχέση με τη φορά του ανέμου (τα μαύρα βέλη αναπαριστούν την κυρίαρχη φορά των ανέμων)

(πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Longitudinal\\_dune.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Longitudinal_dune.jpg); [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Transverse\\_dune.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Transverse_dune.jpg); [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Parabolic\\_dune.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Parabolic_dune.jpg)).

#### 5.4.2 Σύγχρονα ερημικά περιβάλλοντα

Τα αιολικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης τα συναντάμε σε ποικίλες θέσεις σε μικρής κλίμακας ερήμους και σε παράκτιες περιοχές. Ωστόσο, οι κυριότερες περιοχές συσώρευσης βρίσκονται σε ερήμους, στις λεγόμενες θάλασσες άμμου (ergs). Οι απέραντες εκτάσεις άμμου, οι λεγόμενες θάλασσες άμμου, σχηματίζονται κάτω από την επίδραση των επικρατούντων ανέμων, κυρίως σε άνυδρες περιοχές, όπου υπάρχουν άφθονα αποθέματα λεπτόκοκκου ιζήματος. Σύγχρονα τέτοια αποθετικά παραδείγματα είναι της Σαχάρας και της Αραβικής ερήμου της Βόρειας Αφρικής, της ερήμου Namib της Νότιας Αφρικής, των ερήμων Mojave και Sonoran της Νοτιοδυτικής Βόρειας Αμερικής και της Αυστραλιανής ερήμου στην Κεντρική Αυστραλία. Η τροφοδοσία σε υλικό, η διαθεσιμότητα και η αιολική ενέργεια παίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της γεωμορφολογίας των θαλασσών άμμου. Οι ποικίλες μορφές των θαλάσσιων αμμοθινών οφείλονται σε δύο παράγοντες: (α) στις μεταβολές στα ανεμολογικά καθεστώτα που δημιουργούν διαφορετικούς τύπους αμμοθινών με ξεχωριστή μορφολογία και (β) στις μεταβολές στη διαθεσιμότητα, την κινητικότητα και την προσφορά αμμώδους υλικού οι οποίες οδηγούν στη δημιουργία πολλαπλών μορφών αμμοθινών.

Τα διαφορετικά περιβάλλοντα των ερήμων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρία κύρια υποπεριβάλλοντα: (1) αμμόλοφος, (2) ενδιάμεσος αμμόλοφος και (3) καλύμματα άμμου. Το περιβάλλον των αμμολόφων αναπτύσσεται σε θέσεις όπου ο άνεμος είναι το κυρίαρχο μέσο το οποίο μεταφέρει και αποθέτει την άμμο. Οι

ενδιάμεσες περιοχές αμμολόφων μπορούν να δεχτούν τόσο αιολικά ιζήματα όσο και ιζήματα που μεταφέρονται και αποτίθενται από εφήμερα ρεύματα σε πλημμυρικές πεδιάδες ρεμάτων ή λίμνες Playa. Το περιβάλλον των καλυμμάτων άμμου αναπτύσσεται γύρω από τα περιθώρια των αμμόλοφων. Οι αποθέσεις των καλυμμάτων άμμου χαρακτηρίζονται από μια μεταβατική φάση μεταξύ των αποθέσεων αμμόλοφων και ενδιάμεσων αμμόλοφων.

## 5.5 Λιμναία Περιβάλλοντα Ιζηματογένεσης

Η *λιμνολογία* ως επιστήμη αποτελεί υποσύνολο της Θαλάσσιας Βιολογίας - Ιζηματολογίας και της Ωκεανογραφίας. Μελετά τους αβιοτικούς και τους βιοτικούς παράγοντες που συναντώνται στα εσωτερικά ύδατα γλυκού ή υφάλμυρου νερού που απαντώνται στη χέρσο. Οι λίμνες ως περιβάλλοντα, σύμφωνα με την οδηγία 2000/60/EK, ανήκουν στην κατηγορία των εσωτερικών υδάτων, δηλαδή στα επιφανειακά ύδατα τα οποία ανήκουν τα στάσιμα ή ρέοντα επιφανειακά ύδατα. Ως *λίμνη* μπορεί να οριστεί μια μάζα νερού που δεν είναι θαλασσινό και που συγκεντρώνεται σε ένα βύθισμα του ανάγλυφου της Γης. Το μέγεθος των λιμνών αρχίζει από μερικές εκατοντάδες μέτρα και φθάνει μέχρι εκατοντάδες χιλιόμετρα. Επιπλέον, οι λίμνες διακρίνονται σε παραμένουσες και εφήμερες και απαντώνται σε ορεινές περιοχές (λίμνες των Άλπεων) ή σε χαμηλές και επίπεδες περιοχές. Ακόμη, περιέχουν γλυκά ή υφάλμυρα νερά ανάλογα με το κλίμα. Μπορεί να αποτελούν ή να μην αποτελούν πηγές τροφοδοσίας ποταμού.

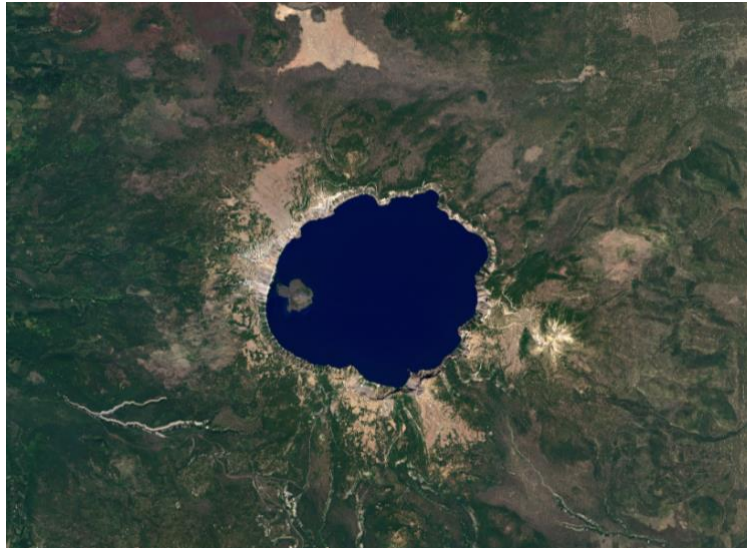
Οι λίμνες καλύπτουν περίπου το 1-2% της επιφάνειας της Γης. Η ιζηματογένεση των λιμνών είναι πιο διαδεδομένη σήμερα από ό,τι ήταν κατά το γεωλογικό παρελθόν, εξαιτίας της ανύψωσης και της ανάδυσης. Στην πραγματικότητα, οι παλαιές λιμναίες αποθέσεις φαίνεται να είναι ελάχιστος σημασίας σε μέγεθος στη συνολική στρωματογραφική καταγραφή, αν και έχουν αναγνωριστεί σε στρωματογραφικές ακολουθίες από το Προκάμβριο έως το Ολόκαινο. Αν και δεν αφθονούν ως γεωαρχεία, τα ιζήματα των λιμνών είναι σημαντικά καθώς αποτελούν τα σημαντικότερα παλαιοκλιματικά αρχεία καθώς οι μεταβολές του χημισμού των λιμναίων ιζημάτων αποτελούν δείκτη για την καταγραφή των κλιματικών μεταβολών του παρελθόντος. Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι παλαιοκλιματικές μεταβολές υγρού και ξηρού κλίματος μπορούν να αναγνωριστούν στη βάση του χημισμού και της ορυκτολογίας των λιμναίων ιζημάτων. Επίσης, μερικά κοιτάσματα λιμνών περιέχουν οικονομικά σημαντικές ποσότητες πετρελαϊκών σχιστόλιθων, εβαποριτικών ορυκτών, άνθρακα, ουράνιο και σίδηρο, ενώ πλούσια σε οργανικό υλικό λιμναία ιζήματα μπορούν να αποτελέσουν μητρικά πετρώματα υδρογονανθράκων.

### 5.5.1 Προέλευση και μέγεθος λιμνών

Οι λεκάνες ή κοιλάτρες στις οποίες σχηματίζονται οι λίμνες μπορούν να δημιουργηθούν με διάφορους μηχανισμούς, οι οποίοι συνοψίζονται ακολούθως:

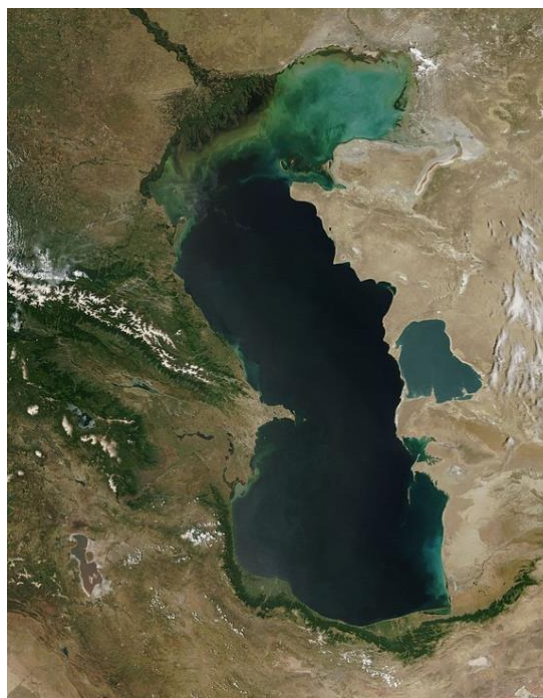
- α) τεκτονικές κινήσεις όπως ρηγματώσεις, ταφρογένεση,
- β) παγετώδεις διεργασίες,
- γ) κατολισθήσεις,
- δ) ηφαιστειακή δραστηριότητα, έκρηξη και κατάρρευση κρατήρα,
- ε) επίδραση του ανέμου,
- στ) ποτάμια δραστηριότητα.

Πολλές υπάρχουσες λίμνες φαίνεται ότι προήλθαν άμεσα ή έμμεσα από παγετώδεις διεργασίες ενώ γνωρίζουμε ότι ορισμένες μεγάλες σύγχρονες λίμνες σχηματίζονται επίσης από τεκτονικές διεργασίες (π.χ. λίμνη Τανγκανίκα στο σύστημα ρήγματος της Ανατολικής Αφρικής, λίμνη Βαϊκάλη στο σύστημα ρήγματος Baikal στη Σιβηρία) και ηφαιστειακές διεργασίες (π.χ. Λίμνη Κρατήρα Όρεγκον, Εικόνα 5.13).



**Εικόνα 5.13** Δορυφορική φωτογραφία της λίμνης του κρατήρα Όρεγκον  
(πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crater\\_Lake,\\_Oregon\\_by\\_Planet\\_Labs.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crater_Lake,_Oregon_by_Planet_Labs.jpg) ).

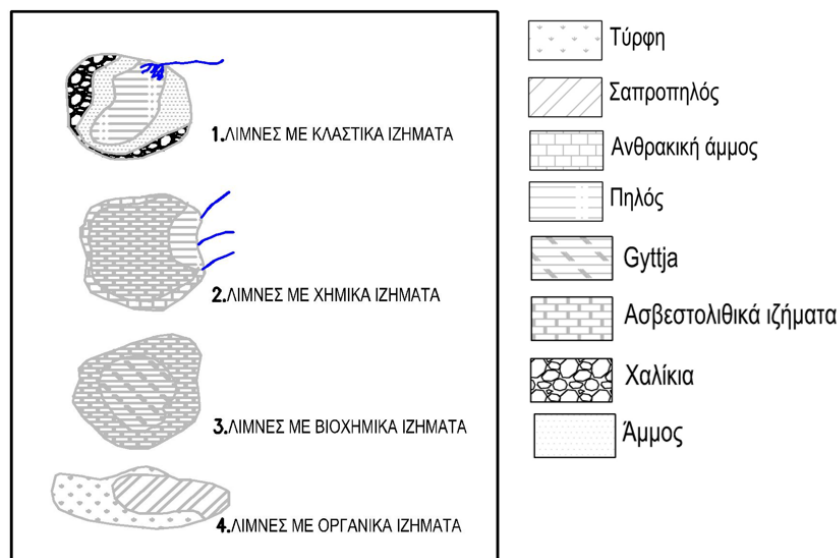
Οι σύγχρονες λίμνες κυμαίνονται σε διαστάσεις από μερικές δεκάδες τετραγωνικά μέτρα έως δεκάδες χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα. Η μεγαλύτερη σύγχρονη λίμνη είναι της Κασπίας Θάλασσας με έκταση 436.000 km<sup>2</sup> (Εικόνα 5.14). Άλλες μεγάλες λίμνες με επιφάνειες που κυμαίνονται μεταξύ 50.000 και 100.000 km<sup>2</sup> είναι η λίμνη Superior, η λίμνη Huron και η λίμνη Michigan στη Βόρεια Αμερική, η λίμνη Βικτώρια, που βρίσκεται μεταξύ Ουγκάντας και Κένυας στην Ανατολική-Κεντρική Αφρική και η λίμνη Aral ανατολικά της Κασπίας Θάλασσας. Τα βάθη των σύγχρονων λιμνών κυμαίνονται από λίγα μέτρα σε μικρές λίμνες έως περισσότερα από 1.700 μέτρα στη βαθύτερη λίμνη του κόσμου, τη λίμνη Βαϊκάλη, στη Σιβηρία. Το βάθος του νερού και η επιφάνεια δεν σχετίζονται απαραίτητα. Έτσι, μερικές από τις μεγαλύτερες λίμνες έχουν πολύ μικρό βάθος και μεγάλη επιφάνεια και το αντίθετο. Για παράδειγμα, η λίμνη Βικτώρια έχει επιφάνεια 68.000 km<sup>2</sup> αλλά μέγιστο βάθος μόνο 79 m, ενώ η λίμνη του κρατήρα στο Oregon, με έκταση περίπου 52 km<sup>2</sup> έχει μέγιστο βάθος περίπου 580 m. Τα γεωαρχαία των λιμναίων ιζημάτων δείχνουν ότι οι παλαιές λίμνες κυμαίνονταν επίσης σε μέγεθος από μικρές έως μεγάλες υδάτινες μάζες που ξεπερνούσαν τα 100.000 km<sup>2</sup>.



**Εικόνα 5.14** Δορυφορική φωτογραφία της Κασπίας θάλασσας  
(πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Caspian\\_Sea\\_from\\_orbit.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Caspian_Sea_from_orbit.jpg)).

Οι σύγχρονες λίμνες εμφανίζονται σε ποικίλα περιβάλλοντα και γεωγραφικές περιοχές, συμπεριλαμβανομένων των παγετώνων σε πεδιάδες και ορεινές κοιλάδες, σε μη παγετώδεις πεδινές και ορεινές περιοχές, σε ερήμους και παράκτια πεδία. Από άποψη κλιματικών συνθηκών συναντώνται σε όλο το φάσμα των κλιματικών ζωνών, από πολύ ζεστές έως πολύ κρύες περιοχές και από πολύ ξηρές έως πολύ υγρές. Οι περισσότερες λίμνες είναι γεμάτες με γλυκό νερό, αλλά άλλες, όπως η Κασπία Θάλασσα και πολλές λίμνες σε άνυδρες περιοχές (π.χ. Great Salt Lake, Γιούτα), παρουσιάζουν υψηλή αλατότητα. Πολλές λίμνες συνδέονται με άλλους τύπους συστημάτων εναπόθεσης, κυρίως με παγετώδη, ποτάμια, αιολικά και δελταϊκά συστήματα. Οι διεργασίες εναπόθεσης που λαμβάνουν χώρα στις λίμνες επηρεάζονται τόσο από τις κλιματικές συνθήκες όσο και από μια ποικιλία φυσικών, χημικών και βιολογικών παραγόντων, που εξαρτώνται από τη χημική σύσταση των νερών τους και τις μεταβολές της επιφάνειάς τους και την παροχή κλαστικού ιζήματος. Ορισμένα χαρακτηριστικά των λιμναίων περιβαλλόντων ιζηματογένεσης είναι παρόμοια με εκείνα του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικές διαφορές όσον αφορά τους παράγοντες όπως το μέγεθος της λεκάνης, τον χημισμό του νερού, τις φυσικές διεργασίες (π.χ. απουσία παλιρροιών στις λίμνες) και τις βιολογικές διεργασίες.

Με βάση τα υδρολογικά χαρακτηριστικά των λιμνών, οι λίμνες χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: (α) ανοιχτές και (β) κλειστές. Οι ανοιχτές λίμνες είναι εκείνες που έχουν εκροή νερού και σχετικά σταθερή ακτογραμμή και στις οποίες η εισροή και η βροχόπτωση εξισορροπούνται περίπου από την εκροή και την εξάτμιση. Η κλαστική ιζηματογένεση συνήθως κυριαρχεί σε ανοιχτές λίμνες. Ωστόσο, η χημική ιζηματογένεση μπορεί να συμβεί σε ανοιχτές λίμνες που έχουν χαμηλή παροχή κλαστικού ιζήματος. Οι κλειστές λίμνες δεν έχουν μεγάλη εκροή και έχουν κυμαινόμενες ακτές. Η εισροή συνήθως υπερβαίνει την εξάτμιση και την κατείσδυση. Αυτές οι συνθήκες οδηγούν σε συγκέντρωση ιόντων στο νερό της λίμνης και επικράτηση της χημικής ιζηματογένεσης, αν και μπορεί επίσης να συσσωρευούνται και κλαστικά ιζήματα. Ως εκ τούτου με βάση τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, τις κλιματικές συνθήκες και το υδρολογικό ισοζύγιο μπορούμε να έχουμε την παρουσία στις λίμνες κλαστικών, χημικών, βιοχημικών και οργανικών ιζημάτων (Εικόνα 5.15).



Εικόνα 5.15 Κατηγορίες προτύπων λιμναίων περιβαλλόντων ιζηματογένεσης και οι κατηγορίες των αποθέσεων αυτών.

### 5.5.2 Παράγοντες που ελέγχουν τη λιμναία ιζηματογένεση

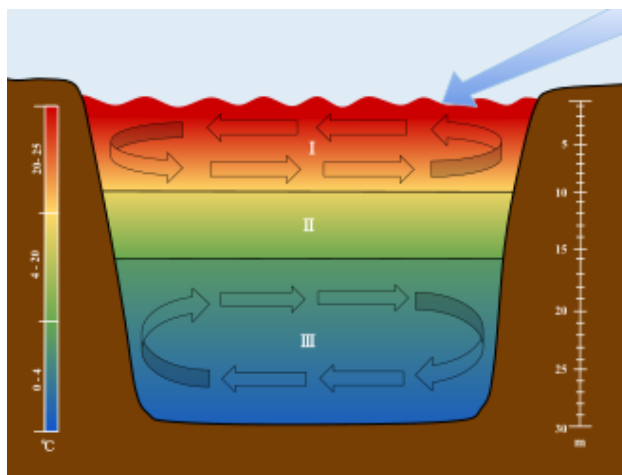
Τα είδη των ιζημάτων που εναποτίθενται στις λίμνες είναι το αποτέλεσμα (α) φυσικών, (β) χημικών και (γ) βιολογικών διεργασιών (Talbot and Allen, 1996). Οι κλιματικοί παράγοντες επηρεάζουν την ιζηματογένεση των λιμνών με πολλούς τρόπους. Για παράδειγμα, η παγκόσμια κατανομή των λιμνών αντανακλά τα παγκόσμια κλιματικά πρότυπα. Η στάθμη του νερού στις λίμνες διατηρείται λόγω της ισορροπίας μεταξύ εξάτμισης και βροχόπτωσης. Το κλίμα μπορεί να καθορίσει εάν μια λίμνη είναι πλήρης και έχουμε υπερχειλίση (ανοιχτή) ή λειτουργεί ως εσωτερική λεκάνη απορροής (κλειστή). Επιπλέον, το είδος της χημικής ιζηματογένεσης στις λίμνες αντανακλά έντονα τις κλιματικές συνθήκες. Για παράδειγμα, η χημική καθίζηση σε λίμνες άνυδρων περιοχών κυριαρχείται από την κατακρήμνιση γύψου, αλίτη και διαφόρων άλλων αλάτων, αλλά σε υγρά κλίματα η χημική ιζηματογένεση κυριαρχείται από την απόθεση ανθρακικών αλάτων. Η εισροή ιζημάτων στις λίμνες επηρεάζεται από τη φυτική κάλυψη και την έκταση αποστράγγισης και είναι μεγάλη σε άνυδρες περιοχές



με χαμηλή βλάστηση. Σε ψυχρά κλίματα, οι εποχιακές πτώσεις της θερμοκρασίας οδηγούν σε πάγωμα των λιμνών, προκαλώντας μείωση της εισροής ιζημάτων και παύση της κυματικής δραστηριότητας, επιτρέποντας την εναπόθεση λεπτόκοκκου αιωρούμενου ιζήματος κατά τη διάρκεια αυτών των ήσυχων υδροδυναμικών συνθηκών. Το κλίμα και η φυσιογραφία των λιμνών καθορίζονται από τις τοπικές καιρικές συνθήκες. Σφοδρές, τοπικές καταιγίδες με ισχυρούς ανέμους μπορεί να προκαλέσουν σημαντική διάβρωση των ακτών, σε συνδυασμό με μεταφορά και εναπόθεση ιζημάτων, σε σύντομες χρονικές περιόδους.

### 5.5.2.1 Φυσικές Διεργασίες

Οι φυσικές διεργασίες που αλληλοεπιδρούν στις λίμνες για να επιφέρουν τη μεταφορά και την απομάκρυνση των ιζημάτων περιλαμβάνουν τον άνεμο, την εισροή ποτάμιων υδάτων και τις κλιματικές συνθήκες. Το ανεμολογικό καθεστώς έχει μεγάλη σημασία στις λίμνες καθώς είναι ο κύριος παράγοντας για τη δημιουργία των ρευμάτων και των κυμάτων στη λίμνη και κατ' επέκταση ο κύριος παράγοντας για την κυκλοφορία και ανάμειξη των υδάτων. Η εισροή κάποιου ποταμού ή ρεύματος μέσα σε μια λίμνη μπορεί να μεταφέρει λεπτόκοκκο υλικό σε μεγάλες αποστάσεις μέσα στη λίμνη ή μπορεί να δημιουργήσει ροές πυκνότητας ή ρεύματα θολότητας, που μεταφέρουν ιζήματα κατά μήκος του πυθμένα προς τα βαθύτερα τμήματα της λίμνης. Η εισροή ποταμών μπορεί επίσης να δημιουργήσει ρεύματα που ρέουν κατά μήκος των περιθωρίων των λιμνών. Εξαιτίας της ατμοσφαιρικής εποχικής αύξησης της θερμοκρασίας, η οποία είναι συνάρτηση του κλίματος, δημιουργούνται διαφορές πυκνότητας και στρωμάτωση της υδάτινης στήλης μιας λίμνης με τη δημιουργία τριών κύριων διακριτών στρωμάτων, τα οποία είναι τα εξής: το *επιλίμνιο*, το *μεταλίμνιο* και το *υπολίμνιο* (Εικόνα 5.16). Αυτές οι διαφορές μπορεί να προκαλέσουν στρωματοποίηση της υδάτινης στήλης (θέρμανση επιφανειακών υδάτων) ή, υπό ορισμένες συνθήκες, δημιουργία ρευμάτων πυκνότητας εξαιτίας της αναστροφής της υδάτινης στήλης (Εικόνα 5.16). Επίσης, σε περιοχές χαμηλών θερμοκρασιών, το πάγωμα και λιώσιμο των επιφανειακών υδάτων ελέγχει την κλαστική ιζηματογένεση και τη μεταφορά των ιζημάτων.



**Εικόνα 5.16** Οι τρεις κύριες διακριτές ενότητες της υδάτινης στήλης των λιμνών: I. επιλίμνιο, II. μεταλίμνιο και III. υπολίμνιο (πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Lake\\_Stratification\\_\(11\).svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Lake_Stratification_(11).svg)).

### 5.5.2.2 Χημικές διεργασίες

Η χημική ιζηματογένεση είναι ιδιαίτερα συχνή σε κλειστές λίμνες. Ο χημισμός των νερών των λιμνών ποικίλλει από λίμνη σε λίμνη, αλλά κυριαρχείται από ιόντα ασβεστίου, μαγνησίου, νατρίου, καλίου, ανθρακικά, θειικά και ιόντα χλωρίου. Έτσι, τα πιο κοινά χημικά ιζήματα στις λίμνες των υγρών περιοχών είναι ανθρακικά, ενώ συναντάμε επίσης και φωσφορικά άλατα, σουλφίδια, πυριτόλιθους και οξείδια σιδήρου και μαγγάνιου. Σε ξηρές περιοχές, όπου οι ρυθμοί εξάτμισης είναι υψηλοί, τα χημικά λιμναία ιζήματα κυριαρχούνται από ανθρακικά, θειικά και χλωριούχα ιζήματα. Οι αποθέσεις των εβαποριτών στις λίμνες περιλαμβάνουν πολλά κοινά θαλάσσια εβαποριτικά ορυκτά όπως γύψο, ανυδρίτη, αλίτη και σουλβίτη. Το pH των νερών μιας λίμνης συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 6 και 9. Ωστόσο, μπορεί να κυμαίνεται από λιγότερο από 2 (πολύ όξινο) σε ορισμένες ηφαιστειακές λίμνες έως και 12 (πολύ αλκαλικό) σε ορισμένες κλειστές λίμνες της ερήμου. Αν και οι διεργασίες χημικής ιζηματογένεσης είναι πιο σημαντικές σε κλειστές λίμνες, μπορεί να κυριαρχούν επίσης σε ορισμένες ανοιχτές λίμνες όπου η παροχή κλαστικού ιζήματος είναι περιορισμένη (Εικόνα 5.15).



### 5.5.2.3 Βιολογικές Διεργασίες

Οι οργανισμοί διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη λιμναία ιζηματογένεση με την προσρόφηση χημικών στοιχείων από την υδάτινη στήλη της λίμνης: (α) για την κατασκευή του κελύφους τους και την επακόλουθη εναπόθεση αυτών των κελυφών, (β) στην προσρόφηση του CO<sub>2</sub> κατά τη φωτοσύνθεση (βοηθώντας έτσι την κατακρήμνιση του CaCO<sub>3</sub>), συμβάλλοντας έτσι στον σχηματισμό φυτικών αποθέσεων από τα υπολείμματα των φυτών και (γ) στη βιοαναμόχλευση των ιζημάτων. Πολλά είδη οργανισμών ζουν σε λίμνες και συνεισφέρουν τα σκελετικά και μη, υπολείμματά τους στα ιζήματα των λιμνών. Τα πυριτικά διάτομα είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα και αξιοσημείωτα. Τα διάτομα πραγματοποιούν φωτοσύνθεση και είναι ο μόνος σημαντικός τύπος λιμναίων οργανισμών που παράγει πυρίτιο. Οι αποθέσεις αυτών των ιζημάτων έχουν σχηματίσει σημαντικά κοιτάσματα διατομιτών σε πολλές λίμνες του Πλειστόκαινου. Τα γαστερόποδα, τα ασβεστολιθικά φύκη και τα οστρακάδια επίσης αφθονούν σε πολλές λίμνες και είναι σημαντικοί παράγοντες προσφοράς ανθρακικού ασβεστίου. Πολλοί διαφορετικοί τύποι ανώτερων φυτών ζουν σε λίμνες. Υπό τις συνθήκες μείωσης οξυγόνου και τους υψηλούς ρυθμούς καθίζησης που υπάρχουν σε ορισμένες λίμνες, τα υπολείμματα των ανώτερων φυτών μπορεί να διατηρηθούν εν μέρει για να σχηματίσουν τελικά τύρφη και άνθρακα. Λαμβάνοντας υπόψη το μικρό μέγεθος πολλών λιμνών και τη γενικά χαμηλότερη αλκαλικότητα και ρυθμιστική τους ικανότητα, σε σύγκριση με εκείνα του ανοιχτού ωκεανού, η αφομοίωση του CO<sub>2</sub> από τα φυτά κατά τη φωτοσύνθεση είναι πολύ πιο σημαντικός παράγοντας για τον έλεγχο του pH των λιμνών από αυτό των ωκεανών.

### 5.5.3 Κατάταξη των λιμνών και τρόπος σχηματισμού των λιμνών

Ανάλογα με τον μηχανισμό γένεσης και τον τρόπο σχηματισμού τους, οι λίμνες ταξινομούνται με βάση:

- (Α) τις γεωλογικές συνθήκες σχηματισμού της λεκάνης,
- (Β) τη θερμοκρασία και τον τρόπο ανάμειξης της υδάτινης στήλης,
- (Γ) την περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά και τον βαθμό ευτροφισμού,
- (Δ) την αλατότητα των υδάτων,
- (Ε) τη διατήρησή τους στον χρόνο,
- (ΣΤ) το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο στο οποίο βρίσκονται.

(Α) Με βάση τον τρόπο σχηματισμού της λιμναίας λεκάνης και τις γεωλογικές διεργασίες, διακρίνουμε τις λίμνες σε τεκτονικές, ηφαιστειογενείς, λίμνες που δημιουργούνται εξαιτίας κατολισθήσεων, παγετωνικής προέλευσης, καρστικές, λίμνες που δημιουργούνται από τη δράση των ποταμών, λίμνες από πρόσκρουση με μετεωρίτη, παράκτιες και αιολικές λίμνες.

(Β) Με βάση τη θερμοκρασία και τον τρόπο ανάμειξης διακρίνουμε τις λίμνες σε:

- *Αμεικτικές* δίχως αρκετά σημαντικές θερμικές ανταλλαγές ανάμεσα στο εξωτερικό και το εσωτερικό του νερού.
- *Ψυχρές μονομεικτικές* με θερμοκρασία που δεν ξεπερνά ποτέ τους 4°C στην επιφάνεια κατά τη θερμή εποχή και αποκαλούμενες μερικές φορές λίμνες πολικού τύπου.
- *Θερμές μονομεικτικές* των οποίων η θερμοκρασία δεν κατεβαίνει ποτέ κάτω από 4°C, ούτε στην επιφάνεια, ούτε στον βυθό και δεν δέχονται εξαιτίας αυτού του γεγονότος παρά μια περίοδο κυκλοφορίας κατά την ψυχρή εποχή και μια περίοδο άμεσης στρωμάτωσης κατά τη θερμή εποχή. Είναι οι λίμνες του τροπικού τύπου, οι λίμνες του υποτροπικού τύπου και οι θερμές λίμνες.
- *Ολιγομεικτικές* μέσα στις οποίες το νερό είναι πάντοτε θερμό σε όλα τα βάθη και οι περιόδοι κυκλοφορίας σπάνιες, μικρές, ακανόνιστες και δίχως μεγάλη σημασία. Είναι οι λίμνες του τροπικού τύπου, οι λίμνες σε χαμηλό υψόμετρο των περιοχών του Ισημερινού.
- *Πολυμεικτικές* με θερμοκρασία σχετικά χαμηλή σε όλα τα βάθη, αν και πάντοτε ανώτερη από 4°C και που παρουσιάζουν πολυάριθμες (και μάλιστα καθημερινές) περιόδους κυκλοφορίας που οφείλονται στην απώλεια της εναποθηκευμένης θερμότητας και που εμποδίζουν έτσι τον σχηματισμό μιας σταθερής στρωμάτωσης. Είναι η περίπτωση των πολυάριθμων λιμνών σε μεγάλο υψόμετρο των ενδοτροπικών περιοχών.

(Γ) Οι λίμνες με βάση τη συγκέντρωσή τους σε θρεπτικά συστατικά, την πρωτογενή τους παραγωγικότητα και τη συγκέντρωσή τους σε χλωροφύλλη-α διαχωρίζονται σε *ολιγοτροφικές*, *ευτροφικές* και *δυστροφικές*. Μια τυπικά ολιγότροφη λίμνη έχει χαμηλή συγκέντρωση και παροχή θρεπτικών συστατικών (άζωτο, φώσφορο,

οργανικό άνθρακα), μεγάλο βάθος με απότομες πλαγιές, μικρή πρωτογενή παραγωγικότητα, μικρούς πληθυσμούς οργανισμών, ελάχιστα φυτά, μικρή διαφοροποίηση του διαλυμένου οξυγόνου από το επιλίμνιο στο υπολίμνιο, διαυγή νερά με εισβολή φωτός ακόμη και κάτω από το θερμοκλινές. Την αντίθετη εικόνα παρουσιάζει μια τυπικά εύτροφη λίμνη.

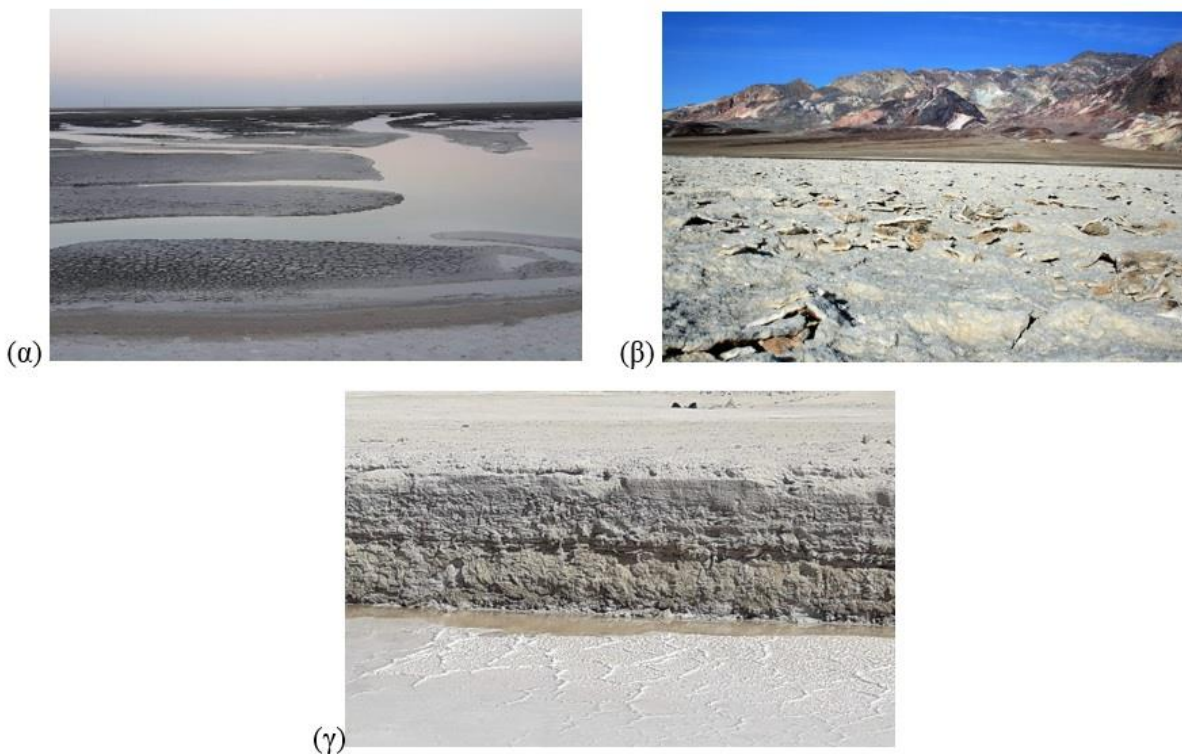
Η αύξηση των συγκεντρώσεων θρεπτικών αλάτων στις λίμνες προκαλεί συνήθως αύξηση της πρωτογενούς (φυτικής) παραγωγής, *άνθιση των φυκιών* (algae bloom) (Εικόνα 5.17). Το φαινόμενο ονομάζεται *ευτροφισμός*. Όταν όμως η πρωτογενής παραγωγή αυξηθεί υπέρμετρα το οικοσύστημα δεν μπορεί να καταναλώσει την παραγόμενη βιομάζα, που πεθαίνει και αποσυντίθεται. Η αποσύνθεση της οργανικής ύλης προκαλεί κατανάλωση του διαλυμένου οξυγόνου και μπορεί να καταλήξει σε εξάντλησή του (ανοξία).



**Εικόνα 5.17** Χαρακτηριστικό παράδειγμα άνθισης φυκιών (algae bloom) από υδάτινο σύστημα της Δυτικής Πελοποννήσου.

(Δ) Ένας από τους κύριους διαχωρισμούς των λιμνών γίνεται με βάση τις ιδιότητες των υδάτων τους ως προς την αλατότητα. Οι λίμνες με βάση την αλατότητά τους χωρίζονται σε λίμνες (α) γλυκών, (β) υφάλμυρων και (γ) αλμυρών υδάτων. Η αλατότητα σχετίζεται με την περιεκτικότητα των υδάτων σε υδατοδιαλυτές ιοντικές ουσίες (π.χ. άλατα). Η φυσική παράμετρος, την οποία μετράμε με φορητά όργανα, είναι το μέτρο της ικανότητας του νερού να λειτουργεί ως αγωγός του ηλεκτρισμού (αγωγιμότητα). Η αλατότητα αποτελεί μια συνολική εκτίμηση της περιεκτικότητας του ύδατος σε συγκεκριμένα ιόντα αλάτων και κυρίως αυτών της θάλασσας (Μέση αλατότητα θάλασσας = 35 psu ή ‰). Η αλατότητα είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για ένα οικοσύστημα καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη βιολογική και φυσικοχημική δραστηριότητα του οικοσυστήματος. Η αλατότητα, σε συνδυασμό με άλλες φυσικοχημικές παραμέτρους (π.χ. θερμοκρασία) καθορίζει τα είδη των μικροοργανισμών, των φυτών και ζώων που θα αναπτυχθούν στις διάφορες ζώνες. Τα όρια της αλατότητας για τις τρεις κύριες υποκατηγορίες λιμνών είναι 0,3-1‰ γλυκών νερών, 1-25‰ υφάλμυρων νερών και >25‰ αλμυρών νερών.

(Ε) Με βάση τη διατήρησή τους στον χρόνο οι λίμνες χωρίζονται σε παραμένουσες και εφήμερες λίμνες. Οι παραμένουσες είναι αυτές που διατηρούνται για μεγάλα χρονικά διαστήματα και μπορεί να ανήκουν σε μία από τις παραπάνω κατηγορίες. Οι εφήμερες λίμνες δημιουργούνται σε περιοχές όπου οι βροχοπτώσεις είναι σποραδικές και χαρακτηρίζονται από μεγάλα διαστήματα ανομβρίας. Στην κατηγορία των εφήμερων λιμνών είναι οι λίμνες playa και sabkha (Εικόνα 5.18). Λίμνες playa αποτελούν περιφερειακό υποπεριβάλλον των αλλουβιακών ριπιδίων, με χαρακτηριστικές ερυθροκάστανες αργιλικές αποθέσεις οι οποίες λόγω των κύκλων διαβροχής και ξήρανσης, τις περιόδους ξηρασίας εμφανίζουν δομές πολυγωνικών διαρρήξεων, τις δομές mud-cracks, ενώ συχνά εντός των αποθέσεων παρατηρούνται ασβεστίτικα συγκρίματα (caliche). Η δεύτερη κατηγορία εφήμερων λιμνών είναι οι sabkha, οι οποίες εμφανίζονται σε ερήμους όπου κυριαρχούν η εξάτμιση του νερού και η χημική ιζηματογένεση μέσω της απόθεσης εβαποριτικών αλάτων και ορυκτών όπως είναι ο γύψος, ο ανυδρίτης, ο αλίτης, ο χλωρίτης κ.λπ.



**Εικόνα 5.18** Παραδείγματα εφήμερων λιμνών και αποθέσεων (α) σύγχρονη λίμνη Sabkha στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, (β) αποθέσεις λίμνης playa στην Κοιλιάδα του Θανάτου (Death Valley πηγή: [https://af.wikipedia.org/wiki/L%C3%AAer:Devil%27s\\_Golf\\_Course\\_in\\_Death\\_Valley\\_NP.jpg](https://af.wikipedia.org/wiki/L%C3%AAer:Devil%27s_Golf_Course_in_Death_Valley_NP.jpg)) και (γ) σύγχρονες εβαποριτικές αποθέσεις βάθους 1 m λίμνης Sabkha στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα.

(ΣΤ) Με βάση το γεωγραφικό πλάτος και τις κλιματικές συνθήκες οι λίμνες διαχωρίζονται σε:

- *Τροπικές* λίμνες με μέση θερμοκρασία γύρω στους 40°C. Αυτές δείχνουν μια θερμική ζώνωση, όπου μικρές διαφορές σημειώνονται μεταξύ των ανώτερων και κατώτερων υδάτινων στρωμάτων ενώ λείπει το μεταλλίμνιο.
- *Εόκρατες* λίμνες με κανονική θερμική ζώνωση το καλοκαίρι και αντίστροφη ζώνωση τον χειμώνα. Την άνοιξη και το φθινόπωρο υπάρχουν επίσης ομοθερμικές συνθήκες.
- *Πολικές* λίμνες με μέση θερμοκρασία κάτω από 40°C στη διάρκεια του έτους όπου αναπτύσσεται αντίστροφη θερμική ζώνωση πλην μιας μικρής περιόδου της άνοιξης, όπου σημειώνεται ομοθερμία.

### 5.5.4 Λιμναία ιζήματα

Τα λιμναία ιζήματα διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες: (α) κλαστικά, (β) χημικά, (γ) βιοχημικά και (δ) οργανικά.

(α) Η λιμναία κλαστική ιζηματογένεση ακολουθεί τους κανόνες της κλαστικής ιζηματογένεσης έχοντας ως μέσο το νερό. Ως εκ τούτου, η κατανομή του κοκκομετρικού μεγέθους των λιμναίων ιζημάτων εξαρτάται από τις υδροδυναμικές συνθήκες, το είδος του υποβάθρου και την απόσταση από την πηγή τροφοδοσίας, τη μορφολογία της περιοχής, από την παρουσία ποτάμιου συστήματος το οποίο μπορεί να εκβάλλει στη λίμνη, και από τα βαθυμετρικά χαρακτηριστικά της λίμνης, ενώ όπως και στα περισσότερα περιβάλλοντα ιζηματογένεσης, ο άνεμος διαδραματίζει δευτερεύοντα ρόλο. Σε παγετώδεις λίμνες οι οποίες σχηματίστηκαν από λιθώνες ή μοραίνες, ο πυθμένας χαρακτηρίζεται από αδρομερές υλικό. Στις περισσότερες λίμνες ακολουθείται μια κατανομή του κοκκομετρικού μεγέθους το οποίο ελαττώνεται από τις όχθες και προς τα βαθύτερα τμήματα της λίμνης με αποτέλεσμα το αδρομερές υλικό (άμμος και χάλικες) να αποτίθεται πλησίον των όχθων και το λεπτόκοκκο (ιλύς και άργιλος) να αποτίθεται στα βαθύτερα τμήματα. Επιπλέον, το μέγεθος των κλαστικών κόκκων μιας λίμνης εξαρτάται από το αν αυτή είναι ορεινή ή πεδινή, με το αδρομερές υλικό να κυριαρχεί στις ορεινές λίμνες έναντι των πεδινών. Η εκβολή ενός ποταμού ή ενός ρέματος το οποίο μεταφέρει ιζηματογενές φορτίο επηρεάζει την κατανομή των μεγεθών, με το αδρομερές υλικό να αναπτύσσεται στο εγγύτατο τμήμα

του ποταμού και το λεπτόκοκκο στα απομακρυσμένα και βαθύτερα τμήματα της λίμνης. Το αδρομερές υλικό συνήθως περιορίζεται σε μικρά βάθη της λίμνης, ενώ προς το κεντρικό τμήμα της λιμναίας λεκάνης τα αδρομερή υλικά γίνονται βαθμιαία πιο λεπτόκοκκα.

(β) Η χημική ιζηματογένεση στις λιμναίες λεκάνες εξαρτάται από τα διαλυμένα ιόντα και τις φυσικοχημικές παραμέτρους του νερού όπως είναι η θερμοκρασία, το pH, η αλατότητα και το δυναμικό οξειδοαναγωγής. Η κατηγορία των λιμναίων χημικών ιζημάτων περιλαμβάνει ιζήματα που αποτελούνται κυρίως από αυτογενή και διαγενετικά ορυκτά που σχηματίζονται από ανόργανη κατακρήμνιση εντός της στήλης νερού ή μετά την εναπόθεση στη στήλη ιζήματος. Οι δύο μεγάλες κατηγορίες λιμναίων χημικών ιζημάτων είναι τα ανθρακικά (Tucker, & Wright, 1990) και τα εβαποριτικά. Οι βασικοί ιζηματογενείς κόκκοι που κατακρημνίζονται ανάλογα με το φυσικοχημικό πλαίσιο της στήλης του νερού της λίμνης είναι ο ασβεστίτης, ο αραγωνίτης, ο δολομίτης και ο μαγνησίτης. Σε λίμνες με πολύ ξηρό κλίμα έχουμε την παρουσία εβαποριτικών αλάτων όπως την απόθεση γύψου κ.λπ.

(γ) Τα βιοχημικά ιζήματα μπορεί να αποτελούνται από καλά διατηρημένα έως εξαιρετικά αποικοδομημένα υπολείμματα οργανισμών (φυτών ή/και ζώων) που μπορεί να έχουν ή να μην έχουν πυριτικά, χιτινώδη ή ασβεστολιθικά κελύφη. Διαχωρίζουμε τα βιογενή ιζήματα σε ανθρακικά ιζήματα, που αποτελούνται από υπολείμματα οργανισμών που δεν έχουν σκληρά σκελετικά μέρη (μεγάλο εύρος από μακροσκοπικά θραύσματα φυτών και ωλίθους από αραγωνίτη και ανοικοδομούμενη οργανική ύλη φυκιών) και απολιθωματοφόρα ιλυώδη ιζήματα - όζους (oozes). Οι όζοι αποτελούνται από υπολείμματα οργανισμών με διατηρημένα τα σκληρά σκελετικά στοιχεία. Ένας όζος αποτελείται από μικροσκοπικά σκελετικά στοιχεία (π.χ. διάτομα). Λόγω της σπανιότητας της ύπαρξης ασβεστιτικών πλαγκτονικών οργανισμών στις λίμνες οι ασβεστιτικοί βιογενείς όζοι είναι σπάνιοι.

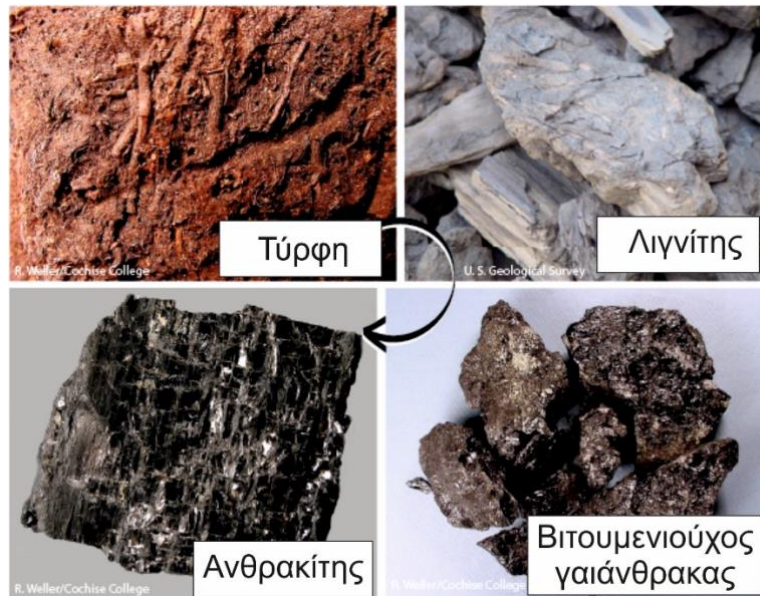
(δ) Τα λιμναία οργανικά ιζήματα προέρχονται από τη συσσώρευση οργανικής ύλης σε λιμναίες λεκάνες, τα οποία μπορεί να προέρχεται από οργανισμούς που κατοικούν στη λίμνη (κυανοβακτήρια, μακρο- και μικρόφυτα, φυτοπλαγκτόν, ζωοπλαγκτόν, βενθικοί οργανισμοί), ή περιττώματα από υδρόβιους ή χερσαίους οργανισμούς ή από οργανική ύλη που εισάγεται στη λίμνη από τη λεκάνη απορροής (χερσογενή ποώδη και ξυλώδη φυτά), αν και το τελευταίο είναι γενικά λιγότερο κοινό.

Όπως ισχύει για τις θαλάσσιες λεκάνες, τα ανθρακικά ιζήματα συσσωρεύονται συνήθως σε λιμναίες λεκάνες που χαρακτηρίζονται από στρωμάτωση της υδάτινης στήλης και το υπολίμνιό τους από ανοξία, υψηλή αλατότητα, γρήγορους ρυθμούς ιζηματογένεσης, ή σε εξαιρετικά παραγωγικά ρηγά συστήματα που κυριαρχούν τα μακρόφυτα. Σε σύγκριση με τις θαλάσσιες λεκάνες, η οργανική ύλη τείνει να διατηρείται καλύτερα στις λιμναίες λεκάνες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι λίμνες έχουν συνήθως υψηλότερους ρυθμούς ιζηματογένεσης, υψηλότερη παραγωγικότητα και ευνοϊκότερες συνθήκες διατήρησης, όπως υποξία ή ανοξία. Τα περισσότερα οργανικά λιμναία ιζήματα έχουν υποστεί κάποιο βαθμό αλλοίωσης από την αρχική τους μορφή εξαιτίας της ενανθράκωσης, της βιτουμενοποίησης και της βιοαποικοδόμησης. Αυτές οι διαδικασίες γενικά καθιστούν την οργανική ύλη των λεπτόκοκκων φυκιών μη αναγνωρίσιμη, οδηγώντας μας να διαχωρίζουμε τα οργανικά ιζήματα σε δύο κατηγορίες: τους γαιάνθρακες (διανεμημένα οργανικά ιζήματα και τύρφη) και τον σαπροπηλό.

Τα οργανογενή ιζήματα αποτελούνται από το μη διανεμημένο πλούσιο σε οργανικό υλικό ίζημα, ενώ οι γαιάνθρακες αποτελούν το διανεμημένο ίζημα και ταξινομούνται ανάλογα με τον βαθμό ενανθράκωσης/ωρίμανσης (Εικόνα 5.19). Τέσσερις κατηγορίες αναγνωρίζονται και χρησιμοποιούνται ως κύρια ονοματολογία των οργανογενών ιζημάτων/γαιάνθρακων και είναι:

- *Τύρφη*: μη συνεκτικοποιημένο, ασύνδετο οργανικό υλικό.
- *Λιγνίτης*: παρουσία λιγοστών θραυσμάτων φυτών, είναι μαλακός, θαμπός και καφέ.
- *Βιτουμενιούχος γαιάνθρακας*: μαύρος και σκληρός, με γυαλιστερές στρώσεις και κερματίζεται σε κυβοειδή θραύσματα.
- *Ανθρακίτης*: φωτεινός και στιλπνός, με κονγχώδη θραυσμό.





**Εικόνα 5.19** Χαρακτηριστικές φωτογραφίες της τύρφης και των γαιανθράκων με το βέλος να δείχνει τη σειρά ενανθράκωσης (πηγή: <https://openpress.usask.ca/physicalgeology/chapter/9-3-organic-sedimentary-rocks-2/>).

Ο σαπροπηλός είναι λεπτόκοκκη οργανική ύλη. Ο σαπροπηλός είναι ένας υδάτινος όζος ή λάσπη η οποία είναι πλούσια (>50%) σε οργανική ύλη σε άμορφη ή πολύ λεπτόκοκκη (<0,1 mm) μορφή. Η οργανική ύλη μπορεί να προέρχεται από φύκια ή βακτήρια ή από την αποσύνθεση χερσαίων και υδρόβιων φυτών. Ο όρος κοπρανοπηλός (coprope) μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θέση του σαπροπηλού όταν γίνεται ταυτοποίηση της οργανικής ύλης ως κόπρανα.

## 5.6 Παγετώδη Περιβάλλοντα

Τα παγετώδη περιβάλλοντα, με την ευρεία έννοια, είναι σύνθετα περιβάλλοντα που τα συναντάμε σε ποτάμια, και λιμναία κυρίως περιβάλλοντα. Μπορεί επίσης να περιλαμβάνουν τμήματα του ρηγού-θαλάσσιου περιβάλλοντος. Οι παγετώνες αποτελούν ένα σχετικά μικρό κομμάτι του γεωλογικού αρχείου πετρωμάτων, αν και αυτοί κάλυπταν μεγάλο μέρος στο γεωλογικό παρελθόν, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του Προκάμβριου, του Ορδοβίσιου, του Λιθανθρακοφόρου και του Πλειστόκαινου. Οι παγετώνες καλύπτουν επί του παρόντος περίπου το 10% της επιφάνειας της Γης, κυρίως σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Απαντώνται κυρίως ως μεγάλες μάζες πάγου στην Ανταρκτική (~86% της παγωμένης παγκόσμιας έκτασης) και στη Γροιλανδία (~ 11% της παγωμένης παγκόσμιας έκτασης) και ως μικρότερες μάζες στην Ισλανδία. Μικροί ορεινοί παγετώνες εμφανίζονται σε μεγάλα υψόμετρα σε όλα τα γεωγραφικά πλάτη του κόσμου. Περίπου το 80% του γλυκού νερού του κόσμου είναι συνδεδεμένο με παγετώδεις εκτάσεις, εκ των οποίων το μεγαλύτερο μέρος βρίσκεται στην Ανταρκτική. Σε αντίθεση με την τρέχουσα κατανομή τους, οι παγετώνες κάλυψαν περίπου το 30% της Γης κατά τη διάρκεια της μέγιστης επέκτασης τους στο Πλειστόκαινο και επεκτάθηκαν σε πολύ χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη και υψόμετρα από εκείνα που επηρεάζονται σήμερα από τους ηπειρωτικούς παγετώνες. Ορεινές παγετώδεις αποθέσεις στον Ελληνικό χώρο συναντάμε στον Όλυμπο, στον Παρνασσό, στον Χελμό αλλά και σε άλλους ορεινούς όγκους της χώρας.

Ως παγετώνες (glaciers) ορίζουμε μεγάλες μάζες πάγου οι οποίες διατηρούνται για μεγάλα χρονικά διαστήματα λόγω της αδιάλειπτης συσσώρευσης χιονιού. Κύκλοι τήξης των επιφανειακών στρωμάτων πάγου και πήξης τους στο εσωτερικό τους, όπως και η αποβολή του εγκλωβισμένου αέρα από το εσωτερικό τους, οδηγούν σε ολοένα περισσότερη συμπαγοποίηση των μαζών του πάγου. Οι σχηματιζόμενες αυτές μάζες πάγου κινούνται προς τα κατάντη υψόμετρα με τη δύναμη της βαρύτητας.

Το περιβάλλον των παγετώνων περιορίζεται ειδικά σε εκείνες τις περιοχές όπου υπάρχουν περισσότερο ή λιγότερο μόνιμες συσσωρεύσεις χιονιού και πάγου. Τέτοια περιβάλλοντα υπάρχουν σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη σε όλα τα υψόμετρα (ηπειρωτικοί παγετώνες) και σε χαμηλά γεωγραφικά πλάτη (παγετώνες βουνών ή κοιλάδων) πάνω από το υψόμετρο από το οποίο το χιόνι δεν λιώνει το καλοκαίρι (Εικόνα 5.20). Κινούνται προς τα κατάντη μόνο εάν οι ρυθμοί συσσώρευσης χιονιού πάνω από τη γραμμή χιονιού υπερβαίνουν τους ρυθμούς τήξης του πάγου. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την κίνηση των παγετώνων και οι μηχανισμοί της ροής του



πάγου δεν αποτελούν πρωταρχικό αντικείμενο της ενότητας. Στην ιζηματολογία το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη μεταφορά ιζημάτων και στις διαδικασίες απόθεσης που σχετίζονται με την κίνηση και την τήξη των παγετώνων και στον τύπο των ιζημάτων που εναποτίθενται από αυτούς (Boggs, 2006).



**Εικόνα 5.20** Χαρακτηριστικοί σύγχρονοι ορεινοί παγετώνες στην Αυστρία  
(ημερομηνία λήψης φωτογραφίας: Αύγουστος 2022).

Ως παγετωνικό περιβάλλον ορίζονται όλες εκείνες οι περιοχές που βρίσκονται σε άμεση επαφή με τον παγετώδη πάγο. Το παγετωνικό κάλυμμα χωρίζεται στις ακόλουθες ζώνες: (1) τη βασική ή υποπαγετωνική ζώνη, επηρεασμένη από την επαφή με την κοίτη ή το γεωλογικό υπόβαθρο, (2) την υπερπαγετώδη ζώνη, που είναι η άνω επιφάνεια του παγετώνα, (3) τη ζώνη επαφής στα περιθώρια του παγετώνα, και (4) την παγετώδη ζώνη εντός του εσωτερικού του παγετώνα. Τα περιβάλλοντα εναπόθεσης γύρω από τα περιθώρια του παγετώνα επηρεάζονται από το λιώσιμο των πάγων αλλά δεν έρχονται σε άμεση επαφή με τον πάγο. Αυτά τα περιβάλλοντα συνθέτουν το προπαγετωνικό περιβάλλον, το οποίο περιλαμβάνει το παγετωνικο-ποτάμιο, το παγετωνικό-λιμναίο και το παγετωνικό θαλάσσιο περιβάλλον (όπου οι παγετώνες εκτείνονται στον ωκεανό).

Η βασική υποπαγετωνική ζώνη ενός παγετώνα χαρακτηρίζεται από διάβρωση και απομάκρυνση του υποκείμενου γεωλογικού στρώματος. Τα θραύσματα των πετρωμάτων που αφαιρούνται από την τριβή και τη διάβρωση ενσωματώνονται στην κοίτη του παγετώνα. Αυτά τα θραύσματα προκαλούν περαιτέρω αυξημένη τριβή με το υποκείμενο γεωλογικό στρώμα καθώς ο παγετώνας κινείται και έτσι βοηθούν στην τριβή και τη μεγαλύτερη διάβρωση του γεωλογικού στρώματος. Οι υπερπαγετώδεις ζώνες και η ζώνη επαφής είναι ζώνες τήξης, όπου συσσωρεύονται τεμάχια πάγων που μεταφέρονται από τον παγετώνα καθώς αυτός λιώνει. Το παγετωνικό-ποτάμιο περιβάλλον βρίσκεται σε πλαγιά από το μέτωπο του παγετώνα και χαρακτηρίζεται από κυμαινόμενα λιωμένες μάζες πάγου, νερά.

### 5.6.1 Μεταφορά και απόθεση σε παγετώδη περιβάλλοντα

Η μεταφορά του ιζήματος μέσω των παγετώνων είναι ένα είδος μεταφοράς ροής ρευστού, αν και ο πάγος ρέει πολύ αργά ως ένα πλαστικό υψηλού ιξώδους, μη Νευτώνειο, ρευστό. Οι παγετώνες μπορούν να κινούνται με ρυθμούς έως και 80 m την ημέρα κατά τη διάρκεια σποραδικών εξάρσεων, ωστόσο, ένας τυπικός ρυθμός κίνησης είναι της τάξης των μερικών εκατοστών ανά ημέρα. Οι παγετώνες προχωρούν εάν ο ρυθμός συσσώρευσης του χιονιού στο ανώτερο τμήμα (κεφαλή) του παγετώνα υπερβαίνει τον ρυθμό αφαίρεσης (τήξης) του πάγου στο κατώτερο σημείο. Η ροή στον παγετώνα γίνεται εσωτερικά από την κεφαλή του παγετώνα για να αντικαταστήσει αυτόν που χάνεται από το λιώσιμο στην άκρη. Η ροή του παγετώνα είναι γραμμική και η ταχύτητα ροής είναι μεγαλύτερη κοντά στην κορυφή και το κέντρο του. Οι παγετώνες υποχωρούν εάν ο ρυθμός τήξης υπερβαίνει τον ρυθμό συσσώρευσης. Φτάνουν σε μια κατάσταση ισορροπίας, ούτε υποχωρούν ούτε προχωρούν, όταν οι ρυθμοί τήξης και συσσώρευσης είναι ίσοι, αν και η εσωτερική κίνηση στον παγετώνα συνεχίζεται.

Το ιζήμα παρασύρεται από τους παγετώνες με την υποσκαφή και την τριβή από τον πάγο καθώς ο παγετώνας διαβρώνει το υπόστρωμα του και με πτώσεις ή ολισθήσεις υλικού από τα τοιχώματα της κοιλάδας. Μέρος αυτού του ιζήματος μεταφέρεται σε επαφή με τα τοιχώματα και το δάπεδο της παγετωνικής κοιλάδας και ευθύνεται για μεγάλο μέρος της τριβής. Μέρος του φορτίου που απομένει μεταφέρεται στην επάνω επιφάνεια του παγετώνα και μέρος μεταφέρεται μέσα σε αυτόν. Το εσωτερικό φορτίο προέρχεται είτε από την ένωση ρευμάτων πάγου από δύο ή περισσότερες κοιλάδες είτε από το πλύσιμο ή την πτώση υλικού από την επιφάνεια. Μεγάλο μέρος του ιζήματος που μεταφέρεται από τους παγετώνες μεταφέρεται κατά μήκος του πυθμένα και των πλευρών. Το παρασυρόμενο φορτίο ιζήματος περιλαμβάνει μεγάλα και μικρά τεμάχια πετρωμάτων καθώς και εξαιρετικά λεπτά ιζήματα, που ονομάζονται πούδρα πετρωμάτων (rock flour), που παράγονται με σμίλευση των θραυσμάτων της βάσης του παγετώνα στο βραχώδες υπόστρωμα. Έτσι, το φορτίο ιζήματος του παγετώνα αποτελείται συνήθως από μια εξαιρετικά ετερογενή ποικιλία σωματιδίων που κυμαίνονται από κόκκους μεγέθους πηλού έως ογκόλιθους μεγέθους μέτρου. Οι παγετώνες δεν υπερφορτώνονται ποτέ με θραύσματα πετρωμάτων σε σημείο που να ακινητοποιούνται. Ωστόσο, καθώς ο παγετώνας λιώνει, το φορτίο των ιζημάτων πέφτει για να σχηματίσει διάφορα είδη παγετωνικών μοραίνων (moraines) (Εικόνα 5.21).



**Εικόνα 5.21** Χαρακτηριστικές αποθέσεις από μοραίνες στον Καναδά  
(πηγή: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:MorainesLakeLouise.JPG>).

Καθώς οι παγετώνες κινούνται προς την κατάντη πλευρά, φτάνουν σε ένα υψόμετρο όπου ο ρυθμός τήξης στο μπροστινό τμήμα του παγετώνα ισούται ή υπερβαίνει τον ρυθμό συσσώρευσης νέου χιονιού στο πάνω τμήμα. Εάν ο ρυθμός τήξης είναι περίπου ίσος με τον ρυθμό συσσώρευσης, ο παγετώνας επιτυγχάνει μια κατάσταση ισορροπίας στην οποία ούτε προχωρά ούτε υποχωρεί. Μέσα σε έναν τέτοιο παγετώνα ισορροπίας, η εσωτερική κίνηση του πάγου συνεχίζει να μεταφέρει το φορτίο του βράχου και να τροφοδοτεί με θραύσματα από πετρώματα το λωμένο μπροστινό τμήμα του παγετώνα. Αυτή η διαδικασία προκαλεί τη συσσώρευση και δημιουργία στο μπροστινό τμήμα του παγετώνα μιας ράχης φτωχά ταξιθετημένων ιζημάτων που ονομάζεται τελική μοραίνα. Οι πλευρικές μοραίνες ή περιφερειακές μοραίνες μπορούν να σχηματιστούν από συγκεντρώσεις θραυσμάτων που μεταφέρονται κατά μήκος των άκρων του παγετώνα όπου ο πάγος έρχεται σε επαφή με το τοίχωμα της κοιλάδας. Ενδέχεται να σχηματιστούν μεσαίες μοραίνες όπου ενώνονται οι πλευρικές μοραίνες δύο παγετώνων.

Καθώς οι παγετώνες λιώνουν στην ξηρά, μεγάλες ποσότητες νερού ρέουν κατά μήκος των περιθωρίων τους, για να δημιουργήσουν στο μέτωπο του παγετώνα ένα ρεύμα λωμένου πάγου. Τέτοια ρεύματα ρέουν με υψηλή αλλά μεταβλητή ροή ως απόκριση στις εποχιακές και ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Ρεύματα που εκβάλλουν σε παγετώδεις λίμνες τείνουν να δημιουργούν προοδευτικά δελταϊκά συστήματα εντός των λιμνών. Τα πολύ λεπτά ιζήματα που εκφορτίζονται στη λίμνη από τα ρέματα μπορεί να διασκορπιστούν προς τη λεκάνη σε αιώρηση από κύματα ή ρεύματα που οδηγούνται από τον άνεμο. Εάν υπάρχει αρκετά μεγάλη συγκέντρωση ιζήματος σε αιώρηση για να δημιουργήσει μια διαφορά πυκνότητας στο νερό, θα προκύψει μια

ροή πυκνότητας ή ρεύμα θολότητας που μπορεί να μεταφέρει ιζήματα κατά μήκος του πυθμένα της λίμνης στο μέσο της λεκάνης. Ισχυροί άνεμοι που πνέουν πάνω από έναν παγετώνα ή ένα στρώμα πάγου συσσωρεύουν λεπτή άμμο από εκτεθειμένες, ξηρές πεδιάδες και αποθέτουν την άμμο σε κοντινές περιοχές ως μικρούς αμμόλοφους.

### 5.6.2 Παγετώδεις αποθέσεις

Οι παγετώδεις αποθέσεις κυμαίνονται σε μέγεθος από μικρές μάζες που εναποτίθενται από τους παγετώνες σε κοιλάδες μέχρι παγετώδη καλύμματα που εναποτίθενται από ηπειρωτικούς παγετώνες και καλύπτουν πολλές χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα. Τα πιο χαρακτηριστικά γνωρίσματα των ηπειρωτικών παγετωδών αποθέσεων και των φάσεών τους, είναι ο εξαιρετικά κακός βαθμός ταξιθέτησης και η απουσία στρωμάτωσης. Οι προπαγετικές αποθέσεις (παγετοποτάμιες, παγετολιμναίες και θαλάσσιες παγετικές) εμφανίζουν στρώση και καλύτερο βαθμό ταξιθέτησης. Αυτές οι προπαγετικές αποθέσεις είναι δύσκολο να διακριθούν σε παλαιές ακολουθίες καθώς εμφανίζουν όμοια χαρακτηριστικά με τις παλαιές στρωματογραφικές ακολουθίες με άλλους τύπους ηπειρωτικών ιζημάτων. Για παράδειγμα, τα ιζηματολογικά χαρακτηριστικά των ποταμοπαγετώνων μπορεί να εμφανίζονται σχεδόν ίδια με άλλα ηπειρωτικά ποτάμια ιζήματα. Ωστόσο, μερικά χαρακτηριστικά αυτών των αποθέσεων μπορούν να τα εντάξουν στα παγετωνικά περιβάλλοντα. Η παρουσία βαρβών μπορεί να είναι διαγνωστική για τις παγετώδεις λίμνες και οι απότομες αλλαγές στο κοκκομετρικό μέγεθος των ιζημάτων που σχετίζονται με τη μεταβαλλόμενη εκφόρτιση λιωμένου πάγου (νερού) μπορεί να υποδηλώνουν γενικά το προπαγετώδες περιβάλλον απόθεσης. Τα ιζήματα των παγετοθαλάσσιων αποθέσεων διακρίνονται από άλλους τύπους παγετώνων από την παρουσία θαλάσσιων απολιθωμάτων και πιθανώς από άλλες θαλάσσιες αποθέσεις, λόγω του γενικά καλύτερου βαθμού ταξιθέτησης και στρωματοποίησης έναντι των τυπικών παγετικών αποθέσεων. Τείνουν να εμφανίζουν ακραίες διαφορές στον τύπο κόκκων, αντανακλώντας πολλαπλές πηγές τροφοδοσίας. Οι παλαιές παγετώδεις αποθέσεις είναι περισσότερο γνωστές από τις ιζηματογενείς ακολουθίες του Πλειστόκαινου, οι οποίες είναι ευρέως διαδεδομένες σε πολλά μέρη του κόσμου. Τουλάχιστον τέσσερις μεγάλοι ηπειρωτικοί παγετώνες εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια του Πλειστόκαινου, καθώς και πολλοί μικρότεροι.

### 5.6.3 Η γενεσιουργός αιτία δημιουργίας των παγετώνων και το κλίμα

Οι εποχές των παγετώνων σχηματίζονται κατά τη διάρκεια παρατεταμένων περιόδων μιας σχετικά θερμοκρασιακά ψυχρότερης Γης, σε βαθμό που να μπορεί να διατηρήσει τον μόνιμο σχηματισμό του πάγου και να διαρκέσει για ένα σημαντικό γεωλογικά χρονικό διάστημα. Ως αποτέλεσμα της παρατεταμένης ψύξης κατά τις εποχές των παγετώνων, έχουμε την ανάπτυξη ηπειρωτικών παγετώνων στο βόρειο και νότιο ημισφαίριο και την ανάπτυξη παγετώνων σε ορεινά μέρη του κόσμου, όπως στα Ιμαλία, στις Άλπεις, στις Νότιες Άλπεις και στις Άνδεις, και περιοχές να καλύπτονται από πάγο για εκατομμύρια έως δεκάδες ή και εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια. Οι εποχές των παγετώνων αλλάζουν τις κλιματικές ζώνες της Γης. Οι εύκρατες και τροπικές ζώνες περιορίζονται στα κατώτερα γεωγραφικά πλάτη του ισημερινού. Ένα βασικό ερώτημα που προκύπτει από τον ορισμό της εποχής των παγετώνων, είναι πόσο κρύα πρέπει να γίνει η Γη για να δημιουργήσει μια τέτοια εποχή, δεδομένου ότι η μέση παγκόσμια θερμοκρασία της Γης σήμερα είναι περίπου 16°C. Η ανάλυση των παλαιοθερμοκρασιακών δεδομένων (χρήση ισοτόπων σε ιζήματα βαθιών ωκεανών) κατά τα τελευταία 500 εκατομμύρια χρόνια της ιστορίας της Γης, δείχνει ότι οι μέσες παγκόσμιες θερμοκρασίες κυμάνθηκαν από περίπου -10°C μέχρι 30°C. Κατά τη διάρκεια του πιο πρόσφατου παγετικού μέγιστου (περίπου πριν από 23.000 έως 11.000 χρόνια), η μέση παγκόσμια θερμοκρασία ήταν περίπου 8°C, με τις πολικές περιοχές να έχουν μέσες θερμοκρασίες -2°C. Περίοδοι χωρίς πάγο τα τελευταία 500 εκατομμύρια χρόνια αντιστοιχούν με μέσες παγκόσμιες θερμοκρασίες άνω των 20°C. Δεν υπάρχει επίσημη ελάχιστη χρονική περίοδος για να χαρακτηριστεί μια εποχή των παγετώνων. Μερικές ψυχρότερες περίοδοι στους ιστορικούς χρόνους ονομάζονται μικρές εποχές των παγετώνων (little ice ages), συμπεριλαμβανομένου του 13ου και του 18ου αιώνα. Αυτές οι περίοδοι χαρακτηρίζονταν από μεγαλύτερους σε διάρκεια και ψυχρότερους χειμώνες και μικρότερα σε διάρκεια, πιο δροσερά καλοκαίρια, ενώ μεγάλο μέρος των ποταμών στη Δυτική Ευρώπη ήταν παγωμένα τον χειμώνα. Οι παγετώδεις περίοδοι διακόπτονταν από τις μεσοπαγετώδεις περιόδους, από διαστήματα όπου η θερμοκρασία ανέβαινε και πλησίαζε ως μέση παγκόσμια θερμοκρασία τους 20°C, έχοντας ως κύριο αποτέλεσμα το λιώσιμο των πάγων της παγετώδους περιόδου.

Κατά τη διάρκεια του Πλειστοκαίνου έως το Ολόκαινο έχουν διακριθεί τέσσερις κύριες παγετώδεις περιόδους (οι οποίες για την περιοχή των Άλπεων – Ευρώπη ονομάζονται Günz, Mindel, Riss, και Wurm), που διακόπτονταν από αντίστοιχες μεσοπαγετώδεις περιόδους. Από τη μελέτη της ιστορίας της Γης φαίνεται ότι κατά τις παγετώδεις περιόδους επικρατούσε στη Γη κλίμα ψυχρότερο και πιο ομοιόμορφο από το σημερινό. Κατά μέσο όρο, η παγκόσμια θερμοκρασία ήταν χαμηλότερη περίπου κατά 8°C, ενώ υπήρχαν αφθονότερα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.

Η κύρια αιτία των κλιματικών αυτών μεταβολών στην ιστορία της Γης πιθανόν να είναι αποτέλεσμα των αλλαγών της γεωμετρίας στην τροχιά της Γης που μεταβάλλουν την απόσταση της Γης από τον Ήλιο και έχουν ως αποτέλεσμα την αλλαγή στο ποσό της ακτινοβολίας που δέχεται η Γη από τον Ήλιο. Η θεωρία αυτή αναπτύχθηκε από τον Milankovitch και προσπαθεί να ερμηνεύσει τις αλλαγές από παγετώδεις σε μεσοπαγετώδεις περιόδους καθώς το σχήμα της γήινης τροχιάς αλλάζει από ελλειπτικό σε κυκλικό κάθε περίπου 90.000 χρόνια. Επιπλέον έχουμε αλλαγή της κλίσης του άξονα της Γης από 22° σε 24° κάθε περίπου 41.000 χρόνια και αλλαγή της θέσης του άξονα της Γης κάθε 26.000 χρόνια. Συγχρόνως, γεωλογικά φαινόμενα, όπως διακυμάνσεις στα ωκεάνια ρεύματα, τεκτονική δραστηριότητα, κίνηση λιθοσφαιρικών πλακών, περίοδοι ορογένεσης και ηφαιστειότητα, συνδράμουν άλλοτε σε μεγαλύτερο και άλλοτε σε μικρότερο βαθμό, στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή και κατ' επέκταση στην έναρξη των παγετωδών περιόδων.

## Βιβλιογραφία/Αναφορές

### Ξενόγλωσση

- Blair, T.C. (1999). Cause of dominance by sheetflood vs. debris-flow processes on two adjoining alluvial fans, Death Valley, California. *Sedimentology*, 46(6), 1015–1028.
- Boggs, S.Jr. (2006). *Principles of sedimentology and stratigraphy* (4th ed.). Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall.
- Bridge, J.S. (2003). *Rivers and Floodplains: Forms, Processes, and Sedimentary Record*. Blackwell Science, Oxford.
- Leeder, M. (2011). *Sedimentology and sedimentary basins from turbulence to tectonics* (2nd ed.). Chichester, West Sussex, UK: Wiley-Blackwell.
- Miall, A.D. (1978). Lithofacies Types and Vertical Profile Models in Braided River Deposits: A Summary. In: A.D. Miall (Ed.), *Fluvial Sedimentology*, Memoir 5, Canadian Society of Petroleum Geologists, Calgary, 597-604.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and stratigraphy*. (2<sup>nd</sup> ed). Blackwell Publishing.
- Pye, K., & Lancaster, N. (1993). *Aeolian Sediments Ancient and Modern*. Special Publication 16, International Association of Sedimentologists. Blackwell Science, Oxford.
- Talbot, M.R., & Allen, P.A. (1996). Lakes. In H.G. Reading (Ed.), *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. Blackwell Scientific Publications, Oxford 83–124.
- Tucker, M.E., & Wright, V.P. (1990). *Lacustrine carbonates*. In: *Carbonate Sedimentology*. Blackwell Scientific Publications, Oxford 164-190.



## Κεφάλαιο 6

### Περιθωριακά θαλάσσια / μεταβατικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης

#### Σύνοψη

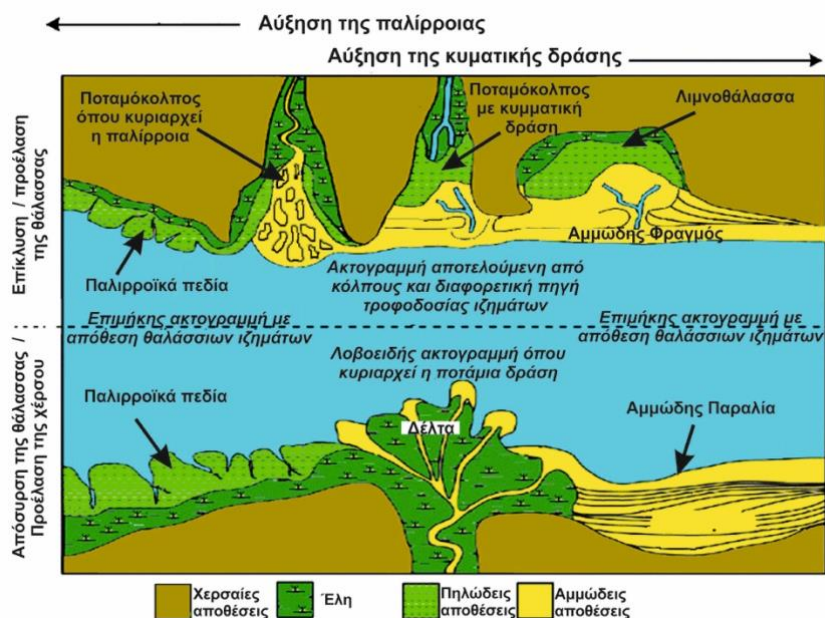
Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα περιθωριακά των θαλασσών ή μεταβατικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης τα οποία αναπτύσσονται στην παράκτια ζώνη και αποτελούν τη μετάβαση ανάμεσα στα χερσογενή και τα θαλάσσια αποθετικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης. Στην κατηγορία των περιθωριακών/μεταβατικών περιβαλλόντων ανήκουν (α) τα δέλτα, (β) οι λιμνοθάλασσες, (γ) οι φραγματοειδείς νησίδες, (δ) τα παλιρροϊκά πεδία, (ε) οι εστούρες/ποταμόκολποι και (στ) τα παράκτια έλη. Περιγράφονται οι τρόποι σχηματισμού και εξέλιξης των παράκτιων αυτών περιβαλλόντων, η επίδραση σε αυτά του κλίματος, της τεκτονικής και της γεωμορφολογικής εξέλιξης της περιοχής. Καθώς είναι ευαίσθητα περιβαλλοντικά οικοσυστήματα και, στις περισσότερες περιπτώσεις, προστατευόμενα από διεθνείς συνθήκες, γίνεται αναφορά στην επίδραση της ανθρώπινης δραστηριότητας και της κλιματικής αλλαγής σε αυτά.

#### Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται γνώσεις γενικής γεωλογίας και φυσικής γεωγραφίας.

### 6.1 Εισαγωγή

Τα μεταβατικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης ή περιθωριακά των θαλάσσιων περιβαλλόντων ιζηματογένεσης αναπτύσσονται κατά μήκος του ορίου μεταξύ του ηπειρωτικού και του θαλάσσιου χώρου αποθέσεως. Πρόκειται για μια στενή ζώνη που κυριαρχείται από την ποτάμια δράση, τον θαλάσσιο κυματισμό και τις παλιρροϊκές διεργασίες (Εικόνα 6.1). Οι αλατότητες μπορεί να κυμαίνονται σε αυτά τα περιβάλλοντα από γλυκό, υφάλμυρο έως υπεραλμυρό νερό, ανάλογα με τις ποτάμιες εισροές και τις κλιματικές συνθήκες. Οι διακοπτόμενες έως σχεδόν σταθερές υποαεριώδεις συνθήκες χαρακτηρίζουν ορισμένα από τα μεταβατικά περιβάλλοντα, καθώς μερικά από αυτά καλύπτονται συνεχώς από ρηχά νερά. Πολλά μεταβατικά περιβάλλοντα χαρακτηρίζονται από θαλάσσια κύματα και ρεύματα υψηλής ενέργειας, αν και ορισμένα λιμνοθάλασσα περιβάλλοντα και ποταμόκολποι κυριαρχούνται από συνθήκες χαμηλού υδροδυναμικού καθεστώτος (Εικόνα 6.1).



Εικόνα 6.1 Απλοποιημένο διάγραμμα των μεταβατικών περιβαλλόντων ιζηματογένεσης σε σχέση με την κυματική δράση, την παλίρροια και τη στάθμη της θάλασσας.

Λόγω των μεγάλων ποσοτήτων κλαστικού ιζήματος που μεταφέρεται από τα ποτάμια στην παράκτια ζώνη κατά τη διάρκεια του γεωλογικού χρόνου, ο όγκος των μεταβατικών περιβαλλόντων ιζηματογένεσης διατηρείται στο

πέρας του χρόνου και αποτελούν σημαντικά γεωαρχεία. Τα κύρια μεταβατικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης είναι τα δέλτα, οι λιμνοθάλασσες, οι φραγματοειδείς νησίδες, τα παλιρροϊκά πεδία, οι ποταμόκολποι/εστούρες και τα παράκτια έλη (Εικόνα 6.1). Οι ποταμόκολποι και τα δέλτα είναι ιδιαίτερα χαρακτηριστικά συστήματα των μεταβατικών περιβαλλόντων, ενώ, ειδικότερα, τα δέλτα είναι χαρακτηριστικά για την προέλασή τους προς τη θάλασσα. Σε αυτά τα διαφορετικά μεταβατικά θαλάσσια περιβάλλοντα ιζηματογένεσης μπορεί να συσσωρευτεί μεγάλη ποικιλία ιζημάτων και ιζηματογενών πετρωμάτων, από τις διεργασίες είτε της κλαστικής ιζηματογένεσης είτε της χημικής ιζηματογένεσης. Υπό αυτήν την έννοια συναντάμε κλαστικά ιζήματα, κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, ιλυολίθους αλλά και ανθρακικά και εβαποριτικά ιζήματα.

## 6.2 Δελταϊκά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης

Όπως έχει αναφερθεί από πολλούς Έλληνες αλλά και ξένους ερευνητές και όπως αποδεικνύεται από τη διεθνή βιβλιογραφία, ο όρος «δέλτα» προέρχεται από το ελληνικό γράμμα Δ και από τον αρχαίο φιλόσοφο Ηρόδοτο, περίπου το 490 π.Χ., ο οποίος με αυτόν τον τρόπο περιέγραψε το δέλτα του Νείλου στην Αίγυπτο εξαιτίας της μορφής του (Εικόνα 6.2). Φυσικά αυτό δεν σημαίνει ότι όλα τα δέλτα έχουν ως μορφή το δέλτα του Νείλου. Τα δέλτα αναπτύσσονται στις εκβολές των ποταμών στη θάλασσα μεταφέροντας μεγάλο ιζηματογενές φορτίο που το εναποθέτουν και δημιουργούν γεωμορφολογικές προεξοχές της χέρσου προς τη θάλασσα. Μεγάλο μέρος του κλαστικού ιζήματος από τα δέλτα μεταφέρεται στις παράκτιες ζώνες χωρίς να αποκλείεται ο σχηματισμός δέλτα σε μεγάλες λίμνες. Παλαιές δελταϊκές αποθέσεις έχουν αναγνωριστεί σε στρωματογραφικές ακολουθίες σχεδόν όλου του γεωλογικού χρόνου και οι αποθέσεις αυτές έχουν συγκεντρώσει το ενδιαφέρον των ερευνητών καθώς αποτελούν ιζηματογενή πετρώματα τα οποία συνδέονται με την ανεύρεση οικονομικών κοιτασμάτων πετρελαίου, αερίου, γαιανθράκων αλλά και με ορισμένα κοιτάσματα ουρανίου. Η αναγνώριση των παλαιών δελταϊκών αποθέσεων βασίστηκε στην ερμηνεία και κατανόηση των ιζηματογενών διαδικασιών που κυριαρχούν στα σύγχρονα δέλτα.



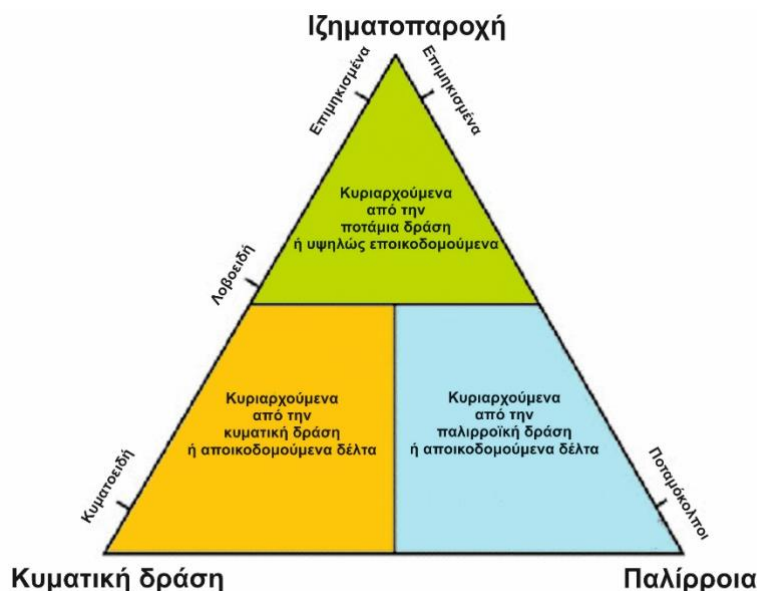
**Εικόνα 6.2** Δορυφορική εικόνα του δέλτα του Νείλου στην Αίγυπτο (πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=19912>).

Τα σύγχρονα δέλτα εμφανίζονται σε όλες τις ηπείρους, με πιθανή εξαίρεση την Ανταρκτική. Τα δέλτα σχηματίζονται εκεί όπου υπάρχουν μεγάλα, ενεργά συστήματα αποστράγγισης με μεγάλο φορτίο ιζημάτων και τεκτονική δραστηριότητα στην παράκτια ζώνη να είναι περιορισμένη. Λιγότερο από το 10% των μεγάλων σύγχρονων δέλτα τα συναντάμε σε ακτές όπου η τεκτονική δραστηριότητα είναι υψηλή και η λεκάνη αποστράγγισης πολύ κοντά στην παράκτια ζώνη.

Ο όρος των *δελταϊκών ριπιδίων* (deltaic fan) χρησιμοποιείται ως έννοια για να περιγράψει μια παράκτια ακτινική απόθεση η οποία προέρχεται από ένα αλλουβιακό/ποτάμιο ριπίδιο και αποτίθεται, κυρίως ή εξ ολοκλήρου, κάτω από τη στάθμη του νερού, στην επαφή του ποταμού με τη θάλασσα ή τη λιμναία λεκάνη.

## 6.2.1 Διαδικασίες ιζηματογένεσης και κατάταξης των δέλτα

Η κατανομή και τα χαρακτηριστικά των δέλτα ως μεταβατικών περιβαλλόντων ελέγχονται από ένα σύνολο ποτάμιων, θαλάσσιων και λιμναίων διεργασιών και περιβαλλοντικών συνθηκών που συνδέονται μεταξύ τους. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν το κλίμα, την εκφόρτιση ποσοτήτων γλυκού νερού και ιζημάτων, τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στις εκβολές των ποταμών, την κυματική δράση κατά μήκος της ακτής, τις παλίρροιες, τα θαλάσσια ρεύματα και το ανεμολογικό καθεστώς. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχηματισμό των δέλτα είναι η κλίση του ανάγλυφου, ο ρυθμός ιζηματογένεσης, η τεκτονική δραστηριότητα στη θέση εναπόθεσης των ιζημάτων και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ιζηματογενούς λεκάνης. Από όλες αυτές τις παραμέτρους το μεταφερόμενο ιζηματογενές φορτίο, η κυματική δράση και οι παλίρροιες είναι οι πιο σημαντικές διεργασίες που ελέγχουν τη γεωμετρία και τα εσωτερικά δομικά χαρακτηριστικά των δέλτα (Εικόνα 6.3). Τα δέλτα μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους. Ωστόσο, η ταξινόμηση με βάση τα γεωμετρικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τους που διαμορφώνονται στο μέτωπο στις εκβολές του δέλτα θεωρείται η πιο σημαντική. Ως εκ τούτου τα δέλτα ταξινομούνται ως: (Α) κυριαρχούμενα από την ποτάμια δράση ή υψηλώς εποικοδομούμενα, (Β) κυριαρχούμενα από την παλίρροια (αποικοδομούμενα) και (Γ) κυριαρχούμενα από την κυματική δράση (αποικοδομούμενα) (Εικόνα 6.3). Επιπλέον, καθένα από αυτά ταξινομείται με βάση το κοκκομετρικό του μέγεθος (Galloway, 1975; Miall, 1979; Colella & Prior, 1990).



**Εικόνα 6.3** Τριγωνικό διάγραμμα με τους τρεις κύριους παράγοντες που διαμορφώνουν τις εκβολές ενός δέλτα και τα αντίστοιχα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτών.

(Α) Δέλτα κυριαρχούμενα από την ποτάμια δράση. Τα δέλτα όπου κυριαρχεί η ποτάμια δράση είναι τα δέλτα εκείνα στα οποία οι ποτάμιες διαδικασίες διαμορφώνουν την ακτογραμμή, καθώς αυτά προελαύνουν προς τη θάλασσα, χωρίς να υφίστανται καμιά ουσιαστική αλλοίωση από τη δράση των κυμάτων και της παλίρροιας (Εικόνα 6.4). Η απορροή και εκφόρτιση των ποσοτήτων νερού των ποταμών και του ιζηματογενούς φορτίου αυτών, σε μια λίμνη ή ωκεανό μπορεί να περιγραφεί ως ένας πίδακας μιας εκροής νερού και ιζήματος. Αυτή η είσοδος του ιζηματογενούς φορτίου και του νερού και ο τρόπος απόθεσης των ιζημάτων ελέγχονται από την πυκνότητα των αναμειγνυόμενων ρευστών (ποταμός/θάλασσα/λίμνη).

Το νερό του ποταμού που εισέρχεται σε νερό μιας λεκάνης με σχεδόν ίδια πυκνότητα -έχουμε δηλαδή μια ομοπυκνική ροή-, οδηγεί σε γρήγορη ανάμειξη των μαζών και απότομη εναπόθεση μεγάλου μέρους του ιζηματογενούς φορτίου. Αυτός ο τύπος της ανάμειξης είναι ιδιαίτερα συνηθισμένος στις εκβολές χονδρόκοκκων ποταμών, σχηματίζοντας δελταϊκές αποθέσεις τύπου Gilbert, όπου καταγράφεται η προέλαση των ιζημάτων του δέλτα προς τη θάλασσα. Το νερό του ποταμού που έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το νερό της λεκάνης (λόγω του ιζηματογενούς φορτίου) ρέει προς τα κατώτερα τμήματα της λεκάνης, ως πιο πυκνό, διαμορφώνοντας μια διαστρωμάτωση της στήλης του νερού και ο τρόπος αυτός ανάμειξης ονομάζεται υπέρπυκνη ροή. Αυτός ο τύπος ανάμειξης εναποθέτει το φορτίο του κατά μήκος των πιο ήπιων κλίσεων του πυθμένα της λεκάνης και πολλές φορές αποθέτει και τουρβιδίτες. Εάν η πυκνότητα του ρευστού (νερό και ιζήμα) του ποταμού είναι μικρότερη από το νερό της λεκάνης, όπως σε ποτάμια που ρέουν σε πυκνότερο



θαλασσινό νερό ή σε μια λίμνη με αλατότητα, ως ελαφρύτερο ρέει προς τα ανώτερα υδάτινα στρώματα της λεκάνης και ο τρόπος ανάμειξης ονομάζεται *υποπυκνική ροή*. Λόγω της μικρότερης πυκνότητας του ρευστού, το λεπτόκοκκο ίζημα (ιλύς, άργιλος) μπορεί να παραμείνει μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε αιώρηση και να μεταφερθεί σε μεγαλύτερες αποστάσεις στα βαθύτερα τμήματά της όπου εκεί θα κροκιδωθεί και θα καθιζήσει. Η υποπυκνική ροή τείνει να δημιουργεί ένα μεγάλο μέτωπο του δέλτα με μικρές κλίσεις, σε αντίθεση με την υπέρπυκνη ροή των τύπου Gilbert δέλτα όπου η βύθιση είναι περίπου 10-20°.



**Εικόνα 6.4** Το δέλτα του Μισισσιπή από τον δορυφόρο ως ένα παράδειγμα δέλτα που προελαύνει προς τη θάλασσα (πηγή: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a0/Mississippi\\_delta\\_from\\_space.jpg/640px-Mississippi\\_delta\\_from\\_space.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a0/Mississippi_delta_from_space.jpg/640px-Mississippi_delta_from_space.jpg)).

(B) Δέλτα κυριαρχούμενα από την παλίρροια. Στις περιπτώσεις όπου τα παλιρροϊκά ρεύματα είναι ισχυρά τότε έχουμε αναδιαμόρφωση και ανακατανομή του μετώπου του δέλτα, από την αμφίδρομη κίνηση των θαλάσσιων μαζών, δημιουργώντας γεωμορφές με πολλά κανάλια διανομής (Εικόνα 6.5). Υπό την επίδραση της αμφίδρομης κίνησης των υδάτων λόγω της παλίρροιας, οι αποθέσεις φραγμού στο στόμιο του δέλτα μετατρέπονται σε γραμμικές παλιρροϊκές ράχες.

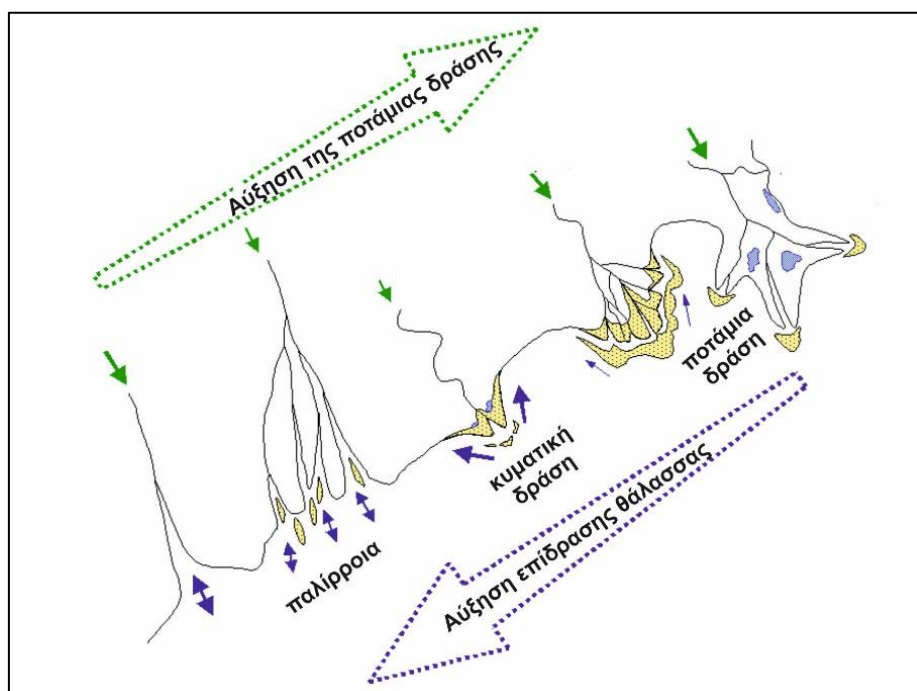


**Εικόνα 6.5** Δορυφορική εικόνα του δέλτα του Γάγγη ποταμού και οι χαρακτηριστικές γεωμορφές με τα πολλά κανάλια διανομής εξαιτίας της κυριαρχίας της παλίρροιας (πηγή: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/96/The\\_-\\_Ganges\\_delta.\\_%2846961056201%29.png/640px-The\\_-\\_Ganges\\_delta.\\_%2846961056201%29.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/96/The_-_Ganges_delta._%2846961056201%29.png/640px-The_-_Ganges_delta._%2846961056201%29.png)).

(Γ) Δέλτα κυριαρχούμενα από την κυματική δράση. Τα ισχυρά κύματα προκαλούν ταχεία διάχυση και επιβράδυνση της εκροής του ποταμού προς τη θάλασσα και προκαλούν μείωση ή και αλλαγές στους φραγμούς στο στόμιο του ποταμού. Οι αποθέσεις φραγμού στο στόμιο του ποταμού υπό την επίδραση της κυματικής δράσης επανατοποθετούνται και ανακατανέμονται κατά μήκος του μετώπου του δέλτα, ενώ τα επιμήκη ρεύματα κατά μήκος της ακτής διαμορφώνουν και αποτυπώνουν τη δράση τους επί της ακτογραμμής (Εικόνα 6.6).



**Εικόνα 6.6** Το δέλτα του Δούναβη και η διαμόρφωση της ακτογραμμής υπό την επίδραση της κυματικής δράσης (πηγή: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/37/Danube\\_Delta\\_ESA23450088.jpeg/640px-Danube\\_Delta\\_ESA23450088.jpeg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/37/Danube_Delta_ESA23450088.jpeg/640px-Danube_Delta_ESA23450088.jpeg)).



**Εικόνα 6.7** Διαμόρφωση της ακτογραμμής ενός δέλτα υπό την επίδραση των παραγόντων της ποτάμιας δράσης, της παλίρροιας και της κυματικής δράσης (τροποποιήθηκε από [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Delta\\_types.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Delta_types.png)).



Φυσικά, η φύση δεν μπορεί να περιοριστεί στις τρεις ανωτέρω βασικές κατηγορίες (Εικόνα 6.7). Πολλές φορές στα σύγχρονα δέλτα έχουμε παραδείγματα όπου μπορεί να κυριαρχούν δύο ή και οι τρεις από τους κύριους μηχανισμούς που ελέγχουν την ανάπτυξη ενός δέλτα στις εκβολές του (Εικόνα 6.7). Σε αυτές τις περιπτώσεις έχουμε δέλτα μεικτού τύπου.

### 6.2.2 Φυσιογεωγραφικά χαρακτηριστικά των δέλτα

Όπως αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το ιζηματογενές φορτίο του ποταμού, η κυματική δράση και η παλίρροια, διαμορφώνουν μια ποικιλία από δέλτα με διαφορετικά φυσιογεωγραφικά και μορφομετρικά χαρακτηριστικά. Ανεξαρτήτως όμως αυτού του διαχωρισμού, ένα δέλτα διαίρεται στο τμήμα που βρίσκεται μόνιμα ή περιοδικά (λόγω της παλίρροιας) πάνω από τη στάθμη της θάλασσας και αυτό που βρίσκεται σε μόνιμη βάση κάτω από τη στάθμη αυτής.

Το τμήμα που βρίσκεται πάνω από τη στάθμη της θάλασσας καλείται *δελταϊκό πεδίο* (delta plain) και είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερο από το τμήμα εκείνο του δέλτα που βρίσκεται κάτω από τη στάθμη της θάλασσας. Το δελταϊκό πεδίο υποδιαιρείται στο (α) *ανώτερο*, το οποίο δεν επηρεάζεται από την παλίρροια και κυριαρχεί η ποτάμια δράση και (β) στο *κατώτερο δελταϊκό πεδίο* το οποίο επηρεάζεται από την παλίρροια και περιοδικά εκτίθεται πάνω από τη θάλασσα ή καλύπτεται από αυτήν.

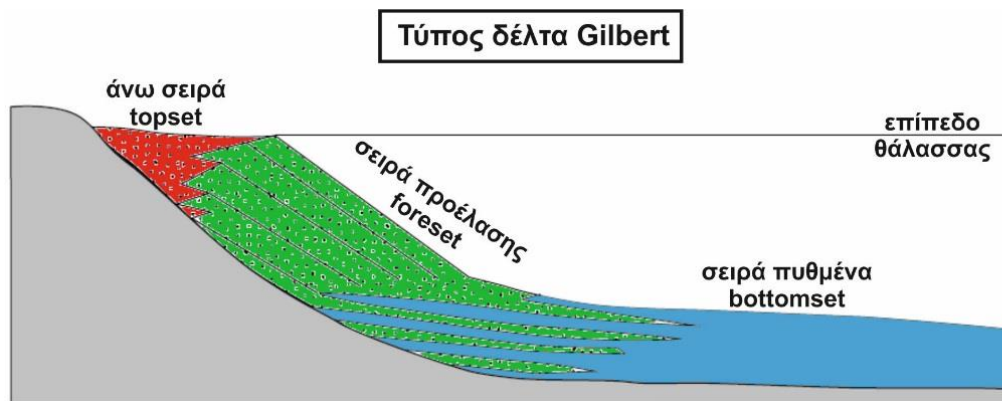
Στο ανώτερο δελταϊκό πεδίο κυριαρχούν μαϊάνδροι και πλεξοειδούς τύπου ρέματα, έλη, αποθέσεις πεδιάδας πλημμύρας και λίμνες. Λόγω του ποταμοχερσαίου χαρακτήρα του ανωτέρου δελταϊκού ριπιδίου, οι αποθέσεις είναι ποτάμιες άμμοι και χαλίκια και λεπτόκοκκο υλικό το οποίο συνδέεται με τα έλη ή τις λίμνες που μπορεί να υπάρχουν. Η ανάπτυξη και το μέγεθος του κατώτερου δελταϊκού πεδίου εξαρτώνται από το μέγεθος της παλίρροιας. Στο κατώτερο δελταϊκό πεδίο κυριαρχούν τα κανάλια διανομής.

Το τμήμα του δέλτα, το οποίο βρίσκεται κάτω από τη στάθμη της θάλασσας, εκτείνεται προς τη θάλασσα μετά το κατώτερο δελταϊκό πεδίο και κάτω από τη χαμηλή στάθμη της παλίρροιας και σε βάθος έως τα 10 m περίπου, συχνά ονομάζεται *μέτωπο του δέλτα* (delta front). Το βαθύτερο τμήμα του δέλτα που εκτείνεται σε βάθος μεγαλύτερο των 10 m περίπου, ονομάζεται *προδελταϊκή περιοχή* (prodelta).

Πέρα από τον φυσιογεωγραφικό διαχωρισμό, ένα δέλτα δομείται από τρεις διαφορετικές αποθέσεις οι οποίες είναι: (α) η *άνω σειρά* (topset), (β) η *σειρά προέλασης* (foreset) και (γ) η *σειρά πυθμένα* (bottomset) και οι οποίες περιγράφονται στα δέλτα τύπου *Gilbert* (Gilbert type delta) (Εικόνα 6.8). Η κατηγορία αυτή των δέλτα με τις τρεις κύριες διακριτές φάσεις περιγράφηκε για πρώτη φορά από τον Grove Karl Gilbert το 1885 αναφερόμενος σε δελταϊκές αποθέσεις οι οποίες αναπτύχθηκαν στη λίμνη Bonneville, στη συνέχεια περιγράφονται σε θαλάσσιο περιβάλλον από τους Postma και Roer και τέλος, τροποποιημένη μορφή του τύπου *Gilbert* με επίδραση της τεκτονικής περιγράφονται από τον Πουλημένο, τα ονομαζόμενα «*τραπεζοειδή*» τύπου δέλτα. Οι τρεις αυτές κύριες παραλλαγές των δέλτα σχετίζονται με το κοκκομετρικό μέγεθος των υλικών, τον τρόπο μεταφοράς τους και την τεκτονική δραστηριότητα η οποία ελέγχει τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απόθεσης των δελταϊκών ριπιδίων. Στο αρχικό μοντέλο του *Gilbert*, οι αποθέσεις της σειράς πυθμένα (bottom set) χαρακτηρίζονται από λεπτόκοκκο υλικό προερχόμενο από διαδικασίες αιώρησης (ίλυ και άργιλο), στον τροποποιημένο τύπο δέλτα κατά τους Postma και Roer, η σειρά πυθμένα χαρακτηρίζεται και από αδρομερές υλικό (χαλίκια) το οποίο όμως δεν φτάνει στην εξωτερική, προς τα βαθύτερα τμήματα της θάλασσας, πλευρά. Στα τραπεζοειδή τύπου δέλτα, η σειρά πυθμένα απουσιάζει είτε γιατί μπορεί να υπάρχει κάποια υδραυλική παράκαμψη είτε εξαιτίας κάποιου υβώματος εσωτερικά της λεκάνης απόθεσης λόγω τεκτονικής.

Οι τρεις αυτές διαφορετικές αποθέσεις αντιστοιχούν σε τρεις φυσιογεωγραφικές μονάδες που αναφέραμε: η άνω σειρά στο *δελταϊκό πεδίο* (delta plain), η σειρά προέλασης στη *δελταϊκή κατοφέρεια* (delta slope) και η σειρά πυθμένα στην *προ-δελταϊκή περιοχή* (prodelta).

Τα κλαστικά δελταϊκά ιζήματα έχουν ένα εύρος κοκκομετρικού μεγέθους από άργιλο (clay) μέχρι ψηφίτη και χαλίκια. Τόσο το κοκκομετρικό μέγεθος όσο και η σύσταση των δελταϊκών ιζημάτων εξαρτώνται από το υπόβαθρο, την πηγή τροφοδοσίας, το κλίμα και τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής.



**Εικόνα 6.8** Ο τύπος δέλτα κατά Gilbert με τα τρία διακριτά τμήματα.

### 6.2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη ενός Δέλτα

Η ανάπτυξη και τα φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά ενός δέλτα εξαρτώνται από γεωλογικούς, κλιματικούς και υδρολογικούς κυρίως παράγοντες. Η μορφή, η έκταση και το γεωμορφολογικό αποτύπωμα του δέλτα επί της ακτής δεν είναι ίδιο σε όλες τις γεωγραφικές περιοχές. Εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά της ενδοχώρας, δηλαδή το ανάγλυφο, την κλίση, τη στερεοπαροχή, το κοκκομετρικό μέγεθος, και από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απόθεσης, δηλαδή τον ρυθμό βύθισης, τα κύματα και τις παλίρροιας. Συνοψίζοντας, η ανάπτυξη των δέλτα εξαρτάται από τους ακόλουθους επιμέρους γεωλογικούς και φυσιογεωγραφικούς παράγοντες οι οποίοι είναι οι εξής:

- (α) το μέγεθος και η έκταση της λεκάνης απορροής του ποτάμιου συστήματος,
- (β) η τεκτονική και το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής,
- (γ) το κλίμα και η βλάστηση της περιοχής,
- (δ) οι άνεμοι,
- (ε) οι παλίρροιας και η κυματική δράση,
- (στ) οι ευστατικές κινήσεις,
- (ζ) η στερεοπαροχή.

Όλοι οι ανωτέρω παράγοντες και ο καθένας ξεχωριστά, άλλοτε σε μεγάλο βαθμό και άλλοτε σε μικρότερο, επηρεάζουν την ανάπτυξη μιας δελταϊκής απόθεσης. Για παράδειγμα, σε περιοχές της Μεσογείου όπου το μέγεθος της παλίρροιας είναι μικρό, η ανάπτυξη των δέλτα επηρεάζεται ελάχιστα από αυτές. Σε ποτάμια συστήματα όπου η έκταση της υδρολογικής λεκάνης και η στερεοπαροχή είναι μικρές, τα φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά διαφοροποιούνται από ποτάμια συστήματα όπου η υδρολογική τους λεκάνη μπορεί να καλύπτει τη μισή ήπειρο, όπως είναι ο Αμαζόνιος στη Νότια Αμερική και ο Μισισσιπής στη Βόρεια Αμερική. Επιπλέον, η ενεργός τεκτονική στην ενδοχώρα αλλά και στην παράκτια ζώνη πολλές φορές ελέγχει τις διαδικασίες ανάπτυξης και απόθεσης ενός δελταϊκού ριπιδίου και σε συνδυασμό με τις ευστατικές κινήσεις, την ανύψωση ή πτώση της στάθμης της θάλασσας, αποτελούν δύο από τους κύριους γεωλογικούς παράγοντες ελέγχου της ανάπτυξης ενός δέλτα.

### 6.2.4 Τα μεγαλύτερα δέλτα στον Ελληνικό χώρο και τα χαρακτηριστικά τους

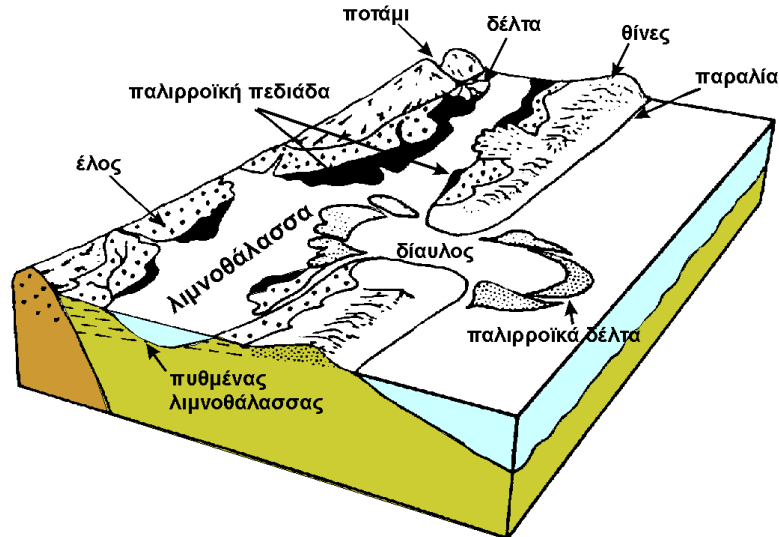
Τα μεγαλύτερα δέλτα της Ελλάδας αναπτύσσονται από τα μεγαλύτερα ποτάμια συστήματα τα οποία διέρχονται από αυτή και σχετίζονται με τις κλιματικές και γεωμορφολογικές συνθήκες των περιοχών. Η κατανομή των μεγαλύτερων δελταϊκών οικοσυστημάτων της χώρας παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.1 όπου διαφαίνεται μια ξεκάθαρη χωρική διαφοροποίηση μεταξύ Δυτικής, Ανατολικής και Βόρειας Ελλάδας, με τις δελταϊκές αποθέσεις να κυριαρχούν στη Δυτική και Βόρεια Ελλάδα. Τα μεγαλύτερα ποτάμια που διέρχονται τη χώρα είναι ο Έβρος και ο Αξιός στη Βόρεια Ελλάδα τα οποία πηγάζουν από γειτονικές χώρες, ενώ σε μήκος ακολουθούν ο Αλιάκμονας, ο Αχελώος, ο Πηνειός, ο Νέστος, ο Στρυμόνας, ο Καλαμάς, ο Άραχθος, ο Αλφειός και ο Ευρώτας. Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των δελταϊκών αποθέσεων των μεγαλύτερων ποτάμιων συστημάτων της χώρας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.

**Πίνακας 6.1** Τα κύρια δελταϊκά συστήματα της χώρας, με τα μορφομετρικά τους χαρακτηριστικά, την παροχή τους και το μεταφερόμενο ιζηματογενές φορτίο εν αιωρήσει.

Ποταμός	Εκβολές	Έκταση λεκάνης απορροής (km <sup>2</sup> )	Έκταση δέλτα (km <sup>2</sup> )	Μήκος δελταϊκής ακτογραμμής (km)	Μέση ετήσια παροχή (m <sup>3</sup> /sec)	Μέση ετήσια ποσότητα ιζήματος που μεταφέρεται σε αιώρηση (10 <sup>6</sup> t)
Αχελώος	Πατραϊκός Κόλπος	5470	270	80	188	2,53
Αλφειός	Ιόνιο Πέλαγος	3600	110	40	-	-
Αλιάκμονας	Θερμαϊκός Κόλπος	9250	120	16	73	2,80
Αραχθός	Αμβρακικός Κόλπος	1895	245	25	69,8	7,31
Αξιός	Θερμαϊκός Κόλπος	23750	400	35	-	-
Εύηνος	Πατραϊκός Κόλπος	1070	90	40	27,6	15,74
Έβρος	ΒΔ Αιγαίο Πέλαγος	52900	190	20	-	-
Καλαμάς	Ιόνιο Πέλαγος	1826	80	30	51	1,92
Λούρος	Αμβρακικός Κόλπος	785	110	15	19,3	0,08
Νέστος	Βόρειο Αιγαίο Πέλαγος	6178	435	62,5	-	-
Μόρνος	Κορινθιακός Κόλπος	1010	28	14	-	-
Πηνειός (Πελοπόννησος)	Ιόνιο Πέλαγος	913	85	22,5	81	4,4
Σπερχειός	Μαλιακός Κόλπος	1780	104	25	62	2,10
Στρυμόνας	Βόρειο Αιγαίο Πέλαγος	16550	10	10,5	-	-

### 6.3 Λιμνοθάλασσα περιβάλλοντα ιζηματογένεσης

Οι λιμνοθάλασσες (lagoons) είναι γενικά ρηχά περιορισμένα υδάτινα σώματα υφάλμυρου, αλμυρού ή υπεράλμυρου χαρακτήρα που αναπτύσσονται στην παράκτια ζώνη και οι οποίες διαχωρίζονται από την ανοιχτή θάλασσα με έναν χαρακτηριστικό αμμώδη ή χαλικώδη νησιωτικό φραγμό (barrier island) ή με έναν αμμώδη ή χαλικώδη βραχίονα (barrier spit) αποτελούμενο από άμμους παραλίας ή αμμοθίνες (Εικόνα 6.9). Η παράκτια αυτή γεωμορφή του φραγμού είναι ένα διακριτό στοιχείο των λιμνοθαλάσσιων συστημάτων, από άλλα παρόμοια παράκτια συστήματα όπως είναι οι ποταμόκολποι (estuaries). Οι λιμνοθάλασσες εμφανίζονται ευρέως σε όλες τις ηπείρους, καλύπτοντας πάνω από το 13% των ακτογραμμών του κόσμου, και απαιτούν κάποιες ιδιαίτερες συνθήκες και προϋποθέσεις για να αναπτυχθούν. Η επικοινωνία των συστημάτων αυτών με τη θάλασσα είναι γενικά περιορισμένη ή εφήμερη και γίνεται διαμέσου ενός ή περισσότερων διαύλων (inlets), σταθερών ή όχι οι οποίοι διακόπτουν τους νησιωτικούς φραγμούς (Εικόνα 6.9). Ο χαρακτηρισμός των λιμνοθαλασσών ως παράκτιων οικοσυστημάτων γίνεται για να διαχωρίσουμε τις λιμνοθάλασσες αυτές από τις βαθιές λιμνοθάλασσες που συνδέονται με ατόλες, αν και συχνά παραλείπεται ο επιθετικός αυτός προσδιορισμός και σήμερα επικρατεί γενικά ο όρος λιμνοθάλασσα για όλους τους τύπους λιμνοθαλασσών.



**Εικόνα 6.9** Σχηματική απεικόνιση των κύριων λιμνοθαλάσσιων υποπεριβαλλόντων ιζηματογένεσης.

Οι λιμνοθάλασσες τυπικά αναπτύσσονται σε ομαλού ανάγλυφου παράκτιες ζώνες οι οποίες γειτνιάζουν με χαμηλής κλίσεως ηπειρωτικές κατωφέρειες. Βέβαια, μπορούν να αναπτυχθούν και σε περιοχές με υψηλό ανάγλυφο, όπως είναι οι ακτές του Μεξικού στον Ειρηνικό Ωκεανό. Στις ακτογραμμές, υπάρχουν συχνά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά λιμνοθαλασσών που συχνά αναδεικνύονται στον κυρίαρχο παράκτιο χαρακτήρα. Έχει εκτιμηθεί από πολλούς ερευνητές ότι το 13% των παράκτιων ζωνών ανά τον κόσμο καταλαμβάνεται από λιμνοθάλασσα περιβάλλοντα. Επίσης, οι λιμνοθάλασσες παρουσιάζουν μια ευρεία γεωγραφική κατανομή και απαντώνται από τον ισημερινό έως και τους πόλους. Το 1/3 των ακτών του Μεξικού, το μισό περίπου των ανατολικών ακτών των Η.Π.Α. και του κόλπου του Μεξικού, καθώς επίσης πολλές ακτές της Βραζιλίας, της Δυτικής Αφρικής, της Νότιας και Ανατολικής Ινδικής χερσονήσου, της Νοτιο-δυτικής και Νοτιο-ανατολικής Αυστραλίας, της Αλάσκας, της Σιβηρίας, παράκτιων περιοχών που βρίσκονται στη Μεσόγειο θάλασσα, στη Νότια Βαλτική, στη Μαύρη και στην Κασπία θάλασσα, χαρακτηρίζονται από την παρουσία λιμνοθαλάσσιων περιβαλλόντων ιζηματογένεσης.

Ο σχηματισμός μιας λιμνοθάλασσας συνδέεται άμεσα με την άφθονη προσφορά ιζήματος (άμμου ή/και χαλικιών) από την παράκτια και υποπαράκτια ζώνη. Αποτέλεσμα της προσφοράς υλικού είναι ο σχηματισμός του φραγματικού νησιού ή βραχίονα ο οποίος περιορίζει τη λιμνοθάλασσα από το ανοιχτό πέλαγος. Οι δύο αυτές γεωμορφές της παράκτιας ζώνης, δηλαδή της λιμνοθάλασσας και του φραγμού της, συνδέονται στενά μεταξύ τους και δεν μπορεί να υφίσταται ο σχηματισμός της λιμνοθάλασσας χωρίς τον σχηματισμό του φραγμού. Οι λιμνοθαλάσσιοι φραγμοί μπορούν να σχηματιστούν σε απόσταση από την ακτή ή κοντά προς την ακτή (onshore) ανάλογα με την παράκτια δυναμική και κυρίως από τη φύση των κυμάτων που φθάνουν στην ακτή, την τοπογραφία της περιοχής, το κλίμα και την αφθονία του υλικού που διατίθεται για τη δόμησή τους.

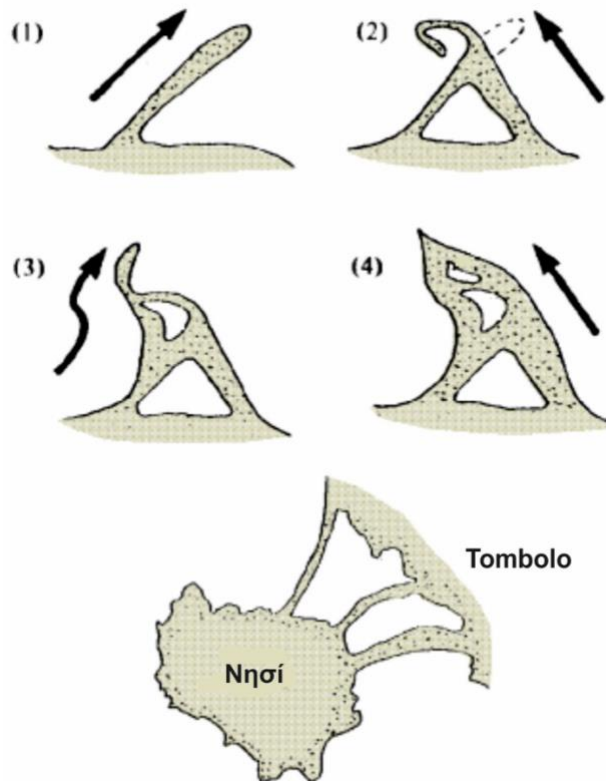
Αν και οι περισσότερες λιμνοθάλασσες σχηματίστηκαν με τις προαναφερόμενες διαδικασίες, βιβλιογραφικά αναφέρονται και άλλες διαδικασίες σχηματισμού λιμνοθαλασσών τοπικής σημαντικότητας. Σε ακτές, όπου για παράδειγμα επικρατεί το καθεστώς βύθισης, η θάλασσα μπορεί να σπάσει έναν προϋπάρχοντα φραγμό πλημμυρίζοντας τη χαμηλή τοπογραφικά περιοχή πίσω από αυτόν. Εδώ συγκαταλέγεται και η περίπτωση όπου στην ακτή υπάρχουν κρατήρες ηφαιστειών, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στη Νέα Ζηλανδία. Επίσης κάποιες λιμνοθάλασσες (για παράδειγμα αυτές των ανατολικών ακτών της Σαουδικής Αραβίας) σχηματίστηκαν σε περιοχές, όπου κατά το Πλειστόκαινο η παλαιο-ακτή είχε διαβρωθεί εξαιτίας της κυματικής δράσης και η μέση στάθμη της θάλασσας ήταν λίγο χαμηλότερη από ό,τι η σημερινή. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα με την ανύψωση της στάθμης της θάλασσας στο σημερινό επίπεδο και με την κατάκλιση της περιοχής αυτής σε συνδυασμό με τον σχηματισμό λιμνοθαλάσσιων φραγμών, να δημιουργηθούν ρηχά και με επίπεδο πυθμένα λιμνοθαλάσσια συστήματα.

Έντονες θύελλες επίσης μπορούν να προκαλέσουν τη δημιουργία λιμνοθαλασσών, από τη μετακίνηση σημαντικών ποσοτήτων ιζήματος από τα άκρα κάποιου βραχίονα και την εναπόθεσή του κοντά στην ακτή με τέτοιο τρόπο ώστε να εγκλωβίσουν μικρές λιμνοθάλασσες. Επίσης ο συνδυασμός της βύθισης κάποιας περιοχής, της επανατοποθέτησης ιζήματος και της μετανάστευσης κάποιου ποτάμιου καναλιού διανομής, μπορεί να μετατρέψει ένα δελταϊκό πεδίο σε ισοδύναμο λιμνοθαλάσσιο.



Ένας από τους πιο ενδιαφέροντες τρόπους σχηματισμού μικρών λιμνοθαλασσών είναι αυτός που παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.10, με τέσσερα εξελικτικά στάδια. Στο στάδιο (1) έχουμε τον σχηματισμό ενός βραχίονα. Με την αλλαγή του ρευματικού καθεστώτος, σε αντίθετη κατεύθυνση από την αρχική, σχηματίζεται ένας δεύτερος βραχίονας και διασταυρώνεται με τον πρώτο (στάδιο 2) ενώ η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφθεί (στάδια 3 και 4). Μετά από τον εγκλεισμό μιας λιμνοθάλασσας, ο αρχικός βραχίονας εξακολουθεί να μεγαλώνει και να εγκλείει και δεύτερη λιμνοθάλασσα, ενώ η περαιτέρω αύξηση των βραχιόνων επιτρέπει τον περιορισμό και τρίτης λιμνοθάλασσας (στάδια 3 και 4). Τέτοιοι συνδυασμοί βραχιόνων ή οδοντωτών (cusprate) γεωμορφών σχηματίζονται συχνά σε ακρωτήρια σε προφυλασσόμενες περιοχές και μερικές φορές ενώνουν μικρά νησιά με την κυρίως στεριά σχηματίζοντας τα tombolo (Εικόνα 6.10).

### Στάδια Εγκλεισμού Λιμνοθαλασσών



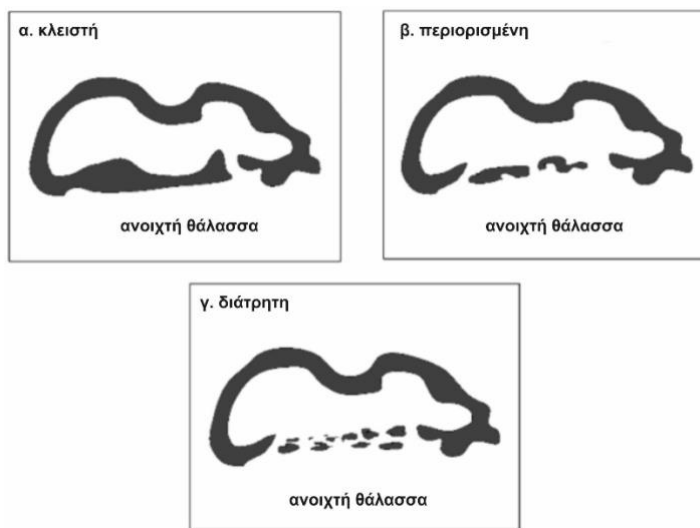
**Εικόνα 6.10** Στάδια σχηματισμού και ανάπτυξης μικρών λιμνοθαλασσών με βραχίονες. (1), (2), (3), (4) και με σύνδεση μικρών νησίδων με την κοντινή παραλία (tombolo).

Συνήθως κάθε λιμνοθάλασσα συνδέεται με ένα ποτάμιο σύστημα που εκβάλλει είτε μέσα στη λιμνοθάλασσα είτε στην ανοιχτή θάλασσα κοντά σε αυτήν. Το ποτάμιο αυτό σύστημα αποτελεί την κύρια πηγή τροφοδοσίας ιζημάτων της παράκτιας και υποπαράκτιας ζώνης, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην ανάπτυξη και διατήρηση μιας λιμνοθάλασσας. Μερικές λιμνοθάλασσες δεν συνοδεύονται από κάποιο ποτάμι. Όμως και στις περιπτώσεις αυτές μπορεί να καταδειχτεί ότι ένα ποτάμι υπήρχε κάποτε και έρεε στην περιοχή σχηματίζοντας ένα δέλτα και το οποίο για κάποιο λόγο μετανάστευσε τις εκβολές του.

### 6.3.1 Μορφολογικά Χαρακτηριστικά Λιμνοθαλασσών

Αν και οι λιμνοθάλασσες εκθέτουν ποικίλα σχήματα, εντούτοις το βασικό σχήμα μιας λιμνοθάλασσας σε κάτοψη είναι επίμηκες και σχετικά στενό με τον μεγάλο άξονα παράλληλο με την ακτή. Σύμφωνα με την ταξινόμηση των παράκτιων λιμνοθαλασσών κατά Kjerfve and Magill (1989) διακρίνονται σε κλειστές, περιορισμένες και διάτρητες (Εικόνα 6.11). Το σχήμα της λιμνοθάλασσας προκαλείται από τον περιορισμό του νερού από έναν αμμώδη ή χαλικώδη φραγμό (barrier) πάνω σε ένα υπόβαθρο που κλείνει ελαφρά προς τη θάλασσα. Αν το υπόβαθρο δεν έχει σημαντικές υψομετρικές ανωμαλίες, η αρχική λιμνοθάλασσα θα είναι ουσιαστικά ένα επιμηκυμένο ορθογώνιο που κινείται παράλληλα προς την ακτή. Το μήκος μιας λιμνοθάλασσας

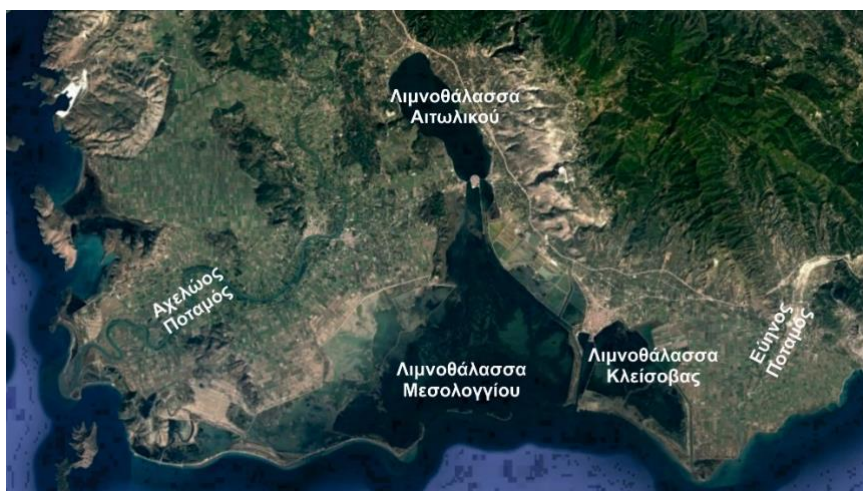
ή ενός συστήματος λιμνοθαλασσών εξαρτάται εν μέρει από την κανονικότητα του ίχνους της γραμμικής ακτής και εν μέρει από την παρουσία ή την απουσία κρημνών, ακρωτηρίων στην ακτή. Λιμνοθάλασσες πολύ επιμηκυμένες παρατηρούνται πάνω σε σχετικά ευθύγραμμες ή ασθενώς καμπύλες χαμηλές ακτές, όπου υπάρχει αφθονία προσφοράς ιζήματος.



**Εικόνα 6.11** Ταξινόμηση των παράκτιων λιμνοθαλασσών: (α) κλειστές, (β) περιορισμένες και (γ) διάτρητες (σύμφωνα με τους Kjerfve and Magill, 1989).

Ωστόσο η σχετική ανύψωση της μέσης στάθμης της θάλασσας που ολοκληρώθηκε μέσα στο Ολόκαινο και η παρουσία υψομετρικών ανωμαλιών στον αρχικό πυθμένα της λιμνοθάλασσας μεταβάλλουν το σχήμα της. Η πιο συνηθισμένη μετατροπή στο σχήμα οφείλεται σε μια ποτάμια κοιλάδα που διασχίζει το υπόβαθρο και ιχνογραφείται λιγότερο ή περισσότερο κάθετα προς την ακτή. Στον Ελλαδικό χώρο, το λιμνοθαλάσσιο σύμπλεγμα του Μεσολογγίου – Αιτωλικού είναι ένα ανάλογο παράδειγμα κάθετης ανάπτυξης μιας λιμνοθάλασσας προς την ακτή και είναι το αποτέλεσμα της κατάκλισης της παλιάς ποτάμιας κοιλάδας του Αχελώου που διέσχισε το Νεογενές και Προ-Νεογενές υπόβαθρο της περιοχής, πριν το ποτάμι μεταναστεύσει δυτικότερα, εκβάλλοντας στο Ιόνιο Πέλαγος (Εικόνα 6.12).

Το αρχικό σχήμα μιας λιμνοθάλασσας αλλάζει σταδιακά με την απόθεση ιζημάτων γύρω από τις όχθες της. Αυτές οι αποθέσεις αναπτύσσονται αρχικά ως μεσοπαλιρροϊκές πεδιάδες (intertidal flats) και επιπαλιρροϊκές πεδιάδες (supratidal flats) και αργότερα καλύπτονται από έλη με ευρύαλα αγριοκάλαμα και αλόφυτα που μεγαλώνουν προς τα εξωτερικά τμήματα της λιμνοθάλασσας σε ακανόνιστα σχήματα.



**Εικόνα 6.12** Δορυφορική εικόνα της ανάπτυξης του συμπλέγματος των λιμνοθαλασσών Μεσολογγίου – Αιτωλικού κάθετα προς την ακτογραμμή.

## 6.4 Φραγματοειδείς νησίδες – νησιωτικοί φραγμοί και βραχίονες

Η φραγματοειδής νησίδα ή νησιωτικός φραγμός είναι μια επιμηκυσμένη απόθεση ιζήματος προερχόμενου από την παράκτια και υποπαράκτια ζώνη σε απόσταση από την ακτή (offshore) ή κοντά προς την ακτή (onshore) και επηρεάζεται από την αφθονία του υλικού που διατίθεται για τη δόμησή του, από τη φύση των κυμάτων που φτάνουν στην ακτή και από το κλίμα της περιοχής. Σύμφωνα με τη μορφολογική ταξινόμηση των Zenkovitch (1967) και King (1972), οι λιμνοθαλάσσιοι φραγμοί μπορεί να διακριθούν σε πέντε (5) γεωμορφολογικούς τύπους (Εικόνα 6.13). Ο πρώτος φραγματικός τύπος είναι αυτός του φραγματικού βραχίονα (barrier spit), ο οποίος χαρακτηρίζεται από μια ενωμένη με τη χέρσο και μια ελεύθερη άκρη, ενώ παρουσιάζει συνήθως μια επιμήκη τοξοειδή ανάπτυξη με την κυρτή πλευρά προς τη θάλασσα (Εικόνα 6.13). Ο δεύτερος φραγματικός τύπος είναι αυτός του φραγμού «τσέπης» (rocket barrier), ο οποίος αναπτύσσεται συνήθως σε μικρούς, στενόμακρους κόλπους με την κοίλη του πλευρά προς την πλευρά της θάλασσας (Εικόνα 6.13). Ο τρίτος φραγματικός τύπος είναι αυτός του διπλού «tombolo» (double tombolo), ο οποίος εκθέτει ανάλογη μορφολογική ανάπτυξη με αυτήν του φραγμού «τσέπης», με τη μόνη διαφορά ότι αποτελείται από δύο φραγμούς που τελικά συνδέουν τη χέρσο με ένα νησί, δημιουργώντας έναν κλειστό κόλπο (Εικόνα 6.13). Ο τέταρτος φραγματικός τύπος είναι αυτός του «οδοντωτού/γωνιώδους» φραγμού (cusped barrier), αναπτύσσοντας ένα τριγωνικού σχήματος περιβάλλον πίσω από τους φραγμούς οι οποίοι δείχνουν ανάλογη μορφολογική ανάπτυξη με αυτή του διπλού «tombolo», χωρίς βέβαια να συνδέονται οι φραγμοί με την ύπαρξη κάποιου νησιού. Τέλος, ο πέμπτος φραγματικός τύπος είναι αυτός του φραγμού «θηλιά» (looped barrier), ο οποίος χαρακτηρίζεται από μια ημικυκλική ή ελλειπτική ανάπτυξη περιβάλλοντος πίσω από τον φραγμό, δείχνοντας κυρτή γεωμετρία προς την πλευρά της θάλασσας (Εικόνα 6.13).

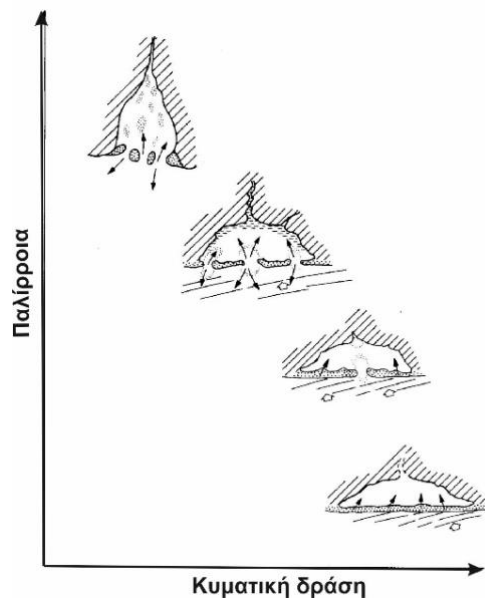
Οι λιμνοθαλάσσιοι φραγμοί παρουσιάζουν παγκόσμια εξάπλωση καταλαμβάνοντας έως και το 11% των ακτογραμμών των κυριότερων ηπειρωτικών μαζών επιδεικνύοντας μεγάλη ποικιλία γεωμορφών, φυσιογραφικών και κυματικών καθεστώτων. Εξαιτίας αυτής της ποικιλομορφίας που δείχνουν, έχει γίνει αντιληπτό από πρόσφατες έρευνες ότι οι νησιωτικοί φραγμοί ή βραχίονες παρουσιάζουν πολλαπλή αιτιότητα όσον αφορά τη γέννησή τους και έχουν διατυπωθεί ανάλογες θεωρίες.

Έχει διατυπωθεί η άποψη ότι ένας νησιωτικός φραγμός μπορεί να δημιουργείται από έναν εμβρυακό φραγμό που αναπτύσσεται στην υποπαράκτια ζώνη και ο οποίος συγκεντρώνοντας ίζημα από την ανοιχτή θάλασσα με κυματικές διαδικασίες, προβάλλει τελικά στην επιφάνεια μόλις αποκτήσει το απαιτούμενο μέγεθος. Επίσης, πολλοί ερευνητές θεωρούν ότι τα φραγματικά νησιά προκύπτουν από την επαύξηση των επιμήκων βραχιόνων με τη βοήθεια των επιμήκων προς την ακτή ρευμάτων (longshore currents) και στη συνέχεια με το «σπάσιμό» τους και τον σχηματισμό διαύλων. Τέλος, διατυπώνεται η άποψη ότι ο σχηματισμός των λιμνοθαλάσσιων φραγμών δημιουργείται από τις ανυψώσεις του μέσου επιπέδου της θάλασσας (ισοστατικές κινήσεις) και το πλημμύρισμα παρακτίων ράχων.

Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη και τη μορφολογία των φραγματικών νησιών διαδραματίζει, εκτός του σχετικού επιπέδου της θάλασσας, και η κυματική δράση σε συνδυασμό με τα επιμήκη προς την ακτή ή παράκτια ρεύματα και την παλίρροια (Εικόνα 6.14). Χρησιμοποιώντας την παλιρροϊκή ταξινόμηση του Davies (1972), έχει δειχθεί μια σχέση ανάμεσα στο παλιρροϊκό εύρος και του φραγματικού συστήματος. Οι μικροπαλιρροϊκές ακτές (παλιρροϊκό εύρος < 2m), όπως είναι αυτές της Δυτικής Ελλάδας, χαρακτηρίζονται από καλώς ανεπτυγμένους και σχεδόν συνεχείς λιμνοθαλάσσιους φραγμούς, απουσία διαύλων ή εμφανίζουν έναν κύριο διάυλο. Οι φραγμοί των μεσοπαλιρροϊκών ακτών (παλιρροϊκό εύρος 2-4 m) είναι τυπικά βραχείς με κοινή την παρουσία των διαύλων. Οι ακτές που δέχονται τη δράση μακροπαλιρροϊκού εύρους (>4m), δεν αναπτύσσουν λιμνοθαλάσσιους φραγμούς, γιατί τόσο η κυματική δράση όσο και τα επιμήκη προς την ακτή ή παράκτια ρεύματα δεν μπορούν να δράσουν αποτελεσματικά ή είναι πρακτικά απόντα.



Εικόνα 6.13 Μορφολογική ταξινόμηση των λιμνοθαλάσσιων φραγμών.



Εικόνα 6.14 Διάγραμμα μορφολογικής απεικόνισης των λιμνοθαλασσών σε σχέση με την παλίρροια και την κυματική δράση.

Ο αριθμός και το μέγεθος των διαύλων (πλάτος και μήκος) με τους οποίους συνδέεται μια λιμνοθάλασσα με τον ανοιχτό ωκεανό είναι συνάρτηση της ποσότητας του νερού που κινείται μέσα από τους διαύλους, ως αποτέλεσμα της ανταλλαγής ενός μεγάλου όγκου νερού ανάμεσα στη λιμνοθάλασσα και του ανοικτού ωκεανού. Η πηγή της υδάτινης αυτής ροής είναι από τους ποταμούς που χύνονται στη λιμνοθάλασσα και από την ανύψωση και ταπείνωση της ωκεάνιας παλίρροιας. Αν το παλιρροϊκό εύρος είναι μικρό, η ποτάμια ροή είναι ο βασικός παράγοντας στη διατήρηση ενός διαύλου. Η ποσότητα του νερού, που ρέει μέσα από έναν διάυλο, εξαιτίας της ωκεάνιας παλιρροϊκής δράσης είναι μια απευθείας συνάρτηση του παλιρροϊκού εύρους, της παλιρροϊκής συχνότητας και της έκτασης της λιμνοθάλασσας που δέχεται την παλιρροϊκή πλημμύρα.



Οι περισσότεροι ή ακόμη και όλοι οι αμμώδεις λιμνοθαλάσσιοι φραγμοί προελαύνουν προς τη θάλασσα εφόσον η προσφορά άμμου υπερβαίνει τη μέση ανύψωση της στάθμης της θάλασσας ή τη βύθιση της περιοχής. Βέβαια, σε περίπτωση έντονων θυελλών ή αλλαγής των παρακτίων ρευμάτων (longshore currents) είναι δυνατόν να διαβρώνεται ο φραγμός, αλλά η κυρίαρχη διαδικασία, για όσο χρόνο διατίθεται άμμος, είναι η συνεχής δόμησή του προς τη θάλασσα. Σε περιοχές όπου υπάρχει σημαντική εισροή άμμου από ποτάμια που ρέουν προς την ανοικτή θάλασσα, οι λιμνοθαλάσσιοι φραγμοί μπορούν να επεκταθούν σε πλάτος πολλών χιλιομέτρων και να προωθηθούν ταχύτατα προς την ανοικτή θάλασσα.

Η πλειονότητα της κατακόρυφης ανάπτυξης των λιμνοθαλάσσιων φραγμών επιτυγχάνεται μέσω του σχηματισμού αμμόλοφων (dunes). Οι αμμόλοφοι, οι οποίοι συνιστούν υποπεριβάλλον των λιμνοθαλάσσιων φραγμών, σχηματίζονται σε όλες τις αμμώδεις παραλίες (sand beaches) και το μέγεθός τους, καθώς και το ύψος τους ρυθμίζονται από αρκετούς παράγοντες, όπως είναι ο επικρατέστερος άνεμος, οι ταχύτητες των ανέμων, η ποσότητα της άμμου που διατίθεται στην παραλία και πάνω στον λιμνοθαλάσσιο φραγμό και η ποσότητα της βλάστησης. Η ποσότητα της βλάστησης εξαρτάται από το κλίμα και κυρίως από το ύψος των βροχοπτώσεων. Ένα κάλυμμα βλάστησης μπορεί γρήγορα να σταθεροποιήσει έναν αμμόλοφο και μια υπερυψωμένη *αμμώδη λωρίδα* γνωστή ως *αυχένας* (beach berm) και ακόμη να εμποδίσει την καθ' ύψος ανάπτυξη των αμμόλοφων. Αν άφθονη άμμος είναι διαθέσιμη στην υποπαράκτια ζώνη, ο φραγμός μπορεί να αναπτυχθεί πιο γρήγορα προς τη θάλασσα σε σχέση με εκείνους τους φραγμούς όπου μεγάλη ποσότητα άμμου μεταφέρεται με τον άνεμο από την παραλία τους προς την ξηρά. Ένας τέτοιος φραγμός έχει σχετικά χαμηλό ανάγλυφο. Σε μια περιοχή ξηρού κλίματος που έχει εξίσου άφθονη προσφορά άμμου, ο φραγμός θα γίνει ψηλότερος από αυτόν μιας περιοχής θερμού και υγρού κλίματος, εξαιτίας μιας σχετικά πιο εντατικής δράσης του ανέμου. Το αποτέλεσμα είναι ότι ένας τέτοιος φραγμός μπορεί να αναπτύσσεται προς τη θάλασσα πιο αργά.

Άλλα υποπεριβάλλοντα ενός τυπικού συστήματος λιμνοθαλάσσιου φραγμού, αρχίζοντας από το πιο ακραίο προς τη θάλασσα, είναι η επάκτια ζώνη (shoreface) με υψηλή κυματική ενέργεια η οποία χαρακτηρίζεται από την παρουσία των γεωμορφών *επιμηκυμένων φραγμών* (longshore bar) και *αυλάκων* (troughs). Το υποπεριβάλλον αυτό καθορίζεται ως η περιοχή του φραγματικού νησιού που εκτείνεται προς την πλευρά της θάλασσας από το σημείο της χαμηλής παλίρροιας μέχρι ένα βάθος από 10 έως 20 μέτρα, στη θέση όπου τα κανονικά κύματα αρχίζουν να επιδρούν πάνω στον πυθμένα. Από το σημείο της χαμηλής παλίρροιας και μέχρι το ύψος που αρχίζει η απόθεση των θινών το οποίο συμπίπτει με το ανώτερο όριο της κυματικής δράσης, έχουμε το υποπεριβάλλον απόθεσης της *παραλίας* (beach). Είναι ένα περιβάλλον με χαλαρά ιζήματα, διαφόρων λιθολογικών τύπων και χαρακτηρίζεται από την απότομη αλλαγή της κλίσης και της μορφολογίας του, ενώ το προς τη θάλασσα άκρο του συνίσταται συνήθως από μία ράχη (ridge) που δημιουργεί φραγμό και μία στενή λεκάνη (runnel), μεταβαίνοντας προς τα πάνω ή σε μια κοίλη *παραλία θυέλλης* (storm beach) ή σε μια σχεδόν οριζόντια πίσω από την ακτή περιοχή (οπισθοαιγιαλός - backshore). Η ποσότητα των κελυφών στα ιζήματα παραλίας του φραγμού εξαρτάται από την ποσότητα που αυτά παράγονται στην υποπαράκτια ζώνη και επίσης από τον βαθμό προσφοράς της άμμου.

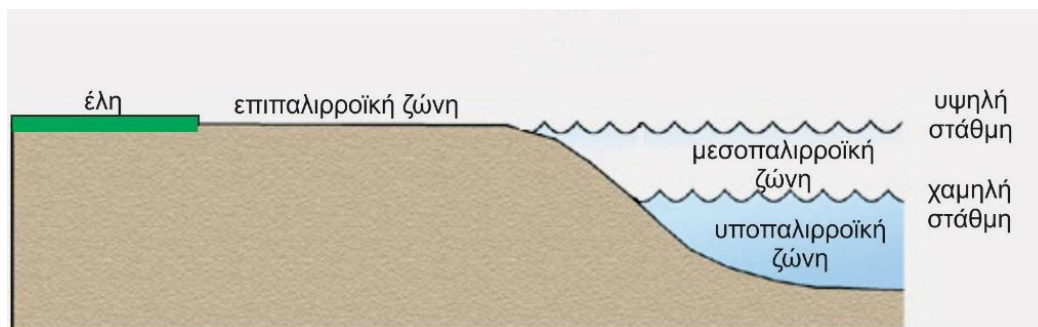
## 6.5 Παλιρροϊκές πεδιάδες (tidal flats)

Οι *παλιρροϊκές πεδιάδες* απαντώνται σε ανοικτές ακτές χαμηλού ανάγλυφου και σχετικώς χαμηλής ενέργειας, καθώς και σε προφυλαγμένες περιοχές ακτών υψηλής ενέργειας που συνοδεύονται από *ποταμόκολπους* (estuaries), *λιμνοθάλασσες* (lagoons), *κόλπους* (bays) και από θέσεις που βρίσκονται πίσω από *φραγματικά νησιά* (barrier islands) (Εικόνα 6.1). Παρουσιάζουν γενικά ευρεία κατανομή και τις συναντάμε και στις τρεις κλιματικές ζώνες του πλανήτη, δηλαδή έχουμε: 1) *χαμηλού* γεωγραφικού πλάτους παλιρροϊκά πεδία, στις θερμές και υγρές τροπικές και υποτροπικές περιοχές, 2) *μεσαίου* γεωγραφικού πλάτους παλιρροϊκά πεδία στις εύκρατες περιοχές και 3) *υψηλού* γεωγραφικού πλάτους παλιρροϊκά πεδία τα οποία δέχονται την επίδραση του πάγου (Dionne, 1988).

Πρόκειται για αμμώδη μέχρι ιλυώδη ή ελώδη επίπεδα τα οποία αναδύονται κατά τη διάρκεια της χαμηλής παλίρροιας και κατακλύζονται από νερό, κατά τη διάρκεια της υψηλής παλίρροιας. Οι αναγκαίες συνθήκες για τον σχηματισμό παλιρροϊκών πεδιάδων είναι ένα αξιοσημείωτο παλιρροϊκό εύρος, η απουσία ισχυρής κυματικής δράσης και η σημαντική παροχή ιζήματος. Οι παλιρροϊκές πεδιάδες επικρατούν σε προφυλαγμένες από ισχυρό κυματισμό περιοχές και όπου η ποτάμια παροχή ιζήματος είναι μικρή, που σημαίνει ότι τα παλιρροϊκά επίπεδα αντανακλούν τον προελαύνοντα χαρακτήρα των ιζημάτων προερχόμενων από τη θάλασσα.

Το μεγαλύτερο τμήμα της παλιρροϊκής πεδιάδας καταλαμβάνει η *ενδο-παλιρροϊκή ή μεσο-παλιρροϊκή ζώνη* (intertidal zone), ενώ προς την πλευρά της ξηράς, στην *υψηλή στάθμη νερού* (high tide) είναι η *επι-*

παλιρροϊκή ζώνη (supratidal zone) και κάτω από τη χαμηλή στάθμη νερού (low tide), δηλαδή κάτω από τη μεσοπαλιρροϊκή ζώνη, είναι η υποπαλιρροϊκή ζώνη (subtidal zone) (Εικόνα 6.15).



Εικόνα 6.15 Διαχωρισμός σε ζώνες της παλιρροϊκής πεδιάδας σε σχέση με τις μεταβολές της στάθμης της θάλασσας.

Η επιφάνεια των παλιρροϊκών πεδιάδων, γενικά, κλίνει ασθενώς από την επιπαλιρροϊκή ζώνη προς την υποπαλιρροϊκή ζώνη και τη λιμνοθάλασσα και καλύπτεται συνήθως από αλμυρόφιλα φυτά (αλόφυτα). Μέσα στη μεσοπαλιρροϊκή ζώνη αναπτύσσονται συνήθως κανάλια που διακλαδίζονται έντονα στα χερσαία άκρα τους, ενώ η μορφολογία τους εξαρτάται άμεσα από το παλιρροϊκό εύρος και τα αναπτυσσόμενα ρεύματα αμπώτιδος (ebb currents) και πλήμμης (flood currents), που συνήθως αναπτύσσουν ταχύτητες της τάξης των 30 έως 50 cm/sec. Ως εκ τούτου, πάνω σε αμμώδη παλιρροϊκά πεδία παράγονται με αφθονία μικρές ρευματικές ρυτιδώσεις (current ripples). Η μεταβλητή διεύθυνση των ρευμάτων, αλλά και των κυμάτων πολλές φορές, αποτυπώνεται πάνω στις παλιρροϊκές πεδιάδες με τον σχηματισμό μεταβλητής διεύθυνσης ρυτιδώσεων εμφανίζοντας μια διασταυρούμενη στρώση τύπου ψαροκόκκαλο (herringbone). Επίσης στα παλιρροϊκά κανάλια σχηματίζονται συνήθως μεγάλες ρυτιδώσεις (megaripples ή dunes), ενώ σε παλιρροϊκές πεδιάδες που συνίστανται από άμμο και ιλύ (mixed flats) αναπτύσσεται ετερολιθική στρώση (κυματοειδής στρώση (wave bedding) και φακοειδής στρώση (lenticular bedding)), καθώς και εναλλαγές σε λεπτή κλίμακα αμμωδών και ιλυωδών στρωμάτων. Αυτή η εναλλασσόμενη στρώση συσχετίζεται κύρια από την εναλλαγή της παλίρροιας και φάσεων εξασθένησης ή μηδενισμού της ταχύτητας του παλιρροϊκού ρεύματος. Τα αμμώδη στρώματα έχουν αποθεθεί στη διάρκεια περιόδων ρευματικής δράσης και η ιλύς στη διάρκεια περιόδων αντιστροφής της παλίρροιας. Οι μορφολογικοί χαρακτήρες και η κατανομή των παλιρροϊκών πεδιάδων εξαρτώνται άμεσα από το αν η ακτογραμμή προελαύνει ή υποχωρεί.

Το σώμα ιζήματος της παλιρροϊκής πεδιάδας είναι επιμηκυσμένο παράλληλα προς την ακτογραμμή και διατέμενεται από παλιρροϊκά κανάλια. Η ιζηματογένεση και η σταθερότητα των παλιρροϊκών πεδίων επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες που λαμβάνουν χώρα τόσο κατά τη διάρκεια της παλιρροϊκής κατάκλυσης, όσο και κατά τον χρόνο έκθεσης της παλιρροϊκής πεδιάδας στον αέρα. Η ξήρανση, η βροχή, η ηλιακή θέρμανση, οι φυτικές και οι ζωικές δραστηριότητες και η επίδραση του πάγου είναι μερικοί από τους παράγοντες αυτούς. Η πανίδα πάνω στις παλιρροϊκές πεδιάδες χαρακτηρίζεται από έναν μεγάλο αριθμό ατόμων, που ανήκουν όμως σε έναν περιορισμένο αριθμό ειδών. Τα περισσότερα από τα επιφανειακά ιζήματα των παλιρροϊκών πεδίων είναι ισχυρώς αναμοχλευμένα από βενθονικούς οργανισμούς. Η βιοαναμόχλευση (bioturbation) σε ιλυώδεις παλιρροϊκές πεδιάδες είναι γενικά ισχυρότατη, ασθενέστερη σε ιλυώδεις-αμμώδεις πεδιάδες (mixed flats) και ασθενέστατη σε αμμώδεις παλιρροϊκές πεδιάδες. Γενικά το φαινόμενο της βιοαναμόχλευσης παρουσιάζει αρνητική συσχέτιση με τον ρυθμό ιζηματογένεσης.

Τα ιζήματα που αποτίθενται στα παλιρροϊκά πεδία είναι κυρίως λεπτόκοκκα, συνήθως ιλύς και λεπτόκοκκη άμμος. Καμιά φορά πάνω στις επιφάνειες των παλιρροϊκών πεδιάδων εξαιτίας της ισχυρής διάβρωσης παρατηρείται συγκέντρωση κελυφών. Η κατανομή των ιζημάτων πάνω στις παλιρροϊκές πεδιάδες εξαρτάται από την ενέργεια και εν μέρει από τον μηχανισμό μεταφοράς που επικρατεί τόσο στη θέση ανάπτυξης της παλιρροϊκής πεδιάδας όσο και ανάμεσα στις διάφορες παλιρροϊκές ζώνες. Έτσι, κοντά στη χαμηλή στάθμη νερού έχουμε εμπλουτισμό της θέσης αυτής με άμμο, επειδή η κυματική δράση είναι ισχυρότερη και δρα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σύγκριση με τα υψηλότερα τμήματα της μεσοπαλιρροϊκής ζώνης, όπου παίρνει μέρος η κύρια απόθεση ιλύος που σε αντίθεση χαρακτηρίζεται από χαμηλή κυματική και ρευματική ενέργεια. Στην ενδιάμεση ζώνη, στη θέση δηλαδή της μεσαίας πεδιάδας ή μεικτής μεσοπαλιρροϊκής πεδιάδας, έχουμε την απόθεση μεταβατικών lithολογικών τύπων, από αμμώδεις σε ιλυώδεις.

Άμμος και γενικά αδρομερή υλικά, επίσης, αποτίθενται μέσα στα παλιρροϊκά κανάλια διανομής, όπου η ρευματική δράση είναι σχετικά ισχυρή. Υπάρχουν δύο κύριες ομάδες παλιρροϊκών πεδίων: 1) τα αμμώδη

παλιρροϊκά πεδία (sandy tidal flats), όπου η μέση συγκέντρωση του ανόργανου εν αιωρήσει ιζήματος των παλιρροϊκών κατακλύσεων είναι γενικά μικρότερη του 1g/L και 2) τα ιλυώδη παλιρροϊκά πεδία, όπου η μέση συγκέντρωση του ανόργανου εν αιωρήσει ιζήματος των παλιρροϊκών κατακλύσεων είναι γενικά μεγαλύτερη από 1g/L. Η έλλειψη ή η σημαντική παρουσία άμμου στις παλιρροϊκές πεδιάδες των παραπάνω δύο πεδίων φαίνεται να εξαρτάται κύρια από την προσφορά τέτοιου ιζήματος (άμμου) και λιγότερο από τη διαδικασία και τη δυναμική της απόθεσης.

## 6.6 Παράκτια έλη (coastal marshes)

Τα παράκτια έλη (Εικόνα 6.16) απαντώνται σε χαμηλές ακτές που είναι χώροι απόθεσης και κύρια συνοδεύονται με λιμνοθάλασσες και δέλτα. Τα έλη σε γενικές γραμμές είναι περιβάλλοντα που αναπτύσσονται στη θέση απόθεσης της υψηλής μεσο-παλιρροϊκής πεδιάδας, όπου το ιλυώδες υλικό του πυθμένα διευκολύνει την ανάπτυξη ποικίλων αλμυρόφιλων φυτών (Εικόνα 6.17). Το χαμηλότερο όριο του χώρου αυτού που ριζώνουν τα έλη είναι κατά προσέγγιση το επίπεδο της μέσης χαμηλής στάθμης του νερού (mean lower high water) και έτσι αυτά μπορούν να εδραιώνονται μόνο στα ψηλότερα τμήματα των παλιρροϊκών πεδιάδων (Εικόνα 6.17). Αυτό, βέβαια, είναι σε συνάρτηση με το παλιρροϊκό εύρος που επικρατεί στις διάφορες παράκτιες περιοχές του κόσμου. Σχηματίζονται σε ανοιχτές ακτές, σε παλιρροϊκούς κόλπους, πίσω από φραγματικά νησιά, στα εσωτερικά περιθώρια των λιμνοθαλασσών και σε δελταϊκούς και μη δελταϊκούς ποταμόκολπους. Τα έλη στις λιμνοθάλασσες συνήθως απαντώνται πάνω στα δέλτα των ποταμών που χύνονται μέσα σε αυτές, πάνω στις παλιρροϊκές πεδιάδες, τις περισσότερες φορές στα περιθώρια των λιμνοθαλασσών και πάνω στους φραγμούς και μάλιστα προς την πλευρά που βλέπει προς τη λιμνοθάλασσα.



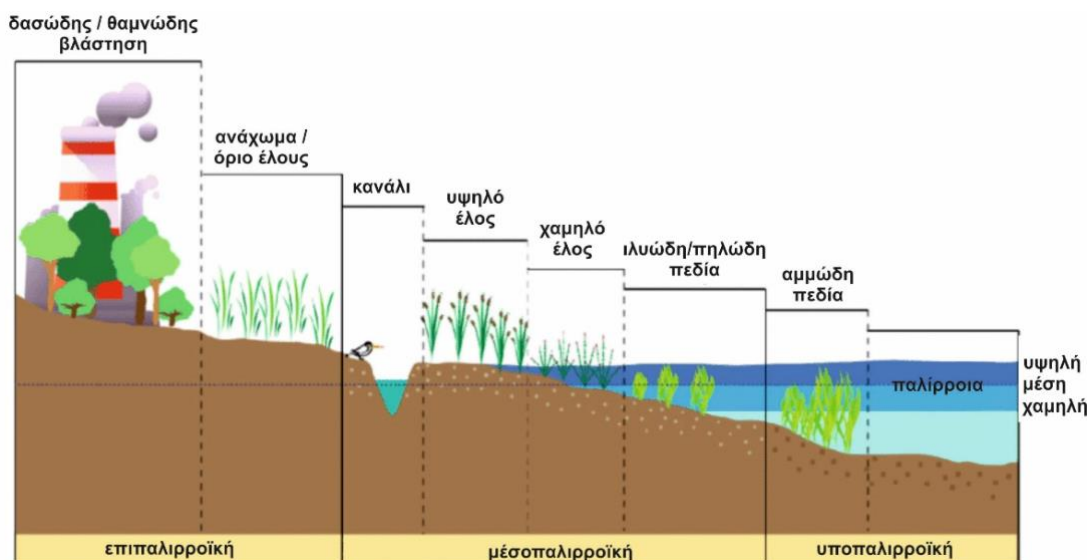
**Εικόνα 6.16** Παράδειγμα παράκτιου έλους

(πηγή: <http://www.public-domain-image.com/public-domain-images-pictures-free-stock-photos/nature-landscapes-public-domain-images-pictures/wetlands-and-swamps-public-domain-images-pictures/coastal-wetlands.jpg>).

Μελέτες επί των ελών έχουν αποκαλύψει την παραγωγή σημαντικής ποσότητας βιομάζας αποτελούμενης από μικρό αριθμό ειδών και υψηλού ποσοστού παραγωγής οργανικού υλικού. Τα λιμνοθαλάσσια έλη και κυρίως αυτά των εύκρατων περιοχών παρουσιάζουν ζώνωση και διακρίνονται σε χαμηλό και υψηλό έλος που μπορούν να αναγνωριστούν από τις διαφορές τους στη βλάστηση, στα μαλάκια και στις συγκεντρώσεις των τρηματοφόρων (Εικόνα 6.17). Γενικά, η βιοποικιλότητα αυξάνεται καθώς ανεβαίνουμε υψομετρικά, αλλά στα ανώτερα υψομετρικά επίπεδα η κατανομή των ειδών δείχνει να κυριαρχείται από ανταγωνισμό, ενώ στα χαμηλότερα επίπεδα η κατανομή αυτή δείχνει να κυριαρχείται από τη φυσιολογική ανθεκτικότητα των φυτών. Ωστόσο έχει παρατηρηθεί μια σημαντική συσχέτιση μεταξύ της συχνότητας και της διάρκειας της παλιρροϊκής κατάκλυσης, με την κατανομή των φυτικών ειδών. Η κατακόρυφη κατανομή και η οικολογική σημασία των

ιδιαίτερων αυτών αλόφυτων φαίνεται επίσης να επηρεάζονται από τις τοπικές γεωγραφικές συνθήκες του εκεί περιβάλλοντος.

Τα έλη γενικά αναπτύσσονται σε θέσεις αβαθούς ύδατος, όπου οι ταχύτητες των ρευμάτων είναι χαμηλές και τα ελώδη φυτά δρουν ως ένα φράγμα για παραπέρα ελάττωση των ταχυτήτων αυτών. Τα αποτελέσματα είναι ο υψηλός ρυθμός ιζηματογένεσης και η απόθεση λεπτόκοκκου ιζήματος. Σε ένα μοντέλο που θέλει τον ρυθμό παροχής ιζήματος να υπερισχύει της σχετικής ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας ή/και της βύθισης της λεκάνης κατάκλισης, το έλος τείνει να μεγαλώσει πλευρικά και κατακόρυφα με έναν σχετικά γρήγορο ρυθμό προελαύνοντας προς το εσωτερικό της λιμνοθάλασσας.



**Εικόνα 6.17** Διαγραμματική απεικόνιση των παλιρροϊκών ζωνών σε σχέση με την ανάπτυξη παράκτιων ελωδών αποθέσεων (τροποποιήθηκε από Taramelli et al., 2022, CC BY 4.0). [https://www.researchgate.net/figure/Graphic-description-of-the-coastal-tidal-system-Coastal-elevation-and-habitat-HWL-MWL\\_fig2\\_350717556](https://www.researchgate.net/figure/Graphic-description-of-the-coastal-tidal-system-Coastal-elevation-and-habitat-HWL-MWL_fig2_350717556)

Τα έλη έχει εκτιμηθεί ότι αποτελούν περιοχές τροφής και προστασίας των ιχθυοπληθυσμών αλλά και της άγριας πανίδας, τόσο σε ήπιες καιρικές συνθήκες όσο και κυρίως σε περιόδους έντονων καιρικών φαινομένων όπου και βρίσκουν καταφύγιο. Επίσης μπορούν να λειτουργήσουν ως φυσικά φίλτρα, έστω και προσωρινά, απομακρύνοντας κάποιες ποσότητες τοξικών μεταλλικών ιόντων, μπορούν να μειώσουν την ορμητική δύναμη των θυελλωδών κυμάτων πριν αυτά προλάβουν να προσβάλουν παράκτιες βιοκοινωνίες και προσφέρονται ως περιοχές για ψυχαγωγικές δραστηριότητες, που θα πρέπει βέβαια να είναι τέτοιες ώστε να μην ασκούν πίεση και να μην θέτουν σε κίνδυνο το ίδιο το οικοσύστημα. Ωστόσο δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις καταστροφής των ελών από τον άνθρωπο και της χρησιμοποίησης των ανακτούμενων εδαφών για οικιστικούς σκοπούς, για τη βιομηχανία, για την απόρριψη υγρών αποβλήτων και για χώρους αναψυχής παρεμβαίνοντας καταστροφικά στη φυσική του κατάσταση και φυσιολογία. Το αποτέλεσμα στις περισσότερες περιπτώσεις είναι η φύση να «εκδικείται», διαβρώνοντας τις παράκτιες αυτές περιοχές, τόσο γιατί έχει διαταραχτεί η υδροδυναμική ισορροπία του συστήματος, όσο και γιατί είναι πλέον περιοχές που βρίσκονται σε «δίαιτα» από πλευράς απόθεσης ιζήματος και διευκολύνεται έτσι η προέλαση της θάλασσας προς τη χέρσο.

Η βλάστηση η οποία εγκαθίσταται επί των πεδίων των ελών είναι υπεύθυνη για τη σταθεροποίηση των περιβαλλόντων αυτών αλλά και για την προέλαση και αύξηση της έκτασης των ελών προς τη θάλασσα. Η μείωση της ταχύτητας του νερού που διέρχεται από τα πεδία αυτά οδηγεί στην κατακράτηση του ιζήματος που μεταφέρεται από το ρεύμα και επομένως στη σταδιακή ανύψωση της επιφάνειας των ελών. Τα επιφανειακά ιζήματα αυτών των περιβαλλόντων γενικά συνίστανται από τους λιθολογικούς τύπους της λεπτόκοκκης άμμου και της ιλύος και είναι γενικά αδρομερέστερα στα χαμηλότερα τμήματα, στην περιοχή δηλαδή του χαμηλού έλους από ό,τι στην περιοχή του υψηλού ή άνω έλους (Εικόνα 6.17). Εξάιρεση αποτελεί η περίπτωση που το τμήμα του άνω έλους τροφοδοτείται από γειτνιάζοντα νησιωτικό φραγμό ή από μια κρημνώδη περιοχή, οπότε παρουσιάζεται αδρομερέστερο αλλά και με τη συμμετοχή ακόμη πιο αδρομερών λιθολογικών τύπων (άμμος, κροκάλες) από ό,τι συνήθως. Τροποποίηση της γενικής κατανομής του ιζήματος επί των ελών μπορεί να συμβεί και με την ύπαρξη γεωμορφολογικών ανωμαλιών και ιδιομορφιών, όπως καναλιών εντός του πεδίου των περιβαλλόντων αυτών και της ύπαρξης κοιλωμάτων (pans) με τη μορφή μικρών λιμνών κυρίως στην περιοχή



του άνω έλους. Επίσης έχει παρατηρηθεί σε ορισμένες περιπτώσεις ότι η λιθολογική κατανομή των ιζημάτων των ελών μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη και την πυκνότητα του δικτύου των καναλιών των ελών. Έτσι, έλη που εκτίθενται σε ένα μέτριο παλιρροϊκό εύρος και των οποίων ο πυθμένας συνίσταται από ήλυ, εμφανίζουν ένα πιο περίπλοκο δίκτυο καναλιών από εκείνα που χαρακτηρίζονται από μεγάλο παλιρροϊκό εύρος και των οποίων ο πυθμένας συνίσταται από αδρομερέστερα ιζήματα.

Ο ρυθμός ιζηματογένεσης στα έλη είναι συνήθως της τάξης των λίγων mm/χρόνο, αλλά σε προελαύνοντα έλη ο ρυθμός αυτός μπορεί να αυξηθεί σημαντικά. Η κυρίαρχη φυσική δομή που αναπτύσσεται στα ιζήματα πολλών ελών είναι η ασυνεχής κυματοειδής μέχρι παράλληλη ελασμάτωση ή η συνεχής ελασμάτωση και η λεπτοστρωματώδης στρώση. Αυτή η χαρακτηριστική δομή δημιουργείται ως αποτέλεσμα της ρυθμικής εναλλαγής απόθεσης οργανικού και ανόργανου υλικού. Συχνά οι δομές αυτές διακόπτονται από την παρουσία βιοαναμόχλευσης, η συχνότητα των οποίων εξαρτάται από την πυκνότητα αποικισμού της περιοχής από τους αντίστοιχους πληθυσμούς, από τα διαθέσιμα είδη φυτών και ζώων και από τον ρυθμό ανάπτυξης των ελών ή από τον συνδυασμό και των τριών προηγούμενων.

Τα παράκτια έλη είναι συχνά όξινα και αναερόβια περιβάλλοντα. Ωστόσο διαφορές στην επιφανειακή γεωχημεία έχουν διαπιστωθεί τόσο μεταξύ χαμηλού και υψηλού έλους, όσο και μεταξύ πεδίων του ίδιου παλιρροϊκού επιπέδου. Αυτές οι μεταβολές οφείλονται είτε στη φυσικοχημική επίδραση της διαφορετικής πανίδας και χλωρίδας που αναπτύσσεται σε διαφορετικούς τύπους ιζήματος, είτε στη διαφορετική κατανομή του κοκκομετρικού μεγέθους εντός των πεδίων των ελών.

## 6.7 Ποταμόκολλοι (estuaries)

Ένας ποταμόκολλος (estuary) είναι μια ποτάμια εκβολή η οποία έχει καλυφθεί με θαλασσινό νερό εξαιτίας της ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας και έχει ως αποτέλεσμα την κάλυψη μεγάλου τμήματος της κοίτης του, σχηματίζοντας ένα ημίκλειστο παράκτιο σώμα νερού με ελεύθερη επικοινωνία με την ανοιχτή θάλασσα. Οι ποταμόκολλοι είναι περιοχές ανάμειξης γλυκού και θαλασσινού νερού. Η παροχή ιζημάτων στους ποταμόκολλους γίνεται τόσο από ποτάμιες όσο και από θαλάσσιες πηγές και οι διεργασίες που μεταφέρουν και αποθέτουν τα ιζήματα σε αυτά τα περιβάλλοντα είναι ένας συνδυασμός διεργασιών ποτάμιας δράσης, κυμάτων και παλίρροιας. Ένας ποταμόκολλος διαφέρει από ένα δέλτα επειδή σε έναν ποταμόκολλο όλη η ιζηματογένεση λαμβάνει χώρα εντός της πλημμυρισμένης κοιλάδας, ενώ τα δέλτα είναι προοδευτικά σώματα ιζήματος που συσσωρεύονται στο θαλάσσιο περιβάλλον αφήνοντας το αποτύπωμα της προέλασής τους επί της ακτής και περιλαμβάνουν και χερσαίο δελταϊκό πεδίο. Ένα τμήμα του ποταμού κοντά στις εκβολές που δεν έχει θάλασσα επιρροή δεν θα θεωρηθεί ποταμόκολλος. Οι ποταμόκολλοι αποτελούν πολύ ευρέως διαδεδομένα σύγχρονα περιβάλλοντα ιζηματογένεσης καθώς σχηματίστηκαν εξαιτίας της ανόδου της στάθμης της θάλασσας που έλαβε χώρα κατά την τελευταία περίοδο των παγετώνων και κατά τη διάρκεια του Ολοκαίνου.

Οι σύγχρονοι ποταμόκολλοι κυμαίνονται από μερικά χιλιόμετρα έως πάνω από 100 χιλιόμετρα μήκος και από μερικές εκατοντάδες μέτρα έως πάνω από 10 χιλιόμετρα πλάτος. Το πάχος των ιζηματογενών ακολουθιών που αποτίθενται με το πλημμύρισμα ενός ποταμόκολλου είναι συνήθως κάποιες δεκάδες μέτρα.

### 6.7.1 Φυσικογεωγραφικά, υδρολογικά και ιζηματολογικά χαρακτηριστικά

Με βάση τα φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά, του τρόπου και του βαθμού ανάπτυξης του φραγμού του καναλιού, αναγνωρίζονται επτά βασικοί τύποι ποταμόκολλων (Flemming, 2011):

- Τα *φιόρντ* (Fjords) είναι εκβολές ποταμών με υψηλό ανάγλυφο με προφίλ κοιλάδας σε σχήμα U, που σχηματίζεται από την πλημμύρα κοιλάδων που έχουν σχηματιστεί μέσω της διάβρωσης από παγετώνες και έχουν καλυφθεί με θαλασσινό νερό κατά τη διάρκεια της ανόδου της στάθμης της θάλασσας στο Ολόκαινο. Τα φιόρντ λόγω του τρόπου σχηματισμού τους αποτελούν τους πιο βαθιούς ποταμόκολλους και το βάθος τους πολλές φορές μπορεί να ξεπερνά και τα 700 m (Εικόνες 6.18, 6.19).
- Τα *φιάρντ* (Fjards) σχετίζονται με τα φιόρντ αλλά έχουν μικρότερο ανάγλυφο, μικρότερο βάθος και είναι το αποτέλεσμα της βύθισης και του πλημμυρίσματος από το θαλασσινό νερό μιας παγετικής ακτής με χαμηλό ανάγλυφο. Λόγω του τρόπου σχηματισμού τους, οι ποταμόκολλοι αυτοί έχουν μικρή ικανότητα διατήρησης στον γεωλογικό χρόνο (Εικόνα 6.19).
- Τα *ρίας* (rias) είναι ποταμόκολλοι που αναπτύσσονται σε ελικοειδείς κοιλάδες με μέτριο ανάγλυφο.



- Οι παράκτιοι επίπεδοι ποταμόκολλοι (coastal plain estuaries) έχουν χαμηλό ανάγλυφο και σε κάτοψη έχουν σχήμα χωνιού και είναι ανοιχτοί προς το μέτωπο της θάλασσας (Εικόνα 6.19).
- Οι φραγματοειδείς ποταμόκολλοι (bar built estuaries) έχουν χαμηλό ανάγλυφο, σε κάτοψη σχήμα L και έχουν πορεία παράλληλα με την ακτή (Εικόνα 6.19).
- Οι τυφλοί ποταμόκολλοι (blind estuaries) ανήκουν στην προηγούμενη κατηγορία μόνο που εποχικά η εκβολή τους μπορεί να φράξει ολοκληρωτικά υπό την επίδραση των κυμάτων επί της ακτής (longshore drifting) ή με τη μετανάστευση των αμμοθινών (Εικόνα 6.19).
- Οι δελταϊκοί ποταμόκολλοι (deltaic estuaries) εμφανίζονται στα μέτωπα των δέλτα ως εφήμερα κανάλια διανομής (Εικόνα 6.19).



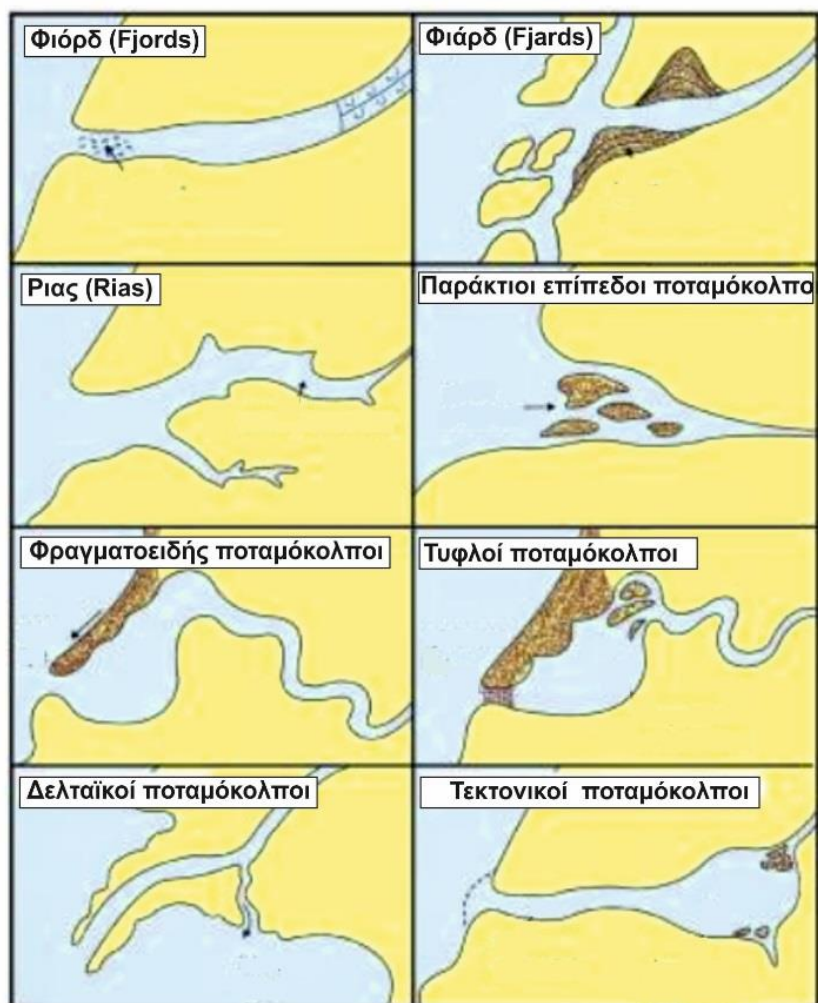
**Εικόνα 6.18** Χαρακτηριστικό φιόρντ στη Νορβηγία

(πηγή: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e3/Fjords\\_and\\_mountains.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e3/Fjords_and_mountains.jpg)).

Η ιζηματογένεση σε έναν ποταμόκολλο θα οδηγήσει τελικά στο γέμισμα της πλημμυρισμένης ποτάμιας κοιλάδας μέχρι το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας, εκτός εάν υπάρξει περαιτέρω άνοδος της στάθμης της θάλασσας και η περιοχή θα πάψει να έχει εκβολές ποταμών. Εάν υπάρχει υψηλός ρυθμός παροχής ποτάμιου ιζήματος, θα αρχίσει να εμφανίζεται εναπόθεση στις εκβολές του ποταμού και ένα δέλτα θα αρχίσει να σχηματίζεται (Εικόνα 6.18). Όταν κυριαρχούν οι θαλάσσιες διεργασίες, το στόμιο του ποταμού θα μετατραπεί σε παλιρροϊκό επίπεδο, εάν υπάρχουν ισχυρά παλιρροϊκά ρεύματα. Εναλλακτικά, εάν κυριαρχούν οι κυματικές διεργασίες, τα ιζήματα θα διασκορπιστούν και θα αναδιανεμηθούν, οδηγώντας στον σχηματισμό μιας πεδιάδας. Ως εκ τούτου, ένας ποταμόκολλος είναι ένα προσωρινό μορφολογικό χαρακτηριστικό, που υπάρχει μόνο κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά την επίκλυση της θάλασσας, ενώ τα ιζήματα γεμίζουν τον χώρο και το κενό που δημιουργείται από την άνοδο της. Ως εκ τούτου, η παρουσία αποθέσεων στους ποταμόκολλους μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για την αναγνώριση της επίκλυσης ή απόσυρσης της θάλασσας.

Η αναγνώριση παλαιών αποθέσεων ποταμόκολλων στον γεωλογικό χρόνο είναι περιορισμένη καθώς μαζί με τις λιμνοθάλασσες αποτελούν σχετικά εφήμερα γεωλογικά συστήματα καθώς τείνουν να εναποθέτουν τα ιζήματά τους σε σύντομες χρονικές περιόδους ή πιθανώς επειδή δεν έχουν αναγνωριστεί ευρέως και δεν διακρίνονται εύκολα από τις ποτάμιες και δελταϊκές αποθέσεις, τις λιμνοθάλασσες ή τις αβαθείς θαλάσσιες

αποθέσεις. Τα ιζήματα των ποταμόκολπων μπορεί να αποτελούνται εξ ολοκλήρου από άμμους, διασταυρούμενη στρώση, ελασματοποιημένη ή βιοαναμοχλευμένη ιλύ ή συνδυασμό άμμου και ιλύος.



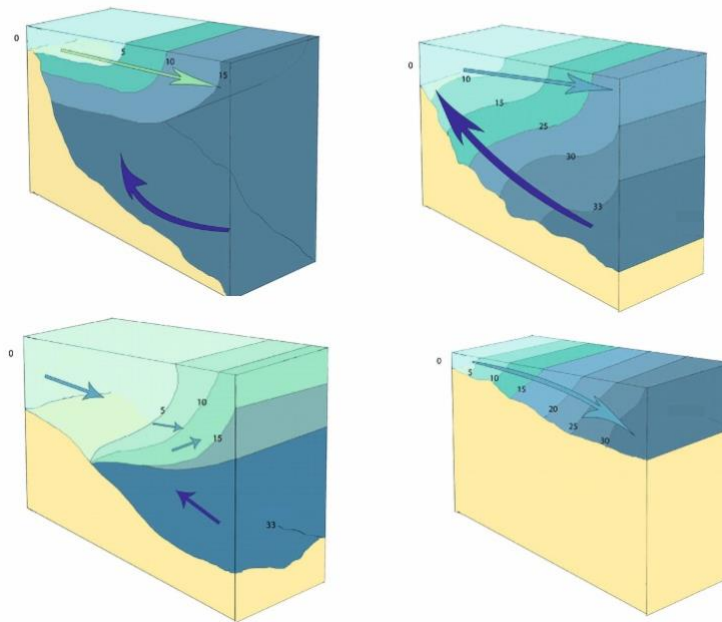
**Εικόνα 6.19** Οι κατηγορίες ποταμόκολπων με βάση τα φυσικογεωγραφικά τους χαρακτηριστικά (προσωπικό αρχείο συγγραφέων, τροποποιημένο από Flemming, 2011).

Όπως και στα δελταϊκά ριπίδια έτσι και στους ποταμόκολπους καθοριστικό ρόλο διαδραματίζουν οι παλίρροιες και η κυματική δράση από τη θάλασσα και η παροχή σε γλυκό νερό από πλευράς ποτάμιου συστήματος. Σύμφωνα με τον τρόπο ανάμειξης των δύο αυτών διαφορετικών υδάτινων μαζών (θαλασσινό και γλυκό νερό) διακρίνουμε τέσσερις κυρίως τύπους ποταμόκολπων με βάση τη φύση, την κατανομή και τον τρόπο ανάμειξης των μαζών αυτών (Εικόνα 6.20).

- Οι *στρωματωμένοι ποταμόκολπιοι* (density stratified) χαρακτηρίζονται από ελάχιστη ανάμειξη μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού και στην υδάτινη στήλη τους σχηματίζεται μια διακριτή στρωμάτωση με βάση τη διαφορά πυκνότητας. Συνήθως αυτές οι κατηγορίες ποταμόκολπων παρατηρούνται εκεί όπου η ποτάμια εκφόρτιση είναι κυρίαρχη και τα μεταφερόμενα ιζήματα του ποτάμιου συστήματος αποτίθενται στη σφήνα θαλασσινού και γλυκού νερού που σχηματίζεται στο μέτωπο της ανάμειξης των δύο διαφορετικής πυκνότητας υδάτινων μαζών.
- Οι *ποταμόκολπιοι μερικής στρωμάτωσης* (partially mixed) παρατηρούνται σε περιοχές όπου κυριαρχεί η παλίρροια η οποία καθορίζει την κυκλοφορία των υδάτων και τον μηχανισμό ανάμειξης των υδάτινων μαζών. Στις περιπτώσεις αυτές εξαιτίας της ταλάντωσης λόγω της παλίρροιας, ο όγκος του θαλασσινού νερού που μπορεί να εισέρχεται στον ποταμόκολπο μπορεί να είναι πενταπλάσιος ή και δεκαπλάσιος από τον όγκο του γλυκού νερού που εισέρχεται μέσω της ποτάμιας δράσης. Η ταλάντωση αυτή λόγω της παλίρροιας εξαλείφει την πιθανή δημιουργία στρωμάτωσης στην υδάτινη στήλη και για αυτό τον λόγο οι ποταμόκολπιοι αυτοί ονομάζονται μερικής στρωμάτωσης.

- Οι ποταμόκολλοι με *ομογενή υδάτινη στήλη*, όπου απουσιάζει η οποιαδήποτε στρωμάτωση (vertically homogeneous) υφίστανται σε περιοχές όπου οι παλίρροιες κυριαρχούν ακόμα περισσότερο σε σχέση με αυτούς με τη μερική στρωμάτωση και είναι αρκετά φαρδείς και ρηχοί στο στόμιο τους σε σχέση με αυτούς με τη μερική στρωμάτωση και είναι αρκετά φαρδείς και ρηχοί στο στόμιο τους σε σχέση με αυτούς με τη μερική στρωμάτωση. Το οριακό επίπεδο ανάμειξης των δύο μαζών πλέον γίνεται κάθετο, με τη μάζα του γλυκού νερού να κινείται από τη μια πλευρά του ποταμόκολλου και τη μάζα του θαλασσινού από την άλλη.
- Οι ποταμόκολλοι με *τμηματική ομογενοποίηση* της υδάτινης στήλης (sectionally homogeneous) όπου κυριαρχεί η θαλάσσια δράση έναντι του ποταμού, ώστε να μην δημιουργείται μια δυναμική ανάμειξη των μαζών και να απουσιάζει το οριακό επίπεδο ανάμειξης των υδάτινων μαζών. Στις περιπτώσεις αυτές οι ποταμόκολλοι διαχωρίζονται χωρικά στο ποτάμιο και θαλάσσιο τμήμα ενώ ως προς την κατακόρυφο αλλά και πλευρικά η αλατότητα παραμένει ίδια.

Τύποι ανάμειξης υδάτινης στήλης σε ποταμόκολλους



Εικόνα 6.20 Τύποι ανάμειξης της υδάτινης στήλης ανάλογα την ποτάμια και την παλιρροϊκή δράση.

## 6.8 Μεταβατικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης και κλιματική αλλαγή

Τα μεταβατικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης, καθώς αναπτύσσονται πλησίον της παράκτιας ζώνης, αποτελούν ευαίσθητα οικοσυστήματα ως προς τις κλιματικές μεταβολές και την αλλαγή του επιπέδου της στάθμης της θάλασσας αλλά και εξαιτίας της ανθρώπινης δραστηριότητας και της αλλαγής των χρήσεων γης (εντατικές καλλιέργειες, αστικοποίηση κ.λπ.). Όπως αναφέραμε, οι γεωμορφές και τα περιβάλλοντα ιζηματογένεσης στις μεταβατικές αυτές περιοχές διαμορφώνονται και ελέγχονται από έναν συνδυασμό μεταξύ των ποτάμιων διεργασιών, της κυματικής δράσης και της παλίρροιας.

Καθοριστικές για την ανάπτυξη και τη διατήρησή τους είναι οι μεταβολές της στάθμης της θάλασσας που θα λάβουν μελλοντικά χώρα λόγω της κλιματικής αλλαγής και ειδικότερα λόγω της ανύψωσής της -κάτι που επανειλημμένα έχει απασχολήσει τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel for Climatic Change – IPCC) ως προς την ευαισθησία και την προσαρμοστικότητα των οικοσυστημάτων αυτών. Πέρα από τις μεταβολές που υφίστανται τα συστήματα αυτά εξαιτίας των φυσικών διεργασιών, τα πρότυπα της ανθρώπινης δραστηριότητας και ανάπτυξης στις περιοχές αυτές διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην υποβάθμισή τους και στην έκθεσή τους σε ένα καθεστώς διάβρωσης. Τέτοια παραδείγματα συναντάμε σε ποτάμια συστήματα όπου κατασκευάζονται μεγάλα φράγματα τα οποία στερούν και δεν τροφοδοτούν με ιζήματα την παράκτια ζώνη, σε μεγάλους ποταμόκολλους και δέλτα όπου έχουν κατασκευαστεί μεγάλα λιμενικά έργα και σε περιοχές όπου έχουν κατασκευαστεί έργα για την προστασία από τις παλίρροιες και τις πλημμύρες. Αυτά είναι μερικά παραδείγματα όπου επηρεάζουν τα μοτίβα και τις φυσικές διεργασίες ιζηματογένεσης στα μεταβατικά περιβάλλοντα εξαιτίας μεγάλων τεχνικών έργων.

Ένα μεγάλης κλίμακας παγκόσμιο παράδειγμα επίδρασης της κλιματικής αλλαγής και της ανθρώπινης δραστηριότητας σε αυτά τα περιβάλλοντα ιζηματογένεσης είναι η υποχωρούσα δελταϊκή πεδιάδα του ποταμού Μισισσιπή της Νοτιοανατολικής Λουιζιάνας. Στην περίπτωση αυτή, η μείωση της στερεοπαροχής και της τροφοδοσίας με ιζήματα είχε ως αποτέλεσμα την υποχώρηση της δελταϊκής πεδιάδας του Μισισσιπή και την αύξηση της αλατότητας και της στάθμης των υδάτων στα παράκτια έλη του δέλτα. Το φαινόμενο αυτό άρχισε να καταγράφεται από τη δεκαετία του 1970 (1978 έως 2000) με περίπου 1565 km<sup>2</sup> παλιρροιακών παράκτιων ελών και των παρακείμενων εδαφών τους να μετατρέπονται σε νερά ανοιχτής θάλασσας. Σύμφωνα με τη διακυβερνητική επιτροπή μέχρι το 2050 προβλέπονται περίπου 1.300 km πρόσθετης απώλειας παράκτιας γης, εάν συνεχιστούν οι τρέχουσες παγκόσμιες, περιφερειακές και τοπικές διεργασίες, η προβλεπόμενη επιτάχυνση της στάθμης της θάλασσας και η αύξηση της έντασης των τροπικών καταιγίδων, οι οποίες θα επιδεινώσουν αυτές τις απώλειες. Σε πολλές περιπτώσεις, η απώλεια παράκτιας γης δεν θα είναι βαθμιαία αλλά επεισοδιακή υπό την επίδραση ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως ακριβώς συνέβη με τον τυφώνα Κατρίνα το 2005 στη Νέα Ορλεάνη.

Όλα τα μεταβατικά παράκτια οικοσυστήματα, όπως τα δέλτα και οι ποταμόκολλοι, έχουν από καιρό αναγνωριστεί ως εξαιρετικά ευαίσθητα στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας και ας λάβουμε υπόψη ότι στις περιοχές αυτές έχουμε τη μεγαλύτερη συγκέντρωση του παγκόσμιου πληθυσμού όπως σε δελταϊκές πεδιάδες στην Μπανγκόκ, στη Νέα Ορλεάνη, και στη Σαγκάη. Το μεγαλύτερο μέρος της χερσαίας έκτασης του Μπαγκλαντές αποτελείται από δελταϊκές πεδιάδες των ποταμών Γάγγη και Μέγκνα.

Ενώ οι σημερινοί ρυθμοί ανόδου της στάθμης της θάλασσας συμβάλλουν στη σταδιακή μείωση πολλών από τα δέλτα παγκοσμίως, οι πιο πρόσφατες απώλειες των δελταϊκών αποθέσεων και υγροτόπων αποδίδονται στην ανθρώπινη δραστηριότητα και ανάπτυξη. Μια ανάλυση δορυφορικών εικόνων δεκαετησίων από τα μεγαλύτερα δέλτα του κόσμου (Δούναβης, Γάγγης-Βραχμαπούτρα, Ινδός, Μαχανάντι Μαγκόκι, McKenzie, Μισισσιπή, Νείλος, Shatt el Arab, Βολγας, Κίτρινος, Yukon και Zambezi) έδειξε συνολική απώλεια 15.845 km<sup>2</sup> των δελταϊκών υγροτόπων τα τελευταία 14 χρόνια. Κάθε δέλτα παρουσίασε απώλεια γης, αλλά με ποικίλους ρυθμούς και η ανθρώπινη δραστηριότητα αποτέλεσε την αιτία για την απώλεια για πάνω από το ήμισυ των εκτάσεων. Στην Ασία, όπου στο παρελθόν οι ανθρώπινες δραστηριότητες οδήγησαν σε αυξημένα ιζηματογενή φορτία μεγάλων ποταμών, σήμερα η κατασκευή φραγμάτων στα ανάντη αυτών στερεί από την παράκτια ζώνη την παροχή ιζημάτων, με αποτέλεσμα σε πολλά δέλτα να επικρατεί αυξημένη διάβρωση των ακτών. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο Κίτρινος ποταμός στην Κίνα, όπου μεγάλα φράγματα που κατασκευάστηκαν έχουν μειώσει την ετήσια στερεοπαροχή του ποταμού προς το δέλτα του από 1,1 δισεκατομμύρια τόνους που ήταν πριν σε 0,4 δισεκατομμύρια τόνους. Η ανθρώπινη επιρροή είναι πιθανό να συνεχίσει να αυξάνεται σε ολόκληρη την Ασία και παγκοσμίως.

Ειδικότερα, τα δέλτα αποτελούν μερικές από τις σημαντικότερες κλασικές αποθέσεις ιζημάτων παγκοσμίως και αναγνωρίζονται ευρέως ως εξαιρετικά ευάλωτα στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, ιδιαίτερα εξαιτίας της ανόδου της στάθμης της θάλασσας. Τα περισσότερα δέλτα υφίστανται ήδη φυσική βύθιση ως αποτέλεσμα του επιταχυνόμενου ρυθμού σχετικής ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας πάνω από τον παγκόσμιο μέσο όρο.

Έχει υπολογιστεί ότι σχεδόν 300 εκατομμύρια άνθρωποι κατοικούν σε 40 δέλτα παγκοσμίως, με τη μέση πυκνότητα του πληθυσμού να ανέρχεται σε 500 άτομα/km<sup>2</sup> με τον μεγαλύτερο πληθυσμό στο δέλτα του Γάγγη-Βραχμαπούτρα και την υψηλότερη πυκνότητα στο δέλτα του Νείλου. Μεγάλο μέρος του πληθυσμού αυτών των 40 δέλτα βρίσκεται σε κίνδυνο λόγω της διάβρωσης των ακτών και της απώλειας γης, κυρίως ως αποτέλεσμα της μειωμένης παροχής ιζημάτων από τους ποταμούς, αλλά και λόγω των αυξημένων ρυθμών ανόδου της στάθμης της θάλασσας. Ερευνητές εκτιμούν, χρησιμοποιώντας ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους και δεδομένα παγκόσμιας κατανομής πληθυσμού, ότι περισσότεροι από 1 εκατομμύριο άνθρωποι θα επηρεαστούν άμεσα έως το 2050 σε τρία μεγάλα δέλτα: στο δέλτα του Γάγγη-Βραχμαπούτρα στο Μπαγκλαντές, στο δέλτα του Μεκόνγκ στο Βιετνάμ και στο δέλτα του Νείλου στην Αίγυπτο. Περισσότερα από 50.000 άτομα είναι πιθανό να επηρεαστούν άμεσα σε καθένα από τα επιπλέον 9 δέλτα και περισσότερα από 5.000 σε καθένα από τα άλλα 12 δέλτα. Αυτή η γενικευμένη προσέγγιση μοντελοποίησης δείχνει ότι το 75% του πληθυσμού που επηρεάζεται ζει σε ασιατικά δέλτα και ένα μεγάλο ποσοστό των υπολοίπων βρίσκεται σε δέλτα στην Αφρική. Αυτές οι επιπτώσεις θα επιδεινωθούν από την επιταχυνόμενη άνοδο της στάθμης της θάλασσας και τις αυξημένες ανθρώπινες πιέσεις. Εντός των ασιατικών μεγαδελταϊκών αποθέσεων, η τοπογραφία της επιφάνειας είναι πολύπλοκη ως αποτέλεσμα της γεωμορφολογικής ανάπτυξης των δέλτα και η κατανομή του πληθυσμού δείχνει σημαντική χωρική μεταβλητότητα, που αντικατοπτρίζει την εντατική χρήση γης και την ανάπτυξη μερικών από τις μεγαλύτερες μεγαλουπόλεις του κόσμου. Πολλοί άνθρωποι σε αυτά και σε άλλα δέλτα

παγκοσμίως υπόκεινται ήδη σε πλημμύρες τόσο από καταγίδες όσο και από εποχικές πλημμύρες ποταμών, και επομένως είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν περαιτέρω μέθοδοι για την αξιολόγηση της ατομικής ευπάθειας.

Αν λάβουμε υπόψη τα δεδομένα από την υπηρεσία NOAA –National Oceanic and Atmospheric Administration αναφορικά με τον πληθυσμό και την οικονομική δραστηριότητα στην παγκόσμια παράκτια ζώνη, βλέπουμε (α) ότι 600 εκατομμύρια άνθρωποι, περίπου το 10% του παγκόσμιου πληθυσμού, ζει σε παράκτιες περιοχές, (β) το 40% των θέσεων εργασίας παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένου του τουρισμού και των μεταφορών, σχετίζονται με την παράκτια ζώνη και (γ) παράγονται \$8,6 τρισεκατομμύρια ως ακαθάριστο προϊόν. Όλα αυτά τα στοιχεία καταδεικνύουν τη σπουδαιότητα της προστασίας και της διατήρησης της καλής περιβαλλοντικής κατάστασης αλλά και τον μετριασμό της τρωτότητας των μεταβατικών αυτών οικοσυστημάτων.



## Βιβλιογραφία/Αναφορές

### Ξενόγλωσση

- Colella, A., & Prior, D.B. (1990). *Coarse-Grained Deltas*. Special Publication 10, International Association of Sedimentologists. Blackwell Science, Oxford, 357 pp.
- Davies, J.L. (1972). *Geographical Variation in Coastline Development*. Oliver and Boyd, Edinburgh p.204. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(89\)90099-6](https://doi.org/10.1016/0025-3227(89)90099-6)
- Dionne, J.C. (1988). *Characteristic features of modern tidal flats in cold regions*. In P.L. de Boer et al. (Eds.), *Tide-influenced sedimentary environments and facies*, Reidel, Dordrecht, pp.301-332. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(88\)90002-5](https://doi.org/10.1016/0169-555X(88)90002-5)
- Flemming B.W. (2011). Geology, Morphology, and Sedimentology of Estuaries and Coasts. In: E. Wolanski & D.S. McLusky (Eds.) *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, Vol 3, pp. 7–38. Waltham: Academic Press.
- Galloway, W.E. (1975). *Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems*. In M.L. Brousard (Ed.), *Deltas, Models for Exploration*: Houston Geological Society, Houston, Texas, pp. 87–98.
- King, C.A.M. (1972). *Beaches and Coasts* (2nd ed.). Arnold, London, p.507. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(72\)90059-X](https://doi.org/10.1016/0025-3227(72)90059-X)
- Kjerfve, B., & Magill, K.E. (1989). Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. *Marine Geology* 88(3–4),187-199.
- Miall, A. D. (1979). Deltas. In R. G. Walker (Ed.) *Facies Models*. Geological Association of Canada, Hamilton, Ontario.
- Poulimenos, G., Zelilidis, A., Kontopoulos, N., & Doutsos, T. (1993). Geometry of trapezoidal fan deltas and their relationship to extensional faulting along the south-western active margins of the Corinth rift, Greece. *Basin Res.*, 5, 179–192.
- Taramelli, A., Valentini, E., Piedadlobo L., Righini M., & Cappucci, S. (2021). Assessment of State Transition Dynamics of Coastal Wetlands in Northern Venice Lagoon, Italy. *Sustainability* 13(8), 4102. <https://www.researchgate.net/journal/Sustainability-2071-1050>
- Zenkovich, V. P. (1967). *Processes of Coastal Development*. Edinburgh: Oliver and Boyd.

## Κεφάλαιο 7

### Θαλάσσια περιβάλλοντα ιζηματογένεσης

#### Σύνοψη

Το θαλάσσιο περιβάλλον είναι ένα πολύ ιδιαίτερο περιβάλλον, καθώς αλληλοεπιδρά με την ξηρά, τη θάλασσα και την ατμόσφαιρα. Καθένα από αυτά συμβάλλει στη λειτουργία του θαλάσσιου περιβάλλοντος, καθιστώντας τη μελέτη του πολύ ενδιαφέρουσα αλλά και δύσκολη. Η μελέτη του θαλάσσιου περιβάλλοντος είναι ιδιαίτερα διεπιστημονική, ενσωματώνοντας τη γεωλογία, τη φυσική και ανθρώπινη γεωγραφία, την ωκεανογραφία, την κλιματολογία, τη μηχανική κ.ο.κ. Η ποικιλομορφία των θαλάσσιων περιβαλλόντων αποτελεί σημαντικό ελκυστικό παράγοντα για τη μελέτη τους. Τα κύρια θέματα αυτού του κεφαλαίου είναι η γεωλογία των θαλάσσιων ιζηματογενών περιβαλλόντων (ρηχών και βαθιών) και οι γεωλογικές διεργασίες που τα διαμορφώνουν.

#### Προαπαιτούμενη γνώση

Βασικές γνώσεις ιζηματολογίας (ιζηματογενείς διεργασίες, ιζηματογενείς φάσεις, μηχανική ιζηματολογία), ωκεανογραφία, γεωμορφολογία.

### 7.1 Εισαγωγή

Οι ωκεανοί καλύπτουν το 71% της επιφάνειας της Γης και φιλοξενούν το 97,5% του επιφανειακού νερού της. Πρόκειται για τον μεγαλύτερο βιότοπο για την ανάπτυξη της ζωής (περίπου το 97% της βιόσφαιρας) αφού το σύνολο των σημαντικότερων ομάδων των προκαρυωτών (π.χ. βακτήρια, κυανοβακτήρια) και των ευκαρυωτών (πρωτόζωα, μύκητες, φυτά και ζώα) διαθέτουν θαλάσσιους εκπροσώπους. Σε πλανητική κλίμακα, οι ωκεανοί αποτελούν μόλις το 0,13% του όγκου της Γης (0,02% της μάζας της). Η ηλικία των ωκεανών είναι περίπου 4.000 εκατομμύρια έτη (million years, my), αλλά οι ωκεανοί και η ατμόσφαιρα βρίσκονται σε σταθερή κατάσταση για περίπου 800 my.

Η μέση θερμοκρασία του ωκεανού είναι 3,9°C και η μέση αλατότητα είναι 34,48%. Το μέσο βάθος του ωκεανού είναι 3.796 m με το μεγαλύτερο βάθος του να είναι το Challenger Deep (11.022 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας) που βρίσκεται στην τάφρο των Μαριανών, στον Δυτικό Ειρηνικό. Εκτιμάται ότι 440.000 χλμ. ακτογραμμών οριοθετούν τους παγκόσμιους ωκεανούς. Η λεκάνη του Ειρηνικού Ωκεανού είναι το μεγαλύτερο και πιο εμφανές στοιχείο, ορατό από το διάστημα. Στα 4.207 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, το Mauna Kea αποτελεί την υψηλότερη κορυφή, που βρίσκεται στην ηφαιστειακή νησιωτική αλυσίδα της Χαβάης - με τη βάση του να βρίσκεται περίπου 6.000 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και με συνολικό υψόμετρο πάνω από 10.000 μέτρα, καθιστώντας το το υψηλότερο βουνό της Γης (από τη βάση του, το Έβερεστ υψώνεται 8.848 μ. πάνω από τη στάθμη της θάλασσας). Η παγκόσμια μεσοωκεάνια ράχη, που σχηματίζεται από την εξάπλωση του πυθμένα της θάλασσας, έχει μήκος πάνω από 60.000 χλμ. Καταλαμβάνει περίπου το ένα τρίτο της επιφάνειας του ωκεάνιου πυθμένα και αντιπροσωπεύει το 22% της στερεάς επιφάνειας του πλανήτη. Το μέσο υψόμετρο της μεσοατλαντικής κορυφογραμμής είναι 2.351 μέτρα.

Οι ωκεανοί αποτελούνται από ιζηματογενή και βασαλτικά πετρώματα. Με βάση την κοκκομετρία, τα ιζήματα κυμαίνονται από λεπτόκοκκα (άργιλος, ιλύς), έως χονδρόκοκκα (άμμος και χαλίκια), με προέλευση λιθογενή (λόγω της διάβρωσης των πετρωμάτων) ή βιογενή (λιθοποίηση υπολειμμάτων οργανισμών που πεθαίνουν), ή αυτόχθονη (καθίζηση λόγω χημικών ή βιοχημικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στο νερό), ή ηφαιστειογενή ή κοσμογενή.

Οι βασικοί παράγοντες που επιδρούν στη διαμόρφωση και ιζηματογένεση στα θαλάσσια περιβάλλοντα είναι η εγγύτητα στη χέρσο και η προσφορά χερσογενούς ιζήματος, το βάθος και ο περιεχόμενος βιόκοσμος.

Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ ενός περιβάλλοντος και της ακτής, τόσο λιγότερα κλαστικά ιζήματα δέχεται και η εν λόγω περιοχή εμφανίζει υψηλότερη συγκέντρωση χημικών και βιογενών ιζηματογενών πετρωμάτων που σχηματίζονται μέσα στην ίδια τη θαλάσσια λεκάνη. Επιπλέον, υπό τις κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες, ορισμένοι οργανισμοί μπορούν να παράγουν τεράστιες ποσότητες σκελετικού υλικού.

Παρόλο που η ιζηματογένεση που λαμβάνει χώρα στον θαλάσσιο χώρο, χαρακτηρίζεται από ποικιλομορφία, υπάρχουν φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που είναι κοινές σε πολλά από τα θαλάσσια περιβάλλοντα.

Οι φυσικές διεργασίες επιδρούν στη μεταφορά και απόθεση των ιζημάτων στις θάλασσες και περιλαμβάνουν τη δημιουργία ρευμάτων εξαιτίας της δράσης των ανέμων, την πυκνότητα του νερού, τις παραλλαγές της αλμυρότητας και παλιρροιακές δυνάμεις.

Οι χημικές αντιδράσεις στο θαλασσίνο νερό έχουν ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό νέων ορυκτών, καθώς και την τροποποίηση των κλαστικών ιζημάτων.

Οι θάλασσες συνδέονται επίσης με τη ζωή (βιολογικές διεργασίες). Οι οργανισμοί εξελίχθηκαν στο θαλάσσιο βασίλειο πολύ πριν από την ύπαρξη ζωής στη στεριά και συνεχίζουν να καταλαμβάνουν μια ποικιλία ενδιαιτημάτων στη στήλη του νερού και στον πυθμένα της θάλασσας.

## 7.2 Θαλάσσια ιζήματα – Ταξινόμηση

Η ταξινόμηση των θαλασσίων ιζημάτων βασίζεται στο μέγεθος του κόκκου ή την προέλευση.

Η ταξινόμηση με βάση την προέλευση διακρίνει 5 κύρια είδη ιζημάτων:

- λιθογενή/χερσογενή (αποτελούνται από θραύσματα προϋπαρχόντων πετρωμάτων),
- βιογενή (αποτελούνται από σκληρά υπολείμματα μικροσκοπικών θαλασσίων οργανισμών),
- υδρογενή/αυτόχθονα ή αυτογενή (σχηματίζονται όταν λόγω εξάτμισης απομακρυνθεί ένα σημαντικό μέρος νερού, προκαλώντας αύξηση της συγκέντρωσης των διαλυμένων αλάτων, προκαλώντας έτσι την καθίζηση μερικών από αυτά (εβαπορίτες)),
- κοσμογενή (μικρά εξωγήινα σωματίδια (τεκτίτες) τα οποία πέφτουν στους ωκεανούς και ενσωματώνονται με άλλα ιζήματα).

*Λιθογενή* καλούνται τα θαλάσσια ιζήματα που προέρχονται από την ξηρά (για τον λόγο αυτό λέγονται και χερσογενή). Η διαδικασία του σχηματισμού τους περιλαμβάνει αποσάθρωση (όπου εμπλέκονται φυσικές και χημικές διεργασίες) ή διάβρωση πετρωμάτων της ξηράς που έχουν ως τελικό αποτέλεσμα την κατάτμηση του πετρώματος. Όσο πιο μικρά είναι τα κομμάτια αυτά, τόσο πιο εύκολα μεταφέρονται μέσω των ποταμών, του ανέμου, των παγετώνων ή της βαρύτητας (π.χ. κατολισθήσεις) από την ξηρά στη θάλασσα.

*Βιογενή* λέγονται τα ιζήματα που προέρχονται από υπολείμματα σκληρού ιστού νεκρών οργανισμών, όπως κελύφη, οστά, δόντια κ.λπ. ή από τη βιολογική δραστηριότητα οργανισμών. Τα βιογενή ιζήματα αποτελούνται, κυρίως, από κελύφη και σκελετούς ζωοπλαγκτού και φυτοπλαγκτού που ζουν στην ευφωτική ζώνη, αλλά περιλαμβάνουν και οργανική ύλη. Όταν οι ζωοπλαγκτονικοί και φυτοπλαγκτονικοί οργανισμοί πεθαίνουν, αρχίζουν να βυθίζονται με μικρή ταχύτητα λόγω του μικρού μεγέθους τους. Επειδή, όμως, η διάρκεια ζωής τους είναι μικρή (μέχρι μερικές εβδομάδες) και το πλήθος τους μεγάλο, υπάρχει διαρκής ροή των υπολειμμάτων τους προς τον βυθό, η οποία προσομοιάζει με μια διαρκή βροχή ή «βιολογική χιονόπτωση». Το λεπτόκοκκο αυτό υλικό συσσωρεύεται, τελικά, στον βυθό και συν τω χρόνω, σχηματίζει χαλαρό ίζημα το οποίο περιέχει τουλάχιστον 30% κατά βάρος βιογενές υλικό (το υπόλοιπο 70% είναι λιθογενές ίζημα κυρίως ερυθρός πηλός, που καθιζάνει συγχρόνως με το μικροσκοπικό βιογενές υλικό).

Τα βιογενή ιζήματα απαντώνται συχνά στις πελαγικές αποθέσεις και σπάνια στις νηριτικές. Στη νηριτική περιοχή οι τεράστιες αποθέσεις λιθογενούς υλικού μειώνουν τόσο πολύ την % συμμετοχή του αντιστοίχου βιογενούς, ώστε να το καθιστούν αμελητέο. Ωστόσο έχουν εντοπιστεί νηριτικές περιοχές, όπου οι ανθρακικές βιογενείς αποθέσεις επικρατούν σε ποσοστό συμμετοχής.

Η εξάπλωση του βιογενούς υλικού εξαρτάται από: 1) την παραγωγικότητα, 2) την αποδόμηση και 3) την αραίωση.

*Παραγωγικότητα* είναι ο αριθμός οργανισμών που βρίσκονται στην υδατική στήλη από την επιφάνεια μέχρι τον πυθμένα του ωκεανού. Όταν στα επιφανειακά νερά ζει μεγάλο πλήθος μικροοργανισμών, οι συνθήκες είναι ευνοϊκές για μεγάλη παραγωγή βιογενούς ιζήματος.

*Αποδόμηση* είναι η διαδικασία διάλυσης σκελετικών υπολειμμάτων καθώς αυτά βυθίζονται προς τον πυθμένα. Ένα μέρος των βιογενών υπολειμμάτων διαλύεται πλήρως πριν προλάβει να φτάσει στον πυθμένα της θάλασσας.

*Αραίωση* είναι η διαδικασία κατά την οποία άλλα ιζήματα συν-αποτίθενται στον πυθμένα, μειώνοντας την ποσότητα των βιογενών ιζημάτων στον πυθμένα.

Οι κυριότερες ανόργανες χημικές ενώσεις που απαντώνται στα βιογενή ιζήματα, είναι το ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ) και το διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$  – χαλαζίας). Το  $\text{SiO}_2$  των βιογενών ιζημάτων προέρχεται

από δύο είδη μικροοργανισμών: από τα διάτομα (φυτοπλαγκτονικοί οργανισμοί) και από τα ακτινόζωα (ζωοπλαγκτονικοί οργανισμοί).

Από την άλλη, τα τρηματοφόρα, τα πτερόποδα και τα κοκκολιθοφόρα (φυτοπλαγκτονικοί οργανισμοί) συνεισφέρουν σημαντικά στην ανθρακική ιζηματογένεση των ωκεανών. Ειδικά για τα κοκκολιθοφόρα, όταν αυτοί οι οργανισμοί πεθαίνουν, καθιζάνουν στον πυθμένα των ωκεανών και δημιουργούν χαλαρό ίζημα από τα υπολείμματά τους. Καθώς το ίζημα αυτό συνεκτικοποιείται, δημιουργεί σταδιακά τη γη κοκκολιθοφόρων, κοιτάσματα κιμωλίας και τελικά ασβεστολιθικά πετρώματα.

Το λιθογενές και το βιογενές υλικό, το οποίο αποτίθεται σε βάθη μεγαλύτερα των 200m, δηλαδή πέραν του ηπειρωτικού χείλους, σχηματίζει τα ιζήματα των βαθιών θαλασσών ή όπως συνήθως καλούνται τα *πελαγικά ιζήματα* τα οποία παρουσιάζουν μια υδαρώδη και ιλυώδη υφή.

Η καθίζηση στη στήλη του νερού, η δράση των ρευμάτων και η βαρυτική κίνηση των μαζών (κατολίσθηση) αποτελούν τους κύριους μηχανισμούς μεταφοράς του λιθογενούς και βιογενούς υλικού, στις βαθιές θάλασσες. Οι δύο πρώτες διεργασίες μεταφέρουν λιθογενές και βιογενές υλικό υπό μορφή μεμονωμένων κόκκων, ενώ οι κατολισθήσεις μεταφέρουν τα ιζήματα ως ενιαίες μεγάλες μάζες σε βαθιές θαλάσσιες λεκάνες. Οι κατολισθήσεις είναι η μόνη διαδικασία που ευθύνεται για την παρουσία χονδρόκοκκων ιζημάτων στον πυθμένα της βαθιάς θάλασσας, όπου τα λεπτόκοκκα ιζήματα επικρατούν συντριπτικά, όπως προαναφέρθηκε.

Τα *πελαγικά ιζήματα* είναι οι αποθέσεις του ανοικτού ωκεανού που συσσωρεύονται στον πυθμένα του ωκεανού, προστατευμένες από τις χερσαίες επιδράσεις. Δεν είναι απαραίτητα βαθών υδάτων, αλλά συνήθως βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από τις ηπείρους. Χαρακτηρίζονται από την έλλειψη αποσθρωμένων ιζηματογενών συστατικών, γενικά χαμηλό ρυθμό ιζηματογένεσης και από κοινού χαμηλές έως μέτριες συγκεντρώσεις οργανικής ύλης.

Τα *πελαγικά ιζήματα*, ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε λιθογενές ή βιογενές υλικό και συγκεκριμένα ποιο από τα δύο υπερβαίνει το 30% σε συμμετοχή, διακρίνονται σε *ερυθρές αργίλους* και *βιογενείς λάσπες ή ιλύες*, οι οποίες σύμφωνα με τη χημική σύστασή τους διακρίνονται σε *ανθρακικές* και *πυριτικές λάσπες*.

Η *βιογενής ιλύς* αποτελείται από ασβεστολιθικούς ή πυριτικούς σκελετούς μικροσκοπικών οργανισμών οι οποίοι ζουν κοντά στην επιφάνεια του ωκεανού. Μερική από τη λάσπη προσλαμβάνεται από ισχυρά ρεύματα, κοντά στην ακτή σε εκβολές ποταμών, συγκρατείται εν αιωρήσει και καταπίπτει μακριά προς τη θάλασσα.

Οι *ερυθρές αργίλοι* σχηματίζονται από υλικά χερσογενούς ή/και ηφαιστειογενούς προέλευσης, τα οποία μεταφέρονται στη θάλασσα μέσω των ποταμών, των παγετώνων ή με τους ανέμους. Το κύριο μέσο μεταφοράς των υλικών αυτών είναι ο άνεμος. Ο σχηματισμός των ερυθρών αργίλων σε ορισμένες ωκεάνιες λεκάνες δεν οφείλεται αποκλειστικά στη μεγάλη ποσότητα λιθογενούς προέλευσης υλικών, αλλά και στην αμελητέα προσφορά βιογενούς προέλευσης υλικού, είτε λόγω της χαμηλής πρωτογενούς παραγωγικότητας στην επιφάνεια της θάλασσας είτε λόγω της αυξημένης διαλυτότητας των σκελετικών τμημάτων των οργανισμών που λαμβάνει χώρα κατά την καθίζησή τους.

Οι ερυθρές αργίλοι συνίστανται από λεπτόκοκκο χαλαζία και ενυδατωμένα αλουμινοπυριτικά (αργιλικά) ορυκτά, όπως είναι ο χλωρίτης, ο καολινίτης, ο ιλλίτης και ο μοντμοριλονίτης.

Οι ερυθρές αργίλοι οφείλουν το χαρακτηριστικό καφέρυθρο χρώμα τους στην οξειδωση του σιδήρου που βρίσκεται στα αργιλικά ορυκτά, με αποτέλεσμα να δημιουργείται γύρω από τα σωματίδια ένα λεπτό περίβλημα από άμορφα οξείδια του σιδήρου. Η οξειδωση του σιδήρου αναπτύσσεται εξαιτίας της μακρόχρονης παραμονής των αλουμινοπυριτικών ορυκτών στην επιφάνεια του πυθμένα, όπου εκτίθενται στο καλά οξυγονωμένο θαλασσίνο νερό.

### **7.3 Μορφολογία - γεωμορφολογία του θαλάσσιου πυθμένα**

Μέχρι τον εικοστό αιώνα, επικρατούσε η άποψη ότι η μορφολογία του ωκεάνιου πυθμένα ήταν πολύ ομαλή. Μετά το 1920, όμως, η επεξεργασία επιστημονικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης, σε συνδυασμό με τη συστηματική χαρτογράφηση του θαλάσσιου πυθμένα με ηχοβολιστικά συστήματα, ανέτρεψε τις προηγούμενες αντιλήψεις. Είναι πλέον ευρέως αποδεκτό ότι η μορφολογία του ωκεάνιου πυθμένα επηρεάζεται τόσο από ενδογενείς διεργασίες όσο και από ιζηματογενή-βιογενή αίτια, και κάθε άλλο παρά ομαλή είναι.

Αρχικά, η μορφή του πυθμένα επηρεάζεται από τις επικρατούσες τεκτονικές διεργασίες, με την πυριγενή δραστηριότητα να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο. Η βαθυμετρία, το σχήμα και το βάθος του πυθμένα της θάλασσας, καθορίζονται βασικά από τις διεργασίες της τεκτονικής των πλακών που δημιουργούν ωκεάνιες λεκάνες εξαιτίας της εξάπλωσης του θαλασσίου πυθμένα.

Οι κύριες μορφολογικές μονάδες οι οποίες απαντώνται στον θαλάσσιο πυθμένα από το σημείο όπου η θάλασσα συναντά την ξηρά έως το βαθύτερο σημείο της είναι οι εξής (Εικόνα 7.1) (Steward, 2008):

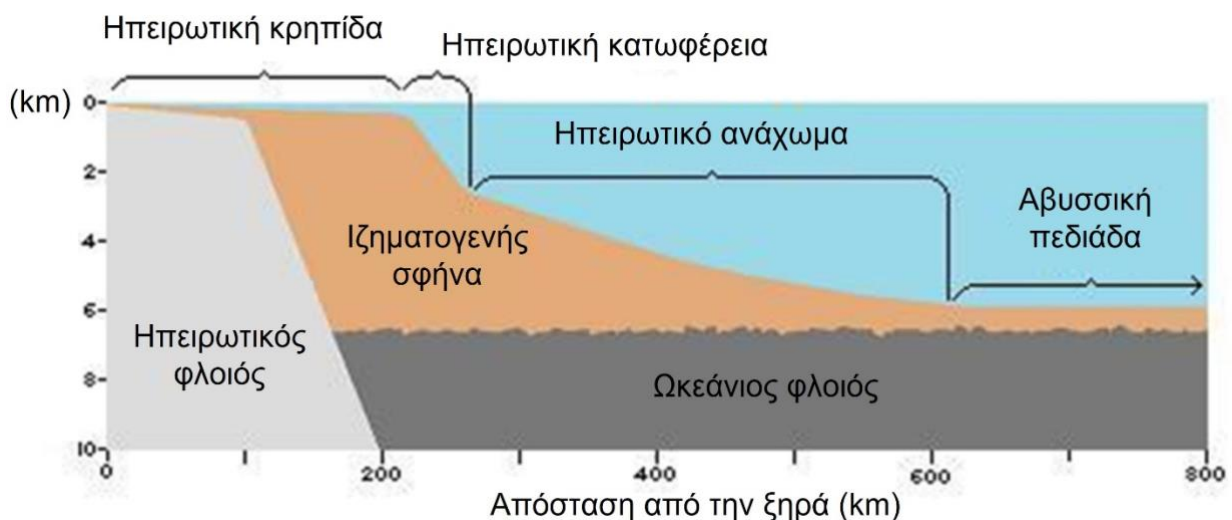
Ως *ακτή* ορίζεται η περιοχή όπου η ξηρά συναντά τον ωκεανό ή η γραμμή που αποτελεί το όριο μεταξύ της ξηράς και της ακτογραμμής.

Η *ηπειρωτική κρηπίδα* είναι η ζώνη περιμετρικά των ηπείρων, που εκτείνεται από τη ζώνη χαμηλής στάθμης του νερού έως το βάθος στο οποίο παρατηρείται αισθητή και απότομη αύξηση της κλίσης του θαλάσσιου πυθμένα. Πρόκειται για μια αβαθή ζώνη, με μικρή κλίση και μεγάλο πλάτος η οποία ξεκινά από την ακτή και εκτείνεται έως το άκρο της κρηπίδας, γνωστό ως *ηπειρωτικό χείλος*, βάθους 200 m.

Την κρηπίδα διαδέχεται η *ηπειρωτική κατωφέρεια*, η οποία επικάθεται σε ηπειρωτικό φλοιό και αποτελεί ζώνη με μεγάλη κλίση του πυθμένα (40-50%), η οποία ξεκινά από τα 200 m βάθος και κατέρχεται στα 3.000 ή 4.000 m στα παθητικά περιθώρια και 5.000 έως 10.000 m στα ενεργά περιθώρια. Η κατωφέρεια είναι «ο βυθιζόμενος θαλάσσιος πυθμένας από την άκρη της κρηπίδας έως το ανώτερο όριο του *ηπειρωτικού αναχώματος* (προς το περιθώριο της αβυσσικής πεδιάδας) το οποίο αποτελείται κυρίως από ιζήματα μεγάλου πάχους, τα οποία προέρχονται από την ηπειρωτική κατωφέρεια ή το σημείο όπου παρατηρείται γενική μείωση της απότομης κλίσης» (IHO, 2008).

Η ηπειρωτική κατωφέρεια διατέμνεται, συνήθως, από υποθαλάσσια φαράγγια. Τα ιζήματα της ηπειρωτικής κατωφέρειας μετακινούνται γενικά εύκολα λόγω της απότομης κλίσης του πυθμένα και της δράσης της βαρύτητας. Αυτή η μετακίνηση των ιζημάτων μπορεί να λάβει τη μορφή *υποθαλάσσιων κατολισθήσεων* (μετακίνηση κατά μήκος μιας επιφάνειας ρηγμάτωσης χωρίς μεγάλη μεταβολή της εσωτερικής δομής των στρωμάτων), *καταπτώσεων* (κύλιση ιζημάτων κατά την οποία καταστρέφεται η εσωτερική δομή των στρωμάτων αλλά διατηρείται η εσωτερική υφή), *λασπορροών* (μεταφορά ιζημάτων με τη μορφή παχύρρευστου πολτού με σχεδόν πλήρη καταστροφή της εσωτερικής δομής των στρωμάτων), και *ρευμάτων θολερότητας* (τουρβιδιτικά ρεύματα) (μεταφορά ιζημάτων αναμεμιγμένων με νερό και χωρίς συνοχή των κόκκων).

Η *ηπειρωτική κατωφέρεια* και το *ηπειρωτικό ανάχωμα* σηματοδοτούν τη μετάβαση από τον ηπειρωτικό φλοιό στον ωκεάνιο. Η ηπειρωτική κρηπίδα και η ηπειρωτική κατωφέρεια αποτελούν το «*ηπειρωτικό περιθώριο*».



**Εικόνα 7.1** Κύριοι μορφολογικοί χαρακτήρες του θαλάσσιου πυθμένα (άδεια χρήσης CC BY-SA 3.0, πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=25791563>).

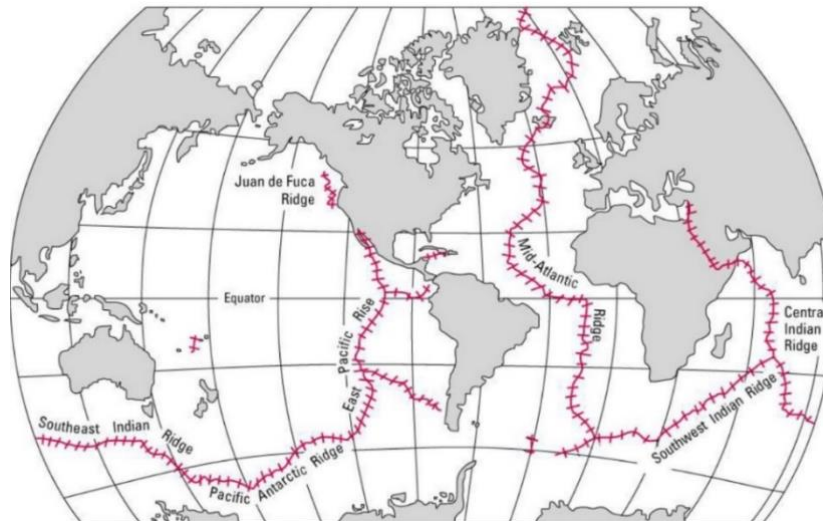
Ο *αβυσσικός πυθμένας* είναι μια ευρεία, σχετικά ομαλή επιφάνεια που αποτελείται από δύο τμήματα: την *αβυσσική πεδιάδα* η οποία συνιστά το απώτερο και βαθύτερο τμήμα του ωκεανού και πρόκειται για την πιο επίπεδη από όλες τις επιφάνειες της Γης, αποτελούμενη από ιζήματα, τα περισσότερα από τα οποία προέρχονται από τις ηπείρους, και το πάχος τους μπορεί να υπερβαίνει το ένα χιλιόμετρο, και τα *αβυσσικά υψίπεδα - λόφους*, οι οποίοι είναι μικροί, κυλινδρικοί λόφοι που συχνά εμφανίζονται σε ομάδες κοντά σε συστήματα μεσοωκεάνιων ράχων.

Τα αβυσσικά υψίπεδα έχουν σχετικά χαμηλό ανάγλυφο, καθώς υψώνονται μόνο 75 έως 900 μέτρα πάνω από τον πυθμένα του ωκεανού. Καλύπτονται, συνήθως, από ένα στρώμα μη στερεοποιημένων πελαγικών ιζημάτων, που έχουν αποθεθεί με σχετικά ομοιόμορφο τρόπο, ο οποίος σταδιακά τροποποιεί και εξομαλύνει τα



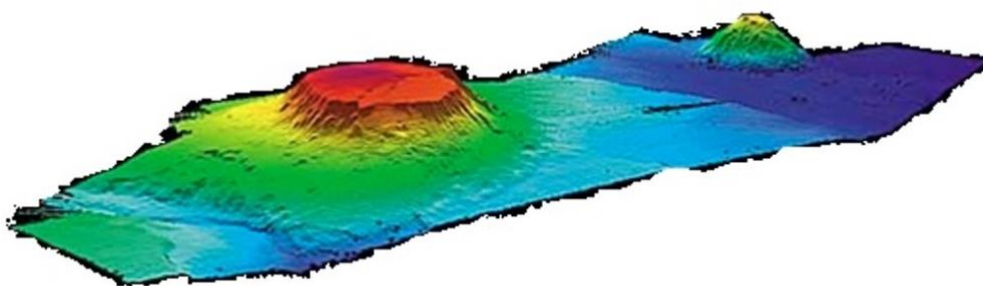
μορφολογικά χαρακτηριστικά του πυθμένα, αλλά δεν αλλάζει την αρχική ηφαιστειακή τοπογραφία του που σχηματίστηκε γύρω από τη μεσοωκεάνια ράχη.

Σε μια μεσοωκεάνια ράχη, λιωμένο υλικό αναδύεται από τον μανδύα και εκρήγνυται, εξαπλώνεται, σπρώχνοντας τα παλαιότερα πετρώματα εκατέρωθεν της ράχης. Η διαδικασία αυτή προσθέτει συνεχώς υλικό στον πυθμένα του ωκεανού. Γενικά, το σύστημα των μεσοωκεάνιων ράχων είναι ένα έντονο, συνεχές, τεκτονικό χαρακτηριστικό, το οποίο εκτείνεται γύρω από την Υδρόγειο με τη μορφή θεαματικών οροσειρών από ηφαιστειακούς βασάλτες (Εικόνα 7.2). Ο γενικός χαρακτήρας της ράχης είναι συνάρτηση του ρυθμού απομάκρυνσης των πλακών. Ένας αργός ρυθμός διάνοιξης παράγει μια υψηλότερη και πιο τραχιά ωκεάνια ράχη από ό,τι όταν οι ρυθμοί διάνοιξης είναι πιο γρήγοροι. Οι ρηξιγενείς κοιλάδες είναι επίσης πιο εμφανείς στις ράχες μεταξύ πλακών που κινούνται αργά.



**Εικόνα 7.2** Παγκόσμιο σύστημα μεσοωκεάνιων ράχων (από J M Watson - USGS, U.S Geological Survey; <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4575922>).

Τα υποθαλάσσια όρη (Seamounts) είναι υποθαλάσσια ηφαιστειακά βουνά που υψώνονται από τον πυθμένα της θάλασσας και δεν διαπερνούν την επιφάνεια του νερού. Αυτά είναι συνήθως απομονωμένα και κωνικού σχήματος, συχνά ηφαιστειακής προέλευσης. Όταν ένα βουνό υψώνεται πάνω από το νερό, η διάβρωση από τα κύματα ισοπεδώνει την κορυφή του, στη συνέχεια, το υποθαλάσσιο όρος βυθίζεται και σχηματίζει ένα Guyot (Εικόνα 7.3).



**Εικόνα 7.3** Τριδιάστατη απεικόνιση του Bear Seamount, ενός guyot στον Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό, με το Physalia Seamount στο βάθος. (άδεια χρήσης πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3285975>).

Τέλος, οι ωκεάνιες τάφροι είναι μεγάλου βάθους βυθίσεις στον ωκεανό όπου παλιός ωκεάνιος φλοιός από μια τεκτονική πλάκα ωθείται κάτω από μια άλλη, δημιουργώντας ορεινούς όγκους, προκαλώντας σεισμούς και σχηματίζοντας ηφαίστεια στον πυθμένα της θάλασσας και στην ξηρά.

Τα ωκεάνια περιβάλλοντα διακρίνονται σε αβαθή θαλάσσια περιβάλλοντα και περιβάλλοντα βαθιάς θάλασσας.

## 7.4 Αβαθή θαλάσσια περιβάλλοντα

Τα ρηγά θαλάσσια περιβάλλοντα είναι περιοχές όπου συσσωρεύονται σημαντικές ποσότητες κλαστικών υλικών που έχουν μεταφερθεί από τους ποταμούς, από την ενδοχώρα. Χαρακτηρίζονται κυρίως από την παρουσία των ακτών και τις εκβολές των ποταμών. Αποτελούν περιβάλλοντα υψηλής ενέργειας, με την έννοια ότι υπόκεινται στην έντονη δράση παραγόντων όπως είναι ο κυματισμός, η παλίρροια, ο άνεμος, που έχουν ως αποτέλεσμα να μεταβάλλουν γρήγορα τα χαρακτηριστικά τους (σχήμα, πλάτος, πάχος ιζηματογενών αποθέσεων).

### 7.4.1 Παράκτιο περιβάλλον

Τα παράκτια περιβάλλοντα είναι μεταβατικές ζώνες μεταξύ του ανοικτού ωκεανού και των χερσαίων λεκανών απορροής. Περιλαμβάνουν τόσο τη ζώνη ρηχών υδάτων εντός της οποίας τα κύματα είναι σε θέση να μετακινήσουν ιζήματα, όσο και την περιοχή προς την ξηρά από τη ζώνη αυτή, συμπεριλαμβανομένων των ακτών, των βραχωδών πρανών και των παράκτιων αμμοθινών. Οι αποθέσεις σε ρηγά θαλάσσια περιβάλλοντα προκύπτουν σε μεγάλο βαθμό από την ανακατανομή των εισροών χερσογενών ιζημάτων κατά μήκος των ακτών από τα κύματα, τις παλίρροιες και τα ρεύματα και είναι ευαίσθητες στις μεταβολές της στάθμης της θάλασσας.

Η παράκτια ζώνη αποτελεί το σημείο συνάντησης της ξηράς με τη θάλασσα. Η ζώνη αυτή είναι εξαιρετικά ζωτικής σημασίας, διότι φιλοξενεί τη συντριπτική πλειονότητα του παγκόσμιου πληθυσμού.

Λόγω της δυναμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των ωκεανών και της ξηράς, οι παράκτιες ζώνες μεταβάλλονται συνεχώς. Τα κύματα και οι άνεμοι κατά μήκος της ακτής διαβρώνουν συνεχώς τα πετρώματα και αποθέτουν ιζήματα, με τους ρυθμούς διάβρωσης και απόθεσης να ποικίλλουν σημαντικά κατά μήκος αυτών των ζωνών. Κατά τη διάρκεια καταιγίδων, η ενέργεια που φτάνει στην ακτή μπορεί να γίνει πολύ υψηλή, καθιστώντας τις παράκτιες ζώνες εξαιρετικά ευάλωτες σε φυσικούς κινδύνους. Η κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του ωκεανού και της ξηράς είναι επομένως ζωτικής σημασίας για την κατανόηση των κινδύνων που συνδέονται με τις παράκτιες ζώνες.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η παράκτια ζώνη καλύπτει λιγότερο από το 20% της επιφάνειας της Γης, φιλοξενεί περισσότερο από το 60% του πληθυσμού της Γης, περιλαμβάνει το 75% των πόλεων με πληθυσμό μεγαλύτερο των 10 εκατομμυρίων κατοίκων, συγκεντρώνει το 75% της παγκόσμιας αλιευτικής παραγωγής, αποτελεί τον κύριο αποδέκτη ιζημάτων, αποτελεί την κύρια περιοχή ανάπτυξης βιογεωχημικών διεργασιών, διαθέτει υψηλή χωρική και χρονική μεταβλητότητα και υψηλή βιοποικιλότητα. Λόγω της πολυπλοκότητας και της δυναμικής φύσης της, η παράκτια ζώνη δεν μπορεί να οριοθετηθεί με σαφήνεια και ακρίβεια.

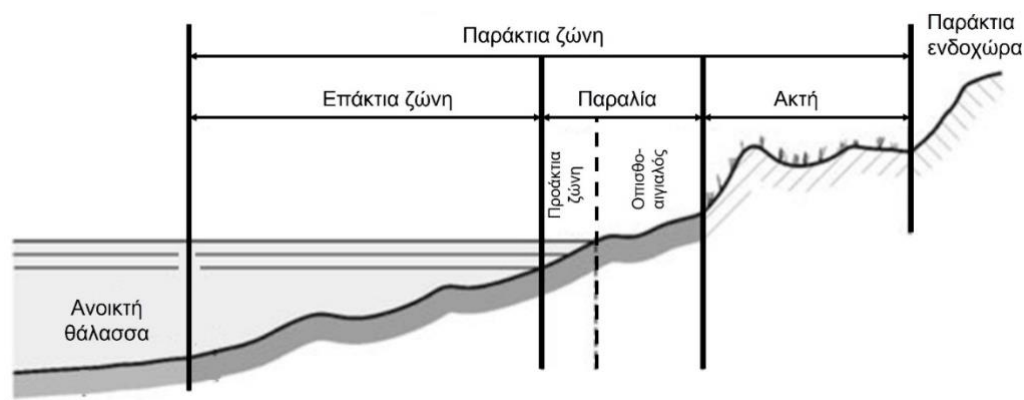
Οι παράκτιες περιοχές αντιστοιχούν μόλις στο 8% της συνολικής επιφάνειας του πλανήτη αλλά παρέχουν το 25% της παγκόσμιας παραγωγικότητας. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι:

- Αβιοτικά: κλιματικές συνθήκες, υδρογραφικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, τεκτονικές δράσεις κ.λπ.
- Βιοτικά: συστήματα παράκτιας χλωρίδας και πανίδας.
- Ανθρωπογενή: χρήσεις γης, κοινωνικές και οικονομικές δραστηριότητες, τεχνικά παράκτια έργα κ.λπ.

Οι παράκτιες ιζηματογενείς φάσεις επηρεάζονται από ένα σύνθετο σύστημα διεργασιών. Τα κύματα, οι παλίρροιες και οι βιογενείς διεργασίες είναι οι σημαντικότερες από αυτές. Η εισροή ιζήματος είναι επίσης κρίσιμη για τον χαρακτήρα της φάσεως (μέγεθος κόκκου) και για τη φύση της διατηρούμενης απόθεσης (ρυθμός καθίζησης).

#### 7.4.1.1 Παραλία (beach)

Οι παραλίες είναι τα πιο αναγνωρίσιμα μεταβατικά περιβάλλοντα. Πρόκειται για στενές, ελαφρώς επικλινείς λωρίδες ιζήματος που βρίσκονται κατά μήκος των ακτογραμμών (Εικόνα 7.4).



**Εικόνα 7.4** Κύρια υποπεριβάλλοντα της παράκτιας ζώνης.

Τα ιζήματα μιας παραλίας μπορεί να προέρχονται από την ξηρά και να μεταφέρονται μέσω ποταμών, παγετώνων και διάβρωσης της ακτογραμμής, καθώς και από θαλάσσιους οργανισμούς στη θάλασσα. Μόλις φτάσουν στην ακτή, μετακινούνται στην ξηρά από τα κύματα, την παλίρροια και τα ρεύματα που οδηγούνται από τον άνεμο και σχηματίζουν παραλίες. Μια θετική παροχή ιζημάτων προκαλεί την προσαύξηση της παραλίας, ενώ όταν είναι αρνητική οι παραλίες διαβρώνονται (Εικόνα 7.5).



**Εικόνα 7.5** α) Αρνητική παροχή ιζημάτων: διάβρωση της παραλίας.  
β) Θετική παροχή ιζημάτων: προσαύξηση της παραλίας.

Όλες οι παραλίες αποτελούνται από ιζήματα, τα οποία μπορεί να κυμαίνονται σε μέγεθος από άμμο μέχρι χαλίκια και ογκόλιθους. Η λεπτόκοκκη άμμος δημιουργεί παραλίες με πολύ χαμηλή κλίση (~1°), ενώ τα χαλίκια μπορεί να συσσωρευτούν με απότομη κλίση έως και 20°. Οι περισσότερες παραλίες, με λεπτόκοκκη έως και μεσόκοκκη άμμο, παρουσιάζουν κλίση μεταξύ 1-8°.

Οι περισσότερες παραλίες, στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη, αποτελούνται από κόκκους πυριτικής ή χαλαζιακής άμμου προερχόμενοι από διάβρωση. Θραύσματα κοραλλιογενών υφάλων και κελύφη, γνωστά ως «ανθρακικά ιζήματα», επικρατούν στους τροπικούς, ενώ η φυσική αποσάθρωση παράγει χονδρόκοκκα θραύσματα πετρωμάτων και χαλίκια στα υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη.

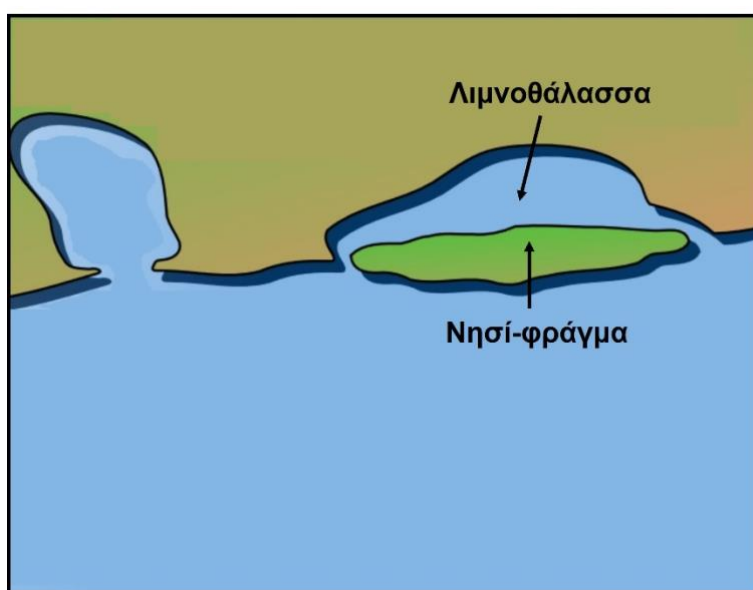
Οι παραλίες σχηματίζονται εκεί όπου η ενέργεια των κυμάτων παρασύρει την ιλύ και την άργιλο, αφήνοντας πίσω τους μεγαλύτερα σωματίδια άμμου. Τα κύματα μεταφέρουν ιζήματα παράλληλα προς την ακτή, ενώ τα παλίρροιακά ρεύματα μεταφέρουν ιζήματα κάθετα προς την ακτή. Η ιλύς και η άργιλος μπορεί στη συνέχεια να εναποτεθούν σε άλλα μεταβατικά περιβάλλοντα χαμηλής ενέργειας, όπως παλίρροιακές πεδιάδες ή sabkhas<sup>3</sup>, ή σε βαθιά θαλάσσια περιβάλλοντα. Οι παραλίες μπορεί να κυμαίνονται από συστήματα

<sup>3</sup> Το sabkha είναι ένα παράκτιο, υπερπαλίρροιακό, λασπώδες ή αμμώδες επίπεδο στο οποίο συσσωρεύονται εβαποριτικά ορυκτά, ως αποτέλεσμα ξηρού κλίματος. Τα Sabkhas είναι μεταβατικά μεταξύ της χερσαίας και της ενδοπαλίρροιακής ζώνης, εντός περιορισμένων παράκτιων πεδιάδων, ακριβώς πάνω από το κανονικό επίπεδο της παλίρροιας.

χαμηλής ενέργειας, όπου μικρά κύματα προσκρούουν στην ακτή, έως παραλίες με υψηλά κύματα που σπάνε σε μια ζώνη κυματισμού αρκετών εκατοντάδων μέτρων.

Η μορφολογία μιας παραλίας, συνδέεται στενά με την ενέργεια των κυμάτων και των παλιρροϊκών ρευμάτων, που συνήθως αναφέρονται ως «υδρογραφικό καθεστώς». Σε αυτά τα περιβάλλοντα, ο λόγος της παλιρροιακής ενέργειας, η οποία συνήθως καθορίζεται από το παλιρροιακό εύρος, προς την κυματική ενέργεια, η οποία καθορίζεται από το μέσο ύψος κύματος, καθορίζει τη μορφολογία της ακτής, ενώ η παροχή ιζημάτων αποτελεί σημαντικό τροποποιητικό παράγοντα κοντά στις εκβολές των μεγάλων ποταμών.

Το εύρος των παλιρροιών καθορίζει τη διάρκεια δράσης των κυμάτων σε κάθε τμήμα του προφίλ της ακτής. Ως αποτέλεσμα, οι παραλίες μπορούν να επηρεαστούν από μικρο- (<2 m), μεσο- (2-4 m), μακρο- (4-8 m) και mega-παλίρροιες (>8 m). Στις μικροπαλιρροιακές ακτές (0-2 m παλιρροιακό εύρος), νησιωτικοί φραγμοί (barrier islands)<sup>4</sup> και συναφή περιβάλλοντα εμφανίζονται κατά προτίμηση κατά μήκος τους (Εικόνα 7.6). Στις μεσοπαλιρροιακές ακτές, εάν υπάρχουν νησιωτικοί φραγμοί, αυτοί είναι συνήθως μικροί ή περιορισμένοι. Τέλος, στις μακροπαλιρροιακές ακτές, οι νησιωτικοί φραγμοί γενικά απουσιάζουν. Το παλιρροιακό εύρος προκαλεί διασπορά και διάχυση της κυματικής ενέργειας σε πολύ μεγάλο πλάτος της παράκτιας ζώνης, γεγονός που εμποδίζει τον σχηματισμό νησιωτικών φραγμών.



**Εικόνα 7.6** Η γεωμορφή ενός νησιωτικού φραγμού (πηγή:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Accreting\\_coast\\_Image6.svg#/media/File:Accreting\\_coast\\_Image6.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Accreting_coast_Image6.svg#/media/File:Accreting_coast_Image6.svg)).

Εν κατακλείδι και λαμβάνοντας υπόψη την ανταπόκριση στο εύρος των υψών των κυμάτων, στο εύρος της παλίρροιας και στα ιζήματα της παραλίας (από άμμο έως ογκόλιθους), οι παραλίες διακρίνονται σε τρεις βασικούς τύπους: *κυματογενείς*, *παλίρροια-τροποποιημένες* και *παλίρροια-κυριαρχούμενες*, με βάση το σχετικό εύρος της παλίρροιας (RTR), όπου TR είναι το εύρος της εαρινής παλίρροιας.

Το παλιρροιακό εύρος RTR των κυματογενών παραλιών είναι μικρότερο από το τριπλάσιο του μέσου ύψους κύματος. Οι παραλίες που τροποποιούνται από τις παλίρροιες έχουν RTR από 3 έως 10, γεγονός που υποδηλώνει ότι το παλιρροιακό εύρος αυξάνεται ή/και το ύψος κύματος μειώνεται. Τέλος, οι παραλίες που κυριαρχούνται από παλίρροια έχουν RTR από 10 έως 50, υποδεικνύοντας υψηλή παλίρροια ή/και πολύ χαμηλό ύψος κύματος ( $H < 0,3$  m).

<sup>4</sup> Οι νησιωτικοί φραγμοί ή νησιά-φράγματα (barrier islands) είναι παράκτιες γεωμορφές και ένας τύπος συστήματος αμμοθινών που είναι εξαιρετικά επίπεδες ή ανώμαλες περιοχές άμμου που σχηματίζονται παράλληλα με την ηπειρωτική ακτή λόγω της δράσης των κυμάτων και των παλιρροιών.

### 7.4.1.2 Ακτή (coast)

*Ακτή* (coast) ονομάζεται η ζώνη ξηράς, το ανάγλυφο της οποίας σχηματίστηκε από τη δράση της θάλασσας<sup>5</sup>. Το εξωτερικό της όριο προς τη θάλασσα είναι η *ακτογραμμή*, ενώ το εσωτερικό προς την ξηρά είναι το ανώτερο σημείο της ζώνης απόθεσης των ιζημάτων. Η ακτή αποτελεί τη ζώνη επαφής της λιθόσφαιρας με την υδρόσφαιρα και είναι προϊόν της διαρκούς ανταγωνιστικής δράσης τους, που διαμορφώνεται και αποκτά συγκεκριμένα χαρακτηριστικά μέσα από την αλληλεπίδρασή τους στην πορεία του χρόνου.

Ο δυναμικός συνδυασμός των ακόλουθων δράσεων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ακτών:

- γεωλογικές διεργασίες (σεισμοί, ρήγματα, καθιζήσεις),
- ιζηματογένεση κατά μήκος της ακτής (κυρίως προερχόμενη από τις λεκάνες απορροής και σε μικρότερο βαθμό από τη διάβρωση των παράκτιων πετρωμάτων),
- ρεύματα και κυματική δράση (διάβρωση των ακτών, ανακατανομή των ιζημάτων, μεταφορά ιζημάτων κατά μήκος της ακτής, μεταφορά ιζημάτων στον βυθό).

Η αλληλεπίδραση αυτών των παραμέτρων οδηγεί σε μια δυναμική ισορροπία. Όταν μια παράμετρος αλλάζει, το παράκτιο σύστημα αλλάζει μορφή μέχρι να επιτευχθεί μια νέα δυναμική ισορροπία.

Επειδή υπάρχουν τόσοι πολλοί διαφορετικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις ακτές, η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος ταξινόμησης είναι εξαιρετικά δύσκολη, με αποτέλεσμα να έχουν γίνει, κατά καιρούς, αρκετές προσπάθειες ταξινόμησης των ακτών βασισμένες σε μεμονωμένες παραμέτρους, όπως το κυματικό ή παλιρροϊκό περιβάλλον, η γεωλογία και η τεκτονική τοποθέτηση.

Οι ακτές μπορούν να ταξινομηθούν λαμβάνοντας υπόψη την *τεκτονική* και τη *στάθμη της θάλασσας*. Επιπλέον, διακρίνονται σε *διαβρωσιγενείς* και *αποθετικές* ανάλογα με το αν τα κύρια χαρακτηριστικά τους δημιουργήθηκαν από διάβρωση ή από απόθεση διαβρωμένου υλικού. Οι διαβρωσιγενείς ακτές αναπτύσσονται όπου υπάρχει ενεργή διάβρωση από τη δράση των κυμάτων ή όπου ποταμοί ή παγετώνες προκαλούν διάβρωση όταν η στάθμη της θάλασσας είναι χαμηλότερη από ό,τι σήμερα. Σε αυτές περιλαμβάνονται γκρεμοί ή βραχώδεις ακτές. Οι αποθετικές ακτές αναπτύσσονται εκεί όπου επικρατεί συσσώρευση ιζημάτων λόγω μεταφοράς υλικού από ποτάμια και παγετώνες ή με ωκεάνια ρεύματα και κύματα. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα δέλτα, μαγκρόβια έλη, αλυκές, νησιά-φράγματα και αμμόλοφοι.

Οι *πρωτογενείς* ακτές είναι νεαρές ακτές στις οποίες κυριαρχούν οι χερσαίες επιδράσεις. Οι *δευτερογενείς* ακτές είναι παλαιότερες ακτές που έχουν τροποποιηθεί από θαλάσσιες επιδράσεις.

### 7.4.2 Ταξινόμηση παράκτιων περιβαλλόντων

Τα παράκτια περιβάλλοντα απόθεσης μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το κατά πόσο επιδρούν στην προσφορά ιζημάτων οι *ποτάμιες*, *παλιρροϊκές* και *κυματικές* διεργασίες. Σαφής κατηγοριοποίηση, πάντως, δεν υπάρχει, αφού πολλά παράκτια συστήματα ανήκουν σε μια ενδιάμεση κατηγορία, όπου αλληλοεπιδρούν και οι τρεις παράγοντες προέλευσης και μεταφοράς (παλίρροιες, κύματα και ποτάμια απορροή).

Όλες οι παράκτιες περιοχές επηρεάζονται σε κάποιο βαθμό από τις παλίρροιες, αλλά μόνο λίγοι τύποι παράκτιων περιβαλλόντων μπορούν να θεωρηθούν ότι κυριαρχούνται εξ ολοκλήρου από παλίρροιες (tide-dominated). Αυτά τα συστήματα εμφανίζονται σε παράκτιες περιοχές, όπου η δράση των παλιρροιών είναι πολύ μεγαλύτερη από τη δράση των κυμάτων. Ένα παράδειγμα τέτοιων περιβαλλόντων είναι οι εκβολές ποταμών με ευρύ στόμιο και κύριο κανάλι που στενεύει προς την ενδοχώρα και συνδέεται με ένα ποτάμι. Μπροστά στο στόμιο δεν υπάρχει νησί - φράγμα και σε περίπτωση που κάποτε υπήρχε, αυτό έχει μετατραπεί σε υποθαλάσσιο παλιρροϊκό δέλτα με παλιρροϊκές πεδιάδες κατά μήκος των καναλιών. Αυτές οι παλιρροϊκές πεδιάδες τροφοδοτούνται συνήθως από εισροές θαλάσσιων ιζημάτων, με τα μεγέθη των κόκκων να μειώνονται προς την ενδοχώρα (Εικόνα 7.7).

<sup>5</sup> Η ακτή είναι το σημείο όπου η ξηρά συναντά τη θάλασσα. Η παραλία, από την άλλη πλευρά, είναι η χερσαία περιοχή κατά μήκος της ακτογραμμής ενός ωκεανού ή μιας θάλασσας. Αυτή είναι η μεγάλη διαφορά μεταξύ ακτής και παραλίας.





**Εικόνα 7.7** Παλιρροϊκές πεδιάδες (πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=610234> ).

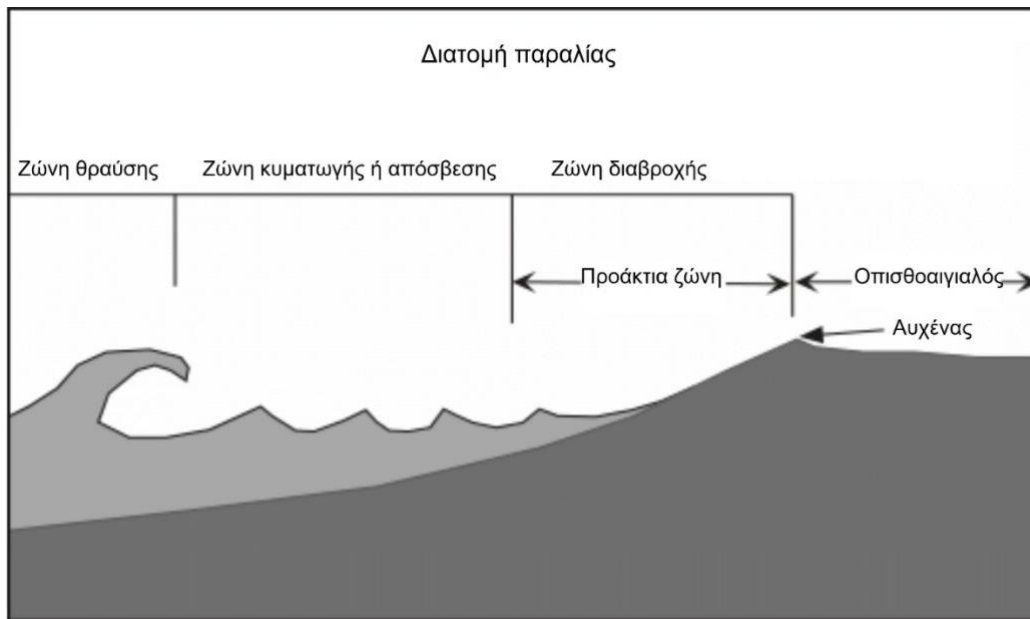
Από την άλλη πλευρά, τα κυματογενή παράκτια περιβάλλοντα (wave dominated) είναι από τα πιο διαδεδομένα. Ο όρος «κυματογενές παράκτιο περιβάλλον» αναφέρεται στο περιβάλλον με αφθονία ιζημάτων, κυρίως άμμου αλλά και χαλικιών και κροκάλων, του οποίου η εξέλιξη διαμορφώνεται μέσω της διάβρωσης, της μεταφοράς και της απόθεσης ιζημάτων από τα κύματα και τα ρεύματα. Οι παλίρροιες και τα παλιρροϊκά ρεύματα επηρεάζουν επίσης αυτά τα παράκτια περιβάλλοντα, αλλά σε μικρότερο βαθμό από ό,τι τα κύματα.

Σε συστήματα που κυριαρχούνται από κύματα, υπάρχει συνήθως το νησιωτικό φράγμα, το οποίο δημιουργείται από την προκαλούμενη από τα κύματα εγκάρσια παράκτια μεταφορά ιζημάτων και τα επιμήκη προς την ακτή ρεύματα (longshore currents). Κατά τη διάρκεια καταιγίδων ή περιόδων ακραίας απορροής ποταμών, μπορεί να συμβεί διάρρηξη του παράκτιου φράγματος. Εάν το παράκτιο φράγμα υποστηρίζεται από μια χαμηλού υψομέτρου ευρεία παράκτια πεδιάδα, η θάλασσα θα ανοίξει μια μεγάλη είσοδο στο παράκτιο φράγμα και θα μετατρέψει την παράκτια πεδιάδα σε λιμνοθάλασσα. Τα παλιρροϊκά ρεύματα μπορεί επίσης να δημιουργήσουν ένα σύστημα καναλιών στο εσωτερικό της λιμνοθάλασσας και μέρος του ιζήματος μπορεί να αποτεθεί στη λιμνοθάλασσα για να σχηματίσει εκτεταμένες παλιρροϊκές πεδιάδες.

Πολλοί ποταμοί μεταφέρουν σημαντικές ποσότητες ιζημάτων στην ακτή και, κατά συνέπεια, οι εκβολές τους αποτελούν ένα δυναμικό σύνολο γεωμορφών που εξαρτάται από τα κύματα, το εύρος των παλιρροιών και την εκροή των ποταμών. Η έντονη δράση των ποταμών δημιουργεί δελταϊκά συστήματα απόθεσης σε περιβάλλοντα χαμηλής κυματικής ενέργειας. Δυστυχώς, υπάρχουν περιορισμένες πληροφορίες σχετικά με τα πρότυπα και τις διεργασίες της μεταφοράς ιζημάτων από τους ποταμούς στα παράκτια συστήματα.

### 7.4.3 Μορφολογία της παράκτιας ζώνης

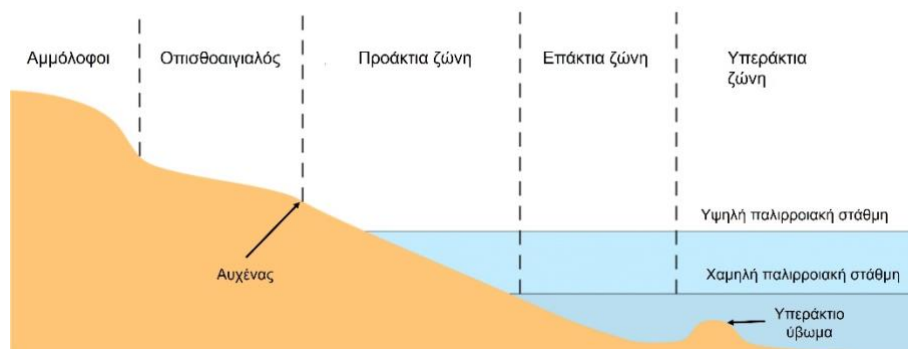
Η παράκτια ζώνη, ανάλογα με τον τύπο των κυματικών διεργασιών που λειτουργούν στα επιμέρους τμήματα, χωρίζεται σε τρεις ξεχωριστές ζώνες οι οποίες είναι η ζώνη διαβροχής (swash zone), η ζώνη κυματογής ή απόσβεσης (surf zone) και η ζώνη θραύσης (breaker zone) και όλες μαζί συνθέτουν την περιπαράλια ζώνη (nearshore zone) (Εικόνα 7.8).



**Εικόνα 7.8** Ορολογία που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των διεργασιών των κυμάτων και των ρευμάτων στη ζώνη του κυματισμού.

Το τμήμα της παράκτιας ζώνης, όπου το νερό που μεταφέρεται από τα κύματα, εισέρχεται στην παραλία, είναι η *ζώνη κυματωγής ή απόσβεσης*. Το νερό στη ζώνη κυματωγής είναι ρηχό, συνήθως μεταξύ 5 έως 10 μέτρα βάθος. Πρόκειται για το πιο δυναμικό τμήμα της παραλίας. Τα κύματα σπάνε όταν το βάθος του νερού είναι περίπου 1,5 φορές το ύψος του κύματος. Η περιοχή θραύσης των κυμάτων ορίζει τη «*ζώνη θραύσης*». Μετά τη θραύση, τα κύματα (με μειωμένο πλέον ύψος) συνεχίζουν να κινούνται προς τη χέρσο, διατρέχοντας το επικλινές μέτωπο της παραλίας, προκαλώντας την εκτίναξη του νερού στη *ζώνη διαβροχής*. Η ζώνη διαβροχής βρίσκεται στο χερσαίο άκρο της ζώνης κυματωγής, στο ανώτερο τμήμα του προφίλ της παραλίας που υπόκειται σε πλημμύρα. Το νερό, στη συνέχεια, επιστρέφει και πάλι προς τα πίσω, ως παλινδρόμηση ή αντίστροφη έκπλυση (backwash).

Η παράκτια ζώνη αποτελεί ένα σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει διάφορες ζώνες που καθορίζονται από την εγγύτητά τους στην ακτή και τις κυρίαρχες διαδικασίες που εμφανίζονται μέσα σε αυτές (τοπική υδροδυναμική και αεροδυναμική, χαρακτηριστικά ιζημάτων). Χωρίζεται σε δύο κύρια τμήματα, στο χερσαίο και στο υποθαλάσσιο. Το χερσαίο ορίζεται ως η περιοχή που εκτείνεται από τη γραμμή της μέσης χαμηλής παλιρροιακής στάθμης μέχρι την περιοχή όπου αναπτύσσεται μόνιμη χερσαία βλάστηση. Το υποθαλάσσιο τμήμα είναι η περιοχή που καλύπτεται πάντα από τη θάλασσα, και όπου λαμβάνουν χώρα οι σημαντικές διεργασίες της θαλάσσιας μεταφοράς ιζημάτων εξαιτίας των κυματισμών και παράκτιων κυματογενών ρευμάτων (Εικόνα 7.9).



**Εικόνα 7.9** Ορολογία που χρησιμοποιείται για την περιγραφή του περιγράμματος της παραλίας.

Οι υπεράκτιες και επάκτιες ζώνες των παράκτιων συστημάτων, βρίσκονται μόνιμα μέσα στο νερό, κάτω από το σημείο της χαμηλής παλίρροιας. Επειδή η υπεράκτια ζώνη βρίσκεται κάτω από τη βάση των κυμάτων του καλοκαιριού (fairweather wave base)<sup>6</sup>, τα κανονικά κύματα δεν την επηρεάζουν. Συνήθως, η υπεράκτια ζώνη δέχεται μόνο λεπτόκοκκα ιζήματα που καθιζάνουν από την αιώρηση (βέβαια, μπορεί να δέχεται και χονδρόκοκκα ιζήματα κατά τη διάρκεια καταιγίδων, όταν η βάση των κυμάτων χαμηλώνει).

Η επάκτια ζώνη ορίζεται ως η μετάβαση μεταξύ της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας και της ακτής (Εικόνες 7.4 και 7.9). Ο Barrell (1912) επινόησε τον όρο «επάκτια ζώνη» για να περιγράψει τη ζώνη μεταξύ των επιφανειακών και υποθαλάσσιων πεδιάδων ενός δελταϊκού συστήματος. Η ζώνη αυτή θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει ένα σχετικά έντονα κεκλιμένο ανάγλυφο που δημιουργείται από τη θραύση των κυμάτων. Αργότερα, ο Johnson (1919) όρισε την «επάκτια ζώνη» ως την περιοχή μεταξύ της ακτογραμμής χαμηλής παλίρροιας και της σχεδόν οριζόντιας επιφάνειας της υπεράκτιας ζώνης.

Η επάκτια ζώνη βρίσκεται πάνω από τη βάση των κυμάτων με καλό καιρό και επηρεάζεται συνεχώς από τα κανονικά κύματα. Διακρίνεται σε τρεις ζώνες: στην *ανώτερη επάκτια ζώνη* που ισοδυναμεί με την εσωτερική ζώνη κυματωγής ή απόσβεσης (surf zone), στη *μεσαία επάκτια ζώνη* που ορίζεται ως το τμήμα που καταλαμβάνεται από τη ζώνη θραύσης (breaker zone), και στην *κατώτερη επάκτια ζώνη* που προσδιορίζεται ως η περιοχή προς τη θάλασσα όπου η επάκτια ζώνη συγχωνεύεται με την εσωτερική κρηπίδα και βρίσκεται εντός της βάσης των κυμάτων του καλοκαιριού. Οι κατώτερες επάκτιες ζώνες είναι ποικίλες και διακρίνονται σε επάκτιες ζώνες ελεγχόμενες από το μητρικό πέτρωμα, επάκτιες ζώνες φτωχές ή πλούσιες σε ιζήματα, πυριτικοκλαστικές, ανθρακικές, χαμηλής έως υψηλής κυματικής ενέργειας, μικροπαλιρροιακές έως μακροπαλιρροιακές, και επηρεάζονται ποικιλοτρόπως από τις ροές ιζημάτων που προκαλούνται από καταιγίδες και ανέμους. Η κατώτερη επάκτια ζώνη μπορεί να αποτελέσει αποθετήριο ιζημάτων χερσαίας προέλευσης και ζώνη ενεργού παραγωγής ανθρακικών αλάτων. Η ήπια κλίση του κατώτερου τμήματος της επάκτιας ζώνης προκύπτει από την εξομάλυνση του ιζήματος που σχετίζεται με την παλίνδρομη κίνηση των κυμάτων.

Στο ανώτερο τμήμα της επάκτιας ζώνης, το κύμα επιβραδύνεται λόγω της τριβής με τον βυθό. Το κύμα ουσιαστικά διασπάται, και χάνει ένα μεγάλο μέρος της ενέργειάς του. Λόγω της απώλειας ενέργειας, ένα μέρος ιζήματος αποτίθεται δημιουργώντας αμμώδη φράγματα.

Από ιζηματολογικής άποψης, η επάκτια ζώνη είναι μια σφήνα απόθεσης ψαμμίτη με κλίση προς τα ανοιχτά της θάλασσας. Αυτή η σφήνα ιζημάτων μεταπίπτει, προς τη λεκάνη, σε υπεράκτιους (ανοιχτής θάλασσας) αμμώδεις και ιλυώδεις σχιστόλιθους και προς την ξηρά σε προάκτιους ψαμμίτες ή/και κροκαλοπαγή. Το σύνολο των ιζημάτων αναπτύσσει διάφορες μορφές διασταυρούμενης στρώσης (Εικόνα 7.10), με επικρατέστερη τη λοφοειδή διασταυρούμενη στρώση (hummocky cross stratification).



**Εικόνα 7.10** Ψαμμίτες της ανώτερης επάκτιας ζώνης με διασταυρούμενη στρώση (Κρητιδικό, Agadir Basin, Morocco, από ManuRoquette – άδεια χρήσης CC BY-SA 4.0, πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=83758660>).

<sup>6</sup> Η βάση των κυμάτων καλοκαιριού (fairweather wave base) αναφέρεται στο βάθος κάτω από τα μέσα ημερήσια κύματα, ενώ η βάση των κυμάτων καταιγίδας (storm wave base) αναφέρεται στο βάθος κάτω από τα κύματα που προκαλούνται από καταιγίδες και είναι συχνά πολύ βαθύτερα.

Το *μέτωπο της παραλίας* (που ονομάζεται επίσης και *προάκτια ζώνη*) είναι το τμήμα της παραλίας που βρίσκεται σε επαφή με την ίσαλο γραμμή (ακτογραμμική) και, επομένως, επηρεάζεται άμεσα από την υδροδυναμική των κυμάτων (Komar, 1998). Πρόκειται για τη ζώνη μεταξύ της μέσης στάθμης των υδάτων (MLW) και του αυχένα της παραλίας, ο οποίος ισοδυναμεί με το ανώτατο όριο της ανόδου των κυμάτων κατά την παλίρροια (Εικόνα 7.9). Η προάκτια ζώνη είναι το τμήμα της ακτής/παραλίας που βρέχεται λόγω της μεταβαλλόμενης παλίρροιας και του κυματισμού υπό κανονικές συνθήκες. Η προάκτια ζώνη επηρεάζεται από τη ζώνη παφλασμού σε καθημερινή βάση (μεταξύ των χαμηλών και υψηλών επιπέδων παλίρροιας, Εικόνα 7.11). Από μορφολογική άποψη, αντιπροσωπεύεται από μια επιφάνεια με κλίση προς τη θάλασσα, η οποία διακόπτεται από μια σειρά διαβρωσιγενών προσχώσεων και ουλών. Αυτά τα φυσικά στοιχεία σχηματίζουν σχεδόν κατακόρυφες αυλακώσεις που προκαλούνται από τη δράση των κυμάτων κατά τη διάρκεια υψηλότερων επιπέδων νερού που συνδέονται με εποχιακές διακυμάνσεις της ενέργειας. Λόγω της δραστηριότητας των κυμάτων, η οποία εμποδίζει την απόθεση λεπτών ιζημάτων, η προάκτια ζώνη αποτελεί ένα ιδιαίτερα ενεργό περιβάλλον.

Ανάλογα με την αντίστοιχη προσφορά, η άμμος και τα χαλίκια είναι τα πιο συνηθισμένα ιζήματα του πυθμένα. Η παρουσία μέσης έως αδρομερούς, πολύ καλά ταξινομημένης άμμου με κροκάλες, υποδηλώνει μεταφορά και απόθεση ιζημάτων κατά τη διάρκεια θαλάσσιων γεγονότων υψηλής ενέργειας (Bourgeois & Leithold, 1984). Εξαιτίας του έντονου, παλίνδρομου κυματισμού, τα ιζήματα αυτά μπορούν να οργανωθούν σε διασταυρούμενα στρώματα υψηλής γωνίας, με κλίση προς την ξηρά, και σε διασταυρούμενα στρώματα χαμηλής γωνίας, με κλίση προς τη θάλασσα (Elliott, 1986).



**Εικόνα 7.11** Προάκτια ζώνη - Port Augusta από Georgie Sharp με άδεια χρήσης CC BY-NC 2.0 (πηγή: <https://openverse.org/image/38c4dcf8-787b-40fd-a805-1a9dde17195a?q=foreshore>).

Ο *οπισθοαιγιαλός* ή *αλλιώς εσωτερική παραλία* αποτελεί τη ζώνη που εκτείνεται από το όριο του χειμέριου κύματος μέχρι το σημείο ανάπτυξης της χερσαίας βλάστησης (Εικόνα 7.12). Σύμφωνα με τους πιο συνηθισμένους και χρησιμοποιούμενους ορισμούς, ο οπισθοαιγιαλός είναι το πιο προσήνεμο και υπερυψωμένο τμήμα της παραλίας, το οποίο είναι τυπικά μια επιφάνεια με σχεδόν οριζόντια έως ήπια κλίση προς την ξηρά. Ο οπισθοαιγιαλός γενικά δεν επηρεάζεται από την υπερπήδηση των κυμάτων, με εξαίρεση τις καταγίδες ακραίας ενέργειας. Ως εκ τούτου, συνδέεται συνήθως με το «ξηρό» τμήμα της παραλίας.

Ο ορισμός αυτός ισχύει μόνο για ακτές που κυριαρχούνται από κύματα, όπου η κυματική κίνηση έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στη μορφολογία της παραλίας και την κατανομή των ιζημάτων. Οι ακτές που κυριαρχούνται από τα ποτάμια και τις παλίρροιας υπόκεινται συνήθως σε διαφορετική υδροδυναμική, με την επίδραση των κυμάτων να είναι αμελητέα (Clark, 1996; Elliott, 1986; Bird, 2008; Bird, 2003).

Άλλα μοντέλα ορίζουν τον οπισθοαιγιαλό ως τη ζώνη της παραλίας πάνω από την ίσαλο γραμμή, η οποία χαρακτηρίζεται γενικά από μια απότομη αλλαγή στο μέγεθος των κόκκων του ιζήματος. Αυτό το υποπεριβάλλον του επιφανειακού τμήματος ελέγχεται κυρίως από την παράκτια αεροδυναμική και χαρακτηρίζεται από την παρουσία αμμοθινών. Τα ιζήματα είναι πολύ καλά ταξινομημένα, με κυρίαρχο μέγεθος κόκκων από μεσαία έως λεπτή άμμο, με ενιαία κατανομή. Οι κόκκοι σχηματίζουν μικρές ανεμογενείς συνιζηματογενείς ρυτιδώσεις, στο πιο εξωτερικό τμήμα του οπισθοαιγιαλού, και πεδία αμμοθινών με κορυφογραμμές από βαρκανοειδείς έως ευθείες, στον πιο εσωτερικό τομέα (Komar, 1998).





**Εικόνα 7.12** Οπισθοαιγιαλός από το Corrubedo (Pontevedra, Ισπανία) - από Banco de Imágenes Geológicas με άδεια χρήσης CC BY-NC-SA 2.0

(πηγή: <https://openverse.org/image/ef4b24e7-5470-4d4d-a7cf-f11957f677d3?q=backshore> ).

Ο αυχένας είναι το σχεδόν οριζόντιο τμήμα της χερσαίας παραλίας, το οποίο σχηματίζεται κάτω από ήπιες κυματικές συνθήκες. Συνήθως δημιουργείται σε παραλίες αποτελούμενες από πιο χονδρόκοκκα ιζήματα όπως χαλίκια και χονδρόκοκκη άμμο. Μερικές παραλίες δεν έχουν αυχένα, ενώ άλλες παρουσιάζουν έναν ή περισσότερους αυχένες σε διαφορετικά επίπεδα.

Οι ιζηματογενείς φάσεις των παράκτιων ακολουθιών αναπτύσσονται με προβλέψιμη κατακόρυφη σειρά. Για παράδειγμα, σε μια ακτή με κυματογενούς προέλευσης πυριτοκλαστικά ιζήματα, τέσσερις φάσεις είναι συνήθως παρούσες, σε σταθερή κατακόρυφη σειρά. Η παράκτια ακολουθία αρχίζει με βιοαναμοχλευμένο υπεράκτιο (ανοικτής θάλασσας) ιλυόλιθο, περνά μέσα από στρώματα θυέλλης της κατώτερης επάκτιας ζώνης, συνεχίζει μέσα από την ανώτερη επάκτια ζώνη με στρώματα που παρουσιάζουν διασταυρούμενη στρώση, περνά προς τα πάνω σε κεκλιμένα προς τη θάλασσα ελασματοειδή στρώματα της προάκτιας ζώνης και καλύπτεται από ένα στρώμα λιθάνθρακα - λιγνίτη της εσωτερικής παραλίας ή του οπισθοαιγιαλού.

#### 7.4.4 Ταξινόμηση παράκτιων ιζημάτων

Το τεκτονικό περιβάλλον, η μορφολογία της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας, οι ευστατικές μεταβολές, η προσφορά ιζημάτων και οι διαδικασίες μεταφοράς ιζημάτων που σχετίζονται με τα κύματα, τις παλίρροιες και τα ρεύματα είναι παράγοντες που ελέγχουν ή επηρεάζουν την κατανομή των ιζημάτων στην παράκτια ζώνη (π.χ. Pratson et al., 2007). Η κατανομή και το πάχος των παράκτιων ιζημάτων μπορεί να είναι μεταβλητά και πολύπλοκα λόγω της ποικιλομορφίας αυτών των παραγόντων και των αλληλεπιδράσεών τους. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα κατά μήκος των μετασχηματισμένων ηπειρωτικών περιθωρίων, όπου τα χερσαία και υπεράκτια ρήγματα με διαφορετική γεωμετρία και ιστορία ολίσθησης μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές αλλαγές στην παράκτια γεωμορφολογία, την προσφορά ιζημάτων και τη θέση υποδοχής των ιζημάτων.

Ανάλογα με την προέλευσή τους, τα παράκτια ιζήματα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

**Μηχανικά ή κλαστικά ιζήματα** – προέρχονται από τη φυσική αποσάθρωση των πετρωμάτων που είναι εκτεθειμένα στην επιφάνεια της ξηράς. Τα υλικά αυτά μεταφέρονται κυρίως με το νερό των ποταμών αλλά και με τον άνεμο και τους παγετώνες. Περίπου το 85% όλων των παράκτιων θαλάσσιων ιζημάτων είναι κλαστικά ιζήματα (Huggett, 2007). Τα μεταφερόμενα σωματίδια και θραύσματα λειαινούν και διαβρώνουν τις επιφάνειες πάνω από τις οποίες περνούν, συμβάλλοντας στην περαιτέρω αποσάθρωση των πετρωμάτων. Ο χρόνος και η απόσταση είναι σημαντικοί παράγοντες: όσο μεγαλύτερο είναι το ταξίδι προς τη θάλασσα, τόσο περισσότερες είναι οι πιθανότητες να στρογγυλοποιηθούν και να μειωθούν σε μέγεθος οι κόκκοι των ορυκτών, λόγω της τριβής. Οι κόκκοι ταξινομούνται με βάση την *πυκνότητα*, το *μέγεθος* και το *σχήμα* κατά τη διάρκεια αυτού του ταξιδιού, ενώ τα χημικά, λιγότερο σταθερά, ορυκτά διαλύονται. Τα θραύσματα πετρωμάτων, ο *χαλαζίας* και τα *αργιλικά ορυκτά* είναι τα πιο συνηθισμένα στερεά προϊόντα διάβρωσης. Στην επιφάνεια της Γης, ο χαλαζίας είναι το μόνο κοινό ορυκτό των πυριγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων που είναι τόσο σκληρό



(ανθεκτικό στην τριβή) όσο και χημικά σταθερό. Ως αποτέλεσμα, ο χαλαζίας είναι το κυρίαρχο ορυκτό στις σημερινές άμμους παραλιών και ποταμών, καθώς και στους περισσότερους παλαιούς ψαμιμίτες.

Ένα μικρό μέρος του χερσαίου υλικού εναποτίθεται από την ατμόσφαιρα. Αποτελείται από σκόνη που μεταφέρεται από τον άνεμο και ηφαιστειακή τέφρα και περιέχει κυρίως πολύ λεπτή άμμο (χαλαζία), αλλά και σωματίδια ιλύος και αργίλου, καθώς και σημαντικές ποσότητες αργιλίου (Al), σιδήρου (Fe), μαγνησίου (Mg) και ασβεστίου (Ca).

*Βιογενή ή οργανικά ιζήματα* – Τα ιζήματα αυτά, που ονομάζονται και «βιοκλαστικά ιζήματα», περιέχουν συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του 30% υλικού βιογενούς προέλευσης, όπως π.χ. κελύφη, σκελετικά στοιχεία ζωικών ή φυτικών οργανισμών. Αποτελούνται κυρίως από κρυστάλλους ανθρακικού ασβεστίου (CaCO<sub>3</sub>) με τη μορφή ασβεστίτη ή αραγωνίτη. Άλλα βιογενή ιζήματα με υψηλή οργανική περιεκτικότητα, όπως τα νεκρά φυτικά υπολείμματα (τύρφη), αναφέρονται ως *βιολογικά ιζήματα πλούσια σε οργανικά συστατικά*. Τα βιογενή ιζήματα μπορεί να αποτελούν σημαντικό μέρος του υλικού του πυθμένα σε παράκτια περιβάλλοντα όπου το χερσαίο υλικό είναι σπάνιο (δεν υπάρχουν δέλτα ποταμών στην περιοχή). Πολλές παραλίες στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές αποτελούνται σχεδόν εξ ολοκλήρου από ανθρακική άμμο που προέρχεται από παρακείμενους υφάλους με κοράλλια, σκελετικό υλικό, θραύσματα κελυφών ή κατακρημνισμένο ανθρακικό ασβέστιο. Λεπτά βιοκλαστικά ιζήματα μπορεί επίσης να συσσωρεύονται σε προστατευμένα παράκτια περιβάλλοντα σε εύκρατες κλιματικές ζώνες.

Ανάλογα με το μέγεθός τους χωρίζονται σε:

*Συνεκτικά* που ονομάζονται άμμοι, αποτελούνται από στερεούς κόκκους μεγαλύτερους από 63 μm σε διάμετρο και διατηρούν τη συνοχή τους λόγω βαρύτητας μόνο.

*Μη συνεκτικά* που ονομάζονται άργιλοι και συγκρατούνται από ηλεκτρολυτικές δυνάμεις.

Το 90% των παράκτιων ιζημάτων προέρχεται από ποτάμιες αποθέσεις. Άλλες πηγές είναι οι παγετώνες, η αιολική μεταφορά/απόθεση, η παράκτια διάβρωση, τα βιογενή υλικά, η ηφαιστειακή δράση.

Οι απώλειες ιζημάτων σε μια ακτή μπορεί να οφείλονται στη χειμερινή (πρόσκαιρη) απομάκρυνση ιζημάτων, στη θυελλώδη (μόνιμη) απομάκρυνση ιζημάτων στην εξωτερική υφαλοκρηπίδα και καταφέρεια, στην παγίδευση σε ποταμοκόλπους και λιμνοθάλασσες, στην αιολική μεταφορά στα ενδότερα, στις ανθρώπινες παρεμβάσεις.

## 7.5 Ηπειρωτική κρηπίδα

Οι υποθαλάσσιες πλατφόρμες που περιβάλλουν τις ηπείρους είναι γνωστές ως *υφαλοκρηπίδες*. Βρίσκονται στον ανοιχτό ωκεανό, καθώς και σε πολλές παράκτιες θάλασσες. Τα βάθη, στα προς τη θάλασσα άκρα των ηπειρωτικών υφαλοκρηπίδων, κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 80 και 100 μέτρων, αν και υπάρχουν θέσεις όπου τα βάθη είναι μικρότερα από 50 μέτρα ή μεγαλύτερα από 200 μέτρα.

Το πλάτος της ηπειρωτικής κρηπίδας ποικίλλει ανάλογα με την τεκτονική της περιοχής, αλλά γενικά είναι μεγάλο κι έχει μικρή κλίση. Η κρηπίδα αποτελεί περιθωριακό τμήμα του ηπειρωτικού φλοιού, καλύπτεται από θάλασσα και περιζώνει τις ηπείρους με πλάτος από 15 km (π.χ. Δ. Αφρική) έως και 100 km (π.χ. Σιβηρία). Θεωρείται πως κατά τις παγετώδεις περιόδους μετατρέπονταν σε ξηρά, ενώ μέσα σε αυτή μπορεί να παρατηρηθούν αβαθείς χαράδρες και χαμηλές ράχες.

Τα περιβάλλοντα της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας βρίσκονται σε μοναδική θέση για να καταγράψουν ορισμένες από τις πιο δυναμικές διεργασίες στον πλανήτη, όπως είναι η κλιματική μεταβλητότητα και οι ανθρωπογενείς τροποποιήσεις των παράκτιων συστημάτων. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο αυτές οι διεργασίες επηρέασαν την προσφορά και τη συσσώρευση ιζημάτων στην υφαλοκρηπίδα στο παρελθόν μπορεί να βοηθήσει στην πληροφόρηση για πιθανές μελλοντικές αλλαγές. Επιπλέον, η υφαλοκρηπίδα είναι η πιο πυκνοκατοικημένη περιοχή του θαλάσσιου πυθμένα. Παρά το γεγονός ότι οι περιοχές της υφαλοκρηπίδας αντιπροσωπεύουν μόλις το 8% των θαλάσσιων περιοχών του κόσμου, χρησιμοποιούνται περισσότερο για τη ναυσιπλοΐα, την αναψυχή, την αλιεία και την υδατοκαλλιέργεια, την εξερεύνηση ορυκτών πόρων, τη διάθεση αποβλήτων και, όλο και περισσότερο στο μέλλον, για την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας από κύματα, παλιρροϊκά ρεύματα και αιολική ενέργεια.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η υφαλοκρηπίδα με γεωλογικούς όρους διαφέρει από την «υφαλοκρηπίδα» όπως ορίζεται νομικά στους διεθνείς νόμους και συνθήκες (Emery, 1981). Στην τελευταία περίπτωση, με τον όρο «υφαλοκρηπίδα» εννοείται ολόκληρο το ηπειρωτικό περιθώριο (υφαλοκρηπίδα, καταφέρεια και ανάχωμα). Συνεπώς, και σύμφωνα με τη Σύμβαση του 1958 που αφορά το Διεθνές Δίκαιο της Θάλασσας, διατηρώντας αυστηρά νομική ορολογία, *ηπειρωτική κρηπίδα* είναι ο βυθός και το υπέδαφος των υποθαλάσσιων περιοχών

που εκτείνονται από τα χωρικά ύδατα μέχρι την ισοβαθή των 200 m, ή μέχρι εκεί που το βάθος της θάλασσας επιτρέπει την εκμετάλλευση του βυθού – ανεξάρτητα από τη γεωλογική μορφή του βυθού. Αργότερα, στη Σύμβαση του 1982, επιχειρήθηκε ο συγκερασμός γεωλογικών και νομικών ορισμών.

Μια υφαλοκρηπίδα εμφανίζει διακριτές υποζώνες. Αν και η ονοματολογία δεν είναι τυποποιημένη, η περιοχή μεταξύ της ζώνης κυματογής ή απόσβεσης και του ηπειρωτικού χείλους, χωρίζεται συνήθως σε τέσσερις μεγάλες περιοχές: (1) την επάκτια ζώνη, (2) την εσωτερική υφαλοκρηπίδα, (3) τη μεσαία υφαλοκρηπίδα και (4) την εξωτερική υφαλοκρηπίδα, καθεμία από τις οποίες έχει συγκεκριμένη γεωμορφολογία και θαλάσσια βιολογία.

Η *εσωτερική κρηπίδα* θεωρείται συνήθως ότι εκτείνεται προς τη θάλασσα μέχρι το σημείο όπου η ακτή δεν επηρεάζει πλέον σημαντικά την ανεμογενή κυκλοφορία. Η ένταση και η διάρκεια του ανέμου ανά πάσα στιγμή επηρεάζουν σημαντικά την απόσταση αυτή. Το πλάτος της είναι συνήθως μεταξύ 5 και 15 χιλιομέτρων. Οι κοραλλιογενείς ύφαλοι και άλλες ανθρακικές πλατφόρμες είναι κοινές στην εσωτερική υφαλοκρηπίδα σε χαμηλά γεωγραφικά πλάτη.

Τα περιβάλλοντα της εξωτερικής και της μεσαίας κρηπίδας επηρεάζονται επίσης από δυναμικές διεργασίες. Η *εξωτερική κρηπίδα* είναι μια περιοχή όπου τα συστήματα κυκλοφορίας των βαθιών ωκεανών και της υφαλοκρηπίδας αλληλοεπιδρούν σημαντικά. Στη *μεσαία κρηπίδα*, η κυκλοφορία ανταποκρίνεται στα περιορισμένα βάθη αλλά δεν κυριαρχείται από την αλληλεπίδραση με τα ωκεάνια ρεύματα ή την κυκλοφορία κοντά στην ακτή. Επειδή οι ηπειρωτικές κρηπίδες έχουν πλάτος περίπου 100 χιλιομέτρων, τα χαρακτηριστικά αυτών των υποζωνών είναι αρκετά μεταβλητά.

Οι ηπειρωτικές υφαλοκρηπίδες διακρίνονται επίσης με βάση την προέλευσή τους, τις κυρίαρχες διεργασίες και τη γεωγραφική τους θέση. Οι ηπειρωτικές υφαλοκρηπίδες είναι ευρείες και με χαμηλό ανάγλυφο στα περισσότερα μέρη του κόσμου όπου η ακτογραμμή είναι τεκτονικά σταθερή. Συχνά είναι απλώς βυθισμένες προεκτάσεις μεγαλύτερων παρακείμενων παράκτιων πεδιάδων.

Οι ηπειρωτικές υφαλοκρηπίδες, από την άλλη πλευρά, τείνουν να είναι στενές και απότομες στις έντονα τεκτονικά ενεργές περιοχές οι οποίες βρίσκονται κοντά σε παράκτιες οροσειρές.

Η στρωματογραφία της ηπειρωτικής κρηπίδας ενσωματώνει τόσο χερσαίες όσο και θαλάσσιες διεργασίες (Nittrouer, 1999). Συνήθως, τα χερσογενή ιζήματα διοχετεύονται στην κρηπίδα από ποτάμια και συχνά εξελίσσονται σε επόμενα στάδια απόθεσης, επανακινητοποίησης από κύματα και ρεύματα και επαναπόθεσης πριν από την τελική ταφή (Wright and Nittrouer, 1995). Ειδικά οι περιοχές της μέσης κρηπίδας βρίσκονται σε μοναδική θέση για να αποτελέσουν την τελική «δεξαμενή» για αυτό το ιζηματογενές υλικό που προέρχεται από την ξηρά και στη συνέχεια τροποποιείται από θαλάσσιες διεργασίες (π.χ. Traykovski et al., 2000; Puig et al., 2001). Ως αποτέλεσμα, μετά την απόθεση, τα ιζήματα αυτά διατηρούν ενδείξεις τόσο των χερσαίων διεργασιών που επηρέασαν την παροχή ιζημάτων όσο και των θαλάσσιων διεργασιών που επηρέασαν τη δευτερογενή μεταφορά και απόθεση.

Στις ηπειρωτικές υφαλοκρηπίδες, τα ιζηματογενή περιβάλλοντα και η απόθεση ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό. Υπάρχουν, ωστόσο, ορισμένες γενικές κατευθυντήριες γραμμές. Σε ορισμένες θέσεις, αργιλόδη ιζήματα εμφανίζονται σε όλη την έκταση της κρηπίδας, από την ακτή έως το ηπειρωτικό χείλος. Σε άλλες περιοχές, ολόκληρη η κρηπίδα καλύπτεται από αμμώδη ιζήματα, ενδεχομένως με τοπικές παρεμβολές ιλύος και αργίλου.

Πολλές ευρείες ηπειρωτικές υφαλοκρηπίδες, ιδίως εκείνες που βρίσκονται σε σταθερές τεκτονικές περιοχές, στερούνται πλέον ιζημάτων. Η ακτογραμμή σε αυτές τις περιοχές διακρίνεται από εκτεταμένες εκβολές ποταμών. Τα ιζήματα που μεταφέρονται από τα ποτάμια συσσωρεύονται στα στόμια των εκβολών. Οι αμμώδεις παρακείμενες ηπειρωτικές υφαλοκρηπίδες είναι το αποτέλεσμα της επανεπεξεργασίας προηγούμενων αποθέσεων. Οι προηγούμενες αποθέσεις σε πολλές περιπτώσεις αντιπροσωπεύουν παλιές παράκτιες διεργασίες από περιόδους χαμηλότερης στάθμης της θάλασσας. Στο άλλο άκρο του φάσματος, τα δέλτα ποταμών μπορεί να εκτείνονται κατά μήκος σύγχρονων κρηπιδωμάτων, «μολύνοντας» την προς τη θάλασσα πλευρά με ιζήματα από την ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα. Το δέλτα του ποταμού Μισισσιπή είναι ένα εξαιρετικό παράδειγμα.

### 7.5.1 Ιζηματογένεση κρηπίδας

Η *διαθεσιμότητα των ιζημάτων*, το *υδροδυναμικό καθεστώς* και οι *διακυμάνσεις της στάθμης της θάλασσας* επηρεάζουν τις ιζηματογενείς διεργασίες σε περιβάλλοντα υφαλοκρηπίδας (Nittrouer et al., 2007; Campos & Dominguez, 2010). Η αλληλεπίδραση αυτών των παραγόντων έχει ως αποτέλεσμα την αποτύπωση διαφορετικών προτύπων ιζηματογένεσης στην υφαλοκρηπίδα: οι σύγχρονες ιζηματογενείς αποθέσεις συγκεντρώνονται στην εσωτερική και μεσαία υφαλοκρηπίδα, ενώ οι υπολειμματικές και ανθρακικές ιζηματογενείς αποθέσεις συγκεντρώνονται στο εξωτερικό περιβάλλον της υφαλοκρηπίδας (Pinet, 2009).

Ο όγκος των ιζημάτων που φιλοξενεί μια κρηπίδα, εξαρτάται από τον ρυθμό υποθαλάσσιας απογύμνωσης, ο οποίος αυξάνεται, αναλογικά, με το ανάγλυφο του πυθμένα και σε συνάρτηση με το κλίμα. Σε περιοχές με μέτριες βροχοπτώσεις, η παραγωγή ιζημάτων είναι υψηλότερη, ενώ η βλάστηση καταστέλλει τη διάβρωση σε περιοχές με έντονες βροχοπτώσεις. Στις άνυδρες περιοχές δεν υπάρχει βλάστηση που να εμποδίζει τη διάβρωση, αλλά δεν υπάρχουν και αρκετά ποτάμια για να μεταφέρουν ιζήματα στον ωκεανό. Ομοίως, οι μικρές λεκάνες απορροής και οι χαμηλές κλίσεις δεν συμβάλλουν σημαντικά στην ιζηματογένεση των ωκεανών. Σε περιπτώσεις χαμηλού ρυθμού παροχής ιζημάτων, ευνοείται η ανάπτυξη ανθρακικής ιζηματογένεσης. Σε ψυχρότερα κλίματα, όπου η παραγωγή ανθρακικών υλικών είναι βραδύτερη, οι υφαλοκρηπίδες και οι ρηγές θάλασσες με χαμηλή παροχή χερσογενών ιζημάτων θεωρούνται ότι βρίσκονται σε στασιμότητα. Επειδή ο ρυθμός συσσώρευσης ιζημάτων είναι αργός αλλά μπορεί να υπερβαίνει τον ρυθμό βύθισης του πυθμένα, το περιβάλλον βαθαίνει σταδιακά με την πάροδο του χρόνου.

Η εισροή ιζημάτων στις λεκάνες και η απόθεσή τους εξαρτώνται από την ισορροπία μεταξύ του ρυθμού δημιουργίας διαθέσιμου χώρου στη λεκάνη και του ρυθμού ιζηματογένεσης, κατά την οποία είναι δυνατές τρεις καταστάσεις (Swift and Thorne, 1991): α) να υπάρχει ισορροπία μεταξύ των ρυθμών, β) ο ρυθμός δημιουργίας διαθέσιμου χώρου να υπερβαίνει τον ρυθμό προσφοράς ιζημάτων, οπότε υπάρχει *θαλάσσια επίκλυση*, και γ) ο ρυθμός προσφοράς ιζημάτων να ξεπερνά τον ρυθμό δημιουργίας διαθέσιμου χώρου, οπότε υπάρχει *θαλάσσια απόσυρση*.

Η κατανομή των ιζημάτων και το μέγεθος των σωματιδίων τους εξαρτώνται από το κλίμα, την εγγύτητα της πηγής και την ενέργεια των κυμάτων και των ρευμάτων που θα τα διαμορφώσουν στον πυθμένα σύμφωνα με διάφορες υδροδυναμικές διεργασίες (Nittrouer et al., 2007).

Άλλοι παράγοντες που επιδρούν στην ιζηματογένεση της ηπειρωτικής κρηπίδας είναι:

- ο χημισμός των υδάτων (παραγωγή αυθιγενών ορυκτών),
- οι διακυμάνσεις της θαλάσσιας στάθμης (ελέγχει την κατανομή των «υπολειμματικών» ιζημάτων),
- το είδος και η ένταση του υδραυλικού καθεστώτος της κρηπίδας («ενέργεια»),
- το είδος και ο ρυθμός ιζηματογένεσης,
- η επίδραση του βιόκοσμου (τροποποιεί τον πυθμένα).

Ειδικότερα για το κλίμα, όπως ήδη αναφέρθηκε, οι αλλαγές στις βροχοπτώσεις, και, ενδεχομένως, στην ενέργεια και τη συχνότητα των καταιγίδων, μπορεί να αφήσουν τη σφραγίδα τους στη στρωματογραφία και τη μορφολογία της κρηπίδας. Λόγω του υψηλού ρυθμού απόθεσης και της εγγύτητας με τις πηγές ιζημάτων, οι πυρήνες ιζημάτων που συλλέγονται στην υφαλοκρηπίδα είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι ακόμη και σε μικρές αλλαγές στο κλίμα. Ως αποτέλεσμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαφοροποίηση μεταξύ τοπικών και παγκόσμιων επιδράσεων, καθώς και για τη διάκριση μεταξύ ανθρωπογενών και φυσικών περιβαλλοντικών αλλαγών. Οι ευστατικές μεταβολές που προκαλούνται από το κλίμα ήταν ιδιαίτερα σημαντικές τα τελευταία 2 εκατομμύρια χρόνια, όταν ο συνδυασμός των αστρονομικά προκαλούμενων κύκλων ηλιακής ακτινοβολίας και της θέσης των χερσαίων μαζών (ιδίως στο βόρειο ημισφαίριο) προκάλεσε τη δημιουργία παγετώνων σε μεγάλα τμήματα της Βόρειας Αμερικής και της Ευρασίας και οδήγησε στη διακύμανση της στάθμης της θάλασσας με ταχείς ρυθμούς. Κατά συνέπεια, οι υφαλοκρηπίδες βίωσαν δραματικές περιβαλλοντικές αλλαγές, συμπεριλαμβανομένων επαναλαμβανόμενων κύκλων ανύψωσης και κατάδυσης, μετατόπισης της ακτογραμμής από το ηπειρωτικό χείλος προς το εσωτερικό άκρο του ηπειρωτικού περιθωρίου και επακόλουθης εναλλαγής ιζηματογένεσης και διάβρωσης, ίχνη των οποίων μπορούν να βρεθούν στη στρωματογραφία, τη μορφολογία και την παρουσία υπολειμματικών ιζημάτων σε μια υφαλοκρηπίδα.

Τα ιζήματα της κρηπίδας προέρχονται κυρίως από τη γειτονική χέρσο, ιδίως αν βρίσκονται πλησίον μεγάλων ποτάμιων συστημάτων. Υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση στις διεργασίες και τον τύπο των επικρατούντων ιζημάτων ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της γεωγραφικής περιοχής στην οποία βρίσκεται η υφαλοκρηπίδα.

Τα ιζήματα της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας τείνουν να περιέχουν ένα μείγμα τόσο βιογενών όσο και λιθογενών υλικών. Εάν η περιοχή γειτνιάζει με μια ανυψωμένη ηπειρωτική περιοχή και υπάρχει ένα σύστημα αποστράγγισης ποταμών που μεταφέρουν θραύσματα στην ακτή, η ιζηματογένεση σε ρηγά νερά θα κυριαρχείται από κλαστικές αποθέσεις χερσογενούς προέλευσης. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις κλαστικών ιζημάτων θα βρίσκονται κοντά στις εκβολές των μεγάλων ποταμών: οι παρακείμενες παράκτιες περιοχές θα τροφοδοτούνται επίσης με ιζήματα από την παράκτια μετακίνηση υλικού από κύματα, καταιγίδες και παλίρροιες. Οι ρηγές θάλασσες που δεν τροφοδοτούνται από χερσαία υλικά μπορεί να είναι περιοχές

ιζηματογένεσης ανθρακικών πετρωμάτων, ιδίως αν βρίσκονται σε χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη με σχετικά θερμό κλίμα.

Τα βιογενή ανθρακικά ιζήματα επικρατούν σε περιοχές με μεγάλη βιολογική παραγωγικότητα και περιορισμένη προσφορά χερσογενών ιζημάτων. Τα υπολειμματικά ιζήματα είναι αδρόκοκκα ιζήματα τα οποία πρωτογενώς δεν αποτέθηκαν σε θαλάσσιο περιβάλλον.

Η παροχή ιζημάτων στις υφαλοκρηπίδες αποτελεί θεμελιώδη ρυθμιστή των ρηχών θαλάσσιων περιβαλλόντων και των μορφών απόθεσης των υφαλοκρηπίδων και των επιηπειρωτικών θαλασσών. Ο ρυθμός ιζηματογένεσης στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα ποικίλλει ανάλογα με την περιοχή. Γενικά, όμως, η ιζηματογένεση στην υφαλοκρηπίδα είναι ταχύτερη από ό,τι στον βαθύ ωκεανό, παρόλο που οι διεργασίες ιζηματογένεσης στην υφαλοκρηπίδα επηρεάζονται κατά πολύ από τον παρακείμενο βαθύ ωκεανό.

Τα ιζήματα που συσσωρεύονται στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα διατρέχουν, με μορφή χιονοστιβάδας, τις ηπειρωτικές κατωφέρειες, δημιουργώντας ρεύματα θολερότητας ή τουρβιδιτικά ρεύματα τα οποία μεταφέρουν όγκους ιζημάτων μέχρι την αβυσσική πεδιάδα. Οι αποθέσεις αυτές καλούνται *τουρβιδίτες* και αποτελούνται από στρώματα, λιθογενούς προέλευσης, άμμου ενσωματωμένα με τα πιο τυπικά, λεπτόκοκκα ιζήματα της βαθιάς θάλασσας.

Τρεις κυρίαρχες διαδικασίες είναι υπεύθυνες για τη μεταφορά, την επεξεργασία και τη διαλογή ιζημάτων στις κρηπίδες. Ανάλογα με το ποια διεργασία επικρατεί οι κρηπίδες διακρίνονται σε:

- Κρηπίδες υπό την επίδραση θύελλας και κύματος οι οποίες καταλαμβάνουν το 80% της παγκόσμιας κατανομής ιζημάτων κρηπίδας.
- Κρηπίδες υπό την επίδραση παλίρροιας οι οποίες καταλαμβάνουν το 17% της παγκόσμιας κατανομής ιζημάτων κρηπίδας.
- Κρηπίδες υπό την επίδραση ωκεάνιων ρευμάτων οι οποίες καταλαμβάνουν το 3% της παγκόσμιας κατανομής ιζημάτων κρηπίδας.

## 7.6 Περιβάλλοντα βαθιάς θάλασσας

Αν και οι βαθιές ωκεάνιες λεκάνες αποτελούν τις μεγαλύτερες περιοχές συσσώρευσης ιζημάτων στη Γη, είναι από τις λιγότερο προσβάσιμες, με αποτέλεσμα ο προσδιορισμός των φάσεων βαθιών υδάτων να είναι συχνά προβληματικός και δύσκολος. Στα ρηχά περιβάλλοντα (βάθος < 200 m), τα κύματα, οι παλίρροιες και τα ρεύματα καταιγίδας επεξεργάζονται το ίζημα για να δημιουργήσουν χαρακτηριστικά που απουσιάζουν σε μεγαλύτερα βάθη. Ως εκ τούτου, οι ενδείξεις για απόθεση σε μεγάλα βάθη, τις περισσότερες φορές, βασίζονται στην απουσία των δομών που εντοπίζονται σε ρηχά νερά και στον εντοπισμό θετικών δεικτών βαθιών υδάτων (Nichols, 2009).

Το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας της Γης καλύπτεται από ωκεανούς, οι οποίοι σχηματίστηκαν από την εξάπλωση του θαλάσσιου πυθμένα και καλύπτονται από πυκνό βασαλτικό φλοιό. Τα κέντρα εξάπλωσης, όπου το καυτό βασαλτικό μάγμα εξέρχεται στον πυθμένα της θάλασσας και αρχίζει να ψύχεται, εμφανίζονται κατά μήκος της μεσοωκεάνιας ράχης και βρίσκονται χιλιόμετρα κάτω από την επιφάνεια των ωκεανών μας. Καθώς το θερμό υλικό ψύχεται, γίνεται πυκνότερο και βυθίζεται σε σχέση με τον νεότερο, θερμότερο φλοιό. Αυτή η σχέση νεαρού, θερμού φλοιού κοντά στα κέντρα εξάπλωσης, και παλαιού, ψυχρού φλοιού κατά μήκος της ωκεάνιας περιμέτρου, έχει αναπτύξει ένα χαρακτηριστικό προφίλ στον πυθμένα των ωκεανών, με επικλινείς επιφάνειες και αυξανόμενο βάθος απομακρυνόμενοι από τα κέντρα εξάπλωσης (Nichols, 2009).

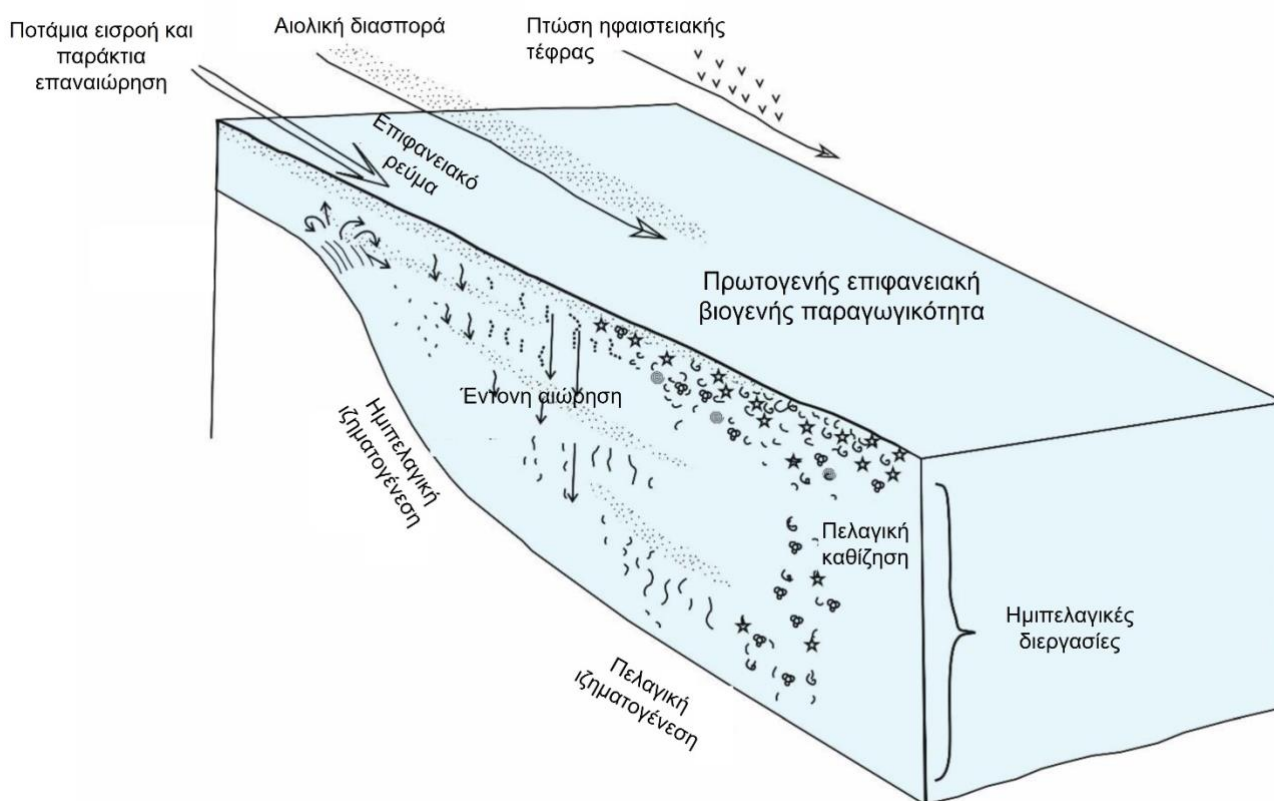
Οι ωκεανοί συνδέονται με τον ηπειρωτικό φλοιό, ο οποίος συνεισφέρει τεράστιους όγκους ιζημάτων στις ωκεάνιες λεκάνες και συγκεντρώνει μεγάλα συστήματα κλαστικών αποθέσεων κοντά στο περιθώριο των ηπείρων (Nichols, 2009). Οι εκτεταμένες περιοχές που καλύπτονται από βασαλτικό ωκεάνιο φλοιό, παρέχουν χώρο για την απόθεση ιζημάτων που απομακρύνονται από τα ηπειρωτικά περιθώρια και υπερκαλύπτονται από ωκεάνιο νερό βάθους έως και χιλιομέτρων.

*Τουρβιδιτικά ρεύματα* και *ροές κορημάτων* μεταφέρουν θραύσματα από την ηπειρωτική κατωφέρεια στον βαθύ ωκεανό. Η σκόνη που μεταφέρουν ο άνεμος, η τέφρα, τα λεπτά σωματίδια, καθώς και τα κελύφη και οι σκελετοί νεκρών θαλάσσιων οργανισμών, αποτελούν επίσης πηγές ιζημάτων σε βαθιά θαλάσσια ύδατα (Nichols, 2009). Ειδικότερα, στη βαθιά θαλάσσια λεκάνη η διαδικασία ιζηματογένεσης πραγματοποιείται μέσα από την αργή και σταθερή καθίζηση βιογενών θραυσμάτων παραγόμενων κατά κύριο λόγο στα ανώτερα στρώματα της θάλασσας στήλης, όπου πραγματοποιείται φωτοσύνθεση. Το υλικό αυτό που καθιζάνει περιλαμβάνει μικροσκοπικά σκελετικά θραύσματα ασβεστιτικής και πυριτικής πλαγκτονικής πανίδας και

χλωρίδας, όπως επίσης και τον μαλακό οργανικό ιστό τους. Αυτό σε κάποιες περιοχές μπορεί να συμπληρωθεί από λεπτόκοκκη ηφαιστειακή τέφρα, σκόνη από αιολική μεταφορά και πηλό χερσογενούς προέλευσης. Όταν απουσιάζουν θαλάσσια ρεύματα και η περιοχή δεν επηρεάζεται από άλλες διεργασίες, όπως τουρβιδιτικά ρεύματα, οι κόκκοι καθιζάνουν κάθετα με την επίδραση της βαρύτητας.

Συνεπώς, η ιζηματογένεση στη βαθιά θάλασσα περιλαμβάνει (Εικόνα 7.13):

- το χερσογενές κλαστικό ίζημα που μέσω της υφαλοκρηπίδας μεταφέρεται κυρίως με ροές βαρύτητας,
- το χερσογενές ίζημα που μεταφέρεται με τον αέρα,
- το διαλυμένο φορτίο που μεταφέρεται με τα ποτάμια και δεσμεύεται από τους οργανισμούς που αποτελούν τη βιολογική συνεισφορά στην ιζηματογένεση και στη συμπλοκοποίηση διαλυμένου φορτίου με τη χημική ιζηματογένεση.



**Εικόνα 7.13** Ωκεάνιες ημιτελαγικές και πελαγικές διεργασίες. Καθορισμός της προσφοράς ιζήματος από χερσαίες και βιολογικές πηγές, καθώς και της διασποράς και της καθίζησής του στη στήλη του νερού (από Dorrik Stow and Zeinab Smillie, CC BY-SA 4.0 πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=112787823> ).

Το κύριο πρόβλημα της έρευνας που αφορά την ιζηματογένεση βαθιών υδάτων, είναι ότι, αν και τα σύγχρονα συστήματα είναι εύκολο να εντοπιστούν, λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας, είναι εξαιρετικά δύσκολο να προσεγγιστούν. Η μελέτη των βαθιών ωκεανών εξαρτάται επομένως σε μεγάλο βαθμό από τις βαθυμετρικές έρευνες, τα σόναρ και τις έρευνες σεισμικής ανάκλασης.

### 7.6.1 Διαδικασίες απόθεσης και φάσεις

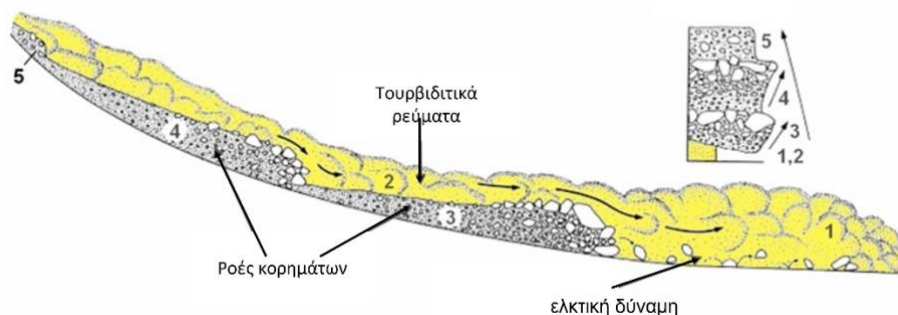
Οι ωκεάνιες αποθέσεις αποτελούνται συνήθως από μη στερεοποιημένα, χαλαρά ιζήματα που αποτίθενται στον πυθμένα του ωκεανού, από διάφορες πηγές και με διάφορες διεργασίες. Τα ποτάμια, οι άνεμοι, οι ηφαιστειακές εκρήξεις και οι θαλάσσιοι οργανισμοί μπορούν να μεταφέρουν ωκεάνια ιζήματα. Πράγματι, τα φυτά και τα ζώα συμβάλλουν στη μεταφορά και την απόθεση των ωκεάνιων ιζημάτων. Το πάχος αυτών των αποθέσεων ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό μεταξύ των ωκεανών. Οι ωκεάνιες αποθέσεις μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τη σύνθεση, την πηγή, τη μεταφορά και την κατανομή τους, αλλά γενικά χωρίζονται σε δύο κύριους τύπους με βάση τη χωροθέτησή τους στον ωκεανό: τις χερσογενείς αποθέσεις και τις πελαγικές αποθέσεις.



### 7.6.1.1 Αποθέσεις ροών κορημάτων και τουρβιδίτες

Η μεταφορά και η απόθεση κλαστικών υλικών στον βαθύ ωκεανό επιτυγχάνονται κυρίως μέσω της μετακίνησης μάζας υλικών από ροές κορημάτων και τουρβιδιτικά ρεύματα (Εικόνα 7.14).

Η κίνηση ενός μείγματος φτωχά ταξινομημένων ιζημάτων κατά μήκος της ηπειρωτικής κατωφέρειας και προς τον πυθμένα της λεκάνης, συνιστά μια *ροή κορημάτων*. Η ροή κορημάτων είναι ένα μείγμα νερού και σωματιδίων που κινείται κατά μήκος μιας κατωφέρειας, λόγω της βαρύτητας. Συνήθως αποτελείται από ασταθή, ανομοιομορφα μείγματα λασπώδους νερού και υψηλών συγκεντρώσεων θραυσμάτων πετρωμάτων διαφορετικών σχημάτων και μεγεθών. Κατά τη διέλευσή της κατά μήκος της κατωφέρειας, η ροή κορημάτων συσσωρεύει μεγάλες ποσότητες υλικού το οποίο το μεταφέρει με υψηλές ταχύτητες.



**Εικόνα 7.14** Διεργασίες ιζηματογένεσης σε περιβάλλοντα βαθέων υδάτων και προκύπτουσα ιζηματογενής ακολουθία φάσεων (πηγή: <https://geologyistheway.com/sedimentary/turbidity-currents/>).

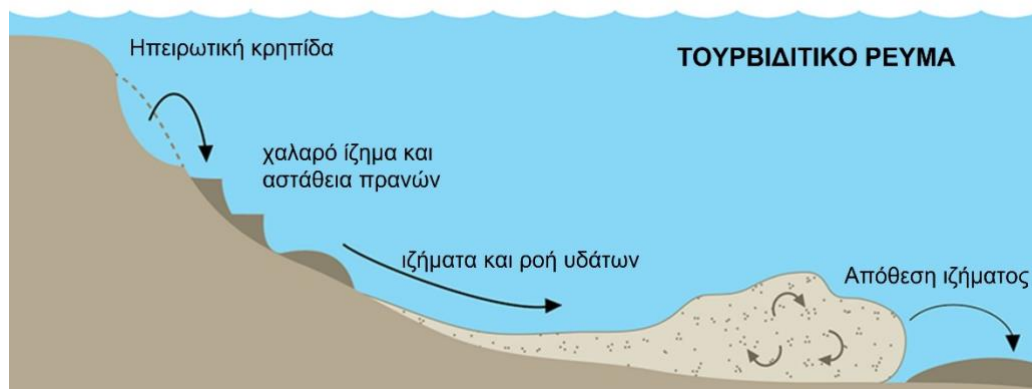
Οι υποθαλάσσιες ροές κορημάτων διακρίνονται σε *ροές με συνοχή* (συνεκτικές ροές) και *ροές χωρίς συνοχή*, καθώς η συνεκτικότητα της κύριας μάζας επηρεάζει τη συμπεριφορά της ροής και τα χαρακτηριστικά της προκύπτουσας ιζηματογενούς απόθεσης (Mulder and Alexander, 2001). Οι ροές αυτές αποτελούν μέρος ενός φάσματος ροών υποθαλάσσιων κορημάτων, που κυμαίνονται από συνεκτικές ροές κορημάτων, μέσω ροών κορημάτων χωρίς συνοχή, έως τυρβώδεις ροές.

Η συνεκτικότητα στις υποθαλάσσιες ροές κορημάτων προκύπτει όταν υπάρχει άργιλος στην κύρια μάζα: όταν αναμειγνύεται με νερό, το υλικό της αργιλικής κύριας μάζας δρα ως ρευστό που αναπτύσσει δυνάμεις συνοχής. Σε ροές κορημάτων χωρίς συνοχή, οι κόκκοι υποστηρίζονται από έναν ή περισσότερους από τους ακόλουθους μηχανισμούς κατά τη μεταφορά: (1) *πίεση διασποράς*, η οποία είναι η συνιστώσα της ανοδικής πίεσης που ασκείται από παρακείμενους κόκκους που υφίστανται διασπορά, (2) *φαινόμενα άνωσης*, όπου η πυκνότητα της περιβάλλουσας κύριας μάζας καθιστά τους κόκκους ελαφρύτερους από ό,τι θα ήταν στο νερό-ή/και (3) *υγροποίηση και ρευστοποίηση*, η οποία είναι η προσωρινή αιώρηση ή η ανοδική κίνηση των κόκκων από διαφεύγον ρευστό (Nemec, 1990).

Τα *τουρβιδιτικά ρεύματα* δημιουργούνται όταν τα πλούσια σε νερό κλαστικά ιζήματα αποσταθεροποιούνται, για παράδειγμα εξαιτίας μιας υποθαλάσσιας κατολίσθησης, και αρχίζουν να κινούνται κατάντη, στο υποθαλάσσιο περιβάλλον. Καθώς το ίζημα αρχίζει να ολισθαίνει στον πυθμένα της θάλασσας, ενσωματώνει και άλλο νερό και σταδιακά χάνει τη συνοχή του, μετατρέποντάς το σε μείγμα νερού και αιωρούμενων σωματιδίων που κινούνται μαζί σαν μια ροή πυκνότητας η οποία μπορεί να μεταφέρει, με μεγάλη ταχύτητα, τεράστιες ποσότητες χαλαρού υλικού. Κατά τη διάρκεια της ροής των τουρβιδιτικών ρευμάτων, συχνά δημιουργείται το «*φαινόμενο χιονοστιβάδας*», καθώς αναδύεται το υπόστρωμα πάνω από το οποίο ρέουν και συγκεντρώνουν ακόμη περισσότερα ιζηματογενή σωματίδια στο πέρασμά τους (Εικόνα 7.15). Το πέρασμά τους δημιουργεί αλλοιώσεις και διαβρώσεις στον πυθμένα πάνω από τον οποίο ρέουν. Μόλις ένα ωκεάνιο τουρβιδιτικό ρεύμα φτάσει στα πιο ήρεμα νερά της πιο επίπεδης περιοχής της αβυσσικής πεδιάδας (κύριος ωκεάνιος πυθμένας), τα σωματίδια που μεταφέρονται από το ρεύμα, καθιζάνουν. Η ιζηματογενής απόθεση που δημιουργείται τότε ονομάζεται *τουρβιδίτης*.

Τα τουρβιδιτικά ρεύματα είναι αρκετά διαφορετικά από τις άλλες ροές βαρύτητας, όπως είναι οι κατολισθήσεις ή οι καταπτώσεις, οι οποίες τερματίζονται όταν η κλίση (άρα και η επίδραση της βαρύτητας) εκλείπει. Τα τουρβιδιτικά ρεύματα είναι ροές πυκνότητας που οδηγούνται από τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ του τυρβώδους νερού, που είναι εμπλουτισμένο με ιζήματα, και του περιβάλλοντος θαλάσσιου νερού. Για τον λόγο αυτό, μπορούν να ταξιδεύουν στον βυθό της θάλασσας για δεκάδες έως εκατοντάδες χιλιόμετρα, με ταχύτητες όπως 10 έως 30 km/h, πριν σταματήσουν.

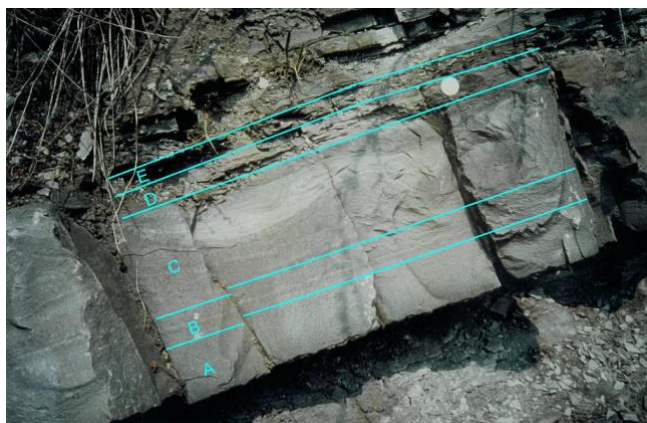
Τα υποθαλάσσια τουρβιδιτικά ρεύματα χαρακτηρίζονται από ένα σαφώς καθορισμένο μέτωπο προέλασης, γνωστό και ως *κεφαλή* του ρεύματος, και ακολουθούνται από το κύριο σώμα και την ουρά του ρεύματος. Προκαλούνται κυρίως από σεισμούς, ηφαιστειακές δραστηριότητες, καταγίδες, τσουνάμι και άλλα ξαφνικά γεωλογικά φαινόμενα. Με την αύξηση της κλίσης της ηπειρωτικής κατωφέρειας, αυξάνεται η ταχύτητα του ρεύματος. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα της ροής, αυξάνεται η τουρβώδης κίνηση και το ρεύμα παρασύρει περισσότερα ιζήματα. Η αυξημένη ποσότητα ιζήματος αυξάνει την πυκνότητα του ρεύματος και συνεπώς αυξάνει ακόμη περισσότερο την ταχύτητά του.



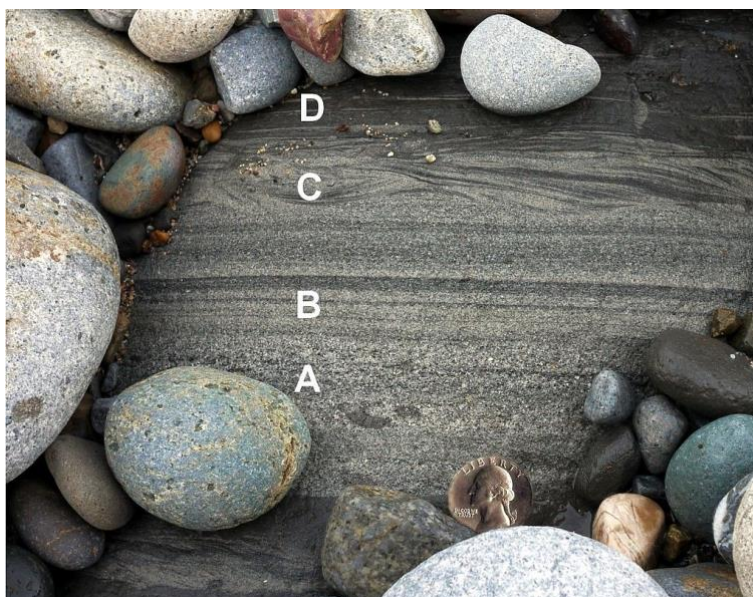
**Εικόνα 7.15** Διάγραμμα που απεικονίζει τη διαδικασία σχηματισμού και διάδοσης ενός τουρβιδιτικού ρεύματος (δημόσια χρήση από NOAA's National Ocean Service - NOAA Ocean Facts πηγή: <http://oceanservice.noaa.gov/facts/turbidity.html>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=48187901>).

Οι *τουρβιδίτες* περιγράφηκαν για πρώτη φορά στο πεδίο από τον Arnold H. Bouma (1962), ο οποίος όρισε αυτό που σήμερα ονομάζουμε *ακολουθία Bouma*, στα θαλάσσια ιζήματα βαθιών υδάτων. Ο Bouma αναγνώρισε ότι πολλά από τα στρώματα που ερευνούσε, αποτελούνταν από τυπικά τμήματα με ομοιογενείς δομές. Συγκεκριμένα, αναγνώρισε πέντε χαρακτηριστικά τμήματα, από τη βάση έως την κορυφή του τουρβιδίτη, τα οποία είναι (Εικόνες 7.16 και 7.17):

- A: συμπαγές διαβαθμισμένο στρώμα (η πιο αδρόκοκκη απόθεση),
- B: στρώμα με επίπεδη ελασματοειδή στρώση (υψηλής ενέργειας ροή),
- C: χαμηλής ροής συνιζηματογενείς ρυτιδώσεις με κυματοειδή ελασματοειδή στρώση,
- D: ελασματοειδώς ενστρωμένη ιλύς και
- E: ελασματοειδώς ενστρωμένη άργιλος.



**Εικόνα 7.16** Τουρβιδίτης με πλήρη ακολουθία Bouma, από Becke-Oese, ηλικίας Δεβονίου, στη Γερμανία, (πηγή: Jo Weber - CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3278639>).



**Εικόνα 7.17** Στρώματα Bouma A, B, C και D σε έναν τουρβιδίτη από τον Κρητιδικό σχηματισμό Pigeon Point, Pescadero Beach, Καλιφόρνια (από Mikesclark CC BY-SA 3.0, πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27065538>).

Η ερμηνεία αυτής της διάταξης σχετίζεται με την προοδευτική μείωση της ταχύτητας που παρουσιάζουν τα τουρβιδιτικά ρεύματα, καθώς μετακινούνται προς την αβυσσική πεδιάδα.

Όταν το τουρβιδιτικό ρεύμα δεν είναι πλέον αρκετά γρήγορο, ώστε να συγκρατήσει όλο το ιζηματογενές φορτίο του σε τυρβώδη αιώρηση, οι αδρομερέστεροι κόκκοι αρχίζουν να αποτίθενται όλοι μαζί, δημιουργώντας το πρώτο διαβαθμισμένο στρώμα (A). Η λεπτόκοκκη άμμος μπορεί να συνεχίσει να κινείται, ενώ εξακολουθεί να υπάρχει ρεύμα που ρέει, και να επιταχύνει προς τα κατάντη, σχηματίζοντας μια απόθεση με παράλληλη στρώση (B), η οποία, ακολουθείται από διασταυρούμενη στρώση με ρυτιδώσεις και αναρριχητικές ρυτιδώσεις (C). Η στρωματοποιημένη λεπτόκοκκη ιλύς και άργιλος (D) αποτίθεται όταν η ροή είναι πολύ αργή και σχεδόν έχει σταματήσει. Τέλος, το στρώμα E εναποτίθεται όταν το τουρβιδιτικό ρεύμα έχει πλέον σταματήσει και τα αργιλικά σωματίδια που παρέμειναν αιωρούμενα στο νερό αρχίζουν σιγά-σιγά να καθιζάνουν. Αυτό το στρώμα αντιπροσωπεύει επίσης το ενδιάμεσο στρώμα μεταξύ δύο τουρβιδιτικών γεγονότων, καθώς περιέχει την άργιλο που αποτίθεται αργά από τη στήλη του νερού σε υποθαλάσσια περιβάλλοντα. Επομένως, ενώ τα στρώματα A έως D αντιπροσωπεύουν ένα ενιαίο γεγονός που μπορεί να συνέβη σε λιγότερο από λίγες ώρες, το στρώμα E μαρτυρεί τόσο την απόθεση άργιλου από την «ουρά» του τουρβιδίτη όσο και την αργή πελαγική αργιλική απόθεση από τη στήλη του νερού που λαμβάνει χώρα μεταξύ ενός τουρβιδιτικού γεγονότος και του επόμενου.

Η προκύπτουσα αρχιτεκτονική ενός τουρβιδίτη χαρακτηρίζεται από μια ακολουθία με ιζήματα που είναι προοδευτικά όλο και πιο λεπτόκοκκα προς την κορυφή, ως αποτέλεσμα της μείωσης της ταχύτητας και της ενέργειας της ροής.

### 7.6.1.2 Πελαγική και ημιπελαγική ιζηματογένεση

Τα ιζήματα στο βαθύ θαλάσσιο περιβάλλον, εκτός από τα ιζήματα μαζικής ροής, όπως οι τουρβιδίτες και οι ροές κορημάτων, ταξινομούνται σε *πελαγίτες* και *ημιπελαγίτες*.

Τα *πελαγικά ιζήματα* αποτελούνται από χερσογενή σκόνη που μεταφέρεται με τον άνεμο, κυρίως άργιλο και μερικά σωματίδια μεγέθους ιλύος, πολύ λεπτή ηφαιστειακή τέφρα από μεγάλες εκρήξεις και αερομεταφερόμενα σωματίδια από πυρκαγιές, κυρίως μαύρο άνθρακα (για λεπτομέρειες των διεργασιών πελαγικής ιζηματογένεσης βλ. Εικόνα 7.13). Περιέχουν επίσης βιοκλαστικό υλικό, το οποίο θα μπορούσε να είναι τα υπολείμματα ασβεστολιθικών οργανισμών, όπως τρηματοφόρα και κοκκολιθοφόρα, καθώς και πυριτικά κελύφη από ακτινόζωα και διάτομα. Όλα αυτά τα σωματίδια βρίσκονται στο νερό του ωκεανού σε αιώρηση, μετακινούμενα από τα επιφανειακά ρεύματα, αλλά όταν φτάνουν σε πιο ήρεμα, βαθύτερα νερά, εναποτίθενται σταδιακά κατά μήκος της υδάτινης στήλης για να αποτεθούν, τελικά, στον πυθμένα.

Η αερομεταφερόμενη σκόνη, η οποία προέρχεται από περιοχές της ερήμου, είναι η πηγή του χερσαίου κλαστικού υλικού. Ως αποτέλεσμα, τα σωματίδια οξειδώνονται και τα ιζήματα που προκύπτουν έχουν συνήθως

σκούρο κοκκινωπό-καφέ χρώμα. Αυτές οι «ερυθρές άργιλοι» αποτελούνται από 75% έως 90% αργιλικά ορυκτά και έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο και μαγγάνιο.

Οι πελαγικές άργιλοι συσσωρεύονται αργά, συνήθως 1 έως 5 mm/έτος, που σημαίνει ότι ένα μέτρο ιζηματος μπορεί να χρειαστεί έως και ένα εκατομμύριο χρόνια συνεχούς ιζηματογένεσης.

Τα *πελαγικά βιογενή ιζήματα* είναι ο πιο άφθονος τύπος στους σύγχρονους ωκεανούς. Τα σκληρά μέρη μικροσκοπικών ασβεστολιθικών οργανισμών (πλαγκτονικά τρηματοφόρα και κοκκολιθοφόρα) είναι οι πρωταρχικοί τροφοδότες των λεπτόκοκκων ανθρακικών ιλύων που σχηματίζουν τις αποθέσεις στον πυθμένα της θάλασσας. Τα σκληρά, ασβεστολιθικά μέρη αυτών των θαλάσσιων οργανισμών μπορούν να αποθέσουν λεπτή ασβεστιτική ιλύ, στον πυθμένα των ωκεανών, η οποία συσσωρεύεται με ρυθμούς που κυμαίνονται από 3 έως 50 mm/kyr (Einsele, 2000). Η βιωσιμότητα του ασβεστολιθικού υλικού επηρεάζεται επίσης από τη σχετική *θερμοκρασία* και την *παροχή θρεπτικών ουσιών*. Τα περισσότερα βιογενή πελαγικά υλικά είναι επομένως λεπτόκοκκα, αλλά τα κελύφη ή οι σκελετοί μεγάλων οργανισμών που κολυμπούν, όπως τα κεφαλόποδα, και τα οστά υδρόβιων ζώων, μπορούν περιστασιακά να ενσωματωθούν σε ιζηματογενή σύνολα βαθιάς θάλασσας και να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του βάθους. Πελαγικοί ασβεστόλιθοι σχηματίζονται όταν η ασβεστιτική ιλύς λιθοποιείται.

Τα πελαγικά ιζήματα συσσωρεύονται σε περιοχές όπου δεν επικρατούν ιζήματα από άλλες πηγές, συνεπώς, είναι λιγότερο σημαντικά κατά μήκος των ηπειρωτικών περιθωρίων, λόγω της συμβολής των ιζημάτων που προέρχονται από την ξηρά, ενώ πιο μακριά από το περιθώριο, είναι πιο σημαντικά λόγω της σχετικής έλλειψης τυπικών χερσογενών θραυσμάτων (Nichols, 2009).

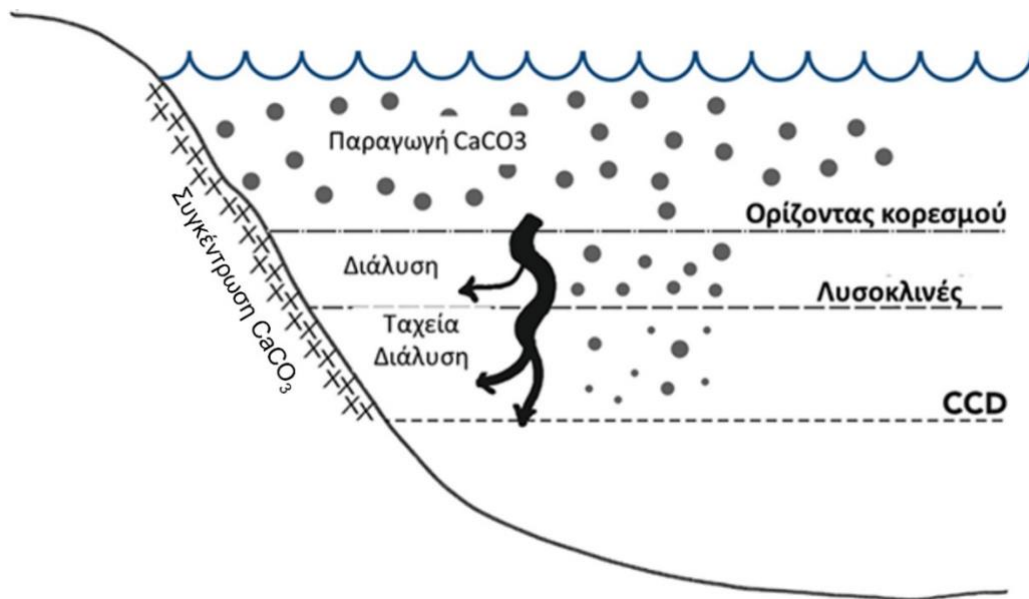
Υπάρχουν δύο κύριοι παράγοντες που ελέγχουν τη φύση και κατανομή των πελαγικών ιζημάτων. Αυτοί είναι η *διαλυτοποίηση* και η *παραγωγικότητα*. Οι ωκεανοί είναι τεράστιοι ταμειντήρες CO<sub>2</sub> το οποίο συσσωρεύουν στο εσωτερικό των ανθρακικών ιζημάτων τους.

Η *διαλυτοποίηση του ανθρακικού ασβεστίου* (Εικόνα 7.18) στα πελαγικά ιζήματα εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία όσο και από την πίεση. Οι υψηλότερες πιέσεις και οι χαμηλότερες θερμοκρασίες επιτρέπουν τη διάλυση περισσότερου ανθρακικού ασβεστίου στην ίδια μάζα νερού. Το *βάθος αντιστάθμισης του ασβεστίτη - CCD*, το βάθος στο οποίο ο ασβεστίτης θα έχει διαλυθεί πλήρως, είναι ~4.000 m (Nichols, 2009). Κάτω από το βάθος αντιστάθμισης του ασβεστίτη, οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που σχετίζονται με το βάθος οδηγούν σε συγκεντρώσεις διοξειδίου του πυριτίου, το οποίο είναι λιγότερο διαλυτό, και αργιλικών ορυκτών. Συνεπώς, πάνω από το βάθος αντιστάθμισης του ασβεστίτη, οι ανθρακικές εκροές είναι σε θέση να σχηματίσουν ανθρακικούς ιλυόλιθους, ενώ κάτω από αυτό, οι πυριτικές εκροές σχηματίζουν κερατόλιθους. Σε τμήματα του ωκεανού που είναι αρκετά βαθιά, τα μόνα ιζήματα που αποτίθενται είναι πελαγικές άργιλοι, επειδή βρίσκονται κάτω από το βάθος αντιστάθμισης ασβεστίτη και πυριτίου, γεγονός που σημαίνει ότι ουσιαστικά όλο το υλικό έχει διαλυτοποιηθεί εκτός από αυτά τα ειδικά πελαγικά αργιλικά υλικά.

Επειδή ο αραγωνίτης είναι πιο διαλυτός από τον ασβεστίτη, το *βάθος αντιστάθμισης του αραγωνίτη* μπορεί να οριστεί υψηλότερα στη στήλη νερού από το βάθος αντιστάθμισης του ασβεστίτη.

Το *λυσοκλινές* είναι το βάθος στον ωκεανό που εξαρτάται από το βάθος αντιστάθμισης του ασβεστίτη (CCD), συνήθως γύρω στα 3,5 km, κάτω από το οποίο ο ρυθμός διάλυσης του ασβεστίτη αυξάνεται δραματικά λόγω του φαινομένου της πίεσης. Ενώ το λυσοκλινές είναι το ανώτερο όριο αυτής της μεταβατικής ζώνης κορεσμού του ασβεστίτη, το CCD είναι το κατώτερο όριο αυτής της ζώνης (Εικόνα 7.18).





**Εικόνα 7.18** Τυπική διατομή ωκεανού που δείχνει τη σχέση μεταξύ του ορίζοντα κορεσμού, του λυσοκλινούς και του βάθους αντιστάθμισης ανθρακικού (CCD) στον ωκεανό.

Η *παραγωγικότητα* αφορά τον ρυθμό παραγωγής βιομάζας στο νερό. Στις περισσότερες ωκεάνιες περιοχές το παραγόμενο οργανικό υλικό καταστρέφεται, κατά την καθίζησή του, με βακτηριδιακή οξείδωση. Συνήθως, σε βάθη μεταξύ 300-1.500m. όπου οξειδώνεται η οργανική ύλη παρατηρείται η ανάπτυξη μιας Ζώνης Ελάχιστου Οξυγόνου και ταυτόχρονα μια αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα και των θρεπτικών αλάτων (κυρίως νιτρικά και φωσφορικά). Όπου παρατηρείται ανάβλυση υδάτων (ανοδικά ρεύματα) προκαλούνται θεαματική αύξηση της παραγωγικότητας και εναπόθεση αυξημένων ποσοστών οργανικού άνθρακα στον βυθό. Ανάβλυση (upwelling) παρατηρείται στα ωκεάνια μέτωπα όπου διαφορετικές μάζες νερού συναντώνται, κυρίως γύρω από τον Ισημερινό και σε βόρεια και νότια γεωγραφικά πλάτη μεταξύ 50° και 60°. Οι ζώνες αυτές της αυξημένης παραγωγικότητας χαρακτηρίζονται από ιζήματα πλούσια σε βιογενές πυρίτιο (διατομίτες).

Τα θερμότερα νερά κοντά στον ισημερινό έχουν την υψηλότερη παραγωγικότητα βιογενούς υλικού, όπως και οι περιοχές με άφθονη παροχή θρεπτικών ουσιών, που παρέχονται από τα ωκεάνια ρεύματα. Σε αυτές τις περιοχές παρατηρείται μια συνεχής «βροχή» ασβεστολιθικού και, σε μικρότερο βαθμό, πυριτικού βιογενούς υλικού προς τον πυθμένα. Αυτή η «βροχή» είναι λιγότερο έντονη σε ψυχρότερες περιοχές ή σε περιοχές με μικρότερη παροχή θρεπτικών συστατικών.

Τα *ημιπελαγικά ιζήματα* αποτίθενται στο ηπειρωτικό περιθώριο και διαφέρουν από τα πελαγικά ιζήματα ως προς τη σύνθεσή τους. Ενώ τα πελαγικά ιζήματα αποτελούνται κυρίως από βιογενές υλικό που προέρχεται από οργανισμούς που ζουν στη στήλη του νερού ή στον πυθμένα και περιέχουν ελάχιστα έως καθόλου εδαφικά υλικά, τα *ημιπελαγικά ιζήματα*, ή ο *ημιπελαγίτης*, είναι ένας τύπος θαλάσσιου ιζήματος που αποτελείται από πηλό και κόκκους μεγέθους ιλύος, χερσογενούς προέλευσης αλλά ένα ποσοστό μέχρι 75% είναι βιογενούς προέλευσης.

Η σύνθεση των ημιπελαγικών ιζημάτων εξαρτάται από τη *βιολογική παραγωγικότητα*, τη *διαλυτοποίηση* και τη *διαθεσιμότητα* χερσογενούς ή άλλου ιζήματος. Το χερσογενές ίζημα μπορεί να είναι: 1) ποτάμιο ίζημα που μεταφέρεται από τη μάζα του γλυκού, ποτάμιου νερού, με αιώρηση, 2) λεπτόκοκκο ίζημα που επανα-αιωρείται λόγω των θυελλών που επικρατούν πάνω στην υφαλοκρηπίδα ή διαβρώνεται στην ακτή, 3) ίζημα που μεταφέρεται από τους επιπλέοντες πάγους, 4) ίζημα που μεταφέρεται με αιολικές διεργασίες, 5) ηφαιστειακή τέφρα.

Συμπληρωματικά, διάφοροι πολύπλοκοι μηχανισμοί ιζηματογένεσης, όπως η απόσπαση του λεπτόκοκκου νέφους των τουρβιδιτικών ρευμάτων πάνω στην επιφάνεια του ωκεάνιου πυκνοκλινούς<sup>7</sup>, μπορούν

<sup>7</sup> Το πυκνοκλινές είναι η ζώνη ή το στρώμα όπου η διαβάθμιση της πυκνότητας είναι μεγαλύτερη σε ένα υδάτινο σώμα. Ένα ωκεάνιο ρεύμα δημιουργείται από δυνάμεις όπως η θραύση των κυμάτων, οι διαφορές θερμοκρασίας και αλατότητας, ο άνεμος, το φαινόμενο Coriolis και οι παλίρροιες που προκαλούνται από τη βαρυτική έλξη των ουράνιων σωμάτων. Επιπλέον, οι φυσικές ιδιότητες σε ένα πυκνοκλινές που καθοδηγείται από διαβαθμίσεις πυκνότητας επηρεάζουν επίσης τις ροές και τα κατακόρυφα προφίλ στον ωκεανό. Αυτές οι αλλαγές μπορούν να συνδεθούν με τη μεταφορά θερμότητας, αλάτων και θρεπτικών ουσιών μέσω του ωκεανού, ενώ η διάχυση του πυκνοκλινούς ελέγχει τα ανοδικά ρεύματα.



να συνεισφέρουν ποσότητα λεπτόκοκκου χερσογενούς υλικού στην ημιπελαγική ιζηματογένεση. Όταν το λεπτόκοκκο ιζημα είναι σε αιώρηση στο νερό, διασκορπίζεται με τα ρεύματα και τελικά καθιζάνει. Μερικές αιωρήσεις ιζημάτων μπορεί να έχουν αρκετή πυκνότητα που θα τους επιτρέψει να καθιζάνουν σαν αργά κινούμενες ροές που μπορεί να φθάσουν μέχρι και τις βαθιές λεκάνες. Όταν συναντήσουν επιφάνειες πυκνοκλινούς τότε αποσπώνται και ρέουν πάνω στην επιφάνεια αυτή μέχρι ότου εξαντληθεί η ορμή τους, οπότε καθιζάνουν στον βυθό κάθετα. Ο μηχανισμός αυτός λέγεται *καταρράκτης αιώρησης*.

Η κατανομή των ημιπελαγικών ιζημάτων συνδέεται στενά με την τροφοδοσία του χερσογενούς ιζήματος. Οι ημιπελαγίτες κυριαρχούν σε πολλές ηπειρωτικές κατωφέρειες, σε ηπειρωτικές ή ημίκλειστες λεκάνες και σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Συχνά βρίσκονται ενδιαστρομένοι με τουρβιδίτες στα εξωτερικά ριπίδια και σε αβυσσικές λεκάνες.

Τα πελαγικά ιζήματα ή πελαγίτες και τα ημιπελαγικά ιζήματα ταξινομούνται με βάση τα περιεχόμενα βιογενή και χερσογενή ποσοστά. Ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε λιθογενές ή βιογενές υλικό, και συγκεκριμένα ποιο από τα δύο υπερβαίνει το 30% σε συμμετοχή, διακρίνονται σε *ερυθρές αργίλους* και βιογενείς λάσπες ή ιλύες, οι οποίες σύμφωνα με τη χημική σύστασή τους διακρίνονται σε *ανθρακικές και πυριτικές ιλύες*.

Ένα απλουστευμένο σχήμα προτάθηκε από τους Hay et al. (1984), βασισμένο στο τριγωνικό διάγραμμα ποσοστών του μη-βιογενούς, πυριτικού βιογενούς και ανθρακικού βιογενούς υλικού. Οι άργιλοι ή οι αργιλόλιθοι είναι λεπτόκοκκα ιζηματογενή πετρώματα με ποικίλες σχετικές αναλογίες χερσογενούς υλικού και βιογενή συστατικά. Ένα αργιλικό πέτρωμα με περιεχόμενο οργανικής ύλης υψηλότερο από τον μέσο όρο των θαλάσσιων πετρωμάτων, δηλαδή περίπου 0,5%, αναφέρεται ως *μαύρη άργιλος*. Η μαύρη άργιλος είναι επομένως ο γενικός όρος για οποιοδήποτε σκουρόχρωμο, λεπτόκοκκο, πλούσιο σε οργανική ύλη ιζημα. Σύμφωνα με τους Stow et al. (1996) κάθε μαύρη άργιλος είναι *ημιπελαγίτης*. Ασβεστόλιθοι που περιέχουν μαύρους κερατόλιθους και αφθονία οργανικού υλικού, είναι *πελαγίτες*, ενώ άλλοι είναι λεπτόκοκκοι *τουρβιδίτες*.

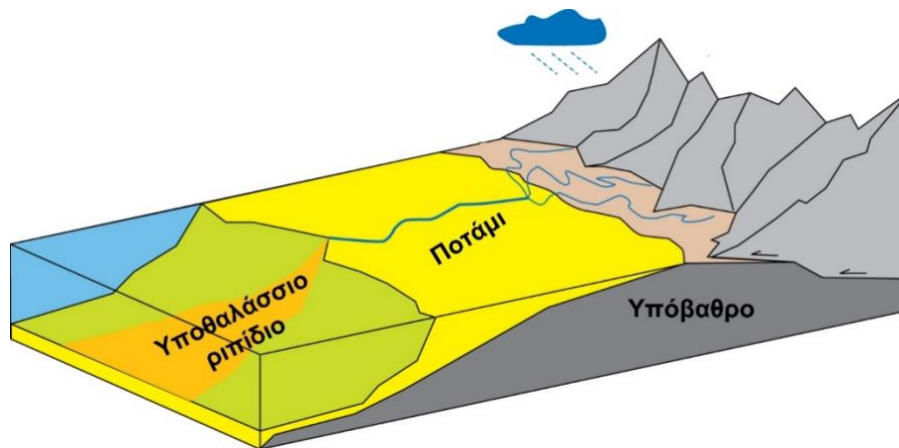
### 7.6.1.3 Υποθαλάσσια ριπίδια

Ο όρος «*υποθαλάσσιο ριπίδιο*» αναφέρεται γενικά σε αποθέσεις ποικίλων σχημάτων και μεγεθών, σε βαθιά θαλάσσια περιβάλλοντα. Τα κύρια στοιχεία των υποθαλάσσιων ριπιδίων είναι τα φαράγγια, τα κανάλια και οι λοβοί. Το μεγαλύτερο υποθαλάσσιο ριπίδιο στον κόσμο, γνωστό ως *ριπίδιο της Βεγγάλης*, έχει μήκος 3.000 km, πλάτος 1.430 km και άχος ιζημάτων 16,5 km, καταλαμβάνει όλο το μήκος του κόλπου της Βεγγάλης και καλύπτει έκταση 2.800-3.000 km<sup>2</sup>. Τα κλασικά μοντέλα τόσο των σύγχρονων υποθαλάσσιων ριπιδίων όσο και των παλαιών υποθαλάσσιων ριπιδίων παρουσιάζουν μια μορφολογία σε σχήμα βεντάλιας (ριπιδίου), με κανάλια και λοβούς που αποτελούνται από τουρβιδίτες.

Τα υποθαλάσσια ριπίδια είναι ξεχωριστές δομικές ιζηματογενείς γεωμορφές του θαλάσσιου βυθού που σχηματίζονται ανοικτά μιας κύριας πηγής τροφοδοσίας χερσογενούς κλαστικού ιζήματος, στη θάλασσα. Τέτοιες πηγές βρίσκονται είτε στην ακτογραμμή, όπως τα ποτάμια, τα δέλτα, τα αλλουβιακά ριπίδια, η προελαύνουσα «γλώσσα» των παγετώνων, είτε πέρα από την υφαλοκρηπίδα και την κλιτή, όπως τα Κάννυον, οι ρηματογενείς κοιλάδες και τάφροι που ξεκινούν από την εσωτερική κρηπίδα και τερματίζουν στη βάση της κατωφέρειας (Εικόνα 7.19).

Τα ιζήματα των ριπιδίων βαθιάς θάλασσας φέρουν φυσικές και χημικές ενδείξεις που αντικατοπτρίζουν τις συνθήκες υπό τις οποίες εξελίχθηκαν. Τα ριπίδια συνιστούν μεγάλης διάρκειας, καθαρής απόθεσης σωρούς από χερσογενή θραύσματα, σε ορισμένες περιπτώσεις άμεσα συνδεδεμένους με μια μεγάλη λεκάνη απορροής ποταμού.

Η επιφάνεια του ριπιδίου απαρτίζεται από ξεχωριστά αποθετικά περιβάλλοντα και η ανάπτυξη του αντανακλά την περίπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ των διεργασιών μεταφοράς της μάζας του ιζήματος και της αποθετικής τοπογραφίας της επιφάνειας του ριπιδίου.



**Εικόνα 7.19** Σχηματική απεικόνιση υποθαλάσσιου ριπίδιου  
(πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=35964521> ).

Όπως τα αλλουβιακά ριπίδια έτσι και τα υποθαλάσσια ριπίδια έχουν το σχήμα κώνου και γίνονται πιο λεπτόκοκκα προς την περιφέρεια του ριπίδιου.

Η μορφολογία και ο χαρακτήρας απόθεσης των συστημάτων υποθαλάσσιων ριπίδιων ελέγχονται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση του παρεχόμενου υλικού, ιδίως από τις αναλογίες χαλικιών, άμμου και ιλύος που υπάρχουν. Τα υποθαλάσσια ριπίδια είναι παρόμοια, από αυτή την άποψη, με άλλα συστήματα απόθεσης, όπως τα δέλτα, τα οποία επίσης παρουσιάζουν σημαντική μεταβλητότητα, ανάλογα με την κοκκομετρική κατανομή του παρεχόμενου υλικού. Να σημειωθεί ότι παρόλο που τα αδρόκοκκα δέλτα αναφέρονται μερικές φορές ως δελταϊκά ριπίδια και είναι σε μεγάλο βαθμό υποθαλάσσια, ο όρος «υποθαλάσσιο ριπίδιο» περιορίζεται σε γεωμορφές σε σχήμα ριπίδιου (βεντάλιας) που αποτίθενται από διεργασίες ροής μάζας, και συγκεκριμένα από τουρβιδιτικά ρεύματα.

Ένα υποθαλάσσιο ριπίδιο μπορεί να χωριστεί σε διάφορα «αρχιτεκτονικά στοιχεία»-συνιστώσες του συστήματος απόθεσης που είναι αποτέλεσμα διαφόρων διεργασιών απόθεσης. Τα κανάλια του υποθαλάσσιου ριπίδιου σχηματίζουν διακριτά στοιχεία στην επιφάνεια του ριπίδιου και μπορεί να έχουν αναχώματα που συνδέονται με αυτά: τα κανάλια αυτά μπορεί να εισχωρούν ή να περνούν από μακριά μέσα από τους λοβούς απόθεσης, οι οποίοι είναι πλατιά, ελαφρώς κυρτά σώματα ιζημάτων.

Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των υποθαλάσσιων ριπίδιων είναι τα χαρακτηριστικά της χερσαίας λεκάνης απορροής που τροφοδοτούν το ίζημα, η τεκτονική της λεκάνης απορροής και της λεκάνης εναπόθεσης του ριπίδιου, η φυσιογραφία της λεκάνης εναπόθεσης, οι διακυμάνσεις της στάθμης της θάλασσας, το γεωγραφικό πλάτος και το ρευματικό καθεστώς της περιοχής. Γενικά, σήμερα έχει επικρατήσει η διάκριση τεσσάρων τύπων υποθαλάσσιων ριπίδιων ανάλογα με την κοκκομετρία:

*Λεπτόκοκκα υποθαλάσσια ριπίδια:* είναι συνήθως τεράστια και τροφοδοτούνται από μεγάλο όγκο ιζήματος που έχει τη δυνατότητα να μεταφέρεται και να εναποτίθεται σε μεγάλες αποστάσεις με τουρβιδιτικά ρεύματα χαμηλής πυκνότητας.

*Πλούσια σε μεικτό φορτίο (άργιλος/άμμος) ριπίδια:* χαρακτηρίζονται από μεσαίου μεγέθους ριπίδια που κυμαίνονται από 1.200 km<sup>2</sup> έως 70.000 km<sup>2</sup> ενώ η ακτίνα τους κυμαίνεται μεταξύ 10-450 km. Το σχήμα του ριπίδιου, αν δεν παρεμποδίζεται από βυθομετρικά εμπόδια, είναι λοβοειδές παρά επίμηκες. Στο κατώτερο τμήμα του ριπίδιου, προς τη λεκάνη, επικρατεί η ημιπελαγική ιζηματογένεση.

*Πλούσια σε άμμο ριπίδια:* πρόκειται για ριπίδια ακτινικής ανάπτυξης, με ακτίνα 5-10 km. Η άμμος προέρχεται από τη γειτονική παράκτια ζώνη και την υφαλοκρηπίδα και μεταφέρεται στη λεκάνη με Κάνυον με δύο τρόπους: i) όταν η στάθμη της θάλασσας είναι χαμηλή, μικρά δελταϊκά συστήματα απελευθερώνουν με διεργασίες επαναϊζηματογένεσης μεγάλες ποσότητες άμμου, ii) κατευθείαν τροφοδοσία από μεταφορά ιζήματος κατά μήκος της ακτής. Τα τουρβιδιτικά ρεύματα που μετακινούν την άμμο συνήθως δεν ταξιδεύουν μακριά και εναποθέτουν την άμμο στο ανώτερο, προς τη χέρσο, ριπίδιο και σχηματίζουν ένα υπερριπίδιο.

*Ριπίδια κροκαλών:* συνιστούν το υποθαλάσσιο τμήμα των χονδρόκοκκων δελταϊκών ριπίδιων. Τα περισσότερα έχουν ακτίνα 1-5 km μέχρι 10 km και αναπτύσσονται σε τεκτονικά ενεργές ιζηματογενείς λεκάνες. Οι περιοχές που καλύπτουν τα ριπίδια αυτά κυμαίνονται από 1-50 km<sup>2</sup> με κλίσεις κλιτύων από 250 m/km (14°) μέχρι 20 m/km (1-2°) με μερικά ριπίδια βαθιάς θάλασσας να παρουσιάζουν τοπικές κλίσεις έως και 450 m/km (27°). Τα περισσότερα ριπίδια κροκαλών βαθιάς θάλασσας τροφοδοτούνται κατευθείαν από αλλουβιακούς κώνους και δελταϊκά ριπίδια. Οι μηχανισμοί ιζηματογένεσης περιλαμβάνουν κατολισθήσεις-ροές κορημάτων μάζας, τουρβιδιτικά ρεύματα και άλλες διεργασίες αστάθειας κλιτύων. Τα φαινόμενα που μεταφέρουν ίζημα στο ριπίδιο

κυμαίνονται από καταγιγίδες που διαρκούν μερικές ώρες ή ετήσιες πλημμύρες ή παγετώδεις διαδικασίες και συχνά η τεκτονική αστάθεια πυροδοτεί ροές μάζας ιζημάτων που εξελίσσονται σε βαρυτικές ροές.

#### 7.6.1.4 Βαθιές λεκάνες

Οι βαθιές λεκάνες χαρακτηρίζονται από επίπεδη ευρεία ανάπτυξη και τα βάθη τους κυμαίνονται από αρκετές εκατοντάδες έως χιλιάδες μέτρα. Συνήθως το ιζηματογενές τους κάλυμμα έχει πάχος από μερικές εκατοντάδες έως χιλιάδες μέτρα και το μεγαλύτερο πάχος ιζημάτων παρατηρείται στις λεκάνες με έντονη συνιζηματογενή καταβύθιση. Τοπογραφικές ανωμαλίες στις λεκάνες συνήθως απαλείφονται από την εναπόθεση τουρβιδιτών. Τα *αβυσσικά πεδία* αποτελούν έναν ειδικό τύπο λεκανών των οποίων ο βυθός εδράζεται σε ωκεάνιο βυθό και όπου οι αβυσσικοί λόφοι σκεπάστηκαν από την ιζηματογένεση. Έτσι, δεν περιλαμβάνουν τις τάφρους και τις μικρές λεκάνες που σχηματίζονται σε ενεργά ορογενή και τις μεσοωκεάνιες ράχεις. Παγκόσμια, διακρίνονται περίπου 75 αβυσσικές λεκάνες με βάθη που κυμαίνονται από 2.200-8.000 μέτρα και εκτάσεις που κυμαίνονται σε μέγεθος από την Αλβορική, στη Δυτική Μεσόγειο (έκτασης 2.600 km<sup>2</sup>) έως του Enderby στην Ανταρκτική (έκτασης 3.703km<sup>2</sup>). Η ύπαρξη υψηλών ρυθμών ιζηματογένεσης αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία και διατήρηση των αβυσσικών λεκανών.

Οι βαθιές λεκάνες συνήθως διακρίνονται χρησιμοποιώντας κριτήρια όπως: 1) σύσταση (π.χ. χερσογενής-βιογενής), 2) απομόνωση της λεκάνης (ανοιχτή, ημίκλειστη), 3) γεωμετρία του ιζηματογενούς καλύμματος, 4) βάθος, 5) τύπος ιζήματος. Σχετικά μικρές λεκάνες που περιβάλλονται από αμμώδη περιθώρια μπορεί να χαρακτηρίζονται από πελαγική και ημιπελαγική ιζηματογένεση γιατί τα τουρβιδιτικά ρεύματα δεν διεισδύουν βαθιά στη λεκάνη. Μεγάλες λεκάνες, όπως τα αβυσσικά πεδία, χαρακτηρίζονται από αλληπάλληλους τουρβιδίτες, με τα ημιπελαγικά διαστήματα να αποτελούν το 10-20% της ιζηματογενούς ακολουθίας.

Η συσσώρευση και κατανομή του ιζήματος είναι συνάρτηση : i) της φύσης του περιθωρίου της λεκάνης και της γειτνίασης με την ακτογραμμή, ιδιαίτερα με τη στάθμη της θάλασσας, ii) του τεκτονικού πλαισίου, όπου η λεκάνη και η γύρω περιοχή είναι σεισμικά ενεργές, iii) του ποσοστού του συστήματος των λεκανών απορροής που τροφοδοτούν με ιζήματα τη λεκάνη ιζηματογένεσης, iv) της διάταξης των σημείων εισόδου της τροφοδοσίας ιζήματος στη λεκάνη, όπως ακτινική, επιμήκης, μονόπλευρη οριζόντια κ.λπ.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των υποτροφοδοτούμενων σε ιζήματα λεκανών θεσπίστηκαν από τον Pilkey (1987), με βάση όμως σχετικά γεωγραφικά περιορισμένα στοιχεία. Γενικά κυριαρχούν οι τουρβιδίτες με τις οπισθοτόξιες λεκάνες να δέχονται σημαντικούς όγκους ηφαιστειοκλαστικών ιζημάτων. Η φύση των ριπιδίων και πλατφορμών με τη μορφή ράμπας που αναπτύσσονται περιφερειακά στις λεκάνες, ελέγχει την κοκκομετρία και την ποσότητα του ιζήματος. Σχετικά πλούσιες σε άμμο πηγές τροφοδοσίας όπως ο Ροδανός (στη Δυτική Μεσόγειο) εναποθέτουν άμμο τοπικά στην υφαλοκρηπίδα και οι τουρβιδίτες της γειτονικής αβυσσικής λεκάνης των Βαlearίδων περιέχουν στη βάση τους σχετικά μικρά ποσοστά άμμου. Τα πλούσια σε λεπτόκοκκο ιζήματα περιθώρια μπορεί να προσφέρουν τεράστιους όγκους ιζήματος. Στο αβυσσικό πεδίο του Hatteras, ο όγκος ενός τουρβιδίτη υπολογίζεται σε πάνω από 100 km<sup>3</sup>. Οι τουρβιδίτες γενικά εναποθέτουν το ιζήμα σε γλωσσοειδείς σχηματισμούς αλλά συχνά η άφιξη τουρβιδιτικών ροών από διαφορετικές κατευθύνσεις τροποποιεί το ιζηματογενές γέμισμα της λεκάνης. Η υφιστάμενη βυθομετρία της λεκάνης διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στον δρόμο ροής που ακολουθούν οι τουρβιδίτες, καθώς και στο πάχος τους. Ακόμα και στα επίπεδα αβυσσικά πεδία μια μικρή διαφοροποίηση 10-20 m προκαλεί αυξημένο πάχος εναπόθεσης τουρβιδιτών που οδηγεί σε τέλεια επιπέδωση του βυθού.

Στα αβυσσικά πεδία όπου υπάρχει υπερπροσφορά ιζήματος, όπως αυτό της Μαδέιρα, παρατηρείται μια σχετική διαφοροποίηση στις εναποτιθέμενες φάσεις. Η έκταση της παραπάνω λεκάνης, όπως ορίζεται από την ισοβαθή των 5.400m, είναι 68.000 km<sup>2</sup> και η λεκάνη απορροής-τροφοδοσίας είναι 3.360.000 km<sup>2</sup>. Οι τουρβιδίτες κυριαρχούνται από λεπτόκοκκο ιζήμα και εντάσσονται σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες που εγκολλώνουν την περιοχή και τον τύπο ιζήματος που μεταφέρουν: i) τουρβιδίτες πλούσιοι σε οργανικό υλικό με προέλευση από το Αφρικανικό περιθώριο, ii) τουρβιδίτες πλούσιοι σε ηφαιστειοκλαστικό ιζήμα προερχόμενοι από τα ηφαιστειακά νησιά των Κανάριων νησιών, iii) μικρότεροι τουρβιδίτες, πλούσιοι σε ανθρακικό ιζήμα προερχόμενοι από τα υποθαλάσσια βουνά, δυτικά του αβυσσικού πεδίου.

Τα τελευταία 300.000 χρόνια, 600 km<sup>3</sup> τουρβιδίτες, καθώς και 60 km<sup>3</sup> ημιπελαγικά ιζήματα εναποτέθηκαν στο αβυσσικό πεδίο της Μαδέιρα. Το πάχος κάθε τουρβιδίτη, στη λεκάνη αυτή, κυμαίνεται από λίγα εκατοστά έως πάνω από 5 μέτρα και οι όγκοι ιζήματος που κάθε τουρβιδίτης εναπόθεσε κυμαίνονται από 3,5 έως 190 km<sup>3</sup>. Η συχνότητα εναπόθεσης των τουρβιδιτών ήταν κάθε 20-30.000 χρόνια και η πυροδότηση των τουρβιδιτικών ροών σχετίζεται με τις μεταβολές της στάθμης της θάλασσας και τις κλιματικές αλλαγές.

## Βιβλιογραφία/Αναφορές

### Ξενόγλωσση

- Bird, E.C.F. (2003). *The World's Coasts: Online*. An Electronic Encyclopedia. Springer, Dordrecht.
- Bird, E.C.F. (2008). *Coastal Geomorphology: An Introduction* (2nd ed.). John Wiley & Sons, New York.
- Bourgeois, J., & Leithold, E. (1984). Wave-Worked Conglomerates—Depositional Processes and Criteria for Recognition. In: E.H. Koster & R.J. Steel (Eds.), *Sedimentology of Gravels and Conglomerates*, *Memories Canadian Society Petroleum Geologists*, Vol. 10, 331-343.
- Campos R.H.S., & Dominguez J.M.L. (2010). Mobility of sediments due to wave action on the continental shelf of the northern coast of the state of Bahia. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58(2) (2010), pp. 57-63.
- Clark, J.R. (1996). *Coastal Zone Management Handbook*. Lewis Publishers, Boca Raton.
- Clifton, H.E., Hunter, R.E., & Phillips, R.L. (1971). Depositional Structures and Processes in the Non-Barred, High-Energy Nearshore. *Journal of Sedimentary Petrology*, 41, 711-726.
- Einsele, G. (2000). *Sedimentary Basins, Evolution, Facies and Sediment Budget* (2nd ed.). Springer-Verlag, Berlin.
- Elliott, T. (1986). *Clastic Shorelines*. In: H.G. Reading (Ed.), *Sedimentary Environments and Facies*, Blackwell, Oxford, 113-154.
- Huggett, R.J. (2007). *Fundamentals of geomorphology*. Routledge, Taylor & Francis.
- IHO (2008). *Standardization of Undersea Feature Names: Guidelines Proposal form Terminology*, 4th ed. International Hydrographic Organisation and Intergovernmental Oceanographic Commission, Monaco, p. 32.
- Johns, D.R., Mutti, E., Rosell, J., & Seguret, M. (1981). Origin of a thick, redeposited carbonate bed in Eocene turbidites of the Hecho Group, south-central Pyrenees, Spain. *Geology*, 9, 161-164.
- Komar, P.D. (1998). *Beach Processes and Sedimentation* (2nd ed.). Prentice-Hall, Englewood-Cliffs.
- Masson, D.G. (1994). Late Quaternary turbidite current pathways to the Madeira Abyssal Plain and some constraints on turbidity current mechanisms. *Basin Research*, 6, 17-33.
- Masson, D.G., Kidd, R.B., Gardner, J.V., Huggett, Q.J., & Weaver, P.P.E. (1992). Saharan continental rise: facies distribution and sediment slides. In: C.W. Poag & P.C. Graciansky (Eds.), *Geologic Evolution of Atlantic Continental Rises*. Van Nostrand Reinhold, New York; 327-343.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy*. Wiley and Sons, New York, 225-246.
- Nittrouer, C. A. (1999). STRATAFORM: overview of its design and synthesis of its results. *Mar. Geol.* 154, 3-12. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(98\)00128-5](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(98)00128-5)
- Nittrouer, C.A., Austin, J.A., Field, M.E., Kravitz, J.H., Syvitski, J.P.M., & Wiberg P.L. (Eds.) (2007). *Continental margin sedimentation: from sediment transport to sequence stratigraphy*. Blackwell Publishing. International Association of Sedimentologists. Special Publication, 37, Malden.
- Pauley, J.C. (1995). Sandstone megabeds from the Tertiary of the North Sea. In: A.J. Hartley & D.J. Prosser (Eds.), *Characterization of Deep Marine Clastic Systems*. Special Publication 94, Geological Society Publishing House, Bath; 103-114.
- Pinet, P.R. (2009). *Invitation to oceanography* (5th ed). Jones and Bartlett Publishers, Egham.
- Pratson, L., Wiberg, P., Steckler, M., Cacchione, D., Karson, J., Mullenbach, E., Swenson, J., Nittrouer, C., Murray, A.B., Spinelli, G., Fulthorpe, C., O'Grady, D., Parker, G., Driscoll, N., Burger, R., Paola, C., Orange, D., Wolinsky, M., Field, M., Friedrichs, C., & Fildalez, J. (2007). Seascapes evolution on clastic continental shelves and slopes. In: C.A. Nittrouer, J.A. Austin, M.E. Field, J.H. Kravitz, M.S. Steckler, J.P.M. Syvitski, & P.L. Wiberg (Eds.), *Continental Margin Sedimentation—From Sediment Transport to Sequence Stratigraphy*: Int. Ass. Sedimentol. Spec. Pub. vol. 37, p. 339-380.

Swift, D.J.P., & Thorne, J.A. (1991). Sedimentation on continental margins, I: a general model for shelf sedimentation. In: D.J.P. Swift, G.F. Oertel, R.W. Tillman, & J.A. Thorne (Eds.), *Shelf sand and sandstone bodies: geometry, facies and sequence stratigraphy*, Malden: Blackwell Publishing. International Association of Sedimentologists. Special publication, 14 (1991), pp. 3-31.

Walker, R.G., & Plint, A.G. (1992). Wave- and Storm-Dominated Shallow Marine Systems. In: R.G. Walker & N.P. James (Eds.), *Facies Models: Response to Sea Level Change*, Geological Association of Canada, Newfoundland, 219- 238.

Wright, L. D., & Nittrouer, C. A. (1995). Dispersal of river sediments in coastal seas - 6 contrasting cases. *Estuaries*, 18, 494-508.





# Κεφάλαιο 8

## Ηφαιστειοκλαστική Ιζηματογένεση

### Σύνοψη

*Το συγκεκριμένο κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή σε ένα «νεόδημο» αντικείμενο της σύγχρονης Ιζηματολογίας, τα ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα. Τα ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα, τα οποία ορίζονται ευρέως ως κλαστικές αποθέσεις που προέρχονται από τη μεταφορά, την απόθεση ή/και την επανεπεξεργασία και επαναπόθεση των προϊόντων της ηφαιστειακής δραστηριότητας, αποτελούν εδώ και πολύ καιρό ένα αρκετά αμφιλεγόμενο αντικείμενο των γεωεπιστημών, λόγω της εγγενούς πολυπλοκότητας των διαδικασιών κατακερματισμού, μεταφοράς και απόθεσης που λειτουργούν σε περιβάλλοντα με ηφαιστειακές επιπτώσεις και της σχετικά πρόσφατης ανάπτυξης του κλάδου ως ειδικού τομέα. Ορισμένα ηφαιστειοκλαστικά πετρώματα και ιζήματα μπορούν επίσης να ταξινομηθούν στο σύστημα των «πυριγενών πετρωμάτων».*

### Προαπαιτούμενη γνώση

*Στοιχεία της φυσικής ηφαιστειολογίας, της δυναμικής των ρευστών, της κλασικής κλαστικής ιζηματολογίας, της υδρολογίας και της γεωμορφολογίας.*

## 8.1 Εισαγωγή

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα είναι η επιφανειακή έκφραση θερμικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του πλανήτη μας και ευθύνεται για την παραγωγή μεγάλου όγκου κατακερματισμένων υλικών, συνεισφέροντας 5-10% στη συνολική ροή κλαστικών υλικών στην επιφάνεια της Γης. Υπολογίζεται ότι το 27% των μετα-αρχαϊκών ιζημάτων προέρχεται από τη διάβρωση και την επεξεργασία των πρωτογενών εκρηκτικών προϊόντων για την παραγωγή ηφαιστειοκλαστικών πετρωμάτων (Fisher and Schmincke, 1984).

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα παρέχει μια μοναδική και τοπικά άφθονη πηγή ιζημάτων σε πολλές από τις ηπειρωτικές και θαλάσσιες υδάτινες λεκάνες της Γης. Γενικά, στις ιζηματολογικές και τεκτονικές αναλύσεις, τα ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν μεθοδολογικά όπως τα μη ηφαιστειακά. Ωστόσο, η στενή σύνδεση τεκτονισμού και ηφαιστειότητας παρέχει μια πρόσθετη διάσταση στην ανάλυση των ηφαιστειοκλαστικών ιζημάτων. Καθώς το αρχείο του τεκτονισμού συνήθως διατηρείται στα ιζήματα και καθώς η ηφαιστειότητα σχετίζεται κυρίως με τα περιθώρια των πλακών, η γνώση σχετικά με τα ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα αποδεικνύεται σημαντική για την ερμηνεία της δραστηριότητας των λιθοσφαιρικών πλακών και των τεκτονικών διεργασιών.

Επίσης, οι ηφαιστειοκλαστικές αποθέσεις, μέσω της χημικής τους σύστασης και της αρχιτεκτονικής των φάσεών τους, αποτελούν σημαντικούς στρωματογραφικούς δείκτες. Ο συχνά ισόχρονος χαρακτήρας τους σε μεγάλες περιοχές, επιτρέπει συσχετισμούς, ακόμη και μεταξύ ακολουθιών που στερούνται άλλων δεικτών. Η ταυτόχρονη απόθεση αυτών των υλικών σε μεγάλες περιοχές και λεκάνες, και το υψηλό δυναμικό διατήρησής τους, παρέχουν ένα ισχυρό εργαλείο για τη χρονολόγηση και τη συσχέτιση διαφορετικών ιζηματογενών αρχείων, κυρίως στις θαλάσσιες λεκάνες. Είναι γνωστό άλλωστε στην ακαδημαϊκή κοινότητα πως ένας από τους πλέον σημαντικούς και ευρέως χρησιμοποιούμενους στρωματογραφικούς δείκτες για στρωματογραφικούς συσχετισμούς και καταγραφή πληροφοριών σχετικά με τις γεωδυναμικές συνθήκες και τις ιζηματογενείς διεργασίες που επικρατούσαν κατά το γεωλογικό παρελθόν, αποτελεί η ηφαιστειακή τέφρα, της οποίας η διατήρηση στο στρωματογραφικό αρχείο εξαρτάται άμεσα από το περιβάλλον απόθεσης και την τεκτονική.

Επιπλέον, οι θαλάσσιοι ηφαιστειοκλαστικοί σχηματισμοί μπορούν να είναι ξενιστές κοιτασμάτων πετρελαίου και μεταλλευμάτων με οικονομικό ενδιαφέρον.

Τέλος, οι ηφαιστειοκλαστικές αποθέσεις βοηθούν στην ανακατασκευή της παλαιότερης ηφαιστειακής δραστηριότητας, σε τοπική αλλά και σε ευρύτερη κλίμακα, και άρα αποτελούν κλειδί στην επίλυση ζητημάτων σχετικών με την εκτίμηση των ηφαιστειακών κινδύνων.

Η αναγνώριση της σημασίας των ηφαιστειοκλαστικών ιζημάτων χρονολογείται από την εποχή της ανάπτυξης της θεωρίας των λιθοσφαιρικών πλακών, κατά τη δεκαετία του 1960, και τη μελέτη των αρχαίων ηφαιστειακών τόξων και των περιθωριακών τους φάσεων (Dickinson, 1974a,b). Η μελέτη, όμως, των ηφαιστειοκλαστικών ιζημάτων, ως αναπόσπαστο τμήμα της Ιζηματολογίας, αναπτύχθηκε κατά τις δεκαετίες του 1980 και του 1990. Τα τελευταία 30 χρόνια, οι μελέτες των ηφαιστειοκλαστικών αποθέσεων έχουν ανθίσει,

εν μέρει ως απάντηση σε μια σειρά από καταστροφικές ηφαιστειακές εκρήξεις, συμπεριλαμβανομένων του όρους Αγία Ελένη, το 1981, του Nevado del Ruiz, το 1985 και του Pinatubo το 1991.

Το έτος 1991, όταν το όρος Pinatubo, στις Φιλιππίνες, γνώρισε τη σημαντικότερη έκρηξη του αιώνα (Εικόνα 8.1) (Newhall and Punongbayan, 1996), σηματοδότησε μια καθοριστική στιγμή στις μελέτες των ηφαιστειακών ιζημάτων, με τη δημοσίευση θεματικών τόμων από το Sedimentary Geology (Cas and Busby-Spera, 1991) και την Society for Economic Paleontologists and Mineralogists (Fisher and Smith, 1991). Άλλα σημαντικά έργα περιλαμβάνουν κεφάλαια επισκόπησης σε εγχειρίδια ιζηματολογίας ή ηφαιστειολογίας, στα οποία τα ηφαιστειακά ιζήματα συζητούνται από την άποψη του τεκτονικού περιβάλλοντος των πλακών, της διαδικασίας και του τύπου του ηφαιστείου (Cas and Wright, 1987; Orton, 1996; Leyrit and Montenant, 2000) και άλλους ειδικούς τόμους που αναφέρονται στην ηφαιστειακή ιζηματογένεση σε λιμνοθαλάσσια περιβάλλοντα (White and Riggs, 2001), στα σωματιδιακά ρεύματα βαρύτητας και τις υποθαλάσσιες εκρήξεις (McCaffrey et al., 2001).



**Εικόνα 8.1** Μικρή έκρηξη στο Pinatubo, την 1η Αυγούστου 1991.

*Η κύρια έκρηξη σημειώθηκε 1,5 μήνα νωρίτερα, στις 15 Ιουνίου 1991*

(πηγή: <https://www.flickr.com/photos/jsjgeology/50638042588/in/album-72157646770745246/>).

## 8.2 Ταξινόμηση ηφαιστειοκλαστικών ιζημάτων

Ο όρος *ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα* προτάθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1960 και έγινε γρήγορα αποδεκτός στη διεθνή βιβλιογραφία, καθώς είχαν ωριμάσει οι συνθήκες για τον συνδυασμό της ηφαιστειολογίας και της ιζηματολογίας σε ένα ενιαίο σύστημα, με σκοπό την περιγραφή των ιζηματογενών φάσεων που είχαν παραχθεί ή επηρεαστεί από την ηφαιστειότητα. Συνεπώς, σύμφωνα με τον Fisher (1961), και αργότερα τους Fisher και Smith (1991), τα *ηφαιστειοκλαστικά ιζηματογενή πετρώματα* περιλαμβάνουν όλο το φάσμα των κλαστικών ιζημάτων που αποτελούνται εν μέρει ή εξ ολοκλήρου από ηφαιστειακά θραύσματα, και τα οποία δημιουργούνται με οποιονδήποτε τρόπο, μεταφέρονται με οποιονδήποτε μηχανισμό, αποτίθενται σε οποιοδήποτε φυσιογραφικό περιβάλλον, ή αναμειγνύονται με οποιονδήποτε άλλον τύπο ηφαιστειοκλαστικών ή μη ηφαιστειακών θραυσμάτων, σε οποιαδήποτε αναλογία (Εικόνα 8.2). Τα ηφαιστειοκλαστικά ιζηματογενή πετρώματα περιέχουν, αποκλειστικά και κατά κύριο λόγο, συστατικά ηφαιστειακής προέλευσης, με τη μορφή θραυσμάτων ηφαιστειακού πετρώματος, ηφαιστειακού γυαλιού και ηφαιστειακής τέφρας, καθώς και ορισμένη ποσότητα αμιγώς ιζηματογενών θραυσμάτων (όπως άμμος και ιλύς). Γενικά, τα ηφαιστειακά θραύσματα αντιπροσωπεύουν το 30% ή περισσότερο του συνολικού όγκου του πετρώματος. Ως *ηφαιστειακά θραύσματα* ορίζονται τα θραύσματα που προέρχονται από ηφαιστειακές διεργασίες, είτε πρωτογενώς είτε μετά από επαναπόθεση (δευτερογενώς) (Εικόνα 8.3).





**Εικόνα 8.2** Αλλουβιακά ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα (πηγή: <https://www.flickr.com/photos/35041397@N00/9333481612>).



**Εικόνα 8.3** Ηφαιστειοκλαστικό κροκαλοπαγές από το Collins Bay, Muriwai, Auckland Region, New Zealand.

Πρόκειται για ηφαιστειοκλαστικό ιζηματογενές πέτρωμα που αποτελείται από 10% έως 25% κατ' όγκο πυροκλαστικά θραύσματα, με κατά μέσο όρο διάμετρο  $>2\text{mm}$ ,  $>50\%$  στρογγυλεμένα (πηγή: <https://www.mindat.org/min-49484.html>).

Η πολυπλοκότητα, πάντως, των διεργασιών που εμπλέκονται στη δημιουργία των ηφαιστειοκλαστικών ιζημάτων, οδήγησε σε ανάλογη πολυπλοκότητα στην ορολογία και στην ταξινόμησή τους. Έτσι, ορισμένες ταξινομήσεις λαμβάνουν υπόψη τους μόνο lithολογικά χαρακτηριστικά των αποθέσεων, ενώ άλλες περιλαμβάνουν και όρους σχετικούς με τη δημιουργία και μεταφορά του υλικού.

Γενικά, πάντως τα ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα έχουν ευρύ φάσμα συστάσεων, από βασάλτη (σπάνια κοματίτη) έως ρυόλιθο, και εμφανίζουν ιζηματογενή χαρακτηριστικά, όπως διαβαθμισμένη ή διασταυρούμενη στρώση (Εικόνα 8.4).

Συνδυάζοντας προηγούμενες ταξινομήσεις, οι White and Houghton (2006) εισήγαγαν τον όρο πρωτογενείς ηφαιστειοκλαστικές αποθέσεις για να περιγράψουν αποθέσεις των οποίων τα σωματίδια κινητοποιούνται από την ηφαιστειακή δραστηριότητα και φτάνουν απευθείας στη θέση απόθεσης. Τα πρωτογενή υλικά εκτοξεύονται από ηφαιστειακές εκρήξεις και μεταφέρονται με αέρα, νερό ή πυροκλαστικές ροές, στο σημείο όπου θα αποθεθούν, στην ξηρά ή στη θάλασσα. Σε ορισμένα μέρη, το υλικό αυτό μπορεί να αναμειχθεί και να επαναποτεθεί μαζί με μεγαλύτερες ή μικρότερες ποσότητες υπάρχοντος ιζηματογενούς υλικού που έχει κλαστική ή βιοχημική προέλευση.

Η επεξεργασία των μη λιθοποιημένων ηφαιστειοκλαστικών αποθέσεων είναι μια βασική διαδικασία που διαμορφώνει και καθορίζει τις δευτερογενείς ηφαιστειοκλαστικές αποθέσεις.





**Εικόνα 8.4** Τουρβιδίτες από το Προκάμβριο της Minnesota, ΗΠΑ. Ενσωματωμένα μετακροκαλοπαγή σε σχιστόλιθο (Lake Vermilion Formation,) (πηγή: <https://www.flickr.com/photos/47445767@N05/21621994681> ).

Ειδικότερα, όσον αφορά την ταξινόμηση και τον χαρακτηρισμό των *πρωτογενών ηφαιστειοκλαστικών ιζημάτων* υπάρχουν δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη προσδιορίζει μια ηφαιστειοκλαστική απόθεση με βάση τον τρόπο κατακερματισμού των σωματιδίων που την αποτελούν, ενώ η δεύτερη την προσδιορίζει με βάση τις διάφορες διεργασίες με τις οποίες σχηματίζεται. Η τελευταία προσέγγιση χρησιμοποιείται ευρέως στον ακαδημαϊκό χώρο και είναι πιο ορθολογικά τεκμηριωμένη, καθώς το μοναδικό γεγονός που μοιράζονται όλα τα σωματίδια μιας απόθεσης είναι η διαδικασία απόθεσης, ενώ τα μεμονωμένα σωματίδια μπορεί να προέρχονται από διαφορετικές πηγές και να έχουν υποστεί διαφορετικά συμβάντα κατακερματισμού. Σύμφωνα με αυτήν, τα ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα διακρίνονται σε:

- *Αυτοκλαστικά* ιζήματα, που σχηματίζονται από μηχανική θραύση του μάγματος κατά τη ροή.
- *Πυροκλαστικά* ιζήματα (Εικόνα 8.5), που σχηματίζονται από την εκρηκτική θραύση του μάγματος κατά τη διάρκεια εκρήξεων διαφορετικού βαθμού έντασης. Οι διαδικασίες αυτές περιλαμβάνουν την εκρηκτική απελευθέρωση αερίων από παχύρρευστα μάγματα, δημιουργώντας μια στήλη έκρηξης πάνω από το ηφαίστειο. Τα πυροκλαστικά ιζήματα περιλαμβάνουν τις αποθέσεις τόσο των πυροκλαστικών καταπτώσεων όσο και των πυροκλαστικών ροών. Οι *πυροκλάστες* διακρίνονται περαιτέρω σε *νεανικούς* (προέρχονται απευθείας από το εκρηκτικό μάγμα), *λιθικούς* (σχηματίζονται από τον κατακερματισμό των προϋπαρχόντων πετρωμάτων) και *σύνθετους* (σχηματίζονται από ανάμειξη μάγματος με κροκαλοπαγή ξενιστή) (White and Houghton, 2006).
- Η τρίτη ομάδα ηφαιστειοκλαστικών είναι τα *υδροκλαστικά* ιζήματα (Εικόνα 8.6). Αυτά σχηματίζονται από τη «θραύση» του μάγματος που έρχεται σε επαφή με νερό ή πάγο ή με ιζήματα κορεσμένα με νερό. Το μάγμα «σβήνει» γρήγορα και εκλύεται πολύς ατμός. Οι εκρήξεις κυμαίνονται από σχετικά ήπιες (π.χ. η βασαλτική λάβα που ρέει στη θάλασσα ψύχεται γρήγορα και θρυμματίζεται) έως εξαιρετικά βίαιες (ιδιαίτερα όταν το αέριο είναι πλούσιο σε μάγμα, ώστε να υπάρχει συνδυασμός υδροκλαστικής και πυροκλαστικής δραστηριότητας).
- Η τέταρτη ομάδα είναι τα *επικλαστικά* ή *επεξεργασμένα* ιζήματα. Διαφορετικοί ορισμοί έχουν προταθεί για τα επικλαστικά σωματίδια. Κατά ορισμένους, τα επικλαστικά σωματίδια ορίζονται ως επανεπεξεργασμένα θραύσματα ηφαιστειακής προέλευσης (π.χ. Fisher και Schmincke, 1984). Σε άλλες μελέτες, ο όρος «επικλαστικό» χρησιμοποιείται για οποιοδήποτε σωματίδιο (ηφαιστειακής ή μη προέλευσης) που αποτέθηκε από «κανονικές» ιζηματογενείς διεργασίες, ανεξάρτητα από την προέλευση των κροκάλων (π.χ. Schmid, 1981; Orton, 1996).





**Εικόνα 8.5** Πυροκλαστικό λατυποπαγές, που αποτελείται από γωνιώδεις όγκους ιζηματογενών πετρωμάτων και ακανόνιστες έως σφαιρικές βολίδες ωχρού βασάλτη, μέσα σε γαλαζωπό λεπτόκοκκο τοφφικό συνδετικό υλικό (πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12999919> ).



**Εικόνα 8.6** Υδροκλαστικά ιζήματα κατά μήκος κορυφογραμμής (από Tim Berger, πηγή: <https://www.flickr.com/photos/24971759@N07/28571599624> ).

Για τις πρωτογενείς ηφαιστειοκλαστικές αποθέσεις, οι White and Houghton (2006) πρότείνουν ένα ενοποιημένο σχέδιο ταξινόμησης που βασίζεται στον αρχικό μηχανισμό απόθεσης του υλικού και εξειδικεύεται με βάση το μέγεθος των κόκκων του. Έτσι, όλες οι πρωτογενείς ηφαιστειοκλαστικές αποθέσεις λαμβάνουν πρωτογενή ονόματα όπως τόφφος (ή τέφρα<sup>8</sup> εάν δεν είναι λιθοποιημένη) ή τόφφος λαπίλλων (τέφρα λαπίλλων). Οι όροι πυροκλαστικές, αυτοκλαστικές, υδροκλαστικές και επικλαστικές είναι ερμηνευτικοί τύποι που εφαρμόζονται ως

---

<sup>8</sup> Η τέφρα είναι ένα αερομεταφερόμενο κατακεραματισμένο υλικό που παράγεται από ηφαιστειακή έκρηξη, ανεξάρτητα από τη σύσταση, το μέγεθος των θραυσμάτων και τον μηχανισμό απόθεσης. Η λέξη τέφρα είναι συνώνυμη των πυροκλαστικών υλικών και των πυροκλαστικών ιζημάτων και γενικά των συσσωρεύσεων πυροκλαστικών υλικών ανεξάρτητα από το μέγεθος των θραυσμάτων και των σωματιδίων.

δεύτερο βήμα, αφού δοθεί στις αποθέσεις η βασική τους ονομασία σύμφωνα με το μέγεθος των κόκκων τους και όχι με βάση τους τύπους των σωματιδίων τους. Ως εκ τούτου, αποθέσεις που έχουν προέλθει από διάβρωση και αποσάθρωση ηφαιστειακών πετρωμάτων δεν θεωρούνται πλέον ηφαιστειοκλαστικές, αλλά λαμβάνουν ένα ιζηματογενές όνομα με ή χωρίς ηφαιστειακό πρόθεμα (Manville et al., 2009).

Τα ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα διακρίνονται ευρέως σε 3 γενετικές ομάδες, με βάση την προέλευση αλλά και τον τρόπο μεταφοράς και απόθεσης των υλικών (Haldar, 2020):

1. *Ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα από πυροκλαστικές ροές*: Προκύπτουν είτε από θερμές, πυροκλαστικές ροές που ρέουν ή κυλίνονται και συντρίβονται στην πλαγιά του ηφαιστείου, είτε από έναν παρόμοιο μηχανισμό βαρυτικών ροών. Τα κύρια συστατικά των ροών είναι ηφαιστειακά αέρια και πρωτογενές υλικό κυρίως όξινης σύστασης, οι διαστάσεις του οποίου κυμαίνονται από μικρούς κόκκους έως μεγάλα τεμάχια. Τέτοιες ροές συμβαίνουν τόσο σε χερσαία όσο και σε υποθαλάσσια περιβάλλοντα.
2. *Ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα από απόθεση πυροκλαστικών υλικών από τον αέρα*: Είναι τα αποτελέσματα της συσσώρευσης πυροκλαστικού υλικού που εκτοξεύεται από ηφαιστειακές εκρήξεις ψηλά στην ατμόσφαιρα. Από την έκρηξη δημιουργούνται σύννεφα λαπίλλων<sup>9</sup> (lapilli) τα οποία συχνά μεταφέρουν την ηφαιστειακή τέφρα σε μεγάλες αποστάσεις. Τα υλικά που φτάνουν μακρύτερα παράγουν λεπτόκοκκο τόφφο (tuff), ενώ στην περιοχή της έκρηξης συνήθως προκύπτουν λατυποπαγή και τόφφοι λαπίλλων (lapilli tuffs).
3. *Ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα που προκύπτουν από τυρβώδη ροή χαμηλής πυκνότητας και υψηλής ταχύτητας*. Χαρακτηρίζονται από ακανόνιστα στρώματα και προκύπτουν από υλικά που κατακρημνίζονται με τυρβώδεις ροές. Οι ροές αυτές προκαλούνται κυρίως από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υλικών και του περιβάλλοντος νερού. Αποτελούνται από κακώς διαβαθμισμένη άμμο και λεπτό χαλίκι, με ποικιλία πυροκλαστών προερχόμενων κυρίως από υλικά προηγούμενων εκρήξεων.

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα αυτής της ταξινόμησης είναι το γεγονός ότι τα πυροκλαστικά υλικά περιορίζονται σε υλικά που παράγονται, μεταφέρονται και αποτίθενται από την επιφανειακή εκρηκτική ηφαιστειότητα και τις άμεσες επιδράσεις της, όπως είναι η ατμοσφαιρική πτώση τέφρας και τα ρεύματα πυκνότητας πυροκλαστικών (Cas & Wright, 1987). Επιπλέον, μια άλλη αδυναμία του συγκεκριμένου συστήματος ταξινόμησης είναι το γεγονός ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η υποθαλάσσια ηφαιστειακή δραστηριότητα ή τα πυροκλαστικά ρεύματα πυκνότητας τα οποία διασχίζουν τη διεπαφή αέρα/νερού αφού, θεωρητικά, όλες οι αποθέσεις από το νερό ορίζονται ως *μη πρωτογενείς*. Τέλος, όλες οι φάσεις που αποτίθενται από κανονικές επιφανειακές ιζηματογενείς διεργασίες, ανεξάρτητα από την προέλευση των σωματιδίων, αναφέρονται ως *επικλαστικές*, έτσι ώστε μόλις ένα σωματίδιο τέφρας έρθει σε επαφή με τρεχούμενο νερό να παύει να είναι πυροκλαστικό.

Οι White και Houghton (2006) ανέπτυξαν πρόσθετους περιγραφικούς προσδιορισμούς οι οποίοι περιλαμβάνουν τη διάταξη των συστατικών, την ταξινόμηση και τη μορφολογία των κροκάλων. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του σχήματος ταξινόμησης είναι ότι λαμβάνει υπόψη την πολυπλοκότητα των διεργασιών κατακερματισμού, μεταφοράς και απόθεσης που προκύπτουν κατά τη διάρκεια επιφανειακών και υποθαλάσσιων ηφαιστειακών εκρήξεων: οι αποθέσεις με προφανή ηφαιστειακή προέλευση δεν αποκαλούνται απλώς «άμμος» ή «χαλίκι» αλλά προστίθεται κι ένας ερμηνευτικός όρος, και πλέον οι αποθέσεις υποθαλάσσιων εκρήξεων δεν θεωρούνται επεξεργασμένες.

Πάντως, οποιαδήποτε ορολογία και αν χρησιμοποιηθεί, πρέπει να αναγνωρίζεται η εγγενής πολυπλοκότητα των ηφαιστειακών περιβαλλόντων και διεργασιών, να διακρίνονται οι πρωτογενείς από τις δευτερογενείς αποθέσεις και να υπάρχει ακρίβεια ως προς την κοκκομετρία των ιζημάτων.

### 8.3 Περιβάλλοντα ηφαιστειακής δραστηριότητας

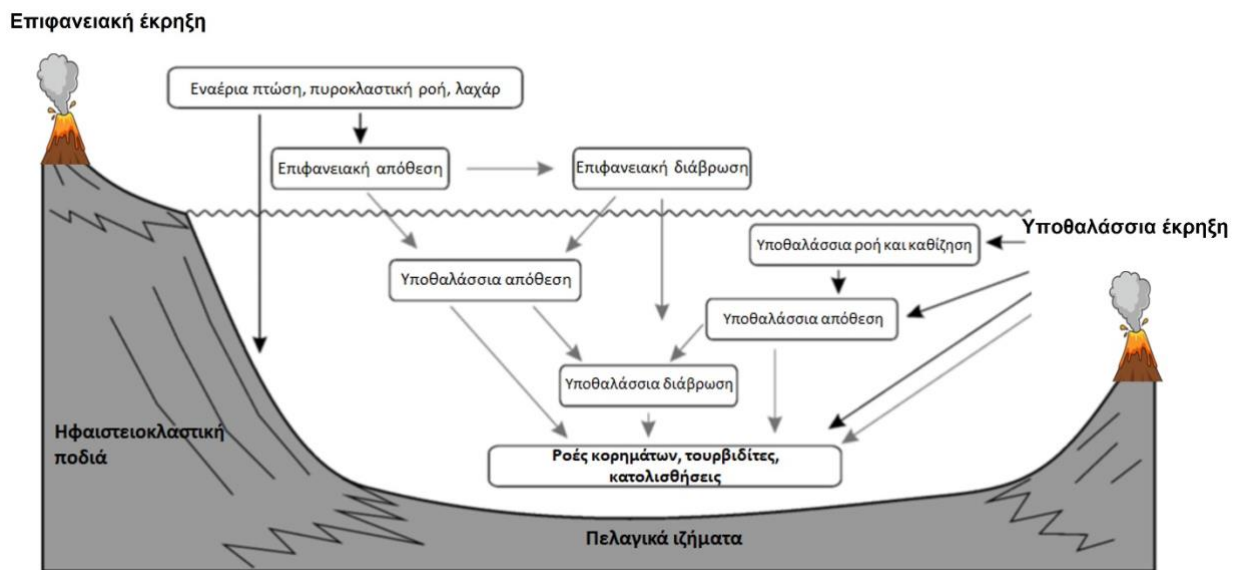
Τα περιβάλλοντα της ηφαιστειακής δραστηριότητας διακρίνονται σε δύο τύπους: τα *επιφανειακά* και τα *υποθαλάσσια*. Στα πρώτα συγκαταλέγονται οι ήπειροι, τα νησιά και οι παράκτιες περιοχές, όπου τα ηφαιστειακά

---

<sup>9</sup> Οι λάπιλλοι είναι μικρά θραύσματα ηφαιστειακών πετρωμάτων που κυμαίνονται σε μέγεθος από 2 έως 64 χιλιοστά σε διάμετρο. Σχηματίζονται κατά τη διάρκεια ηφαιστειακών εκρήξεων, όταν το μάγμα εκτινάσσεται στον αέρα και ψύχεται και στερεοποιείται γρήγορα.

υλικά εκρήγνυνται στον αέρα. Τα υποθαλάσσια περιβάλλοντα περιλαμβάνουν βαθιές και ρηχές θάλασσες, λίμνες και τον πυθμένα παγετωδών περιοχών (Εικόνα 8.7).

Τα προϊόντα που αναπτύσσονται από τις ηφαιστειακές εκρήξεις σε αυτά τα δύο περιβάλλοντα διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους στη χωρική τους κατανομή, στο χρώμα, στα ορυκτά και στις παραγενέσεις τους, στην υφή και στη δομή τους, στη μορφή της λάβας, στη στρωματογραφική τους συνέχεια/ασυνέχεια, καθώς και στον τύπο των θραυσμάτων και στις εναλλαγές των σχετικών ιζηματολογικών φάσεων (Qiu, 1985). Οι αποθέσεις στην ξηρά έχουν συνήθως υψηλή περιεκτικότητα σε θραύσματα και μεγάλο μέγεθος κόκκων, ενώ οι υποθαλάσσιες είναι ακριβώς το αντίθετο. Επιπλέον, τα ηφαιστειοκλαστικά υλικά στην ξηρά είναι γενικά κακώς ταξινομημένα και η αλλαγή των φάσεων (πχ. το πάχος ή το μέγεθος των κόκκων) είναι σημαντική κατά μήκος της οριζόντιας διεύθυνσης. Αντίθετα, τα υποθαλάσσια ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα είναι καλύτερα ταξινομημένα, με την αλλαγή των φάσεων (λόγω της αλλαγής της πυκνότητας), να είναι πιο σημαντική κατά μήκος της κατακόρυφης διεύθυνσης (Zou et al., 2013).



Εικόνα 8.7 Σχηματικό διάγραμμα που απεικονίζει τις διεργασίες ηφαιστειοκλαστικής ιζηματογένεσης.

## 8.4 Διεργασίες μεταφοράς και απόθεσης σε περιβάλλοντα βαθιάς θάλασσας

Η πλειονότητα των ηφαιστειοκλαστικών αποθέσεων των βαθέων υδάτων έχει σχηματιστεί σε μεγάλη απόσταση από την τελική τους θέση. Σε πολλές περιπτώσεις, τα σωματίδια σχηματίζονται είτε στην επιφάνεια είτε σε ρηχά νερά και μεταφέρονται στα βαθιά με δύο κύριες διεργασίες: *πτώση* ή κάποιο είδος *βαρυντικής ροής ιζήματος*. Η τελευταία αντιπροσωπεύει τον πιο σημαντικό μηχανισμό όσον αφορά τη συνολική ροή ηφαιστειοκλαστικού υλικού προς τα βαθιά (Carey and Schneider, 2011).

### 8.4.1 Βαρυντική καθίζηση – πτώση

Τα αερομεταφερόμενα σύννεφα τέφρας (ash plumes) που δημιουργούνται από τις μεγάλες επιφανειακές εκρήξεις αποτελούν τον κύριο μηχανισμό ευρείας απόθεσης ηφαιστειοκλαστικού υλικού στα ιζήματα της βαθιάς θάλασσας. Αρχικά θεωρείτο ότι οι αποθέσεις τέφρας σχηματίζονται μόνο από την παθητική πτώση των σωματιδίων διαμέσου της υδάτινης στήλης, όμως ο Carey (1997) υπέδειξε ότι η πτώση τέφρας στην επιφάνεια της θάλασσας πυροδοτεί τον σχηματισμό κατακόρυφων ρευμάτων βαρύτητας που επιταχύνουν την καθίζησή της. Πτώση ηφαιστειακού υλικού μπορεί να συμβεί και από υποθαλάσσια σύννεφα τέφρας που δημιουργούνται από την έκρηξη πυριτικού, πλούσιου σε αέρια, μάγματος. Τέτοιου τύπου αποθέσεις εμφανίζουν συνήθως

διπολικές κατανομές κόκκων λόγω των παρόμοιων ταχυτήτων καθίζησης που έχουν η κορεσμένη σε νερό κίσηρη<sup>10</sup> και τα λιθικά θραύσματα (Carey and Schneider, 2011).

Ένας άλλος μηχανισμός διασποράς του ηφαιστειακού υλικού στα ιζήματα βαθιάς θάλασσας είναι η μεταφορά του μέσω της κίσηρης ή του πάγου που λειτουργούν εν είδει σχεδίας (pumice rafting ή ice rafting). Οι «σχεδίες ελαφρόπετρας» (pumice rafting) σχηματίζονται με την απόρριψη στον ωκεανό μεγάλων ποσοτήτων κίσηρης από εκρήξεις επιφανειακών ή ρηχών υποθαλάσσιων ηφαιστειών, και μπορούν να επιπλέουν για χρόνια, μεταφερόμενες από τα επιφανειακά ρεύματα. Για παράδειγμα, μετά την έκρηξη του ηφαιστείου Krakatau στην Ινδονησία το 1883, η επιπλέουσα κίσηρη μπόρεσε να παρασυρθεί μέχρι τον Ινδικό Ωκεανό, φτάνοντας ως και τη δυτική ακτή της Αφρικής (Simkin and Fiske, 1983). Κατά τη μεταφορά, μέρος της κίσηρης μπορεί να κορεστεί σε νερό και να καθιζάνει. Με ανάλογο τρόπο μπορεί στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη να λειτουργήσει ο θαλάσσιος πάγος. Η μετατόπιση και η επακόλουθη τήξη του πάγου, όπου έχει πέσει η τέφρα, οδηγούν στη διασπορά της στη βαθιά θάλασσα, σε αποστάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων (Lacasse et al., 1996).

## 8.4.2 Βαρυτικές ροές ιζημάτων

### 8.4.2.1 Υποθαλάσσιες πυροκλαστικές ροές

Ένας μοναδικός τύπος αποθέσεων, με υψηλή συγκέντρωση ηφαιστειοκλαστικών ιζημάτων, προκύπτει από τις υποθαλάσσιες πυροκλαστικές ροές. Η διαδικασία συντελείται σε υψηλή θερμοκρασία, περιλαμβάνοντας μια ενδιάμεση αέρια φάση αντί για νερό. Ανάλογες αποθέσεις μπορούν να δημιουργηθούν και από την είσοδο πυροκλαστικών ροών στη θάλασσα, όπως πχ. συνέβη κατά την έκρηξη του Krakatau το 1883 στην Ινδονησία. Εκεί οι πυροκλαστικές ροές διαιρέθηκαν σε μια πιο πυκνή ροή βάσης που συνέχισε την πορεία της υποθαλάσσια, κατά μήκος του πυθμένα και αποτέθηκε σε υψηλή θερμοκρασία, και σε μια λιγότερο πυκνή και τυρβώδη ροή κορυφής που ταξίδεψε σαν κύμα στην επιφάνεια της θάλασσας (Carey and Schneider, 2011).

### 8.4.2.2 Ηφαιστειοκλαστικοί τουρβιδίτες

Οι κύριοι παράγοντες μεταφοράς ηφαιστειοκλαστικού υλικού στη θάλασσα είναι οι βαρυτικές ροές των ιζημάτων, ιδιαίτερα τα τουρβιδιτικά ρεύματα. Όταν τα υλικά προέρχονται από συν-εκρηκτικές διαδικασίες κατακερματισμού, η ροή τους προκαλεί τα πρωτογενή ηφαιστειοκλαστικά τουρβιδιτικά ρεύματα. Ο σχηματισμός των ρευμάτων αυτών προϋποθέτει: την ταχεία συσσώρευση ηφαιστειοκλαστικών θραυσμάτων, μια κεκλιμένη επιφάνεια, την ανάμειξη ιζήματος και θαλασσινού νερού και έναν μηχανισμό ενεργοποίησης για την έναρξη της κίνησης των ιζημάτων. Συχνά οι ηφαιστειοκλαστικοί τουρβιδίτες δημιουργούνται όταν πυροκλαστικά υλικά, που παράγονται επιφανειακά, διοχετεύονται στη θάλασσα μέσω πυροκλαστικών ροών, ροών τεμαχίων και τέφρας, lahars<sup>11</sup> ή jökulhlaups<sup>12</sup> (τύπος παγετώδους πλημμύρας) (Carey and Schneider, 2011). Μια άλλη σημαντική πηγή υλικού για τα τουρβιδιτικά ρεύματα είναι η επανεπεξεργασία μη στερεοποιημένου ηφαιστειοκλαστικού υλικού που είχε προηγουμένως αποθεθεί. Σε αυτή την περίπτωση, οι μηχανισμοί επανακινητοποίησης, μεταφοράς και απόθεσης είναι καθαρά ιζηματογενείς και οι προκύπτουσες αποθέσεις ονομάζονται «δευτερογενείς ηφαιστειοκλαστικοί τουρβιδίτες».

<sup>10</sup> Η κίσηρη είναι εξαιρετικά πορώδες, κυψελώδες και ελαφρύ ηφαιστειακό υλικό με έντονο χρώμα που επιπλέει στο νερό. Αποτελείται από πυροκλάστες διαφόρων μεγεθών και σχημάτων και προκύπτει από τις ισχυρότερες ιξώδεις όζινες, πλούσιες σε πυρίτιο και ουδέτερες λάβες.

<sup>11</sup> Η λέξη «Lahar» είναι η ινδονησιακή λέξη για τη ροή λάσπης στα ηφαίστεια. Το Lahar ρέει στα ηφαίστεια ως μείγμα κυρίως νερού, λάσπης και θραυσμάτων πετρωμάτων. Η πυκνότητά του είναι σαν υγρό τσιμέντο. Καθώς το λαχάρ ρέει προς τα κάτω από ένα ηφαίστειο, θάβει τα πάντα στο πέρασμά του.

<sup>12</sup> Ο όρος jökulhlaup είναι δανεισμός από την ισλανδική γλώσσα και αρχικά αναφερόταν στην πλημμύρα μετά από μια υποπαγετώδη έκρηξη, δηλαδή μια ηφαιστειακή έκρηξη που συμβαίνει κάτω από έναν παγετώνα. Ο τελευταίος αρχίζει να λιώνει λόγω της θερμότητας που παράγεται από την έκρηξη και σχηματίζει μια λίμνη παγιδευμένη κάτω από το εναπομείναν παγοκάλυμμα. Όταν ο πάγος καταρρέει, το νερό διαπερνά το φράγμα και ρέει εξαιρετικά γρήγορα, με αποτέλεσμα την πλημμύρα της παρακείμενης περιοχής που μπορεί επίσης να είναι καταστροφική.



### 8.4.2.3 Ροές ηφαιστειακών κορημάτων

Οι ροές κορημάτων είναι ένας πολύ κοινός τρόπος μεταφοράς ιζημάτων σε ηφαιστειακά περιβάλλοντα που γειτνιάζουν με θαλάσσιες λεκάνες. Μία σημαντική διαφορά μεταξύ ηφαιστειοκλαστικών και μη-ηφαιστειοκλαστικών ροών κορημάτων είναι ότι οι πρώτες είναι συνήθως φτωχότερες σε υλικό μεγέθους λύου (Smith, 1988). Αυτό επηρεάζει τους μηχανισμούς στήριξης των σωματιδίων αφού μειώνει την αντοχή του συνδετικού υλικού, διευκολύνοντας τη ροή. Στο θαλάσσιο περιβάλλον, οι ροές αυτές μπορούν να έχουν σημαντική κινητικότητα. Στα δυτικά του νησιού Hierro (Κανάρια Νησιά) υπάρχει μια απόθεση από ροή κορημάτων (γνωστή ως ροή κορημάτων Καναρίων νήσων) που συσχετίζεται με την κατάρρευση της βόρειας πλευράς του νησιού και εκτείνεται για περίπου 500km μέχρι την Αβυσσική Πεδιάδα της Μαδέρας (Masson, 1996). Τέτοιες αποθέσεις παρέχουν επομένως ένα σημαντικό αρχείο για καταρρεύσεις ηφαιστειακών νησιών που είναι δυνατό να συμβούν σε ρηγά νερά και οι οποίες αυξάνουν την ηφαιστειακή επικινδυνότητα.

### 8.4.2.4 Υποθαλάσσιες «χιονοστιβάδες» ηφαιστειακών θραυσμάτων

Οι χιονοστιβάδες ηφαιστειακών θραυσμάτων είναι πολύ γνωστές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στα επιφανειακά ηφαίστεια, όμως οι πρόσφατες ωκεανογραφικές έρευνες έχουν αποκαλύψει τη σημασία τους και στην ιζηματογένεση διαφόρων υποθαλάσσιων περιβαλλόντων (Carey and Schneider, 2011). Πρόκειται για μεγάλο όγκο, γρήγορες ροές βαρύτητας με μάζα θραυσμάτων πετρωμάτων, που προκύπτουν από μεγάλης κλίμακας αποσταθεροποιήσεις ή καταρρεύσεις των πλευρών των ηφαιστειακών οικοδομημάτων. Η διαδικασία ξεκινά με μια κύλιση πετρώματος (ή ιζήματος), η οποία γρήγορα μετατρέπεται σε μια ταχέως κινούμενη χιονοστιβάδα θραυσμάτων. Υπολείμματα από τέτοια γεγονότα κατάρρευσης μπορούν να βρεθούν τόσο στο επιφανειακό όσο και στο υποθαλάσσιο περιβάλλον.

Η δημιουργία των χιονοστιβάδων θραυσμάτων δεν σχετίζεται απαραίτητα με εκρηκτικά επεισόδια, συνοδεύει όμως την εξέλιξη των περισσότερων ηφαιστίων, ιδιαίτερα των στρωματοηφαιστίων<sup>13</sup>, περιορίζοντας την κατακόρυφη ανάπτυξή τους. Παρατηρούνται συχνά σε ωκεάνια νησιά. Εκεί, αστάθειες στα πρηνή λόγω βαρύτητας (καθιζήσεις, κατακλύσεις, κατολισθήσεις) ωθούν συνήθως μεγάλους όγκους υλικών κατάντη, καταλήγοντας σε χιονοστιβάδες που μπορούν να ταξιδεύουν για εκατοντάδες χιλιόμετρα στη βαθιά θάλασσα. Επιπλέον, η ανάμειξη των θραυσμάτων με το νερό μπορεί να προκαλέσει δευτερογενείς ροές θραυσμάτων ικανές να ταξιδέψουν έως και 600 km από την πηγή (Masson, 1996). Σε ηφαιστειακά νησιά (πχ. Χαβάη), η αρχική αποσταθεροποίηση είναι συχνά συν-σεισμική και οι αποθέσεις σχηματίζουν ριπίδια με πάχος από 0,05 έως 2 km. Τα ριπίδια αναπτύσσονται συνήθως με διαδοχικά εκρηκτικά γεγονότα, όπως στις ακτές της νήσου Reunion και στις Μικρές Αντίλλες (Carey and Schneider, 2011). Εκτός από την ικανότητα μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ιζήματος στα βαθιά, μια σημαντική πτυχή των χιονοστιβάδων θραυσμάτων είναι η δυνατότητα δημιουργίας τσουνάμι μεγάλης κλίμακας (Ward, 2001).

## 8.5 Ηφαιστειοκλαστική ιζηματογένεση και φάσεις

Ο σχηματισμός των ηφαιστειοκλαστικών αποθέσεων μπορεί να ξεκινήσει από διάφορα συνεκρηκτικά γεγονότα, όπως πρωτογενείς πυροκλαστικές ροές, πυροκλαστικά κύματα, κατάπτωση αιωρούμενου στον αέρα υλικού που συνοδεύονται από ταχεία συσσώρευση και επανακινητοποίηση πυροκλαστών στη θάλασσα κατωφέρεια ή συνεκρηκτικά λαχάρ που εκφορτίζονται απευθείας στη θάλασσα. Όποιος και αν είναι ο μηχανισμός πυροδότησης, τα υλικά αυτά σχηματίζουν μια διαβαθμισμένη ακολουθία που μπορεί να συνδέεται με ένα ενιαίο ηφαιστειακό γεγονός.

Οι ηφαιστειοκλαστικές ακολουθίες διακρίνονται σε: (i) «*συνεκρηκτικές*» ακολουθίες, που σχηματίζονται ταυτόχρονα με την ηφαιστειακή δραστηριότητα μέσω της άμεσης επανεπεξεργασίας του πυροκλαστικού υλικού και εκτείνονται κατά την περίοδο κατά την οποία το τοπίο εξακολουθεί να ανταποκρίνεται στις υδρολογικές και ιζηματογενείς συνέπειες της έκρηξης- και ii) «*μεσοεκρηκτικές*» ακολουθίες, όπου συμβαίνουν κανονικές ιζηματογενείς διεργασίες «υποβάθρου» χωρίς άμεση ηφαιστειακή επίδραση (Smith, 1991).

<sup>13</sup> Το στρωματοηφαίστειο είναι ένας ψηλός, απότομος και κωνοειδής τύπος ηφαιστείου, όπου στην κορυφή του έχει συνήθως έναν μικρό κρατήρα. Τα στρωματοηφαίστεια αναπτύσσονται καθ' ύψος με τη διαστρωμάτωση λάβας και τέφρας. Εξ ορισμού, έχουν εναλλασσόμενα στρώματα πυροκλαστικών και λάβας. Όταν πέφτει τέφρα ή ρέει λάβα, στερεοποιείται και δημιουργεί έναν στενότερο κώνο. Η λάβα έχει υψηλό ιξώδες, οπότε σχηματίζει απότομες πλευρές.



Η αλληλεπίδραση μεταξύ ηφαιστειότητας και ιζηματογένεσης και η ανάπτυξη ταυτόχρονων σχηματισμών διέπονται σε μεγάλο βαθμό από δύο παράγοντες: (1) από την ενεργό ηφαιστειότητα η οποία παράγει άφθονο ίζημα που διοχετεύεται γρήγορα στις θέσεις απόθεσης και (2) από τις πλευρικές αλλαγές που μετασχηματίζουν τις ροές μεταφοράς υλικού.

Κατά τη διάρκεια των εκρήξεων, μεγάλοι όγκοι πυροκλαστικών και υδροκλαστικών ιζημάτων απελευθερώνονται πολύ ταχύτερα από οποιαδήποτε διαδικασία παραγωγής επικλαστικών σωματιδίων (Kuenzi, 1979; Walton, 1979; Vessel and Davies, 1981; Ballance, 1988; Houghton and Landis, 1989). Ο επεισοδιακός χαρακτήρας των εκρήξεων μπορεί να διαταράξει σε βάθος τα ιζηματογενή περιβάλλοντα και τις διεργασίες με αποτέλεσμα τις ταχείες αλλαγές στα συστήματα απόθεσης με την πάροδο του χρόνου. Η απομάκρυνση και η μεταφορά αυτών των υλικών από ενεργά ηφαίστεια πραγματοποιούνται μέσω μετασχηματισμών ροής, καθώς το υλικό μεταφέρεται σε γειτονικές λεκάνες απόθεσης. Τα ιζήματα μεταφέρονται από το ηφαίστειο στη θάλασσα για να αποθηκευτούν για ένα χρονικό διάστημα σε υποθαλάσσια περιβάλλοντα των περιθωρίων και στη συνέχεια επανακινητοποιούνται και μεταφέρονται σε βαθιές θαλάσσιες λεκάνες (Fisher, 1984). Κατά τη διάρκεια περιόδων ηρεμίας του ηφαιστείου, μικρότεροι όγκοι πυροκλαστικών, υδροκλαστικών και ηφαιστειακών επικλαστικών ιζημάτων επανακινητοποιούνται με παρόμοιους μετασχηματισμούς ροής (Walton, 1979).

Οι ηφαιστειοκλαστικές φάσεις εξαρτώνται τελικά από τη σύσταση του μάγματος, η οποία ελέγχει τους ρυθμούς έκρηξης, τους τύπους των σωματιδίων, τον τρόπο απόθεσης, τον συνολικό όγκο και συνεπώς τον τύπο του ηφαιστείου. Σε περιβάλλοντα υποβύθισης, τα μάγματα της σειράς ανδεσίτη έως δακίτη συγκροτούν υψηλά στρωματοηφαίστεια με μεγάλους όγκους και μεγάλα ύψη, και επομένως μεγάλες δεξαμενές ιζημάτων (Hackett and Houghton, 1989). Διαβρώνονται γρήγορα, παρέχοντας μεγάλους όγκους επανεπεξεργασμένων πυροκλαστικών και υδροκλαστικών σωματιδίων μαζί με επικλαστικά ηφαιστειακά θραύσματα που αποτίθενται στις γύρω λεκάνες. Οι μεγάλες καλδέρες, που συνήθως δημιουργούνται σε περιοχές με εκτατικό οπισθότοξο, είναι εξίσου ογκώδεις με τα στρωματοηφαίστεια, αλλά είναι ηφαίστεια χαμηλής στάθμης. Οι πολύ μεγάλοι κρατήρες καλδέρας είναι αρχικά κλειστές ιζηματογενείς λεκάνες στις οποίες αποτίθενται λιμναία ιζήματα και μπλοκ καταπτώσεων από τα τοιχώματα του κρατήρα. Οι διαφορές μεταξύ των ηφαιστειών απαιτούν να λαμβάνονται υπόψη διαφορετικές παράμετροι της φάσης για την ανακατασκευή ηφαιστειακών περιοχών. Αυτές οι παράμετροι της φάσης είναι: (1) οι φάσεις που σχετίζονται με την απόσταση, (2) ο τύπος του ηφαιστείου προέλευσης και (3) αν οι εστίες ήταν μονές, πολλαπλές, κεντρικές ή πλευρικές.

Η παρουσία θραυσμάτων υάλου (θραύσματα, ελαφρόπετρα) μέσα σε ιζηματογενείς ακολουθίες υποδηλώνει πυροκλαστική ή υδροκλαστική προέλευση. Επιπλέον, το γυαλί είναι μετασταθές και μεταβάλλεται εύκολα σε αργίλους και ζεόλιθους και, επομένως, δεν εμφανίζεται ως επικλαστικό θραύσμα.

Στις αναλύσεις θαλάσσιων λεκανών, το υψηλό δυναμικό διατήρησης των ηφαιστειακών αποθέσεων είναι χρήσιμο για την ανασύσταση της ηφαιστειακής ιστορίας των περιοχών προέλευσής τους. Μετά την πρωτογενή απόθεση, οι μη στερεοποιημένες πυροκλαστικές αποθέσεις μπορούν εύκολα να επηρεαστούν από τη διάβρωση, την επανεπεξεργασία και την πρόσμειξη με επικλαστικά υλικά για να σχηματίσουν *μεικτές αποθέσεις πυροκλαστικών-πυριτοκλαστικών ιζημάτων*.

### 8.5.1 Στρωματογραφία ηφαιστειοκλαστικών αποθέσεων

Οι στρωματογραφικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των ηφαιστειοκλαστικών ιζημάτων είναι παρόμοιες με εκείνες που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των κλασικών ιζηματογενών πετρωμάτων και έχουν παρόμοιους σκοπούς: δημιουργία συσχετίσεων, κατακόρυφες χρονικές ακολουθίες, προσδιορισμό των αλλαγών των φάσεων και άλλα παρόμοια. Πρόσθετη βοήθεια στη στρωματογραφία των ηφαιστειοκλαστικών ιζημάτων προέρχεται από την πετρολογία πυριγενών πετρωμάτων, τις μελέτες εξέλιξης του μάγματος και τις μελέτες της ιστορίας ανάπτυξης των ηφαιστειών.

Τονίζεται ότι η στρωματογραφική ανάλυση που περιλαμβάνει,

- i. χαρτογράφηση και υποδιαίρεση των ηφαιστειακών ακολουθιών σε μέλη, σχηματισμούς και ομάδες,
- ii. προσδιορισμό των κατακόρυφων και πλευρικών αλλαγών των φάσεων και
- iii. ερμηνεία των τύπων των εκρήξεων, καθώς και της προέλευσης και του τρόπου μεταφοράς των τύπων πετρωμάτων και των περιβαλλόντων απόθεσης,

παρέχει το απαραίτητο πλαίσιο για τις πετρολογικές και γεωχημικές αναλύσεις αφού τα πυροκλαστικά και επικλαστικά ηφαιστειακά πετρώματα παρέχουν συχνά τις σημαντικότερες παραμέτρους για τον καθορισμό του στρωματογραφικού πλαισίου σε ηφαιστειακές περιοχές.

Ωστόσο, λόγω των πολλών τρόπων με τους οποίους δημιουργούνται οι ηφαιστειακές ακολουθίες, διαφορετικές στρωματογραφικές και πετρολογικές προσεγγίσεις μπορεί να είναι απαραίτητες σε διαφορετικές συνθήκες, όπως, για παράδειγμα, σε περιοχές με βασαλτικά επίπεδα, επίπεδα ιγνιμβρίτη, συστάδες κώνων σκωρίας, σύνθετα ηφαιστεια ανδεσίτη, στρώματα τέφρας βαθιάς θάλασσας ή παχιές μη θαλάσσιες συσσωρεύσεις τόφφων.

Τα πυροκλαστικά υλικά εναποτίθενται σε στιγμιαίο γεωλογικό χρόνο και είναι επομένως χρήσιμα για τη *χρονοστρωματογραφία*. Η ισόχρονη απόθεσή τους σε μεγάλες περιοχές και αποθέσεις παρέχει ένα ισχυρό εργαλείο για τη χρονολόγηση και τη συσχέτιση διαφορετικών ιζηματογενών αρχείων. Σε απομακρυσμένες περιοχές, αυτές οι αποθέσεις είναι γενικά χαλαρές, καλά ταξινομημένες και λεπτοστρωματώδεις (<2 mm). Αντίθετα, οι πυροκλαστικές ροές τείνουν να σχηματίζουν αταξινόμητες, μεγάλου πάχους αποθέσεις (*ιγνιμβρίτες*) σε αποστάσεις που κυμαίνονται από λίγα έως δεκάδες χιλιόμετρα από την εστία. Οι *τέφρες*, δηλαδή τα χαλαρά πυροκλαστικά υλικά οποιασδήποτε προέλευσης, και οι λιθοποιημένες τέφρες, που πρόκειται για στρώματα πλούσια σε ηφαιστειακά υλικά, μπορεί να είναι οι μοναδικοί μάρτυρες ανενεργών ηφαιστειών, που έχουν σβήσει από τεκτονικές ή διαβρωτικές διεργασίες. Τέλος, υπάρχουν *κρυπτοτέφρες*, δηλαδή ιζηματογενή επίπεδα που φιλοξενούν ηφαιστειακά υλικά.

### 8.5.2 Ακολουθίες πυροκλαστικών ροών

Τα πυροκλαστικά ρεύματα περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα διαδικασιών έκρηξης, μεταφοράς και απόθεσης, και συνεπώς παράγουν μια ποικιλία τύπων αποθέσεων (π.χ. Branney and Kokelaar, 1992). Η συγκέντρωση των σωματιδίων και το κυρίαρχο καθεστώς ροής ορίζουν δύο ακραίους τύπους πυροκλαστικών ρευμάτων: (i) τα τυρβώδη με χαμηλή συγκέντρωση σωματιδίων, γνωστά ως *αραιά πυροκλαστικά ρεύματα ή πυροκλαστικά συμβάντα* (pyroclastic surges), και (ii) τα μη τυρβώδη με υψηλή συγκέντρωση σωματιδίων, γνωστά ως *πυκνά πυροκλαστικά ρεύματα ή πυροκλαστικές ροές*. Τα πρώτα πιθανώς αποτίθενται προοδευτικά και παράγουν ποικίλες δομές (όπως κανονικά διαβαθμισμένα, παράλληλα ή στρώματα με διασταυρούμενη στρώση, θίνες κ.ά.), ενώ οι πυκνές, στρωτές ροές θεωρείται ότι παράγουν ογκώδεις, κακώς ταξινομημένες, μη διαβαθμισμένες αποθέσεις (Palladino and Simei, 2002).

Επιπλέον, η διαδικασία επανακινητοποίησης μιας πυροκλαστικής ροής, μπορεί να αφήσει ίχνη όπως: (i) αλλαγές στην κατανομή μεγέθους των κόκκων, (ii) αλλαγή στο σχήμα των κόκκων, (iii) ιζηματογενείς δομές λόγω φορτίου, ροής ή/και βαρύτητας, (iv) παραμόρφωση μαλακών ιζημάτων και (v) παρουσία βιοδηλωτικών ιχνών και απολιθωμάτων.

Παρά τις λεπτομερείς περιγραφές πεδίου, την αφθονία ιζηματολογικών δεδομένων, τα εργαστηριακά πειράματα και τις προσομοιώσεις στους υπολογιστές, πολλά θέματα γύρω από τα πυροκλαστικά ρεύματα παραμένουν ανοιχτά. Μία επιπλέον δυσκολία προκύπτει από το ότι τα χαρακτηριστικά των αποθέσεων αντικατοπτρίζουν κυρίως τις διαδικασίες κατά το τελευταίο στάδιο της απόθεσης. Επομένως είναι κρίσιμο στην έρευνα συγκεκριμένων πυροκλαστικών αποθέσεων να αξιολογείται το κατά πόσο τα χαρακτηριστικά τους αποτελούν αξιόπιστους δείκτες και για τα χαρακτηριστικά των μητρικών ροών που τις δημιούργησαν (Palladino and Simei, 2002).

### 8.5.3 Ιγνιμβριτικές αποθέσεις

Ο όρος *ιγνιμβρίτης* περιλαμβάνει πιθανώς ένα από τα μεγαλύτερα εύρη τύπων αποθέσεων στη Γη. Σχετίζεται με τη μερική έως και την ολική κατάρρευση των εκρηκτικών στηλών των ηφαιστειών η οποία παράγει κοντά στο έδαφος ρεύματα πυκνότητας από θερμά μείγματα πυροκλαστών και αερίων. Τα ρεύματα αυτά τροφοδοτούνται από συνεχείς εκρηκτικούς πίδακες που ανέρχονται σε κάποιο ύψος, μέχρις ότου η αρχική τους κινητική ενέργεια καταναλωθεί, οπότε και πέφτουν στο έδαφος τροφοδοτώντας πλευρικά ρεύματα (Valentine et al., 2019).

Για τους τύπους των ιγνιμβριτών δεν υπάρχει ποσοτικοποιημένο σχέδιο. Επιπλέον, οι τύποι των ιγνιμβριτών δεν συμβαδίζουν με την ονοματολογία του τύπου της έκρηξης. Ως αποτέλεσμα, η συσχέτιση των διαφόρων ιγνιμβριτών είναι δύσκολη, με μόνη εξαίρεση τους ενδοπλίνιους ιγνιμβρίτες που είναι

ενδιαστρωμένοι σε αποθέσεις κατακρήμνισης από πλίνια δραστηριότητα<sup>14</sup> και άρα σχηματίστηκαν από την ίδια έκρηξη (Giordano and Cas, 2021).

Συνεπώς, υπάρχει ένα φάσμα τύπων ιγνιμβριτών, με ένα φάσμα χαρακτηριστικών που αντικατοπτρίζουν μια ποικιλία διαδικασιών απόθεσης. Μεταξύ των πιο διαδεδομένων είναι οι ογκώδεις ιγνιμβρίτες που έχουν συσσωρευτεί σε τοπογραφικά χαμηλά και διακρίνονται για την κατακόρυφη και πλευρική κανονική διαβάθμιση των αδρομερών κλαστών τους και την αντίστροφη διαβάθμιση των κλαστών κίσηρης.

Οι ογκώδεις ιγνιμβρίτες θεωρείται ότι προκύπτουν κυρίως από διασπορές υψηλής συγκέντρωσης σωματιδίων. Άλλοι τύποι ιγνιμβριτών εμφανίζουν σημαντική διαστρωμάτωση και διάφορες κοκκομετρικές παραλλαγές, υποδηλώνοντας απόθεση από αραϊά ή/και ασταθή ρεύματα πυκνότητας (Εικόνα 8.8) (Branney and Kokelaar, 2002).



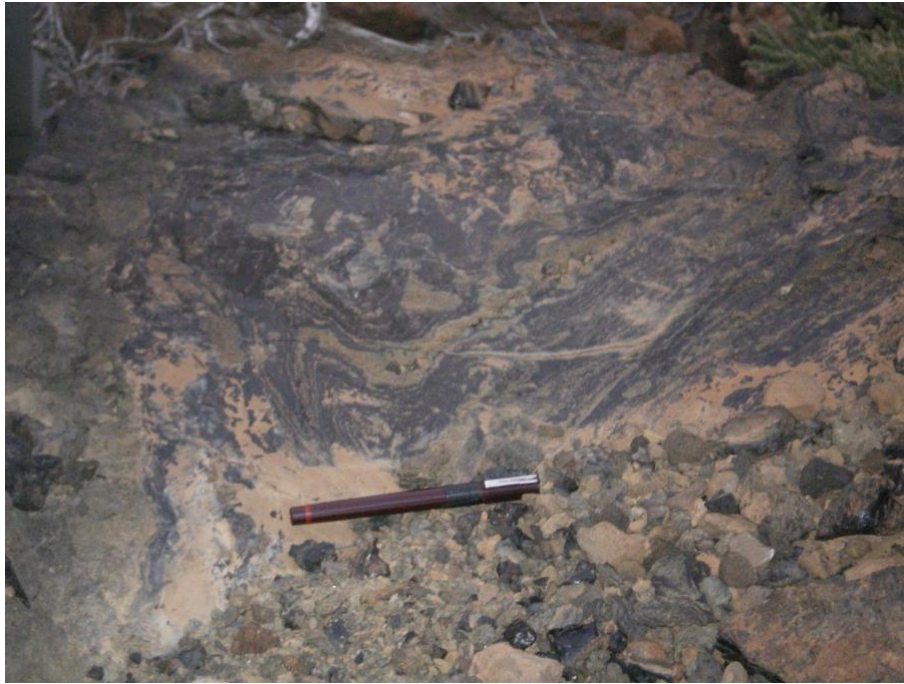
**Εικόνα 8.8** Κάλυμμα αποτελούμενο από ένα στρώμα ιγνιμβρίτη του σχηματισμού Rattlesnake στο Όρεγκον (από Jstuby – άδεια χρήσης, CC0, πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=65402543>).

Επιπλέον, οι ιγνιμβρίτες παρουσιάζουν μια ποικιλία παραλλαγών, στις πλευρικές τους φάσεις, από αποθέσεις ογκώδεις που γεμίζουν τις κοιλάδες, ως αποθέσεις λεπτές, στρωματοποιημένες ή με διασταυρούμενη στρώση που εντοπίζονται στις παρακείμενες, τοπογραφικά υψηλότερες, περιοχές (Druitt, 1998). Συχνά, οι εγγύτερες προς την πηγή φάσεις των ιγνιμβριτών είναι αδρομερείς, πλούσιες σε λιθοκλάστες και τόφφους, με τους περισσότερους ερευνητές να συσχετίζουν αυτά τα λατυποπαγή με εισροές αδρομερών κλαστών από τα τοιχώματα του ηφαιστείου στα εκρηκτικά σιντριβάνια κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης της καλδέρας.

Οι ιγνιμβρίτες συχνά υπέρκεινται λεπτών αποθέσεων (γνωστών στη βιβλιογραφία ως *βασικές αποθέσεις*), οι οποίες μπορεί να είναι συνεχείς ή να έχουν τη μορφή ασυνεχών φακών και αποτελούνται συνήθως από κλάστες του υπερκείμενου ιγνιμβρίτη. Η γενεσιουργός αιτία τους δεν είναι ξεκάθαρη, ωστόσο, από μεγάλης κλίμακας πειράματα που έχουν γίνει, έχει διαφανεί ότι σημαντικό ρόλο στη δημιουργία τους παίζουν οι πλευρικές διογκώσεις τέφρας (surges) που συνοδεύουν τα συμπυκνωμένα πυροκλαστικά ρεύματα (Breard et al., 2016).

Οι βασικές αποθέσεις των ιγνιμβριτών ομαδοποιούνται σε δύο τύπους: (α) εκείνες που κυριαρχούνται από χοντρή τέφρα ως λάπιλλους και τείνουν να είναι ογκώδεις με παρόμοια στοιχεία και κοκκομετρία με τον κύριο ιγνιμβρίτη, και (β) εκείνες που κυριαρχούνται από τέφρα ως λεπτούς λάπιλλους και είναι στρωματοποιημένες ή με διασταυρούμενη στρώση. Αυτές εκτιμάται ότι έχουν προκύψει από αραιωμένα και τυρβώδη σύννεφα αιωρούμενων σωματιδίων (Εικόνα 8.9).

<sup>14</sup> Οι πλίνιες εκρήξεις είναι εξαιρετικά σφοδρές εκρηκτικότητας, οι οποίες παράγουν στήλες τέφρας που εκτείνονται πολλές δεκάδες μίλια μέσα στη στρατόσφαιρα και απλώνονται σε σχήμα ομπρέλας. Αυτές οι μεγάλες εκρήξεις παράγουν εκτεταμένες αποθέσεις τέφρας. Οι στήλες έκρηξης μπορεί επίσης να καταρρεύσουν λόγω πυκνότητας και να σχηματίσουν πυκνές πυροκλαστικές ροές.



**Εικόνα 8.9** Ρεομορφικές δομές ροής σε ιγνιμβρίτη, Νήσος Λιπάρι, Ιταλία  
(Δημόσια χρήση, πηγή: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=17455697>).

#### 8.5.4 Αποθέσεις τέφρας

Η τέφρα είναι προϊόν μεγάλης ηφαιστειακής έκρηξης και μπορεί να ταξιδέψει για χιλιάδες χιλιόμετρα πριν αποθεθεί. Σε θαλάσσια και λιμναία περιβάλλοντα με συνεχή καθίζηση και μικρή φυσική διαταραχή, διατηρούνται ακόμη και λεπτά στρώματα τέφρας από μικρές, τοπικές ή μεγάλες, απομακρυσμένες εκρήξεις.

Στις τέφρες περιλαμβάνονται όλα τα εκρηκτικά προϊόντα, τόσο από κατακρήμνιση όσο και από πυροκλαστικές ροές (Lowe, 2011). Έτσι, οι τέφρες είναι μείγματα από πυροκλάστες διαφόρων μεγεθών (με τα νεότερα σωματίδια να είναι κυρίως θραύσματα γυαλιού) και από ορυκτά. Κάθε τέφρα παρουσιάζει συγκεκριμένα πετρογραφικά/γεωχημικά χαρακτηριστικά, τα οποία αντικατοπτρίζουν το μάγμα προέλευσής της και τις συνθήκες στη μαγματική πηγή (π.χ. τις παραμέτρους υποβύθισης, το γεωτεκτονικό περιβάλλον, τη χημεία του μανδύα, τον τρόπο έκρηξης κ.λπ.). Τα χαρακτηριστικά αυτά αναφέρονται συνήθως ως *γεωχημικό δακτυλικό αποτύπωμα* της τέφρας.

Στρώματα τέφρας εμφανίζονται συχνά σε θαλάσσια ιζήματα, με τη διασκορπισμένη τέφρα να είναι κατά τόπους σημαντική. Για παράδειγμα, η τέφρα αντιπροσωπεύει το 15-20% κ.β. των ιζημάτων στην Καραϊβική, και το 30-35% κ.β. των ιζημάτων στον ΒΔ Ειρηνικό (Ikehara, 2015). Στρώματα τέφρας εμφανίζονται επίσης σε χερσαία και παγετώδη περιβάλλοντα. Αν και οι εκρήξεις μπορούν να διαρκούν από μέρες έως δεκαετίες, οι τέφρες από σχετικά βραχείας διάρκειας εκρήξεις θεωρούνται γεωλογικά σύγχρονες αποθέσεις και άρα αντιπροσωπεύουν χρονοστρωματογραφικά στρώματα-δείκτες που συνδέουν πολλά διαφορετικά περιβάλλοντα.

Στους θαλάσσιους πυρήνες, οι τέφρες είναι ορατές είτε ως στρώμα (παχύ ή λεπτό) είτε με τη μορφή φακών ή κηλίδων. Η εμφάνισή τους εξαρτάται από: (1) τον όγκο και το μέγεθος των κόκκων της τέφρας, που σχετίζονται με τον όγκο της έκρηξης και την απόσταση μεταφοράς, (2) τη διάρκεια και τον τρόπο της έκρηξης, (3) τις τοπικές φυσικές και βιολογικές συνθήκες (π.χ. δράση των ρευμάτων/κυμάτων και δραστηριότητα των βενθονικών οργανισμών), (4) τον τύπο των θαλάσσιων ιζημάτων, και (5) τον ρυθμό ιζηματογένεσης. Ποικίλες διαταραχές μετά την απόθεση μπορούν να καταστήσουν τα στρώματα της τέφρας αόρατα (Ikehara, 2015).

Το περιβάλλον απόθεσης και η τεκτονική επηρεάζουν έντονα τη διατήρηση της ηφαιστειακής τέφρας. Συγκεκριμένα, η ηφαιστειακή τέφρα που αποτέθηκε κατά τη διάρκεια των επικλυσιογενών φάσεων των ιζηματογενών κύκλων έχει υψηλό δυναμικό διατήρησης. Για αυτόν τον λόγο, αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς στρωματογραφικούς δείκτες για στρωματογραφικούς συσχετισμούς αφού καταγράφει πληροφορίες σχετικά με τις γεωδυναμικές συνθήκες και τις ιζηματογενείς διεργασίες που δρουν κατά τη διάρκεια της μεταφοράς.

#### 8.5.4.1 Συσχέτιση των αποθέσεων τέφρας – τεφροχρονολόγηση

Η χρήση πρωτογενών στρωμάτων τέφρας<sup>15</sup> (ή αποθέσεων κρυπτοτέφρας) ως ισόχρονων στρωμάτων-δεικτών με σκοπό τη συσχέτιση και τον συγχρονισμό των αποθέσεων ή των εδαφών/παλαιοεδαφών που τις περιέχουν ονομάζεται *τεφροχρονολόγηση*. Πρακτικά, αυτή επιτυγχάνεται με τη μεταφορά σχετικών ή απόλυτων ηλικιών στις ακολουθίες των στρωμάτων, χρησιμοποιώντας δεδομένα από τη σύσταση και τη λιθοστρωματογραφία μιας συγκεκριμένης τέφρας/κρυπτοτέφρας (Lowe and Alloway, 2015). Η τεφροχρονολόγηση έχει καταστεί πλέον σημαντικό εργαλείο σε ένα ευρύ φάσμα ερευνητικών πεδίων που περιλαμβάνει από κλασικές εφαρμογές (όπως χρονολόγηση, παλαιοπεριβαλλοντικές ανακατασκευές, εξέλιξη αναγλύφου, και αρχαιολογία), μέχρι πιο σύγχρονες (όπως ιατρική και πανδημική έρευνα, αξιολόγηση αεροπορικών κινδύνων, εξέλιξη των ανθρώπινων ειδών κ.ά.) (Lowe et al., 2017).

Η μέθοδος βασίζεται κυρίως στην αναγνώριση του δακτυλικού αποτυπώματος της τέφρας. Για αυτό, απαιτούνται συνήθως εργαστηριακές αναλύσεις ώστε να συμπληρωθούν τα στρωματογραφικά στοιχεία από το πεδίο, ειδικά για τις πιο απομακρυσμένες περιοχές όπου οι τέφρες είναι πιο λεπτόκοκκες και οι αποθέσεις τείνουν να περιέχουν στρώματα από διάφορες εκρήξεις και ηφαιστειακές πηγές, καθώς και μη ηφαιστειακά υλικά (Lowe and Alloway, 2015). Τέτοιες αναλύσεις περιλαμβάνουν την ταυτοποίηση των ορυκτών με περίθλαση ακτίνων X ή οπτική μικροσκοπία, τη χημική ανάλυση θραυσμάτων ή κρυστάλλων γυαλιού με ηλεκτρονικό μικροανιχνευτή, και αναλύσεις των εγκλεισμάτων του τήγματος (π.χ. των ορυκτών ξενιστών).

#### 8.5.4.2 Αποθέσεις τέφρας

Οι αποθέσεις τέφρας διακρίνονται σε:

- αποθέσεις κατακρήμνισης (πτώσης),
- αποθέσεις ροής,
- αποθέσεις ωστικού κύματος.

Οι *αποθέσεις κατακρήμνισης* είναι το αποτέλεσμα πυροκλαστικών εκρήξεων. Το υλικό εκτινάσσεται από έναν ηφαιστειακό κρατήρα και ένα καυτό μανιτάρι από αέρια και τέφρα ανυψώνεται στην ατμόσφαιρα. Το σύννεφο τέφρας εξαπλώνεται εκατοντάδες – χιλιάδες χιλιόμετρα από το ηφαίστειο. Με την αύξηση της απόστασης από τον κρατήρα, το πάχος απόθεσης ελαττώνεται και η τέφρα γίνεται πιο λεπτόκοκκη με καλύτερη ταξινόμηση.

Οι πυροκλαστικές *ροές τέφρας* συνήθως προέρχονται από την κατάρρευση της υπερφορτωμένης κολώνας του κρατήρα. Αυτές κινούνται στις κλιτύες του ηφαιστειακού κώνου, μέσα στις κοιλάδες και τις γεωμορφολογικές ταπεινώσεις. Είναι ζεστές, μερικά υγροποιημένες, μείξεις αερίων – στερεών, με υψηλές συγκεντρώσεις τεμαχιδίων.

Οι ροές αυτές μεταφέρουν μεγάλους όγκους πυροκλαστικού ιζήματος σε μεγάλες αποστάσεις. Απόδειξη της απόθεσης των υπέρθερμων μαζών πυροκλαστικών ροών είναι, μεταξύ άλλων, και η απολίθωση καμένου ξύλου, καθώς και η τηγμένη υφή στους ιγνιμβρίτες. Αν η ροή εισέλθει σε θάλασσα ή λίμνη, τότε δημιουργείται μια ηφαιστειοκλαστική βαρυτική ροή που μπορεί να μεταφέρει το ίζημα σε αποστάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων.

Ταυτόχρονα, λόγω υπέρθερμης κατάστασης του ηφαιστειοκλαστικού υλικού, τμήμα της ροής μπορεί να αποσπαστεί πάνω στην επιφάνεια του νερού και να μεταφέρει υπέρθερμο ίζημα σε αποστάσεις πολλών δεκάδων χιλιομέτρων, ενώ δημιουργείται και ένα δεύτερο νέφος τέφρας που μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένες κατακρημνίσεις τέφρας.

Κατά τη διάρκεια της ενεργής φάσης υποθαλάσσιας ηφαιστειακής δραστηριότητας, μεγάλοι όγκοι τέφρας διαχέονται στο νερό. Μέρος του πυροκλαστικού υλικού καθιζάνει στον βυθό, δημιουργώντας μια υποθαλάσσια πυροκλαστική ροή. Φλυκταινώδη συστατικά (κίσηρη) επιπλέουν στην επιφάνεια και φτάνουν στην ακτή. Λεπτόκοκκη τέφρα μπορεί να παραμείνει σε αιώρηση για μεγάλο χρονικό διάστημα και να μεταφερθεί με ρεύματα σε μεγάλες αποστάσεις. Όταν μειωθεί η ηφαιστειακή δραστηριότητα, το εκλυόμενο πυροκλαστικό υλικό συσσωρεύεται γύρω από τον κρατήρα μέχρις ότου κατακυλήσει κατά μήκος των κλιτύων.

---

<sup>15</sup> Μια τέφρα θεωρείται πρωτογενής εάν διατηρεί το αρχικό της πάχος και δομή μετά την απόθεσή της και διακρίνεται επίσης από μια εσωτερική στρωματογραφία και απότομες επαφές με τα ιζήματα που την περικλείουν στην κορυφή και στη βάση. Ωστόσο, ορισμένες πρωτογενείς αποθέσεις είναι ογκώδεις, μη στρωματοποιημένες και ισότροπες. Εάν μια πρωτογενής τέφρα είναι μερικώς διαβρωμένη, θεωρείται *ατελής*.



Οι *ροές ωστικού κύματος* είναι μεγάλης ταχύτητας, χαμηλής πυκνότητας και τυρβώδεις ροές, οι οποίες δημιουργούνται από διάφορους μηχανισμούς. Πιο σημαντικές είναι αυτές που προκύπτουν από τα ωστικά κύματα βάσης και σχηματίζουν ένα χαμηλό σύννεφο που επεκτείνεται ακτινικά προς όλες τις κατευθύνσεις με ταχύτητες που υπερβαίνουν τα 100 m/sec και στη κυριολεξία «ξυρίζουν» δέντρα και αντικείμενα, κατά την επέλασή τους. Αυτές οι ωστικές ροές είναι υγρές και χαμηλής θερμοκρασίας. Υπάρχουν και άλλων ειδών ροές, όπως είναι οι εδαφικές οι οποίες δημιουργούνται από την κατάρρευση της στήλης της έκρηξης. Αυτές ονομάζονται *ροές ωστικών νεφών στάχτης*. Οι αποθέσεις των ωστικών κυμάτων είναι μικρού πάχους και ακανόνιστες. Η υφή τους αποτελείται από κλάστες μεγέθους τέφρας. Συνήθως αναπτύσσουν ιζηματοδομές που περιλαμβάνουν κυματοειδή και διασταυρούμενη ελασματοειδή στρώση, ρυτιδώσεις και θίνες.

## Βιβλιογραφία/Αναφορές

### Ξενόγλωσση

- Ballance, P.F. (1988). The Huriwai braidplain delta of New Zealand: a late Jurassic, coarsegrained, volcanic-fed depositional system in a Gondwana forearc basin. In: W. Nemec & R.J. Steel (Eds.), *Fan Deltas: Sedimentology and Tectonic Settings*. Blackie and Son, Glasgow, pp. 430–444.
- Branney, M.J., & Kokelaar, B.P. (2002). *Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites*. Geological Society of London. Memoirs 27, 145.
- Breard, E.C.P., Lube, G., Jones, J.R., Dufek, J., Cronin, S.J., Valentine, G.A., & Moebis A. (2016). Coupling of turbulent and non-turbulent flow regimes within pyroclastic density currents. *Nat Geosc.*, 9, 767-774.
- Carey, S.N. (1997). Influence of convective sedimentation on the formation of widespread tephra fall layers in the deep sea. *Geology*, 25, 839-842.
- Carey, S.N., & Schneider, J.-L. (2011). Volcaniclastic processes and deposits in the deep-sea. In: H. Huneke et al. Deep-sea sediments. *Developments in Sedimentology*, 63, pp. 457-515.
- Cas, R.A.F., & Busby-Spera, C.J. (1991). Preface — volcaniclastic sedimentation. *Sedimentary Geology*, 74(1-4), 309-321.
- Cas, R.A.F., & Wright, J.V. (1987). *Volcanic Successions, Modern and Ancient*. Unwin Hyman, Boston. 528 pp.
- Dickinson, W.R. (1974a). Plate tectonics and sedimentation. In: W.R. Dickinson (Ed.), *Tectonics and sedimentation*. Society of Economic Mineralogists and Paleontologists Special Publication, vol. 19. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, Ok.
- Dickinson, W.R. (1974b). Sedimentation within and beside ancient and modern magmatic arcs. In: R.H. Dott & R.H. Shaver (Eds.), *Modern and ancient geosynclinal sedimentation*: Society of Economic Mineralogists and Paleontologists Special Publication, vol. 19. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, Ok, pp. 230–239.
- Druitt, T.H. (1998). Pyroclastic density currents. In: J.S. Gilbert & R.S.J. Sparks (Eds.), *The physics of explosive volcanic eruptions*. Geol Soc, London, Spec Pub 145:145-182.
- Fisher, R V. (1961). Proposed classification of volcaniclastic sediments and rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 72, 1409–1414.
- Fisher, R. (1984). Submarine volcanic rocks. In: B.P. Kokelaar & M.F. Howells (Eds.), *Marginal Basin Geology: Volcanic and Associated Processes in Modern and Ancient Basins*, Geological Society of London Special Publication, vol. 16, pp. 5–27.
- Fisher, R.V. (1990). Transport and deposition of a pyroclastic surge across an area of high relief: The 18 May 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington. *Bull. Geol. Soc. Amer.* 102, 1038-1054.
- Fisher, R.V., & Schminke, H.U. (1984). *Pyroclastic rocks*. Berlin: Springer-Verlag.
- Fisher R.V., & Smith G. A. (Eds.) (1991). *Sedimentation in Volcanic Settings*. SEPM Special Publication no. 45. v 257 pp. Tulsa.
- Gillespie, M. R., & Styles, M T. (1999). *Rock Classification Scheme, Volume 1. Classification of igneous rocks*. British Geological Survey Research Report, (2nd ed.). RR 99–06.
- Hackett, W.R., & Houghton, B.F. (1989). A facies model for a Quaternary andesitic composite volcano: Ruapehu, New Zealand. *Bulletin of Volcanology*, 51, 51–68.
- Haldar, S.K. (2020). Sedimentary rocks. In: S.K. Haldar (Ed.), *Introduction to Mineralogy and Petrology* (2nd ed.), Elsevier, 187-268.

- Houghton, B.F., & Landis, C.A. (1989). Sedimentation and volcanism in a Permian arc-related basin, southern New Zealand. *Bulletin of Volcanology*, 51, 433–450.
- Ikehara, K. (2015). Marine tephra in the Japan Sea sediments as a tool for paleoceanography and paleoclimatology. *Prog. in Earth and Planet. Sci.* 2, 36.
- Kuenzi, W.D., Horst, O.H., & McGehee, R.V. (1979). Effect of volcanic activity on fluvial-deltaic sedimentation in a modern arc-trench gap, southwestern Guatemala. *Geological Society of America Bulletin*, 90, 827–838.
- Lacasse, C., Sigurdsson, H., Carey, S., Paterne, M., & Guichard, F. (1996). North Atlantic deep-sea sedimentation of late Quaternary tephra from the Iceland hotspot. *Mar. Geol.*, 129, 207–235.
- Leyrit, H., & Montenant, C. (Eds.) (2000). *Volcaniclastic rocks from magmas to sediments*. Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam. 270 pp.
- Lowe, D.J., Pearce, N.J.G., Jorgensen, M.A., Kuehn, S.C., Ttyon, C.A., & Hayward, C.L. (2017). Correlating tephtras and cryptotephtras using glass, compositional analyses and numerical and statistical methods: Review and evaluation. *Quaternary Science Reviews*, 175, 1–44.
- Lowe, D.J. (2011). Tephrochronology and its application: a review. *Quat Geochronol.*, 6, 107– 53.
- Lowe, D.J., & Alloway, B.V. (2015). Tephrochronology. In: W.J. Rink & J.M. Thompson (Eds.), *Encyclopedia of Scientific Dating Methods*. Springer, Dordrecht pp. 783–799.
- Manville, V., Nemeth, K., & Kano, K. (2009). Source to sink: A review of three decades of progress in the understanding of volcaniclastic processes, deposits, and hazards. *Sedimentary Geology*, 220, 136–161.
- Masson, D.G. (1996). Catastrophic collapse of the volcanic island of Hierro 15 ka ago and the history of landslides in the Canary island. *Geology*, 24, 231–234.
- McCaffrey, W.D., Kneller, B.C., & Peakall, J. (Eds.) (2001). *Particulate gravity currents*. International Association of Sedimentologists Special Publication, vol. 31. Blackwell Science, Oxford. 302 pp.
- Newhall, C.G., & Punongbayan, A.S. (1996). *Fire and Mud, Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Quezon City & Seattle & London. Philippine Institute of Volcanology and Seismology & University of Washington Press. 1126 pp.
- Orton, G.J. (1996). Volcanic environments. In: H.G. Reading (Ed.) *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. Blackwell Science, Oxford, pp. 485–567.
- Qiu, J. (1985). *Magmatic Petrology*. Geologic Publishing House, Beijing.
- Simkin, T., & Fiske, R.S. (1983). *Krakatau 1883-The Volcanic Eruption and its Effects*. Smithsonian Institution Press, Washington, 464 pp.
- Smith, G.A. (1991). Facies sequences and geometries in continental volcaniclastic sediments. In: R.V. Fisher & G.A. Smith (Eds.), *Sedimentation in Volcanic Settings*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, vol. 45, pp. 10–25. Tulsa, Ok.
- Smith, G.A. (1988a). Sedimentology of proximal to distal volcaniclastics dispersed across an active foldbelt: Ellensburg Formation (late Miocene), central Washington. *Sedimentology*, 35, 953–977.
- Smith, G.A. (1988b). *The influence of explosive volcanism on fluvial sedimentation: The Deschutes Formation (Neogene) in central Oregon*. *J. sediment. Petrol.*, 57, 613–629.
- Sparks, R.S.J., Wilson, L., & Hulme, G. (1978). Theoretical modeling of the generation movement and emplacement of pyroclastic flows by column collapse. *J. geophys. Res.*, 83, 1727–1739.
- Sparks, R.S.J. (1976). Grain size variations in ignimbrites and implications for the transport of pyroclastic flows. *Sedimentology*, 23, 147–188.
- Suzuki-Kamata, K. (1988). The ground layer of Ata pyroclastic flow deposits, southwestern Japan--evidence for the capture of lithic fragments. *Bull. Volcanol.*, 50, 119–129.

- Vessell, R.D., & Davies, D.K. (1981). Nonmarine sedimentation in an active fore arc basin. In: F.G. Ethridge & R.M. Flores (Eds.), *Nonmarine Depositional Environments: Models for Exploration*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, vol. 31, pp. 34–45.
- Walton, A.W. (1979). Volcanic sediment apron in the Tascotal Formation (Oligocene?), Trans-Pecos Texas. *J. sediment. Petrol.*, 49, 303-314.
- Ward, S.N. (2001). Landslide tsunami. *J. Geophys. Res.*, 106, 11201-11215.
- White, J.D.L., & Riggs, N.R. (Eds.) (2001). *Volcanogenic sedimentation in lacustrine settings*. International Association of Sedimentologists Special Publication, vol. 30. Blackwell Science, Oxford. 309 pp.
- Zou, C., Zhang, G., Zhu, R., Yuan, X., Zhao, X., Hou, L., Wen, B., & Wu, X. (2013). *Characteristics of Volcanic Reservoirs*. *Volcanic Reservoirs in Petroleum Exploration*, 31-90.

## Κεφάλαιο 9

# Ανθρακική ιζηματογένεση

### Σύνοψη

Τα ανθρακικά πετρώματα περιέχουν περισσότερο από το 50% των παγκόσμιων αποθεμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, είναι σημαντικοί ξενιστές κοιτασμάτων μεταλλευμάτων και αποτελούν πολύ σημαντικές πρώτες ύλες. Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την απόθεση, καθώς και η διαγένεση που συντελείται, καθορίζουν τις φυσικές και χημικές ιδιότητες αυτών των πετρωμάτων, καθώς και το δυναμικό των αποθέσεων και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι συνθήκες και τα περιβάλλοντα ιζηματογένεσης των ανθρακικών πετρωμάτων και αναλύονται οι δυνατότητες της ανάλυσης μικροφάσεων στην αναγνώριση και ερμηνεία των περιβαλλόντων.

### Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται βασικές γνώσης Ιζηματολογίας και Πετρολογίας ανθρακικών πετρωμάτων.

## 9.1 Εισαγωγή

Τα ανθρακικά αποθετικά συστήματα αποτελούν το εκτενέστερο αρχείο των ιστορικών και πρόσφατων κλιματικών και ωκεανογραφικών αλλαγών της Γης. Αποτελούν σημαντικά ενεργειακά κοιτάσματα, καθώς περιέχουν ένα μεγάλο ποσοστό των συμβατικών και μη συμβατικών αποθεμάτων υδρογονανθράκων παγκοσμίως και, αν και καλύπτουν μόλις το 7% της επιφανείας της Γης, παρουσιάζουν μεγάλη οικονομική σημασία αφού αποτελούν περισσότερο από το 50% των ταμειωτήρων πετρελαίου και φυσικού αερίου σε όλο τον κόσμο. Αναφορικά, το 70% των γιγαντιαίων κοιτασμάτων πετρελαίου συνδέονται με τους ρουδιστοφόρους υφάλους του Κρητιδικού (Μέση Ανατολή). Επίσης παρουσιάζουν μεγάλη οικονομική σημασία αφού χρησιμοποιούνται ως βιομηχανικό «ορυκτό» (τσιμέντα). Έχουν επίσης ιδιαίτερη συνεισφορά στον κύκλο του άνθρακα παγκοσμίως αφού ο περισσότερος άνθρακας στη Γη αποθηκεύεται σε ανθρακικά ιζήματα.

Ωστόσο, η λεπτομερής κατανόηση της ιζηματολογίας και των διαγενετικών προτύπων που διέπουν τα ανθρακικά συστήματα και η σχετική επίδραση των διαφόρων μηχανισμών ελέγχου στην παραγωγή ανθρακικών ιζημάτων, την κατανομή των φάσεων και τη μορφολογία των ανθρακικών πλατφορμών, παραμένει, ακόμα και σήμερα, ανεπαρκής. Πρόσφατες μελέτες σχετικά με την ανθρακική ιζηματολογία, έχουν αναδείξει την ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ της χημείας του υδάτινου περιβάλλοντος, της παραγωγής ιζημάτων και της πρόωμης διαγένεσης, καθώς και της κατανομής των φάσεων τόσο σε ανθρακικά όσο και σε μεικτά ανθρακικά-πυριτικοκλαστικά συστήματα.

Τα ανθρακικά ιζήματα σχηματίζονται και στην ξηρά και στη θάλασσα, ειδικότερα, στην υφαλοκρηπίδα, στη μετάβαση μεταξύ ξηράς και θάλασσας και σε ρηχά και βαθιά ύδατα, εκτός από τις πολύ βαθιές περιοχές των ωκεανών (κάτω από το επίπεδο CCD). Επί του παρόντος, μόνο το 10% των θαλάσσιων ανθρακικών ιζημάτων εμφανίζεται σε αβαθή ύδατα (Εικόνα 9.1). Το 90% της σύγχρονης παραγωγής ανθρακικών ιζημάτων σχετίζεται με την απόθεση ασβεστολιθικού πλαγκτού σε μεγάλα θαλάσσια βάθη.

Τα χερσαία και υδατικά, μη θαλάσσια ανθρακικά πετρώματα λαμβάνουν όλο και μεγαλύτερη προσοχή από τους γεωλόγους, λόγω της οικονομικής τους σημασίας αλλά και της σημασίας τους στις παλαιοπεριβαλλοντικές αναλύσεις. Επιπλέον, τα περιθωριακά θαλάσσια ανθρακικά περιβάλλοντα έχουν μελετηθεί εκτενώς καθώς περιέχουν πλήθος πληροφοριών σχετικά με την παράκτια ιζηματογένεση και τις διαδικασίες διαγένεσης. Περίπου το 70% των μελετών μικροφάσεων των θαλάσσιων ανθρακικών πετρωμάτων αφορά τα ρηχά-θαλάσσια ανθρακικά πετρώματα που σχηματίστηκαν στην ηπειρωτική κρηπίδα και στο ηπειρωτικό χείλος (όριο υφαλοκρηπίδας).



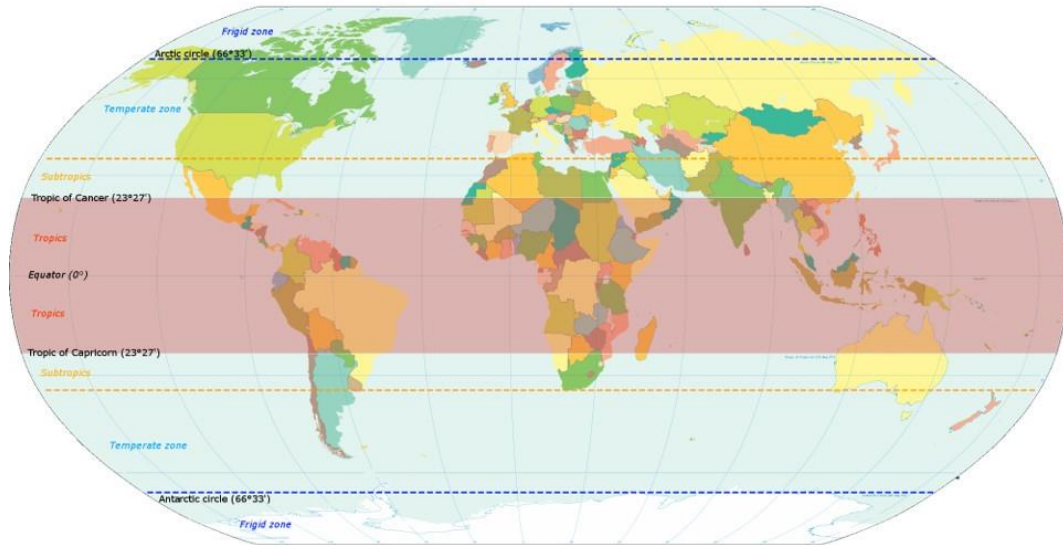


**Εικόνα 9.1** Κύρια περιβάλλοντα ιζηματογένεσης ανθρακικών πετρωμάτων που αρχίζουν στα αριστερά με τα χερσαία (μη θαλάσσια) περιβάλλοντα και καταλήγουν στα δεξιά στα περιβάλλοντα βαθέων υδάτων (προσωπικό αρχείο συγγραφέων, τροποποιημένο από Flugel, 2004).

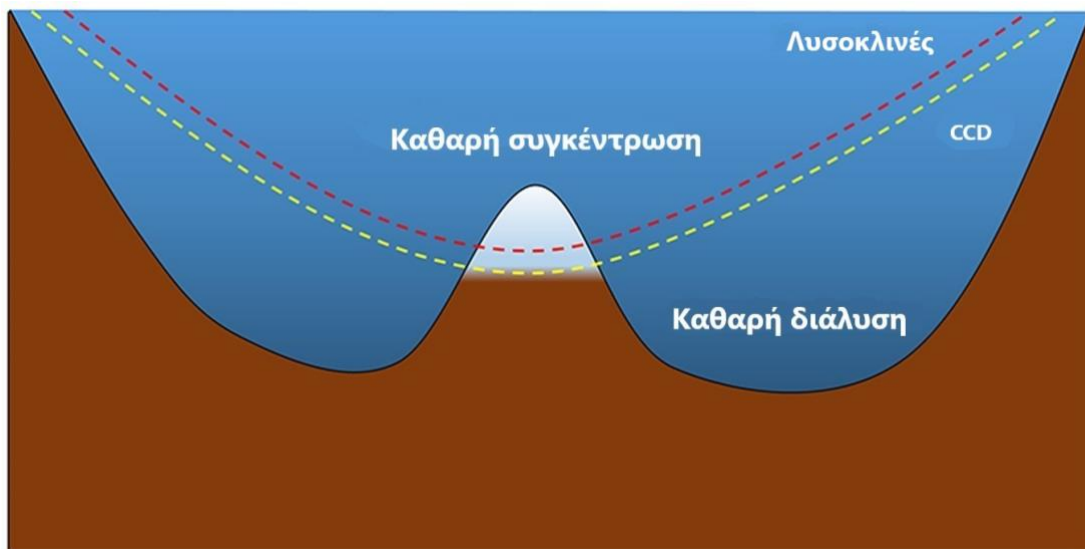
Αντίθετα από τα κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα, τα ανθρακικά πετρώματα «γεννιούνται», αφού προέρχονται από σκελετικούς κόκκους ή κατακρημνίσεις μέσα στο ίδιο το περιβάλλον απόθεσής τους. Τα ρηχά θαλάσσια ανθρακικά αποθετικά συστήματα διαφέρουν θεμελιωδώς από τα πυριτοκλαστικά αποθετικά συστήματα, ως προς τις εγγενείς παραμέτρους που τα καθορίζουν, που είναι το δυναμικό ανάπτυξης, συμπεριλαμβανομένου του «δυναμικού συσσώρευσης» ιζημάτων και του «δυναμικού παραγωγής» (ικανότητα παραγωγής και μεταφοράς ιζημάτων) (Schlager, 1992).

Ομοιότητες με τα κλαστικά ιζήματα, κυρίως των παράκτιων περιοχών, παρουσιάζουν τα ανθρακικά ιζήματα, μη-τροπικών περιβαλλόντων, τα οποία επηρεάζονται, όπως και τα κλαστικά ιζήματα, από τις επικρατούσες υδροδυναμικές συνθήκες, με αποτέλεσμα βιοκλαστικοί κόκκοι να μεταφέρονται προς την ακτή, όπως ακριβώς συμβαίνει και στα κλαστικά ιζήματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ιζήματα ψυχρών υδάτων παραμένουν σχετικά ασύνδετα στον πυθμένα της θάλασσας, καθώς ο βαθμός τσιμεντοποίησης των κόκκων είναι πολύ χαμηλός και, επομένως, είναι πολύ εύκολο να μεταφερθούν και να συγκολληθούν με παρόμοιες ιζηματογενείς διεργασίες, όπως συμβαίνει και στα παράκτια κλαστικά ιζήματα. Για τον λόγο αυτό, τα ανθρακικά ιζήματα των ψυχρών περιβαλλόντων παρουσιάζουν ιστολογικές δομές και γεωμετρία, παρόμοιες με εκείνες των θαλάσσιων άμμων και κροκάλων.

Η πλειονότητα των σύγχρονων ανθρακικών ιζημάτων απαντάται στην τροπική έως υποτροπική ζώνη, περίπου 30° βόρεια και νότια του ισημερινού και ιδιαίτερα στο ανερχόμενο τμήμα της ρηχής θαλάσσιας ευτροφικής ζώνης, δεδομένου ότι εκεί παρατηρείται η υψηλότερη βιογενής παραγωγικότητα (Εικόνα 9.2). Στα βαθύτερα θαλάσσια περιβάλλοντα, σχηματίζονται εκτεταμένες μάζες ασβεστιτικών ιλύων, οι οποίες αποτελούνται κυρίως από σκελετούς και κελύφη πελαγικών οργανισμών, ιδίως οργανισμών που ζουν στην υφαλοκρηπίδα. Κάτω από ένα βάθος που ονομάζεται λυσοκλινές, τα ασβεστολιθικά κελύφη αρχίζουν να διαλύονται. Σε κάποιο βάθος κάτω από το λυσοκλινές, στο βάθος αντιστάθμισης ή εξισορρόπησης του ανθρακικού ασβεστίου (CCD), σχεδόν όλα τα ασβεστολιθικά κελύφη είναι πλέον διαλυμένα. (Εικόνα 9.3). Σήμερα, περίπου το 1/3 του βάθους των ωκεανών καλύπτεται από ασβεστιτικές ιλύες.



**Εικόνα 9.2** Η μεγαλύτερη συγκέντρωση των σημερινών ανθρακικών ιζημάτων απαντάται στην τροπική έως υποτροπική ζώνη, περίπου 30° βόρεια και νότια του ισημερινού (πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27385077>).



**Εικόνα 9.3** Το ανθρακικό ίζημα μπορεί να συσσωρευτεί μόνο σε βάθη μικρότερα από το βάθος αντιστάθμισης ανθρακικού ασβεστίου (CCD). Κάτω από το CCD, αυτό διαλύεται και δεν συσσωρεύεται. Το λυσοκλινές είναι το βάθος στο οποίο ο ρυθμός διάλυσης του ανθρακικού ασβεστίου αυξάνεται δραματικά (πηγή: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=103167264>).

## 9.2 Αρχές ανθρακικής ιζηματογένεσης

Τα ανθρακικά πετρώματα μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τις ιδιότητες που σχετίζονται με το σύστημα πόρων των λιθοποιημένων ιζημάτων, τους λεγόμενους «*πετροφυσικούς τύπους πετρωμάτων*» ή με βάση χαρακτηριστικά που αντικατοπτρίζουν άμεσα το αρχικό περιβάλλον απόθεσής τους, τους λεγόμενους «*αποθετικούς τύπους πετρωμάτων*». Οι τύποι πετρωμάτων ταυμεντήρα αγνοούν τους τύπους πόρων και επικεντρώνονται στις ιζηματογενείς δομές, τη λιθολογία και τα απολιθώματα, ενώ οι πετροφυσικοί τύποι πετρωμάτων χρησιμοποιούνται συνήθως για τον εντοπισμό και την κατανομή ανθρακικών πετρωμάτων εντός ενός ταυμεντήρα με παρόμοια χαρακτηριστικά ροής. Και τα δύο συστήματα ταξινόμησης χρησιμοποιούνται εκτενώς για την περιγραφή των πετρωμάτων ενός ταυμεντήρα, αλλά οι διαφορές μεταξύ τους παραμένουν ελάχιστα κατανοητές.

Οι ασβεστόλιθοι είναι κυρίως βιογενή ιζήματα, δηλαδή προϊόντα επιτόπιας παραγωγής που συνδέονται με οργανισμούς που παράγουν ανθρακικά άλατα, πολλοί από τους οποίους είναι παράγωγα φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, εξαρτώμενης από το βάθος, και συνεπώς έχουν υψηλότερους ρυθμούς παραγωγής κοντά στη διεπαφή αέρα/θάλασσης του αποθετικού συστήματος. Ο κυρίαρχος ρόλος των οργανισμών στον σχηματισμό των ασβεστολιθών ήταν γνωστός ήδη από το 1879 από τον Henry Clifton Sorby, ο οποίος μελέτησε τα παλαιοζωικά, μεσοζωικά και τριτογενή ανθρακικά πετρώματα σε λεπτές τομές και αναγνώρισε τη συντριπτική αφθονία των απολιθωμάτων και τη σημασία τους στη σύνθεση των ανθρακικών ιζημάτων.

Η ιζηματογένεση των ανθρακικών ιζημάτων στο θαλάσσιο περιβάλλον πραγματοποιείται μέσω αβιοτικών και βιοτικών διαδικασιών. Ο βαθμός βιοτικής επιρροής στη διαδικασία ιζηματογένεσης ταξινομείται σε τρεις κατηγορίες φάσεων:

- *Αβιοτική ιζηματογένεση* η οποία ελέγχεται από τη θερμοδυναμική κατάσταση κορεσμού και την κινητική αντίδραση του υδατικού διαλύματος (η επίδραση των οργανισμών είναι αμελητέα).
- *Βιοτικώς προκληθείσα ιζηματογένεση* η οποία λαμβάνει χώρα εκεί όπου οργανισμοί διαταράσσουν το περιβάλλον ούτως ώστε να προκληθεί επαρκής καθίζηση.
- *Βιοτικώς ελεγχόμενη ιζηματογένεση* όπου οι σκελετικοί αυτότροφοι και ετερότροφοι οργανισμοί καθορίζουν τη σύσταση, τη θέση και τον χρόνο παραγωγής των ανθρακικών ιζημάτων.

Πάνω από το 90% των ανθρακικών πετρωμάτων, που εντοπίζονται στα σύγχρονα θαλάσσια περιβάλλοντα, είναι βιολογικής προέλευσης, δηλαδή η ιζηματογένεση είναι βιοτικώς προκληθείσα ή βιοτικώς ελεγχόμενη.

Τα περισσότερα ανθρακικά ιζήματα δημιουργούνται από την κατακρήμιση και απόθεση σκελετών και κελυφών θαλάσσιων οργανισμών, όπως είναι τα κοράλλια, τα μαλάκια και τα τρηματοφόρα. Αυτά τα ιζήματα είναι γενικά γνωστά ως *σκελετικά* ή *βιοκλαστικά ανθρακικά ιζήματα* και απαντώνται τόσο στα θερμά όσο και στα ψυχρά νερά των παγκόσμιων ηπειρωτικών υφαλοκρηπίδων. Είναι πιο συνηθισμένα στις ηπειρωτικές υφαλοκρηπίδες όπου δεν υπάρχει ανάμειξη με μεγάλες ποσότητες διαβρωμένων και μεταφερόμενων πυριτοκλαστικών ιζημάτων, όπως συμβαίνει κοντά στις εκβολές μεγάλων ποταμών και σε ορεινές παράκτιες περιοχές.

Η σύνθεση των σκελετικών ανθρακικών αποθέσεων ποικίλλει ανάλογα με την οικολογία των οργανισμών που παρήγαγαν τα σκελετικά στοιχεία και τα κελύφη. Τα τροπικά ύδατα χαρακτηρίζονται από βενθονικές κοινότητες όπως είναι τα κοράλλια (συμπεριλαμβανομένων των κοραλλιογενών υφάλων σε ρηγά νερά), πράσινα ασβεστοφύκη, μαλάκια και τρηματοφόρα. Στα περιβάλλοντα ψυχρών υδάτων επικρατούν τα μαλάκια, τα βρυόζωα, τα ερυθρά ασβεστοφύκη και οι κοραλλιογενείς ύφαλοι των βαθέων υδάτων. Άλλες ανθρακικές αποθέσεις σχηματίζονται από την καθίζηση κρυστάλλων ανθρακικού ασβεστίου μέσα στο θαλασσινό νερό, απευθείας στους θερμούς, υψηλής αλατότητας, τροπικούς ωκεανούς. Η διαδικασία αυτή δημιουργεί μη σκελετικά ανθρακικά ιζήματα και απαντάται μόνο σε περιοχές με θερμά νερά.

Οι αυτότροφοι παραγωγοί ανθρακικών αλάτων (κυανοβακτήρια, κοκκολιθοφόρα, πράσινα φύκη, ερυθρά φύκη, ερματυπικά κοράλλια) καθώς και οι ετερότροφοι παραγωγοί ανθρακικών αλάτων (μεγάλα δίθυρα, τρηματοφόρα, αρχαιοκυάθια, σπόγγοι, μη ερματυπικά κοράλλια, τα περισσότερα δίθυρα, γαστερόποδα, κεφαλόποδα, αρθρώποδα, βραχιόποδα, βρυόζωα, εχινόδερμα) συμμετέχουν ενεργά στον σκελετικό τρόπο ιζηματογένεσης.

Η κατανομή και η αφθονία των οργανισμών που παράγουν ανθρακικό ασβέστιο επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως το φως, η θερμοκρασία του νερού και η εισροή ιζημάτων. Οι παράγοντες αυτοί, καθώς και οι παλαιοπεριβαλλοντικές συνθήκες, αποτυπώνονται στα παλαιοντολογικά δεδομένα και στα κριτήρια προσδιορισμού της μικροπανίδας.

Η *θερμοκρασία* και η *αλατότητα* είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τον οργανικό κόσμο και συνεπώς ευνοούν ή δυσχεραίνουν την ανάπτυξη ορισμένων οργανισμών. Με βάση τις τιμές αυτών των παραμέτρων, μπορούν να διακριθούν οι ακόλουθοι τύποι παραγόμενων οργανισμών:

Θερμοκρασίες κάτω από 15°C, ακόμη και κάτω από 0°C, προκαλούν την παραγένεση *Foramol* (σε μη τροπικά περιβάλλοντα). Τα ανθρακικά ιζήματα είναι άφθονα σε βενθονικά τρηματοφόρα και μαλάκια, με μικρότερο ποσοστό βρυόζωων. Η φάση αυτή φιλοξενεί συχνά εχινόδερμα, ασβεστολιθικά κυανοφύκη, οστρακώδη και πελοειδή. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει την υποπαραγένεση *Bryomol*, στην οποία κυριαρχούν τα βρυόζωα και τα μαλάκια, και την υποπαραγένεση *Rhodalgol*, στην οποία κυριαρχούν τα ερυθρά φύκη.

Τα ιζήματα της *Chlorozoan* παραγένεσης είναι πλούσια σε ερματυπικά κοράλλια, ασβεστολιθικά πρασινοφύκη και μη σκελετικούς ανθρακικούς κόκκους, όπως είναι τα ωοειδή, τα πελοειδή και οι βοτρυόλιθοι. Αυτή η παραγένεση είναι χαρακτηριστική των περιοχών χαμηλού γεωγραφικού πλάτους (τροπικές ολιγοτροφικές πλατφόρμες, οι οποίες παύουν να υπάρχουν σε θερμοκρασίες άνω των 15°C, και επιβιώνουν μόνο σε μια στενή ζώνη αλατότητας (32-40%).

Τέλος, τα ιζήματα της ποικιλίας *Chloralgal* της παραγένεσης *Chlorozoan* διακρίνονται μόνο από την παρουσία ασβεστολιθικών πρασινοφυκών. Τα κοράλλια πεθαίνουν καθώς αυξάνεται η αλατότητα, αλλά τα πρασινοφύκη που είναι οι κύριοι οργανισμοί αυτής της παραγένεσης, η οποία είναι χαρακτηριστική των τροπικών-υποτροπικών πλατφορμών, μπορούν να επιβιώσουν.

Συμπερασματικά, οι σκελετικές συναθροίσεις επηρεάζονται από το κλίμα (θερμοκρασία, αλατότητα). Ωστόσο, οι συνθήκες δεν είναι πάντα ιδανικές και οι παραπάνω παραγενέσεις παρουσιάζουν ποικίλα όρια. Έτσι λοιπόν, περιβαλλοντικοί ή οικολογικοί παράγοντες, όπως θαλάσσια ρεύματα, ανοδικά ρεύματα, θρεπτικά συστατικά κ.ο.κ., μπορεί να προκαλέσουν την εναπόθεση παραγένεσης foramol και όχι την κανονικά αναμενόμενη παραγένεση chlorozoan σε ένα τροπικό περιβάλλον.

Οι χημικές συνθήκες θα πρέπει να ευνοούν την κατακρήμνιση ανθρακικού ασβεστίου από το θαλασσινό νερό σε μη σκελετικά ανθρακικά ιζήματα- αυτό συμβαίνει σε συνθήκες αυξημένης θερμοκρασίας και αλατότητας, καθώς και μειωμένων επιπέδων διαλυμένου διοξειδίου του άνθρακα. Όλοι αυτοί οι παράγοντες ευνοούν τη συσσώρευση ανθρακικών ιζημάτων σε ρηχά τροπικά ύδατα έναντι ψυχρότερων εύκρατων υδάτων.

Στις τροπικές κρηπίδες, ο ρυθμός συσσώρευσης σκελετικού και μη-σκελετικού ανθρακικού υλικού, στον πυθμένα της θάλασσας, είναι περίπου 1m/year<sup>3</sup>. Στα περιβάλλοντα κρηπίδας με ψυχρά νερά συσσωρεύονται μόνο σκελετικά ανθρακικά ιζήματα, με χαμηλότερους ρυθμούς (0,1-1m/year<sup>3</sup>) από τα αντίστοιχα των θερμότερων νερών. Και οι δύο αυτοί ρυθμοί συσσώρευσης ιζημάτων είναι αρκετές τάξεις μεγέθους υψηλότεροι από τον ρυθμό υποβύθισης του ηπειρωτικού περιθωρίου (0,01-0,1m/year<sup>3</sup>), γεγονός που σημαίνει ότι τα ανθρακικά ιζήματα, γενικά, γεμίζουν αβαθείς περιοχές και συσσωρεύονται μέχρι το επίπεδο της θάλασσας.

## 9.3 Σύγχρονα περιβάλλοντα ανθρακικής ιζηματογένεσης

### 9.3.1 Μη-θαλάσσια περιβάλλοντα

Τα ηπειρωτικά (μη θαλάσσια) ανθρακικά ιζήματα σχηματίζονται σε χερσαία και υδάτινα περιβάλλοντα στα οποία δεν έχει επιδράσει η θάλασσα (Εικόνα 9.4). Σχηματίζονται, κυρίως, σε επιφανειακές συνθήκες έκθεσης και σε βυθισμένα υδάτινα περιβάλλοντα. Τα μη θαλάσσια ανθρακικά ιζήματα που σχηματίζονται σε επιφανειακές συνθήκες περιλαμβάνουν πεδογενετικούς ασβεστόλιθους (pedogenic carbonates), τελματώδεις - παλουστρικές ανθρακικές αποθέσεις (palustrine carbonates), ανθρακικές αποθέσεις σπηλαίων (cave carbonates), αιολικούς ασβεστόλιθους (aeolian carbonates) και παγετώδεις ασβεστόλιθους (glacial carbonates), ενώ τα ανθρακικά ιζήματα γλυκού νερού όπως λιμναία και ποτάμια ανθρακικά ιζήματα, αποτίθενται σε μη θαλάσσια αλλά υδάτινα περιβάλλοντα (aquatic settings).



Εικόνα 9.4 Μη θαλάσσια περιβάλλοντα ανθρακικής ιζηματογένεσης.

Στον Πίνακα 9.1 συνοψίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των μη θαλάσσιων ανθρακικών περιβαλλόντων.

**Πίνακας 9.1** Χαρακτηριστικά των μη θαλάσσιων περιβαλλόντων ανθρακικής ιζηματογένεσης.

<b>Μη θαλάσσια ανθρακικά πετρώματα σε ηπειρωτικά υποαεριώδη εκτεθειμένα περιβάλλοντα</b>	<b>Μη θαλάσσια ανθρακικά πετρώματα σε ηπειρωτικά υδάτινα περιβάλλοντα</b>
<i>Πεδογενετικά ανθρακικά πετρώματα, παλαιοεδάφη:</i> Σχηματίζονται από τη συσσώρευση ανθρακικού ασβεστίου μέσα σε μη στερεοποιημένα εδάφη πλούσια σε ανθρακικά άλατα.	<i>Ανθρακικά πετρώματα του γλυκού νερού (π.χ. τραβερτίνης):</i> Σχηματισμός σε θερμές ή ψυχρές πηγές σε υποθαλάσσια περιβάλλοντα (π.χ. λίμνες), από συνδυασμένες βιοτικές και αβιοτικές διεργασίες.
<i>Παλουστρικά ανθρακικά πετρώματα:</i> Σχηματίζονται σε λιμνοθαλάσσια και μεταβατικά μη θαλάσσια/θαλάσσια περιβάλλοντα εξαιτίας των βραχυχρόνιων διακυμάνσεων της στάθμης του νερού. Έχουν χαρακτηριστικά υποαερίων και γλυκών υδάτων περιβαλλόντων.	<i>Λιμναία ανθρακικά πετρώματα:</i> Απόθεση και καταβύθιση ανθρακικού ασβεστίου σε λίμνες διαφορετικής αλατότητας (λίμνες γλυκών υδάτων, λίμνες υψηλής αλμυρότητας, λίμνες playa) και διαφορετικά περιβάλλοντα.
<i>Ανθρακικά πετρώματα σπηλαίων, καρστ:</i> Σχηματίζονται από την καταβύθιση ανθρακικού ασβεστίου εντός σπηλαίων με αποτέλεσμα τη δημιουργία «σπηλαιοθεμάτων» (π.χ. flowstones, dripstones).	<i>Ποτάμια ανθρακικά πετρώματα:</i> Ανθρακικές αποθέσεις που σχηματίζονται σε ποτάμια, ρυάκια και καταρράκτες, προερχόμενες από τη συνδυασμένη δραστηριότητα βιοτικών και αβιοτικών διεργασιών.
<i>Αιολικά ανθρακικά πετρώματα:</i> Ιζηματογένεση λεπτόκοκκων ανθρακικών υλικών μεγέθους άμμου που προέρχονται από τον άνεμο (αιολιανίτες).	
<i>Παγετώδη ανθρακικά πετρώματα:</i> Διάλυση και ανακρυστάλλωση των παγετωνικά μεταφερόμενων ανθρακικών υπολειμμάτων, εμφανίζονται σε παγετώδεις-θαλάσσιες αποθέσεις.	

### 9.3.2 Θαλάσσια περιβάλλοντα ανθρακικής ιζηματογένεσης

Σε μια στενή παράκτια ζώνη κατά μήκος του ορίου μεταξύ ηπειρωτικών και θαλάσσιων αποθέσεων, εμφανίζονται τα *περιθωριακά θαλάσσια περιβάλλοντα* (δέλτα, ακτές και νησιά-φράγματα, εκβολές ποταμών, παράκτιες λιμνοθάλασσες και παλιρροιακές εκτάσεις). Η αλληλεπίδραση των δυνάμεων υψηλής ενέργειας που σχετίζονται με τα κύματα, τις παλίρροιες, τον άνεμο και τα ρεύματα, καθώς και η συνεχώς μεταβαλλόμενη στάθμη της θάλασσας, χαρακτηρίζει αυτά τα περιβάλλοντα ως *περιβάλλοντα υψηλής περιβαλλοντικής αστάθειας*. Η ενέργεια του νερού, η μεταφορά ιζημάτων και οι προκύπτουσες ιζηματογενείς δομές ποικίλλουν σε αυτά τα περιβάλλοντα. Τα ανθρακικά πετρώματα εναποτίθενται κατά μήκος της ακτής, σε λιμνοθάλασσες πίσω από φράγματα και στην υπερπαλιρροιακή ζώνη.

Λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών, που ευνοούν τόσο τους οργανισμούς που σχηματίζουν ασβεστολιθικούς σκελετούς όσο και την άμεση καταβύθιση ανθρακικού ασβεστίου από το θαλασσινό νερό, οι ακτές και οι υφαλοκρηπίδες αποτελούν σημαντικά περιβάλλοντα για τον σχηματισμό ανθρακικών ιζημάτων. Οι τροπικοί κοραλλιογενείς ύφαλοι και οι παραλίες με λευκή άμμο κατά μήκος των τροπικών και εύκρατων ακτών, είναι τα πιο διάσημα παραδείγματα αυτών των αποθέσεων. Για την ανακατασκευή παλαιών περιβαλλόντων ανθρακικών ιζημάτων, οι γεωλόγοι χρησιμοποιούν συνήθως τη διάκριση μεταξύ περιβαλλόντων ρηχών και βαθέων υδάτων. Οι γεωλόγοι, επίσης, χρησιμοποιούν συνήθως το «σπάσιμο της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας» (*shelf break*) και το κατώτερο όριο της ευτροφικής ζώνης για να διακρίνουν τα περιβάλλοντα ρηχών υδάτων (*νηριτική ζώνη*) από τα περιβάλλοντα βαθιών υδάτων (*πελαγική ή ωκεάνια ζώνη*). Η *μετεωρολογική βάση καταιγίδων* αποτελεί ένα ακόμη κριτήριο. Τα ρηχά θαλάσσια περιβάλλοντα εμφανίζονται πάνω από την υφαλοκρηπίδα και περιλαμβάνουν τόσο τα περιηπειρωτικά όσο και τα ενδοηπειρωτικά καθεστώτα. Οι ράμπες, οι πλατφόρμες και οι ύφαλοι είναι περιβάλλοντα ανθρακικής ιζηματογένεσης με αποθέσεις σε ρηχά νερά.

Τα περιβάλλοντα βαθιάς θάλασσας περιλαμβάνουν την ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα από τα περιηπειρωτικά περιθώρια έως τη βάση της (βαθύτερο όριο), την ηπειρωτική κατώφρεια, τις αβυσσικές πεδιάδες, τις μεσοωκεάνιες ράχες, τα ωκεάνια και ηφαιστειακά «βουνά» και τις ωκεάνιες τάφρους. Τα βαθιά θαλάσσια περιβάλλοντα μπορεί επίσης να περιλαμβάνουν τμήματα των βαθύτερων τμημάτων των περι- και ενδοηπειρωτικών περιθωρίων, καθώς



και το εξωτερικό τμήμα της ράμπας, κάτω από τη βάση των κυμάτων και των καταγιγίδων και κάτω από τη βάση της ευφωτικής ζώνης, τα οποία αντιστοιχούν σε βάθη άνω των 200 μέτρων<sup>16</sup>.

### 9.3.2.1 Ανθρακικές πλατφόρμες και κρηπίδες

Τα μοντέλα ανθρακικών αποθέσεων που αναπτύχθηκαν στη δεκαετία του 1960 και στις αρχές της δεκαετίας του 1970 επηρεάστηκαν σε μεγάλο βαθμό από σύγχρονα ανάλογα από τις Μπαχάμες, τη Φλόριντα, τη χερσόνησο του Γιουκατάν και τον Περσικό Κόλπο (Wilson, 1975). Τα μοντέλα αυτά περιγράφουν πρότυπα ιζηματογένεσης σε υφαλοκρηπίδες που χαρακτηρίζονται από την απόθεση ιζημάτων ρηχών υδάτων σε επίπεδες πλατφόρμες με σημαντικά περιθώρια που οριοθετούνται από υφάλους ή ξέρες κοντά στο σπάσιμο της υφαλοκρηπίδας.

Η *ανθρακική πλατφόρμα* ορίζεται ως: «*ένα μεγάλο οικοδόμημα που σχηματίζεται από τη συσσώρευση των ιζημάτων σε μια περιοχή που βυθίζεται*». Έχουν περιγραφεί πολλοί τύποι ανθρακικών πλατφορμών, από ομοκλινείς ράμπες έως ηπειρωτικές κρηπίδες με περιθώρια και ένα πλήρες φάσμα παραλλαγών στο ενδιάμεσο. Δυστυχώς, όμως, η διάκριση μεταξύ αυτών των διαφορετικών τύπων είναι προβληματική.

Γενικά, ο όρος «ανθρακική πλατφόρμα» είναι ένας στρωματογραφικός όρος για τις μεγάλοι πάχους αποθέσεις ανθρακικών πετρωμάτων σε ρηχά νερά και χρησιμοποιείται για να περιγράψει διάφορες μορφολογίες ανθρακικής υφαλοκρηπίδας. Οι όροι «ανθρακική πλατφόρμα» και «ανθρακική υφαλοκρηπίδα» χρησιμοποιούνται συχνά ως συνώνυμα.

Αναγνωρίζονται πολλές διαφορετικές μορφολογίες ανθρακικών πλατφορμών, με τις πιο ευρέως τεκμηριωμένες να είναι οι *ανθρακικές ράμπες* (ramp), οι οποίες είναι πλατφόρμες με ήπια κλίση, και οι *πλατφόρμες με περιθώριο* (rimmed platform), οι οποίες είναι πλατφόρμες με επίπεδη κορυφή που συνορεύουν με ένα περιθώριο που σχηματίζεται από έναν ύφαλο ή ένα ρηχό κοίλωμα ανθρακικής άμμου.

Ειδικότερα, οι πλατφόρμες με περιθώριο, είναι αβαθείς ηπειρωτικές πλατφόρμες με επίπεδη οροφή και πλάτος συνήθως από λίγα έως περίπου 100 km. Το εξωτερικό τους άκρο επηρεάζεται από τα κύματα και χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη μορφολογικών περιθωρίων όπως ύφαλοι-φράγματα, ξέρες, νησιά που αποσβένουν τη δράση των κυμάτων και από έντονη αλλαγή της κλίσης προς τα βαθύτερα νερά. Τα περιθώρια της πλατφόρμας μπορεί να φέρουν χαρακτηριστικά προσαύξησης, παράκαμψης ή/και διάβρωσης. Ιζηματογενείς φάσεις, χαρακτηριστικές υψηλής ενέργειας, εμφανίζονται κυρίως στο εξωτερικό περιθώριο της υφαλοκρηπίδας.

Το τεκτονικό περιβάλλον επηρεάζει τα χαρακτηριστικά των ανθρακικών πλατφορμών, με τις πιο μεγάλες πλατφόρμες να εμφανίζονται σε παθητικά ηπειρωτικά περιθώρια, ενώ μικρότερες πλατφόρμες σχηματίζονται σε τοπικά υποθαλάσσια υψώματα, όπως ρήγματα σε συνθήκες εφελκυσμού και σε διαπύρους άλατος. Οι διάφοροι τύποι ανθρακικών πλατφορμών μπορεί μερικές φορές να εμφανίζονται σε συνδυασμό μεταξύ τους: μια απομονωμένη πλατφόρμα μπορεί να είναι μια ανθρακική ράμπα από τη μια πλευρά και μια πλατφόρμα με περιθώριο από την άλλη, και η μια μορφή μπορεί να εξελιχθεί σε μια άλλη, για παράδειγμα, μια ράμπα μπορεί να εξελιχθεί σε πλατφόρμα με περιθώριο, καθώς αναπτύσσεται ένας περιθωριακός ύφαλος.

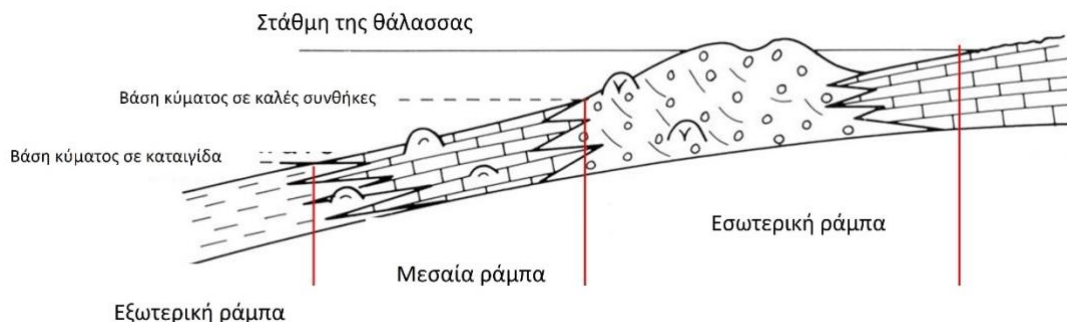
Αναφορικά με τις ανθρακικές ράμπες, το βαθυμετρικό προφίλ τους και οι φυσικές διεργασίες στο εσωτερικό της θάλασσας και στον πυθμένα της μοιάζουν πολύ με μια ανοικτή υφαλοκρηπίδα με απόθεση κλαστικών ιζημάτων. Ο όρος «ράμπα» μπορεί να δίνει την εντύπωση μιας σημαντικής κλίσης, αλλά στην πραγματικότητα η κλίση είναι ήπια, μικρότερη της μιας μοίρας, στις περισσότερες περιπτώσεις, σε αντίθεση με τα περιβάλλοντα κατωφέρειας τα οποία συνδέονται με πλατφόρμες με περιθώριο, οι οποίες είναι πολύ πιο απότομες. Οι σύγχρονες ράμπες εντοπίζονται εκεί που δεν έχουν αναπτυχθεί ύφαλοι, όπως περιοχές με ψυχρά νερά, αυξημένη αλατότητα ή σχετικά υψηλή εισροή χερσογενούς υλικού. Ωστόσο, στο παρελθόν, οι ανθρακικές ράμπες σχηματίζονταν σε ένα ευρύτερο φάσμα κλιματικών και περιβαλλοντικών συνθηκών, ιδίως σε περιόδους κατά τις οποίες η ανάπτυξη υφάλων δεν ήταν τόσο διαδεδομένη.

Σε μακρο- έως μεσοπαλιροϊκά καθεστώτα, τα παλιροϊκά ρεύματα διασκορπίζουν το ανθρακικό ίζημα και επηρεάζουν έντονα τις παράκτιες φάσεις. Οι διεργασίες των κυμάτων και των καταγιγίδων είναι κυρίαρχες

---

<sup>16</sup> Στη θάλασσα βιολογία, ο όρος «βαθιά θάλασσα» αναφέρεται στην περιοχή του ωκεανού κάτω από το επίπεδο της αποτελεσματικής διείσδυσης του φωτός για τη σύνθεση του φυτοπλαγκτού στον ανοικτό ωκεανό (ευφωτική ζώνη) και σε βάθος μεγαλύτερο από το βάθος της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας (περίπου > 200 m). Μέρος του φωτός διατηρείται στα ανώτερα τμήματα της βαθιάς θάλασσας (δυσφωτική ζώνη). Η αφωτική ζώνη είναι η μόνιμη σκοτεινή περιοχή κάτω από τα ηλιοφώτιστα νερά- αρχίζει στα εύκρατα νερά σε σχετικά μικρά βάθη (περίπου 100 m) και εκτείνεται βαθύτερα στα τροπικά νερά (περίπου 600 m).

στις μικροπαλιρροϊκές υφαλοκρηπίδες και θάλασσες. Οι επιδράσεις των παλιρροιών, των κυμάτων και των καταγίδων εξαρτώνται, όλες, από το βάθος και οι ράμπες μπορούν να χωριστούν σε τρεις ζώνες που σχετίζονται με το βάθος: εσωτερική, μεσαία και εξωτερική ράμπα (Εικόνα 9.5).



Εικόνα 9.5 Υποδιαίρεση μιας ανθρακικής ράμπας.

### 9.3.2.2 Ύφαλοι

Ύφαλος (reef) ονομάζεται κάθε σχηματισμός που βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας ή κοντά σε αυτήν και α) παρουσιάζει αντίσταση στο κύμα, β) έχει δημιουργηθεί από οργανισμούς που έχουν την ικανότητα να κατασκευάζουν δομές οι οποίες αντιστέκονται στο κύμα και γ) έχουν στερεά οργανική δομή, που αντιστέκεται στο κύμα. Πρόκειται, δηλαδή, για αναχώματα συσσωρευμένου υλικού, πλούσιου σε ανθρακικό ασβέστιο, που κατασκευάζονται από θαλάσσιους οργανισμούς.

Κύριοι κατασκευαστές των υφάλων είναι τα κοράλλια. Τα κοράλλια που σχηματίζουν υφάλους έχουν συμβιωτική σχέση με φωτοσυνθετικά φύκη, γνωστά ως *ζωοξανθέλες*, που ζουν στους ιστούς τους. Τα κοράλλια παρέχουν ένα ασφαλές καταφύγιο για τα φύκη. Σε αντάλλαγμα, τα φύκη παράγουν υδατάνθρακες και οξυγόνο μέσω της φωτοσύνθεσης, τα οποία τα κοράλλια χρησιμοποιούν για τροφή. Τα φύκη βοηθούν επίσης τα κοράλλια στην απομάκρυνση των αποβλήτων. Πολλά διαφορετικά είδη φυκών, σπόγγων, ακόμη και μαλακίων συμβάλλουν στη δομή των κοραλλιογενών υφάλων. Όταν αυτοί οι οργανισμοί πεθαίνουν, οι σκελετοί τους χρησιμοποιούνται ως θεμέλια νέων κοραλλιογενών αποικιών.

Η πλειονότητα των υφάλων βρίσκεται μεταξύ των τροπικών του Καρκίνου και του Αιγόκερω, στον Ειρηνικό, τον Ινδικό, την Καραϊβική και την Ερυθρά Θάλασσα, καθώς και στον Περσικό Κόλπο. Κοράλλια μπορούν επίσης να βρεθούν νοτιότερα του ισημερινού, σε περιοχές όπου θερμά ρεύματα ρέουν από τους τροπικούς, όπως η Φλόριντα και η νότια Ιαπωνία. Οι κοραλλιογενείς ύφαλοι καλύπτουν παγκοσμίως περίπου 110.000 τετραγωνικά μίλια (284.300 τετραγωνικά χιλιόμετρα). Οι κοραλλιογενείς ύφαλοι απουσιάζουν από τις δυτικές ακτές των τροπικών ηπείρων λόγω της παρουσίας ψυχρών παράκτιων ρευμάτων: στη δυτική ακτή της Αμερικής (ψυχρό ρεύμα του Περού), δυτική ακτή της Αφρικής (ψυχρό ρεύμα της Βεγγουέλας και ρεύμα των Καναρίων), δυτική ακτή της Αυστραλίας (ψυχρό ρεύμα της Δυτικής Αυστραλίας). Γενικά, οι κοραλλιογενείς ύφαλοι δεν ευδοκμοούν στα ψυχρά ρεύματα λόγω της ανοδικής ροής του ψυχρού νερού από τα βάθη που ψύχει το θερμό επιφανειακό νερό (τα κοράλλια δεν μπορούν να επιβιώσουν σε ψυχρά νερά). Η ιδανική θερμοκρασία για τα κοράλλια είναι 20°C.

Οι ύφαλοι αποτελούν τις πιο προφανείς θέσεις της σύγχρονης παραγωγής ανθρακικών υλικών. Πολλές από τις θερμές ρηχές θάλασσες του κόσμου, διαθέτουν εκτεταμένα σύγχρονα περιβάλλοντα υφάλων, που βασίζονται σε μια λεπτή αλληλεπίδραση φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών. Οι σκελετικοί ύφαλοι, οι οποίοι είναι χτισμένοι πάνω σε ένα άκαμπτο, ασβεστολιθικό πλαίσιο, αποτελούνται από θαλάσσιους οργανισμούς που μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλα, ανθεκτικά στα κύματα, συγκροτήματα σε ρηχούς ωκεανούς. Οι αβαθείς, χαμηλής ενέργειας πλατφόρμες ενδέχεται να διατηρηθούν προς την ξηρά, πίσω από αυτούς τους υφάλους και να διευκολύνουν τη δημιουργία περαιτέρω ανθρακικών ακολουθιών (Tucker and Wright, 2009). Τα φράγματα υφάλων είναι βιολογικές πηγές ανθρακούχων υλικών, χωρίς εσωτερικό πλαίσιο. Μπορούν να σχηματίσουν στρώματα από φύκη και κυανοβακτήρια, καθώς και στρωματόλιθους και ασβεστολιθικά αναχώματα λάσπης. Τα σύγχρονα υφαλοφράγματα υπάρχουν μόνο σε περιοχές όπου η θερμοκρασία, η χημεία του νερού, η αλατότητα και το βάθος είναι ανεπαρκή για την ανάπτυξη κοραλλιών-ωστόσο, επειδή οι σύγχρονοι οργανισμοί που δημιουργούν υφάλους δεν έχουν επιβιώσει σε όλη τη διάρκεια του γεωλογικού χρόνου, τα υφαλοφράγματα ήταν κάποτε πιο συνηθισμένα (Reading, 1996; Tucker and Wright,

2009). Εξαιτίας αυτής της διακύμανσης στον τύπο και τον αριθμό των οργανισμών των υφάλων, η σχετική σημασία των υφάλων ως συστημάτων απόθεσης έχει αλλάξει κατά τη διάρκεια του γεωλογικού χρόνου, περιπλέκοντας την ικανότητά μας να κατανοήσουμε τα ανθρακικά συστήματα για τα οποία μπορεί να μην υπάρχει πάντα ένα σύγχρονο ανάλογο (Εικόνα 9.6) (Nichols, 2009).

Οι σύγχρονοι ύφαλοι αποτελούνται από διάφορα υποπεριβάλλοντα. Η αλληλεπίδραση ενός οργανισμού που κατασκευάζει έναν ύφαλο με την ένταση των ρηχών κυμάτων μπορεί να οδηγήσει σε ανθεκτικά εγκιβωτισμένα κοράλλια κατά μήκος της κορυφής του υφάλου και σε πιο εύθραυστες μορφές, στα τμήματα χαμηλότερης ενέργειας του υφαλοσυμπλέγματος. Το υλικό αποσπάται από την κορυφή του υφάλου για να σχηματίσει ανθρακικά θραύσματα και βιοκλάστες στις θέσεις του πρόσθιου και του οπίσθιου υφάλου.

Περίοδος	Σχετική αφθονία	Κυρίαρχα σκελετικά στοιχεία των υφάλων
Νεογενές		Κοράλλια, άλγη
Παλαιογενές		
Κρητιδικό		Ρουδιστές, κοράλλια, στρωματοπόρα
Ιουρασικό		Κοράλλια, σπόγγοι, στρωματοπόρα
Τριαδικό		Κοράλλια, στρωματοπόρα
Πέρμιο		Άλγη, σπόγγοι, κοράλλια
Λιθανθρακοφόρο		
Δεβόνιο		Κοράλλια, στρωματοπόρα
Σιλούριο		
Ορδοβίσιο		Κοράλλια, βρυόζωα, στρωματοπόρα
Κάμβριο		
Προκάμβριο		Στρωματόλιθοι

**Εικόνα 9.6** Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τις σχετικές αφθονίες των οργανισμών που συμμετέχουν στην κατασκευή υφάλων κατά τη διάρκεια του γεωλογικού χρόνου (προσωπικό αρχείο συγγραφέων, τροποποιημένο από Nichols, 2009).

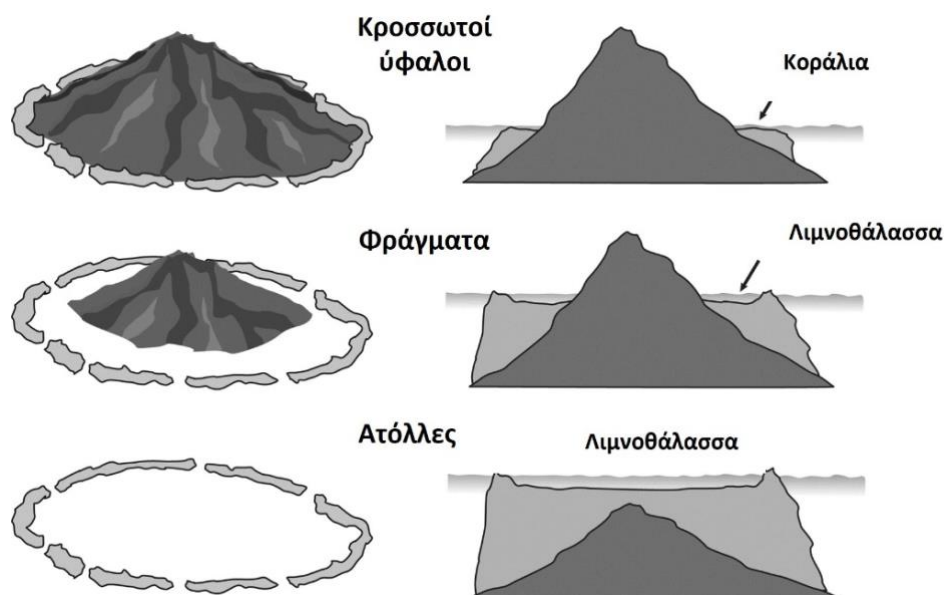
#### Τύποι κοραλλιογενών υφάλων

Οι δομικοί κοραλλιογενείς ύφαλοι διακρίνονται σε τρεις τύπους: στους *κροσσωτούς* υφάλους (fringing reefs), στα *φράγματα* (barrier reefs) και στις *ατόλες* (atolls) (Εικόνα 9.7).

Οι *κροσσωτοί ύφαλοι* αναπτύσσονται κυρίως κατά μήκος των ακτών των ηφαιστειογενών νησιών, σε ζώνες, οι οποίες χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένα βάθη, και διαφορετική δομή αλλά και συνοδό πανίδα και χλωρίδα. Περιλαμβάνουν την κορυφή του υφάλου, όπου «σκάνε» τα κύματα, το εμπρόσθιο τμήμα μέσης ενέργειας και το αντιτοίχισμα, όπου αναπτύσσονται σειρές κοραλλίων εναλλασσόμενες με αμμώδη canyons και περάσματα.

Τα *φράγματα* βρίσκονται σε απόσταση από την ακτή, και χωρίζονται από αυτήν με μια λιμνοθάλασσα. Εκτός από τις ζώνες που αναφέρονται στους κροσσωτούς υφάλους, τα φράγματα περιλαμβάνουν τους μικρο-υφάλους, τους οπισθο-υφάλους (προς την πλευρά της ακτής) και τους υφάλους πλατφόρμας που βρίσκονται σε ανωμαλίες του πυθμένα, σε μεγαλύτερα βάθη. Η μετάβαση από το κοραλλιογενές φράγμα στον ωκεανό γίνεται απότομα.

Οι *ατόλες* είναι ετήσιοι ύφαλοι, που αναπτύσσονται κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, εκεί όπου λαμβάνει χώρα βύθιση νησιών, τα οποία περιβάλλονται από υφάλους. Η ανάπτυξη των ατολών ακολουθεί τη διεύθυνση του επικρατούντα ανέμου, δίνοντάς τους σχήμα κυκλικό ή πεταλοειδές, στο κέντρο των οποίων υπάρχει μια αβαθής λιμνοθάλασσα, με μικρότερα τεμάχια υφάλων. Υπάρχουν δύο είδη ατολών, αυτές που ξεκινούν σε μεγάλα βάθη και αυτές που ξεκινούν από το ηπειρωτικό περιθώριο.



Εικόνα 9.7 Είδη σχηματισμών κοραλλιογενών υφάλων.

Στα συστήματα ανθρακικών υφάλων μπορούν να αναγνωρισθούν διάφορα κύρια υποπεριβάλλοντα (Εικόνα 9.8). Προχωρώντας προς τη θάλασσα από την ακτή, η υφαλώδης επίπεδη ζώνη, η κορυφογραμμή ή ράχη του υφάλου, το αντιτοίχισμα και η προς τη θάλασσα κλιτύς αποτελούν τις κύριες διαιρέσεις που είναι κοινές στους περισσότερους υφάλους.

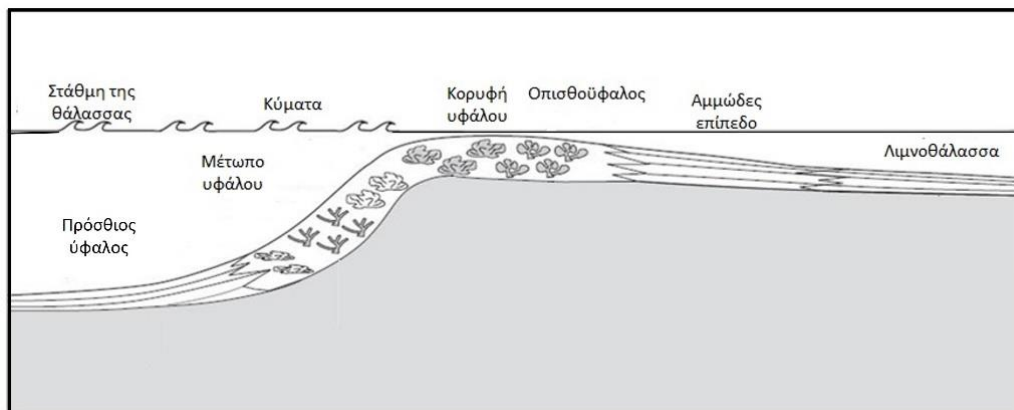
Η υφαλώδης επίπεδη ζώνη με τη λιμνοθάλασσα βρίσκεται στην προστατευμένη πλευρά του υφάλου. Μεγάλα τμήματα του υποστρώματος αποκαλύπτονται κατά τη διάρκεια της παλίρροιας και αποτελούνται από κοραλλιογενή πετρώματα και χαλαρή άμμο.

Η κορυφογραμμή του υφάλου, γνωστή και ως *ράχη*, είναι το υψηλότερο σημείο του υφάλου και είναι σχεδόν πάντα ορατή κατά την άμπωτη. Η ράχη του υφάλου είναι εκτεθειμένη στην απόλυτη μανία των κυμάτων για αυτό αναπτύσσονται τα πιο ισχυρά κοράλλια, ικανά να αντέξουν τη δράση των κυμάτων σε ρηχά νερά.

Το *αντιτοίχισμα* (buttress zone) είναι η κατωφέρεια του υφάλου που εκτείνεται προς τα κάτω από την κορυφογραμμή του. Πρόκειται για μια τραχιά περιοχή με απολήξεις, που εκτείνονται ακτινωτά από τον ύφαλο. Βαθιά κανάλια που κατηφορίζουν προς τα κάτω στην επιφάνεια του υφάλου παρεμβάλλονται μεταξύ των «υποστηλώσεων». Το αντιτοίχισμα λειτουργεί για να διαχέει την τεράστια δύναμη των αμείωτων κυμάτων και σταθεροποιεί τη δομή του υφάλου. Αποστραγγίζει επίσης τα θραύσματα των υφάλων και τα ιζήματα σε βαθύτερα νερά. Η υποχώρηση μιας υφαλοκρηπίδας μπορεί να εκτείνεται εκατοντάδες μέτρα προς τα κάτω. Ενώ η ένταση του φωτός μειώνεται, η μειωμένη δράση των κυμάτων επιτρέπει την ανάπτυξη μεγαλύτερου αριθμού ειδών κοραλλιών. Σπόγγοι και κοράλλια, που δεν κατασκευάζουν υφάλους, αφθονούν και σταδιακά αντικαθιστούν τα πετρώδη κοράλλια σε βαθύτερα, πιο σκοτεινά νερά.

Στην αντίθετη πλευρά της κορυφογραμμής του υφάλου, στον *οπίσθιο ύφαλο*, τα σχετικά ισχυρά σφαιροειδή κοράλλια δίνουν τη θέση τους σε μια αμμώδη ζώνη και στις αποθέσεις της λιμνοθάλασσας του οπίσθιου υφάλου, οι οποίες περιλαμβάνουν κοκκόλιθους (grainstone), πακτόλιθους και βακόλιθους (wackestone)<sup>17</sup>.

<sup>17</sup> Στο σύστημα ταξινόμησης Dunham, ένα μέσο ταξινόμησης των ανθρακικών πετρωμάτων με βάση την υφή σε δείγμα που λαμβάνεται με το χέρι, οι wackestones περιέχουν περισσότερους από 10% κόκκους και υποστηρίζονται από ασβεστολιθική ιλύ, οι packstones περιέχουν ασβεστολιθική ιλύ αλλά υποστηρίζονται από κόκκους και οι grainstones υποστηρίζονται από κόκκους και στερούνται ιλύος (Dunham, 1962).



Εικόνα 9.8 Υποπεριβάλλοντα των σύγχρονων υφάλων.

### 9.3.2.3 Λιμνοθάλασσες ανθρακικών πετρωμάτων

Οι λιμνοθάλασσες σχηματίζονται κατά μήκος ανθρακικών ακτών όπου ένα φράγμα, παράκτιο, περικλείει στο σύνολό της ή εν μέρει, μια περιοχή με ρηγά νερά.

Η αλατότητα του νερού καθορίζει τον χαρακτήρα των αποθέσεων των λιμνοθαλασσών, ο οποίος καθορίζεται από δύο παράγοντες: τον βαθμό σύνδεσης με τον ανοικτό ωκεανό και την ξηρότητα του κλίματος.

Οι ανθρακικές λιμνοθάλασσες είναι χώροι λεπτόκοκκης ιζηματογένεσης που περιέχουν λεπτόκοκκους ανθρακικούς ιλυόλιθους και ιλυοσθηριζόμενους ασβεστόλιθους (wackestone)<sup>18</sup>. Ο τύπος του ανθρακικού υλικού που εναποτίθεται στα παλιρροιακά δέλτα, κατά την άμπωτη και την πλημμυρίδα, καθορίζεται από το υλικό που παράγεται στα ρηγά θαλάσσια ύδατα: θα μπορούσε να είναι βιοκλαστικά θραύσματα ή ωολιθικά ιζήματα που σχηματίζουν στρώματα grainstone και packstone.

Τα λεπτόκοκκα ανθρακικά ιζήματα στις λιμνοθάλασσες σχηματίζονται κυρίως από ασβεστολιθικά φύκη, ενώ τα πιο χονδρόκοκκα είναι συνήθως βιοκλαστικά θραύσματα μαλακίων. Τα συσσωματώματα (pellets) που σχηματίζονται από μαλάκια και καρκινοειδή είναι άφθονα στα ιζήματα των λιμνοθαλασσών.

Η αλατότητα καθορίζει τη φύση και την ποικιλομορφία των φυτικών και ζωικών κοινοτήτων σε μια ανθρακική λιμνοθάλασσα.

Η εξάτμιση από την επιφάνεια μιας λιμνοθάλασσας αποτελεί σημαντική πηγή απώλειας νερού σε θερμά, ξηρά κλίματα. Εάν η αλατότητα της λιμνοθάλασσας δεν εξισορροπείται από την εισροή γλυκού νερού από την ξηρά ή την ανταλλαγή νερού με τον ωκεανό, τότε η λιμνοθάλασσα θα γίνει υπεραλατούχα ή πιο εμπλουτισμένη σε άλατα από το κανονικό θαλασσινό νερό.

Η αλυκή (saltern) είναι ένα σώμα υπεραλατούχων ρηχών υδάτων που καταβυθίζει εβαποριτικά ορυκτά. Οι αποθέσεις είναι συνήθως στρωματοποιημένος γύψος ή/και αλίτης, που εμφανίζεται με πάχος ολίγων έως δεκάδων μέτρων.

Γενικά, οι ανθρακικές λιμνοθάλασσες αποτελούν περιοχές ιζηματογένεσης με χαμηλή ενέργεια οι οποίες προστατεύονται από ένα μέτωπο υφάλου ή ένα νησί-φράγμα, το οποίο απορροφά μεγάλο μέρος της κυματικής ενέργειας. Το είδος των ανθρακικών αποθέσεων που σχηματίζονται καθορίζεται από τη σύνδεση της λιμνοθάλασσας με τον ανοικτό ωκεανό και το κλίμα. Οι ανθρακικές λιμνοθάλασσες έχουν παρόμοιο σχήμα και εσωτερική δομή με τις κλαστικές ακτές. Τα ανοίγματα στην κορυφογραμμή του φράγματος μέσω παλιρροιακών καναλιών επιτρέπουν στα παλιρροϊκά ρεύματα να σχηματίζουν παλιρροιακά δέλτα κατά την άμπωτη και την πλημμυρίδα, παρόμοια με τα κλαστικά φράγματα (Tucker and Wright, 2009; Nichols, 2009). Πίσω από το προστατευμένο μέρος μιας νησίδας-φράγματος, τα ανθρακικά πετρώματα αναπτύσσουν μεγάλη διακύμανση στο πορώδες, πιθανότατα επειδή η επιφανειακή έκθεσή τους μπορεί να προκαλέσει διαγενετικό αποτύπωμα στις φάσεις, το οποίο περιπλέκει την εξερεύνηση υδρογονανθράκων σε ανθρακικά συστήματα (Roehl, 1967).

<sup>18</sup> Ανθρακικό πέτρωμα που φέρει ιλύ και περιέχει περισσότερο από 10% κόκκους (Dunham, 1962). Γενικά υποδηλώνει ήρεμα ύδατα και περιορισμό των οργανισμών που παράγουν κόκκους (περιβάλλον απόθεσης χαμηλής ενέργειας). Σε περιπτώσεις όπου οι κόκκοι είναι εξαιρετικά μεγάλοι, οι Embry και Klovan (1971) χαρακτήρισαν αυτά τα ανθρακικά πετρώματα «floatstones» (πλωτόλιθοι).



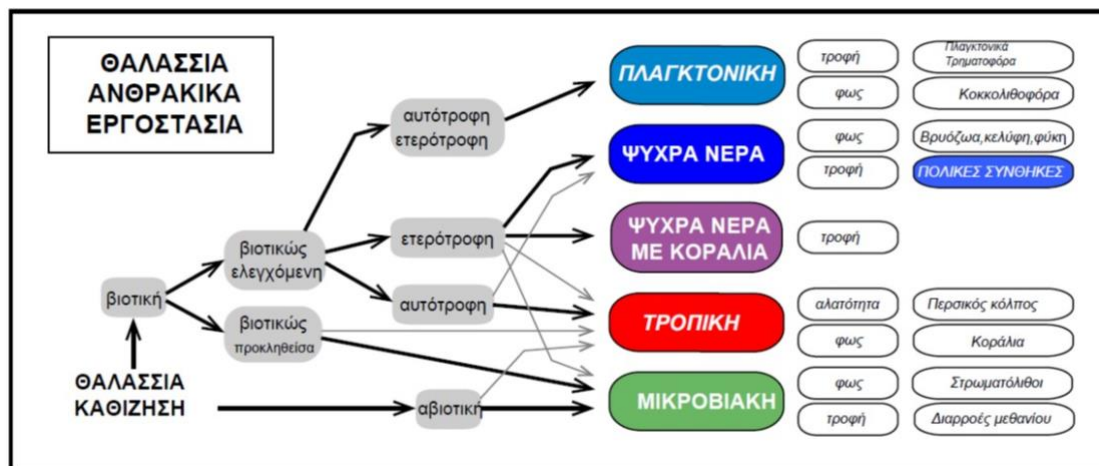
## 9.4 Θαλάσσια εργοστάσια παραγωγής ανθρακικού υλικού (marine carbonate factories)

Ως εργοστάσιο παραγωγής ανθρακικού υλικού (*carbonate factory*) ορίζεται ο ρηχός, εύφωτος, θαλάσσιος χώρος, όπου μέσα σε αυτόν δημιουργούνται σωματίδια ανθρακικού ιζήματος, είτε από την κρυστάλλωση των σκελετικών υπολειμμάτων ή την καθίζηση έξω από αυτόν. Τα ανθρακικά εργοστάσια, ή συστήματα παραγωγής, είναι βενθικές ανθρακικές συναθροίσεις που παρουσιάζουν διακυμάνσεις στον κυρίαρχο τρόπο καταβύθισης, στην ορυκτολογική σύνθεση και στο εύρος βάθους παραγωγής, καθώς και στο δυναμικό ανάπτυξης. Πολλοί θεωρούν το εργοστάσιο παραγωγής ανθρακικού υλικού ως τον «πυρήνα» της ανθρακικής ιζηματογένεσης σε ολόκληρο τον κόσμο. Η έννοια εισάχθηκε από τον Schlager (2000, 2003, 2005), ως μια διαφορετική προσέγγιση για την ταξινόμηση των ανθρακικών πετρωμάτων με βάση τον τρόπο καταβύθισης των ανθρακικών υλικών.

Μία από τις κύριες καινοτομίες στην ιζηματολογία των ανθρακικών πετρωμάτων που επιτεύχθηκε τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, είναι η διάκριση διαφορετικών ανθρακικών εργοστασίων. Η διάκριση αυτή στηρίζεται στην αναγνώριση συγκεκριμένων ομάδων οργανισμών που παράγουν ανθρακικά συστατικά και δραστηριοποιούνται κάτω από συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, με αποτέλεσμα να έχουν συγκεκριμένο ιζηματολογικό και στρωματογραφικό αποτύπωμα. Ένα σύστημα ταξινόμησης των ανθρακικών εργοστασίων παρέχει έτσι ένα σύνολο χαρακτηριστικών, που περιλαμβάνουν από τη μικρο-υφή έως τις συνολικές γεωμετρίες των στρωμάτων, τα οποία επιτρέπουν προβλέψεις πέρα από δεδομένα που είναι ήδη γνωστά.

Οι κύριοι παράγοντες που ελέγχουν τη θαλάσσια καταβύθιση ανθρακικών ιζημάτων είναι το *φως*, η *θερμοκρασία* του νερού, τα *θρεπτικά συστατικά*, η *αλατότητα*, το *υπόστρωμα* και ο *κορεσμός σε ανθρακικά άλατα*. Οι εξειδικευμένοι, για την περιοχή, ρυθμιστικοί παράγοντες που επηρεάζουν τα συστήματα περιλαμβάνουν, επιπλέον, τα *ωκεάνια ρεύματα*, τα *συστήματα ανοδικών και μη ανοδικών ρευμάτων*, τα *συστήματα ωκεανών-ατμόσφαιρας*, τα *ατμοσφαιρικά συστήματα γενικά*, τη *δυναμική των ρηχών υδάτων*, και την *εισροή χερσαίων ιζημάτων και νερού* (Εικόνα 9.9).

Η Εικόνα 9.9 δείχνει ότι κάθε εργοστάσιο έχει το δικό του παράθυρο παραγωγής ιζήματος, με τη βέλτιστη παραγωγή να συνδέεται με συγκεκριμένους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Έτσι, η παραγωγή ιζήματος στο *τροπικό εργοστάσιο (T-factory)* εξαρτάται από το φως και τη θερμοκρασία και επηρεάζεται αρνητικά από τα θρεπτικά συστατικά. Το μέγεθος των ρηχών υδάτινων περιοχών της ευφωτικής ζώνης, επηρεάζει την παραγωγή και την εξαγωγή ιζημάτων. Το *κοραλλιογενές εργοστάσιο ψυχρού νερού (CWC-factory)* εξαρτάται από τα θρεπτικά συστατικά αλλά είναι ανεξάρτητο από το φως. Η παροχή θρεπτικών συστατικών που επιτρέπουν την ανάπτυξη των κοραλλιών ψυχρού νερού συνδέεται με την παραγωγή ιζήματος. Το *εργοστάσιο ψυχρού νερού (C-factory)* παρουσιάζει ισχυρή σύνδεση με τα θρεπτικά συστατικά και τη θερμοκρασία του νερού, καθώς και με περιβάλλοντα που εξαρτώνται από το φως, όπως είναι τα περιβάλλοντα όπου κυριαρχούν τα φύκη. Η ορυκτολογία και η παραγωγή ιζημάτων εντός της υδροδυναμικής ζώνης υψηλής ενέργειας, ρυθμίζουν την κατανομή των ιζημάτων με τρόπο παρόμοιο με αυτόν των πυριτοκλαστικών. Το εργοστάσιο μικροβίων/ιλύος (λάσπης) (*M-factory*) εξαρτάται από τα θρεπτικά συστατικά και σε κάποιο βαθμό από τη θερμοκρασία και το φως. Τέλος, το *πλαγκτονικό εργοστάσιο (P-factory)* επηρεάζεται από τις μεταβολές του φωτός, της θερμοκρασίας και των θρεπτικών συστατικών, με αποτέλεσμα την ακανόνιστη πελαγική κατακρήμνιση.



**Εικόνα 9.9** Αναθεωρημένο διάγραμμα που απεικονίζει το σύστημα ταξινόμησης των ανθρακικών εργοστασίων σύμφωνα με τον Schlager (2003, 2005). Ο θαλάσσιος τρόπος καθίζησης ανθρακικού υλικού διακρίνεται σε: i) βιοτικά ελεγχόμενη καθίζηση με τη δημιουργία αυτότροφου τροπικού εργοστασίου (T-factory), ετερότροφου εργοστασίου ψυχρού νερού-κοραλλιών (CWC-factory), ετερότροφου εργοστασίου ψυχρού νερού (C-factory) και αυτότροφου/ετερότροφου πλαγκτονικού εργοστασίου (P-factory) και ii) βιοτικά προκληθείσα καθίζηση με κυρίαρχο το μικροβιακό εργοστάσιο (M-factory). Όλα τα εργοστάσια διακρίνονται σε φωτοκυριαρχούμενα, ή σε υποκατηγορίες που εξαρτώνται από την παρουσία θρεπτικών συστατικών και την αλατότητα. Το CWC-factory έχει από κοινού τα κοράλλια με το T-factory και τον ετερότροφο τρόπο παραγωγής ανθρακικών με το C-factory. Τα αβιοτικά καθιζήματα εντοπίζονται εντός του εργοστασίου T και του εργοστασίου M. Το P-factory είναι ένα ανεξάρτητο εργοστάσιο, βιοτικά ελεγχόμενης καθίζησης με αυτότροφους και ετερότροφους οργανισμούς. Ξεχωριστή κατηγορία στο συγκεκριμένο διάγραμμα αποτελεί το πολικό εργοστάσιο το οποίο εμφανίζει ελαφρώς διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με εκείνα του κύριου εργοστασίου ψυχρού νερού. Παχιά βέλη: κύρια συμβολή - λεπτά βέλη: δευτερεύουσα συμβολή.

Τα εργοστάσια παραγωγής ανθρακικού υλικού έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ως προς τη μορφολογία των πλατφορμών και τα προφίλ των κατωφερειών τους: Τα T-factories παρουσιάζουν μια περιθωριοποιημένη πλατφόρμα με επίπεδη κορυφή με παρακείμενες εκθετικής μορφής κατωφέρειες ή μορφολογία ανθρακικής ράμπας. Τα εργοστάσια CWC έχουν μορφολογία αναχωμάτων με απότομη κλίση. Τα ανοικτά συστήματα κρηπίδας και τα προφίλ κατωφέρειας σε σχήμα Gauss, συνδέονται με τα εργοστάσια C, ενώ τα εργοστάσια M διακρίνονται από μεμονωμένα αναχώματα με απότομες κλίσεις ή πλατφόρμες με επίπεδη κορυφή, με βαθύτερα περιθώρια και γραμμικά προφίλ πρανών. Το P-factory παρέχει βιοτικούς κόκκους σε όλα τα περιβάλλοντα και κατά καιρούς, όπως στην Κρητιδική περίοδο, μπορεί να επικρατεί στα πρότυπα ιζηματογένεσης στο σύστημα της λεκάνης.

## 9.5 Μικροφασική ανάλυση ανθρακικών πετρωμάτων

Με τον όρο «μικροφάση» εννοούμε τη σύσταση, τα χαρακτηριστικά ή την εμφάνιση ενός τμήματος μιας φάσης, αρκετά μικρού μεγέθους, ώστε να μπορεί να εξεταστεί σε λεπτές τομές ή σε δείγματα πετρωμάτων παρόμοιου μεγέθους.

Αρχικά, ο όρος «μικροφάση», όπως ορίστηκε από τον Brown (1943) και τον Cuvillier (1952), αναφερόταν μόνο σε πετρογραφικά και παλαιοντολογικά χαρακτηριστικά που μελετώνται σε λεπτές τομές. Σήμερα, ωστόσο, αυτός ο όρος είναι ένας από τους πιο σημαντικούς όρους που έχουν χρησιμοποιηθεί στην ανθρακική ιζηματολογία, και θεωρείται το σύνολο όλων των ιζηματολογικών και παλαιοντολογικών δεδομένων που μπορούν να περιγραφούν και να ταξινομηθούν, από λεπτές τομές, αποφλοιώσεις, ή απλώς δείγματα πετρωμάτων.

Η γεωλογία πεδίου, συμπεριλαμβανομένης της χαρτογράφησης, και η μελέτη λεπτών τομών αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχή ανάλυση των μικροφάσεων. Τις τελευταίες δεκαετίες, οι μικροφάσεις έχουν καθιερωθεί ως μέρος της μελέτης των ανθρακικών πετρωμάτων, ωστόσο, πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν τα κριτήρια προσδιορισμού μικροφάσεων για την περιγραφή και την ταξινόμηση των ασβεστόλιθων, αλλά παραλείπουν να διερευνήσουν τη σημασία αυτών των κριτηρίων για την ερμηνεία της ιστορίας απόθεσης και διαγένεσής τους.

Οι μελέτες των μικροφάσεων αποσκοπούν στην αναγνώριση συνολικών προτύπων που αντικατοπτρίζουν την ιστορία των ανθρακικών πετρωμάτων, μέσω της ενδελεχούς εξέτασης των ιζηματολογικών και παλιοντολογικών χαρακτηριστικών τους. Η μικροφασική ανάλυση είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη μοντέλων ιζηματογένεσης ανθρακικών πετρωμάτων. Συγκεκριμένα:

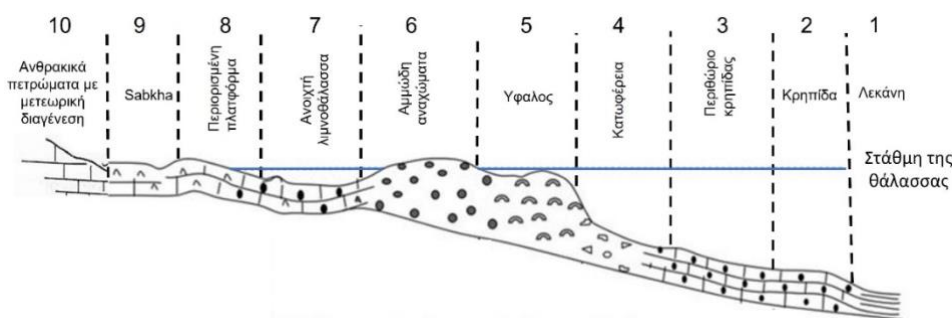
- Περιγράφει ανθρακικές αποθέσεις σε ποικίλα περιβάλλοντα από θαλάσσια έως και χερσαία καθώς και ανθρακικές αποθέσεις τροπικών και μη τροπικών νερών.
- Αναλύει τις συνθήκες απόθεσης και διαγένεσης των ανθρακικών πετρωμάτων.
- Παρουσιάζει διαγνωστικά χαρακτηριστικά και υπογραμμίζει τη σημασία των μικροφασικών κριτηρίων.
- Επισημαίνεται η σημασία των βιολογικών παραγόντων που ελέγχουν την ιζηματογένεση των ανθρακικών πετρωμάτων και παρέχεται μια επισκόπηση των συνηθέστερων απολιθωμάτων που βρίσκονται σε λεπτές τομές ασβεστόλιθου.
- Συνδυάζει τις διαδικασίες διαγένεσης με τη δολομιτίωση και το πορώδες.
- Έχει μεγάλη σημασία στη δημιουργία στρωματογραφικών ακολουθιών και μοντέλων απόθεσης.
- Είναι σημαντικό εργαλείο στη διάκριση παλαιοκλιματικών αλλαγών.
- Διαχωρίζει τις συνθήκες απόθεσης λεκάνης-πλατφόρμας.
- Αποτελεί ένα επιπρόσθετο εργαλείο στις αρχαιολογικές έρευνες.
- Τέλος, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στην αξιολόγηση των ασβεστόλιθων είτε ως μητρικών πετρωμάτων είτε ως ταμιευτήρων.

### 9.5.1 Μικροφάσεις, τύποι μικροφάσεων και τυποποιημένοι τύποι μικροφάσεων

Για τον καθορισμό και την ερμηνεία των ανθρακικών φάσεων λαμβάνονται υπόψη η λιθολογία, η υφή, οι τύποι των κόκκων, το είδος και το ποσοστό των απολιθωμάτων, οι ιζηματοδομές, το χρώμα και οι διαγενετικοί χαρακτήρες. Σε μια ανθρακική ακολουθία μια φάση μπορεί να επαναλαμβάνεται πολλές φορές, ή να εξελίσσεται πλευρικά ή κάθετα σε μια άλλη. Συχνές είναι οι χαρακτηριστικές παραγενέσεις φάσεων.

Η προσέγγιση των μικροφάσεων είναι ως επί το πλείστον περιγραφική, με τύπους μικροφάσεων που ορίζονται από κριτήρια μικροφάσεων, των οποίων η ύπαρξη και η αφθονία καθορίζονται από συγκεκριμένους περιβαλλοντικούς παράγοντες και συνδέονται με συγκεκριμένες συνθήκες απόθεσης. Τα κριτήρια υφής και σύστασης των ανθρακικών πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά.

Ο Wilson (1975) παρατήρησε ότι οι αλλαγές στα ιζηματολογικά και βιολογικά χαρακτηριστικά σε μια ακολουθία περιβαλλόντων, από την αβαθή υφαλοκρηπίδα έως το κέντρο της ιζηματογενούς λεκάνης, αποτελούν τη βάση για τη δημιουργία γενικευμένων μοντέλων για ανθρακικές πλατφόρμες, ράμπες και υφαλοκρηπίδες. Για αυτό δημιούργησε τις *Πρότυπες Φασικές Ζώνες* (Standard Facies Zones – FZ) οι οποίες χαρακτηρίζουν εξιδανικευμένες ζώνες φάσεων κατά μήκος ενός απλουστευμένου προφίλ που περιλαμβάνει μια ανοικτή-θαλάσσια βαθιά λεκάνη, μια κατωφέρεια, ένα έντονο περιθωριακό χείλος πλατφόρμας και μια εσωτερική πλατφόρμα, προς την ακτή (Wilson, 1975) (Εικόνα 9.10). Αυτές οι ζώνες φάσεων διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το περιβάλλον, τα κυρίαρχα ιζήματα και τον κυρίαρχο βιολογικό κόσμο, καθώς και ως προς τις κοινές λιθοφάσεις.



**Εικόνα 9.10** Φασικές ζώνες (ΦΖ) σε ανθρακική πλατφόρμα με περιθώριο (προσωπικό αρχείο συγγραφέων, τροποποιημένο από Wilson, 1975).

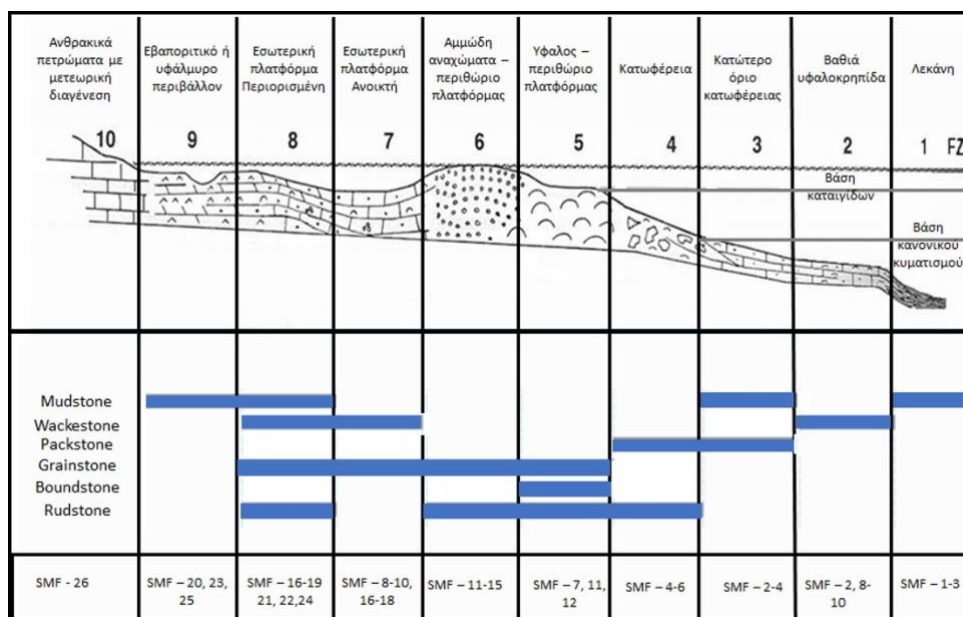
Τα ανθρακικά πετρώματα που σχηματίζονται σε αυτές τις ζώνες φάσεων παρουσιάζουν συχνά συγκεκριμένους τυποποιημένους τύπους μικροφάσεων (SMF) που χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα κριτήρια στην αναγνώριση των κύριων φασικών ζωνών (Flügel, 2004).

Οι τυποποιημένοι τύποι μικροφάσεων – SMF είναι εικονικές κατηγορίες μικροφάσεων με πανομοιότυπα χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι απλά και εύκολα αναγνωρίσιμα. Η αναγνώριση και ο προσδιορισμός τύπων μικροφάσεων - SMF αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την αναγνώριση των φασικών ζωνών, αλλά πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή. Η πλειονότητα των τύπων μικροφάσεων - SMF βασίζεται σε λίγα καθοριστικά χαρακτηριστικά, όπως τύποι κόκκων, βιότοποι ή υφές απόθεσης (Flügel, 2004).

Βασικές προϋποθέσεις για τον ορισμό των μικροφασικών τύπων είναι η σαφής διάκριση των κατηγοριών κόκκων (σκελετικοί – μη-σκελετικοί: επιφλοιωμένοι κόκκοι, πελοειδή, συσσωματώματα και κλάστες), η κατανόηση των ταξινομήσεων των ασβεστολίθων με βάση τα κριτήρια υψής, η αναγνώριση των δομών απόθεσης και η ικανότητα απόδοσης απολιθωμάτων που παρατηρούνται στις λεπτές τομές σε κύριες συστηματικές και ταξινομικές ομάδες. Οι τυποποιημένοι τύποι μικροφάσεων - SMF περιγράφουν τις κύριες αποθέσεις και το βιολογικό τους περιεχόμενο και υποδεικνύουν τις κύριες διεργασίες απόθεσης. Για τον καθορισμό μιας τέτοιας μικροφάσης απαιτείται, εκτός της λεπτομερούς περιγραφής της υπαίθρου και μικροσκοπική παρατήρηση.

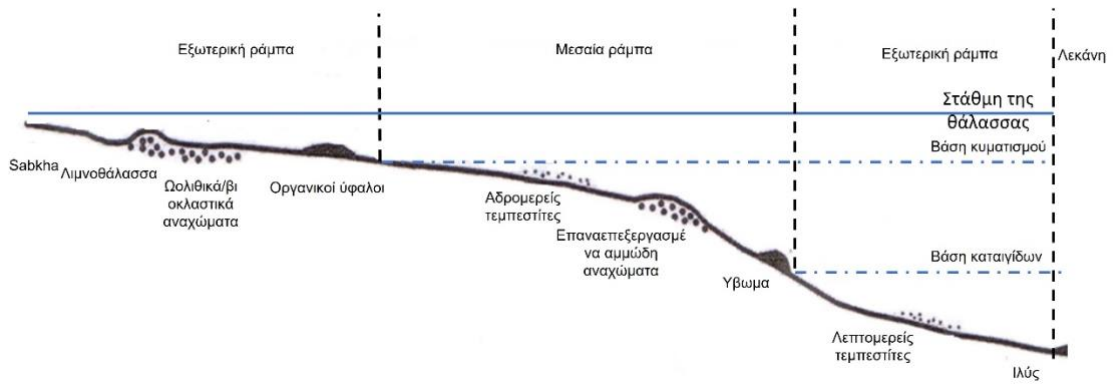
Η υφή, καθώς και τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των μικροφάσεων, μπορεί να ποικίλλουν σημαντικά μέσα σε μια στρώση ασβεστόλιθου, τόσο πλευρικά όσο και κάθετα. Η μεταβλητότητα επηρεάζεται από το μέγεθος του δείγματος και τις διαδικασίες δειγματοληψίας, αλλά μπορεί να είναι πραγματική και να αντανακλά γεγονότα απόθεσης μικρής κλίμακας ή ταχέως μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Μέσα σε μια μόνο λεπτή τομή ή ακόμα και σε δείγματα που λαμβάνονται σε πλευρικές αποστάσεις μόνο μερικών δεκάδων εκατοστών, μπορεί να εμφανιστούν παραπάνω από ένας μικροφασικοί τύποι.

Συνεπώς, σύμφωνα με τον Wilson (1975), υπάρχει ένα σύστημα με 24 πρότυπους μικροφασικούς τύπους - SMF, που αντιστοιχούν σε 9 πρότυπες φασικές ζώνες (ΦΖ/standard FZ) όπως αυτές απεικονίζονται στην Εικόνα 9.11. Έτσι, λοιπόν, αν και η ερμηνεία είναι ως επί το πλείστον υποκειμενική, συγκρίνονται οι προς μελέτη φάσεις με τις πρότυπες μικροφάσεις του Wilson (1975).



**Εικόνα 9.11** 24 μικροφασικοί τύποι οι οποίοι εμπεριέχονται στις 9 Φασικές Ζώνες του Wilson (1975).

Το μοντέλο των ΦΖ του Wilson ανταποκρίνεται μόνο σε τροπικά περιβάλλοντα και συγκεκριμένα σε πλατφόρμες με περιθώριο (υφαλώδες περιθώριο ή περιθώριο με ωολιθικά αναχώματα). Δεν βρίσκει απήχηση στα ψυχρά περιβάλλοντα, στα οποία ευνοείται η ανάπτυξη πλατφορμών ήπιας κλίσης που στερούνται περιθωρίων (Εικόνα 9.12).



**Εικόνα 9.12** Μοντέλο ανθρακικής πλατφόρμας ήπιας κλίσης (Ομοκλινής πλατφόρμα τύπου “ramp”).



## Βιβλιογραφία/Αναφορές

### Ξενόγλωσση

- Bosence, D.W.J., & Wilson R.C.L. (2003). *Carbonate depositional systems*. In: Coe A (ed.) *The Sedimentary Record of Sealevel Change*. pp. 209-233. Milton Keynes και Cambridge: The Open University and Cambridge University Press.
- Brown, J.S. (1943). Suggested use of the word microfacies. *Economic Geology*, 38, p. 325.
- Cuvillier, J. (1952). *Le notion de "microfacies" et ses applications*. VIII Congreso Nazionale di Metano e Petroleo, sect. I, 1-7.
- Dunham, R. L. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *Memoir American Association Petroleum Geologists*, 1, 108–121.
- Embry, A. F., & Klovan, J. E. (1971). A late Devonian reef tract on Northeastern Banks Island, NWT. *Canadian Petroleum Geology Bulletin*, 19, 730–781.
- Flügel, E. (2004). *Microfacies of Carbonate Rocks*. Berlin: Springer, 976 p.
- Folk, R. L. (1959). Practical petrographic classification of limestones. *Bulletin American Association Petroleum Geologists*, 43, 1–38.
- Folk, R. L. (1962). *Spectral subdivision of limestone types*. In: W. E. Ham (Ed.), *Classification of Carbonate Rocks*. American Association of Petroleum Geologists Memoir I, pp. 62–84.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy*. Wiley and Sons, New York, 225-246.
- Roehl, P.O. (1967). Stony Mountain (Ordovician) and Interlake (Silurian) facies analogs of Recent low-energy marine and subaerial carbonates, Bahamas. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 51, p. 1979-2032, <http://dx.doi.org/10.1306/5D25C1F1-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Schlager, W. (2000). *Sedimentation rates and growth potential of tropical, cool-water and mud-mound carbonate systems*. In: *Carbonate Platform Systems: Components and Interactions* (Eds Skelton, P.W. and Palmer, T.J.), Geological Society of London, Special Publication, 178, pp. 217–227. London.
- Schlager, W. (2003). Benthic carbonate factories of the Phanerozoic. *Int. J. Earth Sci.*, 92, 445–464.
- Schlager, W. (2005). *Carbonate Sedimentology and Sequence Stratigraphy*. SEPM (Society for Sedimentary Geology), Tulsa, Oklahoma, USA, 200 pp.
- Tucker, M. E., & Wright, V. P. (1990). *Carbonate Sedimentology*. Oxford: Blackwell, 482 p.
- Wilson, J.L. (1975). *Carbonate facies in geologic history*. 471 pp., Berlin (Springer).



## Κεφάλαιο 10

# Βασικές Αρχές Στρωματογραφίας Ακολουθιών

### Σύνοψη

Στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η ανάδειξη της Στρωματογραφίας Ακολουθιών ως ενός «νέου εργαλείου» για τη μελέτη των ιζηματογενών λεκανών και την υποδιαίρεση του ιζηματογενούς αρχείου σε χρονοστρωματογραφικά σύνολα. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στον όρο «ακολουθία» και στον καθορισμό της, στο πλαίσιο της στρωματογραφίας. Ειδικότερα, περιγράφεται η βασική ιεραρχία και αρχιτεκτονική της ακολουθίας και αναφέρονται οι μεταβλητές που επηρεάζουν τον διαθέσιμο χώρο ιζηματογένεσης (χώρος υποδοχής).

### Προαπαιτούμενη γνώση

Ιζηματογενείς φάσεις, ιζηματογενείς δομές, Βασικές αρχές Στρωματογραφίας, Τεκτονική.

## 10.1 Εισαγωγή

Η Στρωματογραφία Ακολουθιών αποτελεί ένα σχετικά καινούριο αντικείμενο των Γεωεπιστημών και μια από τις πιο πρόσφατες θεωρητικές επαναστάσεις στον ευρύτερο τομέα της Ιζηματολογίας (Miall, 1995). Γενικό αντικείμενο της Στρωματογραφίας Ακολουθιών είναι η μελέτη των σχέσεων των ιζηματογενών φάσεων και η αρχιτεκτονική των στρωμάτων μέσα σε ένα χρονοστρωματογραφικό πλαίσιο. Η Στρωματογραφία Ακολουθιών δίνει έμφαση στην αναγνώριση βασικών στρωματογραφικών επιφανειών, τη σχέση τους με τον διαθέσιμο χώρο ιζηματογένεσης, τη χρονοστρωματογραφική τους σημασία, την προγνωστική τους χρησιμότητα και απαιτεί συνδυαστικές γνώσεις Ιζηματολογίας, Στρωματογραφικών αρχών και Τεκτονικής και έχει άμεση εφαρμογή στη διερεύνηση υδρογονανθράκων.

Έχουν δοθεί πολλοί ορισμοί για τη στρωματογραφία ακολουθιών, αλλά ίσως ο απλούστερος και πλέον προτιμότερος από τους ερευνητές είναι ο εξής: «Στρωματογραφία Ιζηματογενών Ακολουθιών (ή Στρωματογραφία Ακολουθιών – *Sequence Stratigraphy*) είναι η υποδιαίρεση των ιζημάτων μιας λεκάνης σε «πακέτα» της ίδιας γενετικής προέλευσης που οριοθετούνται από ασυμφωνίες και τις σχετικές τους προεκτάσεις σε συμφωνίες».

Η Στρωματογραφία Ακολουθιών χρησιμοποιεί τους κύκλους της αλλαγής της σχετικής στάθμης της θάλασσας και του διαθέσιμου χώρου ιζηματογένεσης (χώρος υποδοχής ιζημάτων), στις ιζηματογενείς λεκάνες, για να εξηγήσει και να προβλέψει τη γεωμετρία των στρωμάτων.

Το αντικείμενο αποτελεί μετεξέλιξη της *Αλλοστρωματογραφίας* (Allostratigraphy), η οποία είναι μια στρωματογραφική μέθοδος που υποδιαιρεί τις γεωλογικές ακολουθίες, με βάση ένα ιεραρχικό πλαίσιο επιφανειών οριοθέτησης ή ασυνχειών, που χρησιμεύουν για την ομαδοποίηση διακριτών πακέτων ιζημάτων ή πετρωμάτων. Οι επιφάνειες αυτές είναι *αλλογενείς* (δημιουργούνται από διεργασίες, ουσιαστικά, εξωτερικές προς την περιοχή ιζηματογένεσης) και είναι χρονοστρωματογραφικά σημαντικές (παρέχουν πληροφορίες για τη σχετική γεωλογική ηλικία) (North American Commission on Stratigraphic Nomenclature-NACSN, 1983).

Σύμφωνα με τον Nickols (1999), «σε κάθε δεδομένη λεκάνη ιζηματογένεσης, ή τμήμα αυτής, η επίδραση στον διαθέσιμο χώρο, των μεταβολών του βασικού επιπέδου θα ασκήσει θεμελιώδη έλεγχο στη στρωματογραφία. Τα αποτελέσματα αυτών των αλλαγών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τρόπος ανάλυσης της ακολουθίας των ιζηματογενών στρωμάτων. Η χρησιμότητα της αλλοστρωματογραφικής προσέγγισης είναι αδιαμφισβήτητη, ανεξάρτητα από την αδυναμία μας να καθορίσουμε με σαφήνεια τον συγκεκριμένο της παγκόσμιας ευστατικής αλλαγής με την τοπική αλλαγή της σχετικής στάθμης της θάλασσας».

Γενικά, η Στρωματογραφία Ακολουθιών αποτελεί έναν *περιγραφικό κλάδο*, ο οποίος διαχωρίζει το ιζηματογενές πλήρωμα μιας λεκάνης σε ακολουθίες οριοθετημένες από ασυμφωνίες οι οποίες χρησιμοποιούνται με επιτυχία, στους στρωματογραφικούς συσχετισμούς σε επίπεδο λεκάνης και έχουν τη δυνατότητα συσχετισμών μεταξύ λεκανών σε παγκόσμιο επίπεδο.

Μια *ακολουθία* είναι ένα σύνολο παρατηρήσιμων φαινομένων που συμβαίνουν με προβλέψιμη σειρά. Στη στρωματογραφία ακολουθιών, πρόκειται για στρώματα ιζημάτων που εναποτίθενται με την πάροδο του χρόνου με προβλέψιμο τρόπο, λόγω των επιδράσεων των περιβαλλοντικών μεταβολών που επηρεάζουν την τεκτονική, την προσφορά ιζημάτων και τη στάθμη της θάλασσας.

Με τον χρόνο, τα περιβάλλοντα αλλάζουν λόγω μιας μεγάλης ποικιλίας μακροπρόθεσμων και βραχυπρόθεσμων παραμέτρων που επηρεάζουν το γήινο σύστημα. Αυτές οι παράμετροι μπορεί να είναι

εξωγενείς, προερχόμενες από το διαστημικό περιβάλλον, ή ενδογενείς, που προκύπτουν εντός του γήινου συστήματος. Παραδείγματα ενδογενών συμβάντων μπορεί να είναι μια μεγάλη έκχυση βασάλτη, η οποία μπορεί να επηρεάσει άμεσα την υδρόσφαιρα, την ατμόσφαιρα και τη βιόσφαιρα. Παράδειγμα εξωγενών γεγονότων θα μπορούσαν να είναι οι σταδιακές αλλαγές στις παραμέτρους της τροχιάς ή της κλίσης της Γης (κύκλοι Milankovitch). Αυτές επηρεάζουν την ποσότητα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορα επίπεδα, η οποία επηρεάζει όλες τις σφαίρες της Γης (ατμόσφαιρα, βιόσφαιρα, γεώσφαιρα, κρυόσφαιρα και υδρόσφαιρα).

Το μεγάλο μειονέκτημα της Στρωματογραφίας Ιζηματογενών Ακολουθιών είναι ότι ο ορισμός, η ορολογία και η ερμηνεία των επιφανειών είναι πολύπλοκα και συχνά αμφιλεγόμενα (Neal & Abgue, 2009).

## 10.2 Ιστορική αναδρομή

Ελάχιστοι γεωλόγοι-στρωματογράφοι αμφισβητούν τον ισχυρισμό ότι η στροφή προς τους στρωματογραφικούς συσχετισμούς ακολουθιών με βάση τις ιζηματογενείς φάσεις αποτελεί μια από τις σημαντικότερες μετεξελίξεις στο πλαίσιο της σύγχρονης στρωματογραφίας. Αυτό που είναι λιγότερο ευρέως αποδεκτό είναι ότι η πλειονότητα των βασικών αρχών της στρωματογραφίας ακολουθιών καθιερώθηκε από μια μικρή ομάδα πρωτοπόρων, στις αρχές έως τα μέσα της δεκαετίας του 1900. Οι περισσότεροι από αυτούς είναι σε μεγάλο βαθμό άγνωστοι ή δεν έχουν εκτιμηθεί επαρκώς από τη σημερινή γενιά των στρωματογράφων ακολουθιών. Οι Eliot Blackwelder, Amadeus Grabau, Joseph Barrell, John Rich και Harry Wheeler είναι μεταξύ των πιο αξιοσημείωτων.

Αρχικά, όμως, τις βάσεις για τη δημιουργία και εξέλιξη του γνωστικού αντικείμενου της Στρωματογραφίας Ακολουθιών έθεσε ο James Hutton (1726-1797), σκωτσέζος γεωλόγος του 18ου αιώνα και πατέρας της σύγχρονης Γεωλογίας, ο οποίος πρώτος περιέγραψε ασυμφωνία στη Βόρεια Σκωτία (Siccar Point). Στο έργο του «Η Θεωρία της Γης» (1785), ο Hutton αναγνώρισε τη σημασία της ασυμφωνίας. Οι «μεγάλες» ασυμφωνίες περιφερειακής ή ηπειρωτικής κλίμακας (τόσο στη γεωγραφία όσο και στη γεωχρονολόγηση) συνδέονται είτε με παγκόσμιες μεταβολές στο ευστατικό επίπεδο της θάλασσας, είτε με τον κύκλο των υπερηπείρων, μια περιοδική ένωση ηπείρων που συμβαίνει περίπου κάθε 500 εκατομμύρια χρόνια.

Ο Blackwelder ήταν, ίσως, ο πρώτος που αναγνώρισε και υπογράμμισε την παρουσία και τη σημασία των τοπικών διαφορών στη συγκέντρωση των στρωμάτων στη Βόρεια Αμερική, οι οποίες αργότερα αποτέλεσαν τη βάση για τις γνωστές *κρατονικές μεγα-ακολουθίες*<sup>19</sup> του Larry Sloss. Ωστόσο, ο Blackwelder είναι περισσότερο γνωστός ως ο μέντορας και συνάδελφος, όχι μόνο των υπόλοιπων προαναφερθέντων πρωτοπόρων, αλλά και των σημαντικότερων επιστημόνων, που τελικά αποτέλεσαν τους μέντορες ορισμένων από τους πιο διάσημους στρωματογράφους των δεκαετιών 1970 και 1980.

Ο Amadeus Grabau επικέντρωσε την προσοχή του στην επεξήγηση του νόμου της συσχέτισης των φάσεων του Johannes Walther (*νόμος του Walther*) και στην εφαρμογή των συσχετίσεων με βάση τις φάσεις στη στρωματογραφία - μια προσέγγιση που έρχεται σε αντίθεση με την έως τότε επικρατούσα άποψη της λιθοστρωματογραφίας ως το κύριο φυσικό στρωματογραφικό εργαλείο.

Ο Grabau διαπίστωσε ότι το αρχείο των ιζηματογενών πετρωμάτων περιέχει πολλά χρονικά κενά που διαχωρίζουν τις ακολουθίες των φάσεων, για τα οποία καθιέρωσε τον όρο «*hiatus*» (στρωματογραφικό κενό). Η θεωρία των παλμικών κινήσεων χρησιμοποιήθηκε για να εξηγήσει τους κύκλους απόθεσης και διάβρωσης καθώς και τα κενά ιζηματογένεσης, και παρόλο που ο μηχανισμός είναι διαφορετικός, το καθαρό αποτέλεσμα αυτών των «ταλαντώσεων» είναι σε γενικές γραμμές παρόμοιο με τα αποτελέσματα των ευστατικών και τεκτονικών κινήσεων που αποδίδουμε σε τέτοιες μεταβολές σήμερα.

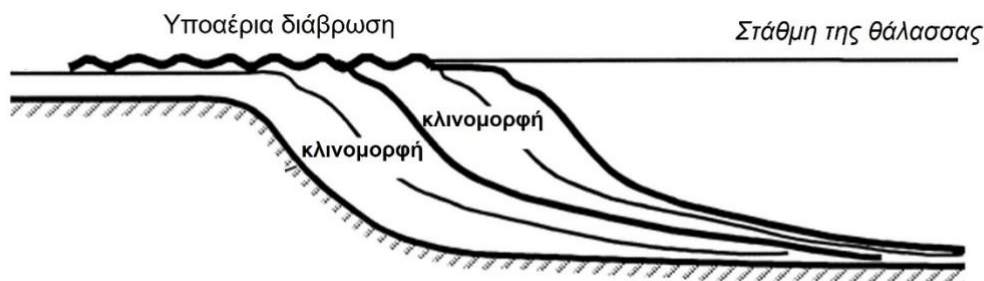
Ο Joseph Barrell επινόησε τον όρο «*επίπεδο βάσης*» και μελέτησε τον ρόλο του στον έλεγχο της διάβρωσης σε σχέση με την απόθεση. Όπως και ο Grabau, ο Barrell επέμεινε ότι η ιζηματογένεση δεν είναι συνεχής, με αποτέλεσμα η στρωματογραφία να χαρακτηρίζεται από διαλείμματα διαφορετικής διάρκειας. Έτσι, επινόησε τον όρο «*διάστημα*» (diastem) για τις μικρές αλλά πολυάριθμες διακοπές ιζηματογένεσης, οι οποίες

---

<sup>19</sup> Μια *κρατονική ακολουθία* στη γεωλογία είναι μια λιθοστρωματογραφική ακολουθία, πολύ μεγάλης κλίμακας, στο αρχείο πετρωμάτων, που αντιπροσωπεύει έναν πλήρη κύκλο θαλάσσιας επίκλυσης και απόσυρσης σε ένα κρατόνιο (τεμάχιο ηπειρωτικού φλοιού), κατά τη διάρκεια του γεωλογικού χρόνου. Οι κρατονικές ακολουθίες είναι επίσης γνωστές ως «μεγασειρές», «στρωματογραφικές ακολουθίες», «ακολουθίες Sloss», «υπερακολουθίες» ή απλώς «ακολουθίες». Αποτελούν γεωλογική απόδειξη της ανόδου και, στη συνέχεια, της πτώσης της σχετικής στάθμης της θάλασσας, με αποτέλεσμα την απόθεση ποικίλων στρωμάτων ιζημάτων, τα οποία εκφράζονται πλέον ως ιζηματογενή πετρώματα.

θα μπορούσαν να αντιπαραβληθούν με εκείνες που αντιπροσωπεύουν μεγαλύτερες διακοπές, τις οποίες ονομάζει «ασυνέχειες».

Το 1951, ο John L. Rich, εκτιμώντας την τοπογραφία των ιζηματογενών αποθέσεων, προτείνει την έννοια των κλινομορφών (clinoforms) - γεωμετρικών στοιχείων που αποτελούν βασικό συστατικό της σύγχρονης στρωματογραφίας ακολουθιών. Σύμφωνα με τον Rich, μια κλινομορφή είναι μια ημιτονοειδής επιφάνεια που εκτείνεται κατά μήκος της υφαλοκρηπίδας από τη βάση κύματος<sup>20</sup> έως τη βάση της παρακείμενης κατωφύρειας (Εικόνα 10.1).



**Εικόνα 10.1** Σχηματική απεικόνιση κλινομορφών.

Ο Rich αναγνώρισε ότι οι κλινομορφές συνδέουν γενετικά συσχετιζόμενες συσσωρεύσεις ιζημάτων που έχουν αποτεθεί από την ακτογραμμή προς το κέντρο της λεκάνης - αυτό που σήμερα θεωρούμε ως σύστημα απόθεσης (ή αποθετικό σύστημα). Στη σύγχρονη στρωματογραφία ακολουθίας, οι προκύπτουσες αρχιτεκτονικές που οριοθετούνται από αυτές τις επιφάνειες χρησιμεύουν ως βάση για όλα τα τμήματα της *υποακολουθίας*. Πλέον, ο όρος «κλινομορφή» δεν περιορίζεται μόνο στις μορφολογίες της υφαλοκρηπίδας, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχεδόν σε οποιαδήποτε κλίμακα (Patruno & Helland-Hansen, 2018).

Κορυφαίος στρωματογράφος της εποχής, ήταν ο Harry Wheeler, ο οποίος ήταν ένας από τους πρώτους που χρησιμοποίησε τον όρο «ακολουθία» για να αναφερθεί σε ενότητες πετρωμάτων που συνδέονται με ασυμφωνίες. Ο Harry Eugene Wheeler (1907-1987), του Πανεπιστημίου της Ουάσιγκτον, υπήρξε πρωτοπόρος των γενετικών στρωματογραφικών αρχών που αποτελούν τη βάση της σύγχρονης αντίληψής μας για τη στρωματογραφία ακολουθίας. Οι εργασίες του σχετικά με αυτό που του άρεσε να αποκαλεί «στρωματολογία», περιελάμβαναν την ταξινόμηση των στρωματογραφικών ενοτήτων σε λιθοστρωματογραφικές και βιοστρωματογραφικές οντότητες, καθώς και κυκλοθέματα, ενότητες που συνδέονται με ασυμφωνίες, και την ανάλυση του επιπέδου βάσης και του ρόλου του στη διαμόρφωση των στρωματογραφικών ασυνεχειών. Το έργο του σχετικά με τις «ακολουθίες», που περιορίζονται από ασυμφωνίες, οδήγησε τελικά τη Διεθνή Υποεπιτροπή για τη Στρωματογραφική Ταξινόμηση να τις ορίσει επίσημα το 1987. Τα διαγράμματα που χρησιμοποιούνται για την αποσαφήνιση των χρονικών σχέσεων των πετρωμάτων αναφέρονται πλέον ως «διαγράμματα Wheeler». Το διάγραμμα Wheeler είναι ένα θεμελιώδες εξάρτημα της εργαλειοθήκης των γεωλόγων για την κατανόηση των χωροχρονικών σχέσεων των στρωμάτων. Τις τελευταίες δεκαετίες, τα διαγράμματα αυτά έχουν βελτιωθεί λόγω της προόδου της σεισμικής τεχνολογίας. Παρά το θεωρητικό πλαίσιο για την ανάλυση ακολουθιών που διατύπωσε ο Wheeler (1958a), ελάχιστες αναφορές έγιναν στο έργο του στις δεκαετίες του 1970 και 1980. Μαθητευόμενος του Blackwelder, και έχοντας ως όπλο την έννοια του βασικού επιπέδου του Joseph Barrell, ο Wheeler ήταν από τους πρώτους που αναγνώρισαν την έννοια της χρονικής στρωματογραφίας. Παρόλα αυτά, λόγω της ανορθόδοξης άποψής του για τη στρωματογραφία, ο Wheeler αναμείχθηκε στη μια διαμάχη μετά την άλλη και οι απόψεις του θεωρήθηκαν προκλητικές.

Συντονισμένα, όλοι αυτοί οι στρωματογράφοι-οραματιστές δημιούργησαν ένα στρωματογραφικό πλαίσιο που επικεντρώθηκε στην κατανόηση του στρωματογραφικού αρχείου σε αντίθεση με την απλή λιθοστρωματογραφική χαρτογράφηση ή τη βιοστρωματογραφική χρονολόγηση. Αυτοί οι αφανείς πρωτοπόροι έθεσαν σε εφαρμογή σχεδόν όλα τα συστατικά στοιχεία της σύγχρονης στρωματογραφίας ακολουθιών, περισσότερο από δύο δεκαετίες πριν από τη διάδοσή της στην επιστημονική κοινότητα.

<sup>20</sup> Η *βάση κύματος*, σύμφωνα με τον Rich, είναι το όριο βάθους στο οποίο τα κύματα και οι κυματικές τροχιές παύουν να μετακινούν ιζήματα στον πυθμένα της θάλασσας. Αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό όριο μεταξύ της παράκτιας και της βαθύτερης ιζηματογένεσης της υφαλοκρηπίδας- σήμερα το χρησιμοποιούμε για να ορίσουμε το εξωτερικό όριο της ακτής.



Το 1963, ο Lawrence Sloss αναγνώρισε με τη χρήση του διαγράμματος Wheeler, έξι μεγάλες ακολουθίες, τις οποίες αποκάλεσε «κρατονικές ακολουθίες», στη Βόρεια Αμερική, που ελέγχονται από τις ευστατικές μεταβολές της θαλάσσιας στάθμης.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1960, οι εξαιρετικοί μαθητές του Sloss, Peter Vail, Robert Mitchum και John Sangree, οι οποίοι ολοκλήρωσαν διατριβές που αφορούσαν στρώματα της Πενσυλβανίας, συνειδητοποίησαν ότι οι παγετώδεις ευστατικές μεταβολές της στάθμης της θάλασσας θα μπορούσαν να είναι υπεύθυνες για τις πολυάριθμες εκτεταμένες ασυμφωνίες στα διάσημα κυκλοθέματα. Οι ερευνητές αυτοί εντάχθηκαν σε μια ερευνητική ομάδα της Exxon<sup>21</sup>, η οποία επρόκειτο να αναπτύξει τη σύγχρονη σεισμική στρωματογραφία. Υιοθέτησαν και βελτίωσαν σε μεγάλο βαθμό τη Στρωματογραφία Ακολουθιών για την ερμηνεία των σεισμικών δεδομένων του υπεδάφους. Αναγνώρισαν παρόμοιες διαδοχές ακολουθιών και ασυμφωνιών σε διαφορετικά, ευρέως απομακρυσμένα ηπειρωτικά περιθώρια, γεγονός που υποδήλωνε κάποια παγκόσμια αιτία, ίσως παγετώδεις ευστατικές διακυμάνσεις.

Η δική τους προσέγγιση αναγνώριζε ακολουθίες μικρότερης διάρκειας από τις αρχικές ακολουθίες του Sloss. Ενώ κάθε μια από τις έξι κρατονικές ακολουθίες αντιπροσώπευαν εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια, οι σεισμικές ακολουθίες αντιπροσωπεύουν συνήθως μόνο χιλιάδες έως μερικά εκατομμύρια χρόνια. Ένα από τα μεγάλα επιτεύγματα του Vail και των συναδέλφων του ήταν η αναγνώριση της θεμελιώδους φύσης των ασυμφωνιών και ότι οι ακολουθίες είναι τα δομικά στοιχεία του στρωματογραφικού αρχείου. Τα όρια ακολουθιών είναι τοπικές επιφάνειες διάβρωσης ή/και μη απόθεσης που μπορούν να αναγνωριστούν αντικειμενικά με σεισμικά, επιφανειακά και χρονοστρωματογραφικά δεδομένα.

Στη δεκαετία του 70 γεννιέται, επισήμως, η περίφημη μέθοδος της Στρωματογραφίας των Ιζηματογενών Ακολουθιών, η οποία βασιζόταν σε δεδομένα σεισμικών ανακλάσεων για την ερμηνεία στρωματογραφικών δομών μεγάλης κλίμακας. Ήταν η εποχή που οι εταιρίες πετρελαίου έδιναν μεγάλη σημασία στην αξιολόγηση σεισμικών μεθόδων με σκοπό τη διερεύνηση της δομής των λεκανών. Η μεγάλη συλλογή σεισμικών δεδομένων ανάκλασης σε συνδυασμό με τις εκτεταμένες διεθνείς γεωτρήσεις (και τα συνοδευτικά αρχεία καταγραφής με καλώδια που επίσης αναπτύσσονταν ραγδαία), καθώς και μια εκρηκτική βάση δεδομένων μικροαπολιθωμάτων, έδωσαν την ευκαιρία να ενσωματωθούν οι ιδέες των Sloss, Blackwelder και Wheeler σε ένα στρωματογραφικό μοντέλο που έδινε έμφαση στον χρόνο, στις βασικές στρωματογραφικές επιφάνειες, όπως είναι οι ασυμφωνίες, και στα συστήματα απόθεσης για τα οποία η κατανόηση των διαδικασιών απόθεσης είναι το κλειδί (Vail et al., 1977).

Οι Vail et al. (1977) πρότειναν μια ταξινόμηση των ακολουθιών σε τέσσερις «τάξεις» με βάση τη διάρκεια, αλλά στη συνέχεια αποδείχθηκε ότι η ταξινόμηση αυτή δεν υποστηρίζεται από δεδομένα σχετικά με τις διάρκειες των ακολουθιών. Αργότερα, ο Miall (1995) πρότεινε έναν εντελώς διαφορετικό τύπο ταξινόμησης με βάση τις κινητήριες αλλογενείς διεργασίες που δημιουργούν τις ακολουθίες.

Μετά τη δεκαετία του 2000, οι μέθοδοι και οι όροι στην ανάλυση στρωματογραφίας ακολουθιών τυποποιήθηκαν. Οι Catuneanu et al. (2009) όρισαν μια ακολουθία ως «*μία διαδοχή στρωμάτων που αποτίθενται κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου αλλαγών στον διαθέσιμο χώρο ή στην παροχή ιζημάτων*». Αυτός ο ευρύς, αλλά εξελιγμένος ορισμός είναι ανεξάρτητος από τις χρονικές και χωρικές κλίμακες και ισχύει για όλα τα μοντέλα ακολουθίας που είχαν προταθεί προηγουμένως. Παρά την ευρεία αποδοχή του από τους επιστήμονες (π.χ. Catuneanu et al., 2011), ο ορισμός αυτός είχε ένα ήσσονος σημασίας μειονέκτημα, καθώς δεν παρείχε αντικειμενικά κριτήρια για την περιγραφή ακολουθιών από ένα πραγματικό σύνολο δεδομένων. Έτσι, οι Catuneanu και Zecchin (2013) παρουσίασαν έναν αναθεωρημένο ορισμό μιας ακολουθίας ως «*κύκλου αλλαγής στα πρότυπα συσσώρευσης στρωμάτων, που διαιρείται σε υποακολουθίες και οριοθετείται από στρωματογραφικές επιφάνειες ακολουθίας*».

Στην τελική, η Στρωματογραφία Ακολουθιών είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο συσχέτισης τόσο σε τοπική όσο και σε περιφερειακή κλίμακα. Η μέθοδος χρησιμοποιείται πλέον ευρέως ως η σύγχρονη προσέγγιση για την ολοκληρωμένη στρωματογραφική ανάλυση, συγκεντρώνοντας γνώσεις από όλους τους τύπους στρωματογραφίας καθώς και από διάφορους μη στρωματογραφικούς κλάδους. Είναι, ωστόσο, η μόνη στρωματογραφική μέθοδος που δεν διαθέτει τυποποιημένο στρωματογραφικό κώδικα. Έχουν καταβληθεί προσπάθειες τόσο από τη Βορειοαμερικανική Επιτροπή Στρωματογραφικής Ονοματολογίας (NACSN) όσο και από τη Διεθνή Υποεπιτροπή Στρωματογραφικής Ταξινόμησης (ISSC), όσον αφορά την τυποποίηση της μεθόδου της Στρωματογραφίας Ακολουθιών, στον Βορειοαμερικανικό Στρωματογραφικό Κώδικα και στον Διεθνή Στρωματογραφικό Οδηγό αντίστοιχα. Η ομάδα εργασίας της ISSC για τη Στρωματογραφία Ακολουθιών υπέβαλε την τελική της έκθεση το 1999, χωρίς να καταλήξει σε συμφωνία σχετικά με την ονοματολογία και τη

<sup>21</sup> Αμερικανική πολυεθνική εταιρεία πετρελαίου και φυσικού αερίου που εδρεύει στο Ίρβινγκ του Τέξας.

μεθοδολογία της Στρωματογραφίας Ακολουθιών. Ταυτόχρονα, η πολυετής επιτροπή της NACSN για την Αλλοστρωματογραφία και τη Στρωματογραφία Ακολουθιών κατέθεσε τις προσπάθειές της το 2002, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι ήταν πρόωρο να αναγνωριστούν επίσημες στρωματογραφικές μονάδες ακολουθίας στον Κώδικα.

### 10.3 Βασικές αρχές και κύρια συστατικά της Στρωματογραφίας Ακολουθιών

Όπως όλα τα γνωστικά αντικείμενα στις Γεωεπιστήμες, έτσι και η Στρωματογραφία Ακολουθιών βασίζεται στην *Αρχή του Ομοιομορφισμού*. Ο ομοιομορφισμός είναι μια γεωλογική θεωρία που υποστηρίζει ότι τα περισσότερα γεωλογικά φαινόμενα μπορούν να κατανοηθούν μέσω της προσεκτικής παρατήρησης των σύγχρονων διεργασιών και ότι όλες οι γεωλογικές διεργασίες που ήταν ενεργές στο παρελθόν εξακολουθούν να είναι ενεργές και σήμερα. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο συστήματα όπως η υδρόσφαιρα, η γεώσφαιρα και η ατμόσφαιρα αλληλεπίδρασαν στο παρελθόν, παρέχει πολλές πληροφορίες για παρόμοιες διεργασίες που συμβαίνουν σήμερα και οδηγούν στη δημιουργία *προγνωστικών μοντέλων*.

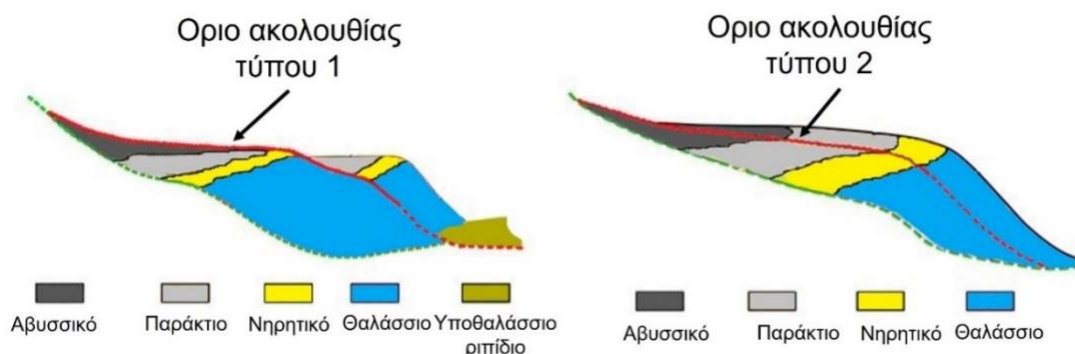
Η Στρωματογραφία Ακολουθιών επικεντρώνεται με μοναδικό τρόπο στην ανάλυση των αλλαγών στις φάσεις και τον γεωμετρικό χαρακτήρα των στρωμάτων και στον προσδιορισμό των βασικών επιφανειών για τον προσδιορισμό της χρονολογικής σειράς της πλήρωσης της λεκάνης και των διαβρωτικών γεγονότων. Ο τρόπος διευθέτησης των στρωμάτων ανταποκρίνεται στην *αλληλεπίδραση των μεταβολών των ρυθμών ιζηματογένεσης και του επιπέδου βάσης* που έχουν ως αποτέλεσμα την *προέλαση* (progradation), την *απόσυρση ή αναδρομή* (retrogradation) και την *προσαύξηση ή επισώρευση* (aggradation) των στρωμάτων. Κάθε πρότυπο συσσώρευσης στρωμάτων ορίζει έναν συγκεκριμένο γενετικό τύπο απόθεσης, με ξεχωριστή γεωμετρία και στυλ διατήρησης των φάσεων. Αυτές οι αποθέσεις είναι περιβαλλοντικά κοινές (δηλαδή μπορούν να βρεθούν σε διάφορα περιβάλλοντα απόθεσης) και μπορεί να περιλαμβάνουν περιοχές με διάφορα συστήματα απόθεσης ισοδύναμης ηλικίας.

Μια ακολουθία *απαρτίζεται* από μικρότερες ενότητες, τις *υποακολουθίες*, οι οποίες σχηματίζονται από μία ή περισσότερες *παρακολουθίες*, οι οποίες, με τη σειρά τους, δημιουργούνται κατά τη διάρκεια λίγων εκατοντάδων χιλιάδων χρόνων και αποτελούν τον «δομικό λίθο» των ακολουθιών. Η διαδοχή των φάσεων μέσα σε μια παρακολουθία ακολουθεί γενικά τον νόμο του Walther, ο οποίος δηλώνει ότι μια κανονική κατακόρυφη διαδοχή φάσεων αντικατοπτρίζει την πλευρική κατανομή των φάσεων σε ένα ιζηματογενές περιβάλλον.

Μια ακολουθία οριοθετείται από *όρια ακολουθίας* (sequence boundaries). Τα όρια ακολουθίας είναι ασυμφωνίες ή οι συσχετιζόμενες με αυτές συμφωνίες, που σχηματίζονται λόγω της πτώσης της στάθμης της θάλασσας. Ένα τυπικό *όριο ακολουθίας* (sequence boundary) είναι μια διαβρωτική επιφάνεια που διαχωρίζει κύκλους απόθεσης.

Ένα όριο ακολουθίας μπορεί να εκφράζεται ως μια ασυμφωνία που δημιουργείται από επιφανειακή έκθεση και διάβρωση η οποία λαμβάνει χώρα σε εκτεταμένες περιοχές τόσο προς την ξηρά όσο και προς τη λεκάνη. Μια τέτοια επιφάνεια ονομάζεται *όριο ακολουθίας τύπου 1* (διαβρωσιγενές) (Εικόνα 10.2).

Σε άλλες περιπτώσεις, τα χαρακτηριστικά ενός ορίου ακολουθίας δεν είναι τόσο ευδιάκριτα και η περιοχή που επηρεάζεται από την έκθεση και την επιφανειακή διάβρωση είναι ελάχιστη. Σε αυτήν την περίπτωση, η προκύπτουσα ασυμφωνία έχει συνήθως περιορισμένη έκταση και η μετατόπιση των φάσεων προς τη λεκάνη είναι μικρή. Πρόκειται για *όριο ακολουθίας τύπου 2* (σύμμορφο).



Εικόνα 10.2 Σχηματική απεικόνιση των δύο τύπων ορίων ακολουθίας.

Σε παλαιότερες δημοσιεύσεις στρωματογραφίας ακολουθιών, οι παγκόσμιοι χάρτες ακολουθιών χαρακτηρίζαν τα μεμονωμένα όρια ακολουθίας είτε ως τύπου 1 είτε ως τύπου 2, συναρτήσει του ρυθμού πτώσης της παγκόσμιας στάθμης της θάλασσας - ωστόσο, σήμερα είναι γενικά αποδεκτό ότι τα όρια ακολουθιών δημιουργούνται πάντα κατά την πτώση της στάθμης της θάλασσας και μπορεί να είναι οποιοδήποτε τύπου ανάλογα με τον χώρο υποδοχής ιζήματος και τους ρυθμούς ιζηματογένεσης (Εικόνα 10.3). Σε γενικές γραμμές, οι ακολουθίες τύπου 1 και 2 διαφέρουν ως προς το τι συμβαίνει στην ακτογραμμή κατά τη διάρκεια μιας ευστατικής πτώσης της στάθμης της θάλασσας.



**Εικόνα 10.3** Όριο ακολουθίας το οποίο διαχωρίζει τα κατώτερα αβαθή ανθρακικά πετρώματα από τις μεγάλου βάθους τουρβιδιτικές αποθέσεις.

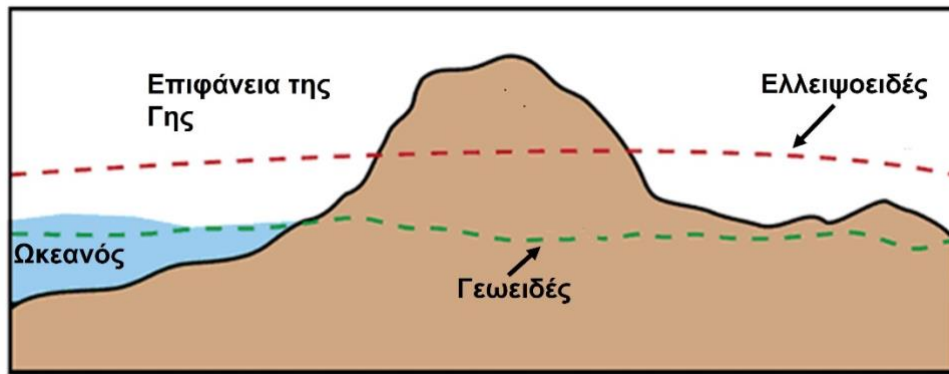
Σε μια ακολουθία τύπου 1, υπάρχει σχετική πτώση της στάθμης της θάλασσας στην ακτογραμμή, επειδή η ευστατική πτώση της στάθμης της θάλασσας είναι ταχύτερη από τον ρυθμό βύθισης στην ακτογραμμή. Εν ολίγοις, η ακτογραμμή έρχεται αντιμέτωπη με την πτώση της στάθμης της θάλασσας σε μια ακολουθία τύπου 1.

Σε μια ακολουθία τύπου 2, ο ρυθμός της ευστατικής πτώσης δεν είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό της καταβύθισης στην ακτογραμμή, με αποτέλεσμα η ακτογραμμή να συνεχίζει να υφίσταται τη σχετική άνοδο της στάθμης της θάλασσας.

#### 10.4 Παράγοντες που επιδρούν στη διαμόρφωση ακολουθιών

Στη μέθοδο της στρωματογραφίας ακολουθιών, τον κύριο και αποφασιστικό ρόλο στη διαμόρφωση μιας ιζηματογενούς ακολουθίας, έχουν οι ευστατικές κινήσεις. Η μεγάλης κλίμακας στρωματογραφική αρχιτεκτονική συσχετίζεται με κύκλους ανόδου και πτώσεις του θαλάσσιου επιπέδου (ευστατικές κινήσεις). Οι κύκλοι αυτοί είναι παγκόσμιας κλίμακας.

Η απόλυτη στάθμη της θάλασσας (ASL), επίσης γνωστή ως ευστατική στάθμη της θάλασσας, είναι το επίπεδο που θα υπήρχε αν όλα τα νερά ήταν απόλυτα ήρεμα και υπό τη δύναμη της βαρύτητας. Αναφέρεται στο ύψος της επιφάνειας του ωκεανού πάνω από το κέντρο της Γης, ανεξάρτητα από το αν η κοντινή ξηρά ανεβαίνει ή κατεβαίνει. Η απόλυτη στάθμη της θάλασσας μετριέται σε σχέση με ένα ελλειψοειδές αναφοράς, το οποίο είναι μια υποθετική σφαίρα μέσα στη Γη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς. Από αυτό μπορεί να προκύψει ένα γεωειδές για τη στάθμη της θάλασσας, το οποίο είναι το επίπεδο στο οποίο θα βρισκόταν μόνο υπό τη δύναμη της βαρύτητας και της περιστροφής της Γης, μείον τις παλιρροϊκές και άλλες βραχυπρόθεσμες μεταβολές (Εικόνα 10.4). Οι μεταβολές της στάθμης της θάλασσας είναι σταδιακές, αλλά επηρεάζονται από παγκόσμια γεγονότα όπως είναι η κλιματική αλλαγή.



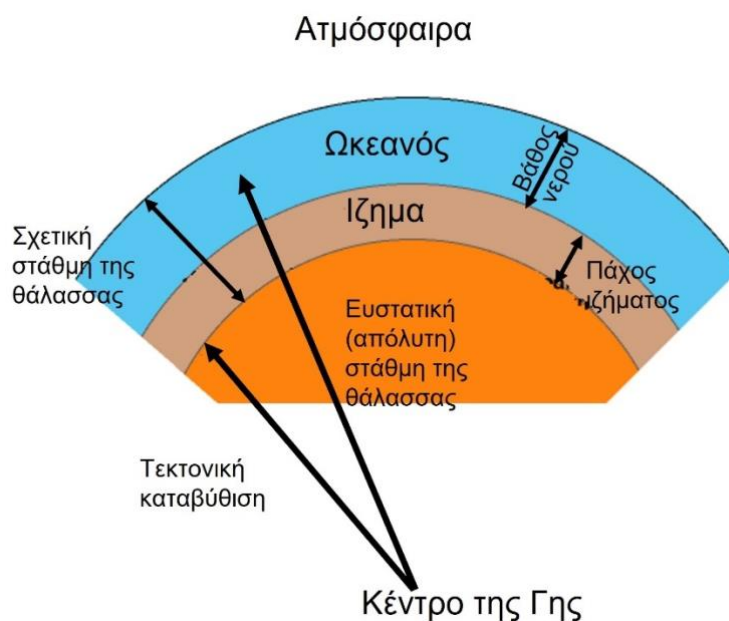
**Εικόνα 10.4** Διατομή της γήινης επιφάνειας όπου απεικονίζονται το γεωειδές μοντέλου και το ελλειψοειδές (πηγή: <https://www.usgs.gov/media/images/geoid-illustration> ).

Η *ευστατική στάθμη της θάλασσας* ορίζεται ως η απόσταση από την επιφάνεια του ωκεανού μέχρι κάποιο σταθερό σημείο αναφοράς, που συνήθως είναι το κέντρο της Γης. Η αλλαγή του όγκου του νερού στον ωκεανό ή του σχήματος των ωκεάνιων λεκανών μπορεί να αλλάξει την ευστατική στάθμη της θάλασσας.

*Τεκτονική καταβύθιση* είναι η προς τα κάτω ή προς τα πάνω κίνηση της λιθόσφαιρας που προκαλείται από τις τεκτονικές πλάκες σε σχέση με ένα σταθερό σημείο αναφοράς, το οποίο είναι συνήθως το κέντρο της Γης. Η τεκτονική καταβύθιση, σε αντίθεση με την ισοστατική εξισορρόπηση της λιθόσφαιρας ως απόκριση στις μεταβολές του βάρους των ιζημάτων και του νερού, αποτελεί κινητήρια δύναμη για τη συσσώρευση ιζημάτων.

Η *σχετική στάθμη της θάλασσας* είναι η διαφορά μεταξύ της ευστατικής στάθμης της θάλασσας και της τεκτονικής καταβύθισης. Μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως η προς τα πάνω ή προς τα κάτω κίνηση της επιφάνειας του ωκεανού σε σχέση με την επιφάνεια του υποβάθρου, δηλαδή τη βάση της στήλης των ιζημάτων και των ιζηματογενών πετρωμάτων που χαρακτηρίζεται ως πάχος ιζήματος. Η σχετική επιφάνεια της θάλασσας ελέγχεται από τις ευστατικές κινήσεις καθώς και από τις τεκτονικές καταβυθίσεις και συχνά ονομάζεται *χώρος υποδοχής*.

Το *βάθος του νερού* είναι η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας του ωκεανού και του πυθμένα του. Μερικές φορές αναφέρεται εσφαλμένα ως σχετικό επίπεδο της θάλασσας ή στάθμη της θάλασσας (Εικόνα 10.5).



**Εικόνα 10.5** Ευστατική και σχετική μέση στάθμη της θάλασσας σε σχέση με το σημείο αναφοράς, το οποίο είναι το κέντρο της Γης (Σχηματικό διάγραμμα, όχι σε κλίμακα).



Οι κατακόρυφες κινήσεις της επιφάνειας της θάλασσας, της επιφάνειας του πυθμένα και του όγκου ιζημάτων διαμορφώνουν τον *χώρο υποδοχής*, ή διαφορετικά, τον *διαθέσιμο χώρο* (accommodation space) των ιζημάτων. Ως χώρος υποδοχής ή διαθέσιμος χώρος ορίζεται ο χώρος που είναι διαθέσιμος για την απόθεση ιζημάτων. Ο συνολικός διαθέσιμος χώρος σε μια λεκάνη είναι ο όγκος κάτω από το βασικό επίπεδο και πάνω από το δάπεδο της λεκάνης που είναι διαθέσιμος για τη συσσώρευση ιζημάτων και μπορεί να αυξάνεται ή να μειώνεται σε παγκόσμια, ή τοπική κλίμακα. Δημιουργείται από την καθίζηση του δαπέδου της λεκάνης. Ανά πάσα στιγμή, ο υπολειπόμενος διαθέσιμος χώρος στη λεκάνη είναι αυτός που δεν έχει ακόμη γεμίσει με ιζήματα και μετριέται με το βάθος νερού (ο χώρος μεταξύ της στάθμης της θάλασσας και της διεπαφής ιζήματος-νερού). Η συσσώρευση των ιζημάτων στον διαθέσιμο, κάθε φορά, χώρο απόθεσης (accommodation space) επηρεάζεται από την *αλλαγή στον ρυθμό ιζηματογένεσης*, την *αλλαγή της ευστατικής στάθμης της θάλασσας* (απόσυρση, επίκλυση) και την *τεκτονική βύθιση ή ανύψωση* της λεκάνης.

Για τον υπολογισμό του διαθέσιμου χώρου σε μια ιζηματογενή λεκάνη, χρησιμοποιείται η εξίσωση:  $T+E=S+W$ , όπου  $T$  = Ρυθμός τεκτονικής καθίζησης ή βύθισης της λεκάνης,  $E$  = Ρυθμός ευστατικής ή παγκόσμιας μεταβολής της στάθμης της θάλασσας, σε σχέση με ένα ελλειψοειδές αναφοράς,  $S$  = Ρυθμός ιζηματογένεσης/συσσώρευσης στη λεκάνη,  $W$  = Ρυθμός μεταβολής του βάθους του νερού εντός της λεκάνης. Η εξίσωση αυτή αντιπροσωπεύει ένα απλό ισοζύγιο. Εάν η αριστερή πλευρά της εξίσωσης είναι θετική, τότε υπάρχει αυξανόμενος διαθέσιμος χώρος στη λεκάνη και, εάν είναι αρνητική, μειούμενος χώρος. Στη δεξιά πλευρά, αν ο αριθμός είναι θετικός, τότε υπάρχει αυξανόμενη ιζηματογένεση και αρνητικός αν είναι μειούμενη. Έτσι, αν οι αριθμοί και στις δύο πλευρές της εξίσωσης είναι και οι δύο θετικοί, τότε τόσο ο χώρος όσο και η καθίζηση ( $S$ ) αυξάνονται. Αν η αριστερή πλευρά είναι αρνητική και η δεξιά θετική, τότε μπορούμε να προβλέψουμε ότι η λεκάνη θα γεμίζει με την πάροδο του χρόνου μέχρι να μην είναι δυνατή πλέον η καθίζηση.

Η εξίσωση αυτή συνιστά προσέγγιση, διότι δεν λαμβάνει υπόψη δευτερογενείς επιδράσεις. Οι αυξήσεις στο πάχος των ιζημάτων ή στο βάθος του νερού, για παράδειγμα, προκαλούν ισοστατική καταβύθιση της λιθόσφαιρας, με αποτέλεσμα να δημιουργείται πρόσθετος χώρος. Οι αυξήσεις στο πάχος των ιζημάτων προκαλούν συμπίεση των υποκείμενων ιζημάτων, δημιουργώντας επιπλέον χώρο.

Η επίλυση αυτής της εξίσωσης τις περισσότερες φορές είναι δύσκολη. Ορισμένοι από τους όρους είναι εύκολο να ποσοτικοποιηθούν, όπως το πάχος των ιζημάτων με την πραγματοποίηση μετρήσεων σε μια λιθωματογραφική τομή ή το βάθος του νερού με την πάροδο του χρόνου μέσω της ανάλυσης των φάσεων. Οι ρυθμοί της ευστατικής μεταβολής της στάθμης της θάλασσας και της τεκτονικής καταβύθισης είναι πολύ πιο δύσκολο να υπολογιστούν, καθώς οι επιπτώσεις τους δεν μπορούν να διακριθούν σε μια μεμονωμένη στρωματογραφική στήλη. Με άλλα λόγια, δεν υπάρχει μοναδική λύση σε αυτή την εξίσωση για μια μόνο στρωματογραφική στήλη και χωρίς περιφερειακό έλεγχο ή εξωτερικές πληροφορίες, είναι αδύνατο να αποδοθούν αλλαγές στο βάθος του νερού ή στην ιζηματογένεση, στον ευστατισμό ή στην τεκτονική. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι μεταβολές στο πάχος των ιζημάτων και στο βάθος του νερού θα χρησιμοποιηθούν για να προσδιοριστεί ο τρόπος με τον οποίο ο χώρος υποδοχής έχει μεταβληθεί με την πάροδο του χρόνου.

## 10.5 Ιεραρχία ακολουθίας

Η ιδέα στην οποία στηρίζεται η στρωματογραφία ακολουθιών είναι απλή: οι ιζηματογενείς αποθέσεις μιας λεκάνης μπορούν να διαιρεθούν σε ενότητες που οριοθετούνται από ασυμφωνίες και ονομάζονται στρωματογραφικές ακολουθίες. Οι στρωματογραφικές ακολουθίες επικάθονται η μια πάνω στην άλλη. Μέσα σε χρονικό διάστημα μιας *μεγα-ακολουθίας 1ης τάξης*, θα εμφανιστεί ένας αριθμός *υπερακολουθιών 2ης τάξης*. Εντός μιας υπερακολουθίας, εμφανίζεται ένας αριθμός μικρότερων ακολουθιών, και ούτω καθεξής. Κάθε ένα από αυτά τα διαφορετικά πακέτα, γενετικά συνδεδεμένων, στρωμάτων οριοθετείται από ασυμφωνίες, που δημιουργούνται από διαβρωτικές πλημμυρικές επιφάνειες (επικλύσεις), οι οποίες μπορούν να ανιχνευτούν σε μεγάλες αποστάσεις. Τα στρώματα είναι γενετικά συσχετιζόμενα εάν όλες οι φάσεις εντός της ακολουθίας έχουν αποθεθεί σε πλευρική συνέχεια μεταξύ τους, σύμφωνα με τον νόμο του Walther. Οι επιφάνειες πλημμύρας είναι έντονες επαφές που διαχωρίζουν τις υποκείμενες φάσεις ρηχότερων υδάτων από τις υπερκείμενες φάσεις βαθύτερων υδάτων.

Τα αίτια των ακολουθιών διαφόρων ιεραρχικών επιπέδων αποτελούν αντικείμενο συζήτησης. Είναι γνωστό ότι οι *μεγαακολουθίες 1ης τάξης* αντικατοπτρίζουν παγκόσμια φαινόμενα, όπως ο σχηματισμός και η διάσπαση των υπερηπείρων. Οι *υπερακολουθίες 2ης τάξης* πιστεύεται ότι είναι πιο περιφερειακές σε έκταση και πάλι καθοδηγούνται από την τεκτονική, αλλά αυτή τη φορά μέσα σε μια ωκεάνια λεκάνη. Κατά τη διάρκεια του Παλαιοζωικού, αναπτύχθηκε μια παγκόσμια *μεγαακολουθία*, εντός της οποίας αναπτύχθηκαν τέσσερις



υπερακολουθίες 2ης τάξης. Καθεμία από αυτές τις υπερακολουθίες φέρει ενδείξεις για μικρότερες, 3ης τάξης ακολουθίες, εντός αυτών, 4ης τάξης, και εντός αυτών, 5ης τάξης. Μέχρι το επίπεδο μιας ακολουθίας 5ης τάξης, τα δεδομένα βρίσκονται εξ ολοκλήρου σε έναν ενιαίο στρωματογραφικό σχηματισμό. Οι βραχύτερες ακολουθίες, 4ης και 5ης τάξης, μπορεί να οφείλονται σε διάφορους παράγοντες, με τις μεταβολές των τροχιακών παραμέτρων του Milankovitch να είναι πιο πιθανές (Εικόνα 10.6).

#### ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ ΚΑΙ ΟΙ ΑΙΤΙΕΣ ΤΟΥΣ Vail et al. (1977)

Τύπος	Διάρκεια (m.y.)	Πιθανές αιτίες
1 <sup>ης</sup> τάξεως	200 - 400 (10 <sup>8</sup> )	Μεγάλης κλίμακας ευστατικοί κύκλοι που προκλήθηκαν από τον σχηματισμό και τη διάρρηξη των υπερ-ηπείρων.
2 <sup>ης</sup> τάξεως	10 - 100 (10 <sup>7</sup> )	Ευστατικοί κύκλοι που προκλήθηκαν από μεταβολές όγκου, σε παγκόσμια μεσο-ωκεάνια κέντρα εξάπλωσης.
3 <sup>ης</sup> τάξεως	1 - 10 (10 <sup>6</sup> )	Περιφερειακοί κύκλοι που προκλήθηκαν από συμπίεσεις εντός των πλακών. Οι περισσότεροι δεν είναι παγκόσμιας έκτασης.
4 <sup>ης</sup> τάξεως	0,2 - 0,5 (10 <sup>5</sup> )	1) Milankovitch παγετο-ευστατικοί κύκλοι 2) Περιφερειακοί κύκλοι από κάμψη λόγω φόρτωσης
5 <sup>ης</sup> τάξεως	0,01 - 0,2 (10 <sup>4</sup> )	1) Milankovitch παγετο-ευστατικοί κύκλοι 2) Περιφερειακοί κύκλοι από κάμψη λόγω φόρτωσης

**Εικόνα 10.6** Ταξινόμηση των στρωματογραφικών κύκλων με αναφορές στους υπευθύνους για τη δημιουργία τους μηχανισμούς.

Ακολουθίες οποιασδήποτε τάξης, οι οποίες σχηματίζονται κατά τη διάρκεια ενός μόνον κύκλου μεταβολής της στάθμης της θάλασσας, δηλαδή σχετικής πτώσης της στάθμης της θάλασσας, ανόδου και επακόλουθης πτώσης σε χρονικό πλαίσιο μεταξύ 1 έως 10 my (κύκλοι τρίτης τάξης σχετικής αλλαγής της στάθμης της θάλασσας), μπορούν να συσχετιστούν διαχρονικά και να μελετηθούν.

Μια ακολουθία αποτελείται από τέσσερα υποσυστήματα – υποακολουθίες (*systems tracts*), τα οποία απαντώνται με συγκεκριμένη σειρά: υποακολουθίες πτωτικής στάθμης της θάλασσας και σχηματισμού ορίων ακολουθίας (Falling Stage Systems Tract and Sequence Boundary Formation-FSST), υποακολουθίες χαμηλής στάθμης (lowstand system tracts-LST), επικλυσιογενείς υποακολουθίες (transgressive system tracts-TST) και υποακολουθίες υψηλής στάθμης (highstand system tracts-HST). Αυτά τα συστήματα συνδέονται άμεσα με τη συμπεριφορά της σχετικής στάθμης του νερού εντός της λεκάνης. Οι υποακολουθίες είναι υποδιαιρέσεις ακολουθιών που αποτελούνται από διακριτό σύνολο ιζηματογενών, αποθετικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών που διαφέρουν από τις παρακείμενες υποακολουθίες, και έχουν ευδιάκριτα όρια στα σεισμικά δεδομένα. Διαφορετικές υποακολουθίες θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν διαφορετικές φάσεις των ευστατικών αλλαγών της θάλασσας.

Η τοποθέτηση ενός συγκεκριμένου συνόλου στρωμάτων σε ένα συγκεκριμένο σύστημα γίνεται με τη χρήση χρονοστρωματογραφικών και λιθostrωματογραφικών εργαλείων. Γενικά, οι υποακολουθίες αποτελούνται από όλα τα ιζήματα που συσσωρεύονται κατά τη διάρκεια ενός κύκλου στάθμης της θάλασσας και, στο μέτρο του δυνατού, οριοθετούνται από χρονοστρωματογραφικούς δείκτες ή παγκόσμιες στρωματογραφικές τομές και σημεία (GSSP).

### 10.5.1 Υποακολουθία πτωτικής στάθμης της θάλασσας και σχηματισμού ορίων ακολουθίας (Falling Stage Systems Tract and Sequence Boundary Formation-FSST)

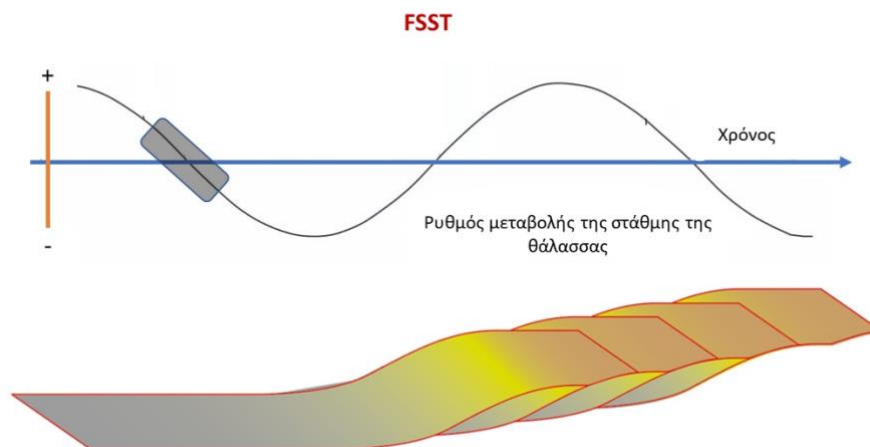
Το σύστημα αυτό αναφέρεται σε όλες τις αποσυρσιγενείς (υποχωρούμενες) αποθέσεις που συσσωρεύτηκαν μετά την έναρξη της σχετικής πτώσης της στάθμης της θάλασσας και πριν από την έναρξη της επόμενης σχετικής ανόδου της στάθμης της θάλασσας.

Η υποακολουθία πτωτικής στάθμης της θάλασσας (Εικόνα 10.7) είναι το προϊόν μιας εξαναγκασμένης απόσυρσης της στάθμης της θάλασσας και βρίσκεται ακριβώς στο όριο της ακολουθίας και καλύπτεται από τα υπερκείμενα ιζήματα της επόμενης υποακολουθίας χαμηλής στάθμης.

Αυτή η υποακολουθία χαρακτηρίζεται από μια ποικιλία προτύπων συσσώρευσης παρακολουθιών, συμπεριλαμβανομένων: κλινομορφές που εξελίσσονται προς τα κάτω, αλυσιδωτές παρακολουθίες και αποθέσεις ροών μάζας σε απομακρυσμένες περιοχές. Καθένα από αυτά τα πρότυπα συσσώρευσης παρακολουθιών εξαρτάται από το μοντέλο απόθεσης, τον ρυθμό παροχής ιζημάτων και τον ρυθμό της σχετικής πτώσης της στάθμης της θάλασσας.

Το FSST ορίστηκε και περιγράφηκε για πρώτη φορά πλήρως από τους Plint και Nummedal (2000). Η υποακολουθία αυτή ονομάζεται επίσης *υποσύστημα πρώιμης χαμηλής στάθμης* (early lowstand systems tract - ELST) (Posamentier and Allen, 1999).

Παλαιότερες μελέτες που αφορούσαν τα υποσυστήματα και τα χαρακτηριστικά τους, συμπεριλαμβανομένων των Vail (1987) και Posamentier και Vail (1988), τοποθετούσαν μέρος του FSST στο υποσύστημα χαμηλής στάθμης (LST) το οποίο περιλάμβανε τις αποθέσεις που συσσωρεύονταν αμέσως μετά τον μέγιστο ρυθμό σχετικής πτώσης της στάθμης της θάλασσας και χωρίζονταν σε τρεις ξεχωριστές αποθετικές μονάδες - ριπίδια του πυθμένα της λεκάνης, ριπίδια κλιτύος και σφηνοειδείς αποθέσεις χαμηλής στάθμης, οι οποίες υπέρκεινται του λεγόμενου ορίου ακολουθίας τύπου 1.



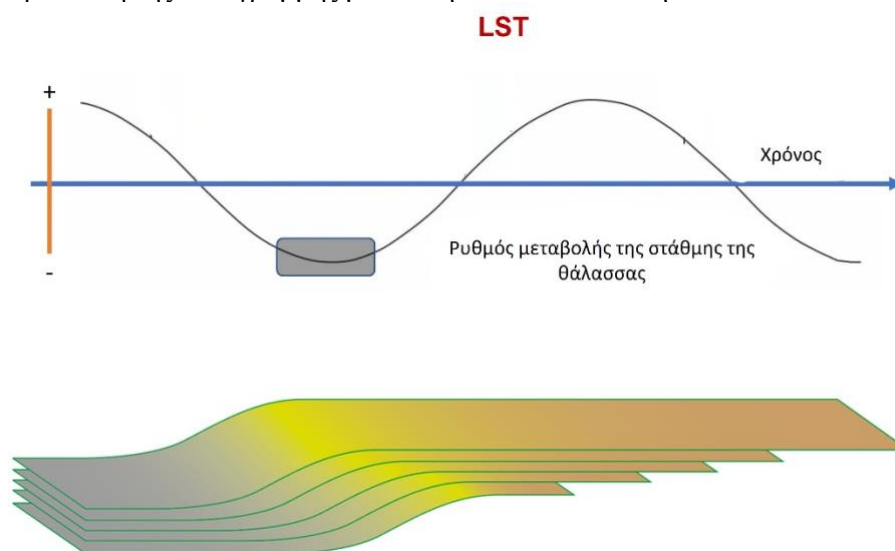
**Εικόνα 10.7** Υποακολουθία πτωτικής στάθμης της θάλασσας και σχηματισμού ορίων ακολουθίας (Falling Stage Systems Tract and Sequence Boundary Formation-FSST).

### 10.5.2 Υποακολουθία χαμηλής στάθμης (Lowstand Systems Tracts-LST)

Η υποακολουθία χαμηλής στάθμης (Lowstand Systems Tracts) (Εικόνα 10.8) περιλαμβάνει τις αποθέσεις που συσσωρεύονται όταν η στάθμη της θάλασσας βρίσκεται στο χαμηλότερό της επίπεδο μέσα στη λεκάνη καθώς και κατά την έναρξη της ανόδου της σχετικής στάθμης της θάλασσας. Σε αυτό το σημείο του κύκλου της στάθμης της θάλασσας, η κύρια διαδικασία είναι η *υψηλού ρυθμού ιζηματογένεση*. Κύριο χαρακτηριστικό αυτού του συστήματος είναι τα μεγάλα πάχους ιζήματα που αποτίθενται στο κέντρο της λεκάνης, οι αποθέσεις βαθέων υδάτων, όπως οι τουρβιδίτες, καθώς και η προέλαση της ακτογραμμής η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του διαθέσιμου χώρου. Η φάση αυτή οριοθετείται στο κάτω μέρος της από το όριο της ακολουθίας, που είναι πάντοτε μια διαβρωσιγενής ασυμφωνία που ακολουθεί την προηγούμενη υποακολουθία πτωτικής στάθμης και καλύπτεται από την επικλυσιογενή επιφάνεια (transgressive surface – TS) η οποία είναι η πρώτη σημαντική θαλάσσια πλημμυρική επιφάνεια σε μια ακολουθία. Η *επικλυσιογενής επιφάνεια - TS*, στις περισσότερες πυριτοκλαστικές και ορισμένες ανθρακικές ακολουθίες, σηματοδοτεί την έναρξη της περιόδου

κατά την οποία ο ρυθμός της δημιουργίας του χώρου υποδοχής είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό παροχής ιζημάτων.

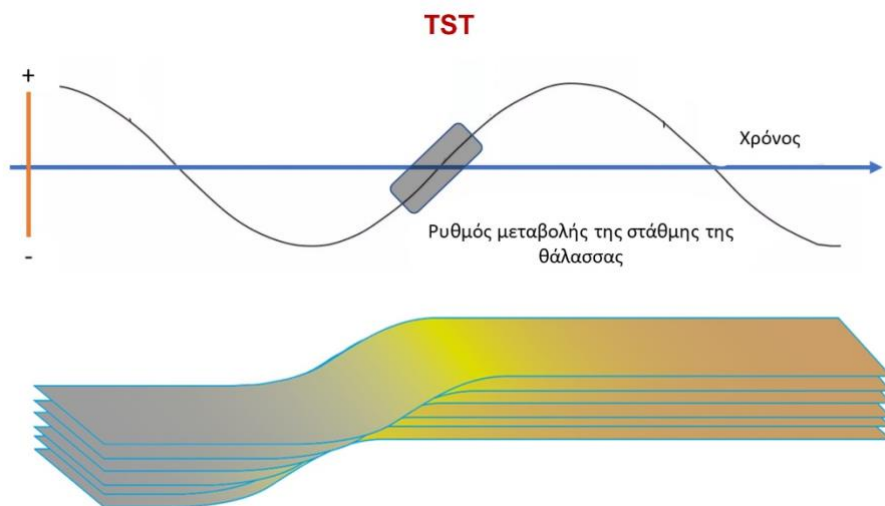
Η υποακολουθία χαμηλής στάθμης περιλαμβάνει τέσσερα στάδια απόθεσης που εναποτίθενται κατά τη διάρκεια περιόδων ταχείας πτώσης της σχετικής στάθμης της θάλασσας (ταχεία μείωση του διαθέσιμου χώρου), υποθαλάσσια διάβρωση, επακόλουθη χαμηλή στάση και αργή άνοδος της στάθμης της θάλασσας (αργή αύξηση του διαθέσιμου χώρου). Κατά τη διάρκεια και των τεσσάρων αυτών σταδίων, ο ρυθμός παροχής ιζήματος είναι επαρκής για την προέλαση της ακτογραμμής μέσα στη θαλάσσια λεκάνη.



### 10.5.3 Επικλυσιογενής υποακολουθία (Transgressive systems tracts-TST)

Η επικλυσιογενής υποακολουθία (Transgressive systems tracts) (Εικόνα 10.9) αποτίθεται κατά τη διάρκεια της ταχέως ανερχόμενης σχετικής στάθμης της θάλασσας (ταχεία αύξηση του διαθέσιμου χώρου) που ακολουθεί την απόθεση της υποακολουθίας χαμηλής στάθμης. Καθώς η στάθμη της θάλασσας ανεβαίνει, παρατηρείται υποχώρηση της ακτογραμμής και άνοδος της στάθμης της θάλασσας. Η επικλυσιογενής υποακολουθία βρίσκεται ακριβώς πάνω στην επικλυσιογενή επιφάνεια (TS) που σχηματίζεται όταν τα ιζήματα επικαλύπτουν την υποκείμενη υποακολουθία χαμηλής στάθμης (LST) και επικαλύπτεται από τη μέγιστη επιφάνεια πλημμύρας (mfs) που σχηματίζεται όταν τα θαλάσσια ιζήματα φθάνουν στην πιο χερσαία θέση τους.

Οι ρυθμοί ιζηματογένεσης κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης είναι μεγαλύτεροι γύρω από το περιθώριο της λεκάνης και μικρότεροι στο κέντρο της. Τελικά, στο κέντρο της λεκάνης θα παρατηρηθεί σημαντική πτώση της ιζηματογένεσης και οι παράκτιες περιοχές θα παρουσιάσουν ενδείξεις παλιρροιακής επιρροής. Τέτοιες ενδείξεις μπορεί να περιλαμβάνουν την ανάπτυξη στρωματόλιθων ή διαδοχικές αποθέσεις αργίλου πάνω σε εξατμιζόμενες μικρές αλυκές. Με λίγα λόγια, ο ρυθμός με τον οποίο δημιουργούνται νέοι διαθέσιμοι χώροι υπερβαίνει τον ρυθμό συσσώρευσης ιζημάτων με αποτέλεσμα την επίκλυση της θάλασσας. Συνήθως, η έναρξη της επίκλυσης είναι απότομη και μια βασική επικλυσιογενής επιφάνεια διαχωρίζει την υποακολουθία χαμηλής στάθμης από την επικλυσιογενή υποακολουθία.

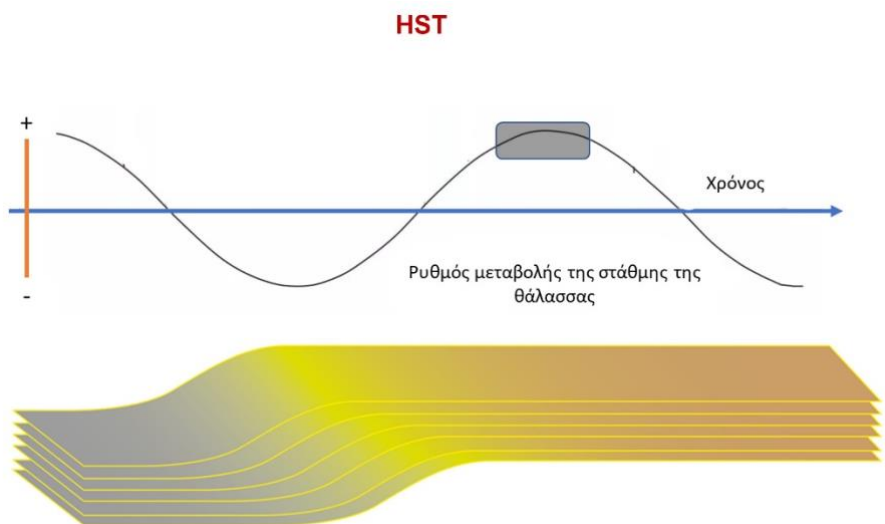


Εικόνα 10.9 Επικλυσιγενής υποακολουθία (Transgressive systems tracts).

### 10.5.4 Υποακολουθία υψηλής στάθμης (Highstand systems tracts – HST)

Η υποακολουθία υψηλής στάθμης (Highstand systems tracts) (Εικόνα 10.10) αποτελεί την ανώτερη υποακολουθία μιας στρωματογραφικής ακολουθίας και βρίσκεται ακριβώς πάνω από τη μέγιστη επιφάνεια πλημμύρας (*mfs*) που σχηματίζεται όταν τα θαλάσσια ιζήματα φτάνουν στην πιο χερσαία θέση τους και καλύπτεται από το ανώτερο όριο της ακολουθίας.

Κατά τη δημιουργία της υποακολουθίας υψηλής στάθμης, ο ρυθμός παροχής ιζημάτων υπερβαίνει το ρυθμό αύξησης του χώρου υποδοχής, με αποτέλεσμα να διαμορφώνεται και πάλι ένα σύστημα προέλασης προς το κέντρο της λεκάνης. Μόλις αρχίσει πάλι η πτώση της στάθμης της θάλασσας, αρχίζει και πάλι η διάβρωση, και ένα νέο όριο ακολουθίας θα σχηματιστεί κατά τη διάρκεια της σταδίου πτώσης. Το τέλος ενός κύκλου της στάθμης της θάλασσας συμπίπτει με την έναρξη και πάλι της υποακολουθίας πτώσης και χαμηλής στάθμης.



Εικόνα 10.10 Υποακολουθία υψηλής στάθμης (Highstand systems tracts - HST).

### 10.5.5 Παρακολουθία

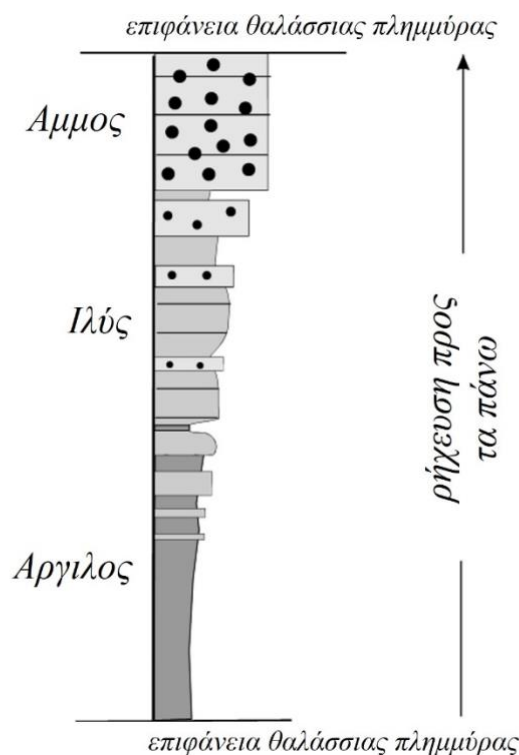
Η παρακολουθία είναι η βασική μονάδα της Στρωματογραφίας Ακολουθιών. Πρόκειται για μια σύμφωνη ακολουθία ιζηματογενών πετρωμάτων η οποία τυπικά αντιπροσωπεύει έναν κύκλο σχετικής ανόδου και πτώσης της στάθμης της θάλασσας σε χρονικό πλαίσιο μεταξύ 0,1 έως 1 my (κύκλοι τέταρτης ή πέμπτης («ανώτερης»))

τάξης της μεταβολής της σχετικής στάθμης της θάλασσας ή μεταβολές στην εισροή ιζημάτων λόγω αυτοκυκλικών διεργασιών), που οριοθετείται από επιφάνειες θαλάσσιας πλημμύρας.

Η παρακολουθία ορίζεται ως μια σχετικά σύμφωνη διαδοχή<sup>22</sup> γενετικά συγγενών στρωμάτων<sup>23</sup> ή συνόλων στρωμάτων που οριοθετούνται από επιφάνειες θαλάσσιας πλημμύρας και τις αντίστοιχες επιφάνειές τους. Οι επιφάνειες πλημμύρας που οριοθετούν τις παρακολουθίες είναι το κρίσιμο στοιχείο του ορισμού τους: οι επιφάνειες πλημμύρας είναι απότομες επαφές που διαχωρίζουν τις υποκείμενες φάσεις ρηχότερων υδάτων από τις υπερκείμενες φάσεις βαθύτερων υδάτων. Πρόκειται για λιθολογική επαφή που σηματοδοτεί μια απότομη μετάβαση από τις εγγύτερες φάσεις (κάτω) στις απώτερες φάσεις (πάνω) και ενδεχομένως να συνδέονται με τις διακυμάνσεις των παγετώνων που καθοδηγούνται από εξωτερικούς κύκλους Milankovich, αλλά θα μπορούσαν επίσης να αντανakλούν τεκτονική υποβύθιση ή αυτοκυκλικές διαδικασίες. Χαρακτηρίζονται από μη απόθεση ή μικρή διάβρωση καθώς και από την παρουσία σημαντικών ιχνοαπολιθωμάτων με τη μορφή λαγουμιών (burrows) από οργανισμούς, την απόθεση χονδρόκοκκου υλικού, όπως κελύφη, χάλικες, αυτογενή ορυκτά που σχηματίζονται από τη διάβρωση και την απομάκρυνση υλικού κατά τη διάρκεια της πλημμύρας.

Η παρακολουθία είναι μια έννοια που αφορά παράκτιες και αβαθείς περιοχές όπου μπορούν να δημιουργηθούν πλημμυρικά φαινόμενα. Αντιπροσωπεύει ένα μοναδικό επεισόδιο προέλασης ιζήματος (μετακίνηση της ακτογραμμής προς τη θάλασσα), η οποία τυπικά διαρκεί δεκάδες έως εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια.

Οι περισσότερες παρακολουθίες είναι ασύμμετροι ιζηματογενείς κύκλοι που υποδεικνύουν ρήγερση προς τα πάνω (Εικόνα 10.11). Επιπλέον, οι περισσότερες παρακολουθίες τείνουν να έχουν πάχος από λίγα μέτρα έως μερικές δεκάδες μέτρα. Υπάρχουν, όμως, πολλές εξαιρέσεις και στις δύο αυτές περιπτώσεις.



**Εικόνα 10.11** Βασική μονάδα της Στρωματογραφίας Ιζηματογενών Ακολουθιών είναι η παρακολουθία η οποία οριοθετείται από επιφάνειες θαλάσσιας πλημμύρας, και υποδεικνύει ρήγερση προς τα πάνω.

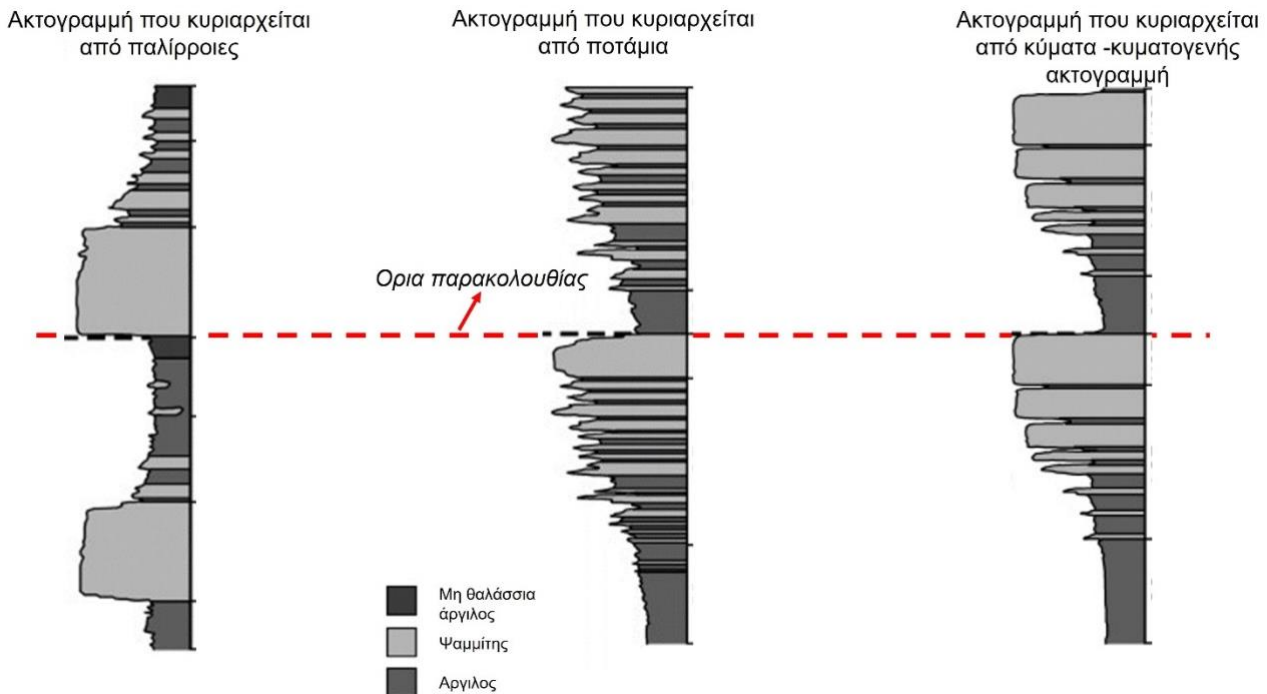
Σε αβαθή θαλάσσια περιβάλλοντα ιζηματογένεσης, οι παρακολουθίες συνήθως γίνονται αδρομερέστερες προς τα πάνω με αύξηση της περιεκτικότητας σε άμμο και γενική αύξηση στο πάχος των στρωμάτων άμμου. Σε

<sup>22</sup> «Σχετικά σύμφωνη» σημαίνει ότι αν και μια παρακολουθία μπορεί να περιέχει σύντομες διακοπές στην απόθεση (διάστημα), δεν περιέχει σημαντικές περιόδους διάβρωσης ή μη απόθεσης.

<sup>23</sup> «Γενετικά συγγενής» σημαίνει ότι όλες οι φάσεις μέσα σε μια παρακολουθία αποτέθηκαν σε πλευρική συνέχεια μεταξύ τους, δηλαδή ισχύει ο νόμος του Walther.



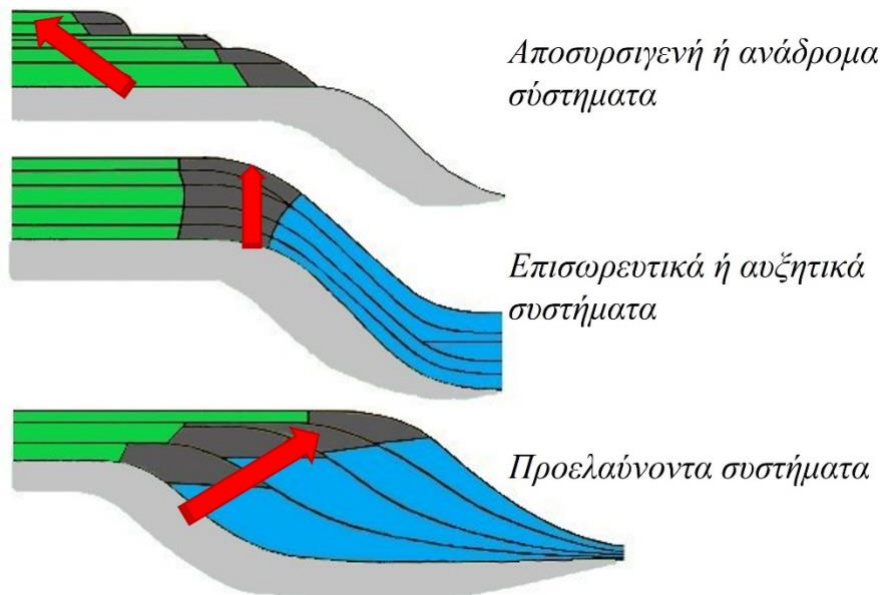
ορισμένες περιπτώσεις, μπορούν να αναγνωριστούν παρακολουθίες οι οποίες γίνονται λεπτομερέστερες όσον αφορά το μέγεθος του κόκκου προς τα πάνω. Για παράδειγμα, σε περιθωριακά-θαλάσσια περιβάλλοντα, η βάση της παρακολουθίας χαρακτηρίζεται από την απότομη εμφάνιση θαλάσσιας άμμου πάνω από θαλάσσιες αργίλους, πάνω από την οποία το ποσοστό άμμου μειώνεται και οι στρώσεις άμμου γίνονται πιο λεπτές. Αυτό το μοντέλο φάσεων είναι συχνό σε υποπαλιρροιακά - μεσοπαλιρροιακά έως υπερπαλιρροιακά περιβάλλοντα (Εικόνα 10.12).



**Εικόνα 10.12** Διαφορετικά μοντέλα παρακολουθίας ανάλογα με το ενεργειακό καθεστώς.

Η σχέση μεταξύ της δημιουργίας διαθέσιμου χώρου ( $A$ ) και του ρυθμού ιζηματογένεσης ( $S$ ) καθορίζει τον τρόπο διεύθυνσης των παρακολουθιών. Έτσι λοιπόν, ανάλογα με το ποια είναι η σχέση του ρυθμού παροχής ιζήματος και του ρυθμού δημιουργίας διαθέσιμου χώρου, οι παρακολουθίες μπορεί να δημιουργούν (Εικόνα 10.13):

1. *Προελαύνοντα συστήματα*: όταν ο ρυθμός παροχής ιζήματος ξεπερνά τον ρυθμό δημιουργίας διαθέσιμου χώρου ( $S > A$ ) και τα ιζήματα προωθούνται πλευρικά στη λεκάνη. Ο όρος *απόσυρση* εδώ θα χρησιμοποιηθεί μόνο για να αναφερθούμε ειδικά στη μετατόπιση της ακτογραμμής προς τη λεκάνη. Αυτή η απόσυρση δεν οφείλεται στην ταπείνωση της θαλάσσιας στάθμης.
2. *Επισωρευτικά ή αυξητικά συστήματα* όταν ο ρυθμός παροχής ιζήματος είναι περίπου ίσος με τον ρυθμό δημιουργίας διαθέσιμου χώρου ( $S = A$ ). Τα ιζήματα επομένως παρουσιάζουν κατακόρυφη επισώρευση και δεν υπάρχει μετανάστευση ούτε προς την ξηρά ούτε προς τη λεκάνη.
3. *Αποσυρσιγενή ή ανάδρομα συστήματα* όπου ο ρυθμός παροχής ιζήματος είναι μικρότερος από τον ρυθμό δημιουργίας διαθέσιμου χώρου ( $S < A$ ). Τα ιζήματα επομένως μεταναστεύουν προς την ξηρά. Ο όρος *επίκλυση* χρησιμοποιείται εδώ μόνο για να αναφερθούμε στη μετατόπιση της ακτογραμμής προς την ξηρά, που δεν γίνεται όμως εξαιτίας ανύψωσης της θαλάσσιας στάθμης.



**Εικόνα 10.13** Τρόπος διεύθησης των παρακολουθιών, ανάλογα με το ποια είναι η σχέση του ρυθμού παροχής ιζήματος και του ρυθμού δημιουργίας διαθέσιμου χώρου.

## 10.6 Εφαρμογή

Η εφαρμογή της στρωματογραφίας ακολουθιών συνήθως προκύπτει από τις ερμηνείες της μικρότερης κλίμακας αποθέσεων προς τις μεγαλύτερες. Η *ερμηνεία των επιμέρους στρωμάτων* όσον αφορά τις συνθήκες απόθεσης είναι το πρώτο βήμα αυτής της προσέγγισης, η οποία περιλαμβάνει την αξιολόγηση της τεκτονικής δραστηριότητας στο περιβάλλον, τον τύπο των ρευμάτων μεταφοράς (ρεύματα, κύματα, παλίρροιες, συνδυασμένη ροή), τη βιολογική επιβάρυνση και τα ιχνοαπολιθώματα κ.λπ. Αυτές οι πληροφορίες είναι κρίσιμες για το επόμενο βήμα, την *αναγνώριση των συνόλων στρωμάτων*, δηλαδή ομάδων στρωμάτων που αποτυπώνουν παρόμοιες συνθήκες απόθεσης, και την ερμηνεία αυτών των συνόλων στρωμάτων ως φάσεις που παραπέμπουν σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα απόθεσης. Τα βήματα αυτά είναι ζωτικής σημασίας, δεδομένου ότι τα σφάλματα σε αυτό το στάδιο οδηγούν συχνά σε σφάλματα στην ερμηνεία του σχετικού βάθους, γεγονός που επηρεάζει τον εντοπισμό των παρακολουθιών και των μορφών συσσώρευσης. Η σοβαρή ανάλυση των φάσεων είναι απαραίτητη για μια σωστή και καλά τεκμηριωμένη στρωματογραφία ακολουθιών.

Από την κατακόρυφη αλληλουχία των στρωμάτων θα πρέπει να προσδιοριστούν τα όρια των στρωμάτων τα οποία μπορεί να είναι διαβαθμισμένα ή απότομα. Τα διαβαθμισμένα όρια υποδηλώνουν γενικά μια επαφή που παραπέμπει στον νόμο του Walther, όπου τα γειτονικά σύνολα στρωμάτων αποτέθηκαν σε πλευρικά γειτονικά περιβάλλοντα. Τα απότομα όρια συνόλων στρωμάτων θα πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά για να διαπιστωθεί αν πρόκειται για επιφάνειες πλημμύρας (φάσεις βαθύτερων υδάτων που υπερκαλύπτουν απότομα φάσεις ρηχών υδάτων) ή για πιθανές επιφάνειες απότομης απόσυρσης (φάσεις ρηχών υδάτων που υπερκαλύπτουν απότομα φάσεις βαθύτερων υδάτων). Στη συνέχεια, οι επιφάνειες πλημμύρας χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των παρακολουθιών μεταξύ τους, ενώ οι επιφάνειες βεβιασμένης απόσυρσης χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των ακολουθιών υψηλής συχνότητας.

Τα πιθανά όρια της ακολουθίας θα πρέπει να προσδιορίζονται με την αναγνώριση των επιφανειακών ασυμφωνιών. Συχνά, οι επιφανειακές ασυμφωνίες επικαλύπτονται από μια συστάδα χονδρόκοκκων πυριτικοκλαστικών χαλικιών.

Από την αναγνώριση των συνόλων παρακολουθιών και των επιφανειακών ασυμφωνιών, μπορούν να αναγνωριστούν οι υποακολουθίες (LST, TST, HST, FSST) με βάση το πρότυπο συσσώρευσης και τη θέση τους μέσα σε μια ακολουθία. Επιπλέον, μπορούν επίσης να προσδιοριστούν οι κύριες στρωματογραφικές επιφάνειες, και συγκεκριμένα το όριο της ακολουθίας, η επικλυσιογενής επιφάνεια, η επιφάνεια μέγιστης πλημμύρας.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι όλες αυτές οι επιφάνειες ή υποακολουθίες δεν μπορούν να εμφανιστούν με την ίδια σειρά σε μια εμφάνιση. Η έλλειψη μίας ή περισσότερων επιφανειών ή συστημάτων μπορεί να παρέχει σημαντικές ενδείξεις για τη σχετική θέση της απόθεσης εντός της λεκάνης.

## Βιβλιογραφία/Αναφορές

### Ξενόγλωσση

- Barrell, J. (1917). Rhythms and the measurement of geologic time. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 28, pp. 745-904.
- Blackwelder, E. (1909). The valuation of unconformities. *J. Geol.*, 17, pp. 289-299.
- Catuneanu, O., Galloway, W.E., Kendall, C.G.S.C., et al. (2011). Sequence Stratigraphy: Methodology and nomenclature. *Newsletters Stratigr.*, 44(3). <https://doi.org/10.1127/0078-0421/2011/0011>
- Catuneanu, O., Abreu, V., Bhattacharya, J. P., Blum, M. D., Dalrymple, R. W., Eriksson, P. G., Fielding, C. R., Fisher, W. L., Galloway, W. E., Gibling, M. R., Giles, K. A., Holbrook, J. M., Jordan, R., Kendall, C. G. St.C., Macurda, B., Martinsen, O. J., Miall, A. D., Neal, J. E., Nummedal, D., Pomar, L., Posamentier, H. W., Pratt, B. R., Sarg, J. F., Shanley, K. W., Steel, R. J., Strasser, A., Tucker, M. E., & Winker, C. (2009). *Towards the Standardization of Sequence Stratigraphy*. Papers in the Earth and Atmospheric Sciences. 238. <https://digitalcommons.unl.edu/geosciencefacpub/238>
- Franzel, M., & Back, S. (2019). Three-dimensional seismic sedimentology and stratigraphic architecture of prograding clinoforms, central Taranaki Basin, New Zealand. *International Journal of Earth Sciences*, 108(2), 475-496.
- Grabau, A.W. (1913). *Principles of Stratigraphy*. New York A. G. Seiler and Company.
- Holland, S. (2018). *An Online Guide to Sequence Stratigraphy*. <https://strata.uga.edu/sequence/index.html>
- Miall, A.D. (1995). Whither stratigraphy? *Sediment. Geol.*, 100, pp. 5-20.
- Neal, J., & Abreu, V. (2009). Sequence stratigraphy hierarchy and the accommodation succession method. *Geology*, 37, 779-782.
- Nichols, G. (1999). *Sedimentology and Stratigraphy*. Blackwell Science Ltd., Oxford, 355 p.
- North American Commission on Stratigraphic Nomenclature (1983). North American stratigraphic code. *AAPG Bulletin*, 67, 841-875.
- Patruno S, & Helland-Hansen, W. (2018). Clinoforms and clinoform systems: Review and dynamic classification scheme for shorelines, subaqueous deltas, shelf edges and continental margins. *Earth-Science Rev.*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.05.016>
- Plint, A.G., & Nummedal, D. (2000). The falling stage systems tract: recognition and importance in sequence stratigraphic analysis. In: D. Hunt & R.L. Gawthorpe (Eds.), *Sedimentary Response to forced regression*. Geol. Soc. London Sp. Publ, vol. 172pp. 1–17.
- Posamentier, H.W., & Vail, P.R. (1988). Eustatic controls on clastic deposition. II. Sequence and systems tract models. In: C.K. Wilgus, B.S. Hastings, C.G.St.C. Kendall, H.W. Posamentier, C.A. Ross & J.C. Van Wagoner (Eds.) *Sea Level Changes—An Integrated Approach*. SEPM Special Publication, vol. 42pp. 125– 154.
- Posamentier, H.W., & Allen, G.P. (1999). Siliciclastic sequence stratigraphy: concepts and applications. *SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology*, 7, 210 p.
- Rich, J.L. (1951). Three critical environments of deposition and criteria for recognition of rocks deposited in each of them. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 62, 1-20.
- Sloss, L.L. (1963). Sequences in the cratonic interior of North America. *Geological Society of America Bulletin*, 74, p. 93–114, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1963\)74\[93:SITCIO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1963)74[93:SITCIO]2.0.CO;2).
- Vail, P.R. (1987). Seismic stratigraphy interpretation procedure. In: A.W. Bally (Ed.), *Atlas of Seismic Stratigraphy*. American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology, vol. 27, pp. 1–10.
- Vail, P.R., Mitchum, Jr., R.M., Todd, R.G., Widmier, J.M., Thompson III, S., Sangree, J.B., Bubb, J.N., & Hatlelid, W.G. (1977). *Seismic stratigraphy and global changes of sea-level*. In: C.E. Payton (Ed.), *Seismic*

Stratigraphy - Applications to Hydrocarbon Exploration. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 26, pp. 49-212.

Wheeler, H.E. (1958). Time-stratigraphy. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 42, 1047–1063.

Zecchin, M, & Catuneanu, O. (2015). High-resolution sequence stratigraphy of clastic shelves III: Applications to reservoir geology. *Mar Pet Geol.* 2015, 62. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.08.025>



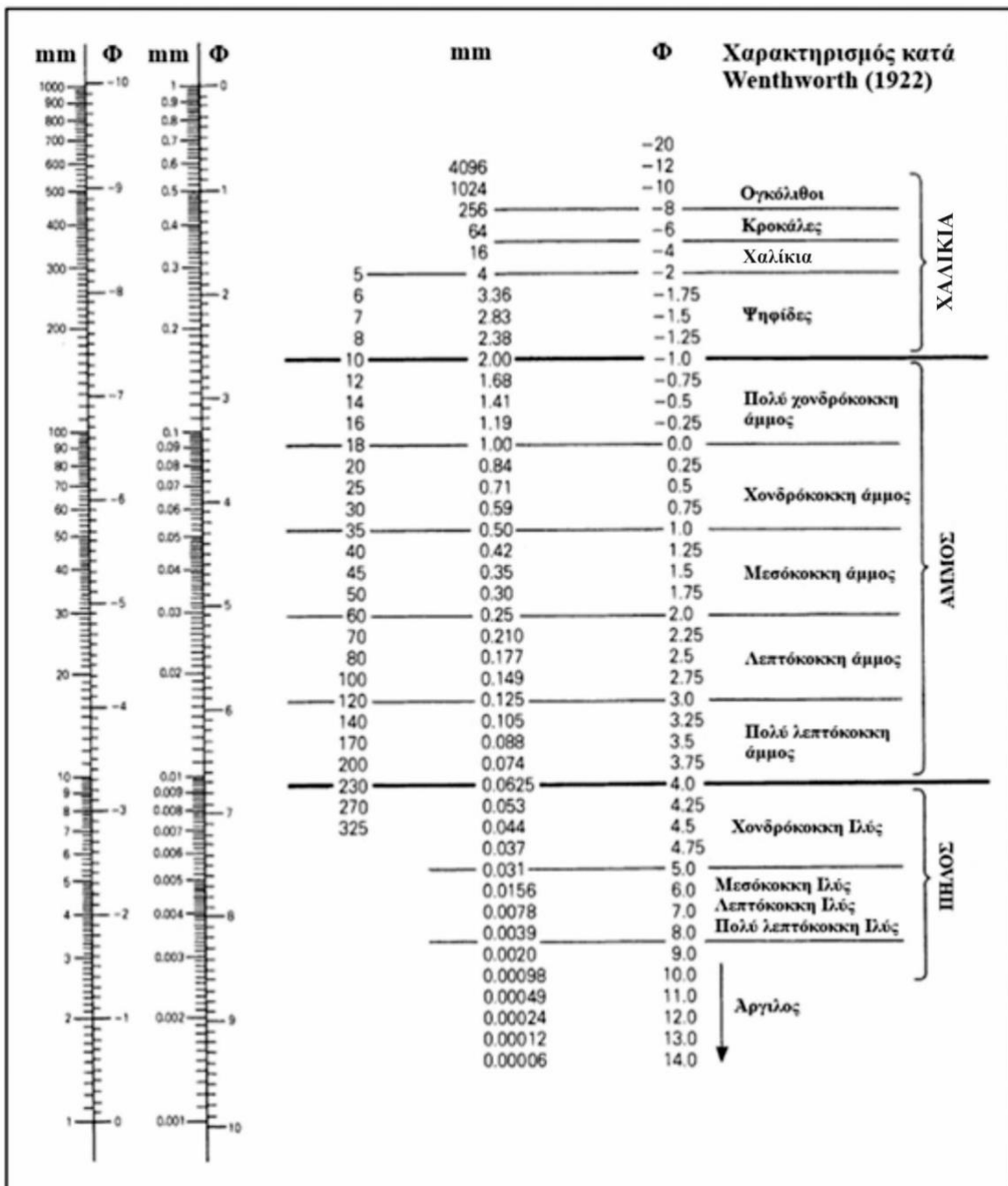


# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Εργαστηριακές Ασκήσεις

## I.1 Άσκηση 1 – Ταξινόμηση Ιζημάτων

**Ερώτημα 1.** Χρησιμοποιώντας το νομόγραμμα που ακολουθεί μετατρέψτε τις ποσότητες από mm σε Φ και από Φ σε mm. Γράψτε σε ποια κλάση (κατηγορία) κατατάσσεται το κάθε υλικό:

15mm	=	φ	-8,1φ	=	mm
1,3mm	=	φ	-5,2φ	=	mm
0,6mm	=	φ	1,3φ	=	mm
0,12mm	=	φ	6,7φ	=	mm
0,036mm	=	φ	9,75φ	=	mm



**Ερώτημα 2.** Τα αποτελέσματα μιας κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

ΚΛΑΣΗ (mm)	ΚΛΑΣΗ (Φ)	ΔΕΙΓΜΑ Α (gr)	ΔΕΙΓΜΑ Β (gr)	ΔΕΙΓΜΑ Α (%)	ΔΕΙΓΜΑ Β (%)
2 - 4		4,32	1,2		
1 - 2		1,06	4,33		
0,5 - 1		4,11	6,73		
0,25 - 0,5		9,87	20,87		
0,125 - 0,25		18,37	12,32		
0,0625 - 0,125		4,31	1,63		
0,031 - 0,0625		1,32	12,2		
0,002 - 0,031		2,7	32,4		
< 0,002		1,44	23,54		
	<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>				

**Ερώτημα 3.** Να κατασκευαστεί το ιστόγραμμα για κάθε δείγμα (Α και Β) και να υπολογιστούν για κάθε δείγμα τα ποσοστά της άμμου (sand), ιλύος (silt), αργίλου (clay), χαλικιών (gravel) και πηλού (mud) (ιλύς + άργιλος). Από τη σύγκριση των δύο δειγμάτων τι συμπεράσματα εξάγονται ως προς το κοκκομετρικό μέγεθος;

## I.2 Άσκηση 2 – Στατιστικές παράμετροι κοκκομετρικής κατανομής ιζημάτων

Τα αποτελέσματα μιας κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

ΚΛΑΣΗ (φ)	Βάρος (gr)	Βάρος (%)	Αθροιστικό Βάρος (%)
-1-0	5,31		
0-1	8,7		
1-2	12,59		
2-3	9,13		
3-4	6,03		
4-5	2,49		
<b>ΣΥΝΟΛΟ:</b>			

**Ερώτημα 1.** Να κατασκευαστεί η αθροιστική καμπύλη τόσο με χρήση αριθμητικής όσο και με κλίμακα συχνότητας πιθανότητας.

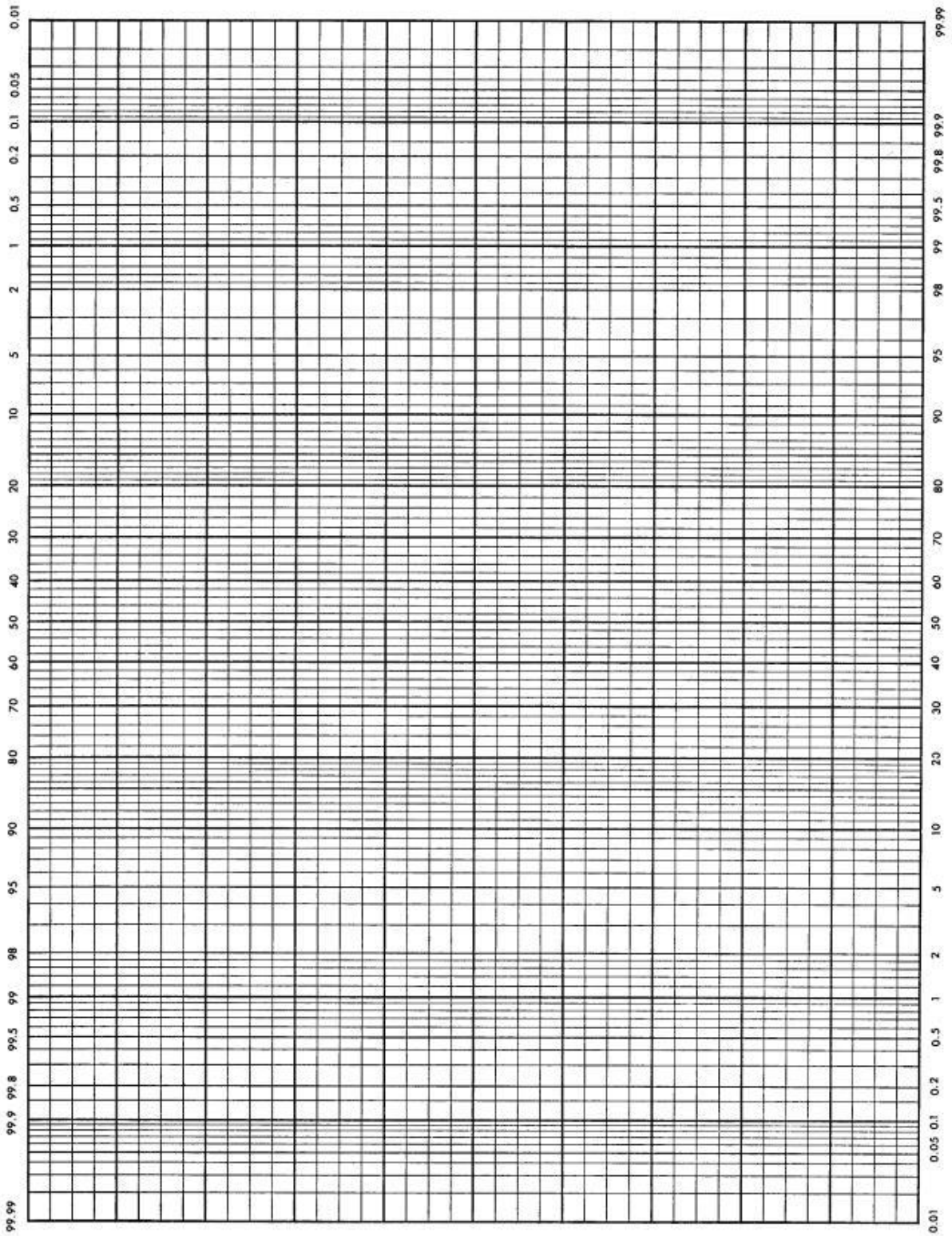
**Ερώτημα 2.** Να υπολογιστούν οι στατιστικές παράμετροι με την κλίμακα συχνότητας πιθανότητας. Για τον σκοπό αυτό σας δίνεται το σχετικό έντυπο.

**Ερώτημα 3.** Περιγράψτε το δείγμα με βάση τις στατιστικές παραμέτρους.

φ5 \_\_\_\_\_ φ75 \_\_\_\_\_  
 φ16 \_\_\_\_\_ φ84 \_\_\_\_\_  
 φ25 \_\_\_\_\_ φ95 \_\_\_\_\_  
 φ50 \_\_\_\_\_

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΥΠΟΣ
Αριθμητικός Μέσος (Mean size)	$Mz = \frac{\Phi16 + \Phi50 + \Phi84}{3}$
Σταθερή Απόκλιση (σi)	$\sigma_i = \frac{\Phi84 - \Phi16}{4} + \frac{\Phi95 - \Phi5}{6,6}$
Ασυμμετρία (SKi)	$SKi = \frac{\Phi16 + \Phi84 - 2\Phi50}{2(\Phi84 - \Phi16)} + \frac{\Phi5 + \Phi95 - 2\Phi50}{2(\Phi95 - \Phi5)}$
Κυρτώση (Kc)	$K_c = \frac{\Phi95 - \Phi5}{2,44(\Phi75 - \Phi25)}$

Median	Mean	Standard deviation	Skewness	Kurtosis
_____ φ	_____ φ	_____ φ	_____	_____
_____ mm*				



### I.3 Άσκηση 3 – Κοκκομετρική ανάλυση-Ταξινόμηση Ιζημάτων

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης παρουσιάζονται στα έντυπα που ακολουθούν (ανάλυση με κόσκινα και με σιφόνιο-πιπέτα).

**Ερώτημα 1.** Κατασκευάστε την κοκκομετρική καμπύλη σε κλίμακα συχνότητας πιθανότητας.

**Ερώτημα 2.** Υπολογίστε τις στατιστικές παραμέτρους.

**Ερώτημα 3.** Με τη βοήθεια του διαγράμματος που σας δίνεται, χαρακτηρίστε το περιβάλλον απόθεσης των δειγμάτων.

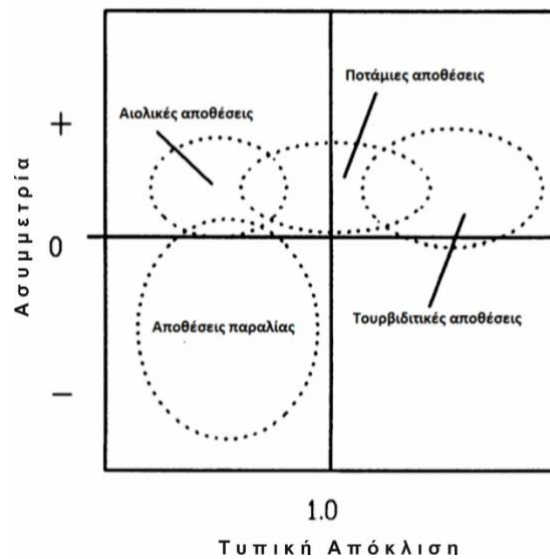
#### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

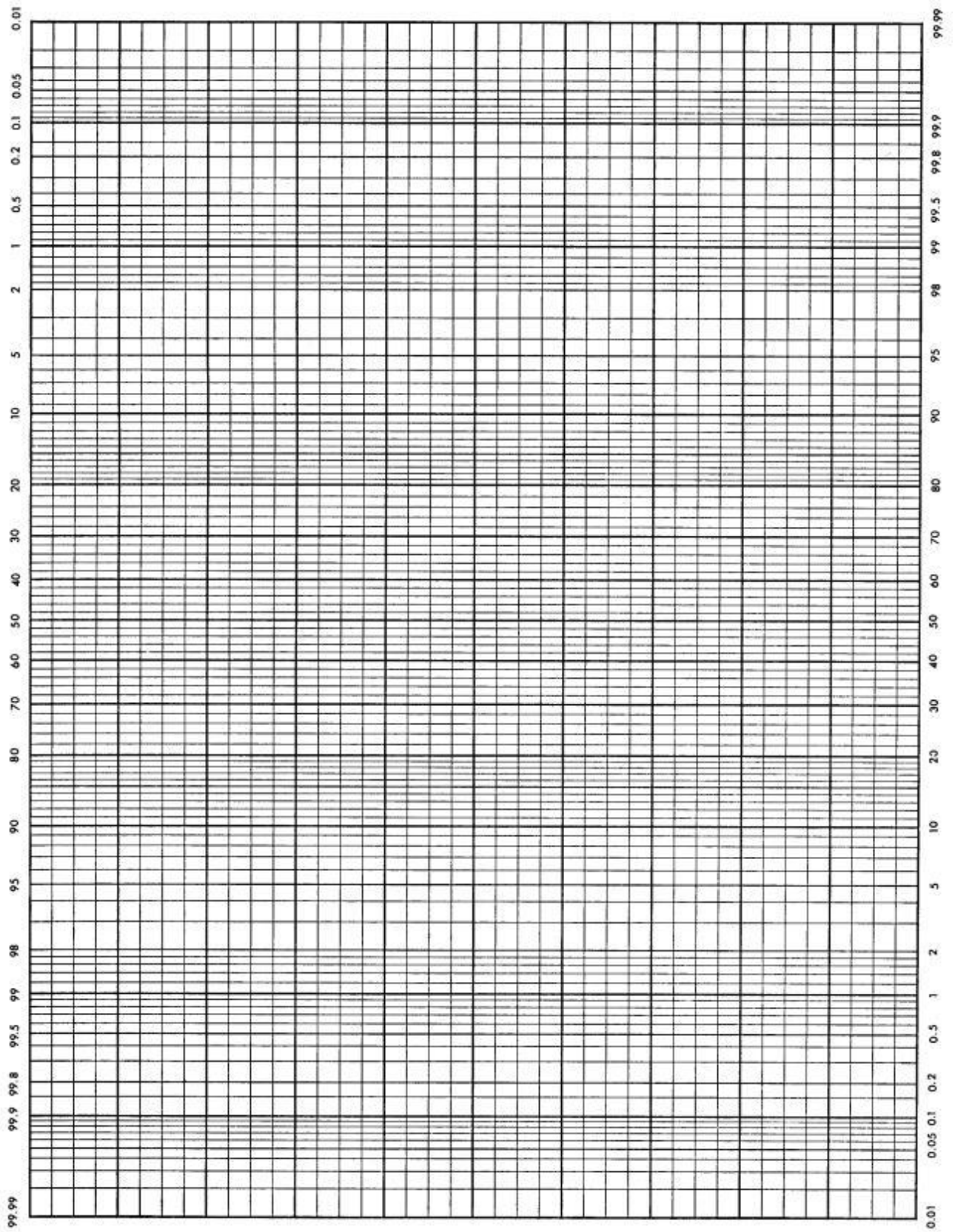
		phi (-log <sub>2</sub> D)	Βάρος κλάσματος (g)	Βάρος (%)	Αθροιστικό βάρος (%)
Χ Α Λ Ι Κ Ε Σ	κροκάλες	-5,5			
		-5			
		-4,5			
		-4			
	χαλίκια	-3,5			
		-3			
		-2,5			
		-2			
ψηφίδες	-1,5				
	-1				
Α Μ Μ Ο Σ	πολύ χονδρόκοκκη	-0,5			
		0			
	χονδρόκοκκη	0,5			
		1			
	μεσόκοκκη	1,5			
		2			
	λεπτόκοκκη	2,5	2,50		
		3	4,00		
πολύ λεπτόκοκκη	3,5	1,20			
	4	8,00			
Π Η Λ Ο Σ	Ι Λ Υ Σ	χονδρόκοκκη	5		
		μεσόκοκκη	6		
		λεπτόκοκκη	7		
		πολύ λεπτόκ.	8		
	ΑΡΓΙΛΟΣ	9			
		>10			
Αθροισμα:					



ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΙΠΕΤΤΑ			
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΙΖΗΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ			
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ:			
ΑΡΧΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ:		ΤΕΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ:	
ΑΠΩΛΕΣΘΕΝ ΒΑΡΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ:		γραμμάρια	
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ:		ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ:	
ΧΡΩΜΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ:			
ΘΕΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ:			
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:			
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΑΛΥΤΗ:			

Λογ2Δ	Α/α φιάλης	Βάρος φιάλης	Βάρος φιάλης+δ	Βάρος δείγματος	Διορθωμένο βάρος δείγματος	Συνολικό Βάρος σε 1 λίτρο
<4	19	23,9780	24,4290			
<5	20	23,7040	24,0370			
<6	21	23,5260	23,7640			
<7	22	23,3330	23,5110			
<8	23	23,3790	23,5190			
<9	24	23,6580	23,7760			
10				Calgon: 0,0290		



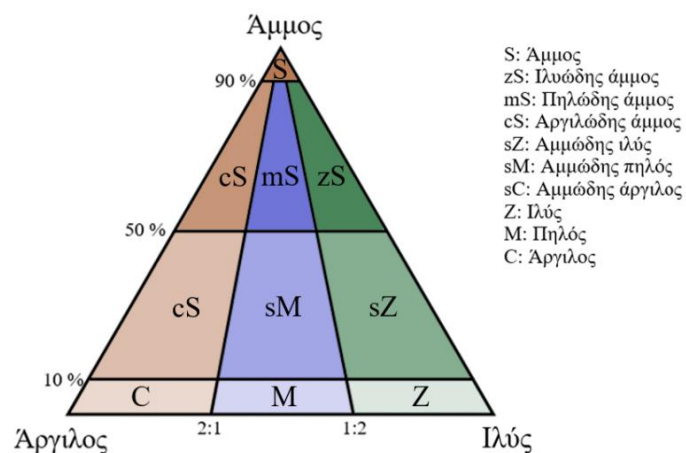
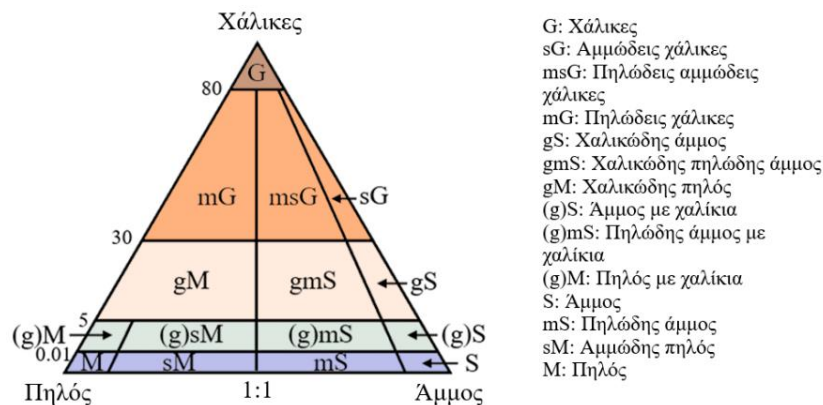


## I.4 Άσκηση 4 – Τριγωνικά διαγράμματα/περιβάλλοντα ιζηματογένεσης

**Ερώτημα 1.** Σύμφωνα με το ποσοστό συμμετοχής της ιλύος, της αργίλου, της άμμου και των χαλικιών που προέκυψαν από την κοκκομετρική ανάλυση, να προσδιοριστεί η ονοματολογία του κάθε δείγματος:

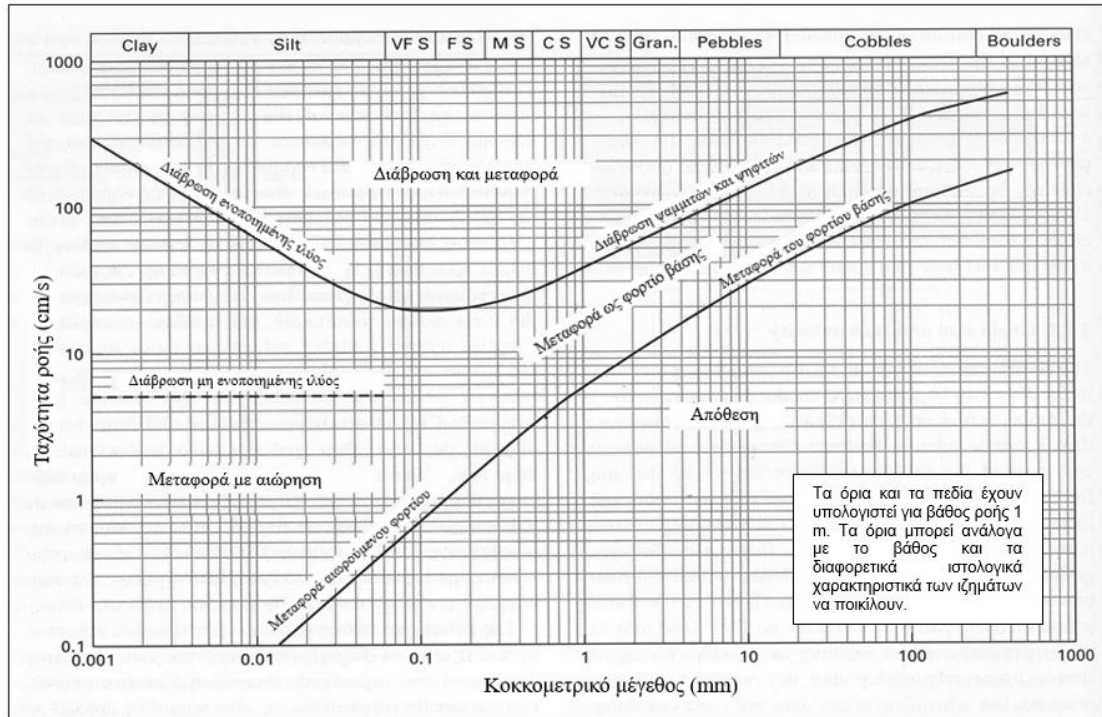
Άμμος (%)	Ιλύς (%)	Αργίλος (%)
27,53	38,56	33,91
44,73	41,58	13,72
25,47	54,25	20,28
3,55	47,54	48,91

Χάλικες (%)	Άμμος (%)	Ιλύς (%)
35	20	45
15	60	25
5	20	75
85	10	5



**Ερώτημα 2.** Με βάση το παρακάτω διάγραμμα:

- α) Ποια είναι η ελάχιστη ταχύτητα ροής που απαιτείται να έχει ένας κόκκος διαμέτρου 0,1 mm προκειμένου να μεταφερθεί υπό αιώρηση και
- β) ποια η ταχύτητα ροής προκειμένου μέγεθος κόκκου 1 mm να μεταφερθεί και να διαβρώσει;

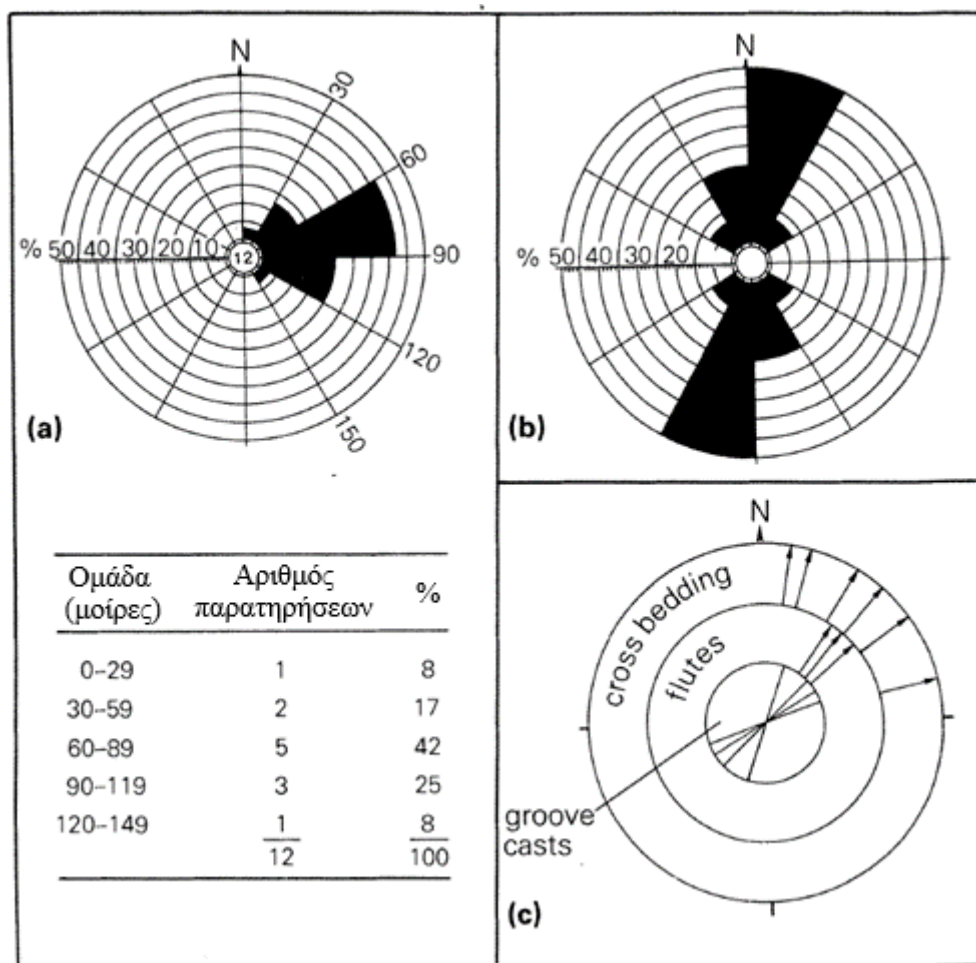


## I.5 Άσκηση 5 – Παλαιορευματική ανάλυση

Η παλαιορευματική ανάλυση στηρίζεται σε δεδομένα που είτε δείχνουν απλά τη ρευματική διεύθυνση (π.χ. ο μέγιστος άξονας των κροκαλών και των κόκκων της άμμου, τα «groove casts» οι συμμετρικές ρυτιδώσεις) είτε δείχνουν τη φορά της ρευματικής διεύθυνσης π.χ. διασταυρούμενη στρώση, ασύμμετρες ρυτιδώσεις, «flute casts». Στην πρώτη περίπτωση έχουμε ανάλυση με «line-of-movement» data («γραμμική κίνησης»<sup>24</sup>δεδομένα) και στη δεύτερη περίπτωση ανάλυση με «movement» data.

*Παλαιορευματική ανάλυση με «movement» data*

Ένας δημοφιλής μηχανισμός για την παρουσίαση γενικά δεδομένων από διεύθυνση είναι το ροδόγραμμα. Αυτό είναι ένα ιστόγραμμα που έχει μετατραπεί σε μια κυκλική- κατανομή. Οι κλάσεις της κατανομής αυτής είναι ποικίλες, συνήθως όμως χρησιμοποιείται η κλάση των 30°. Είναι δε καλύτερα να προβάλλονται το επί τοις % των παρατηρήσεων σε κάθε κλάση παρά ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων κάθε κλάσης (Εικόνα I.5.1).



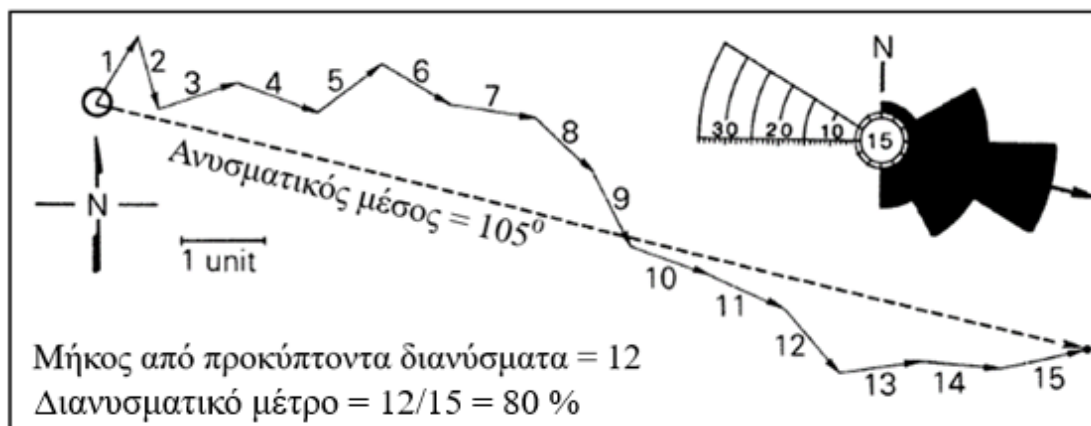
**Εικόνα I.5.1** Ροδογράμματα. Τα ροδογράμματα μπορούν να χρησιμοποιούν «movement data» (α) ή «line of movement data» (β). Στην Εικόνα 1α έχουν προβληθεί 12 αζιμουθιακές τιμές σε μοίρες διασταυρούμενης στρώσεις 10, 80, 112, 71, 130, 42, 58, 72, 67, 74, 99, 102. Στην Εικόνα 1β η προβολή διευθύνσεων 8 «groove casts» (σε μοίρες) - 20(200), 331(151), 340(160), 305(125), 15(195), 18(198), 39(219), 6(186).

Η κλάση με τις πιο πολλές παρατηρήσεις συνιστά την τυπική κλάση ή κλάση του τύπου (modal class). Όταν προβάλλονται «movement data», το ροδόγραμμα δείχνει το κατάντι του ρεύματος. Οι περισσότερες κατανομές έχουν ένα μόνο τύπο, είναι δηλαδή μονοτυπικές (**unimodal**) αν και κάποιες έχουν δύο ή περισσότερους τύπους, είναι δηλαδή διτυπικές ή πολυτυπικές (**bimodal, polymodal**). Αν και το ροδόγραμμα δίνει μια γενική ιδέα για την παλαιορευματική διεύθυνση, χρειαζόμαστε μια πιο αυστηρή προσέγγιση. Ο ανυσματικός μέσος (**vector**

<sup>24</sup> Ο όρος "γραμμική κίνησης" αναφέρεται συνήθως σε μια διαδρομή ή τροχιά κατά μήκος της οποίας κινείται ένα αντικείμενο ή μια οντότητα.



**mean**) είναι η πιο κοινή συνηθισμένη μέτρηση της μέσης διεύθυνσης της ροής (Εικόνα I.5.2). Κατανομές με την έντονη παρουσία των δύο τύπων παράγουν έναν ανυσματικό μέσο που έχει ελάχιστη γεωλογική σημασία.

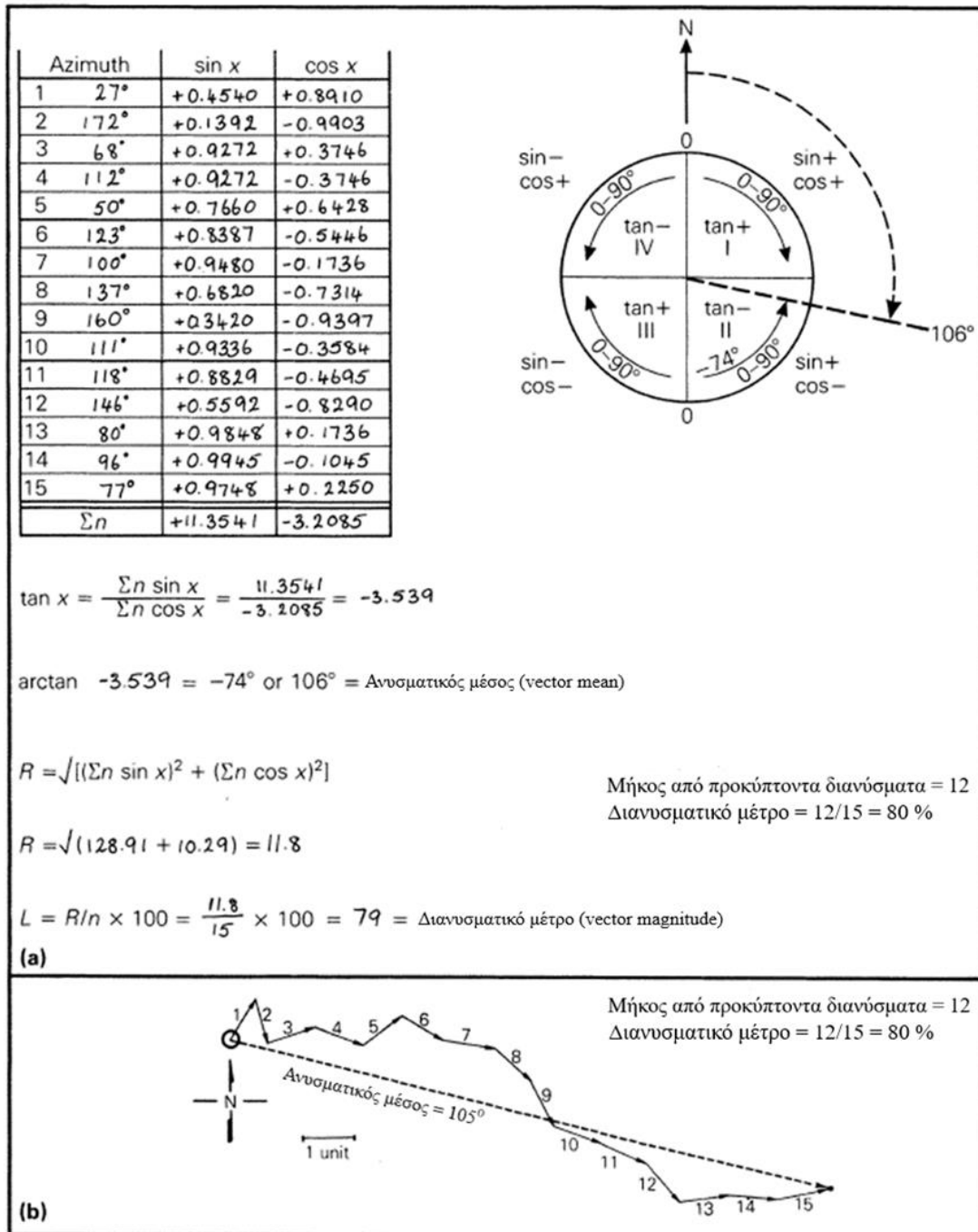


Εικόνα I.5.2 Μέθοδος για τον υπολογισμό του «ανυσματικού μέσου» και του «vector magnitude».

**Γραφική Μέθοδος:** Κάθε μετρούμενο αζιμούθιο προβάλλεται ως ένα μοναδιαίο άνυσμα. Μια μονάδα μήκους μπορεί να είναι 1 cm, 1 ίντσα ή οτιδήποτε άλλο είναι ευκολότερο. Στο παράδειγμα που εικονογραφείται τα μοναδιαία άνυσματα μαρκάρονται από το 1 μέχρι το 15 (τα αζιμούθια είναι: 27, 172, 68, 112, 50, 123, 100, 137, 160, 111, 118, 146, 80, 96, 77). Το προκύπτον άνυσμα, η γραμμή που συνδέει την αρχή με το τέλος του τελευταίου ανύσματος, είναι ο ανυσματικός μέσος. Το «vector magnitude» αποκτάται διαιρώντας το μήκος του προκύπτοντος «ανύσματος» (12 μονάδες) με το συνολικό μήκος όλων των μοναδιαίων ανυσμάτων (15 μονάδες) πολλαπλασιάζοντας με 100.

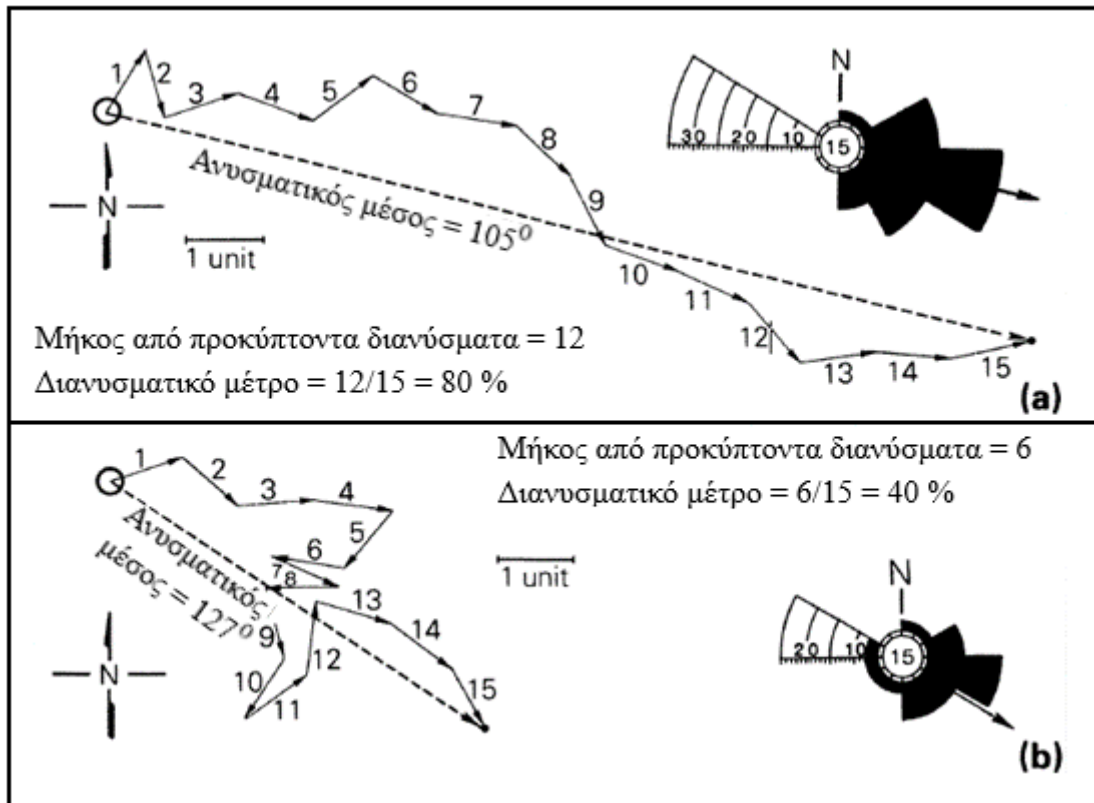
Ο «ανυσματικός μέσος» μπορεί να ερμηνευθεί γραφικώς δίνοντας για κάθε μετρηθείσα τιμή ένα άνυσμα μιας μονάδας μήκους (Εικόνα I.5.2). Η πρώτη παρατήρηση προβάλλεται ως ένα άνυσμα ξεκινώντας από ένα αυθαίρετο σημείο. Το δεύτερο κατόπιν προβάλλεται στο τέλος του πρώτου και ούτω καθ' εξής μέχρις ότου προβληθούν όλες οι παρατηρήσεις. Η γραμμή που συνδέει το σημείο εκκίνησης με το άκρο του τελευταίου ανύσματος είναι ο «γραφικός ανυσματικός μέσος» (graphical vector mean) (Εικόνα I.5.2).

**Τριγωνομετρική μέθοδος:** Ο «ανυσματικός μέσος» είναι η εφαπτομένη τόξου (arctan) της εφαπτομένης (tangent) που προκύπτει. Θα πρέπει πάντα κανείς να έχει υπόψη του ότι σε μια κατανομή  $360^\circ$  οποιαδήποτε τιμή της εφαπτομένης έχει δύο πιθανά αζιμούθια που διαφέρουν  $180^\circ$  π.χ. η εφαπτομένη για γωνία  $10^\circ$  και για γωνία  $190^\circ$  είναι 0,176. Οι δύο αυτές γωνίες ξεχωρίζουν με βάση το πρόσημο του ημιτόνου και του συνημιτόνου. Στο πρώτο τεταρτημόριο (αζιμούθιο= $10^\circ$ ) και το ημίτονο και το συνημίτονο είναι θετικά, ενώ στο τρίτο τεταρτημόριο είναι και τα δύο αρνητικά (Εικόνα I.5.3).



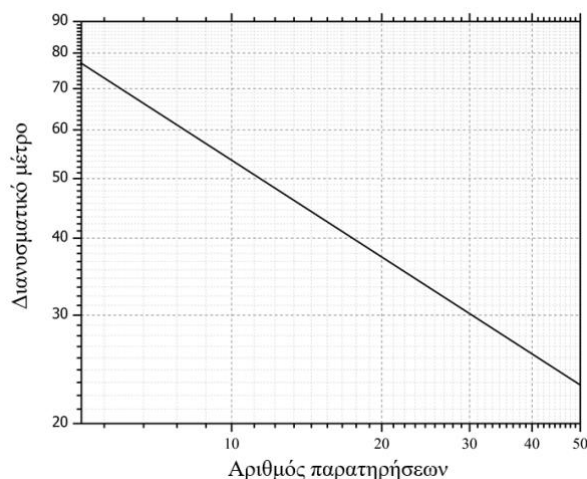
Εικόνα I.5.3 Υπολογισμός ανυσματικού μέσου με την τριγωνομετρική μέθοδο.

Η τυπική απόκλιση (standard deviation) δίνεται από το «vector magnitude» (Εικόνα I.5.4). Για διευκόλυνση κατά τη σύγκριση δειγμάτων το «vector magnitude» εκφράζεται επί τοις % (η έκφραση αυτή είναι γνωστή ως «λόγος συνοχής»(consistency ratio)). Υψηλές τιμές του «vector magnitude» δείχνουν ότι το μέγιστο των παρατηρήσεων είναι γύρω από τον «ανυσματικό μέσο» (μικρή διασπορά) (Εικόνα I.5.4α). Σε αντίθετη περίπτωση η διασπορά είναι μεγαλύτερη (Εικόνα I.5.4β).



**Εικόνα I.5.4** Γραφική σύγκριση δειγμάτων (α) με υψηλό και (β) με χαμηλό διανυσματικό μέτρο.

Για να ερμηνευτεί εάν τα μετρηθέντα αζιμούθια είναι ομοιόμορφα κατανομημένα χρησιμοποιούμε το Rayleigh test. Αν το υπολογισθέν «vector magnitude» είναι μεγαλύτερο από μια κρίσιμη τιμή για έναν δοσμένο αριθμό παρατηρήσεων (δηλαδή το «vector magnitude» προβάλλεται πάνω από την υπό κλίση ευθεία, Εικόνα I.5.5) το δείγμα θεωρείται ότι είναι από έναν πληθυσμό με προσανατολισμένη διεύθυνση. Αυτό είναι η περίπτωση για το Α δείγμα της Εικόνας I.5.4. Αν το υπολογισθέν «vector magnitude» είναι μικρότερο από την κρίσιμη τιμή (για έναν δοσμένο αριθμό παρατηρήσεων δηλαδή προβάλλεται κάτω από την υπό κλίση ευθεία) το δείγμα θεωρείται ότι είναι από έναν πληθυσμό που δεν δείχνει προσανατολισμένη διεύθυνση. Αυτό είναι η περίπτωση για το Β δείγμα που δείχνεται στην Εικόνα I.5.4.



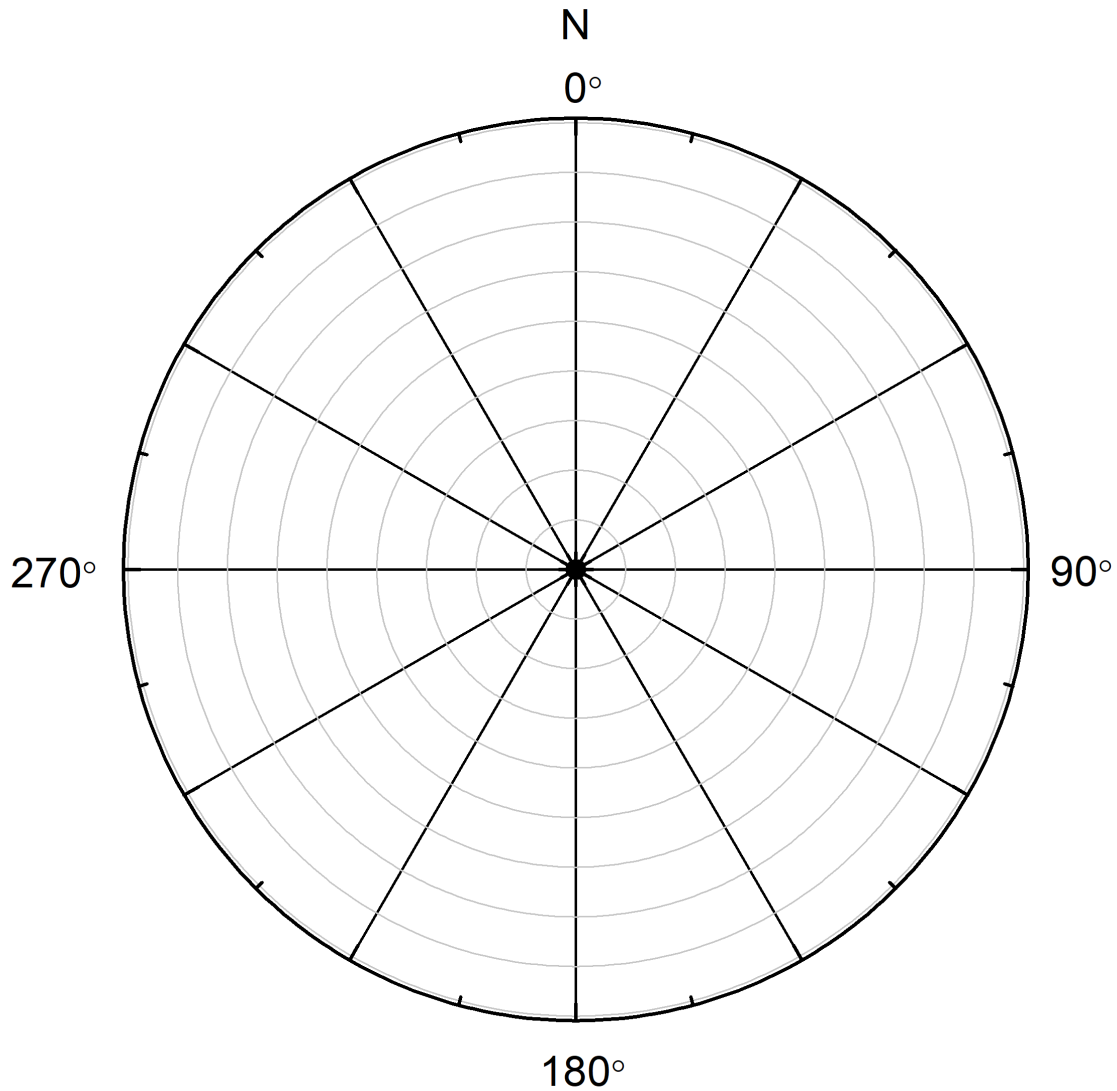
**Εικόνα I.5.5** Έλεγχος στατιστικής αξιοπιστίας προσανατολισμού πληθυσμού χρησιμοποιώντας το Rayleigh test (σημαντικότητα 0,05).

### ΑΣΚΗΣΗ

Σας δίνεται μια ομάδα μετρήσεων της διεύθυνσης της κλίσης (αζιμούθια) διασταυρούμενης στρώσης.

**Ερώτημα 1.** Να υπολογιστεί ο ανυσματικός μέσος και vector magnitude τόσο με την τριγωνομετρική μέθοδο όσο και με τη γραφική. Να εφαρμοστεί το Rayleigh test σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05 για να ελεγχθεί στατιστικά ο ανυσματικός μέσος.

**Ερώτημα 2.** Κατασκευάστε το ροδόγραμμα για τις μετρήσεις αυτές. Σχολιάστε τα αποτελέσματά σας.  
Τιμές : 5°, 12°, 82°, 111°, 42°, 73°, 40°, 35°, 51°, 58°, 20°, 48°, 137°, 17°, 96°.

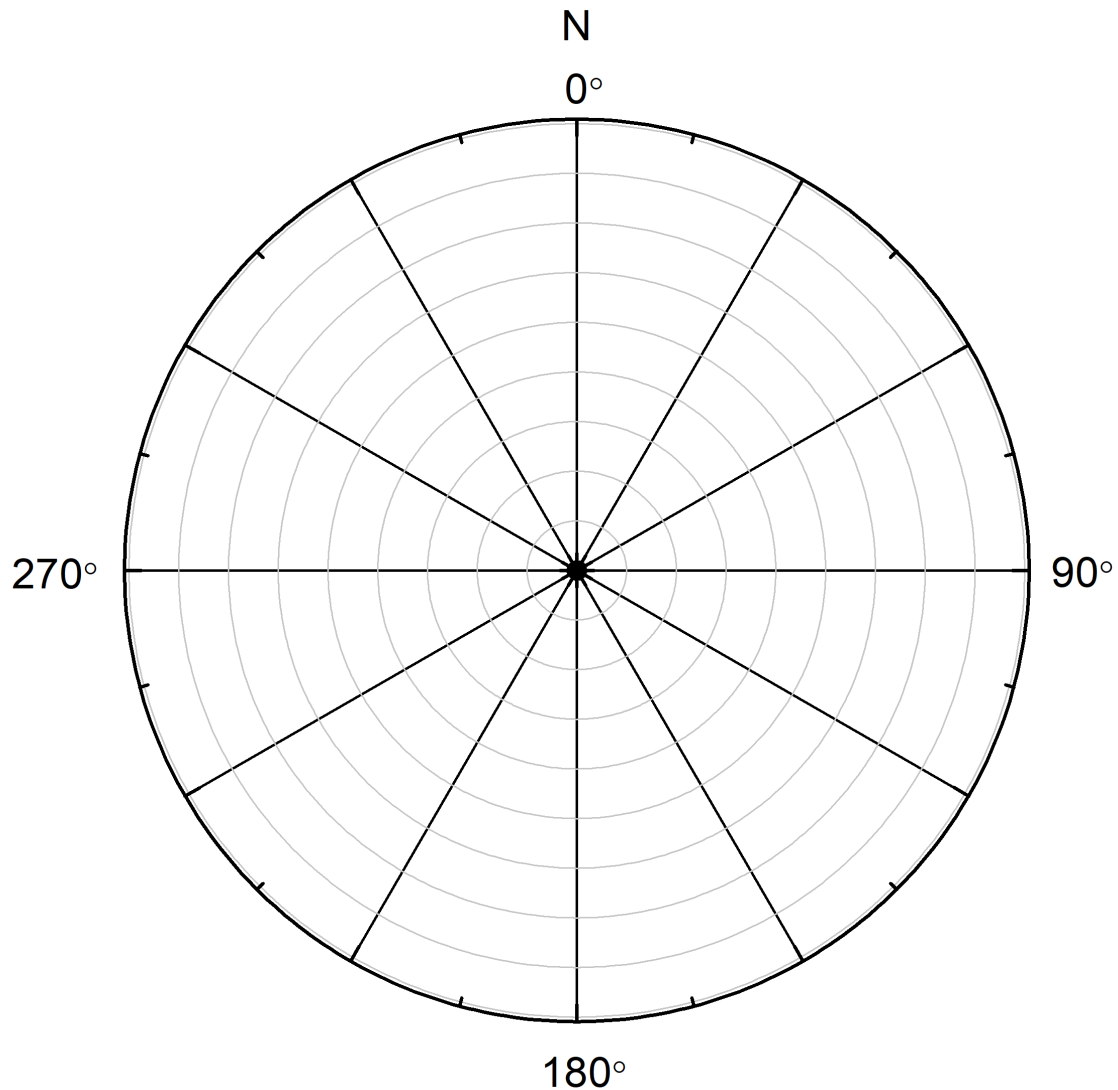


## 1.6 Άσκηση 6 – Παλαιογεωμετρική ανάλυση

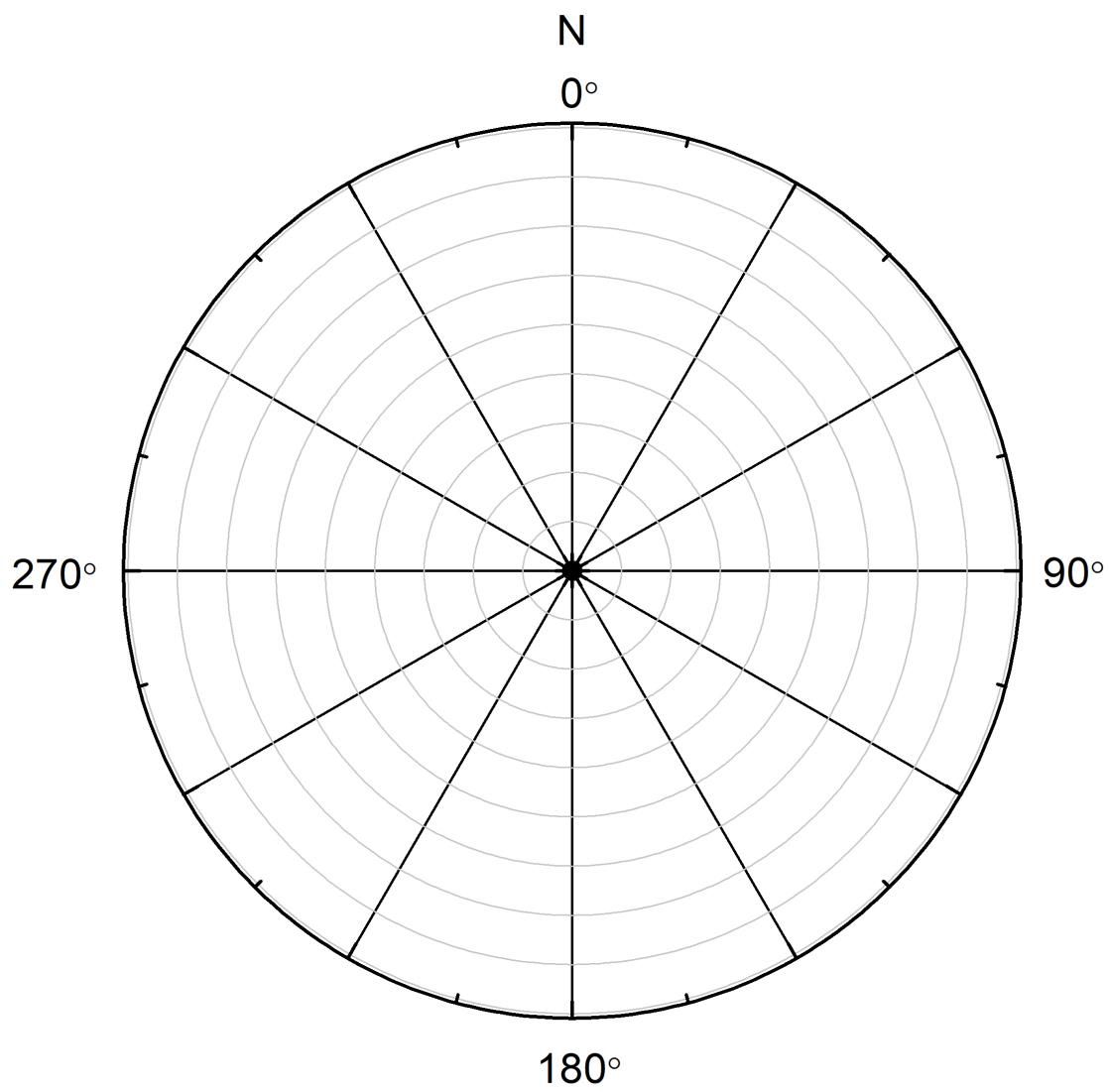
**Ερώτημα 1.** Σας δίνεται ο προσανατολισμός διεύθυνση κλίσης του μεγίστου άξονα 33 κροκαλών. Να κατασκευαστεί το ροδόγραμμα. Να σχολιαστεί η απεικόνιση.

Τιμές: 30°, 80°, 330°, 62°, 210°, 198°, 190°, 65°, 234°, 222°, 188°, 228°, 270°, 68°, 236°, 180°, 82°, 240°, 66°, 172°, 260°, 220°, 220°, 208°, 230°, 162°, 188°, 192°, 175°, 181°, 206°, 178°, 194°.

**Ερώτημα 2.** Σε τεταρτογενή ηφαιστειοκλαστικά πετρώματα, οριζόντια και απαραμόρφωτα, μετρήθηκαν οι διευθύνσεις μιας σειράς από απολιθωμένους κορμούς: 250°, 225°, 245°, 280°, 240°, 190°, 235°, 215°, 230°, 250°, 220°, 325°, 270°, 240°, 235°, 185°, 190°, 185°, 310°, 245°, 205°, 355°, 350°, 190°, 230°, 225°, 230°, 190°, 290°. Σχεδιάστε το ροδόγραμμα και σχολιάστε το αποτέλεσμα.







## I.7 Άσκηση 7 – Μητρώο γεώτρησης/Ιζηματολογικές φάσεις

Γεωλογική τομή που μελετήθηκε στην ύπαιθρο, παρουσιάζει τη στρωματογραφική ακολουθία η οποία περιγράφεται ακολούθως. Σχεδιάστε τη στρωματογραφική στήλη υπό κλίμακα σύμφωνα με το έντυπο που ακολουθεί και με το ελεύθερο λογισμικό SEDLOG.

Πάχος (m)	Σχηματισμός
0,00 – 4,00	Μάργες με παρουσία τρηματοφόρων (foraminifera). Ηλικία Πλειόκαινο. Σημειώσεις υπαίθρου: Διακρίθηκαν πλαγκτονικά τρηματοφόρα γένους <i>Globigerinoides</i> .
4,00 – 6,00	Πηλίτες (mudstone) με παρουσία ιχνοαπολιθωμάτων (trails). Σημειώσεις υπαίθρου: Άγνωστη ηλικία πετρώματος. Παρατηρήθηκαν ρηγματώσεις, μέγιστου μήκους 5 m.
6,00 – 12,00	Ψαμμίτης (sandstone) με σκαφοειδή στρώση. Κοκκομετρικό μέγεθος βάσης χονδρόκοκκη άμμος και οροφής μεσόκοκκη άμμος. Παλαιογεωμετρικές διευθύνσεις 90°, 135°, 48°, 55°. Ηλικία Ηώκαινο. Σημειώσεις υπαίθρου: Παρατηρήθηκαν flute marks στη βάση του στρώματος.
12,00 – 21,00	Πηλίτες με παρουσία Κεφαλόποδων και γαστερόποδων. Επαφή βαθμιαία.
21,00 – 22,00	Ηφαιστειακή τέφρα (fine ash).
22,00 – 26,00	Ιλύλιθος (Siltstone) 70% με αργιλόλιθο (Claystone) 30%. Παρουσία γαστερόποδων (gastropods). Ηλικία Παλαιόκαινο. Σημειώσεις υπαίθρου: Η βάση πετρώματος παρουσιάζει αλλαγή χρώματος λόγω παρουσίας οξειδίων σιδήρου.
26,00 – 40,00	Ψαμμίτης (sandstone) με διασταυρούμενη στρώση (cross bedding). Κοκκομετρικό μέγεθος βάσης μεσόκοκκη άμμος και οροφής χονδρόκοκκη άμμος. Επαφή απότομη.
40,00- 42,00	Ασβεστόλιθος με κελύφη. Ηλικία Κρητιδικό.

Για την κατασκευή θα χρησιμοποιηθεί το ελεύθερο λογισμικό SEDLOG (<http://www.sedlog.com/>) με τη σειρά των παραμέτρων όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



## I.8 Άσκηση 8 – Ιζηματολογικές φάσεις/Στρωματογραφικές ακολουθίες

Παρουσιάζεται η στρωματογραφική περιγραφή, από τα κατώτερα προς τα ανώτερα στρώματα, μιας γεωλογικής τομής που μελετήθηκε στην ύπαιθρο. Σύμφωνα με την περιγραφή αυτή κατασκευάστε τη στρωματογραφική στήλη υπό κλίμακα στο έντυπο που ακολουθεί και στον υπολογιστή χρησιμοποιώντας το ελεύθερο λογισμικό SEDLOG.

Πάχος (m)	Σχηματισμός
0,00 – 2,00	Ασβεστόλιθος (limestone) με γαστερόποδα.
2,00 – 2,45	Άργιλος (clay). Παρατηρήθηκε μικρού βαθμού βιοαναμόχλευση.
2,45 – 2,90	Κροκαλοπαγές πολύμεικτο (conglomerate polymictic). Διαβρωσιγενής βάση. Κοκκομετρικό μέγεθος βάση: χάλικες – οροφή: ψηφίδα.
2,90 – 4,15	Ψαμμίτης (sandstone) με σκαφοειδή διασταυρούμενη στρώση. Επαφή βαθμιαία (gradational). Κοκκομετρικό μέγεθος βάση: χονδρόκοκκη άμμος – οροφή: μεσόκοκκη άμμος. Παλαιορευματικές διευθύνσεις 40°, 30°, 123°, 150°, 90°.
4,15 – 4,90	Ψαμμίτης (sandstone) με διασταυρούμενη στρώση. Επαφή βαθμιαία (gradational). Κοκκομετρικό μέγεθος μεσόκοκκη άμμος.
4,90 – 5,40	Ψαμμίτης (sandstone) με ρυτιδώσεις και διασταυρούμενη ελασμάτωση. Επαφή βαθμιαία (gradational). Κοκκομετρικό μέγεθος λεπτόκοκκη άμμος.
5,40 – 6,50	Ιλύλιθος (siltstone) παρουσία ριζιδίων. Παρουσία λεπτών αμμωδών ελασματώσεων. Επαφή απότομη (sharp). Κοκκομετρικό μέγεθος λεπτόκοκκος πηλίτης.
6,50 – 7,00	Στρώμα τύρφης (peat).
7,00 – 8,00	Πηλίτες (mudstone) και αργιλόλιθος (claystone) παρουσία φυτικών υπολειμμάτων (plant material). Επαφή απότομη (sharp).





## I.9 Άσκηση 9 – Μέθοδοι χρονολόγησης ιζημάτων και υπολογισμός ρυθμού ιζηματογένεσης

Οι σχετικές μέθοδοι χρονολόγησης βασίζονται σε στρωματογραφικές συσχετίσεις των στρωμάτων, ή των υλικών μέσα στα ιζήματα, ανάλογα με τη στρωματογραφική τους θέση. Η βασική παραδοχή είναι ότι η δημιουργία τους είναι ταυτόχρονη με τη δημιουργία των στρωμάτων και δε βρέθηκαν εκεί από επανατοποθέτηση παλαιότερων στρωμάτων που έχουν υποστεί διάβρωση και μεταφορά.

Οι απόλυτες μέθοδοι χρονολόγησης περιλαμβάνουν τις ραδιοχρονολογήσεις, τις χρονολογήσεις που στηρίζονται σε βιολογικής ή λιθολογικής σύστασης υλικά, καθώς και τις μεθόδους συσχέτισης διακριτών, καθοδηγητικών οριζόντων σε παγκόσμια κλίμακα. Οι ραδιοχρονολογήσεις βασίζονται στη ραδιενεργή διάσπαση στοιχείων η οποία πραγματοποιείται με έναν ρυθμό που μπορεί να υπολογιστεί. Οι πιο γνωστές μέθοδοι ραδιοχρονολόγησης είναι του  $^{14}\text{C}$ , της σειράς του Ουρανίου, του Καλίου-Αργού, της θερμοφωταύγειας και της οπτικής φωταύγειας, του μαγνητικού συντονισμού ηλεκτρονικής στροφορμής και της τροχιάς διάσπασης.

Στην απόλυτη μέθοδο χρονολόγησης, η ηλικία αναφέρεται στο χρονικό διάστημα που έχει περάσει από το γεγονός έως σήμερα. Η επιστημονική έκφραση αυτού του διαστήματος είναι σε έτη πριν από σήμερα (BP = Before Present). Ως σημείο αναφοράς ιδιαίτερα στον δυτικό κόσμο χρησιμοποιείται ως σταθερό σημείο η γέννηση του Χριστού. Έτσι οι ηλικίες είτε είναι π. Χ., (BC = Before Christ) ή μ. Χ. (AD = anno Domini). Ένα πιο απόλυτο αριθμητικά παγκόσμιο σύστημα αναφοράς για τον ορισμό του χρόνου πριν από σήμερα για τις χρονολογήσεις με ραδιοάνθρακα γίνεται η παραδοχή ότι το σήμερα νοείται στο 1950 (θεωρητική απαγόρευση ατομικών δοκιμών στην ατμόσφαιρα). Τα τελευταία χρόνια στη διεθνή επιστημονική κοινότητα επικρατεί η άποψη το BC να αναγράφεται ως BCE (Before common era) και το AD ως CE (common era) έτσι ώστε να αποφεύγεται η αναφορά σε συγκεκριμένη θρησκεία.

Οι απόλυτες μέθοδοι χρονολόγησης έχουν κάποια αβεβαιότητα ως προς την ακριβή ηλικία γιατί κάθε μέτρηση που γίνεται δεν είναι δυνατόν να επαναληφθεί απόλυτα στο εργαστήριο και συνοδεύεται από ένα λάθος στη μέτρηση. Τα αποτελέσματα των ραδιοχρονολογήσεων δίνονται με μια τυπική απόκλιση ( $\pm \sigma$ ), η οποία σημαίνει ότι υπάρχει πιθανότητα 68% η τιμή της χρονολόγησης να κυμαίνεται μέσα σε αυτό το διάστημα. Δηλαδή μια ηλικία  $5400 \pm 200$  έχει πιθανότητα 2 στις 3 να είναι από 5200 έως 5800.

### *Μέθοδος χρονολόγησης με $^{14}\text{C}$*

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος απόλυτης χρονολόγησης είναι η μέθοδος του ραδιοάνθρακα. Ανακαλύφθηκε το 1949 από τον Αμερικανό χημικό Libby. Είναι γνωστό ότι ο φυσικός άνθρακας αποτελείται από 3 ισότοπα, τα δύο σταθερά  $^{12}\text{C}$  και  $^{13}\text{C}$  και από το ραδιογενές ισότοπο  $^{14}\text{C}$ . Ο  $^{14}\text{C}$  παράγεται στη στρατόσφαιρα με την επίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με τα άτομα αζώτου και ενώνεται – όπως και τα άλλα δύο ισότοπα- με το οξυγόνο, σχηματίζοντας  $\text{CO}_2$ . Με τη φωτοσύνθεση και διαμέσου της τροφικής αλυσίδας, απορροφάται από τους ζώντες οργανισμούς με σταθερό ρυθμό.

Το βιολογικό τέλος του οργανισμού, σταματώντας τη διαδικασία πρόληψης  $\text{CO}_2$ , σηματοδοτεί τη χρονική στιγμή μηδέν από την οποία και μετά η συγκέντρωση του ραδιενεργού άνθρακα μειώνεται με σταθερό ρυθμό, εκπέμποντας ακτίνες βήτα. Η φθίνουσα ραδιενέργεια μειώνεται με σταθερό ρυθμό, ενώ ο χρόνος που απαιτείται για τη μείωση των μισών ατόμων ενός ραδιενεργού ισότοπου ονομάζεται ημιζωή. Μετά από μια ημιζωή θα έχουν απομείνει τα μισά άτομα, μετά από δύο ημιζωές το  $\frac{1}{4}$  κ.ο.κ. Για τον  $^{14}\text{C}$  έχει ομόφωνα οριστεί ως ημιζωή τα 5730 χρόνια.

Στην αρχή της ανάπτυξης της μεθόδου από τον Libby έγινε η υπόθεση ότι η συγκέντρωση  $^{14}\text{C}$  στην ατμόσφαιρα ήταν σταθερή μέσα στον χρόνο. Τώρα όμως έχει γίνει γνωστό ότι αυτή έχει μεταβληθεί, οφειλόμενη σε μεγάλο μέρος στις αλλαγές του μαγνητικού πεδίου της Γης. Η μέθοδος της δένδροχρονολόγησης υπέδειξε την ανακρίβεια αυτή και βοήθησε στη διόρθωση και βαθμονόμηση της χρονολόγησης με ραδιενεργό άνθρακα. Οι χρονολογήσεις με ραδιενεργό άνθρακα που έχουν προκύψει από τους δακτυλίους των δέντρων δείχνουν ότι οι χρονολογήσεις πριν το 1000 π. Χ. εκφραζόμενες σε χρόνια ραδιοάνθρακα είναι μικρότερης ηλικίας από την πραγματική. Έτσι, κρίθηκε απαραίτητη η κατασκευή των διορθωτικών καμπυλών δένδροδακτυλίων έναντι  $^{14}\text{C}$  για τον υπολογισμό αυτών των αποκλίσεων.

### *Μέθοδοι μέτρησης $^{14}\text{C}$*

Για τη μέτρηση του  $^{14}\text{C}$  δύο βασικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί: α) η καταμέτρηση χτύπων οφειλόμενη σε βήτα διασπάσεις, που είναι και η πιο παραδοσιακή και β) η μέθοδος της ατομικής φασματοσκοπίας – φασματομετρίας με επιταχυντή μάζας (AMS – Accelerator Mass Spectrometry) που είναι η πιο ριζοσπαστική και αναπτυγμένη τα τελευταία χρόνια (Εικόνα I.9.1). Με την παραδοσιακή μέθοδο απαιτείται μεγαλύτερη

ποσότητα δείγματος (περίπου 5 g) ενώ με την AMS απαιτείται ποσότητα 5-10 mg, γεγονός που διευκολύνει τη χρονολόγηση πολύτιμων οργανικών υλικών και μειώνει σημαντικά τον χρόνο μέτρησης. Με τη μέθοδο AMS μετρώνται απευθείας τα άτομα του  $^{14}\text{C}$  παραβλέποντας εντελώς τη ραδιενέργειά τους. Έτσι, αποφεύγονται και τα προβλήματα της ακτινοβολίας υποστρώματος οφειλόμενης στα γύρω υλικά και στην οργανολογία.



**Εικόνα I.9.1** Ατομικός φασματογράφος με επιταχυντή μάζας (AMS) της εταιρίας *National Electrostatics Corp.*

### **Μοντέλο Βάθους Χρόνου (Age-Depth model)**

Στη μελέτη ιζηματογενών δομών, με σκοπό την παλαιοπεριβαλλοντική/ παλαιογεωμορφολογική εξέλιξη, είτε στη μελέτη παλαιοκλιματικών μεταβολών, είναι πολύ σημαντική η κατασκευή ενός αξιόπιστου μοντέλου βάθους χρόνου. Ένα τέτοιο μοντέλο, χρησιμοποιώντας ραδιοχρονολογήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί είτε σε έναν πυρήνα ιζήματος, είτε σε μια γεωλογική τομή, μας επιτρέπει με τη βοήθεια στατιστικών μοντέλων, να μετατρέψουμε περαιτέρω βάθη σε ηλικίες. Έτσι, γνωρίζοντας τον χρόνο που πήρε να αποτεθεί μια ιζηματογενής ακολουθία, μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τον ρυθμό ιζηματογένεσης για μια περιοχή.

### **Παράδειγμα**

Σε πυρήνα γεώτρησης 5 μέτρων έχουν πραγματοποιηθεί οι ραδιοχρονολογήσεις που φαίνονται στον Πίνακα I.9.1. Με τη χρήση διορθωτικής καμπύλης κατασκευάστηκε ένα μοντέλο βάθους χρόνου όπως φαίνεται στην Εικόνα I.9.2.

Για να υπολογίσουμε τον ρυθμό ιζηματογένεσης για κάθε ιζηματολογική φάση (Unit 1,2,3,4,5) ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

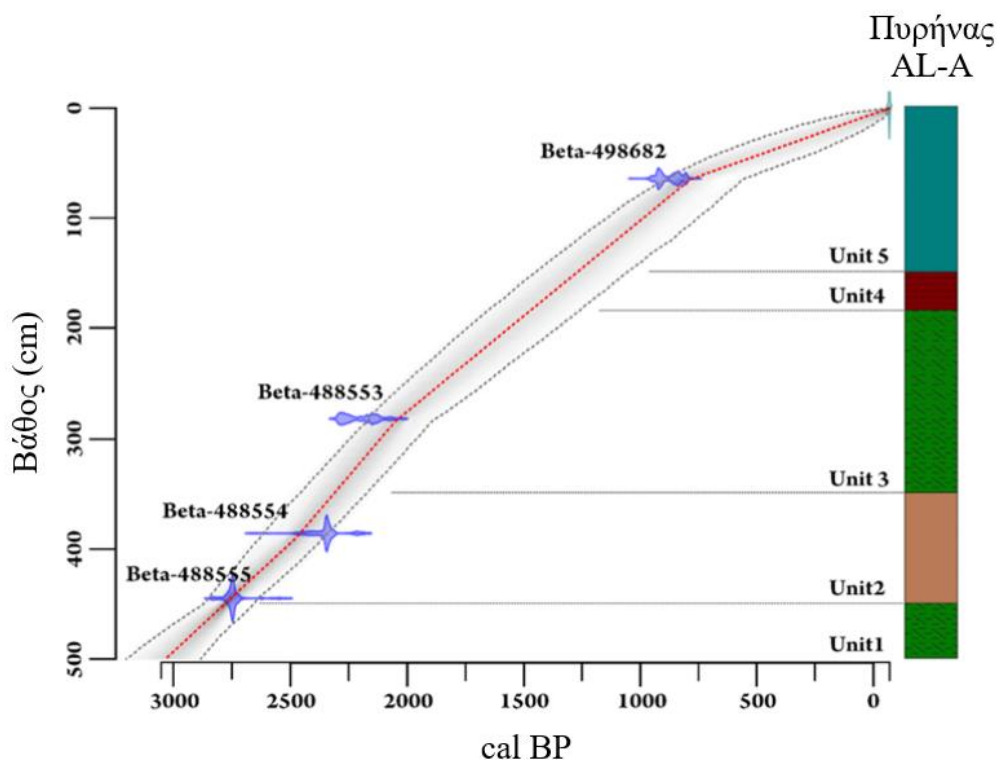
Το Unit 5 ορίζεται από το βάθος 0,00 m έως 1,50 m. Ταυτόχρονα η ηλικία του ορίζεται από ~0 cal BP, έως 1.400 cal BP. Άρα για να αποτεθούν 150 cm ιζήματος ο χρόνος που χρειάστηκε ήταν 1.400 χρόνια. Δηλαδή, σε έναν χρόνο αποτίθενται 0,10 cm. Τα 0,10 cm/yr είναι στην πραγματικότητα ο ρυθμός ιζηματογένεσης για αυτό το Unit.

Με την ίδια λογική υπολογίζουμε τον ρυθμό ιζηματογένεσης και για τα υπόλοιπα Unit.

Για τα Unit τα οποία βρίσκονται ανάμεσα σε άλλα, όπως π.χ. τα Unit 2,3,4, το βάθος το οποίο χρησιμοποιούμε μετριέται από την αρχή του Unit μέχρι το τέλος του και όχι από την αρχή του πυρήνα έως το τέλος του.

**Πίνακας I.9.1** Πίνακας ραδιοχρονολογήσεων για τον πυρήνα γεώτρησης. Από αριστερά προς τα δεξιά βλέπουμε: Όνομα δείγματος ραδιοχρονολόγησης, Βάθος δείγματος, τον τύπο του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε, κωδικός εργαστηρίου στο οποίο γίνεται η ανάλυση, αποτέλεσμα ανάλυσης, διορθωμένο αποτέλεσμα με τη χρήση της διορθωτικής καμπύλης.

ΟΝΟΜΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΒΑΘΟΣ (m)	ΤΥΠΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ	<sup>14</sup> C ΗΛΙΚΙΑ (BP)	cal yrs BP
AL-A 064	0,64	Κέλυφος	Beta-498682	980 ± 30	797-874
AL-A 282	2,82	Κέλυφος	Beta-488553	2170 ± 30	2219-2308
AL-A 386	3,86	Κέλυφος	Beta-488554	2330 ± 30	2309-2383
AL-A 445	4,45	Κέλυφος	Beta-488555	2620 ± 30	2726-2778

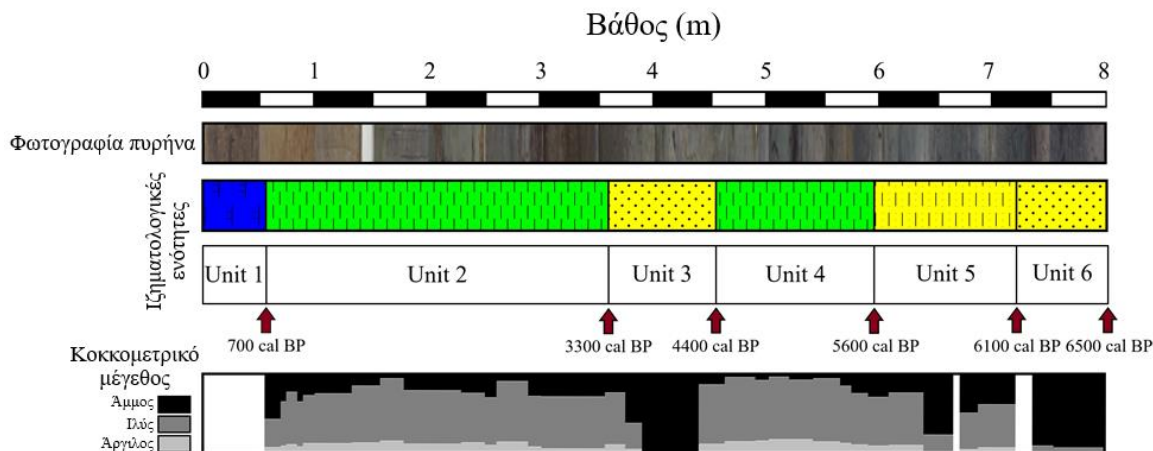


**Εικόνα I.9.2** Μοντέλο βάθους χρόνου για πυρήνα γεώτρησης 5 m με τις ιζηματολογικές φάσεις που διαχωρίστηκαν για τον πυρήνα.

Όπως βλέπουμε από το παραπάνω παράδειγμα, ο ρυθμός ιζηματογένεσης δεν είναι πάντα σταθερός και αυτό είναι κάτι απόλυτα φυσιολογικό, καθώς κάθε περιβάλλον ιζηματογένεσης που μελετάμε, δεν αποτελεί ένα κλειστό σύστημα ανεπηρέαστο από εξωγενείς και ενδογενείς παράγοντες. Υπάρχουν πληθώρα παραγόντων οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν τον ρυθμό ιζηματογένεσης μιας περιοχής. Χαρακτηριστικοί είναι: 1) ενεργός τεκτονική μιας περιοχής, 2) κλιματικές αλλαγές οι οποίες επηρεάζουν τον ρυθμό διάβρωσης στην περιοχή, 3) δυναμικά γεγονότα (τσουνάμι κ.λπ.), 4) ανθρωπογενής παρέμβαση κ.ά.

## ΑΣΚΗΣΗ 9

Σας δίνεται πυρήνας γεώτρησης 8 m όπως φαίνεται στην Εικόνα I.9.3 στον οποίο έχουν πραγματοποιηθεί 6 ραδιοχρονολογήσεις.



**Εικόνα I.9.3** Μητρώο πυρήνα ιζήματος 8 m στο οποίο (από πάνω προς τα κάτω) παρουσιάζονται: α) εικόνα του πυρήνα, β) Ιζηματολογικές ενότητες που χωρίστηκαν, γ) με κόκκινα βέλη οι ραδιοχρονολογήσεις που πραγματοποιήθηκαν και δ) η κοκκομετρική ανάλυση του πυρήνα.

Λεπτομερώς οι ραδιοχρονολογήσεις που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.9.2.

**Πίνακας I.9.2** Ραδιοχρονολογήσεις που πραγματοποιήθηκαν στον πυρήνα. Αναγράφονται ο κωδικός εργαστηρίου, Βάθος κάθε δείγματος, υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τη ραδιοχρονολόγηση, αποτέλεσμα μέτρησης (χρόνια πριν από σήμερα).

Κωδικός Εργαστηρίου	Βάθος (m)	Τύπος Δείγματος	cal yrs BP
Poz - 73359	0,56	C. mariscus seeds	700
Poz - 73360	3,59	C. mariscus & Carex sp. Seeds	3300
Poz - 73362	4,54	Najas sp. Seeds	4400
Poz - 73363	5,94	Charcoals	5600
Poz - 73364	7,2	C. mariscus & Carex sp. Seeds	6100
Poz - 73365	8	C. mariscus & Carex sp. Seeds	6500

Με τα δεδομένα τα οποία σας δίνονται:

**Ερώτημα 1.** Κατασκευάστε το μοντέλο βάθους χρόνου για τη συγκεκριμένη περιοχή.

**Ερώτημα 2** Υπολογίστε τον ρυθμό ιζηματογένεσης για κάθε μια από τις ιζηματολογικές ενότητες οι οποίες διαχωρίστηκαν στον πυρήνα.

**Ερώτημα 3.** Αναφέρατε σε ποια από τις ενότητες παρουσιάζεται ο υψηλότερος ρυθμός ιζηματογένεσης. Λαμβάνοντας υπόψιν την κοκκομετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε καθώς και ότι ο πυρήνας διατρήθηκε από λιμνοθάλασσα στη Δυτική Ελλάδα, αναφέρατε πιθανούς παράγοντες στους οποίους μπορεί να οφείλεται ο υψηλός ρυθμός ιζηματογένεσης.

## I.10 Άσκηση 10 – Στατιστική επεξεργασία δεδομένων

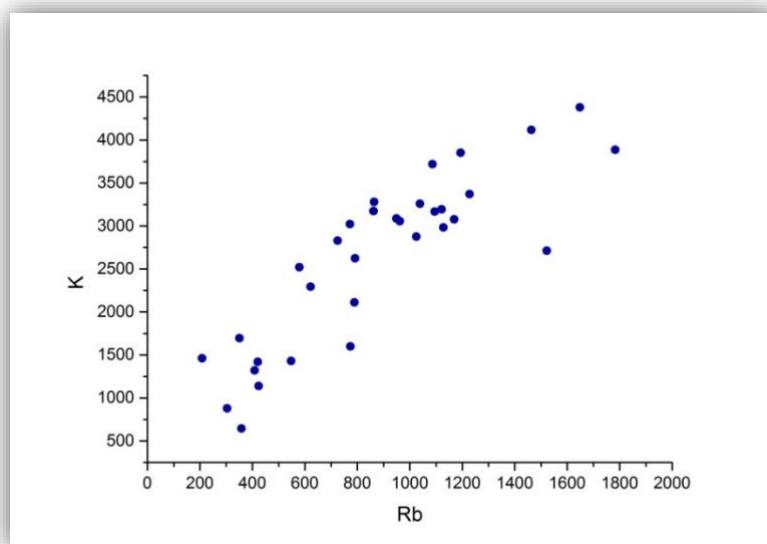
Στην προσπάθεια ερμηνείας διαφόρων αποτελεσμάτων που παράγονται από διάφορες μελέτες, δημιουργείται πολλές φορές η ανάγκη να ελέγξουμε πώς διάφορες μεταβλητές συσχετίζονται μεταξύ τους. Για να το κάνουμε αυτό είναι απαραίτητη η στατιστική επεξεργασία και η ανάλυση των δεδομένων μας.

Σε διάφορες επιστήμες όπως είναι οι Θετικές και οι Οικονομικές όπως επίσης και η Κοινωνιολογία και η Ψυχολογία, η στατιστική έχει τεράστια σημασία καθώς μας επιτρέπει να συνδέσουμε διάφορες μεταβλητές μεταξύ τους και να εξάγουμε συμπεράσματα για την αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών.

Ένας τρόπος για να αποκτήσουμε μια πρώτη εικόνα για το αν και πώς δύο μεταβλητές συσχετίζονται-συσχετίζονται, είναι να κατασκευάσουμε ένα διάγραμμα διασποράς (Scatter diagram) μεταξύ των παρατηρήσεων των δύο μεταβλητών.

### Διαγράμματα Διασποράς (Scatter diagram)

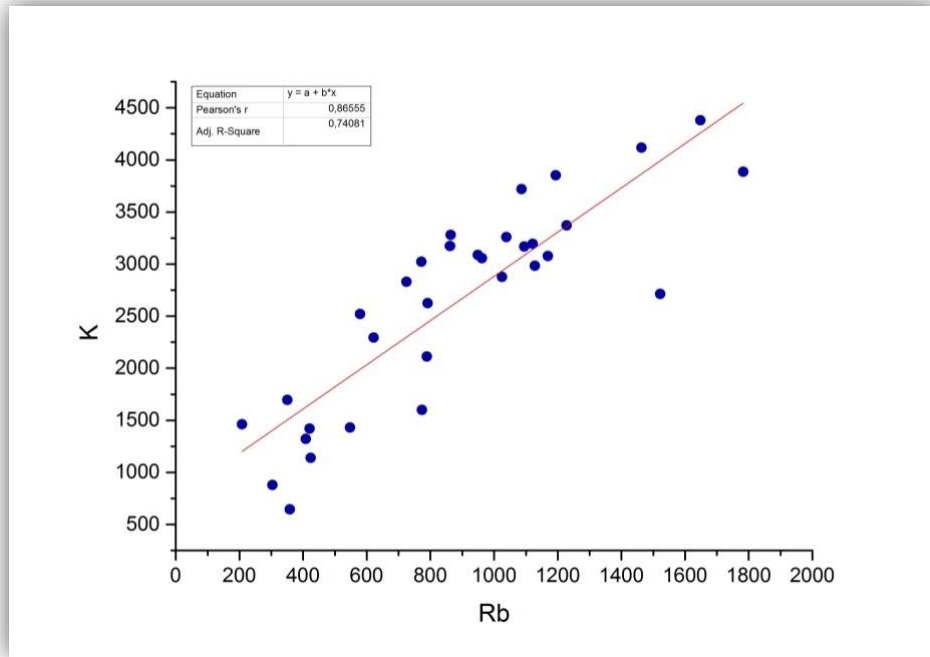
Όταν κατασκευάζουμε ένα διάγραμμα διασποράς και η διασπορά των σημείων είναι μικρή, τότε υπάρχει υψηλή συσχέτιση μεταξύ των παραγόντων που εξετάζουμε. Για παράδειγμα στην Εικόνα I.10.1 βλέπουμε ένα διάγραμμα διασποράς μεταξύ του Καλίου και του Ρουβιδίου, για ένα σύνολο μετρήσεων. Όπως βλέπουμε από το διάγραμμα και τη διασπορά των μετρήσεων, καταλαβαίνουμε πως τα δύο στοιχεία μεταξύ τους έχουν μια σχετικά ίδια κατανομή. Μπορούμε έτσι να συμπεράνουμε ότι υπάρχει μια **ανάλογη σχέση** μεταξύ των δύο μεταβλητών.



Εικόνα I.10.1 Διάγραμμα Διασποράς μεταξύ του K και Rb.

Η κλίση της διασποράς μπορεί να είναι μια ευθεία γραμμή, δηλαδή να υπάρχει μια γραμμική συσχέτιση των δεδομένων (**linear**) ή μπορεί να είναι και καμπυλόγραμμη (**Curvilinear**). Όταν η ευθεία γραμμή έχει πορεία από κάτω δεξιά του διαγράμματος προς επάνω δεξιά τότε υπάρχει Θετική συσχέτιση.





Εικόνα I.10.2 Διάγραμμα Διασποράς με τον συντελεστή γραμμικής συσχέτισης Pearson.

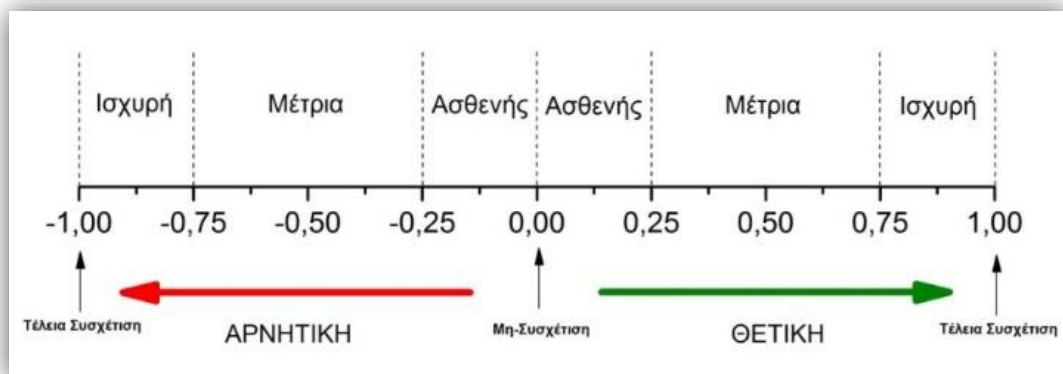
### Συντελεστής Γραμμικής Συσχέτισης Pearson

Είναι ένα αριθμητικό μέτρο ή δείκτης του μεγέθους της συσχέτισης μεταξύ δύο συνόλων τιμών. Κυμαίνεται σε μέγεθος από +1,00 έως -1,00 και δίνεται από τον τύπο που δίνεται παρακάτω.

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \cdot \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \cdot \bar{y}^2}}$$

Το πρόσημο + σημαίνει θετική συσχέτιση, δηλαδή οι τιμές μιας μεταβλητής αυξάνονται όταν αυξάνονται και της άλλης.

Το πρόσημο - σημαίνει αρνητική συσχέτιση, δηλαδή ότι οι τιμές μιας μεταβλητής αυξάνονται καθώς της άλλης μειώνονται.



Ανάλογα με το πλήθος των δεδομένων τα οποία εξετάζονται αλλάζει και η έννοια της στατιστικής σημαντικότητας. Η στατιστική σημαντικότητα είναι μια δήλωση της πιθανότητας να προκύψει ένας

συγκεκριμένος συντελεστής συσχέτισης για ένα δείγμα δεδομένων αν δεν υπάρχει συσχέτιση (δηλαδή αν η συσχέτιση είναι 0,00) στον πληθυσμό από τον οποίο λήφθηκε το δείγμα.

#### **Διαστήματα Εμπιστοσύνης**

Διάστημα Εμπιστοσύνης (Confidence Interval): Είναι ένα διάστημα που βασίζεται σε παρατηρήσεις ενός δείγματος και είναι καθορισμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει μια συγκεκριμένη πιθανότητα ότι θα περιέχει την άγνωστη πραγματική τιμή μιας παραμέτρου. Για παράδειγμα, συνηθίζεται ο καθορισμός διαστημάτων εμπιστοσύνης που έχουν 95% ή 99% πιθανότητα να περιέχουν την πραγματική τιμή.

Επίπεδο Εμπιστοσύνης (Confidence Level): Είναι ο βαθμός εμπιστοσύνης που συσχετίζεται με ένα διάστημα εμπιστοσύνης, δηλαδή η πιθανότητα ότι το διάστημα περιέχει την πραγματική τιμή της παραμέτρου.

Επίπεδο Σημαντικότητας (Level of Significance): Ισούται με 1-Επίπεδο Εμπιστοσύνης.

#### **ΑΣΚΗΣΗ 10**

Σε ένα παράκτιο περιβάλλον πραγματοποιήθηκε δειγματοληπτική γεώτρηση 8 m με σκοπό τη μελέτη της παλαιογεωγραφικής εξέλιξης της περιοχής. Κατά την ανάλυση του πυρήνα εκτελέστηκαν ιζηματολογικές και γεωχημικές αναλύσεις οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα που σας δίνεται.

**Ερώτημα 1.** Από τα δεδομένα τα οποία σας δίνονται υπολογίστε τον συντελεστή συσχέτισης **Pearson r** ανάμεσα στα εξής στοιχεία:

TOC-Silt, TOC-Clay, Clay-Rb, Clay-K, Sand-Silt, Sand-Clay, CaCO<sub>3</sub>-Ca, K-Ti, Rb-K, Ti-Rb, Mn-Fe.

**Ερώτημα 2.** Κατασκευάστε διαγράμματα διασποράς για τους παράγοντες Silt-Clay, Ti-K, Rb-K, Sand-Silt και Sand-Clay, στα οποία να εμφανίζεται η γραμμική συσχέτιση των παραγόντων καθώς και την καμπύλη εμπιστοσύνης για 95%.

**Ερώτημα 3.** Κατασκευάστε έναν πίνακα συσχετίσεων (**correlation matrix**) για τα στοιχεία του Πίνακα που σας δίνεται.

**Ερώτημα 4.** Λαμβάνοντας υπόψη πως τα δεδομένα προέρχονται από μια λιμνοθάλασσα, εξηγήστε τη συσχέτιση που προκύπτει ανάμεσα στους παράγοντες TOC-Clay, Sand-Silt και Rb-K.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

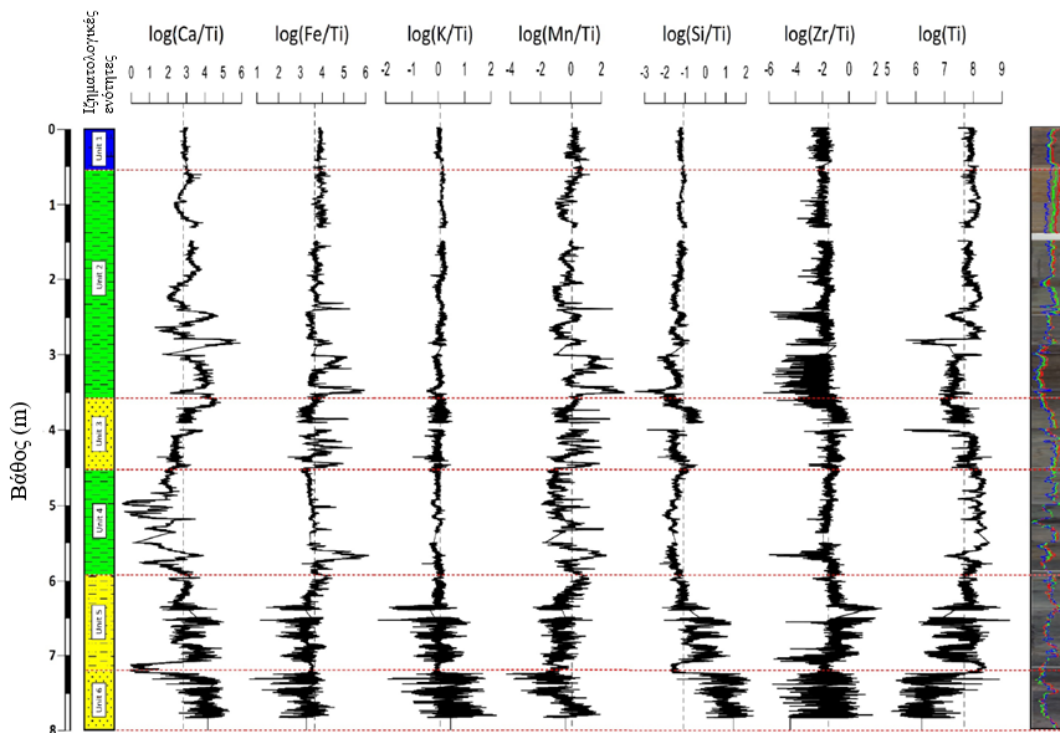
SAMPLES	DEPTH	SAND %	SILT %	CLAY %	TOC %	CaCO <sub>3</sub> %	Si	S	Cl	Ar	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Zn	Rb	Sr	Zr	Pb
A1	0.59	58.39	35.19	6.42	0.59	32.40	966	9	6	543	3259	55138	2627	4272	161600	830	517	1039	2203	456	837
A2	0.725	36.75	55.06	8.20	0.43	30.10	906	26	23	535	3078	71481	2573	1940	127869	790	692	1169	2390	502	904
A3	0.775	24.69	65.15	10.16	1.68	25.80	1008	20	22	600	3168	57156	2822	2608	146422	930	582	1095	2200	558	1083
A4	0.875	36.79	55.80	7.41	2.85	25.10	952	17	6	524	3719	47392	3291	2357	169586	928	741	1086	2006	666	1247
A5	0.975	28.79	59.76	11.45	0.68	20.10	919	27	241	504	2876	51225	2705	3193	134673	880	584	1025	2522	229	2204
A6	1.29	26.39	62.03	11.59	1.64	23.90	903	9	17	542	3172	80479	2575	3230	122129	1036	657	862	3376	376	1021
A7	1.54	16.46	71.26	12.27	2.38	32.20	747	17	22	451	3023	67090	2711	2838	111474	922	686	772	2873	408	1134
A8	1.735	7.30	78.11	14.58	2.01	32.50	721	8	90	537	3086	58740	2683	1471	103358	1007	590	949	2589	457	1345
A9	1.95	22.33	66.69	10.98	1.02	31.40	672	8	96	569	2830	72858	2206	2288	120116	862	545	725	2951	427	1094
A10	2.35	25.39	61.96	12.65	0.90	29.40	722	52	60	604	3371	52316	2856	1440	119303	950	588	1228	2396	394	991
A11	2.56	31.26	59.29	9.46	1.46	50.80	585	50	880	617	2295	92979	1927	2360	64226	704	952	622	2915	260	2189
A12	2.75	10.80	75.25	13.95	3.04	17.00	758	46	246	492	3280	57194	2963	1559	88918	966	537	864	3714	721	1583
A13	2.95	29.40	62.86	7.74	4.89	44.60	419	268	189	675	1431	93964	1245	938	53596	650	265	548	2564	475	1529
A14	3.16	29.82	64.71	5.47	2.36	44.50	298	200	37	589	1421	64722	1383	7591	88150	996	517	421	2491	80	1106
A15	3.61	24.77	64.76	10.47	3.43	51.70	308	183	80	523	1461	106214	1340	1921	57321	671	252	208	3629	175	1490
A16	3.825	62.73	32.45	4.82	0.65	20.30	958	57	12	551	2112	35457	1696	913	50177	816	525	789	3934	846	1317
A17	4.325	100.00	0.00	0.00	0.57	15.20	699	16	31	517	2983	28065	2981	3434	134118	697	443	1128	2297	1056	1303
A18	4.59	14.57	74.12	11.30	3.43	14.30	1189	23	55	522	3195	31756	3507	1560	89575	1051	706	1121	2292	986	1402
A19	4.795	5.19	80.02	14.79	2.72	12.50	944	56	271	544	3853	32596	3776	2253	119665	1064	745	1194	2221	878	1755
A20	4.96	8.69	75.79	15.52	2.25	8.90	693	34	8	654	2713	2657	3391	876	109467	1780	711	1522	720	732	939
A21	5.115	4.82	77.79	17.40	5.38	18.00	564	132	360	585	3885	5255	3916	1338	148860	1942	874	1783	960	689	1858
A22	5.23	8.13	74.34	17.53	6.66	2.80	774	7	7	523	4117	34023	3827	3042	142124	1013	817	1463	2073	704	421
A23	5.5	6.53	78.86	14.61	5.40	7.60	1208	49	193	429	4380	6256	5237	939	165236	2062	935	1648	1283	783	1970
A24	5.69	15.77	71.33	12.91	4.46	31.40	302	80	56	479	1600	53786	1386	10174	449387	557	41	774	1568	30	1015
A25	5.825	25.09	63.78	11.14	3.17	17.30	710	52	32	552	3057	25694	3141	3247	143366	797	502	962	1626	949	875
A26	5.945	29.70	60.57	9.73	1.09	23.50	674	240	606	517	2520	43810	2526	4452	142262	1280	458	579	2434	796	2378
A27	6.225	23.92	65.81	10.27	3.10	20.90	931	97	579	612	2624	41437	2645	1206	72238	693	563	792	2394	706	2249
A28	6.505	76.49	21.15	2.36	0.40	17.80	760	161	41	663	880	36042	1023	707	33703	262	206	304	1466	381	1603
A30	6.755	49.14	45.24	5.62	0.61	18.20	1918	213	63	554	1696	40422	2322	1893	34044	517	367	351	1977	1533	1416
A31	6.995	38.35	53.79	7.86	0.83	22.70	1332	322	84	624	1322	42086	1098	472	28839	421	260	409	2002	299	1216
A34	7.435	90.07	8.00	1.93	0.51	4.600	1686	1116	347	682	645	38119	547	201	13396	381	378	358	976	75	1764
A35	7.765	92.45	6.23	1.32	0.32	11.4	1697	1874	471	633	1140	36438	451	1165	15565	397	157	424	1304	185	1733

## I.11 Άσκηση 11 – Γεωχημικοί δείκτες ιζημάτων

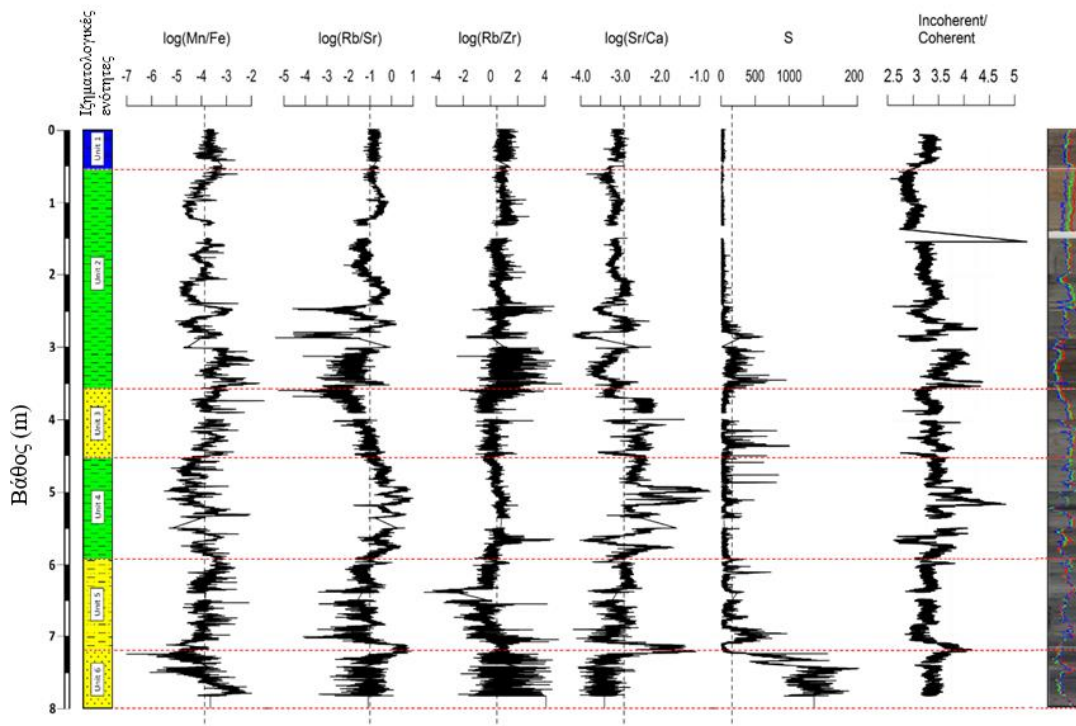
Σε μια Ιζηματολογική μελέτη, η χημική σύσταση των ιζημάτων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για την ερμηνεία όλων των διαδικασιών που έλαβαν χώρα κατά τη διαδικασία της ιζηματογένεσης. Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η χημική σύσταση των ιζημάτων είναι:

1. Ο τύπος του μητρικού πετρώματος.
2. Οι συνθήκες μεταφοράς και απόθεσης.
3. Οι διαγενετικές διαδικασίες που έδρασαν σε αυτά.

Κατά τη διαδικασία επεξεργασίας γεωχημικών αποτελεσμάτων έχει γίνει ευρέως διαδεδομένη η χρήση γεωχημικών λόγων (Εικόνα I.11.1, I.11.2), δηλαδή ο λόγος ενός στοιχείου με κάποιο άλλο, με σκοπό να χαρακτηριστούν οι αλλαγές οι οποίες παρατηρούνται σε πυρήνες ιζημάτων. Ο κάθε γεωχημικός λόγος μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για **αλλαγές στο κοκκομετρικό μέγεθος των ιζημάτων, κλιματικές αλλαγές που έλαβαν χώρα στη μελετώμενη περιοχή, ένταση χημικής αποσάθρωσης, αλλαγές σε οξειδωτικές και αναγωγικές συνθήκες κ.ά.**



Εικόνα I.11.1 Γεωχημικοί λόγοι στοιχείων με παράγοντα το Ti.



**Εικόνα I.11.2** Διάφοροι γεωχημικοί λόγοι οι οποίοι μπορεί να χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια μιας ιζηματολογικής έρευνας.

Όπως φαίνεται και στα παραπάνω σχήματα, σε κάθε μελέτη μπορούμε να χρησιμοποιούμε πληθώρα γεωχημικών λόγων με σκοπό να παρατηρήσουμε ποιοι από αυτούς μας παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για το μελετώμενο σύστημα.

Οι γεωχημικοί λόγοι τους οποίους θα χρησιμοποιήσετε στην παρούσα άσκηση είναι οι Mn/Fe, Si/Ti και Rb/Sr. Πιο συγκεκριμένα οι λόγοι αυτοί μας βοηθούν να αναγνωρίσουμε τις εξής αλλαγές:

**Mn/Fe:** Τα διαγράμματα κατανομής των στοιχείων Fe και Mn μας παρέχουν πληροφορίες για τις οξειδωτικές συνθήκες. Η καλή μείξη της υδάτινης στήλης έχει ως αποτέλεσμα την καλή οξυγόνωση των υδάτων. Γενικά αναερόβιες συνθήκες συμβαίνουν όταν τα ύδατα είναι θερμικώς και χημικώς στρωματοποιημένα. Οι οξειδωαναγωγικές συνθήκες μπορούν να επηρεαστούν από πολλούς παράγοντες όπως είναι το βάθος του νερού, η βιολογική παραγωγικότητα, η ταχεία απόθεση ιζήματος, καθώς και κλιματικοί παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η βροχόπτωση κ.ά. Σε ένα αναγωγικό περιβάλλον, η διαλυτότητα του Fe και Mn αυξάνεται, με το Mn να επηρεάζεται σε μεγαλύτερο ποσοστό από το Fe και ως αποτέλεσμα, μια αύξηση του λόγου Mn/Fe αποτυπώνει οξειδωτικές συνθήκες.

**Si/Ti:** Χρησιμοποιείται για τη μελέτη του κοκκομετρικού μεγέθους των ιζημάτων. Το Si συνδέεται με τα πιο αδρομερή κλάσματα σε έναν τυρήνα (άμμος), ενώ το Ti συνδέεται με τα λεπτότερα κλάσματα (ιλύς).

**Rb/Sr:** Το Ρουβίδιο στα ιζήματα συνήθως συνυπάρχει με το Κάλιο μέσα σε Καλιούχα ορυκτά όπως είναι οι καλιούχοι Άστριοι, ο Βιοτίτης κ.ά. Το Στρόντιο από την άλλη μεριά τείνει να εμπλουτίζει ασβεστιτικά ορυκτά όπως είναι για παράδειγμα ο ασβεστόλιθος, καθώς και πυριτικά ορυκτά πλούσια σε Ασβέστιο όπως είναι η κεροστίλβη, τα πλαγιόκλαστα κ.ά. Καθώς τα Ασβεστιτικά ορυκτά υπόκεινται πιο εύκολα στη διάβρωση σε σύγκριση με τα Καλιούχα ορυκτά, τα ζεύγη K-Rb και Ca-Sr είναι εύκολο να κλασματοποιηθούν και να χρησιμοποιηθούν για την ένταση φυσικοχημικών διαδικασιών. Συγκεκριμένα στην άσκηση τον λόγο Rb/Sr χρησιμοποιήστε τον σαν δείκτη έντασης χημικής αποσάθρωσης και κατ' επέκταση σαν δείκτη κλιματικών συνθηκών. Η αύξηση του λόγου υποδεικνύει πιο υγρές συνθήκες ενώ η μείωση πιο ξηρές συνθήκες.



## ΑΣΚΗΣΗ 11

Σε παράκτιο περιβάλλον της Νοτιοδυτικής Ελλάδας πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία βάθους 8 μέτρων με σκοπό την παλαιογεωγραφική/παλαιογεωμορφολογική και παλαιοκλιματική εξέλιξη της περιοχής. Στον Πίνακα που σας δίνεται παρουσιάζονται το όνομα του δείγματος με τα αντίστοιχα βάθη, το κοκκομετρικό μέγεθος (Mean Size) καθώς και 6 διαφορετικά στοιχεία που μετρήθηκαν μέσω στοιχειακής ανάλυσης με XRF core scanner.

**Ερώτημα 1.** Κατασκευάστε διαγράμματα κατανομής για τα: Depth - Mean Size, Depth -  $\log(\text{Si/Ti})$ , Depth -  $\log(\text{Mn/Fe})$ , Depth -  $\log(\text{Rb/Sr})$ .

**Ερώτημα 2.** Κατασκευάστε ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα με τους παραπάνω γεωχημικούς λόγους και το κοκκομετρικό μέγεθος μαζί. Στη συνέχεια αναφέρετε όλες τις διακυμάνσεις που παρατηρείται στους λόγους και γιατί συμβαίνουν.

**Ερώτημα 3.** Σας δίνονται οι εξής ραδιοχρονολογήσεις:

Κωδικός Δείγματος	Βάθος (cm)	Τύπος Δείγματος	$^{14}\text{C}$ AMS BP	cal yrs BP
Poz-73359	181	<i>C. mariscus</i> seeds	2225±30	2207
Poz-73360	291	<i>C. mariscus</i> & <i>Carex</i> sp. Seeds	2985±30	3246
Poz-73362	362	<i>Najas</i> sp. seeds	3080±35	3310
Poz-73363	537	Charcoals	46220±35	5385
Poz-73364	729	<i>C. mariscus</i> & <i>Carex</i> sp. Seeds	5380±40	6172

Αρχικά τοποθετήστε τις ραδιοχρονολογήσεις δίπλα στη στήλη του βάθους. Στη συνέχεια για την κατανομή του Rb/Sr αναγνωρίστε σε ποια σημεία καταγράφονται οι ακραίες τιμές. Χρονικά σε ποια στιγμή φαίνεται να έχουμε τις πιο ακραίες κλιματικές συνθήκες; **Ποια είναι αυτή η περίοδος;**

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

SAMPLES	DEPTH	Mean Size	Si	Ti	Mn	Fe	Rb	Sr
A1	0.59	3.678	966	2627	4272	161600	1039	2203
A2	0.725	4.863	906	2573	1940	127869	1169	2390
A3	0.775	5.891	1008	2822	2608	146422	1095	2200
A4	0.875	5.445	952	3291	2357	169586	1086	2006
A5	0.975	6.193	919	2705	3193	134673	1025	2522
A6	1.29	6.224	903	2575	3230	122129	862	3376
A7	1.54	6.315	747	2711	2838	111474	772	2873
A8	1.735	6.890	721	2683	1471	103358	949	2589
A9	1.95	6.122	672	2206	2288	120116	725	2951
A10	2.35	6.265	722	2856	1440	119303	1228	2396
A11	2.56	5.640	585	1927	2360	64226	622	2915
A12	2.75	6.819	758	2963	1559	88918	864	3714
A13	2.95	4.781	419	1245	938	53596	548	2564
A14	3.16	4.833	298	1383	7591	88150	421	2491
A15	3.61	5.869	308	1340	1921	57321	208	3629
A16	3.825	4.347	958	1696	913	50177	789	3934
A17	4.325	2.710	699	2981	3434	134118	1128	2297
A18	4.59	6.051	1189	3507	1560	89575	1121	2292
A19	4.795	6.832	944	3776	2253	119665	1194	2221
A20	4.96	6.825	693	3391	876	109467	1522	720
A21	5.115	7.191	564	3916	1338	148860	1783	960
A22	5.23	7.172	774	3827	3042	142124	1463	2073
A23	5.5	6.732	1208	5237	939	165236	1648	1283
A24	5.69	6.414	302	1386	10174	449387	774	1568
A25	5.825	5.911	710	3141	3247	143366	962	1626
A26	5.945	5.362	674	2526	4452	142262	579	2434
A27	6.225	5.639	931	2645	1206	72238	792	2394
A28	6.505	2.198	760	1023	707	33703	304	1466
A30	6.755	4.313	1918	2322	1893	34044	351	1977
A31	6.995	4.821	1332	1098	472	28839	409	2002
A34	7.435	2.330	1686	547	201	13396	358	976
A35	7.765	1.905	1697	451	1165	15565	424	1304

## I.12 Άσκηση 12 – Ισοπαχείς και φασικοί χάρτες

Στον παρακάτω Πίνακα 11.12.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα 32 γεωτρήσεων από την περιοχή Great Plains των Η.Π.Α και του Καναδά. Στον πίνακα αναγράφονται οι λιθολογίες (σχιστόλιθος, ψαμμίτης, ανθρακικά πετρώματα και εβαπορίτες) καθώς και το συνολικό πάχος των σχηματισμών.

**Ερώτημα 1.** Να υπολογίσετε τους δείκτες «clastic ratio» (CR) και «evaporite ratio» (ER).

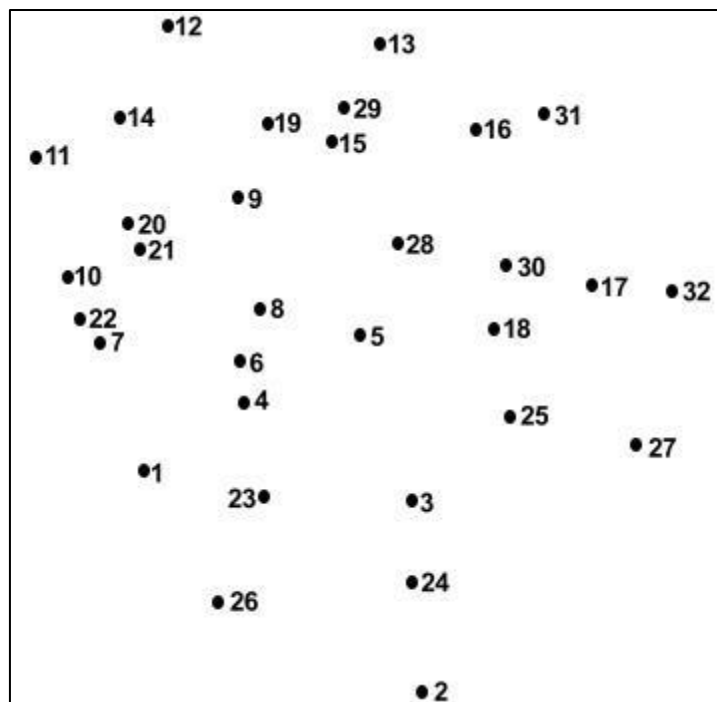
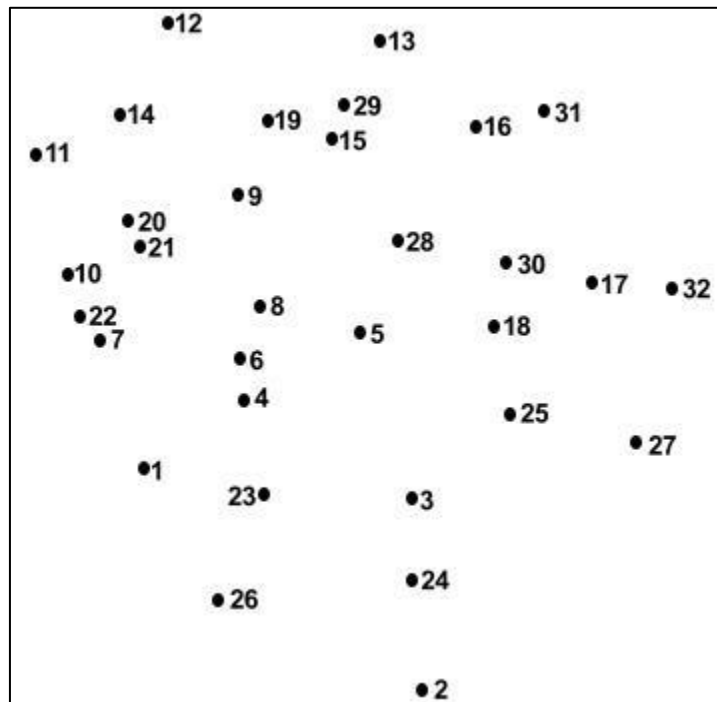
**CR (clastic ratio) = sandstone + shale / carbonate + evaporite**

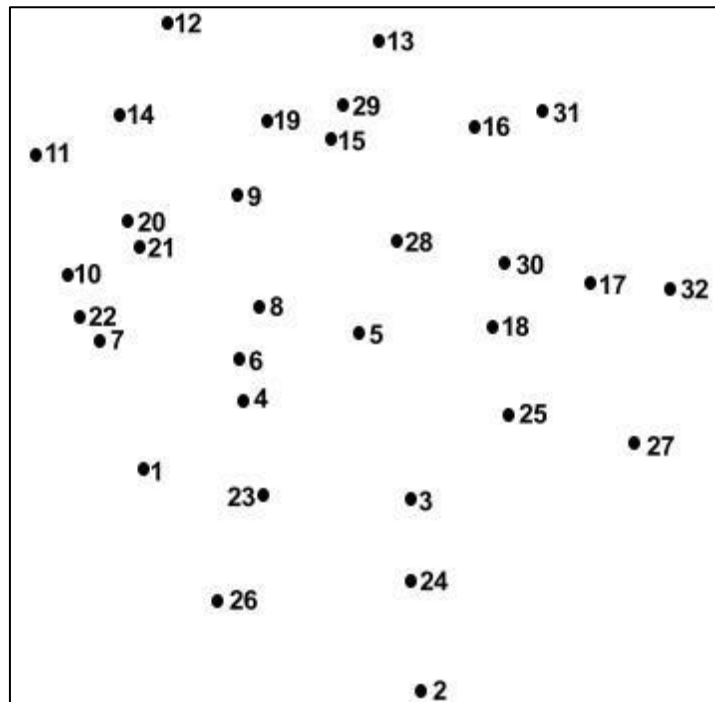
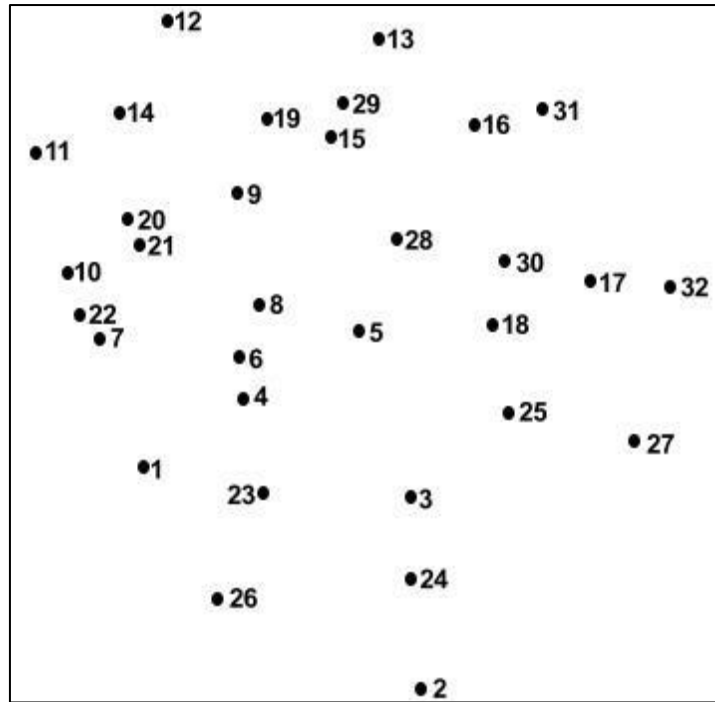
**ER (evaporate ratio) = carbonate / evaporite**

**Πίνακας I.12.1** Συνολικό πάχος γεωτρήσεων και υπαρχόντων λιθολογιών.

Drill number	Total thickness (m)	Shale (m)	Sandstone (m)	Carbonate (m)	Evaporite (m)	Clastic ratio	Evaporite ratio
1	52	10	3	33	6		
2	133	25	10	82	16		
3	550	60	23	118	349		
4	420	42	21	89	268		
5	740	50	24	100	566		
6	160	20	4	116	20		
7	85	16	5	54	10		
8	490	41	18	73	358		
9	746	51	26	101	568		
10	240	35	10	70	125		
11	651	40	11	150	450		
12	157	10	3	124	20		
13	120	28	10	71	11		
14	310	30	12	179	89		
15	340	35	17	189	99		
16	140	10	4	113	13		
17	150	16	6	112	16		
18	360	42	19	75	224		
19	550	60	28	140	322		
20	450	38	7	134	271		
21	220	18	6	163	33		
22	140	11	4	100	25		
23	253	31	10	142	70		
24	345	29	6	176	134		
25	190	12	7	130	41		
26	110	21	7	62	20		
27	140	21	14	63	42		
28	400	30	10	151	209		
29	195	15	5	145	30		
30	197	16	4	133	44		
31	44	3	1	33	7		
32	41	4	1	32	4		

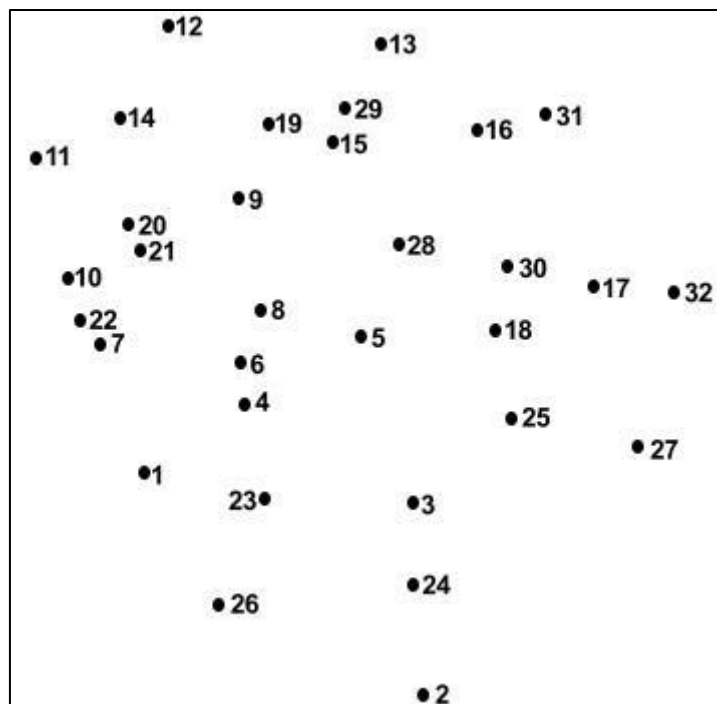
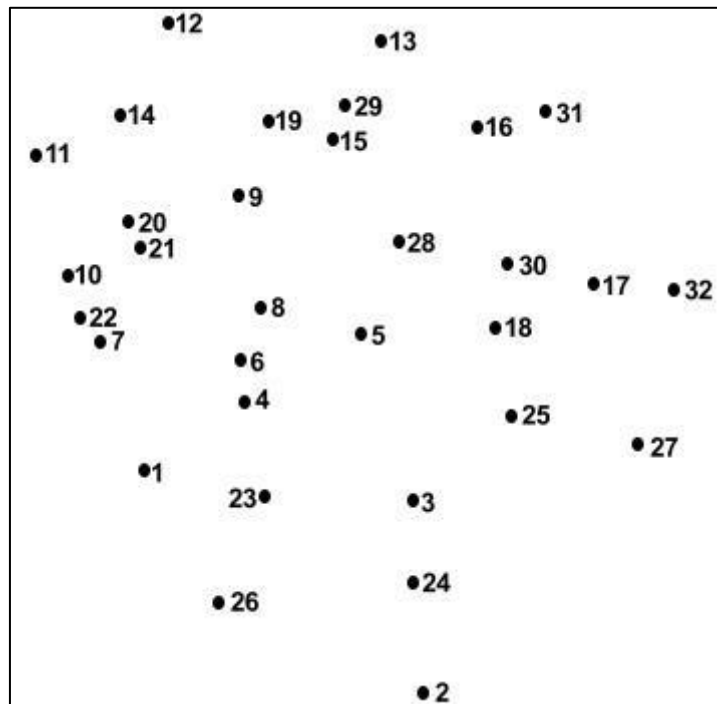
Ερώτημα 2. Να κατασκευαστεί ο χάρτης των ισοπαχών για κάθε λιθολογία.







**Ερώτημα 3.** Να σχεδιαστούν οι φασικοί χάρτες με βάση το **CR** και το **ER**.



## Ξενόγλωσσοι όροι

<b>A</b>	
accommodation space	διαθέσιμος χώρος
aeolian carbonates	αιολικοί ασβεστόλιθοι
Age-Depth model	Μοντέλο Βάθους Χρόνου
aggradation	επισώρευση
algae bloom	άνθιση των φυκιών
algal mats	επίπεδες αναπτύξεις φυκών
Allostratigraphy	Αλλοστρωματογραφία
aquatic settings	υδάτινα περιβάλλοντα
arctan	εφαπτομένη τόξου
ash plumes	σύννεφα τέφρας
atolls	ατόλλες
<b>B</b>	
backshore	οπισθοαιγιαλός
backwash	αντίστροφη έκπλυση
bank deposits	αποθέσεις στις όχθες των καναλιών
bar built estuaries	φραγματοειδείς ποταμόκολποι
barrier island	νησιωτικός φραγμός
barrier reefs	ύφαλος-φράγμα
barrier spit	χαλικώδης βραχίονας
bay	κόλπος
beach	παραλία
beach berm	αμμώδης λωρίδα/αυχένας
bed load	φορτίο επί της στρώσεως
bedding plane	οριακές επιφάνειες στρώσης
bimodal	διτυπικός
biogenic sedimentary structures	βιογενείς ιζηματοδομές
bioturbation	βιοανάδευση/βιοαναμόχλευση
blind estuaries	τυφλοί ποταμόκολποι
borings	οπές (στοές) που έχουν διανοιχτεί μέσα σε σκληρό υπόστρωμα
bottomset	σειρά πυθμένα
braided	πλεξοειδής ή δικτυωτός
braided river	πλεξοειδής ποταμός
breaker zone	ζώνη θραύσης
burrows	οπές (στοές) που έχουν διανοιχθεί μέσα σε χαλαρό ίζημα
buttress zone	αντιτοίχισμα
<b>C</b>	
C-factory	εργοστάσιο ψυχρού νερού
CWC-factory	κοραλλιογενές εργοστάσιο ψυχρού νερού
caliche	ασβεστιτικά συγκρίματα
carbonate factory	εργοστάσιο παραγωγής ανθρακικού υλικού
cave carbonates	ανθρακικές αποθέσεις σπηλαίων
channel	κανάλι
channel deposits	αποθέσεις ποτάμιας αύλακας
chute	αύλακες

clast supported	κοκκοστηριζόμενο
Clay	άργιλος
clay flames	αργλικές φλόγες
clay lumps	αργλικές μπάλες
claystone	αργιλόλιθος
clinoforms	κλινομορφές
coast	ακτή
coastal marshes	παράκτια έλη
coastal plain estuaries	παράκτιοι επίπεδοι ποταμόκολλοι
cobbles	λιθάρια
Confidence Interval	Διάστημα Εμπιστοσύνης
Confidence Level	Επίπεδο Εμπιστοσύνης
Conglomerates	κροκαλοπαγές
conglomerate polymictic	κροκαλοπαγές πολύμεικτο
consistency ratio	Λόγος συνοχής
copropel	κοπρανοπηλός
correlation matrix	πίνακας συσχετίσεων
crests	κορυφές
crevasse-splay	αποθέσεις διάρρηξης
cusplate	οδοντωτός
cusplate barrier	οδοντωτός/γωνιώδης φραγμός
<b>D</b>	
debris flows	ροές κορημάτων
delta front	μέτωπο του δέλτα
delta plain	δελταϊκό πεδίο
delta slope	δελταϊκή κατωφέρεια
deltaic estuaries	δελταϊκοί ποταμόκολλοι
deltaic fan	δελταϊκά ριπίδια
density currents	ρεύματα πυκνότητας
density stratified	στρωματωμένοι με βάση τη διαφορά πυκνότητας
diastem	διάστημα
distal part	κατάντη/απότερη πλευρά
double tombolo	διπλό «tombolo»
dune	αμμόλοφος/θίνα
<b>E</b>	
early lowstand systems tract - ELST	υποσύστημα πρώιμης χαμηλής στάθμης
ebb currents	ρεύματα αμψώτιδος
environments of equilibrium	περιβάλλοντα ισορροπίας
environments of net deposition	περιβάλλοντα καθαρής απόθεσης
environments of net erosional	περιβάλλοντα καθαρής διάβρωσης
ergs	θάλασσες άμμου
escape structures	δομές διαφυγής
estuaries	ποταμόκολλοι
<b>F</b>	
Facies model	Μοντέλο φάσεων
fairweather wave base	βάση των κυμάτων του καλοκαιριού
Falling Stage Systems Tract and Sequence Boundary Formation	υποακολουθίες πτωτικής στάθμης της θάλασσας και σχηματισμού ορίων ακολουθίας

fan apex	κορυφή ριπιδίου
fan head	κεφαλή ή ανώτερη ριπιδιακή ζώνη
feeder canyon	κανάλι τροφοδοσίας
fine ash	ηφαιστειακή τέφρα
Fjards	φιάρδ
Fjords	φιόρδ
flame structures	φλογοδομές
flaser	Παρεμβαλλόμενη στρώση
floatstones	πλωτόλιθοι
flood currents	Ρεύματα πλήμμης
flood plain	πεδιάδα πλημμύρας
flute casts	εκμαγεία αυλού
foraminifera	τρηματοφόρα
foreset	σειρά προέλασης
fringing reefs	κροσσωτοί ύφαλοι
<b>G</b>	
Gilbert type delta	δέλτα τύπου Gilbert
glacial carbonates	παγετώδεις ασβεστόλιθοι
glacial ice	κινούμενος παγετώνας
glaciers	παγετώνες
gradational	βαθμιαία
grain size analysis	κοκκομετρική ανάλυση
grainstone	κοκκόλιθοι
graphical vector mean	γραφικός ανυσματικός μέσος
gravel	χάλικες
<b>groove casts</b>	αυλακώσεις
<b>H</b>	
herringbone	ψαροκόκκαλο
hiatus	Στρωματογραφικό κενό
high tide	υψηλή παλίρροια
Highstand systems tracts	υποακολουθία υψηλής στάθμης
hummocky	λοφοειδής
hummocky cross stratification	λοφοειδής διασταυρούμενη στρώση
<b>I</b>	
Ichnology	Ιχνολογία
inlets	δίαυλοι
Intergovernmental Panel for Climatic Change – IPCC	Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή
International Association of Sedimentologists	Διεθνής Ένωση Ιζηματολόγων
intertidal flats	μεσοπαλιρροϊκές πεδιάδες
intertidal zone	μεσο-παλιρροϊκή ζώνη
Ice rafting	Σχεδία πάγου
<b>L</b>	
lagoons	λιμνοθάλασσες
laminations	ελασματώσεις
lapilli	λάπιλλοι
lapilli tuffs	τόφοι λαπίλλων
lateral accretion	πλευρική προσαύξηση
lee side	κατάντη (της ροής)

lenticular	φακοειδής
lenticular bedding	φακοειδής στρώση
Level of Significance	Επίπεδο Σημαντικότητας
line-of-movement data	Δεδομένα γραμμής κίνησης
little ice ages	μικρές εποχές των παγετώνων
load casts	σφαιροειδή εκμαγεία φορτίου
loess	Loess (ασβεστούχος πηλός)
longshore bar	επιμηκυμένοι φραγμοί
longshore currents	επιμήκη προς την ακτή ρεύματα/παράκτια ρεύματα
looped barrier	φραγμός «θηλιά»
low tide	χαμηλή παλίρροια
lowstand system tracts-LST	υποακολουθίες χαμηλής στάθμης
<b>M</b>	
M-factory	εργοστάσιο μικροβίων/ιλύος
matrix supported	πηλοστηριζόμενο
mean lower high water	μέση χαμηλή στάθμη του νερού
meander	μαιανδρικός
meander river	μαιανδρικοί τύπος ποταμών
megaripples	μεγάλες ρυτιδώσεις
modal class	τυπική κλάση/κλάση του τύπου
moraines	μοραίνες
mud cracks	αργιλικές ρωγμές
mud flow	ιλυροή
mudstone	πηλίτες
<b>N</b>	
natural levee	φυσικό ανάχωμα
nearshore zone	περιπαράλια ζώνη
<b>O</b>	
offshore	σε απόσταση από την ακτή
onshore	κοντά προς την ακτή
oozes	όζοι
orientation	προσανατολισμός
overbank deposits	παρόχθιες αποθέσεις
<b>P</b>	
P-factory	πλαγκτονικό εργοστάσιο
packing	συνεκτικότητα
packstones	πακτόλιθοι
palustrine carbonates	παλουστρικές ανθρακικές αποθέσεις
pans	κοιλώματα
partially mixed	μερικής στρωμάτωσης
particle size	κοκκομετρικό μέγεθος
peat	Στρώμα τύρφης
pedogenic carbonates	πεδογενετικοί ασβεστόλιθοι
pellets	συσσωματώματα
planar lamination	επίπεδη ελασματοειδής ανάπτυξη
plant material	φυτικά υπολείμματα
plant rootlet	αποτυπώματα από ρίζες φυτών
pocket barrier	φραγμός «τσέπης»



point bar	ακραίος φραγμός
polymodal	πολυτυπικός
pool	αύλακα/δεξαμενή
probability	πιθανότητα
prodelta	προδελταϊκή περιοχή
progradation	προέλαση
proximal part	το εγγύτατο τμήμα
pumice	ελαφρόπετρα
pumice rafting	Σχεδία ελαφρόπετρας
pyroclastic surges	πυροκλαστικές εκρήξεις
<b>R</b>	
rain drops	εντυπώματα βροχής
ramp	ανθρακικές ράμπες
recent stromatolites	σύγχρονοι στρωματόλιθοι
reef	ύφαλος
regressive	αποσυρσιγενή
retrogradation	αναδρομή
rias	ρίας
ridge	ράχη/κορυφογραμμή
rimmed platform	πλατφόρμες με περιθώριο
ripples	ρυτιδώσεις
runnel	στενή λεκάνη
rock flour	πούδρα πετρωμάτων
roundness	στρογγυλότητα
<b>S</b>	
saltern	αλκή
sampling	δειγματοληψία
sand	άμμος
sand dunes	αμμόλοφοι/αμμοθίνες
sand seas	θάλασσες άμμου
sandstone	ψαμμίτης
sandy tidal flats	αμμώδη παλιρροϊκά πεδία
Scatter diagram	διάγραμμα διασποράς
scour marks	δομές τριβής
sectionally homogeneous	τμηματική ομογενοποίηση
sedimentary environment	ιζηματογενές περιβάλλον
sequence boundaries	όρια ακολουθίας
Sequence Stratigraphy	Στρωματογραφία Ακολουθιών
sharp	απότομος
shoreface	επάκτια ζώνη/μέτωπο ακτής
silt	ιλύς
shelf break	σπάσιμο της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας
siltstone	ιλυόλιθος
size distribution	κοκκομετρική κατανομή
slumps	συνιζηματογενείς πτυχώσεις
sole marks	δομές βάσης ή πυθμένα
sorting	ταξιθέτηση
sphericity	σφαιρικότητα

standard deviation	διασπορά των δεδομένων
storm beach	παραλία θυέλλης
storm wave base	βάση των κυμάτων καταιγίδας
stoss side	ανάτη (του ποταμού)
straight	ευθύς / ευθύγραμμος
stromatolites	στρωματόλιθοι
suspension	αιώρηση
subtidal	υπο - παλιρροιακά
subtidal zone	υπο-παλιρροϊκή ζώνη
supratidal flats	επιπαλιρροϊκές πεδιάδες
supratidal zone	επι-παλιρροϊκή ζώνη
surf zone	ζώνη κυματωγής ή απόσβεσης
surface texture	επιφανειακή υφή
suspended load	φορτίο εν αιωρήσει
swash zone	ζώνη διαβροχής
systems tracts	υποσυστήματα – υποακολουθίες
<b>T</b>	
T-factory	τροπικό εργοστάσιο
tabular	πινακοειδής
tangent	εφαπτομένη
tappis algal	ταπέτα φυκών
tidal flats	παλιρροϊκές πεδιάδες
tide-dominated	κυριαρχούνται εξ ολοκλήρου από παλίρροιες
toe fan	κατώτερη ριπιδιακή ζώνη
tool marks	δομές εργαλείων
topset	η άνω σειρά
trace fossils	ιχνοαπολιθώματα
trails	ίχνη συνεχούς μετακίνησης
transgressive	επικλυσιογενή
transgressive surface – TS	επικλυσιογενής επιφάνεια
Transgressive systems tracts	επικλυσιογενής υποακολουθία
trough	σκαφοειδής
tuff	τόφος
<b>U</b>	
unimodal	μονοτυπικός
uplift	ανύψωση μιας περιοχής
upwelling	ανάβλυση
<b>V</b>	
vector mean	ανυσματικός μέσος
vertebrate foot prints	πατημασιές μεμονωμένες σπονδυλωτών
vertically homogeneous	Κάθετα ομογενής
<b>W</b>	
wackestone	βακόλιθοι
wave bedding	κυματοειδής στρώση
wave dominated	κυματογενή παράκτια περιβάλλοντα
wavy	κυματοειδής





Το σύγγραμμα «Ιζηματολογία – Περιβάλλοντα Ιζηματογένεσης» καλύπτει τις απαιτήσεις τόσο του προπτυχιακού μαθήματος όσο και των μεταπτυχιακών μαθημάτων, δίνοντας το υπόβαθρο σε θέματα μεθοδολογίας και γνώσεων που απαιτούνται για μια ολιστική θεώρηση των Περιβαλλόντων Ιζηματογένεσης σήμερα. Κύριος στόχος είναι να εισαγάγει, αρχικά, σε βασικές έννοιες της Ιζηματολογίας. Οι ιζηματογενείς διεργασίες, καθώς και η περιγραφή – ανάλυση των ιζηματογενών περιβαλλόντων και των φάσεων καλύπτονται λεπτομερέστερα μέσα από δέκα κεφάλαια. Το βιβλίο ολοκληρώνεται με ένα κεφάλαιο, το οποίο περιλαμβάνει δώδεκα εργαστηριακές ασκήσεις για τους φοιτητές, οι οποίες καλύπτουν την ύλη του βιβλίου.

**Το παρόν σύγγραμμα δημιουργήθηκε στο πλαίσιο του Έργου ΚΑΛΛΙΠΟΣ+**

<b>Χρηματοδότης</b>	Υπουργείο Παιδείας και Θρησκευμάτων, Προγράμματα ΠΔΕ, ΕΠΑ 2020-2025
<b>Φορέας υλοποίησης</b>	ΕΛΚΕ ΕΜΠ
<b>Φορέας λειτουργίας</b>	ΣΕΑΒ/Παράρτημα ΕΜΠ/Μονάδα Εκδόσεων
<b>Διάρκεια 2ης Φάσης</b>	2020-2023
<b>Σκοπός</b>	Η δημιουργία ακαδημαϊκών ψηφιακών συγγραμμάτων ανοικτής πρόσβασης (περισσότερων από 700) <ul style="list-style-type: none"><li>• Προπτυχιακών και μεταπτυχιακών εγχειριδίων</li><li>• Μονογραφιών</li><li>• Μεταφράσεων ανοικτών textbooks</li><li>• Βιβλιογραφικών Οδηγών</li></ul>
<b>Επιστημονικά Υπεύθυνος</b>	Νικόλαος Μήτρου, Καθηγητής ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ

ISBN: 978-618-228-011-9 DOI: <http://dx.doi.org/10.57713/kallipos-240>

Το παρόν σύγγραμμα χρηματοδοτήθηκε  
από το Πρόγραμμα Δημοσίων Επενδύσεων του Υπουργείου Παιδείας.