



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΙΣΤΟΡΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΑΛΑΙΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σεισμική στρωματογραφία του Στρυμονικού
Κόλπου, του Κόλπου του Ορφανού και του
Κόλπου της Ιερισσού, Βόρειο Αιγαίο, Ελλάδα

Αντώνιος Χ. Λάσκος

1114 2015 00057

Επιβλέπων: Γεώργιος Αναστασάκης, Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2021



HELLENIC REPUBLIC
National and Kapodistrian University of Athens
Faculty of Geology and Geoenvironment
Section of Historical Geology and Palaeontology

BACHELOR THESIS

Seismic stratigraphy of the Strymonikos Gulf,
Orfanos Gulf and Ierissos Gulf, North Aegean Sea,
Greece

Antonios C. Laskos

1114 2015 00057

Supervisor: Georgios Anastasakis, Professor

Athens, July 2021

©Copyright by Antonios Laskos, 2021
All Rights Reserved

Περίληψη

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, έχοντας δεδομένα τρεις σεισμικές τομές από το Βόρειο Αιγαίο, δυτικά της Θάσου και συγκεκριμένα από τον Κόλπο του Ορφανού, της Ιερισσού και του Στρυμόνα, παρουσιάζεται η εξέλιξη και η στρωματογραφική ανάλυση των περιοχών αυτών. Κύριος σκοπός είναι η σειμοστρωματογραφική ανάλυση των σεισμικών τομών και ο διαχωρισμός σε σεισμικές ακολουθίες με βάση τις προηγούμενες γεωλογικές μελέτες που έχουν γίνει τόσο σε ξηρά όσο και θάλασσα.

Η συσχέτιση των στρωματογραφικών ευρημάτων στην λεκάνη του Στρυμόνα με αυτών στον κόλπο του Ορφανού, ακόμα και με τη λεκάνη του Πρίνου, είναι αναγκαία καθώς μόνο έτσι είναι δυνατή η πληρέστερη εικόνα για την εξέλιξη της περιοχής μελέτης. Κύριο ρόλο στην κατανόηση των δομών που κυριαρχούν στους δύο αυτούς κόλπους, έχουν οι επαφές άνω Μειόκαινου-Πλειόκαινου, η διαβρωμένη επιφάνεια του Μεσσήνιου δηλαδή, καθώς και η επαφή Πλειόκαινου-Πλειστόκαινου σε συνδυασμό με τις πληροφορίες που έχουμε για την παλαιογεωγραφική εξέλιξη των Νεογενών λεκανών στην περιοχή.

Στον Στρυμονικό Κόλπο παρατηρείται η εμφάνιση μεγάλου πάχους ιζημάτων, κάτω από την επιφάνεια διάβρωσης του Μεσσήνιου, παρόμοια με της λεκάνης του Πρίνου. Σε συνδυασμό με δομές downlap και περαιτέρω πληροφορίες μπορεί να αναφερθεί ότι το περιβάλλον απόθεσης ήταν ρηχής θάλασσας έως δελταϊκό κατά το Πλειόκαινο και αρχές Τεταρτογενούς. Τέλος, δεδομένου ότι η περιοχή μελέτης βρίσκεται αρκετά κοντά στη λεκάνη του Πρίνου, έχει ιδιαίτερο νόημα να μελετηθεί η πιθανότητα πετρελαιοφορίας και να γίνει αναφορά στο πετρελαϊκό σύστημα της περιοχής.

Λέξεις Κλειδιά: Σεισμική στρωματογραφία, Σεισμικές Τομές, Στρωματογραφία, Νεογενής Λεκάνη, Στρυμονικός Κόλπος, Κόλπος Ορφανού, Κόλπος Ιερισσού

Abstract

In the following thesis, given the data we have from three seismic profiles from the North Aegean Sea, west of Thassos and specifically from the Orfanos, Ierissos and Strymonikos Gulfs, the evolution and stratigraphic analysis of these areas is presented. The main purpose is the seismo-stratigraphic analysis of the seismic profiles and the separation into seismic sequences based on previous geological studies, carried out both on land and at sea.

The correlation of the stratigraphic findings in the Strymon basin with those in the Orfanos Gulf, and even with the Prinos basin, is necessary as only in this way a more complete picture of the evolution of the study area is possible. The major role in understanding the structures dominating these two gulfs is played by the Upper Miocene-Pliocene, i.e. the erosional surface of the Messinian, and Pliocene-Pleistocene contacts, in combination with the information we have on the paleogeographic evolution of the Neogene basins in the area.

In the Strymonikos Gulf, the appearance of thick sediments under the Messinian erosional surface is observed, similar to the Prinos Basin. In combination with downlap structures and further information it can be suggested that the depositional environment was shallow marine to deltaic during the Pliocene and early Quaternary. Finally, given that the study area is located quite close to the Prinos basin, it makes particular sense to study the possibility of oil production and make reference to the petroleum system in the area.

Key Words: Seismic stratigraphy, Seismic Profiles Stratigraphy, Neogene Basin, Strymonikos Gulf, Orfanos Gulf, Ierissos Gulf

Ευχαριστίες

Πριν την έναρξη της διπλωματικής μου εργασίας κρίνω απαραίτητη την αναφορά στους ανθρώπους που συνέβαλλαν στην ολοκλήρωσή της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας Δρ Αναστασάκη Γεώργιο, καθηγητή στον τομέα της Ιστορικής Γεωλογίας και Παλαιοντολογίας, για την ευκαιρία και την καθοδήγηση που μου προσέφερε, αλλά και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστώ τον Υποψήφιο Διδάκτορα Βαρέση Αλέξανδρο για τις συμβουλές και τις τεχνικές γνώσεις που μου προσέφερε.

Πολλά ευχαριστώ αξίζουν οι γονείς μου, Χρήστος και Μαρία, για την ηθική και ψυχολογική υποστήριξη που μου παρείχαν σε όλο το διάστημα των σπουδών μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πολύ καλό μου φίλο Τσελίφη Παναγιώτη για την συμπαράσταση και την υποστήριξη που έδειξε, για την ολοκλήρωση της πτυχιακής αλλά και κατά τη διάρκεια φοίτησης μου, καθώς και τους συμφοιτητές μου Βατίδη Ευθύμη, Ζαμπάρα Χριστόφορο, Καραγιωργάκη Δημήτρα, Λατσίνογλου Δημήτρη, Παπαγιαννακόπουλο Πέτρο, Σεραφόπουλο Αδαμάντιο για τη στήριξη και όλες τις γεωλογικές συζητήσεις και στιγμές που έχουμε μοιραστεί.

Κατάλογος Σχημάτων

1.1.1	Διάγραμμα που δείχνει τις κύριες γεωλογικές συνθήκες και γεωχημικές διεργασίες που απαιτούνται για τον σχηματισμό συσσώρευσης πετρελαίου σε ιζηματογενείς λεκάνες. 1: Παραγωγή πετρελαίου σε μετρικό πέτρωμα, 2: Πρωτογενής μετανάστευση πετρελαίου, 3: Δευτερογενής μετανάστευση πετρελαίου, 4: Συσσώρευση πετρελαίου σε παγίδα, 5: Διαρροή πετρελαίου στην επιφάνεια ως συνέπεια του διαρροής του μονωτήρα (Leythaeuser, 2005).	10
1.1.2	Απεικόνιση της πρωτογενούς και δευτερογενούς μετανάστευσης (Tissot & Welte, 1984).	12
1.1.3	Τεκτονικές παγίδες μετά από Biddle και Wielchowsky, 1994. Α: Αντικλινική παγίδα Β: Ρηξιγενής παγίδα Γ: Διαπυρική παγίδα Δ: Συνδυασμός αντικλινικής και ρηξιγενούς.	13
1.1.4	Μορφές υδροδυναμικών παγίδων κατά Ramdhan κ.ά., 2018.	14
2.1.1	Οι δύο κλάδοι του αλπικού συστήματος της Τηθύος στο χώρο της Μεσογείου κατά Papanikolaou, 2015.	15
2.1.2	Οι τρεις Τεκτονομεταμορφικές ζώνες του Ελληνικού τόξου (Papanikolaou, 1984).	16
2.1.3	Χάρτης των Τεκτονοστρωματογραφικών πεδίων των Ελληνίδων (Papanikolaou, 1997).	16
2.1.4	Περιοχή μελέτης (Zananiri & Vakalas, 2019).	17
2.1.5	Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Σερβομακεδονικής Μάζας. (Himmerkus κ.ά., 2009; Kockel κ.ά., 1977).	18
2.2.6	Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης των περιοχών του Κόλπου του Ορφανού και της λεκάνης του Στρυμόνα (τροποποιημένος κατά Steininger και Papp, 1979) όπου παρουσιάζονται τα νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα καθώς και η θέση του Ακροπόταμου.	19
2.2.7	Απλοποιημένος παλαιογεωγραφικός χάρτης της Μεσογείου που παρουσιάζει τις αποθετικές φάσεις στο Άνω Μεσσηνίο και την επικοινωνία της Μεσογείου με την Παρατηθύς (Karakitsios κ.ά., 2017; Rouchy & Caruso, 2006).	20
2.2.8	Χάρτης γεωτρήσεων STR-1, STR-2 (Lalechos, 1986).	21
2.2.9	Συνθετική στρωματογραφική στήλη, κατά Lalechos, 1986.	22
2.2.10	Λιθοστρωματογραφική συσχέτιση των τομών Ακροποτάμου. Η γραμμή MES υποδεικνύει την πιθανή θέση της διαβρωτικής επιφάνειας του Μεσσηνίου (Karakitsios κ.ά., 2017).	23
2.2.11	Συνθετικές στρωματογραφικές στήλες για τον κόλπο του Ορφανού και της λεκάνης του Στρυμόνα (Snel κ.ά., 2006).	24
3.1.1	Λήψη σεισμικών δεδομένων σε θαλάσσιο περιβάλλον (από https://archive.epa.gov/esd/archive-geophysics/web/html/marine_seismic_methods.html).	25
3.1.2	Παράδειγμα της καταγραφής πεδίου (ακατέργαστα δεδομένα) που δείχνουν το σεισμικό σήμα ως συνάρτηση του χρόνου.	26
3.2.3	Χάρτης σεισμικών τομών στην περιοχή μελέτης. Η αρίθμηση που υπάρχει πάνω στις σεισμικές τομές είναι τα shot points.	27
4.0.1	Σεισμική τομή OR3.	30
4.0.2	Σεισμική τομή OR3.	30

4.0.3 Σεισμική τομή OR13.	31
4.0.4 Σεισμική τομή OR13.	32
4.0.5 Σεισμική τομή OR17.	33
4.0.6 Σεισμική τομή OR17.	34

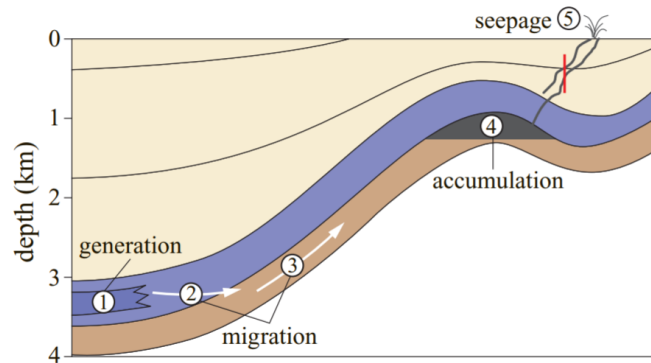
Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	10
1.1	Πετρελαϊκό σύστημα	10
1.1.1	Μητρικά Πετρώματα	11
1.1.2	Πετρώματα Ταμιευτήρες	11
1.1.3	Πετρώματα Κάλυψης-Μονωτήρες	11
1.1.4	Μετανάστευση Πετρελαίου	12
1.1.5	Παγίδες Υδρογονανθράκων	13
2	Γεωλογικό πλαίσιο	15
2.1	Στοιχεία Γεωλογίας Ελλάδος	15
2.1.1	Τεκτονοστρωματογραφική ανάλυση στην περιοχή μελέτης	17
2.2	Νεογενής ιζηματογένεση στη λεκάνη και τον κόλπο του Στρυμόνα	18
2.2.1	Τεκτονική εξέλιξη των λεκανών του Β. Αιγαίου	18
2.2.2	Λιθοστρωματογραφία στη λεκάνη και τον κόλπο του Στρυμόνα	19
3	Σεισμική στρωματογραφία	25
3.1	Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης	25
3.2	Σεισμικές τομές	26
4	Σχόλια και επίλογος	29
	Αναφορές	35

1 Εισαγωγή

1.1 Πετρελαϊκό σύστημα

Η μακροχρόνια μελέτη έχει αποδείξει ότι οι υδρογονάνθρακες συνδέονται πάντοτε με ιζηματογενείς σχηματισμούς. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, τον περιορισμό των ερευνών μόνο σε ιζηματογενείς λεκάνες. Έτσι έχει δημιουργηθεί η ανάγκη για την έρευνα σε πετρελαϊκά συστήματα ή πεδία. Το σύνολο των συνθηκών που πρέπει να συνυπάρχουν προκειμένου μία ιζηματογενής λεκάνη να χαρακτηρίζεται από δυνατότητα πετρελαιοφορίας, ορίζουν ένα πετρελαϊκό σύστημα.



Σχήμα 1.1.1: Διάγραμμα που δείχνει τις κύριες γεωλογικές συνθήκες και γεωχημικές διεργασίες που απαιτούνται για τον σχηματισμό συσσώρευσης πετρελαίου σε ιζηματογενείς λεκάνες. 1: Παραγωγή πετρελαίου σε μετρικό πέτρωμα, 2: Πρωτογενής μετανάστευση πετρελαίου, 3: Δευτερογενής μετανάστευση πετρελαίου, 4: Συσσώρευση πετρελαίου σε παγίδα, 5: Διαρροή πετρελαίου στην επιφάνεια ως συνέπεια του διαρροής του μονωτήρα (Leythaeuser, 2005).

Οι βασικές συνθήκες για να υπάρξει ένα πετρελαϊκό πεδίο είναι: (Leythaeuser, 2005)

1. Εμφάνιση των μητρικών πετρωμάτων που δημιουργούν πετρέλαιο υπό τις κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας κάτω από την επιφάνεια.
2. Συμπύκνωση ιζήματος που οδηγεί σε αποβολή του πετρελαίου από την πηγή στο πέτρωμα αποθήκευσης-ταμιευτήρια (πρωτογενής μετανάστευση πετρελαίου).
3. Εμφάνιση πετρώματος ταμιευτήρα που θα είναι αρκετά πορώδες και διαπερατό, επιτρέποντας έτσι την ροή του πετρελαίου μέσω του συστήματος των πόρων (δευτερογενής μετανάστευση πετρελαίου).
4. Δομές των ιζηματογενών στρωμάτων σύμφωνα με τις οποίες ο ταμιευτήρας σχηματίζει παγίδες.
5. Οι παγίδες να σφραγίζονται πάνω από αδιαπέρατα στρώματα ιζημάτων (μονωτήρες), προκειμένου να συγκρατούνται οι συσσωρεύσεις πετρελαίου.
6. Σωστός συγχρονισμός και διαδοχική σειρά των διεργασιών παραγωγής, μετανάστευσης και παγίδευσης πετρελαίου.

7. Ευνοϊκές συνθήκες για τη διατήρηση της συσσώρευσης πετρελαίου κατά τη διάρκεια παρατεταμένων περιόδων του γεωλογικού χρόνου. Για παράδειγμα, η διάρρηξη του μονωτήρα θα οδηγήσει σε διασπορά της συσσώρευσης πετρελαίου και η θέρμανση μπορεί να διασπάσει το πετρέλαιο σε φυσικό αέριο.

1.1.1 Μητρικά Πετρώματα

Το μητρικό πέτρωμα αποτελεί την πρώτη και σπουδαιότερη προϋπόθεση για την συσσώρευση πετρελαίου και ο όρος έχει μελετηθεί από πολλούς επιστήμονες. Ως μητρικά, χαρακτηρίζονται τα πλούσια σε οργανικό υλικό πετρώματα που μέσω της διαδικασίας ωρίμανσης μπορούν να δώσουν υδρογονάνθρακες. Τέτοια πετρώματα συνήθως είναι είναι λεπτόκοκκα, πλούσια σε άργιλο πυριτοκλαστικά πετρώματα (πηλόλιθοι, αργιλικό σχίστες) ή σκουρόχρωμα ανθρακικά πετρώματα (ασβεστόλιθοι, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι) (Leythaeuser, 2005).

1.1.2 Πετρώματα Ταμιευτήρες

Η συσσώρευση των υδρογονανθράκων λαμβάνει χώρα κάτω από την επιφάνεια της γης σε σχηματισμούς που χαρακτηρίζονται από πορώδες και διαπερατότητα. Το πορώδες είναι το μέτρο της αποθηκευτικής ικανότητας του ταμιευτήρα και ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των πόρων προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος. Ενώ διαπερατότητα, είναι η ικανότητα ενός πετρώματος να επιτρέπει την διέλευση ρευστών, από ζώνες υψηλού σε ζώνες αντίστοιχου χαμηλού δυναμικού.

Οι ταμιευτήρες μπορεί να είναι είτε κλαστικοί-αμμούχοι σχηματισμοί, είτε ανθρακικοί.

- Κλαστικοί Ταμιευτήρες

Οι πιο πολλοί υδρογονάνθρακες συσσωρεύονται σε κλαστικά πετρώματα που επίσης περιέχουν τις μεγαλύτερες ποσότητες των μεγαλύτερων γνωστών ταμιευτήρων. Οι ταμιευτήρες αυτοί, βρίσκονται κυρίως σε συνεκτικοποιημένες-λιθοποιημένες άμμους που ονομάζονται ψαμμίτες. Πιο σπάνια, ταμιευτήρες μπορούν να βρεθούν σε αποθέσεις κροκαλοπαγών και χαλίκων. Το κοκκομετρικό μέγεθος, καθώς και η διαβάθμιση και η ταξινόμηση των κόκκων, επηρεάζουν άμεσα το πορώδες και την διαπερατότητα.

- Ανθρακικοί Ταμιευτήρες

Ανθρακικά πετρώματα μπορούν επίσης να αποτελέσουν μεγάλους ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, ιδιαίτερα εκείνα που έχουν υποστεί δολομιτίωση, γεγονός που δείχνει μία αξιοσημείωτη αύξηση στο πορώδες και στην διαπερατότητα. Το πορώδες σε έναν ανθρακικό ταμιευτήρα, μπορεί να είναι από 1-35% (Schmoker κ.ά., 1985).

1.1.3 Πετρώματα Κάλυψης-Μονωτήρες

Τελευταίο είδος πετρωμάτων που έχει καθοριστικό ρόλο σε ένα πετρελαϊκό σύστημα αποτελούν τα πετρώματα κάλυψης που έχουν την ιδιότητα του καλύμματος, δεν παρουσιάζουν δηλαδή περατότητα και εμποδίζουν την περαιτέρω μετανάστευση και γενικά την κίνηση των υδρογονανθράκων. Τα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων αυτών είναι το ιδιαίτερα μικρό πορώδες, η πλαστικότητα και η πλευρική συνέχεια. Επομένως τα ιδανικά πετρώματα κάλυψης είναι τα αργιλικά ή πηλόλιθοι και οι εβαπορίτες. Τέλος τα πετρώματα αυτά συνδέονται άμεσα με τις παγίδες υδρογονανθράκων όπως φαίνεται στη συνέχεια.

1.1.4 Μετανάστευση Πετρελαίου

Σύμφωνα με τον Selley, 1998, η μετανάστευση πετρελαίου από το μητρικό πέτρωμα στον τόπο της συσσώρευσής του, δηλαδή στην παγίδα, ελέγχεται κυρίως από τις φυσικές και φυσικοχημικές συνθήκες των ιζηματογενών πετρωμάτων, μέσα από τα οποία μετακινείται το πετρέλαιο. Η πίεση, που μπορεί να είναι είτε υδροστατική, είτε λιθοστατική, ασκεί σημαντική επιρροή στην διαδικασία αυτή. Το πορώδες και η διαπερατότητα διαδραματίζουν επίσης πολύ σημαντικό ρόλο. Πορώδες, είναι ο όγκος των κενών χώρων ως ποσοστό του συνολικού όγκου του πετρώματος. Εκτός από την αφθονία των πόρων στον όγκο ενός πετρώματος, το μέγεθος των πόρων, επηρεάζει την κυκλοφορία του πετρελαίου. Με βάση τα παραπάνω η μετανάστευση του πετρελαίου διακρίνεται σε πρωτογενή και δευτερογενή.

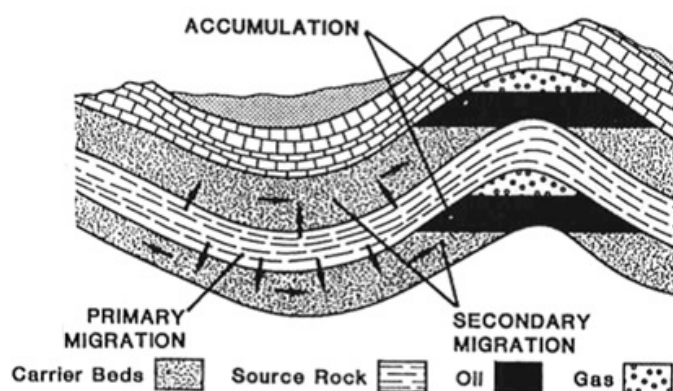
- Πρωτογενής μετανάστευση

Η πρωτογενής μετανάστευση του πετρελαίου, ακολουθεί τις κλίσεις των πιέσεων από το κέντρο του ώριμου μητρικού πετρώματος προς τις επαφές με τα στρώματα του ταμιευτήρα. Διάφορες διαδικασίες ελέγχουν την δημιουργία των πιέσεων. Μία από τις κύριες κινητήριες δυνάμεις της πρωτογενούς μετανάστευσης είναι η συμπίκνωση του ιζήματος λόγω φορτίου του υπερκείμενου υλικού. Η συμπίκνωση επιτυγχάνεται με τη μείωση του χώρου των πόρων με την αποβολή του νερού των πόρων (Leythaeuser, 2005).

- Δευτερογενής μετανάστευση

Ως δευτερογενής μετανάστευση μπορεί να οριστεί η μετακίνηση πετρελαϊκών ενώσεων μέσα από πιο διαπερατά και πορώδη στρώματα και πετρώματα ταμιευτήρα, σε αντίθεση με την πρωτογενή μετανάστευση που λαμβάνει χώρα σε πυκνά, λιγότερο διαπερατά και πορώδη μητρικά πετρώματα.

Η μετανάστευση αυτή, οφείλεται σε τρεις παραμέτρους, στην πλευστότητα των υδρογονανθράκων, στην τριχοειδή πίεση που καθορίζει την πολυφασική ροή και τέλος στην υδροδυναμική ροή των ρευστών. Η δευτερογενής μετανάστευση καταλήγει σε δεξαμενές υδρογονανθράκων (hydrocarbon pools), ωστόσο τεκτονικά γεγονότα όπως η πτύχωση, τα ρήγματα ή η ανύψωση μπορεί να προκαλέσουν ανακατανομή των γεμάτων δεξαμενών πετρελαίου ή αερίου και έτσι να ξεκινήσει μια πρόσθετη φάση δευτερογενούς μετανάστευσης. Επομένως, η δευτερογενής μετανάστευση μπορεί να οδηγήσει και στην διαφυγή των υδρογονανθράκων στην γήινη επιφάνεια (Tissot & Welte, 1984).



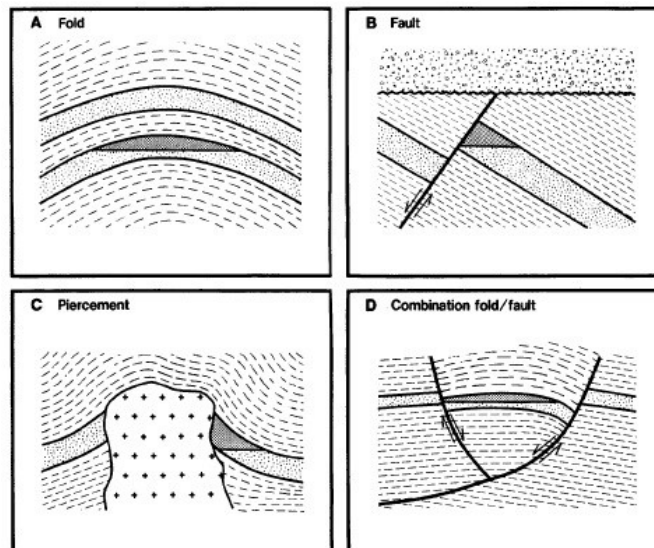
Σχήμα 1.1.2: Απεικόνιση της πρωτογενούς και δευτερογενούς μετανάστευσης (Tissot & Welte, 1984).

1.1.5 Παγίδες Υδρογονανθράκων

Ως παγίδα υδρογονανθράκων χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε γεωμετρική διάταξη των πετρωμάτων, ανεξάρτητα από την προέλευση τους, η οποία επιτρέπει την σημαντική υποεπιφανειακή συσσώρευση του πετρελαίου ή του αερίου ή και των δύο (Biddle & Wielchowsky, 1994). Οι παγίδες μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες. Σε τεκτονικές, στρωματογραφικές, υδροδυναμικές και συνδυαστικές. Οι τελευταίες παρουσιάζουν χαρακτηριστικά δύο ή περισσότερων προηγούμενων κατηγοριών.

- Τεκτονικές

Δημιουργούνται από την συναποθετική προς μεταποθετική παραμόρφωση των στρωμάτων σε μία γεωμετρία (δομή), που επιτρέπει την συσσώρευση των υδρογονανθράκων υποεπιφανειακά. Εξαρτώνται επομένως από το τεκτονικό καθεστώς της περιοχής. Στις τεκτονικές παγίδες ανήκουν οι βασικές κατηγορίες όπως τα αντίκλινα, τα ρήγματα και δόμοι αλάτων.



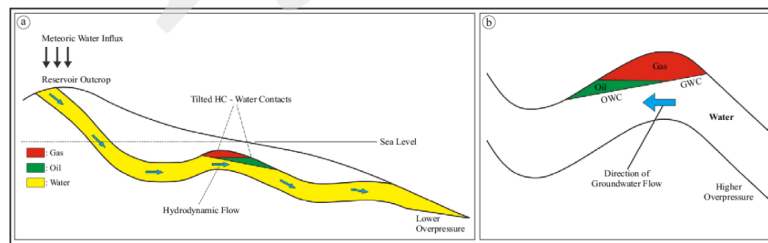
Σχήμα 1.1.3: Τεκτονικές παγίδες μετά από Biddle και Wielchowsky, 1994. Α: Αντικλινική παγίδα Β: Ρηξιγενής παγίδα Γ: Διαπυρική παγίδα Δ: Συνδυασμός αντικλιτικής και ρηξιγενούς.

- Στρωματογραφικές

Ορίζονται ως οι παγίδες στις οποίες κύριο στοιχείο της παγίδευσης είναι μία παραλλαγή στην στρωματογραφία ή στην λιθολογία ή και των δύο, στον ταμιευτήρα, όπως επίσης και μία τοπική μεταβολή του πορώδους και της διαπερατότητας (Levorsen, 1936). Επομένως, οι στρωματογραφικές παγίδες ελέγχονται από την αποθετική ιστορία της λεκάνης, που μπορεί να περιλαμβάνει εκτός από φάσεις απόθεσης και περιόδους διάβρωσης. Χαρακτηριστικές στρωματογραφικές παγίδες αποτελούν οι ύφαλοι, η αποσφήνωση, αμμοί κοίτης εγκλεισμένοι σε λεπτομερείς αποθέσεις λεκάνης κατάκλυσης, αμμολωρίδα παράλληλη στην ακτή, ασυμφωνία πάνω από κεκλιμένες άμμοις και τέλος γωνιώδης ασυμφωνία (Gluyas & Swarbrick, 2011).

- Υδροδυναμικές

Υδροδυναμικές καλούνται οι παγίδες που δημιουργούνται σε μία ιζηματογενή λεκάνη που η ροή του νερού των πόρων είναι αρκετά ισχυρή, η επαφή πετρελαίου-νερού είναι κεκλιμένη λόγω της υδροδυναμικής τάσης που δημιουργείται. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το πετρέλαιο μπορεί να συσσωρευτεί χωρίς να έχει κλείσει η παγίδα.

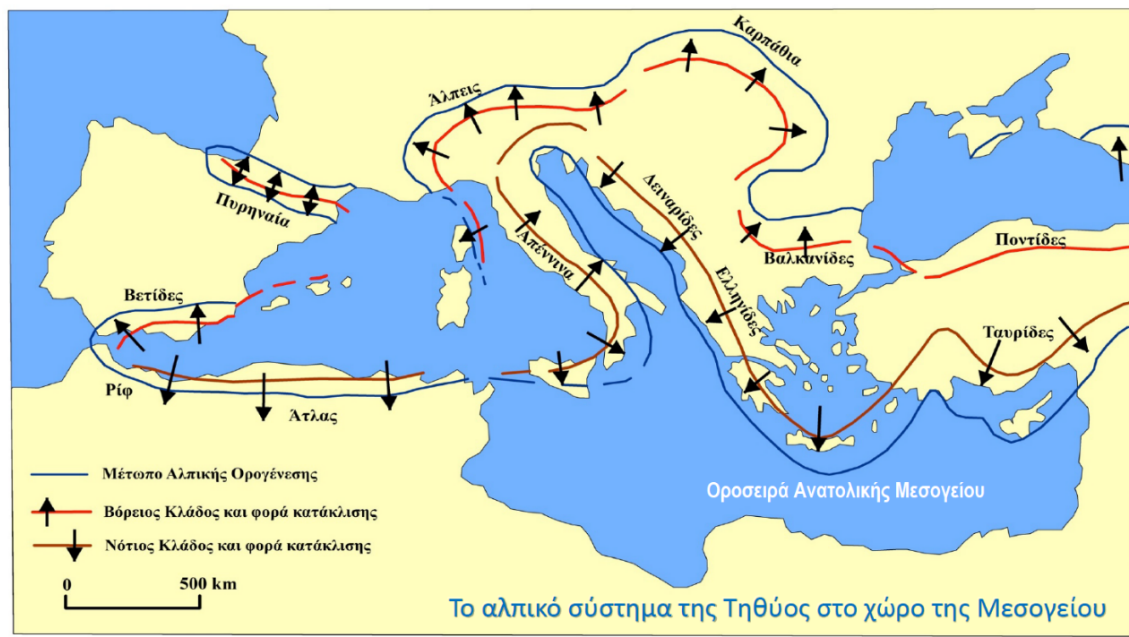


Σχήμα 1.1.4: Μορφές υδροδυναμικών παγίδων κατά Ramdhan κ.ά., 2018.

2 Γεωλογικό πλαίσιο

2.1 Στοιχεία Γεωλογίας Ελλάδος

Το αλπικό ορογενετικό σύστημα της Γης είναι ένα ενεργό ορογενετικό σύστημα το οποίο έχει δημιουργηθεί κατά μήκος των ζωνών σύγκλισης και σύγκρουσης των λιθοσφαιρικών πλακών. Μέρος του Αλπικού Ορογενετικού Συστήματος αποτελεί και το Αλπικό Σύστημα της Τηθούς, το οποίο έχει αναπτυχθεί κατά μήκος της ζώνης σύγκρουσης της Ευρασίας προς το Βορρά και των πλακών της Αφρικής, Αραβίας, Ινδίας και Αυστραλίας, τμήματα της πρώην Γκοντβάνας, προς το Νότο. Οι γεωτεκτονικές ζώνες που συναντάμε στον Ελλαδικό χώρο, οι Ελληνίδες, αποτελούν συνέχεια της ορογενετικής αλυσίδας των Άλπεων, όπου διαμέσου επιμέρους οροσειρών καταλήγουν στο ορεινό συγκρότημα των Ιμαλαίων. Το ορογενετικό σύστημα της Τηθούς μπορεί να διακριθεί σε δυο επιμέρους κλάδους ένα βόρειο κι ένα νότιο, σχεδόν παράλληλους προς τον ισημερινό. Ο βόρειος κλάδος περιλαμβάνει τις Βετίδες οροσειρές, τα Πυρηναία, και τις Βόρειες Άλπεις, τις Ελβετίδες, τα Καρπάθια όρη και άλλες οροσειρές, ενώ ο νότιος κλάδος περιλαμβάνει τη Σικελία, τα Απέννινα, τις Νότιες Άλπεις, τις Δειναρίδες, τις Ελληνίδες, τις Ταυρίδες, τις Ιρανίδες και τμήματα άλλων οροσειρών, μέχρι τα Ιμαλάια.

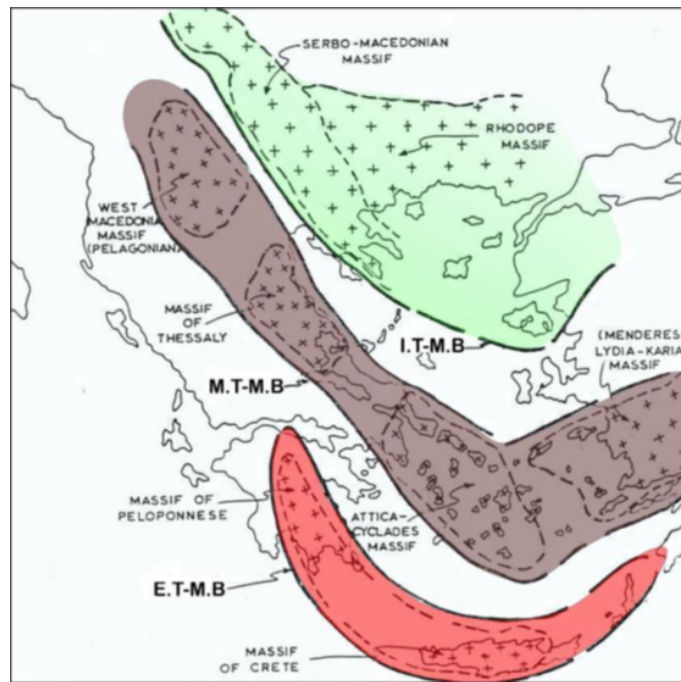


Σχήμα 2.1.1: Οι δύο κλάδοι του αλπικού συστήματος της Τηθούς στο χώρο της Μεσογείου κατά Papanikolaou, 2015.

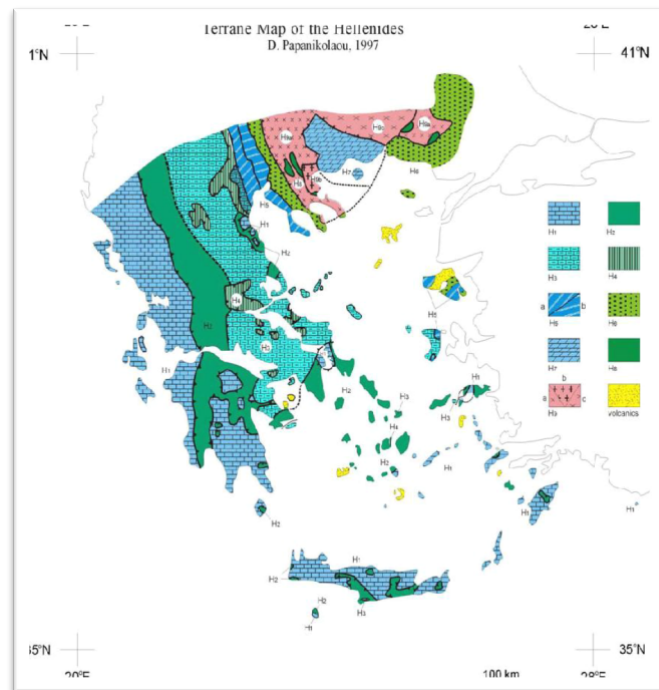
Προκειμένου να διευκολυνθεί η μελέτη των μεταμορφωμένων πετρωμάτων της Ελλάδας, αλπικής και προ αλπικής ηλικίας, το ελληνικό τόξο διαχωρίστηκε σε τρεις Τεκτονομεταμορφικές ζώνες (Papanikolaou, 1984). Οι τρεις ζώνες είναι:

1. Η εσωτερική Τεκτονομεταμορφική ζώνη της Ροδόπης, η οποία περιλαμβάνει κυρίως προ-αλπικά πετρώματα αλλά και μεταμορφωμένες Ελληνίδες
2. Η ενδιάμεση Τεκτονομεταμορφική ζώνη της Πενταγωνικής η οποία περιλαμβάνει και προ-αλπικά πετρώματα, άλλα κυρίως μεταμορφωμένες Ελληνίδες, ιδιαίτερα στο χώρο των Κυκλάδων

3. Η εξωτερική Τεκτονομεταμορφική ζώνη Πελοποννήσου-Κρήτης, η οποία περιλαμβάνει κυρίως μεταμορφωμένες Ελληνίδες μαζί με προ-αλπικά ιζήματα



Σχήμα 2.1.2: Οι τρεις Τεκτονομεταμορφικές ζώνες του Ελληνικού τόξου (Papanikolaou, 1984).

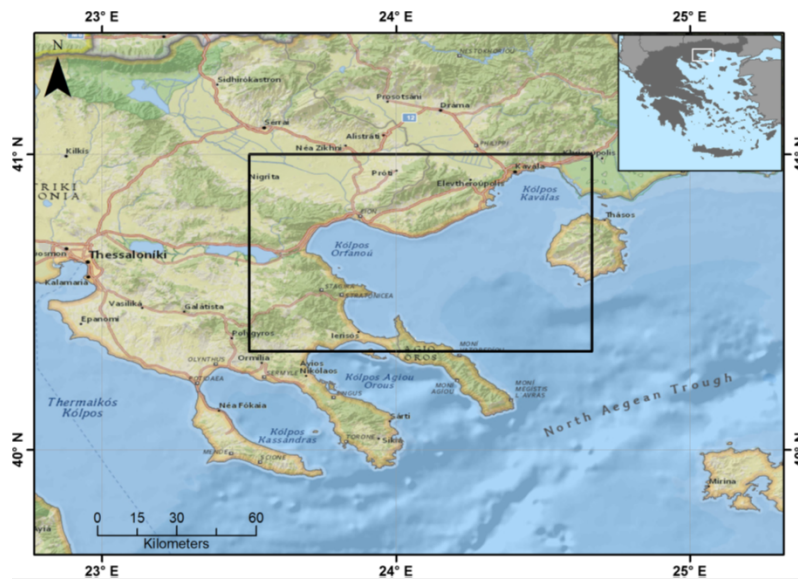


Σχήμα 2.1.3: Χάρτης των Τεκτονοστρωματογραφικών πεδίων των Ελληνίδων (Papanikolaou, 1997).

Η παλαιογεωγραφική οργάνωση των Ελληνίδων και η πιθανή σχέση μεταξύ του προ-αλπικού υποβάθρου και των αλπικών καλυμμάτων επέτρεψε την ανάλυση των Ελληνίδων σε Τεκτονοστρωματογραφικά πεδία (Paranikolaou, 1984, 1997), τα οποία όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.3 χωρίζονται σε H1: Πλατφόρμα Εξωτερικών Ελληνίδων, συμπεριλαμβανομένων προ-αλπικών πετρωμάτων υποβάθρου και αλπικών καλυμμάτων, H2: Ωκεανός Πίνδου - Κυκλάδων, H3: Πλατφόρμα Εσωτερικών Ελληνίδων, συμπεριλαμβανομένων προ-αλπικών πετρωμάτων υποβάθρου και αλπικών καλυμμάτων H4: Ωκεανός Vardar-Αξιού, H5: Πάικο και Αυτόχθονο Λέσβου, H6: Περιοδοπική ζώνη και αλλόχθονο Λέσβου, H7: Μάζα Ροδόπης (Ενότητα Παγγαίου – Αυτόχθονο Ροδόπης, Ενότητα Κερδυλίων), H8: Οφιόλιθοι Βόλβης – Ανατολικής Ροδόπης και H9: Ενότητες Σιδηρόνερου και Βερτίσκου (Αλλόχθονο Ροδόπης). Τα πεδία H1, H3, H5, H7 αντιπροσωπεύουν ηπειρωτικά λιθοσφαιρικά θραύσματα Γκοντβανικής προέλευσης, Τα πεδία H2, H4, H6 και H8 αντιστοιχούν σε τμήματα του ωκεανού της Τηθύος εκτός πιθανόν από το H9, η προέλευση του οποίου παραμένει αβέβαιη.

2.1.1 Τεκτονοστρωματογραφική ανάλυση στην περιοχή μελέτης

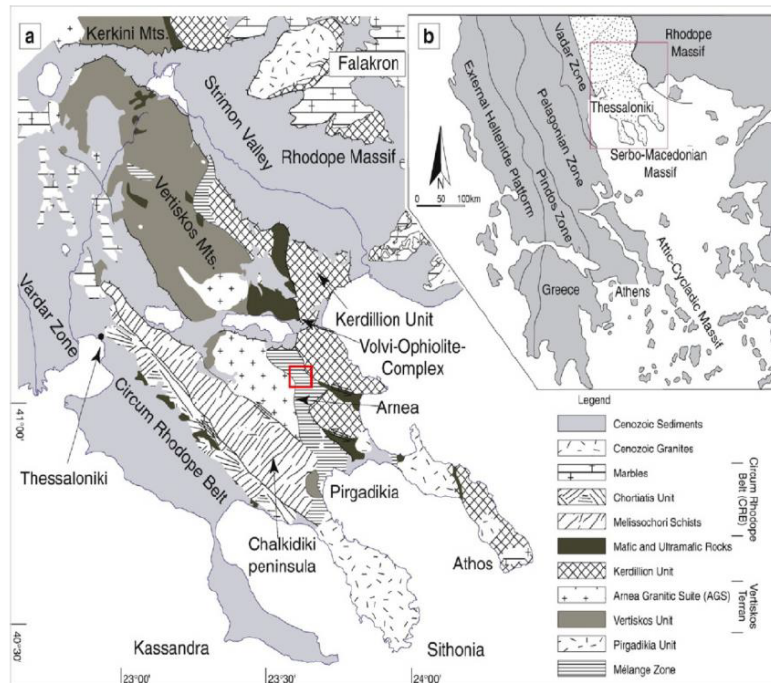
Ο Στρυμονικός κόλπος και ο κόλπος του Ορφανού βρίσκονται στο τμήμα του Βόρειου Αιγαίου και συγκεκριμένα στο ΒΔ άκρο του Θρακικού πελάγους κατά διεύθυνση βορειοδυτική - νοτιοανατολική. Στο τμήμα αυτό εκβάλλει ο ποταμός Στρυμόνας. Ιδιαίτερη σημασία στην περιοχή μελέτης μας έχει και η Στρυμονική λεκάνη κατά μήκος της οποίας ρέει ο Στρυμόνας. Η λεκάνη καλύπτεται από ιζήματα του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς.



Σχήμα 2.1.4: Περιοχή μελέτης (Zananiri & Vakalas, 2019).

Η λεκάνη του Στρυμόνα, πιο συγκεκριμένα, βρίσκεται στην ελληνική ενδοχώρα πάνω από το τεκτονικό όριο μεταξύ της Σερβομακεδονικής Μάζας (H9) και της Μάζας της Ροδόπης (H7). Σύμφωνα με τους Kockel και Walther, 1965, αυτό το όριο, που ονομάζεται "Strimonlinie" ή "Strymon overthrust", είναι μια επώθηση με ΝΔ κλίση που μεταφέρει τη Σερβομακεδονική πάνω από τον ορεινό όγκο της Ροδόπης. Ωστόσο, νεότερες έρευνες έδειξαν ότι η επαφή των δύο μαζών είναι ρήγμα εφελκυστικής αποκόλλησης του Μειοκαινού, που απογυμνώνει τον μεταμορφικό πυρήνα της Ροδόπης στα ανατολικά και το οποίο και δημιούργησε την νεοτεκτονική τάφρο του Στρυμόνα (Dinter & Royden, 1993).

Η Σερβομακεδονική μάζα υποδιαιρείται σε δύο ενότητες (k)(Kockel κ.ά., 1977- Burg κ.α., 1995), την εκτεταμένη ενότητα του Βερτίσκου στο κέντρο και δυτικά που περιλαμβάνει γενέσιους, σχιστόλιθους και αμφιβολίτες και την αρκετά μικρότερη ενότητα Κερδυλίων στα ανατολικά, που περιλαμβάνει ταινιωτούς, μιγματιομένους γενέσιους, βιοτιτικούς γενέσιους, αμφιβολίτες και μάρμαρα.



Σχήμα 2.1.5: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Σερβομακεδονικής Μάζας. (Himmerkus κ.ά., 2009; Kockel κ.ά., 1977).

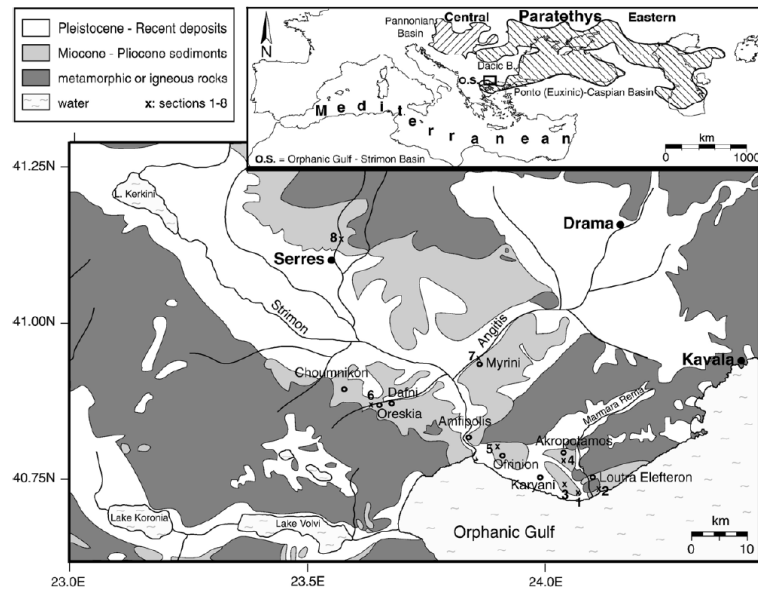
Η Ροδοπική μάζα υποδιαιρείται στην Ενότητα του Παγγαίου που είναι η κατώτερη τεκτονική ενότητα και στο Σιδηρόνερο που είναι η ανώτερη τεκτονική ενότητα (Paranikolaou and Panagoroulos, 1981; Burg κ.ά., 1996). Η Ενότητα του Παγγαίου χαρακτηρίζεται από μεγάλες, ανοικτές πτυχώσεις με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, σε κλίμακα χάρτη και αποτελείται από παχιά ογκώδη μάρμαρα (μάρμαρα Φαλακρών) στα οποία παρεμβάλλονται διάφοροι ορίζοντες σχιστόλιθων που φέρουν ορυκτές παραγενέσεις ανώτερης πρασινοσχιστολιθικής φάσης. Από την άλλη πλευρά, η υπερκείμενη ενότητα του Σιδηρόνερου είναι υψηλότερου μεταμορφικού βαθμού από την ενότητα του Παγγαίου και αποτελείται από μιγματίτες, γενέσιους, εκλογίτες, αμφιβολίτες, ορθογενέσιους, μάρμαρα, μαφικά και σπάνια υπερμαφικά πετρώματα (Mposkos Krohe, 2000- Gerdjikov Milev, 2005).

2.2 Νεογενής ιζηματογένεση στη λεκάνη και τον κόλπο του Στρυμόνα

2.2.1 Τεκτονική εξέλιξη των λεκανών του Β. Αιγαίου

Η μεταλλική εξέλιξη της περιοχής είναι εξίσου σύνθετη, εξηγείται όμως στα πλαίσια εξέλιξης του συμπλέγματος μεταμορφικού πυρήνα της Ροδόπης. Το σύμπλεγμα δημιουργήθηκε λόγω της έκτασης του οπισθοτόξου κατά το Άνω Ολιγόκαινο-Κάτω Μειόκαινο μέσω του ρήγματος αποκόλλησης του Στρυμόνα, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Η έκταση αυτή οφείλεται στην οπισθοκύλιση της Αφρικανικής πλάκας.

Επομένως, η λεκάνη που σχηματίστηκε πληρώθηκε από αποθέσεις του κάτω Μειόκαινου-κάτω Πλειόκαινου. Έπειτα οι αποθέσεις του κάτω Πλειοκαίνου-Τεταρτογενούς, γέμισαν τις λεκάνες του Βορείου Αιγαίου που δημιουργήθηκαν κατά το κάτω Πλειόκαινο ως απόκριση σε κινήσεις ολίσθησης στο βόρειο Αιγαίο, με τη δράση του οριζοντιολισθητικού ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας (Dinter & Royden, 1993; Kydonakis κ.ά., 2015).

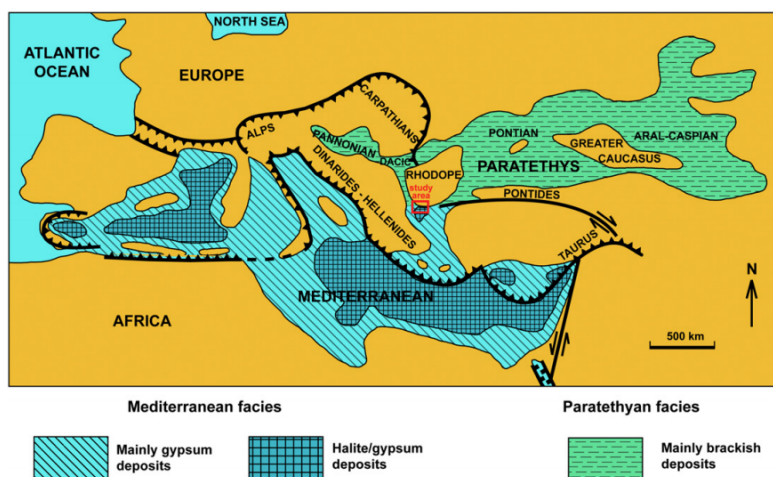


Σχήμα 2.2.6: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης των περιοχών του Κόλπου του Ορφανού και της λεκάνης του Στρυμόνα (τροποποιημένος κατά Steininger και Papp, 1979) όπου παρουσιάζονται τα νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα καθώς και η θέση του Ακροπόταμου.

2.2.2 Λιθοστρωματογραφία στη λεκάνη και τον κόλπο του Στρυμόνα

Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε την γεωλογική εξέλιξη της περιοχής μελέτης είναι σημαντικό να μελετήσουμε την λιθοστρωματογραφία στον κόλπο του Στρυμόνα και του Ορφανού, από δείγματα και τομές στην χέρσο, δηλαδή την Στρυμονική λεκάνη καθώς και σε περιοχές πλησίον του κόλπου του Ορφανού. Ιδιαίτερης σημασίας είναι η περιοχή του Ακροποτάμου, (σχήμα 2.2.6) η οποία βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα της Στρυμονικής λεκάνης και περιλαμβάνει περισσότερα από 700 μέτρα νεογενών αποθέσεων. Τέλος, πρέπει να γνωρίζουμε ότι η κρίση αλατότητας του Μεσσηνίου παίζει καθοριστικό ρόλο στην ιζηματογένεση της λεκάνης.

Η ανω Μειοκαινική σύνδεση μεταξύ της Μεσογείου και της υφάλμυρης λεκάνης της Παρατηθύος έχει διερευνηθεί ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια καθώς είχε τον έλεγχο της ιζηματογένεσης εκείνη την περίοδο. Αρχικά διατυπώθηκε η υπόθεση ότι μια πύλη εισόδου ή ένα αποχετευτικό δίκτυο δημιουργήθηκε διαμέσω των Βαλκανίων πριν και μετά την κρίση αλατότητας του Μεσσηνίου. Περαιτέρω έρευνα αποκάλυψε θαλάσσια ασβεστολιθικά νανοπλαγκτόν στις Ποντιακές αποθέσεις της Δακικής λεκάνης και στις αποθέσεις του άνω Μεσσηνίου της λεκάνης του Στρυμόνα (Snel κ.ά., 2006). Επιπλέον, έχουν προταθεί περιοδικές ανταλλαγές υδάτων μεταξύ της Μεσογείου και της Δακικής λεκάνης κατά τη διάρκεια του άνω Μεσσηνίου, που υπήρχαν οι φάσεις της υψηλής στάθμης της θάλασσας (Suc κ.ά., 2011).

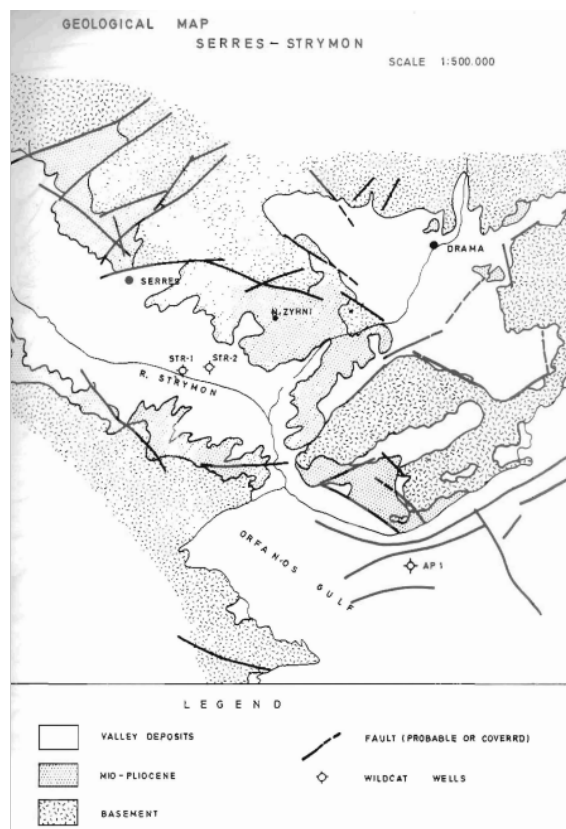


Σχήμα 2.2.7: Απλοποιημένος παλαιογεωγραφικός χάρτης της Μεσογείου που παρουσιάζει τις αποθετικές φάσεις στο Άνω Μεσσηνίο και την επικοινωνία της Μεσογείου με την Παρατηθός (Karakitsios κ.ά., 2017; Rouchy & Caruso, 2006).

Σύμφωνα με Karakitsios κ.ά., 2017, στην περιοχή του Ακροποτάμου (σχήμα 2.2.10), η επιφάνεια διάβρωσης του Μεσσηνίου εντοπίζεται στην κορυφή της εβαποριτικής ενότητας, η οποία έχει αποθεθεί κατά τη διάρκεια 5,97-5,6 Ma. Αυτό το τελικό στάδιο της κρίσης αλατότητας του Μεσσηνίου στην περιοχή του Ακροποτάμου χαρακτηρίζεται από αποθέσεις υφάλμυρου νερού που τελειώνουν από μια φάση τραβερτίνη, της οποίας η εκτεταμένη παρουσία της σε ολόκληρη την χερσαία λεκάνη του Στρυμόνα, υποδεικνύει ότι μικρές λιμνοθάλασσες και λίμνες υπήρχαν πιθανότατα κατά μήκος του διαδρόμου Μεσογείου-Παρατηθός, πριν από τις φάσεις της υψηλής στάθμης της θάλασσας. Η μετάβαση Μειόκαινου-Πλειόκαινου στον Ακροποτάμο σηματοδοτήθηκε από μια μεταβολή της αλατότητας που προκλήθηκε από την αυξανόμενη επιρροή της Παρατηθός στα ύδατα της Μεσογείου, που προηγήθηκε της θαλάσσιας επαναπλημμύρισης στο τέλος της κρίσης αλατότητας, η οποία πιστοποιείται από τις αποθέσεις δέλτα, τύπου Gilbert, ανοιχτής θάλασσας, του Πλειόκαινου που υπερκαλύπτουν τους εβαπορίτες.

Προκύπτει επομένως, πως το κατώτερο τμήμα της νεογενούς ακολουθίας (πάνω από 300 μέτρα) αποτελείται από μη θαλάσσιες ποταμο-λιμναίες κλαστικές αποθέσεις και σπανιότερα αργίλους με παρεμβολές λιγνίτη. Αυτές ακολουθούνται από 80 μέτρα καλά ενστρωμένων εναλλαγών κροκαλοπαγών και ανθρακικών που αντιστοιχούν σε θαλασσολιμναία, υφάλμυρα ή ρηχά θαλάσσια περιβάλλοντα. Πάνω από αυτά βρίσκεται μία στρωματογραφική μονάδα αμμώδους ή ιλυώδους αργίλου, ανοικτής θάλασσας (πάχους περίπου 40 μέτρων), που τοπικά παρεμβάλλονται φακοειδή σώματα γύψου. Κατόπιν, λιμναία/υφάλμυρα στρώματα καλύπτονται από τραβερτινικούς ασβεστόλιθους, οι οποίοι ακολουθούνται από εναλλαγές κροκαλοπαγών και μαργών, ανοικτής θάλασσας του κατώτερου Πλειοκαίνου. Αυτή η ακολουθία καλύπτεται ασύμφωνα από ανώτερο Πλειόκαινο-Πλειστόκαινο άμμους και χαλίκια ρηχής θάλασσας (Karakitsios κ.ά., 2017).

Εκτός από μελέτες επιφανείας στην περιοχή της Στρυμονικής λεκάνης, έχουν γίνει και δύο γεωτρήσεις STR-1 και STR-2. Σύμφωνα με αυτές, παρουσιάζεται η στρωματογραφία της λεκάνης από τον Lalechos, 1986.

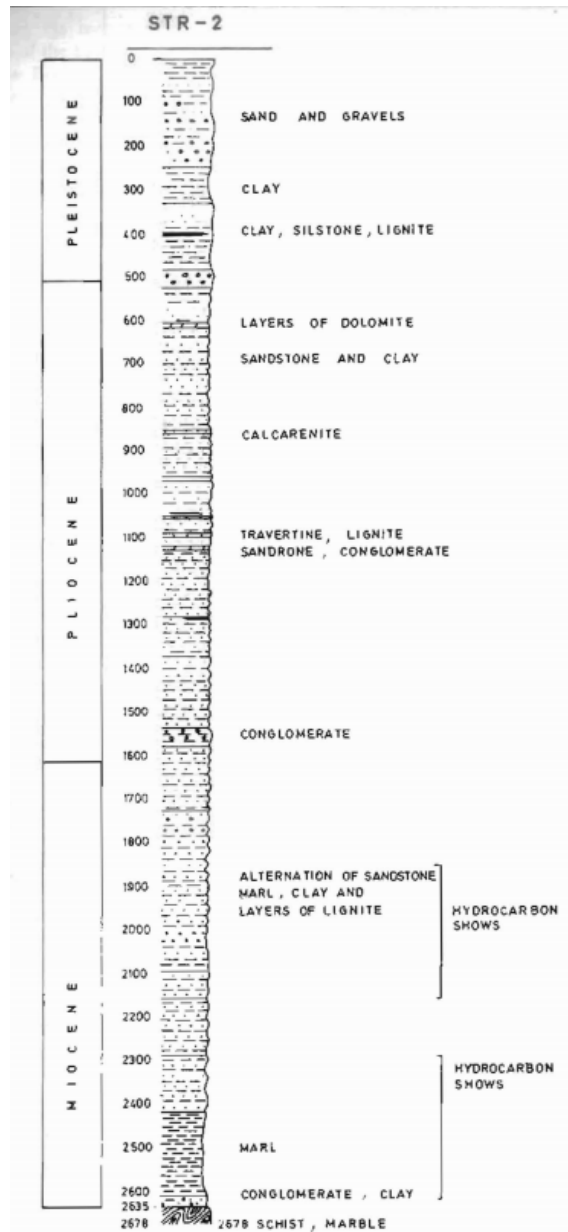


Σχήμα 2.2.8: Χάρτης γεωτρήσεων STR-1, STR-2 (Lalechos, 1986).

Αναλυτικότερα, οι Μειοκαινικοί σχηματισμοί αποτελούνται από εναλλαγές ιζημάτων λιμνοθαλάσσιων και θαλάσσιων φάσεων από κάτω προς τα πάνω. Η βασική ακολουθία αποτελείται από λατυποπαγή με χάλικες από λεπτόκοκκο ψαμμίτη ή σκληρά κροκαλοπαγή. Οι λιμνοθαλάσσιες φάσεις χαρακτηρίζονται από εναλλαγές ψαμμιτών, ιλύολιθων, σκούρων μαργών που στο τέλος μεταπίπτουν σε ασβεστόλιθους. Οι θαλάσσιες φάσεις, χαρακτηρίζονται κι αυτές από εναλλαγές αργίλων, ψαμμιτών, ιλύολιθων με παρεμβολές από μικρολατυποπαγή και στρώματα λιγνίτη.

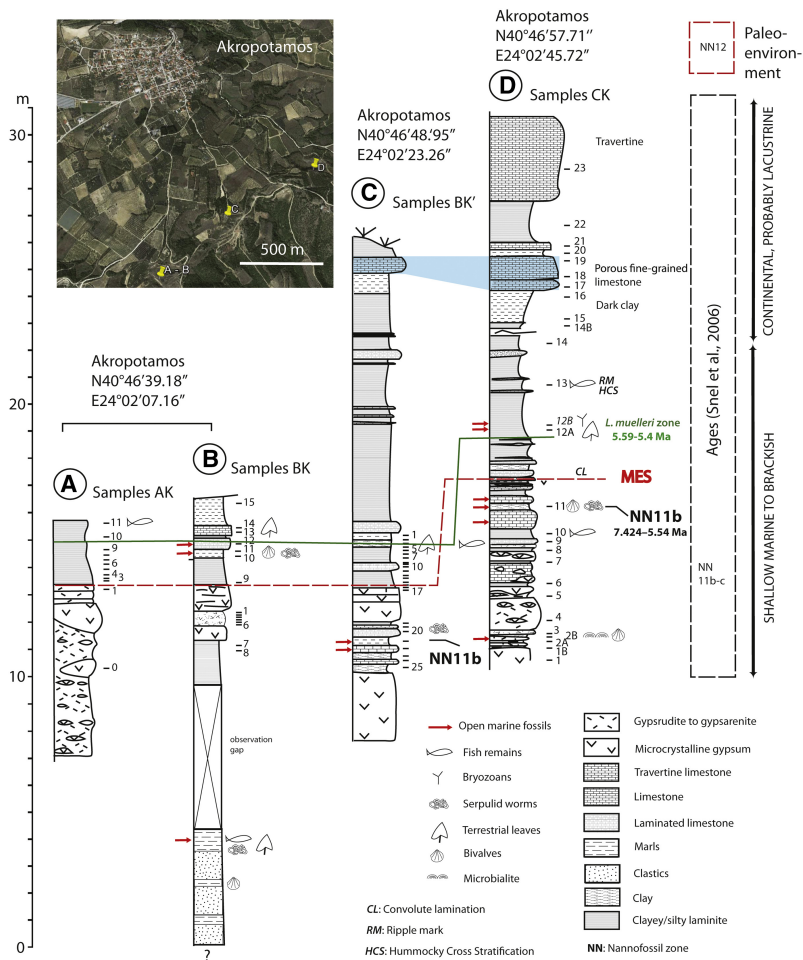
Στη συνέχεια, οι Πλειοκαινικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από εναλλαγές κλαστικών αργίλων. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν υφάλμυρες και ηπειρωτικές φάσεις. Οι πρώτες αποτελούνται από ψαμμίτες, ιλύολιθους, τραβερτίνες και στρώματα λιγνίτη ενώ οι ηπειρωτικές, από εναλλαγές ερυθρών αργίλων, ερυθρών ψαμμιτών και δολομιτικών άμμων με παρεμβολές ιλυολίθων, ψαμμιτών και μικροκροκαλοπαγών. Επιπλέον, στις ηπειρωτικές φάσεις υπάρχουν τραβερτινικοί ασβεστόλιθοι με λιγνιτικές σνδιαστρώσεις καθώς και ασβεστόλιθοι με κιμωλία. Τέλος, οι σχηματισμοί του Πλειστοκαίνου χαρακτηρίζονται από αργίλους, χονδρόκοκκες άμμους, χαλαζιακούς χάλικες, ψαμμίτες και ιλιόλιθους.

Προκύπτει επομένως η ακόλουθη στρωματογραφική στήλη.



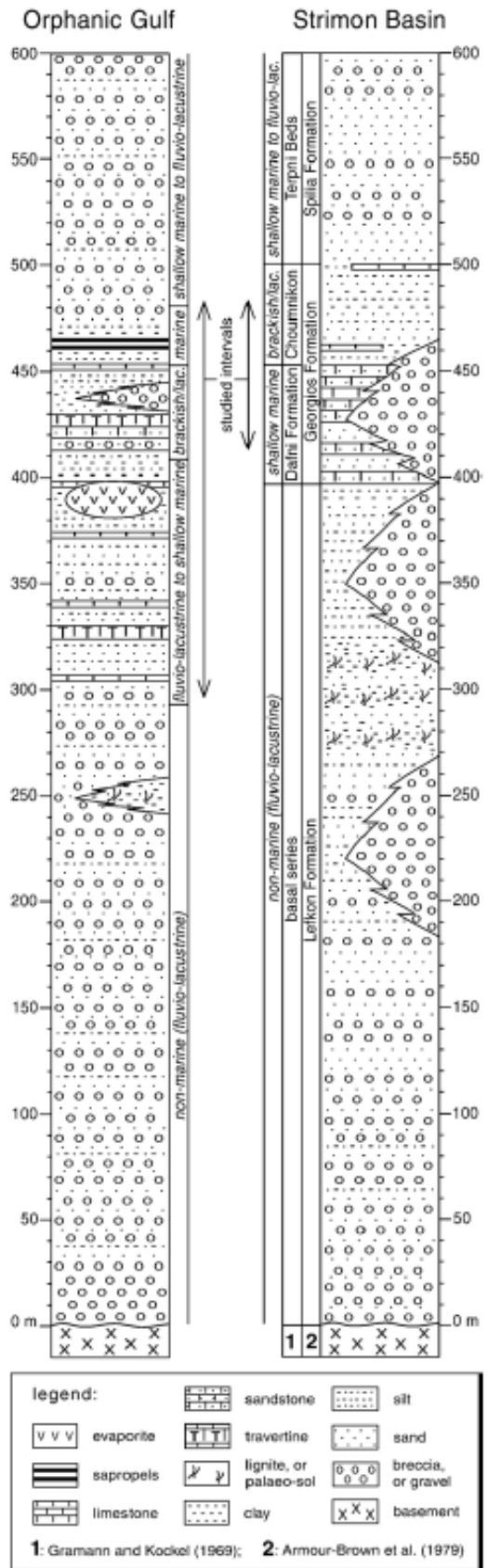
Σχήμα 2.2.9: Συνθετική στρωματογραφική στήλη, κατά Lalechos, 1986.

Συγκεντρωτικά, εκτός από την παραπάνω στρωματογραφική στήλη, μπορούμε να δούμε τη λιθοστρωματογραφική διάρθρωση της κόλπου του Ορφανού και κατ' επέκταση Στρυμονικού κόλπου από τις παρακάτω συνθετικές στρωματογραφικές στήλες στο σχήμα 2.2.10 και 2.2.11.



Σχήμα 2.2.10: Λιθοστρωματογραφική συσχέτιση των τομών Ακροποτάμου. Η γραμμή MES υποδεικνύει την πιθανή θέση της διαβρωτικής επιφάνειας του Μεσσηνίου (Karakitsios κ.ά., 2017).

Από τις παραπάνω στήλες, παρατηρείται ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη διαφορετικές ακολουθίες πάνω από την επιφάνεια διάβρωσης του Μεσσηνίου καθώς φαίνεται η διαφορετική θέση που είχε η κάθε μία στο παλαιοπεριβάλλον απόθεσης των υπερκείμενων ιζημάτων. Εντοπίζονται έτσι διαφορές στα πάχη των σχηματισμών καθώς και σε ορισμένα σημεία κάποιοι σχηματισμοί παραλείπονται.



Σχήμα 2.2.11: Συνθετικές στρωματογραφικές στήλες για τον κόλπο του Ορφανού και της λεκάνης του Στρυμόνα (Snel κ.ά., 2006).

3 Σεισμική στρωματογραφία

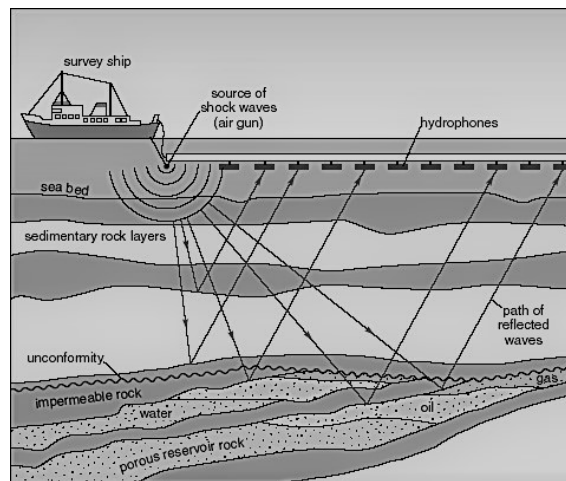
3.1 Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης

Η μέθοδος βασίζεται στην καταγραφή του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ μιας δόνησης στην επιφάνεια και της λήψης της στην επιφάνεια μετά την ανάκλασή της σε μία επιφάνεια ασυνέχειας μεταξύ δύο σε υπέρθεση λιθολογικών συνόλων με διαφορετικές ελαστικές ιδιότητες.

Αυτή η επιφάνεια αποτελεί τον λεγόμενο καθρέπτη ή ανακλαστήρα. Αν γνωρίζουμε την ταχύτητα διάδοσης της προκαλούμενης δόνησης, είναι εύκολο να περάσουμε από την καταγραφή της διάρκειας του χρόνου στο βάθος του ανακλαστήρα.

Εξάλλου ένα μόνο τμήμα της ενέργειας της δόνησης που δέχεται ένας ανακλαστήρας ανακλάται, ενώ ένα άλλο τμήμα της διασχίζει τον ανακλαστήρα και ανακλάται στον επόμενο. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να καταγραφεί ταυτόχρονα η εικόνα διαφόρων διαδοχικών ασυνεχειών.

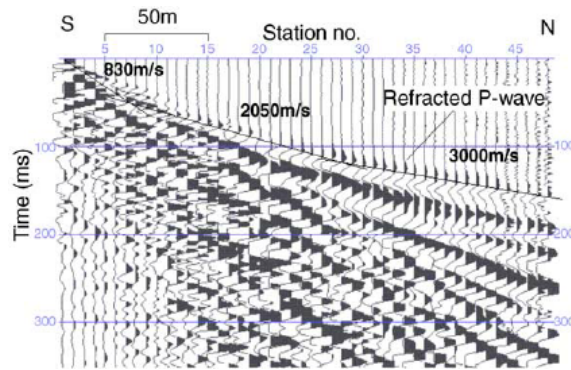
Στην πράξη διαθέτουμε μια πηγή Π και πολλούς δέκτες Δ1, Δ2, Δ3.... . Η πηγή αποτελείται από μια εκρηκτική γόμωση ή ένα θάλαμο αεριούχου μίγματος που μπορούν να πυροδοτηθούν ηλεκτρικά από απόσταση (τώρα στην ξηρά χρησιμοποιούνται συχνά οχήματα δονητές). Στην ξηρά η πηγή τοποθετείται γενικά σε πηγάδια μικρού βάθους (από ορισμένα έως μερικές δεκάδες μέτρα). Στην θάλασσα η έκρηξη γίνεται μέσα στο νερό. Οι δέκτες ή αλλιώς γεώφωνα είναι φορητοί σειсмоγράφοι που τοποθετούνται επί του εδάφους σε μια γνωστή απόσταση ο ένας από τον άλλο κατά μήκος μιας γραμμής που διέρχεται από την πηγή ή σε περίπτωση θαλάσσιας έρευνας οι δέκτες ονομάζονται υδρόφωνα και τους ρυμουλκεί ένα πλοίο.



Σχήμα 3.1.1: Λήψη σεισμικών δεδομένων σε θαλάσσιο περιβάλλον (από https://archive.epa.gov/esd/archive-geophysics/web/html/marine_seismic_methods.html).

Ο κύριος τρόπος διάταξης των υδρόφωνων είναι η γραμμική, ωστόσο πλέον γίνεται χρήση συστοιχιών δύο διαστάσεων. Ανάλογα με τον τρόπο που κατανέμουμε επομένως τα υδρόφωνα στην επιφάνεια της θάλασσας για να καταγράψουμε τα ανακλώμενα σεισμικά κύματα, έχουμε και διάφορες γεωμετρίες καταγραφής. Η αρχική καταγραφή, δηλαδή το σεισμόγραμμα σεισμικής ανάκλασης, είναι μία ομάδα σεισμικών ιχνών από όλα τα υδρόφωνα που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένη σεισμική πηγή.

Στη συνέχεια γίνεται η σεισμική επεξεργασία της αρχικής καταγραφής δηλαδή ένα σύνολο μετασχηματισμών/ διορθώσεων που επιφέρουμε στα δεδομένα υπαίθρου, έτσι ώ-



Σχήμα 3.1.2: Παράδειγμα της καταγραφής πεδίου (ακατέργαστα δεδομένα) που δείχνουν το σεισμικό σήμα ως συνάρτηση του χρόνου.

στε να απομακρύνουμε τους θορύβους και τα διάφορα ανεπιθύμητα σεισμικά κύματα και να καταλήξουμε σε ερμηνεύσιμες σεισμικές τομές που να συσχετίζονται με γεωλογικές δομές. Με τα διάφορα στάδια της σεισμικής επεξεργασίας επιδιώκουμε την απόκτηση αντιπροσωπευτικής εικόνας του υπεδάφους, τη βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο, την παρουσίαση των ανακλάσεων με τη μεγαλύτερη δυνατή καθαρότητα, διακριτική ικανότητα και τη σωστή γεωμετρική σχέση μεταξύ τους. Επιπλέον, επιδιώκεται η απομάκρυνση της ανεπιθύμητης σεισμικής ενέργειας (επιφανειακά κύματα, πολλαπλές ανακλάσεις, κ.ά.), η εξαγωγή πληροφοριών για το υπέδαφος (ταχύτητες, ανακλαστικότητες) και τέλος την διόρθωση της επίδρασης των κλίσεων και περιθλάσεων καθώς και μετατροπή του αποτελέσματος από το πεδίο του χρόνου διπλής διαδρομής στο πεδίο του βάθους.

Μια τυπική σεισμική επεξεργασία περιλαμβάνει: α) απομόνωση συγκεκριμένων παρασιτικών συχνοτήτων, β) ανάκτηση πλατών, γ) αποσυνέλιξη πριν από τη σώρευση, δ) στατικές διορθώσεις, ε) διαχωρισμός ανά κοινό σημείο ανάκλασης, στ) ανάλυση ταχυτήτων, ζ) διορθώσεις χρόνου απόκλισης, η) σώρευση ανά κοινό σημείο ανάκλασης, θ) αποσυνέλιξη μετά τη σώρευση και ι) διορθώσεις μετανάστευσης.

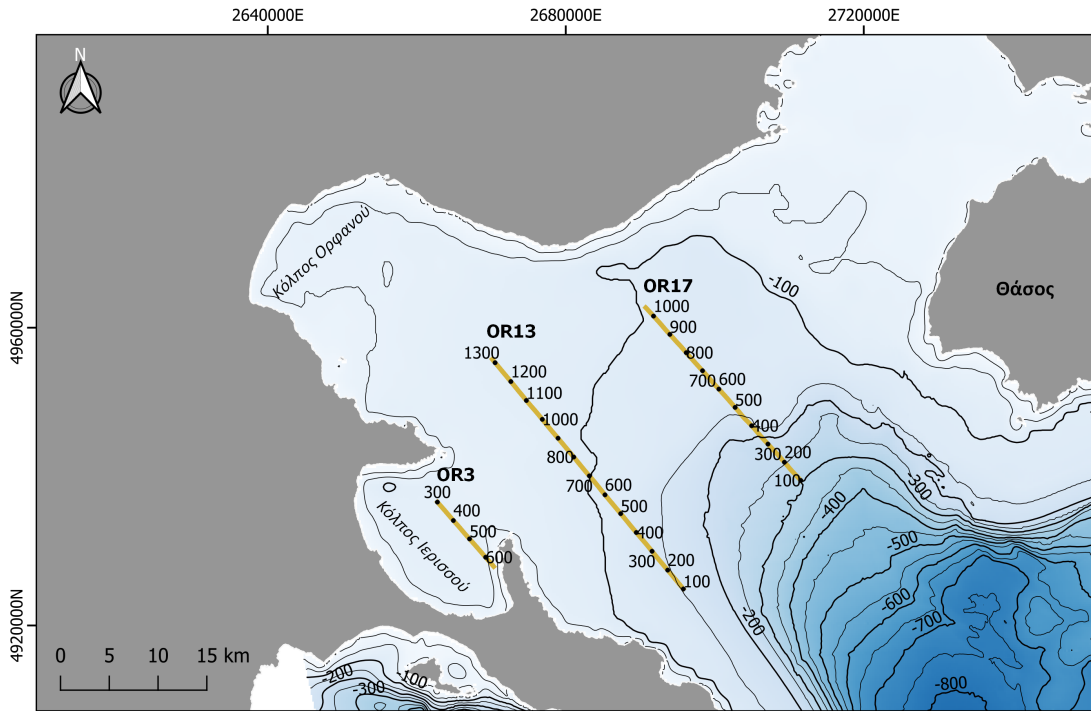
Με την ολοκλήρωση των παραπάνω διαδικασιών, είναι δυνατή η αξιολόγηση των σεισμικών τομών που έχουν προκύψει.

3.2 Σεισμικές τομές

Από ένα σύνολο σεισμικών τομών που υπάρχουν για την περιοχή μελέτης, στα πλαίσια της πτυχιακής αυτής, θα μελετηθούν οι σεισμικές τομές OR3, OR13 και OR17, η θέση των οποίων παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.3. Η γενική διεύθυνση των τομών είναι ΒΔ-ΝΑ.

Οι σεισμικές τομές έχουν στον κατκόρυφο άξονα το χρόνο διπλής διαδρομής (TWTT: two way travel time), που είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένα σεισμικό κύμα για να ταξιδέψει από την πηγή στον ανακλαστήρα και από τον ανακλαστήρα στο υδρόφωνο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση μετριέται σε ms (χιλιοστά του δευτερολέπτου), σε άλλες περιπτώσεις αν πρόκειται για σεισμικές τομές που φτάνουν σε μεγαλύτερο βάθος, ο κατακόρυφος άξονας μετριέται σε s (δευτερόλεπτα).

Στα πλαίσια ερμηνείας των τομών έχει γίνει ένας αρχικός διαχωρισμός των ορίων της διαβρωτικής επαφής του Μεσσηνίου, δηλαδή του Ανώτατου Μειόκαινου, με το Πλειόκαινο και της επαφής Πλειόκαινου-Πλειστόκαινου. Στη συνέχεια γίνεται ερμηνεία των τερματισμών των ανακλάσεων και των κύριων αλλαγών στη «σεισμική φάση», προκειμένου να προσδιοριστούν «πακέτα» Τέλος, γίνεται αναγνώριση ρηγμάτων και δομών.



Σχήμα 3.2.3: Χάρτης σεισμικών τομών στην περιοχή μελέτης. Η αρίθμηση που υπάρχει πάνω στις σεισμικές τομές είναι τα shot points.

- Σεισμική τομή OR3

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.0.2, τα ιζήματα του Μειόκαινου που βρίσκονται κάτω από την Μεσσήνια διαβρωτική επιφάνεια, παρουσιάζονται με πράσινο χρώμα. Τα ιζήματα του Παλαιόκαινου με μωβ και τέλος να Πλειστοκαινικά ιζήματα με κίτρινο.

Τα Μειοκαινικά ιζήματα παρουσιάζουν χαοτική δομή και όχι πολύ καλή διαστρωμάτωση λόγω των εβαποριτών και έχουν έντονη τεκτονική παραμόρφωση με ορισμένες μικρές πτυχώσεις. Φαίνεται ότι το παλαιοανάγλυφο έχει δημιουργήσει μία λεκάνη η οποία στη συνέχεια πληρώθηκε με τα ιζήματα του Πλειόκαινου.

Τα Πλειοκαινικά ιζήματα εμφανίζουν σαφώς καλύτερη διαστρωμάτωση. Υπάρχουν κάποιες ολισθήσεις στα όρια της διαβρωτικής επιφάνειας του Μεσσήνιου. Οι μορφές των σεισμικών ανακλάσεων κυρίως παράλληλες κυματοειδείς.

Στα Πλειστοκαινικά ιζήματα υπάρχει αρκετά καλή στρωμάτωση. Οι σεισμικές ανακλάσεις έχουν υποπαράλληλη μορφή.

Στην τομή δεν παρατηρούνται ρήγματα.

- Σεισμική τομή OR13

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.0.4, τα ιζήματα του Μειόκαινου που βρίσκονται κάτω από την Μεσσήνια διαβρωτική επιφάνεια, παρουσιάζονται με πράσινο χρώμα. Τα ιζήματα του Παλαιόκαινου με μωβ και τέλος να Πλειστοκαινικά ιζήματα με κίτρινο.

Τα Μειοκαινικά ιζήματα παρουσιάζουν μία πιο χαοτική δομή και όχι πολύ καλή διαστρωμάτωση λόγω των εβαποριτών.

Στα Πλειοκαινικά ιζήματα εμφανίζεται καλύτερη διαστρωμάτωση. Μπορεί να διαχωριστεί μία σεισμική ακολουθία στο ΒΔ τμήμα της τομής. Ενδεχομένως πρόκειται για ένα μοντέλο ανακλαστικής επιφάνειας τύπου Toplap, το οποίο δημιουργείται όταν δεν υπάρχει απόθεση κατά μήκος της κορυφής μίας προελαύνουσας σειράς ιζημάτων. Ο τερματισμός των ανακλαστήρων γίνεται στην οροφή της ακολουθίας. Επιπρόσθετα, παρατηρείται πως οι σεισμικές ανακλάσεις έχουν κατά κύριο λόγο, αποκλίνουσα μορφή από τα ΝΑ προς τα ΒΔ.

Στα Πλειστοκαινικά ιζήματα υπάρχει αρκετά καλή στρωμάτωση. Οι σεισμικές ανακλάσεις έχουν παράλληλη-υποπαράλληλη μορφή.

Στην τομή δεν παρατηρούνται ρήγματα.

- Σεισμική τομή OR17

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.0.6, τα ιζήματα του Μειόκαινου που βρίσκονται κάτω από την Μεσσήνια διαβρωτική επιφάνεια, παρουσιάζονται με πράσινο χρώμα. Τα ιζήματα του Παλαιόκαινου με μωβ και τέλος τα Πλειστοκαινικά ιζήματα με κίτρινο.

Τα ιζήματα κάτω από το διαβρωμένο παλαιοανάγλυφο δεν εμφανίζουν καλή διαστρωμάτωση εξαιτίας των εβαποριτών, ωστόσο είναι καλύτερη από τις προηγούμενες δύο τομές. Η τεκτονική τους παραμόρφωση είναι ήπια.

Τα ιζήματα του Πλειόκαινου εμφανίζουν καλύτερη διαστρωμάτωση. Οι σεισμικές ανακλάσεις παρουσιάζουν αποκλίνουσα μορφή από τα ΝΑ προς τα ΒΔ, αντίθετα δηλαδή από την διεύθυνση πλήρωσης της λεκάνης. Επιπλέον, η μορφή της συγκεκριμένης σεισμικής φάσης δείχνει πλευρική πλήρωση της λεκάνης.

Στα Πλειστοκαινικά ιζήματα υπάρχει καλή διαστρωμάτωση. Και εδώ είναι εμφανής η βύθιση της λεκάνης προς τα ΝΑ. Οι σεισμικές ανακλάσεις έχουν καμπυλωτή μορφή.

Στην τομή δεν παρατηρούνται ρήγματα.

4 Σχόλια και επίλογος

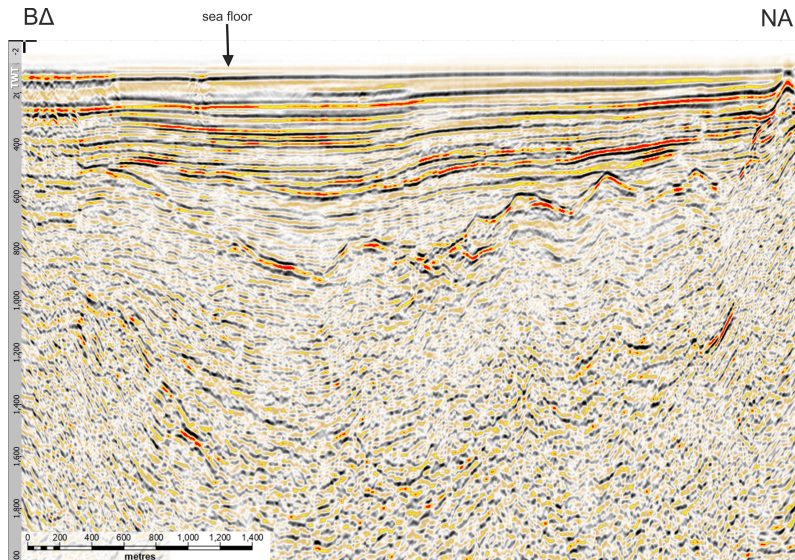
Παρατηρώντας τις σεισμικές τομές που μελετήθηκαν, διαπιστώνεται αρχικά πως η διαβρωμένη βάση του Μεσσήνιου βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος όσο κινούμαστε προς τα ανατολικά επομένως υπήρχε μια σταδιακή βάθυνση στην παλαιολεκάνη.

Εστιάζοντας στα Πλειοκαινικά ιζήματα, με βάση την σεισμική ακολουθία (προελαύνουσα κλινομορφή) που παρατηρήθηκε στην τομή OR13 αλλά και την γενικότερη εικόνα από τις άλλες τομές, μπορεί να αναφερθεί ότι το περιβάλλον απόθεσης ήταν ρηχής θάλασσας έως προελαύνον δελταϊκό περιβάλλον κάτι που επιβεβαιώνεται και από την λιθοστρωματογραφική μελέτη στην ξηρά.

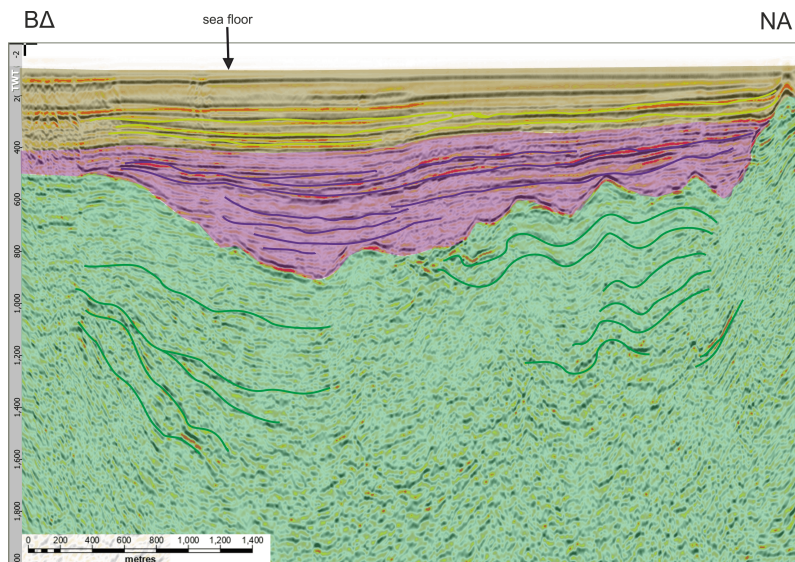
Για να υπάρξει σαφέστερη εικόνα περαιτέρω μελέτες πρέπει να ακολουθήσουν στον θαλάσσιο κυρίως χώρο.

Όσον αφορά την δυνατότητα πετρελαιοφορίας στους δύο Κόλπους, σύμφωνα με Lalechos, 1986 υπάρχουν στρώματα του Μειόκαινου που βρίσκονται στο παράθυρο γένεσης πετρελαίου και έδωσαν ενδείξεις πετρελαιοφορίας. Τα στρώματα αυτά είναι σε βάθος μεταξύ 2400-2600 μέτρων (πετρελαιοφόροι ιλυόλιθοι, πηλόλιθοι και μάργες). Επομένως θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως μητρικά πετρώματα αλλά φαίνονται αρκετά πτωχής ποιότητας.

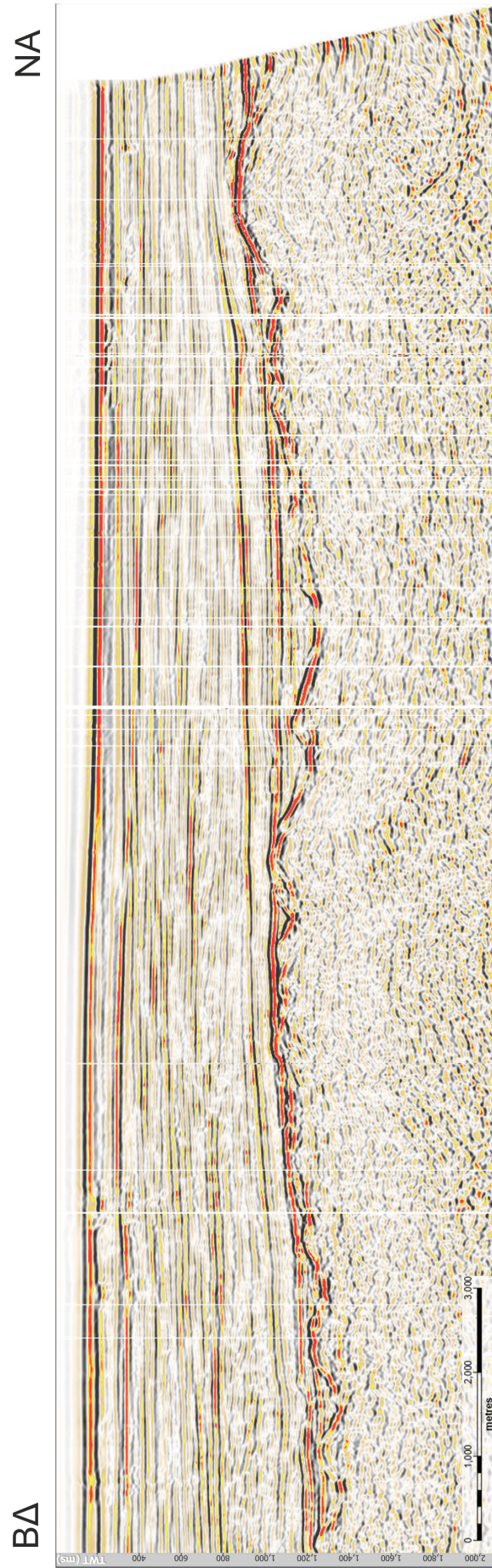
Από τις σεισμικές τομές που αναλύθηκαν δεν μπόρεσε να υπάρξει κάποιο σαφές συμπέρασμα για την ύπαρξη δομών που μπορούν να λειτουργήσουν ως παγίδες πετρελαίου σε βαθμό οικονομικής εκμετάλλευσης.



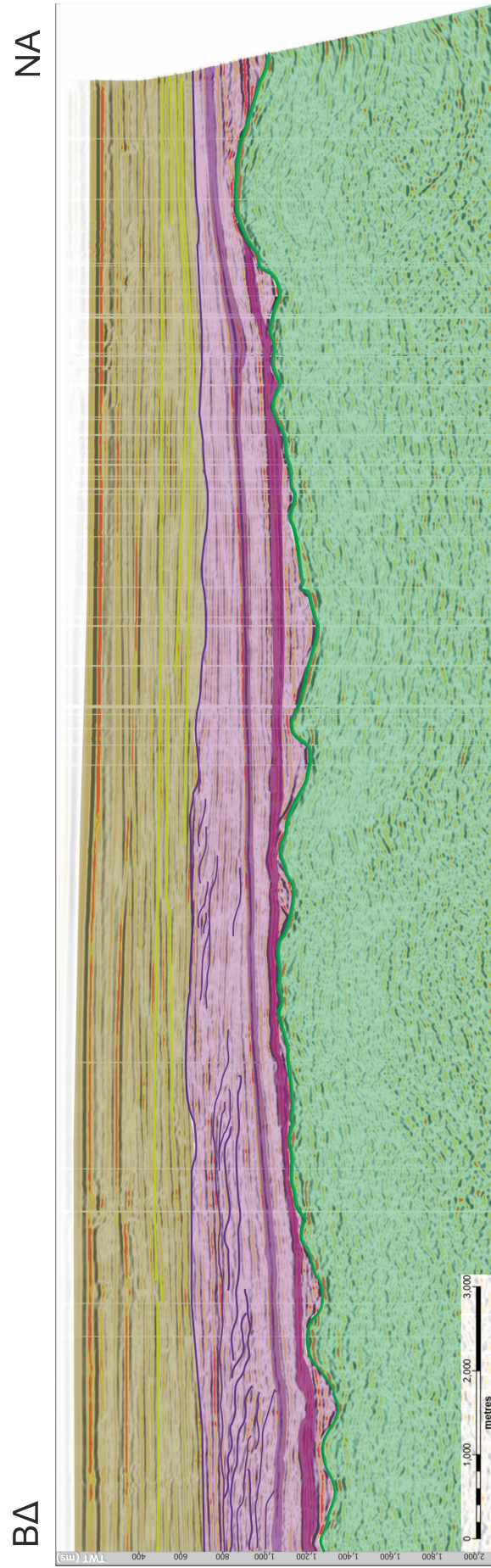
Σχήμα 4.0.1: Σεισμική τομή OR3.



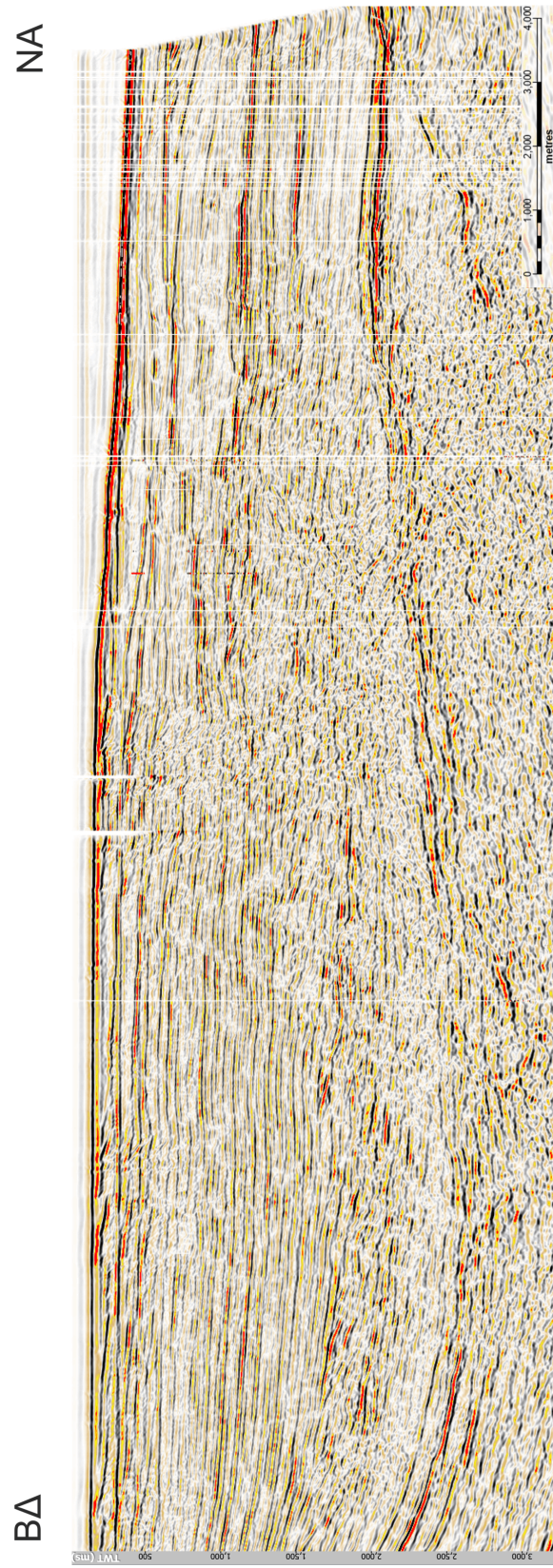
Σχήμα 4.0.2: Σεισμική τομή OR3.



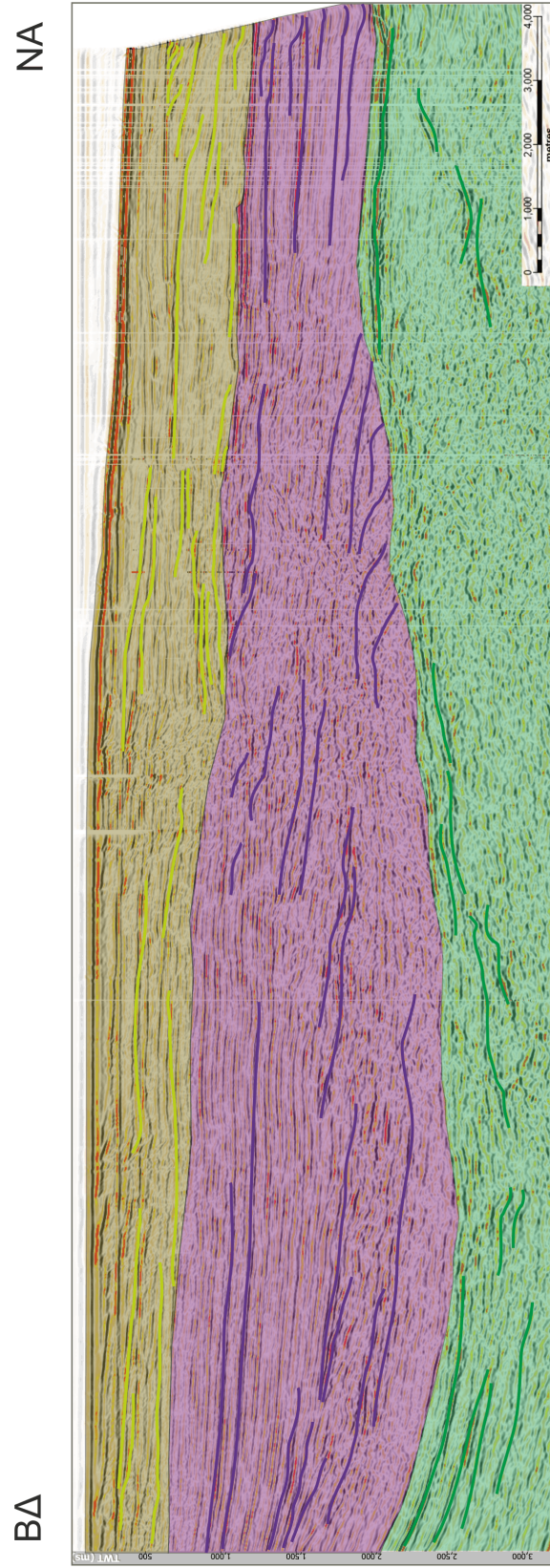
Σχήμα 4.0.3: Σεισμική τομή OR13.



Σχήμα 4.0.4: Σεισμική τομή OR13.



Σχήμα 4.0.5: Σεισμική τομή OR17.



Σχήμα 4.0.6: Σεισμική τομή OR17.

Αναφορές

- Biddle, K. & Wielchowsky, C. (1994). Hydrocarbon Traps. Στο L. B. Magoon & W. G. Dow (Επιμελητές), *The Petroleum System—From Source to Trap* (σσ. 219–236). American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/10.1306/M60585C13>
- Dinter, D. A. & Royden, L. (1993). Late Cenozoic extension in northeastern Greece: Strymon Valley detachment system and Rhodope metamorphic core complex. *Geology*, 21(1), 45. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021<textless>0045:LCEING<textgreater>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<textless>0045:LCEING<textgreater>2.3.CO;2)
- Gluyas, J. & Swarbrick, R. (2011). *Petroleum geoscience* (9. [Dr.]). Blackwell Publishing.
- Karakitsios, V., Cornée, J.-J., Tsourou, T., Moissette, P., Kontakiotis, G., Agiadi, K., Manoutsoglou, E., Triantaphyllou, M., Koskeridou, E., Drinia, H. & Roussos, D. (2017). Messinian salinity crisis record under strong freshwater input in marginal, intermediate, and deep environments: The case of the North Aegean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 485, 316–335. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.06.023>
- Kockel, F. & Walther, H. (1965). Die Strimonlinie als Grenze zwischen SerboMazedonischem und Rila-Rhodope Massiv in Ost Mazedonien. *Geologisches Jahrbuch*, 83, 575–602.
- Koukouvelas, I. K. & Aydin, A. (2002). Fault structure and related basins of the North Aegean Sea and its surroundings. *Tectonics*, 21(5), 10-1-10–17. <https://doi.org/10.1029/2001TC901037>
- Kydonakis, K., Brun, J.-P. & Sokoutis, D. (2015). North Aegean core complexes, the gravity spreading of a thrust wedge. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120. <https://doi.org/10.1002/2014JB011601>
- Lalechos, N. (1986). Correlations and Observations in Molassic Sediments in Onshore and Offshore Areas of Northern Greece. *Mineral Wealth*, 42, 7–34.
- Levorsen, A. I. (1936). Stratigraphic Versus Structural Accumulation. *AAPG Bulletin*, 20, 521–530. <https://doi.org/10.1306/3D932DD6-16B1-11D7-8645000102C1865D>
- Leythaeuser, D. (2005). Origin, migration and accumulation of petroleum. *Encyclopaedia of hydrocarbons* (σσ. 65–84). Istituto Della Enciclopedia Italiana Fondata Da Giovanni Treccani S.p.A.
- Lybérís, N. (1984). Tectonic evolution of the North Aegean trough. *Geological Society, London, Special Publications*, 17(1), 709–725. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1984.017.01.57>
- Mertzanides, Y., Kargiotis, E. & Mitropoulos, A. (2017). GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL DATA OF “EPSILON” FIELD IN PRINOS OIL BASIN. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 43(5), 2257. <https://doi.org/10.12681/bgsg.11425>
- Papanikolaou, D. (1984). The three metamorphic belts of the Hellenides: a review and a kinematic interpretation. *Geological Society, London, Special Publications*, 17(1), 551–561. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1984.017.01.42>
- Papanikolaou, D. (1989). Are the Medial Crystalline Massifs of the Eastern Mediterranean drifted Gondwanan fragments? *Ann. Geol. Pays Hell.*, 1, 63–90.
- Papanikolaou, D. (1997). The tectonostratigraphic terranes of the Hellenides. *Ann. Geol. Pays Hell.*, 37, 495–514.

- Papanikolaou, D. (2015). *Γεωλογία της Ελλάδας*. Πατάκης.
- Perissoratis, C. & Mitropoulos, D. (1989). Late Quaternary Evolution of the Northern Aegean Shelf. *Quaternary Research*, 32(1), 36–50. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(89\)90030-6](https://doi.org/10.1016/0033-5894(89)90030-6)
- Ramdhan, A., Hutasoit, L. & Slameto, E. (2018). Lateral Reservoir Drainage in Some Indonesia's Sedimentary Basins and Its Implication to Hydrodynamic Trapping. *Indonesian Journal on Geoscience*, 5, 65–80.
- Rouchy, J. M. & Caruso, A. (2006). The Messinian salinity crisis in the Mediterranean basin: A reassessment of the data and an integrated scenario [The Messinian Salinity Crisis Revisited]. *Sedimentary Geology*, 188-189, 35–67. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2006.02.005>
- Schmoker, J. W., Krystinik, K. B. & Halley, R. B. (1985). SELECTED CHARACTERISTICS OF LIMESTONE AND DOLOMITE RESERVOIRS IN THE UNITED STATES. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 69(5), 733–741. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/70012826>
- Selley, R. C. (1998). *Elements of petroleum geology* (2. ed.). Acad. Press. <http://www.loc.gov/catdir/description/els032/97074392.html>
- Snel, E., Mărunțeanu, M. & Meulenkamp, J. E. (2006). Calcareous nannofossil biostratigraphy and magnetostratigraphy of the Upper Miocene and Lower Pliocene of the Northern Aegean (Orphanic Gulf–Strimon Basin areas), Greece. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 238(1-4), 125–150. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.03.022>
- Steininger, F. F. & Papp, A. (1979). Current biostratigraphic and radiometric correlations of Late Miocene Central Paratethys stages (Sarmatian s. str., Pannonian s. str., and Pontian) and Mediterranean stages (Tortonian and Messinian) and the Messinian Event in the Paratethys. *Newsletters on Stratigraphy*, 8(2), 100–110. <https://doi.org/10.1127/nos/8/1979/100>
- Suc, J.-P., Do Couto, D., Melinte-Dobrinescu, M. C., Macaleț, R., Quillévéré, F., Clauzon, G., Csato, I., Rubino, J.-L. & Popescu, S.-M. (2011). The Messinian Salinity Crisis in the Dacic Basin (SW Romania) and early Zanclean Mediterranean–Eastern Paratethys high sea-level connection. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 310(3-4), 256–272. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.07.018>
- Tissot, B. P. & Welte, D. H. (1984). *Petroleum Formation and Occurrence* (Second Revised and Enlarged Edition). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87813-8>
- Tranos, M. D. (2011). Strymon and Strymonikos Gulf basins (Northern Greece): Implications on their formation and evolution from faulting. *Journal of Geodynamics*, 51(4), 285–305. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2010.10.002>
- Van Baak, C. G., Krijgsman, W., Magyar, I., Sztanó, O., Golovina, L. A., Grothe, A., Hoyle, T. M., Mandić, O., Patina, I. S., Popov, S. V., Radionova, E. P., Stoica, M. & Vasiliev, I. (2017). Paratethys response to the Messinian salinity crisis. *Earth-Science Reviews*, 172, 193–223. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.015>
- Zanani, I. & Vakalas, I. (2019). Geostatistical mapping of marine surficial sediment types in the Northern Aegean Sea using indicator kriging. *Geo-Marine Letters*, 39(5), 363–376. <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00581-3>