



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών:

«Έρευνα και Εκμετάλλευση Υδρογονανθράκων»



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών – Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
Τμήμα Γεωλογίας – Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών – Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος – Τμήμα Οικονομικών



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΑΝΔΡΕΑΣ Π. ΑΝΔΡΕΟΥ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΤΗΣ
ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ ΣΤΗΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΩΝ
ΑΚΟΛΟΥΘΙΩΝ ΣΤΗΝ ΛΕΒΑΝΤΙΝΗ ΛΕΚΑΝΗ ΚΑΙ Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2017



ΑΝΔΡΕΑΣ Π. ΑΝΔΡΕΟΥ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

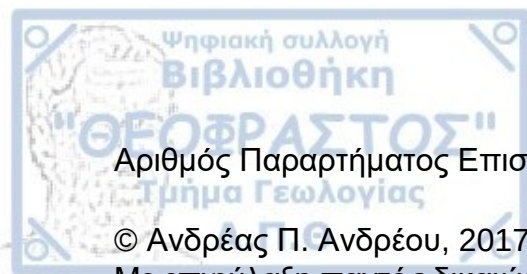
Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΤΗΣ
ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ ΣΤΗΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΩΝ ΑΚΟΛΟΥΘΙΩΝ
ΣΤΗΝ ΛΕΒΑΝΤΙΝΗ ΛΕΚΑΝΗ ΚΑΙ Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Έρευνα και Εκμετάλλευση Υδρογονανθράκων», από τα συνεργαζόμενα Πανεπιστήμια: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών και Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 5/12/17

Τριμελής Συμβουλευτική και Εξεταστική Επιτροπή

Αναπληρωτής Καθηγητής ΑΛΜΠΑΝΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, (Επιβλέπων)
Καθηγητής ΑΝΔΡΕΑΣ ΓΕΩΡΓΑΚΟΠΟΥΛΟΣ, (Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής)
Καθηγήτρια ΦΩΤΕΙΝΗ ΠΟΜΟΝΗ – ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ, (Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής)



Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Ν°

© Ανδρέας Π. Ανδρέου, 2017

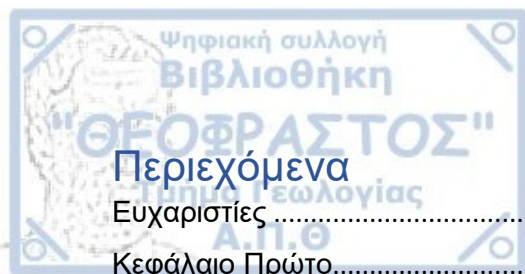
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΤΗΣ
ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ ΣΤΗΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΕΙΑ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΩΝ ΑΚΟΛΟΥΘΙΩΝ
ΣΤΗΝ ΛΕΒΑΝΤΙΝΗ ΛΕΚΑΝΗ ΚΑΙ Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

THE EFFECT OF EASTERN MEDITERRANEAN SEA LEVEL CHANGES ON THE
FORMATION OF SEDIMENTARY SEQUENCES IN THE LEVANTINE BASIN AND
THEIR ROLE IN THE CREATION OF HYDROCARBON DEPOSITS

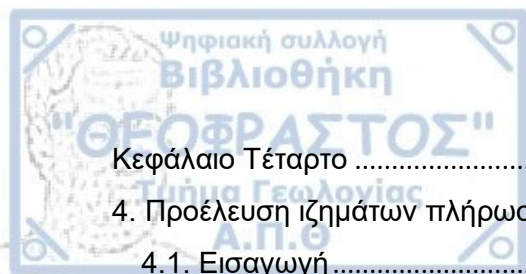
Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ
ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση,
αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής
φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το
παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό
σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

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



Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	6
Κεφάλαιο Πρώτο.....	7
1. Εισαγωγή	7
Κεφάλαιο Δεύτερο	8
2. Γεωτεκτονική εξέλιξη της Ανατολικής Μεσογείου από τα	8
τέλη του Παλαιοζωικού μέχρι σήμερα	8
2.1. Εισαγωγή.....	8
2.2. Από την υπερήπειρο της Παγγαίας στην σημερινή Μεσόγειο	8
2.2.1. Πέρμιο (γύρο στα 290 Ma).....	9
2.2.2. Όριο Πέρμιο – Τριαδικό (251 Ma).....	10
2.2.3. Νώριο (Άνω Τριαδικό)	11
2.2.4. Μέσο Ιουρασικό	13
2.2.5. Άππιο (Άνω Κρητιδικό).....	14
2.2.6. Όριο Κρητιδικού - Τριτογενούς (65.5 Ma).....	16
2.2.7. Όριο Ηωκαίνου - Ολιγοκαίνου (about 34 Ma)	18
Κεφάλαιο Τρίτο	20
3. Παλαιογεωγραφία και εξέλιξη της Λεκάνης Λεβαντίνης.....	20
3.1. Εισαγωγή.....	20
3.2. Τεκτονική.....	21
3.2.1 Μέση – Άνω Ιουρασική ηπειρωτική διάρρηξη και σπάσιμο	24
3.2.2. Κάτω Κρητιδική θερμική καθίζηση και σχηματισμός παθητικού ηπειρωτικού	24
περιθωρίου	24
3.2.3. Άνω Κρητιδική - Σήμερα σύγκλιση και συρρίκνωση	24
3.2.4 Κάτω Ολιγοκαινική διάρρηξη του Κόλπου του Σουέζ και Μέσο Μειοκαινική	25
διάσπαση της Ερυθρά θάλασσας	25
3.2.5. Άνω Μειοκαινική κρίση αλατότητας (MSC) και πλημμυρική υποακολουθία	25
Πλειοκαίνου-Πλειστοκαίνου	25
3.3. Στρωματογραφία.....	26
3.3.1. Το κρυσταλλικό υπόβαθρο της λεκάνης	27
3.3.2. Η Πέρμιο έως Μέσο Ιουρασική ακολουθία (A).....	28
3.3.3. Η Βαθώνια έως Τουρώνια (Μέσο Ιουρασικό – Άνω Κρητιδικό) ακολουθία (B)	29
3.3.4. Η Σενώνια έως Κάτω Ολιγοκαινική ακολουθία (C).....	32
3.3.5. Η Ολιγοκαινική έως Άνω Μειοκαινική Ακολουθία (D)	33
3.3.6. Η Μεσσηνιακή ακολουθία (E)	34
3.3.7. Η Πλειοκαινική – Πλειστοκαινική ακολουθία (F)	34



Κεφάλαιο Τέταρτο	36
4. Προέλευση ιζημάτων πλήρωσης της Λεκάνης	36
4.1. Εισαγωγή	36
4.2. Γεωλογικές συνθήκες	37
4.3. Μοντέλο ιζηματοπόθεσης	41
4.3.1. Αποτελέσματα προσομοίωσης	42
4.3.2. Συμπεράσματα	47
Κεφάλαιο Πέμπτο	49
5. Δημιουργία και ανάπτυξη κοιτάσματος υδρογονανθράκων	49
5.1. Εισαγωγή	49
5.2. Απόθεση μητρικών πετρωμάτων και γένεση υδρογονανθράκων	50
5.2.1. Θερμογενής προέλευση υδρογονανθράκων	55
5.2.2. Βιογενείς προέλευση φυσικού αερίου	56
5.3. Πετρελαϊκό σύστημα	57
5.3.1. Μητρικό πέτρωμα	58
5.3.2. Μετανάστευση	59
5.3.3. Πέτρωμα ταμιευτήρας	59
5.3.4. Πέτρωμα κάλυμμα	60
5.3.4. Δομή παγίδευσης	61
Κεφάλαιο Έκτο	63
6. Εφαρμογές στην Λεκάνη της Λεβαντίνης κοιτάσματα υδρογονανθράκων και προοπτικές	63
6.1. Εισαγωγή	63
6.2. Ανάπτυξη πετρελαϊκών συστημάτων και πιθανές θέσεις υδρογονανθράκων	64
6.2.1. Μητρικά πετρώματα	64
6.2.2. Πετρώματα ταμιευτήρες	66
6.2.3. Πετρώματα καλύμματα	66
6.2.4. Πιθανές θέσεις υδρογονανθράκων	67
6.3. Πρόσφατα ανακαλυφθέντα κοιτάσματα	75
6.3.1. Κοίτασμα Ταμάρ	76
6.3.2. Κοίτασμα Λεβιάθαν	77
6.3.3. Κοίτασμα Αφροδίτη	78
Κεφάλαιο Έβδομο	79
7. Συμπεράσματα	79
8. Βιβλιογραφία	80



Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων Καθηγητή κ. Αλμπανάκη Κωνσταντίνο για την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου για όλες τις θυσίες, την στήριξη και την υπομονή τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Ιδιαίτερες ευχαριστίες αξίζουν και στην φίλη μου Αντωνία που στάθηκε αρωγός και μου συμπαραστάθηκε όλο αυτό το καιρό.

1. Εισαγωγή

Παρά την ανάπτυξη και την χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας η παγκόσμια ζήτηση σε ότι αφορά του υδρογονάνθρακες όχι μόνο δεν παρουσιάζει μείωση, αλλά χρόνο με τον χρόνο αυξάνεται. Μια από τις πιο "υποσχόμενες" περιοχές για έρευνα, με ενδείξεις ύπαρξης μεγάλων κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι η περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου.

Η ύπαρξη μεγάλων ιζηματογενών λεκανών όπως η λεκάνη Ηροδότου και Λεβαντίνης, ο κώνος του Νείλου που αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κομμάτι στην εξέλιξη της περιοχής και η παρουσία του ηπειρωτικού μπλοκ του Ερατοσθένη συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης αρχικά πραγματοποιείται μια ευρύτερη ανασκόπηση της γεωτεκτονικής εξέλιξης της Μεσογείου και τα κύρια γεγονότα τα οποία συνέβησαν στην περιοχή. Στην συνέχεια η μελέτη επικεντρώνεται στην Λεβαντίνη λεκάνη και στην τεκτονική αλλά και στρωματογραφική εξέλιξη της. Ένα από τα κύρια ερωτήματα με τα οποία θα ασχοληθεί, η παρούσα εργασία, είναι η περιοχή προέλευσης των ιζημάτων που πλήρωσαν και αν αυτά είναι ικανά να δώσουν γένεση υδρογονανθράκων.

Τέλος παρουσιάζονται οι διαδικασίες που απαιτούνται ώστε να υπάρξει ανάπτυξη ενός κοιτάσματος. Ακολούθως γίνεται αναφορά στην ιζηματογενή ακολουθία της Λεβαντίνης και μέσω σεισμικών τομών προσδιορίζονται πιθανές θέσεις υδρογονανθράκων. Ενώ για να ενισχυθεί η άποψη ικανών πετρελαϊκών συστημάτων γίνεται μια αναφορά στα πιο πρόσφατα ανακαλυφθέντα κοιτάσματα της Λεκάνης.



Κεφάλαιο Δεύτερο

2. Γεωτεκτονική εξέλιξη της Ανατολικής Μεσογείου από τα τέλη του Παλαιοζωικού μέχρι σήμερα

2.1. Εισαγωγή

Η παλαιογεωγραφία της Γης κατά την διάρκεια του Φανεροζωικού αντανakλά το σπάσιμο της υπερηπείρου της Ροδίνας, τον σχηματισμό της Παγγαίας και της μετέπειτα διάσπασης της. Οι κινήσεις των πλακών είναι βασικά στοιχεία για την κατανόηση της γεωλογικής εξέλιξης της περιοχής της Μεσογείου και για τον περιορισμό των παλαιογεωγραφικών-παλαιοτεκτονικών ανακατασκευών.

Η ιζηματογένεση κατά την διάρκεια του γεωλογικού χρόνου επηρεάστηκε σε παγκόσμια κλίμακα από την γεωγραφική θέση και τις παγκόσμιες κλιματικές συνθήκες, από την χημεία του θαλασσινού νερού, και σε κλίμακα λεκάνης από τις σταδιακές μεταβολές στο τοπικό τεκτονικό περιβάλλον που συνοδεύει τον σχηματισμό και την καταστροφή του ωκεανού της Τηθύος. Η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των μεταβαλλόμενων παραμέτρων είναι σημαντική καθώς ελέγχει και εξηγεί την κατανομή των κλιματικών ζωνών (και κατά συνέπεια την κατανομή των κλιματολογικά ευαίσθητων αποθετικών περιβαλλόντων), το βάθος και την έκταση των βυθισμένων υφάλων και τη βιογενή συμβολή στην παραγωγή ιζημάτων.

Χάρης την μεγάλη βάση δεδομένων (π.χ MEBE project; Barrier and Vrielynck, 2008) κατέστη δυνατή η παραγωγή παγκόσμιων χαρτών οι οποίοι γενικά είναι αποδεκτοί, αν και υπάρχουν διαφορετικές ερμηνείες (όσο αφορά το μέγεθος και την θέσεις) για τις μικρότερες πλάκες.

2.2. Από την υπερήπειρο της Παγγαίας στην σημερινή Μεσόγειο

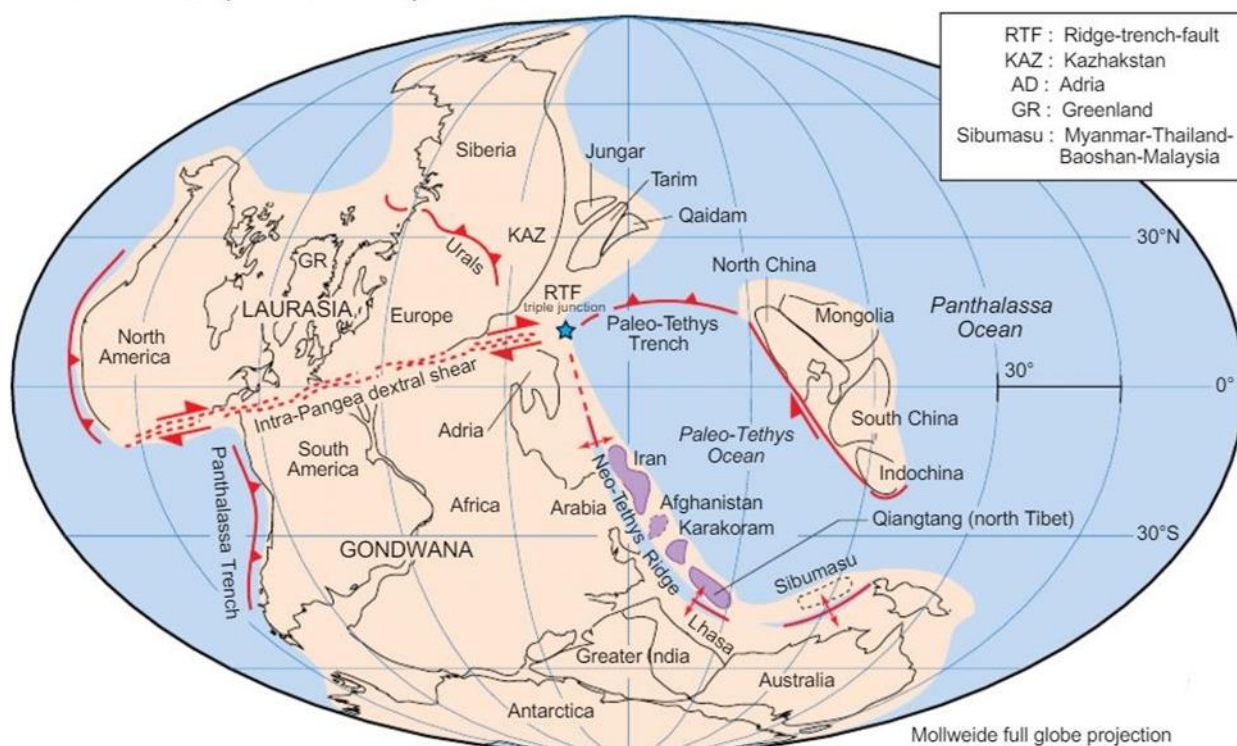
Η γεωτεκτονική εξέλιξη σε παγκόσμια κλίμακα αλλά και για την περιοχή της Μεσογείου μετά από την διάσπαση της υπερηπείρου τη Ροδίνας χωρίστηκε σε 7 περιόδους κλειδιά. Οι περίοδοι αυτοί σηματοδοτούν σημαντικές τεκτονικές αλλαγές που επηρέασαν την παλαιογεωγραφία και την ιζηματογένεση στην περιοχή της Μεσογείου.

2.2.1. Πέρμιο (γύρο στα 290 Ma)

Το Άνω Παλαιοζωικό ήταν μια περίοδος μείζονος τεκτονικής αναδιάρθρωσης. Η Ερκύνια ορογένεση οδήγησε στην ένωση της Γκοντβάνας και της Λαυρασίας σε μια υπερήπειρο, την Παγγαία Β. Την περίοδο του Άνω Λιθανθρακοφόρου - Κάτω Πέρμιου ανατολικά της Παγγαίας, μια ωκεάνια λεκάνη σε σχήμα σφήνας, η Πάλαιο - Τηθύς διευρύνθηκε προς τα ανατολικά μεταξύ της Ευρασίας και της Αφρικής-Αραβίας. Ακολούθως η παγκόσμια αναδιάταξη των πλακών προκάλεσε την κατάρρευση του Ερκύνιου ορογενούς και συνέχισε τι προς τα βόρεια υποβύθιση της Πάλαιο - Τηθύς κάτω από την ευρασιατική ήπειρο (e.g., Vai, 2003).

Μια νέα ωκεάνια λεκάνη η Νέο-Τηθύς άρχισε να σχηματίζεται κατά μήκος του περιθωρίου της Γκοντβάνας. Το άνοιγμα της Νέο-Τηθύς είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία της σύνθετης Κιμερικής ηπειρωτικής πλάκας (Ιράν, Κεντρικό Αφγανιστάν, Karakorum, Qiangtang) (Εικόνα 1). Η Κιμερική ήπειρος προοδευτικά παρασύρθηκε στα βορειοανατολικά, αφήνοντας στο πέρασμά της έναν νέο ωκεανό την Νέο-Τηθύ. Σύμφωνα με τον Muttoni et al. (2003, 2004, 2009b), το άνοιγμα της Νέο-Τηθύς είναι εν μέρει χρονικά ισοδύναμο με μια κύρια δεξιόστροφη κίνηση της Λαυρασίας σε σχέση με την Γκοντβάνη η οποία έλαβε χώρα κυρίως κατά την διάρκεια του Πέρμιου.

EARLY PERMIAN (ca. 296–272 Ma) PANGEA B



Εικόνα 1: Παλαιογεωγραφία της Γης στο Πέρμιο, όπου έχουμε την δημιουργία της υπερηπείρου Παγγαίας Β, την διεύρυνση και υποβύθιση προς τα βόρεια της Πάλαιο-Τηθύς καθώς και την διάνοιξη της Νέο - Τηθύς στο περιθώριο της Γκοντβάνας. (Muttoni, et al., 2009)

2.2.2. Όριο Πέρμιο – Τριαδικό (251 Ma)

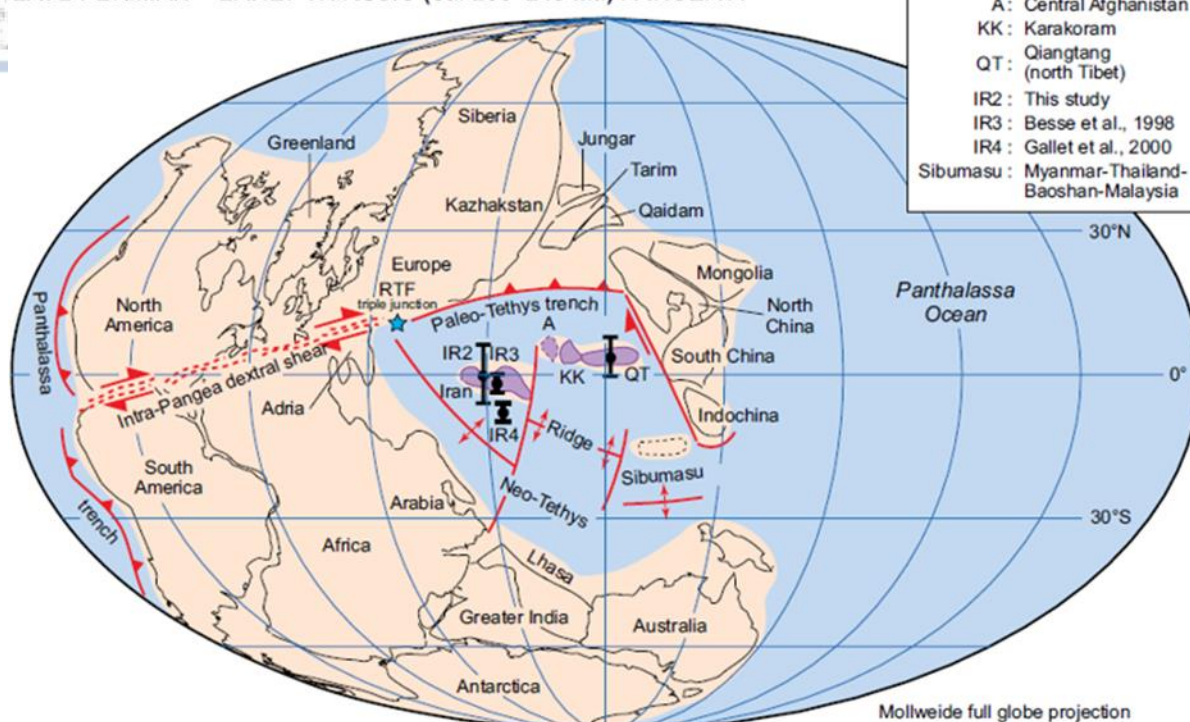
Η αρχή του Μεσοζωικού χαρακτηρίστηκε από το τέλος της μεταβατικής φάσης από την Παγγαία Β στην Παγγαία Α (Irving, 1977, Morel and Irving, 1981, Muttoni et al., 1996, Torq et al., 1997, Bachtadse κ.ά. . 2002, Irving, 2005, Angiolini et al., 2007). Η αλλαγή στη διαμόρφωση της Παγγαίας απαιτούσε μετακίνηση από τα δυτικά προς τα ανατολικά της Λαυρασίας περίπου 3000 χλμ (1864 μίλια) σε σχέση με την Γκοντβάνα (Εικόνα 2). Η δεξιόστροφη κίνηση φιλοξενήθηκε κατά μήκος μιας ζώνης διάτμησης που εκτείνεται από τη ζώνη υποβύθισης της Πανθάλασσας προς την ανατολή μέχρι μια τριπλή διασταύρωση (triple junction joining) που ενώνει τη ζώνη διάτμησης, την ράχη της Νέο-Τηθύς και την ζώνη υποβύθισης της Πάλαιο-Τηθύς κάτω από το νότιο περιθώριο της Λαυρασίας. Αυτή η τριπλή διασταύρωση ήταν τοποθετημένη στο βόρειο περιθώριο της Τηθύς, κοντά στη νότια Ευρώπη (Muttoni et al., 2009b).

Η βόρεια Γκοντβάνα χαρακτηρίστηκε από την ανάπτυξη ενός ώριμου παθητικού περιθωρίου κατά μήκος του ωκεανού Νέο-Τηθύς, ο οποίος άρχισε να ανοίγει στο Λιθανθρακοφόρο (Al-Belushi et al., 1996, Garzanti and Sciunnach, 1997). Ο ωκεάνιος φλοιός άρχισε να σχηματίζεται ήδη από το Κάτω Πέρμιο (Garzanti, 1999 · Angiolini et al., 2003 · Metcalfe 2006). Το άνοιγμα της Νέο-Τηθύς ήταν υπεύθυνο για τη βόρεια κίνηση των περι-Γκοντβάνα μπλοκ (αριθμός μικρών, ημι-ανεξάρτητων τεμαχίων όπως η Απουλία, οι Ταυρίδες, το Ιράν (ΒΔ και Κεντρικό), Sanandaj Sirjan, Heland και Βόρειο Θιβέτ (Ruban et al., 2007)). Οι διαφορετικές ταχύτητες των περι- Γκοντβάνα μπλοκ ελέγχονταν πιθανότατα από την παρουσία ρηγμάτων μετασχηματισμού με Β-Ν διεύθυνση τα οποία καθόριζαν τμήματα της ωκεάνιας ράχης της Νέο-Τηθύς και τα οποία χαρακτηρίζονταν από διαφορετικούς ρυθμούς εξάπλωσης.

Η σημερινή Βόρεια Αφρική βρισκόταν κατά μήκος του νότιου παθητικού περιθωρίου της Νέο-Τηθύς και χαρακτηρίστηκε από την ανάπτυξη εκτατικών λεκανών στη Λιβύη και την Λεβαντίνη. Οι παλαιογεωγραφικές ανακατασκευές είναι πιο περίπλοκες στο δυτικό τμήμα της Τηθύς, καθώς η στενότητα της ωκεάνιας λεκάνης σε συνδυασμό με την πλησιέστερη γειτνίαση με την ράχη της Νέο-Τηθύς και τη ζώνη υποβύθισης της Πάλαιο-Τηθύς περιπλέκουν τον ορισμό και την ακριβή θέση των πολυάριθμων μπλοκ που μπορούν να αναγνωριστούν σε αυτή τη ζώνη.

Το όριο του Πέρμιου - Τριαδικού χαρακτηρίστηκε σε παγκόσμια κλίμακα από τη χαμηλή στάθμη της θάλασσας, που αντανakλάται από τις ευρύτερες ηπειρωτικές ή ρηχές θαλάσσιες φάσεις. Η αρχή της Τριαδικής εποχής χαρακτηριζόταν από μια άνοδο της στάθμης της θάλασσας που μπορεί να εντοπιστεί σε όλο τον κόσμο.

LATE PERMIAN – EARLY TRIASSIC (ca. 260–249 Ma) PANGAEA A



Εικόνα 2: Παλαιογεωγραφία της Γης κατά το όριο του Πέρμιου – Τριαδικού, στο οποίο η Λαυρασία κινείται με μεγαλύτερο ρυθμό σε σχέση με την Γκοντβάνα ανατολικά, στην βόρεια Γκοντβάνα αναπτύσσεται ένα παθητικό περιθώριο ενώ παράλληλα διευρύνεται ο ωκεανός της Νέο-Τηθύς.
(Muttoni, et al., 2009)

2.2.3. Νώριο (Άνω Τριαδικό)

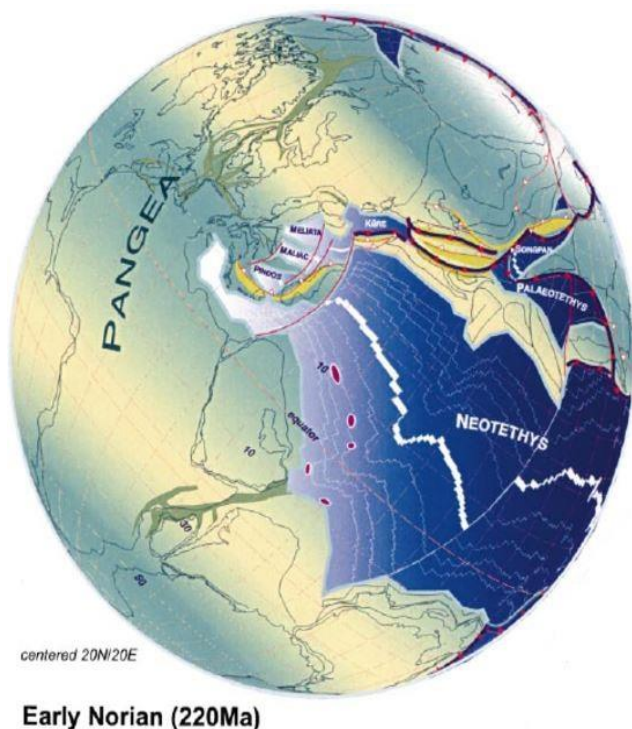
Το Νώριο αντιπροσωπεύει ένα διάστημα κλειδί στην εξέλιξη του ωκεανού της Πάλαιο-Τυθής (Εικόνα 3). Η προοδευτική διεύρυνση της Νέο-Τηθύς και η ταυτόχρονη στένωση της Πάλαιο-Τηθύς είχαν ως τελικό αποτέλεσμα την προσκόλληση του Κιμμερικού εδάφους κατά μήκος του Ευρασιατικού ηπειρωτικού περιθωρίου στο Άνω Τριαδικό (αν και τμήματα της Παλαιό-Τηθύς έκλεισαν νωρίτερα πχ στο Άνω Πέρμιο). Στο στάδιο αυτό η πρώτη απόδειξη του κλεισίματος του ωκεανού της Παλαιό-Τυθής καταγράφηκε από την Κιμμερική ορογένεση κατά μήκος του νότιου περιθωρίου της Ασίας, λόγω της σύγκρουσης του τεμάχου του Ιράν με το ενεργό περιθώριο του Τούραν (Turan). Η σύγκρουση αυτή είναι γνωστή και ως Ηωκημέριο γεγονός (the "Eocimmerian" event) μετά από το οποίο ακολουθήσαν κατά την διάρκεια του Ιουρασικού επιπρόσθετες συγκρούσεις άλλων μικροπλάκων (Zanchi et al., 2009).

Όλες οι μικροπλάκες που αποσπάστηκαν από την Γκοντβάνα, πλησιάζουν την νότια Ασία, η οποία ήταν ένα ενεργό περιθώριο πάνω από μια ζώνης υποβύθισης με κλίση προς τον βορρά. Ο ωκεανός της Νέο-Τηθύς ήταν ευρέως ανοικτός. Η παλαιογεωγραφική κατάσταση είναι ξεκάθαρη στο κεντρικό κομμάτι του κόλπου της Τηθύς, αλλά οι γεωδυναμικές συνθήκες ήταν εξαιρετικά πολύπλοκες κοντά στο

τριπλό σημείο που βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της Τηθύος. Έντονος εφελκυσμός σε οριζόντιας μετατόπισης τεκτονική καταγράφηκε κατά μήκος του νότιου περιθωρίου της Ευρώπης, κοντά στον μελλοντικό άξονα της Αλπικής Τηθύς. Αυτή η τεκτονική δραστηριότητα συνδέθηκε προς τα δυτικά με τον κεντρικό Ατλαντικό ωκεανό, όπου λόγω διάρρηξης σχηματίστηκαν λεκάνες κατά την διάρκεια της Νωριακών χρόνων (Newark Basins). Μεταξύ των διαφόρων μικρών πλακών στην περιοχή της Μεσογείου (Απουλία, Ελλάδα, Τουρκία), έχουν αναγνωριστεί μικρές δίοδοι θαλάσσιων υδάτων, με πυθμένα, εν μέρει με ωκεάνιο φλοιό. Η Βόρεια Αφρική και η Αραβία ενήργησαν ως το νότιο παθητικό περιθώριο της Νέο-Τηθύς, με εκτατικές λεκάνες στη Λιβύη και την Αίγυπτο (Schandelmeier and Reynolds, 1997). Εκτατική τεκτονική (λεκάνη Palmirya) καταγράφηκε κατά μήκος του Λιβάνου-Βόρειου Ισραήλ.

Κατά την διάρκεια της Νώριας εποχής, το κλίμα ήταν γενικά ξηρό στα γεωγραφικά πλάτη της Τηθύς: Οι ανθρακικές φάσεις που είχαν αποθεθεί κατά μήκος του περιθωρίου της Τηθύς ήταν οριοθετημένες από τις εβαπορητικές φάσεις, τα παράκτια και τα ηπειρωτικά ποτάμια περιβάλλοντα. Οι ξηρές κλιματολογικές συνθήκες ευνόησαν πιθανώς την πρώιμη, και ευρέως διαδεδομένη δολομητοποίηση που παρατηρήθηκε στις περισσότερες ανθρακικές πλατφόρμες Νωριακής ηλικίας (Frisia, 1991, Iannace and Frisia, 1993).

Ο διάχυτος δολομιτισμός των ανθρακικών πλατφορμών έληξε κοντά στο όριο Νώρια – Ραίτιο (Norian-Rheetian) στη δυτική Τηθύ λόγω της μετατόπισης σε υγρές συνθήκες (Berra et al., 2010; Berra, 2012), η οποία αντανάκλαται επίσης και από την αύξηση απόθεσης κλαστικών, τα οποία μπορούν να εντοπιστούν κατά μήκος ενός τμήματος του βόρειου περιθωρίου



Εικόνα 3: Παγκόσμια παλαιογραφία κατά το Άνω Τριαδικό στο οποίο έχουμε το κλείσιμο της Παλαιό-Τηθύς και την προσκόλληση του Κιμμερικού εδάφους κατά μήκος του Ευρασιατικού ηπειρωτικού περιθωρίου.

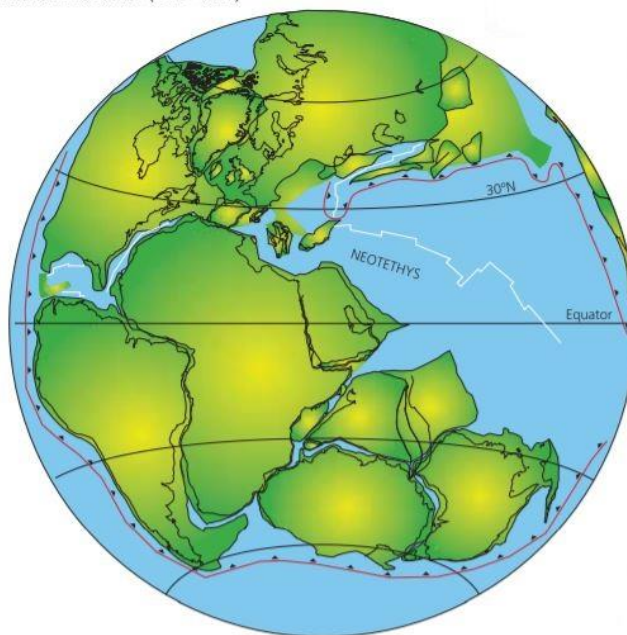
(Stampfli, and Borel, 2002)

2.2.4. Μέσο Ιουρασικό

Η διάσπαση της Παγγαίας συνεχίστηκε και κατά τους Μέσο Ιουρασικούς χρόνους με την εξάπλωση (της διάσπασης) στον κεντρικό Ατλαντικό και την ολοκληρωτική αποκόλληση της Αφρικής από την βόρεια Αμερική (Εικόνα 5). Μια ζώνη διάρρηξης κατά μήκος του μελλοντικού άξονα του βόρειου Ατλαντικού προκάλεσε την ανάπτυξη ενός δικτύου περίπου παράλληλων λεκανών κατά μήκος του Ιβηρικού περιθωρίου και της περιοχής Newfoundland (Καναδά). Σχηματίστηκε επίσης ωκεάνιος φλοιός ανάμεσα στην Ινδία και την Αραβία, μετά από ένα στάδιο διάρρηξης Κάτω Ιουρασικής ηλικίας.

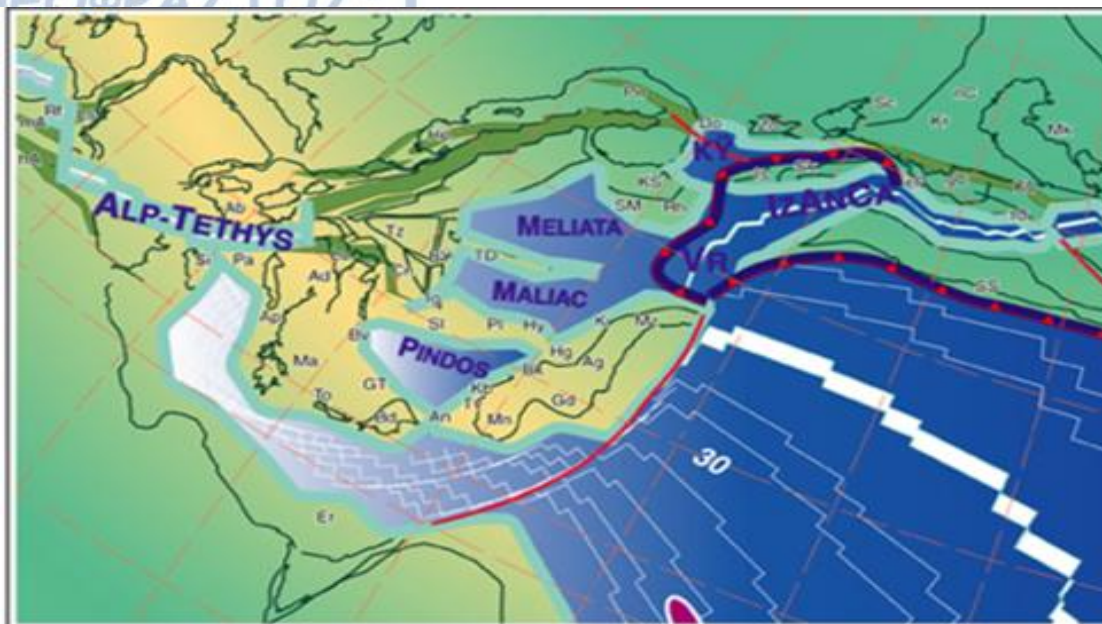
Στην περιοχή της Τηθύος η κατάσταση ήταν περισσότερο πολύπλοκη (Barrier and Vrielynck, 2008), λόγω της ύπαρξης ενός εκτατικού καθεστώτος στα δυτικά (εξαπλώνεται στην Αλπική Τηθύ, γνωστή και ως Πεννινικός ωκεανός) και στο νότο (εξαπλώνεται ο ωκεανός της Μεσογέας (Mesogea)) και λόγω της έναρξης της υποβύθισης της Νέο-Τηθύος κατά μήκος του νότιου περιθωρίου της Λαυρασίας. Η προς τα βόρεια υποβύθιση της Νέο-Τηθύος ήταν υπεύθυνη για την ανάπτυξη ηφαιστειακής ζώνης ενώ οπισθοτόξιες λεκάνες (retro-arc basins) σχηματίστηκαν μεταξύ του περιθωρίου της Λαυρασίας και του ηφαιστειακού τόξου. Η ιζηματογένεση στις οπισθοτόξιες λεκάνες κυμαίνεται από βαθιάς έως ρηχής θάλασσας ανθρακικά και κλαστικά. Το άνοιγμα του ωκεανού της Μεσογέας διαχώρισε το περιθώριο της Αραβίας και της Βόρειας Αφρικής από το κύριο ηπειρωτικό μπλοκ, που αποτελείτο από μια μεγάλη ανθρακική πλατφόρμα και από τις λεκάνες που συνδέονται με την πλατφόρμα, οι οποίες αργότερα θα αποτελούσαν τμήμα του τουρκικού παζλ και των μπλοκ Δινάριαδες και Πελαγονική (Dinaride-Pelagonian). Η νότια ακτή του ωκεανού της Μεσογέας χαρακτηρίστηκε από παράκτιες αποθέσεις κατά μήκος της σημερινής βόρειας Αφρικής (Guiraud and Bosworth, 1999), ενώ ανθρακικοί ύφαλοι αποτέθηκαν στο μεγαλύτερο μέρος της ανατολικής προς τη νότια Αραβία.

Middle Jurassic (170 Ma)



Εικόνα 5: Παγκόσμια παλαιογραφική εξέλιξη στο Μέσο Ιουρασικό με την αποκόλληση της Αφρικής από την Βόρεια Αμερική και την δημιουργία ωκεάνιου φλοιού ανάμεσα στην Αραβία και την Ινδία

(Torsvik et al., 2002)



Εικόνα 6 : Παλαιογεωγραφική ανακατασκευή του Δυτικού τμήματος της Νέο-Τηθύς στο Άνω Τριαδικό όπου γίνεται η υποβύθιση της Νέο-Τηθύς και αναπτύσσεται ηφαιστειακή ζώνη.

(<https://virtualexplorer.com.au/article/2002/57/western-alps-reconstruction/geo.html>)

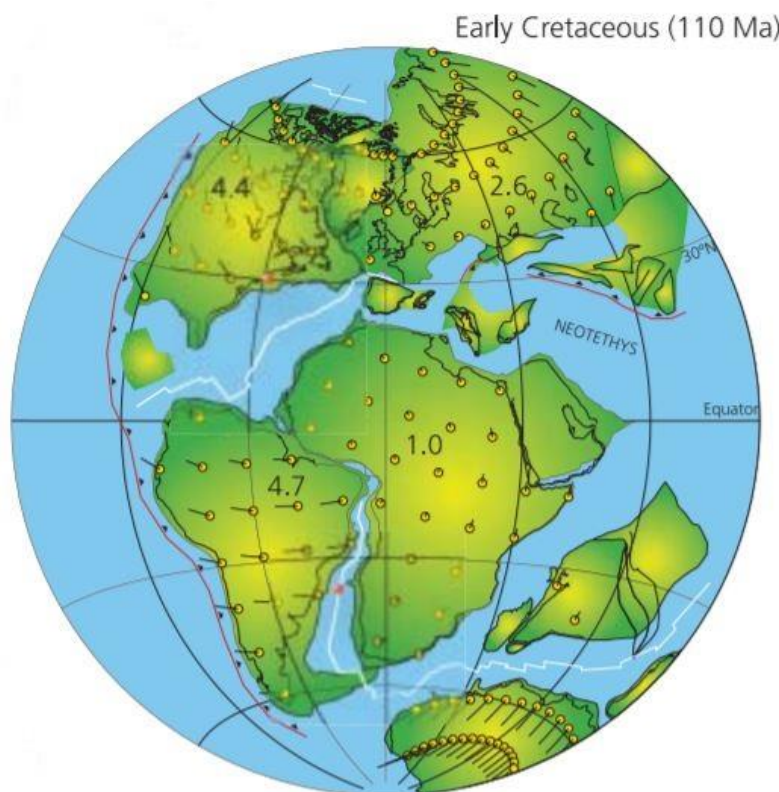
2.2.5. Άπτιο (Άνω Κρητιδικό)

Οι κύριοι θαλάσσιοι οδοί που χαρακτηρίζουν τη σημερινή μορφή της Γης αναγνωρίζονται εύκολα στον χάρτη του Άπτιου (Εικόνα 7). Ο βόρειος Ατλαντικός ωκεανός άνοιξε ανάμεσα στην Ιβηρία και την Newfoundland, όπου το πιο βόρειο τμήμα του μελλοντικού Ατλαντικού ωκεανού χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη ενός δικτύου λεκανών διάρρηξης, ανάμεσα σε Καναδά, Γροιλανδία και Σκανδιναβία. Η Αφρική διαχωρίστηκε από την Ινδία και την Ανταρκτική από στενές θαλάσσιες διόδους. Ο νότιος Ατλαντικός ωκεανός άνοιξε ανάμεσα στην νότια Αφρική και το νοτιότερο τμήμα της νοτίου Αμερικής. Η ηπειρωτική Νότια Αμερική και Αφρική εξακολουθούσαν να συνδέονται κατά μήκος του μελλοντικού Ατλαντικού στην περιοχή του ισημερινού.

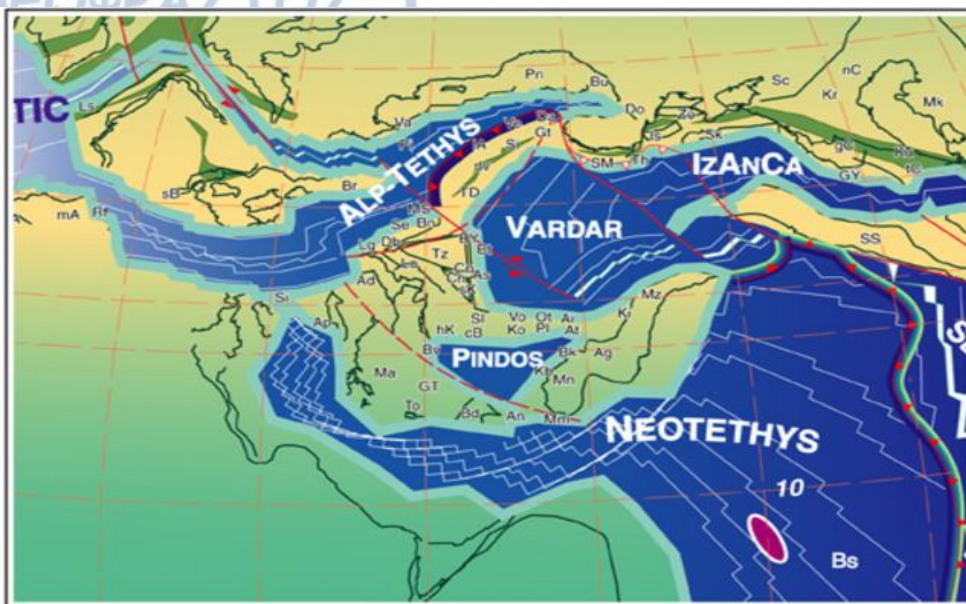
Η Αλπική Τηθύς ένωνε τον κεντρικό Ατλαντικό με τον Νέο-Τηθύ ωκεανό. Το παθητικό περιθώριο της βόρειας Αφρικής και του βορειότερου τμήματος της Αραβίας αντίκριζαν τον ωκεανό της Μεσογέας (Barrier and Vrielynck, 2008). Το ενεργό νότιο περιθώριο της Λαυρασίας εξακολουθούσε να χαρακτηρίζεται από την υποβύθιση του ωκεανού της Νέο-Τηθύς κάτω από αυτό. Κατά μήκος αυτού του περιθωρίου είναι εφικτή ακόμα η αναγνώριση του ηφαιστειακού τόξου με οπισθοτόξιες λεκάνες. Ορισμένες από αυτές τις οπισθοτόξιες λεκάνες εξακολουθούν να διατηρούνται σήμερα (Μαύρη Θάλασσα και Κασπία Θάλασσα), αλλά οι περισσότερες (π.χ. Βάρδαρ, Σμύρνη-Άγκυρα) έχουν κλείσει. Το κεντρικό τμήμα της Νέο-Τηθύς χαρακτηρίστηκε από την αργή, προς τα βόρεια κίνηση ενός πολύπλοκου παζλ από μπλοξ, που περιλαμβάνει τα μελλοντικά τμήματα της Τουρκίας, Ελλάδας, Διήνιρες και της Αδριατικής μικροπλάκας (Εικόνα 8).

Ο Αλβηκός (Albian) χρόνος πιθανότατα σηματοδότησε την αρχή του συμπιεστικού καθεστώτος στην Αλπική Τηθύ, με την πιθανή έναρξη της υποβύθισης της. Κατά τη διάρκεια του Άππιου χρόνου η στάθμη της θάλασσας ήταν κοντά στο μέγιστο επίπεδο για το Φανεροζωικό, έτσι το μέγεθος της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας είναι πολύ μεγάλο. Κατά μήκος του ανυψωμένου ώμου της νότιας ακτής της Μεσογέας (Mesogeas) οι παράκτιες αποθέσεις αντιπροσωπεύονται από μια στενή ζώνη, ενώ το μεγαλύτερο μέρος του ανατολικού και νότιου τμήματος του αραβικού μπλοκ χαρακτηρίζονταν από ρηχές έως βαθιές ανθρακικές αποθέσεις. Η μελλοντική περιοχή της Ερυθράς Θάλασσας ανυψώθηκε και αναδύθηκε.

Κατά εποχή του Άλβιου, το παλαιοωκεανογραφικό σκηνικό χαρακτηριζόταν από ένα σημαντικό ανοξικό γεγονός που μπορεί να εντοπιστεί σε όλη την θάλασσα του Άλβιου.



*Εικόνα 7: Παγκόσμια παλαιογραφική εξέλιξη στο Άππιο όπου αναγνωρίζεται το άνοιγμα του Βόρειου Ατλαντικού ωκεανού μεταξύ Ιβηρίας και Καναδά. Επίσης η Αφρική διαχωρίστηκε από την Ινδία και την Ανταρκτική ενώ αρχίζει να αναπτύσσεται και ο νότιος κλάδος του ατλαντικού ανάμεσα στην Δυτική Αφρική και στην Νότια Αμερική.
(Torsvik et al., 2002)*



Εικόνα 8 : Παλαιογεωγραφική ανακατασκευή του Βορειοδυτικού τμήματος της Νέο-Τηθύς στο Άνω Τριαδικό όπου ένα σύνθετο τμήμα από ηπειρωτικές μικροπλάκες προσεγγίζει το νότιο περιθώριο της Λαυρασίας.

(<https://virtualexplorer.com.au/article/2002/57/western-alps-reconstruction/geo.html>)

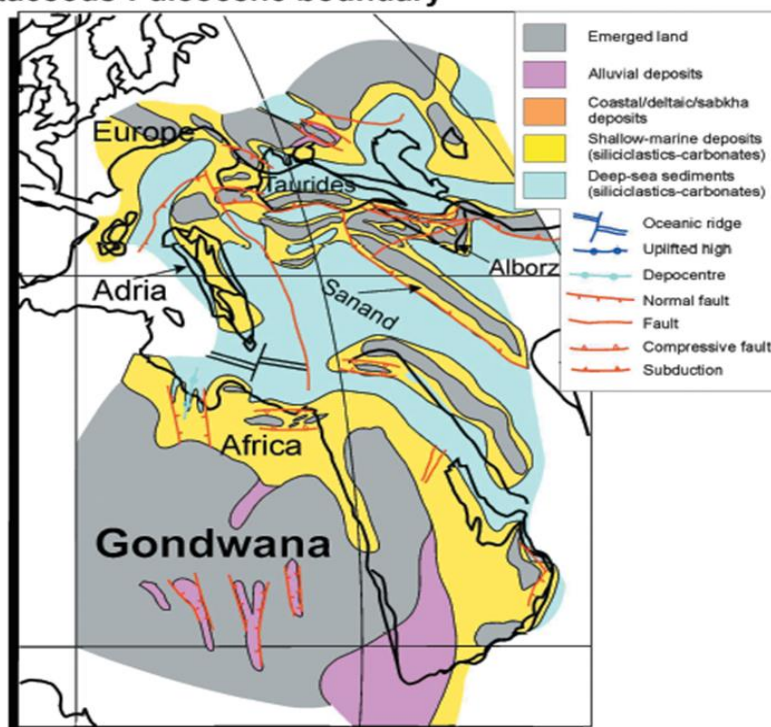
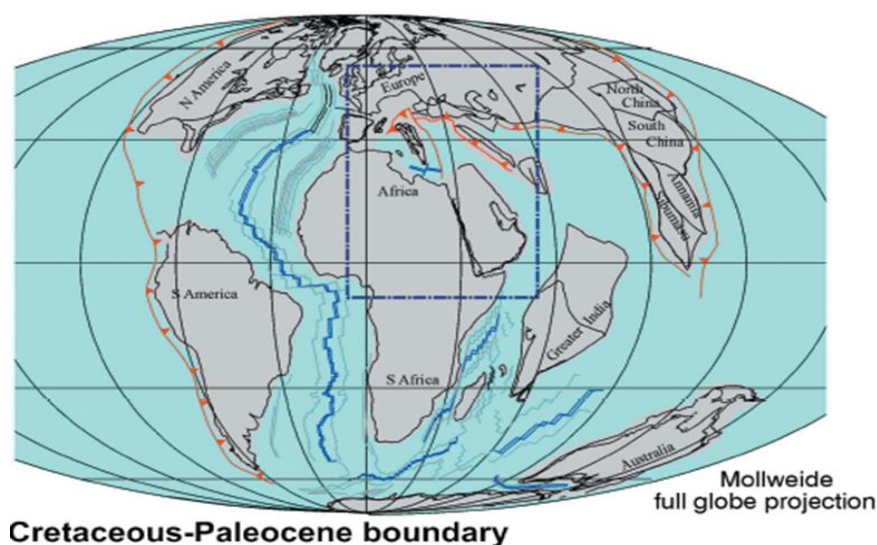
2.2.6. Όριο Κρητιδικού - Τριτογενούς (65.5 Ma)

Στο τέλος της Κρητιδικής εποχής οι σημερινές ήπειροι καθορίστηκαν πλήρως (Εικόνα 9). Μόνο ο βόρειος Ατλαντικός ωκεανός δεν άνοιξε εντελώς (η διάρρηξη ήταν ακόμα ενεργή μεταξύ Γροιλανδίας και Καναδά). Η Αφρική αποχωρίστηκε από την Ανταρκτική και την Ινδία, η οποία άρχισε την προς τα βόρεια πορεία της και η οποία θα οδηγήσει στην ορογένεση των Ιμαλαΐων.

Η Αλπική Τηθύς και οι σχετιζόμενες με αυτήν λεκάνες, οι οποίες συνέδεαν τον κεντρικό Ατλαντικό ωκεανό με την νέο-Τηθύ, ήταν σε ένα καθεστώς σύγκλισης πλακών. Το μεγάλο και πολύπλοκο πάζλ από μπλόξ της Αδριατικής, Ελλάδας και Τουρκίας πλησίαζαν το νότιο περιθώριο της Ευρασίας μετά την σχεδόν ολοκληρωτική υποβύθιση της Νέο-Τηθύς. Η σύγκρουση μεταξύ αυτού του σύνθετου συγκροτήματος διαφορετικών μικροπλακών θα παρήγαγε τις Αλπική - Διναρίδες (Alpine-Dinaric) και Τουρκική ορογενείς ζώνες.

Στην περιοχή των Άλπεων η κατώτερη πλάκα αντιπροσωπεύθηκε από την Ευρασία, ενώ ανατολικά των Άλπεων η Λαυρασία αντιπροσώπευε την ανώτερη πλάκα. Αυτή η αλλαγή μπορεί να αποδοθεί στην διαφορετική ηλικία και προέλευση του υποβυθιζόμενου ωκεάνιας φλοιού (Αλπική Τηθύς στις Άλπεις , Νέο-Τηθύς στην ανατολή). Βόρεια της ζώνης υποβύθισης - σύγκρουσης ήταν ακόμα δυνατή η αναγνώριση της εμφάνισης των οπισθοτόξειων λεκανών από τη Μαύρη Θάλασσα έως την Κασπία Θάλασσα. Το προοδευτικό κλείσιμο της Νέο-Τηθύς επίσης επηρέασε την εξέλιξη του παθητικού περιθωρίου της Αραβίας όπου η περί – Αραβική ορεινή μάζα (Peri-Arabian Massif high) τροφοδοτούσε με ιζήματα τόσο προς τα βόρεια (προς την Νέο-Τηθύ) όσο και προς τα νότια.

Το νότιο περιθώριο της Αραβίας πιθανότατα αντιπροσωπεύθηκε από έναν ρήγμα μετασχηματισμού που χωρίζει αυτή την Αραβία από την Ινδία. Νότια της Περι-Αραβικής ορεινής μάζας στην Αραβική πλάκα, η ιζηματογένεση αντιπροσωπεύεται από την επικράτηση βαθιάς θάλασσας κλαστικών και ρηχής θάλασσας ανθρακικών που περνούν σε μια μεγάλη παράκτια πεδιάδα με απόθεση προσχωσιγενών ιζημάτων. Εκτατικές λεκάνες με βαθιάς θάλασσας ανθρακικά (Sirt Basin) αναπτύχθηκαν κατά μήκος του βόριου παθητικού περιθωρίου της Αφρικής και στον κόλπο Sirt. Λεκάνες διάρρηξης (γέμισαν από ηπειρωτικές κλαστικές αποθέσεις) παρουσιάζονται επίσης στο εσωτερικό της κεντρικής ανατολικής Αφρικής προς τα νότια.



Εικόνα 9: Παλαιογεωγραφική εξέλιξη στο όριο Κρητιδικού – Παλαιογενούς (πάνω) και κύριες αποθετικές συνθήκες στο νότιο περιθώριο της Τυθής (κάτω)
(Berra and Angiolini, 2014)

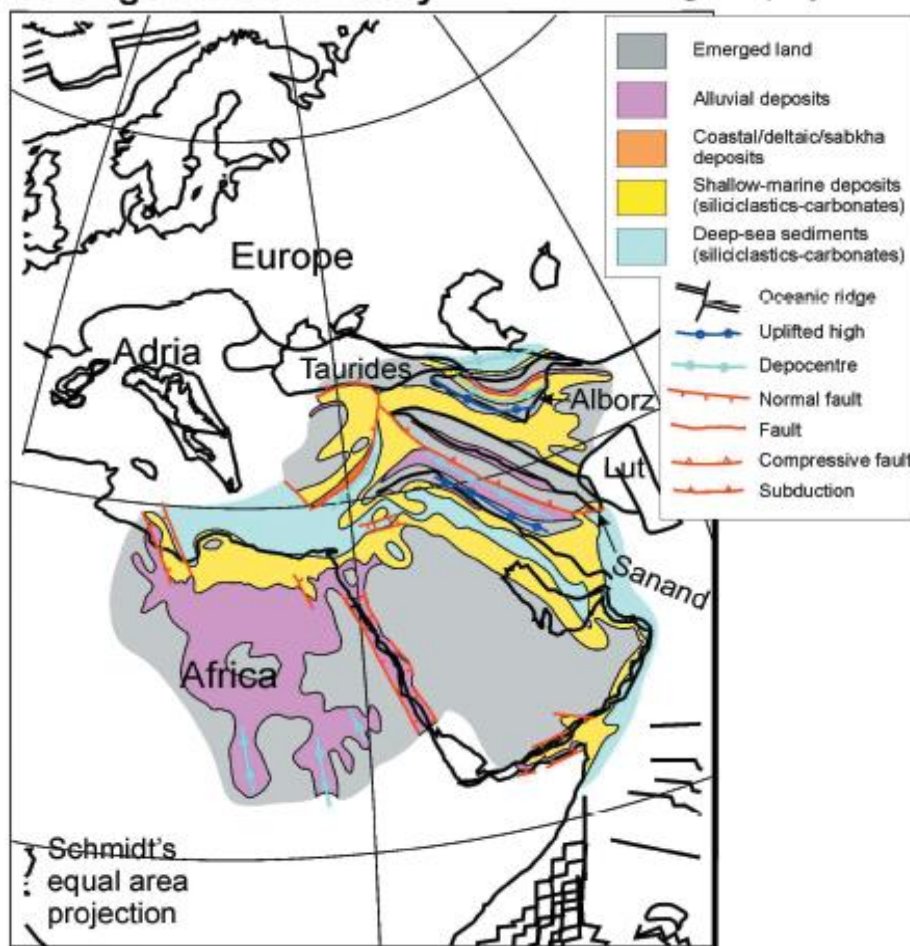
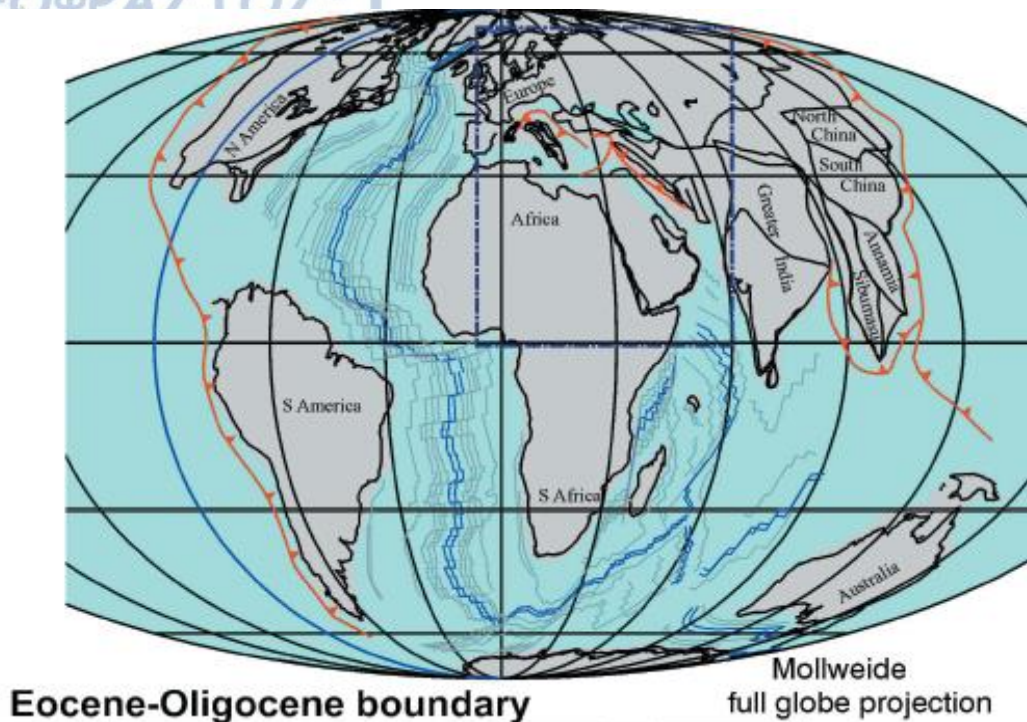
2.2.7. Όριο Ηώκαινου - Ολιγοκαινού (about 34 Ma)

Το άνοιγμα του Ατλαντικού και του Ινδικού Ωκεανού συνδυάστηκε με την κίνηση της Αφρικής προς το νότιο όριο της Ευρασίας και με το σταδιακό κλείσιμο του Ωκεανού Νέο-Τηθύος (Εικόνα 10). Η ταχεία προς τα βόρεια κίνηση της Ινδίας ήταν υπεύθυνη για την ηπειρωτική σύγκρουση και την ανάπτυξη των Ιμαλαΐων, μετά το πλήρες κλείσιμο της ανατολικής Νέο-Τηθύος.

Το πρώην σύνθετο παζλ των μικροπλακών που ήταν παρόν στο βόρειο τμήμα της Μεσογείου και νότια της Νέο-Τηθύος στριμώχτηκε στη ζώνη σύγκρουσης κατά μήκος μιας περιοχής που εκτείνεται από τις Άλπεις ως την Ινδία (e.g., Dercourt et al., 1993; Barrier and Vrielynck, 2008; Moix et al., 2008). Αυτή η σύγκρουση προκάλεσε τις ορογενείς ζώνες από τις Άλπεις μέχρι τα Ιμαλάια, συμπεριλαμβανομένης της Σερβο-Πελαγονικής περιοχής (Serbo-Pelagonian area), των Ποντίδων και των Ταυρίδων. Μετά τις συγκρούσεις που καταγράφηκαν από αυτό το σύνθετο συγκρότημα μικροπλακών, το συνεχιζόμενο σύστημα συμπίεσης που συνδέεται με την περιστροφή προς τα αριστερά της Αφρικής παρήγαγε την προς τα βόρεια υποβύθιση του ωκεανού της Mesogea (που εξελίσσεται στην λεκάνη της Ανατολικής Μεσογείου) κάτω από τα νεοσυσταθέντα εδάφη στη νότια Ευρασία.

Η Περι-αραβική μάζα πλησίαζε τη Λαυρασία η οποία ξεκίνησε την ανάπτυξη του μετώπου παραμόρφωσης του Zagros (Barrier and Vrielynck, 2008). Η αναδυόμενη περιοχή της βορειοανατολικής πλευράς της αραβικής πλάκας μπορεί να ερμηνευτεί ως η περιφερειακή διόγκωση της κάτω πλάκας. Η σύνδεση της Αραβίας στην Ευρασία οδήγησε σε μερικό διαχωρισμό μεταξύ του Ινδικού Ωκεανού προς τα ανατολικά και της λεκάνης της Ανατολικής Μεσογείου προς τα δυτικά. Η Αραβική πλάκα ανυψώθηκε σημαντικά οπότε η μέχρι πρότινος υφαλοκρηπίδα ήταν σχεδόν εξ ολοκλήρου εκτεθειμένη. Η ιζηματογένεση (ανθρακικά ρηχής θάλασσας πέρασαν σε κλαστικά βαθιάς θάλασσας, λεκάνη Kirkuk) μειώθηκε σε μια στενή ζώνη κατά μήκος της μελλοντικής Μεσοποταμίας και του Περσικού Κόλπου.

Η Βόρεια Αφρική εξακολουθούσε να χαρακτηρίζεται ως παθητικό περιθώριο που βρισκόταν νότια από την Ανατολική Μεσόγειο. Βαθιάς θάλασσας κλαστικά αποτέθηκαν στον Κόλπο Sirt, ενώ οι ηπειρωτικές αποθέσεις συγκεντρώθηκαν στην σημερινή Αίγυπτο, τη Λιβύη και το Σουδάν. Κοντά στο χρονικό όριο Ηώκαινο - Ολιγόκαινο, καταγράφηκε έντονη μαγματική δραστηριότητα στην περιοχή Afar (Afar Traps). Ηφαιστειογενή ιζήματα είχαν επίσης αποτεθεί κατά μήκος του δυτικού περιθωρίου της Αραβικής πλάκας, όπου μια κοιλάδα διάρρηξης (rift valley), στην οποία είχαν αποτεθεί αλλουβιακά - λιμναία ιζήματα σηματοδότησε την έναρξη του ανοίγματος της μελλοντικής Ερυθράς Θάλασσας. Ένα σύνθετο δίκτυο λεκανών διάρρηξης αναπτύχθηκε κατά μήκος του μελλοντικού Κόλπου του Aden και ηφαιστειακή δραστηριότητα καταγράφηκε μέσα στις ορογοντικές ζώνες της νότιας Ευρασίας (κυρίως Lut Block, Κεντρικό Ιράν και Αρμενία; Barrier and Vrielynck, 2008).



Εικόνα 10: Παλαιογεωγραφική εξέλιξη στο όριο Ηωκαίνου – Ολιγοκαίνου (πάνω) και κύριες αποθετικές συνθήκες στο νότιο περιθώριο της Τυθής (κάτω) (Berra and Angiolini, 2014)

3. Παλαιογεωγραφία και εξέλιξη της Λεκάνης Λεβαντίνης

3.1. Εισαγωγή

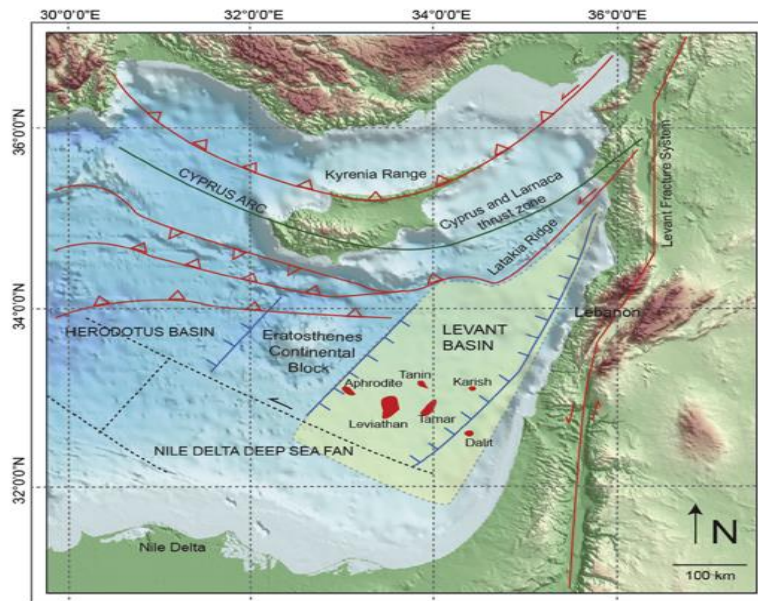
Η λεκάνη της Λεβαντίνης βρίσκεται στο ανατολικότερο τμήμα της περιοχής της Μεσογείου και θεωρείται ότι είναι τα υπολείμματα της Μεσοζωικής Τηθύς που προέκυψαν λόγω της διάσπασης της Παγγαίας. Οριοθετείται προς τα βόρεια από τη ζώνη εφίππουσης (Thrust zone) της Λάρνακας και βορειοδυτικά από το υποθαλάσσιο βουνό Ερατοσθένης. Ο δελταϊκός κώνος του Νείλου και η ακτές της Ανατολικής Μεσογείου καθορίζουν αντίστοιχα το νοτιοδυτικό και ανατολικό περιθώριο (Εικόνα 11).

Στοιχεία από σεισμικές και άλλες γεωφυσικές έρευνες δείχνουν ότι η λεκάνη Λεβαντίνη περιέχει 12 - 14 χλμ. Μεσοζωϊκών και Καινοζωϊκών ακολουθιών πάνω από ένα διαρρηγμένο υπόβαθρο Τριαδικής - Κάτω Ιουρασικής ηλικίας. Η λεκάνη είναι δομικά πολύπλοκη με στοιχεία συμπίεσης και επέκτασης λόγω των κινήσεων των πλακών, της τεκτονικής του άλατος και άλλων διαδικασιών βαρύτητας (Elia et al. 2013 , Gardosh & Druckman, 2006).

Ωστόσο, υπάρχει μεγάλη διαμάχη για το κατά πόσο η διαδικασία διάρρηξης έχει οδηγήσει στον σχηματισμό μιας λεκάνης με ωκεάνιο πυθμένα ή εάν ο πυθμένας της είναι από ηπειρωτικό φλοιό ο οποίος έχει λεπτύνει λόγω της εφελκυστικής τεκτονικής την οποία έχει υποστεί.

Πρόσφατες μελέτες παρέχουν χερσαίες και υπεράκτιες συσχετίσεις για τη νότια περιοχή της Λεβαντίνης (δηλ. το Ισραήλ) μέσω της χρήσης γεωτρήσεων και σεισμικών δεδομένων. Ενώ η μελέτη υπεράκτιων εξερευνητικών θέσεων στο Λίβανο και τη Συρία έγινε με την ανάλυση σεισμικών δεδομένων.

Οι συνέπειες των τεκτονικών αλληλεπιδράσεων και των διακυμάνσεων της στάθμης της θάλασσας στην πλήρωση της λεκάνης μελετώνται περαιτέρω σε μια παλαιογεωγραφική προοπτική, αποκαλύπτοντας ένα περιθώριο που κυριαρχείται από ανθρακικά και ένα μείγμα ανθρακικών και κλαστικών στην λεκάνη.



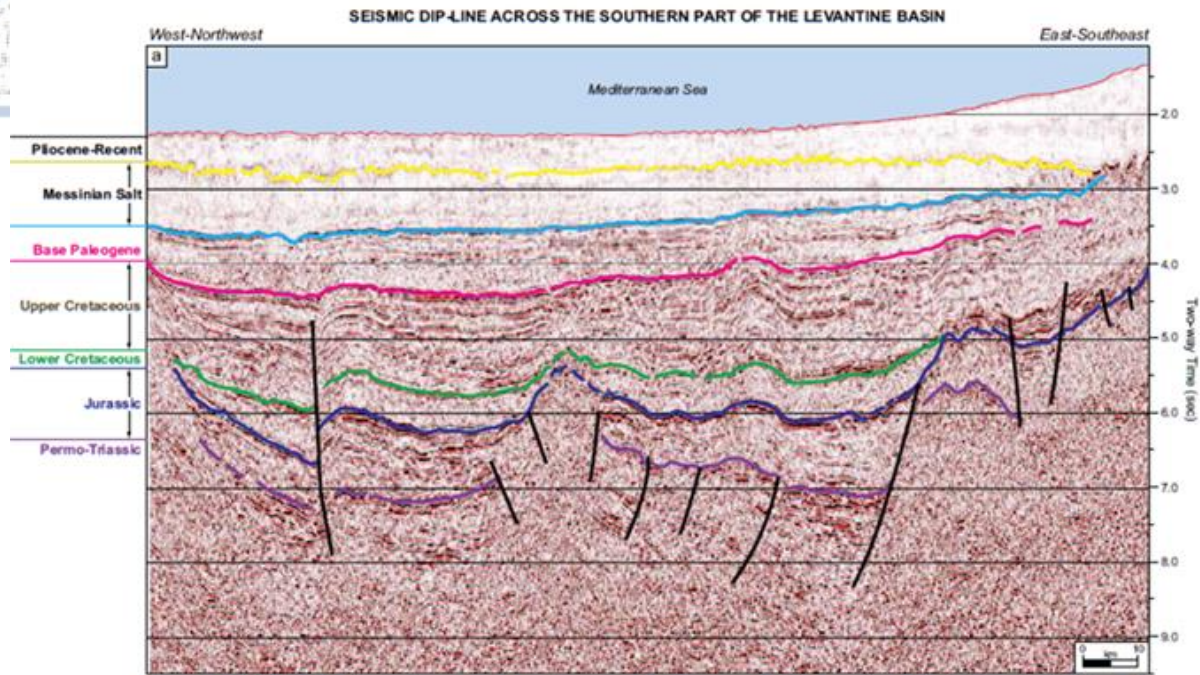
Εικόνα 11: Τοπογραφικός χάρτης της λεκάνης Λεβαντίνης στον οποίο απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά που την οριοθετούν καθώς και τα κύρια ανακαλυφθέντα κοιτάσματα σε αυτήν.

(Hawie et al., 2013)

3.2. Τεκτονική

Η λεκάνη Λεβαντίνη είναι ένα υπόλειμμα μιας μεγαλύτερης ωκεάνιας λεκάνης (Νέο-Τυθής) που άνοιξε μεταξύ των διαφόρων διασπασμένων τεμαχίων της υπερηπείρου Παγγαίας στο Κάτω Μεσοζωικό (Dewey et al., 1973, Bein & Gvirtzman 1977, Garfunkel & Derin 1984, Robertson & Dixon 1984). Ωστόσο, η ιστορία και η φύση του φλοιού κατά την εξέλιξη της λεκάνης Λεβαντίνης δεν είναι γενικά συμφωνημένη και εμπίπτει σε δύο μοντέλα. Το πρώτο μοντέλο ερμηνεύει τον υποκείμενο φλοιό ως ωκεάνιο και ως προϊόν διάρρηξης, ενώ το δεύτερο θεωρεί ότι είναι ένας εκτεταμένος (λέπτυνση λόγω τεντώματος) ηπειρωτικός-μεταβατικός φλοιός. Με βάση τις γεωφυσικές καταγραφές που αφορούν το βάθος της ασυνέχειας Moho (υπάρχουν καταγραφές 20 χλμ. και 35-40 χλμ. για τον ηπειρωτικό φλοιό προς το ανατολικό τμήμα της λεκάνης) μπορούν να υποστηριχθούν και τα δύο μοντέλα.

Τα σύγχρονα σεισμικά δεδομένα όμως υποδηλώνουν ότι ο φλοιός κάτω από τη λεκάνη Λεβαντίνη έχει πιθανώς μεταβατικό χαρακτήρα, καθώς δεν υπάρχουν στοιχεία που να αποδεικνύουν ωκεάνιο φλοιό. Αντ' αυτού, οι βαθιές σεισμικές γραμμές δείχνουν ένα ρηγματωμένο υπόβαθρο Ιουραϊκής ή πιθανώς Τριαδικής ηλικίας. Αυτό αποτυπώνεται και σε σεισμικό προφίλ (Εικόνα 12) από το νότιο τμήμα της λεκάνης στο οποίο επίσης τα πακέτα των ακολουθιών είναι περίπου ορθογώνια με τα περιθώρια της λεκάνης (δηλαδή παράλληλα με την υποτιθέμενη μεσοζωική διεύθυνση επέκτασης).



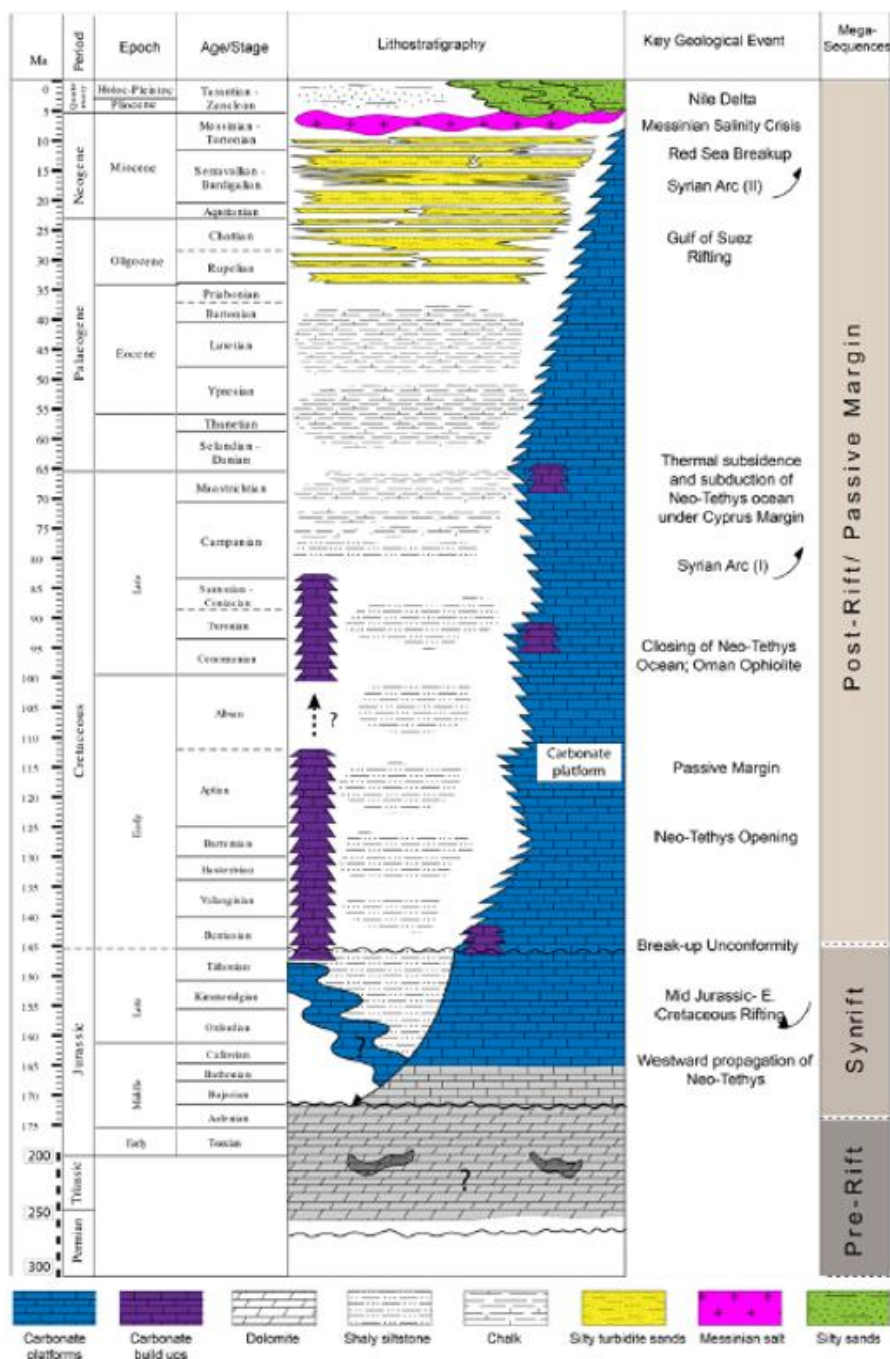
Εικόνα 12: Σεισμική τομή ΔΒΔ-ΑΝΑ κατεύθυνσης από το νότιο τμήμα της λεκάνης της Λεβαντίνης στο οποίο απεικονίζεται το ρηγματωμένο υπόβαθρο και η απόθεση των ιζηματογενών ακολουθιών.
(Roberts and Peace, 2007)

Κατά την διάρκεια του Μέσου Ιουρασικού μέχρι Άνω Κρητιδικό η λεκάνη βρισκόταν σε ένα παθητικό ηπειρωτικό περιθώριο. Από το Άνω Κρητιδικό η λεκάνη άρχισε να κλείνει λόγω της σύγκρουσης μεταξύ της Αφροαραβικής και Ευρασιατικής πλάκας, η οποία οδήγησε στην υποβύθιση του ωκεάνιου φλοιού της Τηθύς κάτω από το Κυπριακό Τόξο στο Νεογενές (Woodside 1977, Garfunkel 1998). Η σύγκλιση μεταξύ της Αφρικανικής και Ευρασιατικής πλάκας εξακολουθεί να είναι σε εξέλιξη και καθορίζεται από το ενεργό όριο υποβύθισης του κυπριακού τόξου και την ράχη της Λατάκας (Ben-Avraham et al. 2002).

Η δομή του περιθωρίου της Ανατολικής Μεσογείου και η γειτονική βαθιά θαλάσσια λεκάνη διατηρεί τα χαρακτηριστικά των κυριότερων τεκτονικών γεγονότων που συνοδεύουν το άνοιγμα και το κλείσιμο του ωκεανού της Νέο-Τηθύς. Αυτά τα γεγονότα μπορούν να συνοψιστούν στις ακόλουθες τεκτονοστρωματογραφικές φάσεις (Εικόνα 13):

- (i) Μέσο – Άνω Ιουρασική ηπειρωτική διάρρηξη και διάσπαση,
- (ii) Κάτω Κρητιδική θερμική καθίζηση και σχηματισμός παθητικού ηπειρωτικού περιθωρίου,
- (iii) Άνω Κρητιδική - Σήμερα σύγκλιση και συρρίκνωση,
- (iv) Κάτω Ολιγοκαινική διάρρηξη του Κόλπου του Σουέζ και Μέσο Μειοκαινική διάσπαση της Ερυθρά θάλασσας, και
- (v) Άνω Μειοκαινική κρίση αλατότητας (MSC) και πλημμυρική υποακολουθία Πλειοκαίνου-Πλειστοκαίνου.

Στις επόμενες υποενότητες παρέχεται μια σύντομη περίληψη των κύριων τεκτονικών φάσεων και γεγονότων απόθεσης που σχετίζονται με κάθε φάση. Μια τέτοια περίληψη είναι σημαντική διότι αυτά τα τεκτονοστρωματογραφικά γεγονότα επηρέασαν άμεσα την κατανομή των φάσεων στη λεκάνη, στην δομή της οποία στηρίζεται η διαπερατότητας και συνεπώς τη ροή του ρευστού κατά τη διάρκεια της μετανάστευσης υδρογονανθράκων.



Εικόνα 13: Τεκτονοστρωματογραφική στήλη στην οποία συνοψίζεται, η προ-τεκτονική, συν-τεκτονική και μετα-τεκτονική ιστορία και τα κύρια γεωλογικά γεγονότα της λεκάνης Λεβαντίνης.

(Al-Balushi et al., 2016 τροποποιημένη εικόνα)

3.2.1 Μέση – Άνω Ιουρασική ηπειρωτική διάρρηξη και σπάσιμο

Η διάσπαση του βόρειου τμήματος της Γκοντβάνας σε πολλά μικροπλάκidia (π.χ. Ταυρίδες, Κιμμέρια και υποθαλάσσιο βουνό Ερατοσθένης) σημειώθηκε στο Ανώτερο Παλαιόζωϊκό - Κατώτερο Μεσοζωϊκό (Stampfli et al., 1991, Hirsch κ.ά., 1995, Garfunkel 1998, Longacre et al. 2007, Robertson & Dixon 1984). Ένα σύστημα λεκάνης και τεκτονικού κέρατος ΒΑ-ΝΔ προσανατολισμού, το οποίο καταγράφει ΒΔ-ΝΑ επέκταση, αναγνωρίζεται σε βαθύτερα δομικά και στρωματογραφικά επίπεδα της κεντρικής λεκάνης της Λεβαντίνης. Δομές Ιουρασικής ηλικίας που σχετίζονται με διάρρηξη έχουν παρατηρηθεί και στο βόρειο τμήμα της λεκάνης Λεβαντίνης (Al-Balushi et al. 2012).

Μια πρόσφατη μελέτη βαρύτητας (gravity inversion) από την Cowie & Kusznir (2012), προτείνει ότι ο ηπειρωτικός φλοιός της Λεβαντίνης υποβλήθηκε σε ακραία λέπτυνση κατά την διάρκεια της διάρρηξης από περίπου 35 χλμ. στην ξηρά σε περίπου 10 χλμ. υπεράκτια στο κέντρο της λεκάνης, η οποία συμφωνεί ευρέως με άλλες εκδόσεις (Ginzburg et al., 1979, Makris et al., 1983, Ginzburg et al., 1994, Ben-Avraham κ.ά., 2002).

3.2.2. Κάτω Κρητιδική θερμική καθίζηση και σχηματισμός παθητικού ηπειρωτικού περιθωρίου

Κατά τη διάρκεια του Κατώτερου - Ανώτερου Κρητιδικού, το περιθώριο της Λεβαντίνης μετατράπηκε σε ένα παθητικό περιθώριο και σημειώθηκε θερμική καθίζηση (Bein & Gvirtzman 1977, Gardosh et al., 2010). Η περίοδος αυτή χαρακτηριζόταν από την δράση κανονικών ρηγμάτων, υπο-παράλληλα προς την σημερινή ακτογραμμή της Ανατολικής Μεσογείου. Στην περιοχή κυριαρχούσαν ανθρακικές αποθέσεις ρηχής έως βαθιάς θάλασσας που εναλλάσσονταν με κλαστικά στο περιθώριο της λεκάνης (May, 1991). Το Κάτω - Μέσο Κρητιδικό χαρακτηρίστηκε από την ταχεία ανάπτυξη και προς τα επάνω επαύξηση (aggradation) μιας ανθρακικής πλατφόρμας (Ben-Avraham et al., 2006). Στο Μέσο Κρητιδικό, η απόθεση χαρακτηρίστηκε από την προέλαση (progradation) των ανθρακικών στη λεκάνη, ακολουθούμενη από εκτατική ανάπτυξη ανθρακικών πλατφορμών στο περιθώριο (Ben-Avraham et al., 2006).

3.2.3. Άνω Κρητιδική - Σήμερα σύγκλιση και συρρίκνωση

Η σύγκλιση της Αφρικανικής-Αραβικής πλάκας και της Ευρασιατικής πλάκας άρχισε κατά το Άνω Κρητιδικό και οδήγησε στην δημιουργία μιας ζώνης υποβύθισης προς το βορρά στο βόρειο τμήμα της Λεβαντίνης (Robertson & Dixon 1984, Ben-Avraham 1989). Ως αποτέλεσμα αυτής της σύγκλισης, μια σειρά δομών συντόμευσης, όπως είναι η πτυχωσιγενής ζώνη του Συριακού τόξου (Syrian Arc Fold Belt), που αναπτύχθηκε σε όλη την περιοχή της Λεβαντίνης και στη βόρεια Αίγυπτο, ανέστρεψαν το παλαιότερο σύστημα (Ανώτερο Μεσοζωϊκό) λεκάνης και τεκτονικού κέρατος. Η συρρίκνωση συνεχίστηκε στην περιοχή της Λεβαντίνης στο Καινοζωϊκό και κατέληξε

σε μια δεύτερη φάση πτύχωσης του Συριακού τόξου (Syrian Arc folding) στο Κάτω Μειόκαινο (Gardosh & Druckman 2006). Οι μεγάλες πρόσφατες ανακαλύψεις φυσικού αερίου στη λεκάνη Λεβαντίνη βρέθηκαν σε μεγάλες δομές που σχετίζονται με το Συριακό τόξο στο Κάτω Μειόκαινο (Hodgson 2012).

3.2.4 Κάτω Ολιγοκαινική διάρρηξη του Κόλπου του Σουέζ και Μέσο Μειοκαινική διάσπαση της Ερυθράς θάλασσας

Η διάρρηξη του Σουέζ πλάτους περίπου 70 χλμ. και μήκους 500 χλμ., αποτελεί το βορειοδυτικό κλάδο της Ερυθράς Θάλασσας. Η επέκταση και η διάρρηξη στον Κόλπο του Σουέζ άρχισαν στο Ολιγόκαινο (Patton et al., 1994). Ωστόσο, η κύρια φάση διάρρηξης παρατηρήθηκε κατά το Μειόκαινο και ακολούθησε η διάσπαση της ερυθράς θάλασσας στο Μέσο Μειόκαινο (Σερραβάλιο) (Dolson et al., 2001). Το τεκτονικό άνοιγμα της Ερυθράς Θάλασσας διαχώρισε την Αραβική από την Αφρικανική πλάκα και όρισε ένα νέο όριο πλάκας με ένα ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης, γνωστό ως ρήγμα Μετασχηματισμού της Νεκράς Θάλασσας (Dead Sea Transform - DST), κατά μήκος του ορίου της Λεβαντίνης (Mart et al., 2005).

Η ανύψωση που σχετίζεται με τη διάρρηξη της ερυθράς θάλασσας διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην τροποποίηση των ποτάμιων μοτίβων αποστράγγισης σε ολόκληρη την Αφρική και ενήργησε ως βασικός διαχωριστής αποστράγγισης και πηγής κλαστικού ιζήματος για το σύστημα του Πρώτο-Νείλου ποταμού (Macgregor 2012). Η άνοδος των ώμων της διάρρηξης (rift shoulders) και άλλων συναφών αφρικανικών πρισμάτων (African swells) προκάλεσε συστήματα που αρχικά αποστράγγιζαν την περιοχή προς τα δυτικά και μετέπειτα προς τα βόρεια με αποτέλεσμα να σχηματίσουν το τρέχον σύστημα αποστράγγισης του Νείλου (Macgregor 2012).

3.2.5. Άνω Μειοκαινική κρίση αλατότητας (MSC) και πλημμυρική υποακολουθία Πλειοκαίνου-Πλειστοκαίνου

Στο τέλος του Μειοκαίνου (περίπου 5,96 Ma), τα στενά του Γιβραλτάρ έκλεισαν ως συνέπεια της συνεχιζόμενης σύγκλισης της αφρικανικής πλάκας με την Ευρασιατική. Η επακόλουθη διακοπή της σύνδεσης της Μεσογείου με τον Ατλαντικό ωκεανό, οδήγησε σε μια δραματική αλλαγή του παλαιοπεριβάλλοντος που είναι γνωστή ως κρίση αλατότητας του Μεσσηνίου (Messinian Salinity Crisis - MSC) (Hsü et al., 1977, Meijer & Krijgsman 2005). Η έλλειψη τροφοδότησης ωκεάνιου νερού και οι υψηλοί ρυθμοί εξάτμισης που προκύπτουν από το ξηρό μεσογειακό κλίμα οδήγησαν σε δραματική πτώση της στάθμης της θάλασσας, αυξάνοντας την αλατότητα του θαλασσινού νερού και προάγοντας την απόθεση μεγάλου πάχους (τοπικά άνω των 2 χλμ.) εβαπορητικών ακολουθιών (Hsü 1972, Hsü et al. 1977, Ryan & Cita 1978, Ryan 2009). Το μέγεθος της μεσσηνιακής πτώσης της στάθμης της θάλασσας είναι θέμα συζήτησης από τότε που το γεγονός αναγνωρίστηκε για πρώτη φορά από τον Hsü (1972). Έχει εκτιμηθεί ότι ήταν 1300 m (Ben-Gai et al., 2005, Urgeles et al., 2011),

1500-1900 m (Ryan 1976, Steckler et al., 2003), 1730-2230 m (Bartol & Govers 2009) και μέχρι 3500 μέτρα (Ryan 1978). Κατά τη διάρκεια αυτής της σημαντικής και γεωλογικά ταχείας πτώσης της στάθμης της θάλασσας, το περιθώριο της Λεβαντίνης υποβλήθηκε σε εκτεταμένη διάβρωση, με αποτέλεσμα το σχηματισμό βαθιών υποθαλάσσιων φαραγγιών τα οποία διάβρωσαν κατά βάθος (incised) τον πυθμένα (Gvirtzman & Buchbinder 1978).

Οι πλημμύρες του Πλειοκαίνου (Ζάγκλιο) σηματοδοτούν το τέλος της Μεσσηνιακής κρίσης αλατότητας (περίπου 5.33 Ma) και την αποκατάσταση των φυσιολογικών θαλάσσιων συνθηκών στις λεκάνες της Μεσογείου (Hilgen & Langereis 1993, Hilgen et al., 2007). Η Πλειοκαινική - Πρόσφατη ακολουθία υπέρκειται ασύμφωνα του Μεσσηνιακού άλατος και αποτελείται κυρίως από ιζήματα που προέρχονται από το Νείλο και φτάνουν μέχρι 4 χλμ. πάνω από την περιοχή του κώνου του Νείλου (Gardosh & Druckman 2006, Segen et al., 2006). Κατά μήκος του περιθωρίου της Λεβαντίνης, όμως, η Πλειοκαινική-Πρόσφατη ακολουθία είναι λεπτότερη (περ. 0,5-1 χλμ.) και χαρακτηρίζεται από σειρές που αποτελούνται από πηλόλιθο και ιλυόλιθο (Gardosh & Druckman 2006).

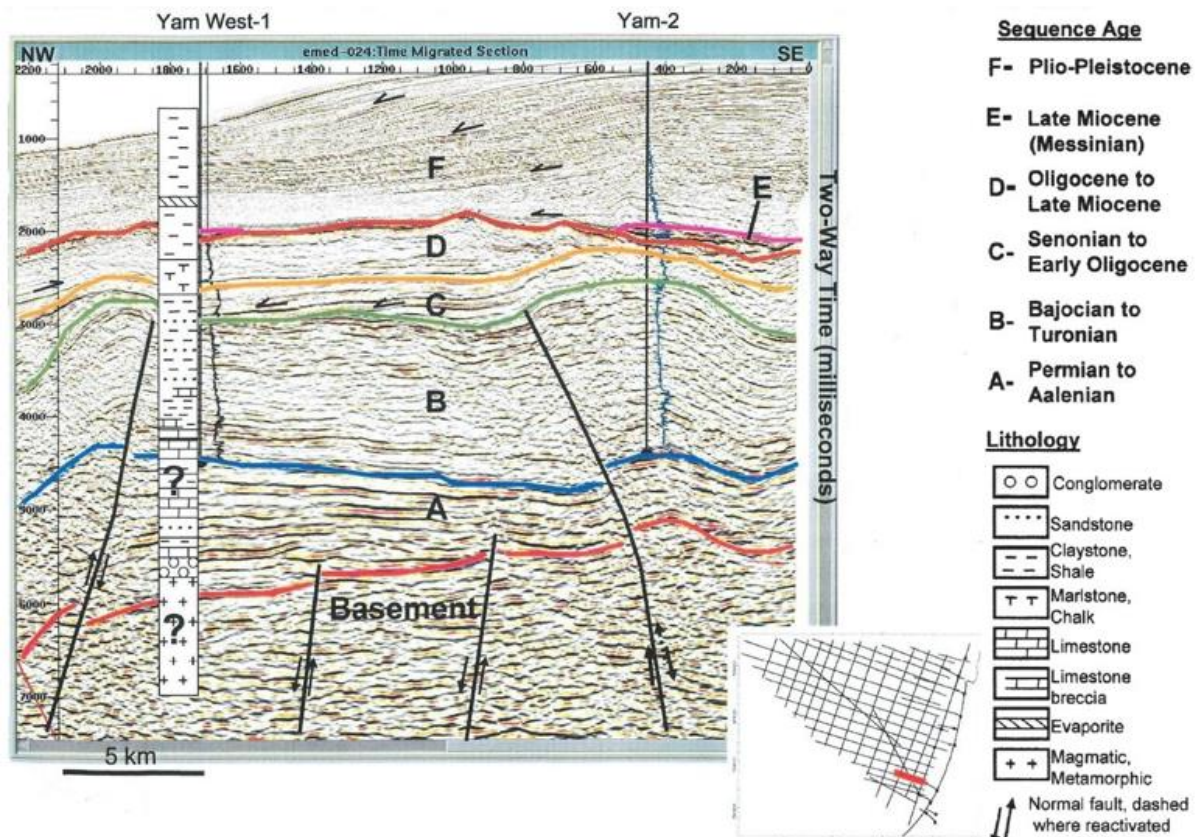
3.3. Στρωματογραφία

Κατά τους Gardosh & Druckman (2006), η λεκάνη Λεβαντίνη έχει πληρωθεί από ελαφρώς παραμορφωμένα ιζήματα Μέσοζωικής έως πρόσφατης ηλικίας τα οποία σε ορισμένα σημεία φτάνουν μέχρι και 14 χλμ. πάχος. Η ερμηνεία των σεισμικών προφίλ βασίζεται στον σεισμικό χαρακτήρα των κύριων σεισμικών πακέτων.

Έξι σεισμικά πακέτα ερμηνεύτηκαν για την λεκάνη μεταξύ του κρυσταλλικού υποβάθρου και της επιφάνειας του πυθμένα (Gardosh & Druckman, 2006) (Εικόνα 14). Τα πακέτα είναι ξεχωριστές σεισμικές μονάδες που οριοθετούνται από τοπικούς δείκτες (regional markers) που αναγνωρίζονται μέσω της περικοπής (truncation) και των onlapping and downlapping αντανakλάσεων. Η συσχέτιση με βαθιές γεωτρήσεις δείχνει ότι τα σεισμικά πακέτα περιλαμβάνουν μεγάλες στρωματογραφικές μονάδες και τα όριά τους είναι τοπικές επιφάνειες ασυνέχειας που σχετίζονται με μεταβολές της στάθμης της θάλασσας.

Οι στρωματογραφικές μονάδες ερμηνεύτηκαν ως κύκλοι απόθεσης χαμηλής τάξης (low-order depositional cycles) και αναπτύχθηκαν ως απόκριση στα κύρια τεκτονικά γεγονότα που διαμόρφωσαν τη λεκάνη Λεβαντίνη και το περιθώριο της. Η χρονική διάρκεια των περισσότερων από αυτούς τους κύκλους απόθεσης, που επισημαίνονται από κάτω προς τα πάνω ως ακολουθίες Α έως F (Εικόνα 14) κυμαίνεται από 5 έως περίπου 80 εκατομμύρια χρόνια. Η ακολουθία Ε, που περιλαμβάνει το Μεσσηνιακό εβαπορίτη, είναι ένας κύκλος απόθεσης υψηλότερης τάξης (higher-order depositional cycle) με χρονική διάρκεια < 2 εκατομμυρίων χρόνων.

Η ερμηνεία της στρωματογραφικής ηλικίας και της λιθολογίας είναι πιο σίγουρη στη μετά - Κρητιδική διαδοχή λόγω της καλύτερης ποιότητας των σεισμικών δεδομένων αλλά και δεδομένων που προέρχονται από γεωτρήσεις.



Εικόνα 14: Σεισμικό προφίλ από το ανατολικό τμήμα της λεκάνης Λεβαντίνης στο οποίο απεικονίζονται οι 6 ιζηματογενείς ακολουθίες (A – F) που πλήρωσαν την λεκάνη και το κρυσταλλικό υπόβαθρο.

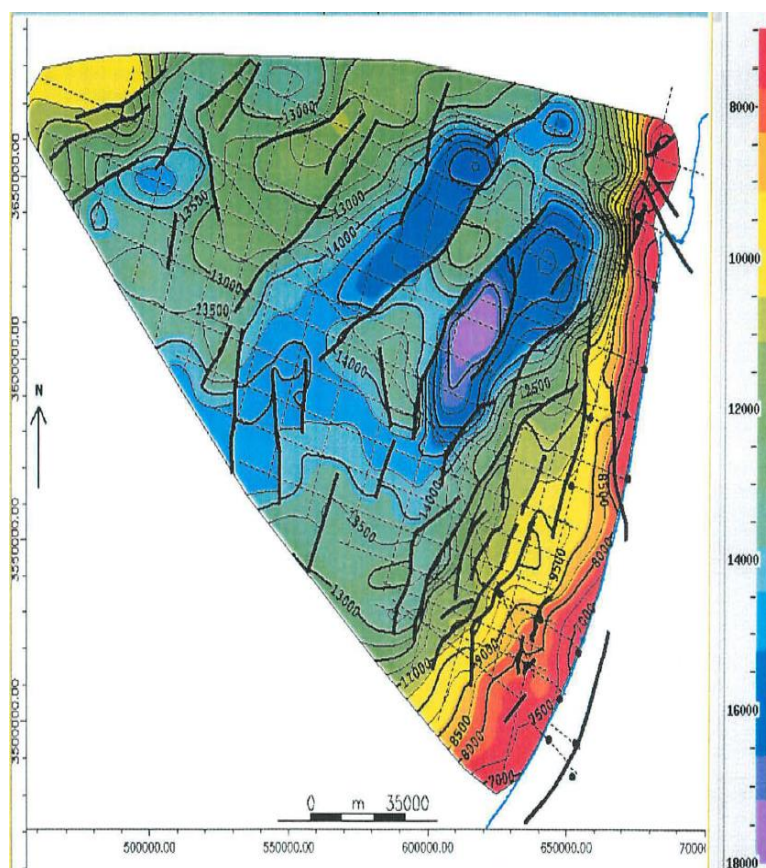
(τροποποιημένη εικόνα από <http://www.gsi.gov.il/uploads/ftp/GsiReport/2006/Gardosh-Michael-GSI-14-2006.pdf> και Gardosh and Druckman, 2006)

3.3.1. Το κρυσταλλικό υπόβαθρο της λεκάνης

Ο βαθύτερος σεισμικός ορίζοντας που ερμηνεύεται σε αυτή τη μελέτη είναι κοντά στην κορυφή του κρυσταλλικού υποβάθρου. Αυτή η αντανάκλαση ορίζει μια μετάβαση προς τα πάνω από τις ανακλάσεις χαοτικού και χαμηλού πλάτους σε συνεχείς, παράλληλες έως αποκλίνουσες ανακλάσεις μεγάλου πλάτους. Η σεισμική έκφραση του τμήματος κάτω από αυτόν τον ορίζοντα υποδηλώνει ότι αντιστοιχεί σε κρυσταλλικό υπόβαθρο και ως εκ τούτου ο ορίζοντας αυτός ορίζει τη βάση της ιζηματογενούς διαδοχής.

Η μετάβαση του σεισμικού χαρακτήρα είναι πιο εμφανής στο νοτιοανατολικό περιθώριο της Λεβαντίνης, κοντά στο πηγάδι Yam West-1, όπου βρίσκεται σε σχετικά μικρό βάθος 5-6 s TWT (Εικόνα 14). Η ανάλυση των σεισμικών δεδομένων μειώνεται γενικά κάτω από 7-8 s ως αποτέλεσμα της μείωσης της σεισμικής ενέργειας. Ωστόσο,

η μετάβαση μεταξύ χαοτικού σεισμικού χαρακτήρα και της επικαλυπτόμενης σειράς υψηλού πλάτους, εν μέρει συνεχούς ανάκλασης εντοπίστηκε κάτω από 8 s σε πολλά σεισμικά προφίλ που βρίσκονται στο κεντρικό, βαθύ τμήμα της λεκάνης. Το υπόβαθρο βυθίζεται σταδιακά προς τα δυτικά από το βάθος των 7 χλμ. στην ακτή της Λεβαντίνης σε 14-16 χλμ. στο κέντρο της λεκάνης (Εικόνα 15). Το υπόβαθρο διαμελίζεται από πολλά ρήγματα, τα οποία είναι κατά κύριο λόγο κανονικά ρήγματα στο δυτικό και κεντρικό τμήμα της λεκάνης και ανάστροφα ρήγματα στο ανατολικό περιθώριο.



Εικόνα 15: Δομικός χάρτης του προ – Κάμβριου υποβάθρου της λεκάνης Λεβαντίνης όπου αποτυπώνεται η βύθιση του από το ανατολικό περιθώριο προς το κεντρικό τμήμα της λεκάνης

(http://www.gsi.gov.il/_uploads/ftp/GsiReport/2006/Gardosh-Michael-GSI-14-2006.pdf)

3.3.2. Η Πέρμιο έως Μέσο Ιουρασική ακολουθία (A)

Η ακολουθία A είναι μια μονάδα πάχους 3-8 χιλιομέτρων (1-3s TWT) και αναπτύσσεται σε ολόκληρο το πλάτος της λεκάνης Λεβαντίνης. Χαρακτηρίζεται από μεγάλου πλάτους, σχετικά συνεχείς, παράλληλες έως αποκλίνουσες αντανάκλασεις. Τοπικά η αντανάκλαση εξασθενεί σε περιοχές όπου η μονάδα παραμορφώνεται από την δράση κανονικών ή ανάστροφων ρηγμάτων.

Το κατώτερο όριο της ακολουθίας A είναι η θεωρούμενη ανώτερη επιφάνεια του κρυσταλλικού υποβάθρου. Το ανώτερο όριο συσχετίζεται με μια μεταβολή του

σεισμικού χαρακτήρα από τις σειρές συνεχούς ανάκλασης υψηλού πλάτους κάτω σε ασυνεχείς αντανakλάσεις χαμηλού πλάτους και περιστασιακά με σχισμές (occasionally shingled) πάνω (Εικόνα 14 στα 4500 ms μεταξύ των Yam-2 και Yam West-1 πηγαδιών).

Δεδομένα πηγαδιών δείχνουν ότι η αλλαγή του σεισμικού χαρακτήρα στην κορυφή της ακολουθίας A αντιστοιχεί σε μια σημαντική μετάβαση στη λιθολογία και στο περιβάλλον απόθεσης. Οι συνεχείς παράλληλες αντανakλάσεις στο άνω μέρος της μονάδας (Εικόνα 14) ερμηνεύονται ως αποθέσεις ρηχής θάλασσας, πιθανώς παρόμοιες με τις ανθρακικές πλατφόρμες του Τριαδικού και Κάτω Ιουρασικού που βρίσκονται σε διάφορα χερσαία πηγάδια στο ανατολικό περιθώριο της λεκάνης. Οι υπερκείμενες ασυνεχείς αντανakλάσεις χαμηλού πλάτους της ακολουθίας B αντιστοιχούν σε μια σειρά από σχιστόλιθο, λάσπη, ασβεστόλιθο και μερικούς ψαμμίτες Βαγίωσιας έως Βαθώνιας (Bajocian to Bathonian) ηλικίας. Αυτά τα ιζήματα συσσωρεύονται στην κατωφέρεια και σε βαθύ θαλάσσιο περιβάλλον, προς το βαθύτερο τμήμα της λεκάνης των ρηχής θάλασσας ανθρακικών πλατφορμών του Μέσου Ιουρασικού.

Το σεισμικό όριο στην κορυφή της ακολουθίας A ερμηνεύεται ως μια τοπική επιφάνεια ασυμφωνίας μεταξύ του Τριαδικού – Κάτω Ιουρασικού ρηχής θάλασσας τμήματος και του υπερκείμενου Μέσου Ιουρασικού βαθιάς θάλασσας τμήματος. Αυτή η ασυμφωνία αναγνωρίζεται σε βαθιά πηγάδια στο ανατολικό περιθώριο της λεκάνης, όπου διατρήθηκε ολόκληρο το Ιουρασικό τμήμα.

Η ρηχής θάλασσας ασβεστόλιθοι επικαλύπτονται από ένα λεπτό στρώμα σχιστόλιθου και ένα στρώμα ιλυόλιθου (σχηματισμός Rosh Pina) που ερμηνεύεται ως μια μονάδα οπισθοχώρησης (regressive unit) (Derin 1974, Hirsch et al., 1998). Ο Hirsch et al. (1998) συσχετίζει αυτή την εδαφική μονάδα με μία πτώση του επιπέδου της θάλασσας στους Ααλένιους χρόνους κατά την έναρξη του ευστατικού κύκλου LZA-1 (Haq et al., 1988). Η ακολουθία A παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις πάχους. Η παρουσία ασύμμετρων λεκανών υποδηλώνει συντεκτονική απόθεση και συνεχή δραστηριότητα βαθιών ρηγμάτων στον πυθμένα.

Η σύνθεση και η ηλικία της ακολουθίας A δεν είναι καλά εδραιωμένη λόγω της έλλειψης ελέγχου από γεωτρήσεις. Ωστόσο, δεδομένα γεωτρήσεων από το περιθώριο της Λεβαντίνης δείχνουν ότι τα ιζήματα του Πέρμιου υπέρκεινται του Προκάμβριου υποβάθρου (Heletz Deep-1, Gevim-1). Συνεπώς, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η ακολουθία A κυριαρχείται από ιζήματα του Πέρμιου, του Τριαδικού και του Κάτω Ιουρασικού (Gardosh & Druckman 2006). Το πάχος αυτού του τμήματος πετρωμάτων στη ξηρά κυμαίνεται από 1,5 έως 5 χλμ. (Garfunke 1998), σημαντικά μικρότερο από τα 4-8 χλμ. της ακολουθίας A στην ανοικτή θάλασσα (Εικόνα 16α).

3.3.3. Η Βαθώνια έως Τουρώνια (Μέσο Ιουρασικό – Άνω Κρητιδικό) ακολουθία (B)

Η ακολουθία B είναι μια εκτεταμένη μονάδα που επιτυγχάνει το μέγιστο πάχος της 3-3,5 χλμ (2-2,5 s TWT) στο ανατολικό περιθώριο της λεκάνης. Το πάχος της μειώνεται σε περίπου 1,5 χλμ. (1 s TWT) στο κεντρικό και δυτικό τμήμα της λεκάνης (Εικόνα

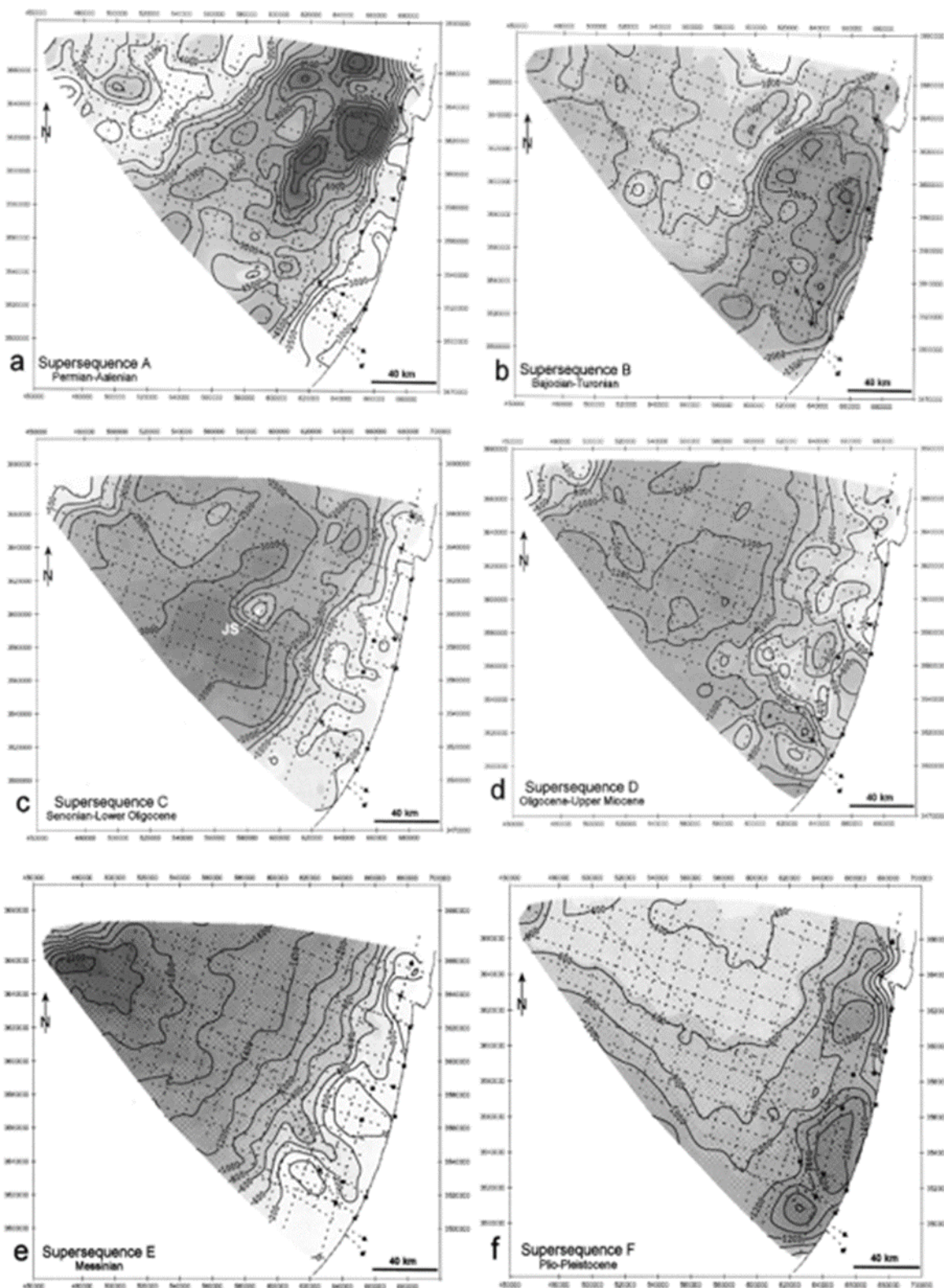
16b). Στα σεισμικά δεδομένα η περιοχή του ανατολικού περιθωρίου χαρακτηρίζεται από μια σχετικώς ασυνεχή σειρά αντανάκλασης χαμηλού πλάτους (Εικόνα 14, μεταξύ των γεωτρήσεων Yam West-1 και Yam-2), ενώ οι συνεχείς αντανakλάσεις υψηλού πλάτους χαρακτηρίζουν τη μονάδα στο βαθύ μέρος της λεκάνης, πιο υπεράκτια.

Το κατώτερο όριο της ακολουθίας συσχετίζεται με την επιφάνεια ασυμφωνίας Μέσης Ιουρασικής ηλικίας. Το άνω όριο αντιστοιχεί σε μια διακριτή μετάβαση του σεισμικού χαρακτήρα μεταξύ ανακλάσεων υψηλού πλάτους στην κορυφή της μονάδας και υπερκείμενων ανακλάσεων χαμηλότερου πλάτους, που χαρακτηρίζονται από χαοτικές ζώνες και ζώνες χωρίς ανάκλαση.

Τα μέσο Ιουρασικά έως μέσο Κρητιδικά στρώματα που αποτελούσαν την ακολουθία Β τρυπήθηκαν από πολλές γεωτρήσεις στην ξηρά και υπεράκτια στο δυτικό τμήμα του Ισραήλ. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που προσδιορίστηκε σε αυτά τα πηγάδια είναι η έντονη μεταβολή των φαινομένων από τις χονδρόκοκκες μονάδες τύπου υφαλοκρηπίδας ανατολικά της σημερινής ακτογραμμής σε λεπτόκοκκες αποθέσεις, κατωφέρειας και λεκάνης περαιτέρω δυτικά (Derin 1974 · Bein & Gvirtzman 1977; Flexer et al., 1986). Αυτή η μεταβολή των φάσεων υποδεικνύει την ανάπτυξη μιας λεκάνης βαθιάς θάλασσας που συνορεύει με μια κατωφέρεια και μια ρηχής θάλασσας υφαλοκρηπίδα στο νοτιοανατολικό ηπειρωτικό περιθώριο της Λεβαντίνης (Bein & Gvirtzman 1977).

Μια λεπτομερής στρωματογραφική ανάλυση των στρωμάτων Μέσο Ιουρασικής έως Μέσο Κρητιδικής ηλικίας στη νότια παραθαλάσσια πεδιάδα του Ισραήλ (Gardosh 2002) δείχνει ότι το ηπειρωτικό περιθώριο αποτελείται από έξι σειρές απόθεσης δεύτερης τάξης και 22 σειρές απόθεσης τρίτης τάξης (composed of six second-order and 22 third-order depositional sequences). Αυτές οι ακολουθίες περιλαμβάνουν τόσο υπο - ακολουθίες απόσυρσης όσο και υπο-ακολουθίες επίκλησης της θάλασσας έως υπο-ακολουθίες ανυψούμενης στάθμης της θάλασσας (include both lowstand and transgressive to highstand components). Οι αποθέσεις τύπου απόσυρσης της θάλασσας είναι λεπτόκοκκα πυριτικά και ανθρακικά θραύσματα που μεταφέρθηκαν στη λεκάνη με υποθαλάσσιες ροές βαρύτητας, ενώ οι επικλυσηγενής έως ανυψούμενης στάθμης θάλασσας αποθέσεις είναι χονδρόκοκκες βιοκλαστικές και πυριτικές αποθέσεις που συσσωρεύονται στο ανατολικό περιθώριο σε ρηχής θάλασσας πλατφόρμες (τύπου rimmed και ramps) (Gardosh 2002).

Τα βαθιά κανονικά ρήγματα στο κέντρο της λεκάνης επηρεάζουν μόνο το κατώτατο τμήμα της ακολουθίας Β. Στο ανατολικό περιθώριο, τα περισσότερα από τα παλαιότερα, κανονικά ρήγματα ξανά ενεργοποιήθηκαν αργότερα ως ρήγματα εφφίπτευσης. Τα δευτερεύοντα αποτελέσματα της ρηγμάτωσης δείχνουν ότι το μεγαλύτερο μέρος της απόθεσης της ακολουθίας Β πραγματοποιήθηκε σε ένα στάδιο μετά τη ρήξη όταν η λεκάνη κυριαρχείτο από την ψύξη και την θερμική καθίζηση. Ο τερματισμός αυτού του κύκλου απόθεσης συμπίπτει με την έναρξη μεγάλης κλίμακας συστολικής παραμόρφωσης (contractional deformation). Αυτό το τεκτονικό συμβάν, γνωστό ως φάση πτύχωσης του Συριακού τόξου, αναγνωρίζεται σε όλο το νότιο και ανατολικό περιθώριο της λεκάνης Λεβαντινής και συνδέεται με το κλείσιμο του ωκεανού της Νέο-Τηθύς κατά το Άνω Κρητιδικό μέχρι το Κάτω Καινοζωικό, κατά την εποχή της απόθεσης ακολουθίας C.



Εικόνα 16: Ισοπαχής χάρτες για τις έξι ιζηματογενείς ακολουθίες που πλήρωσαν την λεκάνη της Λεβαντίνης.
(Gardosh and Druckman 2006 επεξεργασμένη εικόνα)

3.3.4. Η Σενώνια έως Κάτω Ολιγοκαινική ακολουθία (C)

Η ακολουθία C φτάνει στο μέγιστο πάχος της περίπου 2,5-3 χλμ. (2 s TWT) στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης Λεβαντίνης και εμφανίζει έντονη λέπτυνση προς τα ανατολικά και δυτικά περιθώρια. Γενικά χαρακτηρίζεται από χαμηλές έως μέσου πλάτους, συνεχείς και παράλληλες αντανakλάσεις, χαοτικές αντανakλάσεις και ζώνες χωρίς αντανakλαση (Εικόνα 14). Τα δεδομένα των γεωτρήσεων δείχνουν ότι αυτός ο σεισμικός χαρακτήρας αντιστοιχεί σε κιμωλία και λάσπη πελαγικής έως ημιπελαγικής προέλευσης (Almogi-Labin et al., 1993).

Εντός της λεκάνης και στο ανατολικό περιθώριο παρατηρείται εκτεταμένη επικάλυψη των Σενώνιαν (Senonian) στρωμάτων στην κρητιδική κατωφέρεια και στην ανθρακική υφαλοκρηπίδα (Talme Yafe και Judea Groups). Μια διαβρωσιγενείς ασυμφωνία που σχετίζεται με την επιφανειακή έκθεσή της ανθρακικής πλατφόρμας αναγνωρίζεται στο όριο Τουρώνιο – Κονιάσιο (Turonian-Coniacian) (βάση της ακολουθίας C) σε επιφανειακές εκθέσεις πετρωμάτων σε όλο το εσωτερικό του Ισραήλ (Bentor & Vroman 1960, Flexer 1968).

Τόσο η διάβρωση όσο και η επικάλυψη ερμηνεύονται ως αποτέλεσμα μιας σχετικής πτώσης της στάθμης της θάλασσας, η οποία ακολουθήθηκε από την ευστατική άνοδο και πνιγμό της ανθρακικής πλατφόρμας του Μέσου Κρητιδικού (ακολουθία B). Ο πνιγμός προκάλεσε την παύση του Άλβιου – Τουρώνιου (Albian-Turonian) ανθρακικού εργοστασίου στη ρηχή υφαλοκρηπίδα και την αντικατάσταση της ανθρακικής πλατφόρμας με την πελαγική κιμωλία του Σενώνιου (Sass & Bein 1982, Almogi-Labin et al., 1993, Buchbinder et al., 2000).

Το άνω όριο της ακολουθίας C συσχετίζεται με την κορυφή μίας σχετικά συνεχούς σειράς αντανakλασης υψηλότερου πλάτους, που με τη σειρά του επικαλύπτεται με ανακλάσεις χαμηλού πλάτους και καμπυλωτών (mounded) ανακλάσεων. Η αλλαγή του σεισμικού χαρακτήρα αντιστοιχεί σε μια επιφάνεια ασυμφωνίας στις υπεράκτιες Yam Yafo-1 και Yam West-1 γεωτρήσεις (Εικόνα 14), όπως υποδεικνύεται από έντονη λιθολογική διακοπή και βιοστρωματογραφικό κενό μεταξύ των ανθρακικών του Μέσο Ηωκαινικού και ενός υπερκείμενου τμήματος Ολιγοκαινικού έως Μειοκαινικού κλαστικών αποθέσεων (η ομάδα Saqiye, Druckman et al., 1994, Gill et al., 1995).

Στον ισοπαχή χάρτη η ακολουθία Γ εμφανίζει ένα σχεδόν συμμετρικό μοτίβο λέπτυνσης, από 3000 m στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης σε < 500 m τόσο στο δυτικό όσο και στο ανατολικό περιθώριο (Εικόνα 16c). Μια εξαίρεση σε αυτό το μοτίβο είναι μια εξέχουσα ανυψωμένη δομή που βρίσκεται στο κέντρο της λεκάνης, όπου η μονάδα έχει πάχος μόνο 1500 m (Εικόνα 16c). Το χαρακτηριστικό αυτό ονομάστηκε υποθαλάσσιο βουνό Jonah.

Οι ρυθμοί καθίζησης που υπολογίστηκαν για το κεντρικό τμήμα της λεκάνης είναι της τάξης των 33-50m Ma⁻¹ (χωρίς διόρθωση για την συμπίκνωση), αντίθετα κατά μήκος του περιθωρίου ο ρυθμός είναι περίπου 8m Ma⁻¹. Το μεγάλο πάχος και ο υψηλός ρυθμός καθίζησης, καθώς και ο εκτεταμένος επικαλυπτικός και χαοτικός σεισμικός χαρακτήρας στο κατώτερο τμήμα της μονάδας, είναι όλα ενδεικτικά της σημαντικής μεταφοράς με βαρύτητα και της εισροής κλαστικών ιζημάτων στη λεκάνη. Αυτές οι διαδικασίες σχετίζονται με τη δημιουργία χώρου απόθεσης πιθανότατα τόσο μέσω της

τεκτονικής καθίζησης όσο και της σχετικής αύξησης της στάθμης της θάλασσας κατά τη διάρκεια της απόθεσης της ακολουθίας C.

3.3.5. Η Ολιγοκαινική έως Άνω Μειοκαινική Ακολουθία (D)

Η ακολουθία Δ είναι μονάδα πάχους 0.5-1 χλμ. (0.3-0.7 s TWT), που εκτείνεται σε όλο το πλάτος της λεκάνης (Εικόνα 16d). Στα σεισμικά προφίλ χαρακτηρίζεται από χαμηλό πλάτος, μερικώς διακεκομμένες αντανάκλασεις, μερικές καμπυλωτές αντανάκλασης και ζώνες χωρίς ανάκλαση (Σχήμα 14). Το κατώτερο όριο της ακολουθίας είναι η ασυμφωνία στην βάση της, Ολιγοκαινικής - Μειοκαινική ηλικίας. Το ανώτερο όριο συσχετίζεται στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης με μια αξιοσημείωτη μετάβαση στο σεισμικό χαρακτήρα μεταξύ της σειράς αντανάκλασης της ακολουθίας D και της χαοτικής και σε μεγάλο βαθμό χωρίς ανάκλαση σεισμικής δέσμης των υπερκείμενων μεσσηνιακών εβαποριτών (ακολουθία E). Στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης, όπου οι μεσσηνιακοί εβαπορίτες είναι είτε λεπτοί είτε απουσιάζουν εντελώς, το ανώτερο όριο της ακολουθίας αντιστοιχεί σε μια διακριτή επιφάνεια μιας διαβρωσιγενείς ασυμφωνίας και ενός βιοστρωματογραφικού κενού, όπως αναγνωρίζεται τόσο στις γεωτρήσεις όσο και στα σεισμικά δεδομένα στη βάση του Πλείο-Πλειστοκαινικού τμήματος (σχηματισμός Yafo) (Gvirtzman & Buchbinder 1978, Druckman κ.ά., 1995).

Στις υπεράκτιες γεωτρήσεις Yam West-1 και Yam Yafo-1, η ακολουθία D αποτελείται από πελαγική λάσπη και σχιστόλιθο Ολιγοκαινικής έως Άνω Μειοκαινικής ηλικίας (ομάδα Lower Saqiye) (Druckman et al 1994, Gill et al. 1995). Μεγάλου πάχους διαστήματα χονδρόκοκκου ψαμμίτη και κλαστικά σφαιροειδής μορφής (conglomerate) εντοπίζονται στην ξηρά μέσα στην ακολουθία σε γεωτρήσεις κατά μήκος του ανατολικού περιθωρίου. Αυτά τα ιζήματα ερμηνεύονται ως αποθέσεις πλήρωσης από φαράγγια που σχετίζονται με διάφορους κύκλους επιφανειακής και υποθαλάσσιας διάβρωσης και διάβρωσης κατά βάθος στην Ολιγοκαινική – Μειοκαινική υφαλοκρηπίδα (Gvirtzman & Buchbinder 1978, Druckman et al 1995, Buchbinder & Zilberman 1997, Buchbinder & Siman Tov 2000).

Οι καμπυλωτές (mounded) αντανάκλασεις που εντοπίστηκαν μέσα στην ακολουθία D στην υπεράκτια περιοχή, ερμηνεύονται ως πυριτικά, βαθιάς θάλασσας τουρβιδιτικά συστήματα και βαθιάς λεκάνης ριπίδια. Αυτά μπορεί να είναι τα απομακρυσμένα ισοδύναμα των κοντινών αποθέσεων πλήρωσης από τα φαράγγια που βρέθηκαν στην ξηρά. Η παρουσία χονδρόκοκκου πυριτικού υλικού μέσα στις λεπτές στιβάδες της ακολουθίας D μπορεί να εξηγήσει τον συνολικό χαμηλό πλάτος και τον ασυνεχή σεισμικό χαρακτήρα της μονάδας στην υπεράκτια καταγραφή.

3.3.6. Η Μεσσηνιακή ακολουθία (E)

Η Μεσσηνιακή ακολουθία είναι ένα ξεχωριστό σεισμικό πακέτο ταυτοποιημένο σε ολόκληρη την περιοχή της ανατολικής Μεσογείου, το οποίο αποτελείται από παχιές εβαπορητικές σειρές Άνω Μειοκαινικής ηλικίας (Hsfi et al., 1973, Neen et al., 1976, Ryan 1978). Στη λεκάνη Λεβαντίνη, αυτή η μονάδα έχει πάχος περίπου 1-2 χλμ. (0,5-1 s TWT), και εκτείνεται στο μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης. Το κατώτερο και ανώτερο όριο είναι οι γνωστοί σεισμικοί δείκτες που ορίζονται σε προηγούμενες εργασίες ως οι ορίζοντες N και M. Η ακολουθία E εμφανίζει γενικά έναν χαοτικό σεισμικό χαρακτήρα που είναι χαρακτηριστικός του μαζόδους άλατος. Τα πακέτα συνεχούς ανάκλασης που βρίσκονται μέσα στη μονάδα ερμηνεύονται ως παρεμβολές ανυδρίτη και σχιστόλιθου όπως είναι στις γεωτρήσεις Yam-2 και Yam West-1 (Εικόνα 14).

Η περιοχή της συσσώρευσης του εβαπορίτη εκτείνεται σε όλο το βαθύ τμήμα της λεκάνης σε περίπου 20-40 χλμ. δυτικά της σημερινής ακτογραμμής (Εικόνα 16ε). Η εβαποριτική άλμη ήταν πιθανώς περιορισμένη προς τα ανατολικά από μια απότομη κλίση αποτελούμενη από τα τοπογραφικά υψηλότερα στρώματα της ακολουθίας D. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια επεισοδίων ανυψούμενης στάθμης της θάλασσας (highstand episodes), η άλμη κάλυπτε αυτή την πλαγιά και διείσδυσε μέσα από τα βαθιά φαράγγια στην ενδοχώρα. Τα κατάλοιπα της μεσσηνιακής άλμης με τη μορφή κοιλοτήτων από αλίτη (halite) και ανυδρίτη λίγων δεκάδων μέτρων παρατηρήθηκαν σε διάφορες γεωτρήσεις στις παράκτιες περιοχές του Ισραήλ (Druckman et al., 1995).

Η κίνηση του άλατος (Halokinesis) εμφανίζεται σε ολόκληρη τη λεκάνη, επηρεάζοντας το στρώμα άλατος και τα υπερκείμενα Πλείο - Πλειστοκαινικά στρώματα μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας. Στο ανατολικό περιθώριο, η ροή του αλατιού είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη φυσιολογικών, περιστασιακών ληστρικών ρηγμάτων, ενώ στο κεντρικό και βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης και κοντά στο υποθαλάσσιο βουνό Ερατοσθένης το στρώμα αλατιού επηρεάζεται από πολλά ανάστροφα ρήγματα και πτυχές.

3.3.7. Η Πλειοκαινική – Πλειστοκαινική ακολουθία (F)

Η Πλείο – Πλειστοκαινική ακολουθία επιτυγχάνει το μέγιστο πάχος του περίπου 1,6 χλμ. (1,6 TWT) κατά μήκος του ανατολικού περιθωρίου και μειώνεται σε αρκετές εκατοντάδες μέτρα στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης και προς το υποθαλάσσιο βουνό Ερατοσθένης. Το άνω όριο της ακολουθίας είναι ο θαλάσσιος πυθμένας. Το κατώτερο όριο είναι μια σύνθετη επιφάνεια ασυμφωνίας. Μέσα στη λεκάνη αυτό το όριο αντιστοιχεί στην κορυφή των μεσσηνιακών εβαποριτών (ορίζοντας M). Στο ανατολικό περιθώριο, όπου λείπουν οι εβαπορίτες η σύνθετη επιφάνεια συμπίπτει με τη μεσσηνιακή ασυμφωνία της βάσης.

Σε όλη τη λεκάνη, η ακολουθία χαρακτηρίζεται από συνεχείς, λεπτές υψηλού και χαμηλού πλάτους ανακλάσεις. Στο κεντρικό τμήμα, αυτές είναι πολύ παραμορφωμένες ως αποτέλεσμα της υποκείμενης ροής αλατιού. Στο ανατολικό περιθώριο της Λεβαντίνης, όπου η μονάδα επιτυγχάνει το μέγιστο πάχος της, κυριαρχείται από σιγμοειδείς προελαύνουσα αντανάκλαστικά μοτίβα (Εικόνα 14). Τα

δεδομένα από γεωτρήσεις δείχνουν ότι το Πλείο – Πλειστοκαινικό τμήμα που ονομάζεται σχηματισμός Yafo, είναι μια μονάδα που κυριαρχείται από λάσπη και αποτελείται κυρίως από πηλόλιθους και ιλυόλιθους (Gvirtzman & Buchbinder 1978) (βλ. Yam West-1, Εικόνα 14). Απομονωμένα, χονδρόκοκκα σώματα άμμου που περιείχαν μεγάλες ποσότητες βιογενούς αερίου βρέθηκαν πρόσφατα σε υποθαλάσσια κανάλια και ριπίδια στον αβυσικό πυθμένα στο κάτω μέρος της ακολουθίας, νότια της γεώτρησης Yam West-1.

Οι μηχανισμοί απόθεσης του λεπτόκοκκου κλαστικού υλικού που συνθέτει την Πλειοκαινική - Πλειστοκαινική ακολουθία F δεν έχει μελετηθεί επαρκώς. Μέρος του υλικού μεταφέρθηκε πιθανότατα μέσω ρευμάτων από το κώνο του Νείλου, που βρίσκεται περίπου 200 χιλιόμετρα στα ΝΔ (Gvirtzman & Buchbinder 1978, Ben-Gai 1996). Διάφορες ενδείξεις υποδεικνύουν μια πρόσθετη τοπική πηγή προς τα ανατολικά και νοτιοανατολικά.

Προτείνεται ότι κατά τη διάρκεια της απόθεσης της ακολουθίας F (Πλειόκαινο – Πλειστόκαινο) τα ανώτερα κλινόμορφα συστήματα (topset-clinoform systems) αποτελούμενα από μεγάλα δέλτα που προωθούνται κατά μήκος της ακτής της Μεσογείου. Τεράστιες ποσότητες λεπτόκοκκων πυριτικών ιζημάτων συγκεντρώθηκαν στο στόμα υποθαλάσσιων φαραγγιών και καναλιών. Το μεγάλο πάχος της μονάδας δυτικά της σημερινής ακτογραμμής (Εικόνα 16f) συνδέεται με ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά καθίζησης περίπου 300 m Ma^{-1} . Ο ρυθμός παροχής υπερέβη το χώρο απόθεσης, με αποτέλεσμα να προχωρήσει η υφαλοκρηπίδα 20 χιλιόμετρα από τη λεκάνη.

Η ένταση των διεργασιών απόθεσης σχετίζεται με τα συνδυασμένα αποτελέσματα παγκοσμίων και τοπικών παραγόντων. Μεταξύ αυτών είναι η ταχεία άνοδος της στάθμης στο Πλειόκαινο, η καθίζηση εντός της λεκάνης ως αποτέλεσμα της φόρτισης των ιζημάτων του κώνου του Νείλου και η άνοδος της οροσειράς Ιουδαίας και της Σαμαριάς που βρίσκεται 20-50 χιλιόμετρα ανατολικά της λεκάνης.

Κεφάλαιο Τέταρτο

4. Προέλευση ιζημάτων πλήρωσης της Λεκάνης

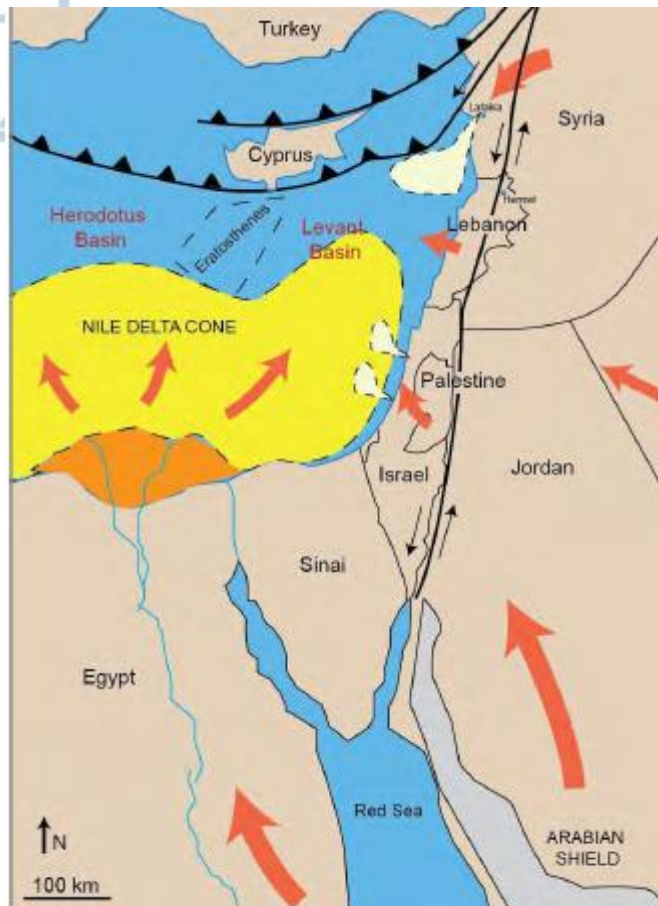
4.1. Εισαγωγή

Η πετρελαϊκή έρευνα στο βαθύτερο τμήμα της λεκάνης Λεβαντίνης στην περιοχή της αποκλειστικής οικονομικής ζώνης του Ισραήλ επισήμανε μια καινούρια περιοχή με τεράστιες προοπτικές για εύρεση μεγάλων κοιτασμάτων υδρογονανθράκων. Τρεις γεωτρήσεις έχουν διανοιχτεί από το 2009 στο βαθύτερο τμήμα της λεκάνης οι οποίες είναι η Tamar, Dalit και Leviathan, που βρίσκονται 90, 40 και 135 χιλιόμετρα από το Ισραήλ, αντιστοίχως. Και οι τρεις γεωτρήσεις σύμφωνα με τη σεισμική ερμηνεία τρύπησαν ένα εξαιρετικά μεγάλου πάχους Άνω Καινοζωικό τμήμα ιζημάτων (Gardosh et al., 2008 · Gvirtzman et al., 2008 · Gardosh et al., 2010 · Steinberg et al., 2011).

Αν και η γεωτρήσεις απέδειξαν την ύπαρξη κλαστικών αποθέσεων Άνω Ολιγοκαινικής ηλικίας (public releases, Noble Energy Inc.), η ερμηνεία των σεισμικών δεδομένων δείχνει ότι η σημαντική μεταβολή στη φύση της απόθεσης παρατηρήθηκε στο Άνω Ηώκαινο όταν ο ρυθμός απόθεσης των ιζημάτων στο βαθύ τμήμα της λεκάνης της Λεβαντίνης επιταχύνθηκε σχεδόν 20 φορές (Steinberg et al., 2011, Εικόνα 18). Αυτή η θεμελιώδης παρατήρηση εγείρει θεμελιώδη ερωτήματα. Γιατί αυξήθηκε ο ρυθμός απόθεσης; Από πού προέρχονται τα ιζήματα; Πού είναι τα αρχαία ιζηματογενή μονοπάτια μέσα στη βαθιά θάλασσα; Ποιος ήταν ο τρόπος ιζηματογενούς μεταφοράς και διασποράς;

Για την προέλευση των ιζημάτων τα οποία γέμισαν της λεκάνης δύο είναι τα επικρατέστερα σενάρια (Εικόνα 17):

- Οι μεγάλες ποσότητες τριτογενούς υλικού που άρχισαν να εισέρχονται στη λεκάνη στο Άνω Ηώκαινο προέρχονται από την Αφρική από την οποία μεταφέρθηκαν μέσω του ηπειρωτικού περιθωρίου της Αιγύπτου, το οποίο περίπου 25 εκατομμύρια χρόνια αργότερα (Πλειόκαινο) εξελίχθηκε στον κώνο του ποταμού Νείλου, ή
- Τα ιζήματα προέρχονται από την Αραβία (συν τη χερσόνησο του Σινά) και μεταφέρθηκαν μέσω του ανατολικού ηπειρωτικού περιθωρίου της Λεβαντίνης.



Εικόνα 17: Παρουσιάζονται οι πιθανές ιζηματογενείς πηγές και η κατεύθυνση μεταφοράς που διένυσαν με πορτοκαλιά βέλη τα ιζήματα πριν αποτεθούν στην λεκάνη Λεβαντίνη

(Fürstenau et al., 2013)

4.2. Γεωλογικές συνθήκες

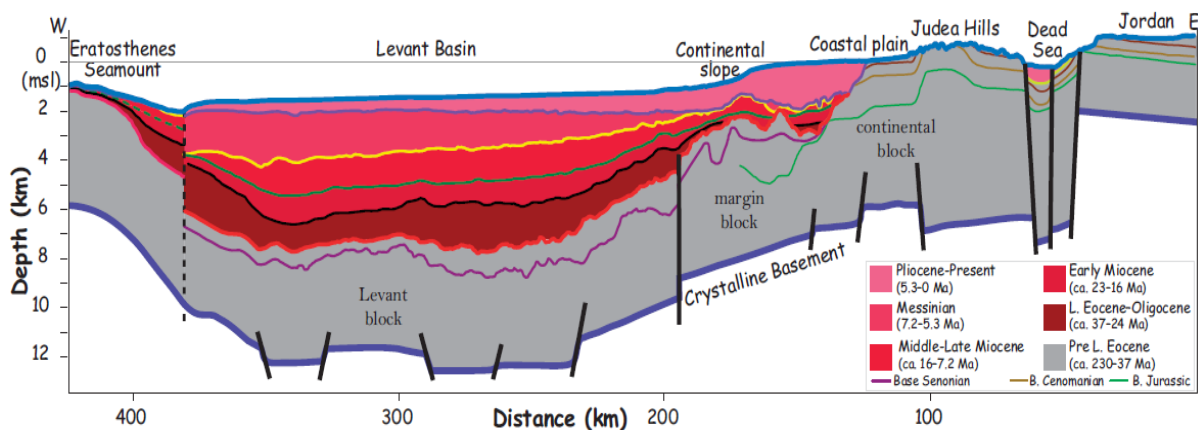
Η λεκάνη Λεβαντίνη, η οποία βρίσκεται μεταξύ του ηπειρωτικού περιθωρίου της Λεβαντίνης και του υποθαλάσσιου βουνού Ερατοσθένη (Εικόνα 11), εξελίχθηκε κατά την διάρκεια του Κάτω Μεσοζωικό ως τμήμα του περιφερειακού ανοίγματος της νεο-Τηθύς (Garfunkel, 1998, Robertson, 1998). Μετά από μια σειρά φάσεων διάρρηξης καθορίστηκαν συνθήκες παθητικού περιθωρίου με μετά-διαρρηξιγενή θερμική καθίζηση και η ιζηματογένεση συνέχισε σταδιακά να φθίνει για περισσότερο από 100 εκατομμύρια χρόνια (Gvirtzman and Garfunkel, 1998).

Το τέλος του Μέσου Ηωκαίνου - Άνω Ηωκαίνου (κλείσιμο της Νέο-Τηθύς) σήμανε την έναρξη μιας σειράς διαδικασιών που άλλαξαν σημαντικά την παλαιογεωγραφία της Μέσης Ανατολής. Μαζί με τη σύγκρουση στη ζώνη εφίππευσης Bitlis-Zagros, η θάλασσα υποχώρησε εκατοντάδες χιλιόμετρα (Dercourt et al., 1992, Ziegler, 2001), εκθέτοντας μεγάλα τμήματα της αραβικής ανθρακικής πλατφόρμας. Τα περιφερειακά συστήματα αποστράγγισης άρχισαν να μεταφέρουν τεράστιο υλικό προς την υποχωρούσα θάλασσα.

Περίπου ταυτόχρονα, πιο νότια στην ανατολική Αφρική η ηφαιστειακή και η τοπική θόλωση άρχισαν γύρω στις αρχές του Ολιγοκαίνου, καθώς η ηπειρωτική διάρρηξη ξεκίνησε κατά μήκος της πρόσφατα ανοιγμένης Ερυθράς Θάλασσας (Bosworth et al., 2005). Αυτή η εσωτερική άνοδος παρείχε μια άλλη σημαντική πηγή για τα ιζήματα στην ανατολική Μεσόγειο.

Αυτές οι διαδικασίες συνοδεύονταν από το σχηματισμό μιας επιφάνειας διάβρωσης, τα κατάλοιπα των οποίων έχουν περιγραφεί στο Σινά, το νότιο Ισραήλ και την Ιορδανία (Picard, 1943, Garfunkel and Horowitz, 1966, Zilberman, 1991, Bar, 2009). Ο Gvirtzman et al. (2008) πρότεινε ότι, ως αποτέλεσμα της διάσπασης Αφρικής-Αραβίας και μαζί με τη σύγκρουση Αραβίας-Ευρασίας, το περιθώριο της Λεβαντίνης ενεργοποιήθηκε ξανά αφού ήταν παθητικό για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Η ύπαρξη ενός προ – Πλειοκαينικού συστήματος μεταφοράς από τα ανατολικά προς τα δυτικά το οποίο έφθασε στο Ισραήλ από την Αραβία μέσω της περιοχής που τελικά εξελίχθηκε στην κοιλάδα διάρρηξης της Νεκράς Θάλασσας (Dead Sea rift valley) και συνεχίστηκε προς τα δυτικά μέχρι τη λεκάνη της Λεβαντίνης, έχει καθιερωθεί. Οι πρώτες ενδείξεις για αυτές τις μεταφορές είναι οι τουρβιδιτικές αποθέσεις που βρέθηκαν μέσα στα Ολιγοκαινικά πετρώματα του κατώτερου τμήματος του Saqiye Group στους πρόποδες της Ιουδαίας (Buchbinder et al., 2005) και στις Άνω Ηωκαινικές αποθέσεις του κατώτερου τμήματος του Saqiye Group στις ακτές του Ισραήλ (Buchbinder et al., 2005). Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτοί οι τουρβιδίτες μεταφέρθηκαν βαθύτερα στην Λεβαντίνη μέσω βαθιών υποθαλάσσιων καναλιών (Druckman et al., 1995 · Gardosh and Druckman, 2006 · Gardosh et al., 2008 · Bar, 2009) τα οποία εγχάραξαν το Ισραηλινό ηπειρωτικό περιθώριο στο Άνω Ηώκαινο (El-Arish, Afiq, Ashdod, Hanna, και άλλα ανώνυμα φαράγγια που σημειώνονται στην Εικόνα 19).



Εικόνα 18: Γεωλογική τομή στην οποία παρουσιάζονται η ηλικία και το πάχος των ιζημάτων που πλήρωσαν την Λεβαντίνη. (Steinberg et al., 2010)

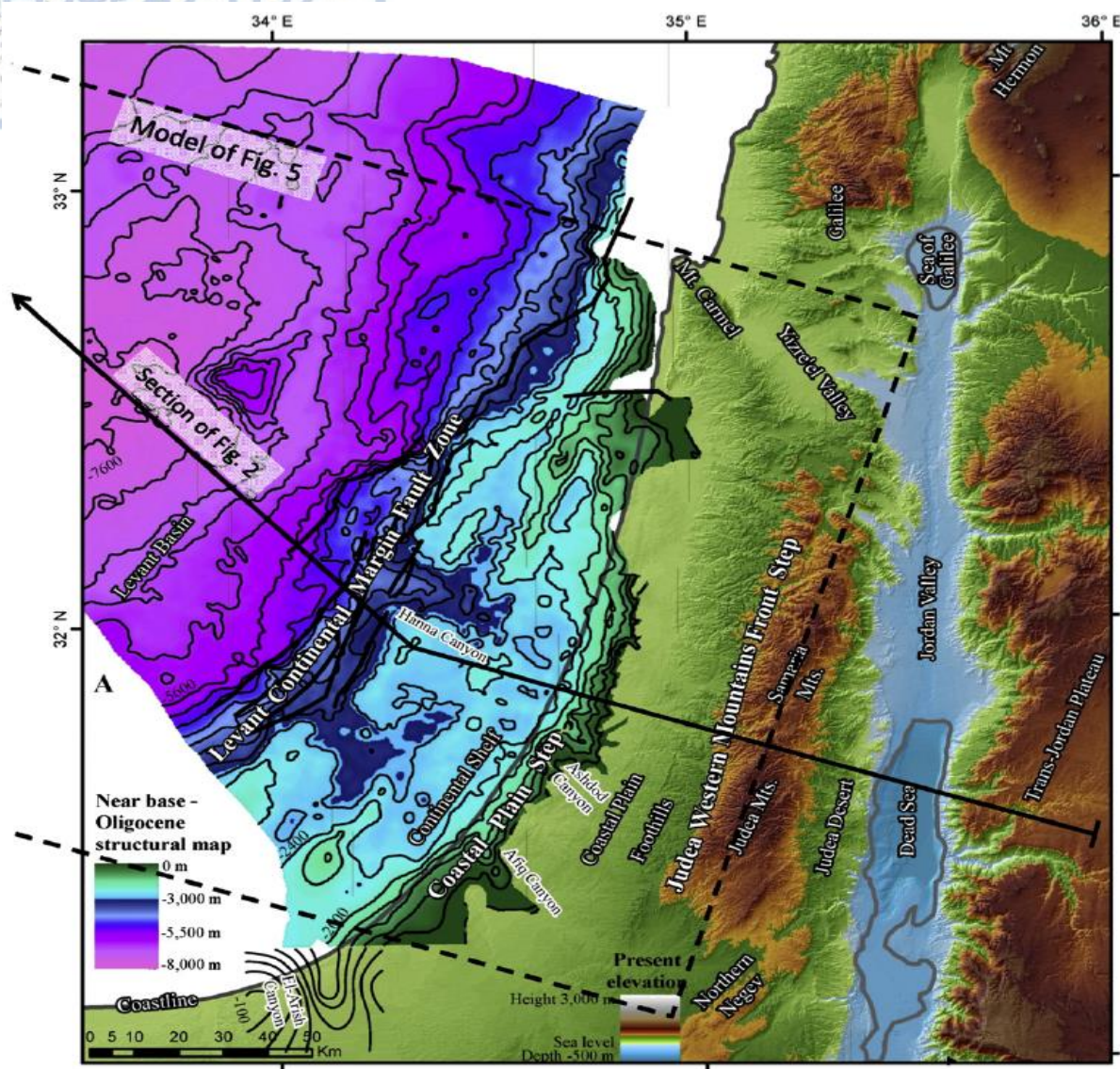
Αντίθετα από το ισραηλινό περιθώριο, το πολύ ευρύτερο σύστημα ποταμών στη βόρεια Αίγυπτο προκάλεσε την προέλαση της ακτογραμμής στην Βόρεια Αφρική εκατοντάδες χιλιόμετρα προς βορρά, υποδεικνύοντας ότι η αφρικανική πηγή ιζημάτων ήταν πολύ μεγαλύτερη από την αραβική πηγή.

Οι μεγάλες ποσότητες εδαφικού υλικού που εισήλθαν στη θάλασσα μετά την έκθεση της αραβικής πλατφόρμας και της ανόδου της Ανατολικής Αφρικής αύξησαν τα ποσοστά καθίζησης στη Λεβαντίνη από περίπου 5m / εκατ. χρον. στο Παλαιόκαινο σε περίπου 100 m / εκατ. χρον. στο Άνω Ηώκαινο - Ολιγόκαινο (πάχος και διάρκεια στην Εικόνα 18). Επιπλέον, η φύση της απόθεσης σε ολόκληρη την περιοχή άλλαξε, και από τις πελαγικές κρητίδες (κιμωλίες - chalks) που χαρακτήριζαν μια περίοδο 60 εκατ. χρον. από το Σενώνιο έως το Μέσο Ηώκαινο, πήγε σε ημιπελαγικές μάργες (Saqiye Group, Gvirtzman και Buchbinder, 1978), οι οποίες επικράτησαν από τότε.

Δέκα έως δεκαπέντε εκατομμύρια χρόνια αργότερα, η φύση της μεταφοράς από την ανατολή άλλαξε. Στο Κάτω Μειόκαινο, μεγάλες ποσότητες χοντρόκοκκων πυριτικών ιζημάτων (Σχηματισμός Hazeva) που μεταφέρθηκαν εκατοντάδες χιλιόμετρα παγιδεύτηκαν σε αρκετές εσωτερικές λεκάνες (Garfunkel και Horowitz, 1966, Zilberman, 1991, Calvo and Bartov, 2001). Το λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό μεταφέρθηκε μακρύτερα προς τη θάλασσα, από όπου το πιο λεπτόκοκκο υλικό μεταφέρθηκε περαιτέρω στη βαθιά λεκάνη μέσω των ίδιων υποθαλάσσιων καναλιών που είχαν μερικώς γεμίσει την λεκάνη στο Ολιγόκαινο και διάβρωσαν ξανά κατά βάθος (re-incised) τον πυθμένα στο Κάτω Μειόκαινο (Druckman et al., 1995).

Ενδιαφέρον όμως είναι ότι η ποσότητα των ιζημάτων που παγιδεύονται κατά μήκος του ηπειρωτικού περιθωρίου της Λεβαντίνης από το Άνω Ηώκαινο μέχρι το τέλος του Μειοκαίνου (χρονική διάρκεια 30 εκατομμυρίων χρόνων), είναι μόνο μερικές εκατοντάδες μέτρα ενώ στην βαθιά λεκάνη έχει συγκεντρωθεί τμήμα πάχους 4 χλμ. (χωρίς να υπολογίζεται το στρώμα του μεσσηνιακού αλατιού πάχους 1.5 – 2 χλμ., Εικόνα 18).

Αυτή η θεμελιώδης παρατήρηση υπογραμμίζει τη δυσκολία ενός ανατολικού σεναρίου παροχής που απαιτεί την παράκαμψη του ηπειρωτικού περιθωρίου και το άλμα πάνω από δύο μορφολογικά βήματα χωρίς το ίζημα να παγιδευτεί ανάμεσα τους (Εικόνα 19). Ο μόνος δυνατός μηχανισμός μεταφοράς για ένα τέτοιο σενάριο είναι μέσω των υποθαλάσσιων φαραγγίων που διέσχισαν τα δύο σκαλοπάτια και συνέδεαν την βαθιά λεκάνη με την αρχαία υφαλοκρηπίδα (σημερινή παράκτια πεδιάδα και πρόποδες, Εικόνα 19).



Εικόνα 19: Τοπογραφία του περιθωρίου της Λεβαντίνης κατά την περίοδο του Ολιγοκαίνου στο οποίο αποτυπώνονται τα δύο μεγάλα μορφο-δομικά βήματα τα οποία εμποδίζουν την μεταφορά ιζημάτων στην λεκάνη που προέρχονται από πιο ανατολικά. Επίσης παρουσιάζονται τα βαθιά φαράγγια τα οποία διάβρωσαν κατά βάθος και το περιθώριο και μετέφεραν ιζήματα στην λεκάνη.
(Gvirtzman et al., 2013)

4.3. Μοντέλο ιζηματοπόθεσης

Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, ο μόνος τρόπος για να εξηγηθεί η πλήρωση της λεκάνης από ένα ανατολικό σύστημα που παρακάμπτε το ηπειρωτικό περιθώριο είναι με μαζικές μεταφορές που περιορίζονται στα υποθαλάσσια φαράγγια. Σύμφωνα με το σενάριο αυτό (Gardosh et al., 2008), τα ιζήματα μεταφέρθηκαν μέσω των φαραγγίων χωρίς να διασκορπιστούν πριν φτάσουν στον τελικό τους προορισμό. Το ερώτημα που προκύπτει είναι το κατά πόσον τέτοια φαράγγια είναι ικανά να μεταφέρουν την απαιτούμενη ποσότητα ιζημάτων.

Για να εξετάσει αν αυτή η μεταφορά είναι εφικτή χρησιμοποιήθηκε ο Διόνυσος, ένα στρωματογραφικό 3D μοντέλο εξέλιξης. Με την βοήθεια του Διόνυσου έγινε εφικτή η προσομοίωση της γεωμετρίας και η φάση των ιζηματογενών μονάδων σε περιφερειακή χωρική κλίμακα από μερικές δεκάδες έως εκατοντάδες χιλιόμετρα και σε μια χρονική κλίμακα από δεκάδες χιλιάδες έως εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια (Granjeon, 1996, Granjeon & Joseph, 1999, Granjeon & Wolf, 2007, Granjeon, 2009). Αυτό το αριθμητικό μοντέλο αντιπροσωπεύει την απόθεση, την παροχή και τη μεταφορά των ιζημάτων.

Από το πρώιμο έργο του Culling (1960), και από τους Carson και Kirkby (1972), οι νόμοι διάχυσης έχουν χρησιμοποιηθεί στη γεωμορφολογία και τη γεωλογία για να αποτυπωθεί κατά μέσο όρο η μεταφορά ιζήματος σε μεγάλη κλίμακα χωρικά, με διαδικασίες ολίσθησης, χερσαίας ροής και διαδικασίες μεταφοράς μέσω καναλιών. Η έννοια της μεταφοράς ιζημάτων από διάχυση (diffusive sediment transport) δηλώνει ότι η μεταφορική ικανότητα του ρέοντος νερού είναι ανάλογη με την τοπική κλίση της λεκάνης και της ποσότητας του νερού που εκβάλλεται στην θάλασσα. Η εξίσωση διάχυσης προέκυψε από εμπειρικές και εννοιολογικές υδραυλικές εξισώσεις από τους Begin et al. (1981) και Paola et al. (1992).

Ακολουθώντας την κλασσική προσέγγιση που χρησιμοποιείται σε μοντέλο τοπογραφικής εξέλιξης (Willgoose et al., 1991, Tucker and Slingerland, 1994), ο Διόνυσος συνδυάζει δύο διαδικασίες μεγάλης κλίμακας: 1) Τον ερπυσμό από πλαγιά λόφου και 2) μια ταχύτερη μεταφορά με νερό (Willgoose et al. 1991, Tucker and Slingerland, 1994). Η πρώτη προσομοιώνεται από μια εξίσωση διάχυσης με γραμμική κλίση, όπου η μεταφορά είναι ανάλογη με την κλίση της πλαγιάς. Η δεύτερη προσομοιώνεται από μια μη γραμμική εξίσωση διάχυσης που καθορίζεται από το νερό και την κλίση. Ο συνδυασμός αυτών των δύο νόμων μεταφοράς οδηγεί στην ακόλουθη εξίσωση μεταφοράς ιζήματος:

$$Q_s = -\left(K_s + K_w Q_w^n S^{m-1}\right) \vec{\nabla} h$$

Όπου:

Q_s είναι η ροή ιζήματος [$\text{km}^2 / \text{έτος}$],

h (m) είναι το τοπογραφικό ύψος ή ανύψωση (topographic elevation),

K_s και K_w είναι ο συντελεστής διάχυσης αντίστοιχα για την αργή ερπυστική μεταφορά και την ταχύτερη διαδικασία με νερό ($\text{km}^2 / \text{έτος}$),

Q_w είναι αδιάστατη τοπική ροή νερού [-],

S είναι η τοπική κλίση της λεκάνης [-],

n και m είναι σταθερές, συνήθως μεταξύ 1 και 2.

Προκειμένου να επικεντρωθεί στην ικανότητα των υποθαλάσσιων φαραγγίων να μεταφέρουν αρκετά ιζήματα για να γεμίσουν τη Λεβαντίνη, κατασκευάστηκε ένα απλοποιημένο ορθογώνιο μοντέλο $300 \text{ χλμ.} \times 265 \text{ χλμ.}$ με τρόπο που μία από τις πλευρές του αντιπροσωπεύει σχηματικά το ηπειρωτικό περιθώριο της Λεβαντίνης. Σε αυτή την πλευρά του μοντέλου (περίπου ανατολικά), εισήχθησαν τρία μορφολογικά βήματα με τέτοιο τρόπο ώστε τα μεγέθη τους να μοιάζουν με τα πραγματικά παλαιο-βαθυμετρικά βήματα που σχηματίστηκαν στο Άνω Ηώκαινο - Άνω Ολιγόκαινο. Για λόγους απλούστευσης, τα βήματα στο μοντέλο είναι παράλληλα και δεν μεταβάλλονται από την δράση ρηγμάτων.

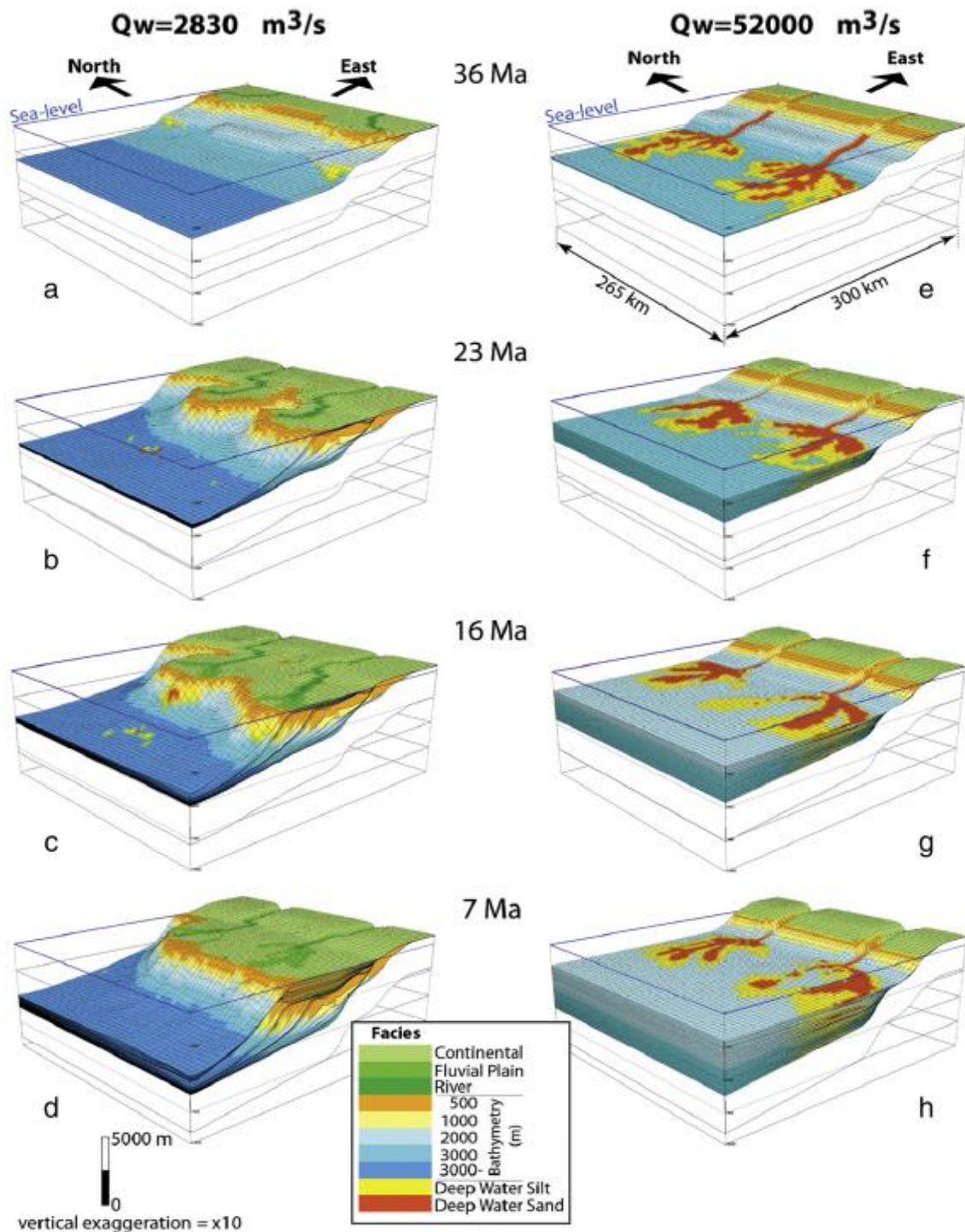
Η στρατηγική της μοντελοποίησης είναι να συναγάγουμε την εισροή του ιζήματος από τον όγκο του ιζηματογενούς τμήματος και της χρονικής διάρκειας που έγινε η απόθεση. Στη συνέχεια, συμπεραίνουμε από τη μοντελοποίηση την ποσότητα νερού που απαιτείται να χυθεί στην θάλασσα για να παραχθεί το μοτίβο της απόθεσης. Τα μοντέλα προσομοίωσης που εκτελέστηκαν αφορούσαν το ιζηματογενές πακέτο που αποτέθηκε από το Άνω Ηώκαινο μέχρι το Άνω Μειόκαινο (πριν από την κρίση αλατότητας)

4.3.1. Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στο πρώτο μοντέλο (Εικόνα 20) παρουσιάζεται μια «μη επιτυχημένη» και «επιτυχημένη» προσομοίωση με χρήση K_w , άμμος = $0,2 \text{ km}^2 / \text{ka}$, που είναι λογική τιμή και επιλέχθηκε από τη βιβλιογραφία (Rabineau et al., 2005, Burgess et al., 2006, Alzaga -Ruiz et al., 2009 · Somme et al., 2009 και Csato et al., 2012). Η προσομοίωση που δεν παράγει ένα μοντέλο που να ταιριάζει στους γεωλογικούς περιορισμούς (αριστερή πλευρά της εικόνας 20) είναι εκείνη που εκτελέστηκε με $Q_w = 2830 \text{ m}^3/\text{s}$ (αντιστοιχεί στην ποσότητα νερού που εκβάλλεται σήμερα από το ποταμό Νείλο). Το πρώτο στιγμιότυπο (Εικόνα 20α) που ελήφθη μόλις 1 εκατομμύριο χρόνια μετά την εκκίνηση δείχνει ήδη ότι με αυτές τις παραμέτρους τα ιζήματα δεν μεταφέρονται στην απομακρυσμένη λεκάνη, αλλά μάλλον κολλάνε κοντά στην ακτογραμμή, όπου χτίζουν ένα προελαύνον (progradational) δέλτα. Συνεπώς, το τελικό αποτέλεσμα στα 7 εκατομμύρια χρόνια (Εικόνα 20d) είναι πολύ διαφορετικό από την παρατηρούμενη στρωματογραφία.

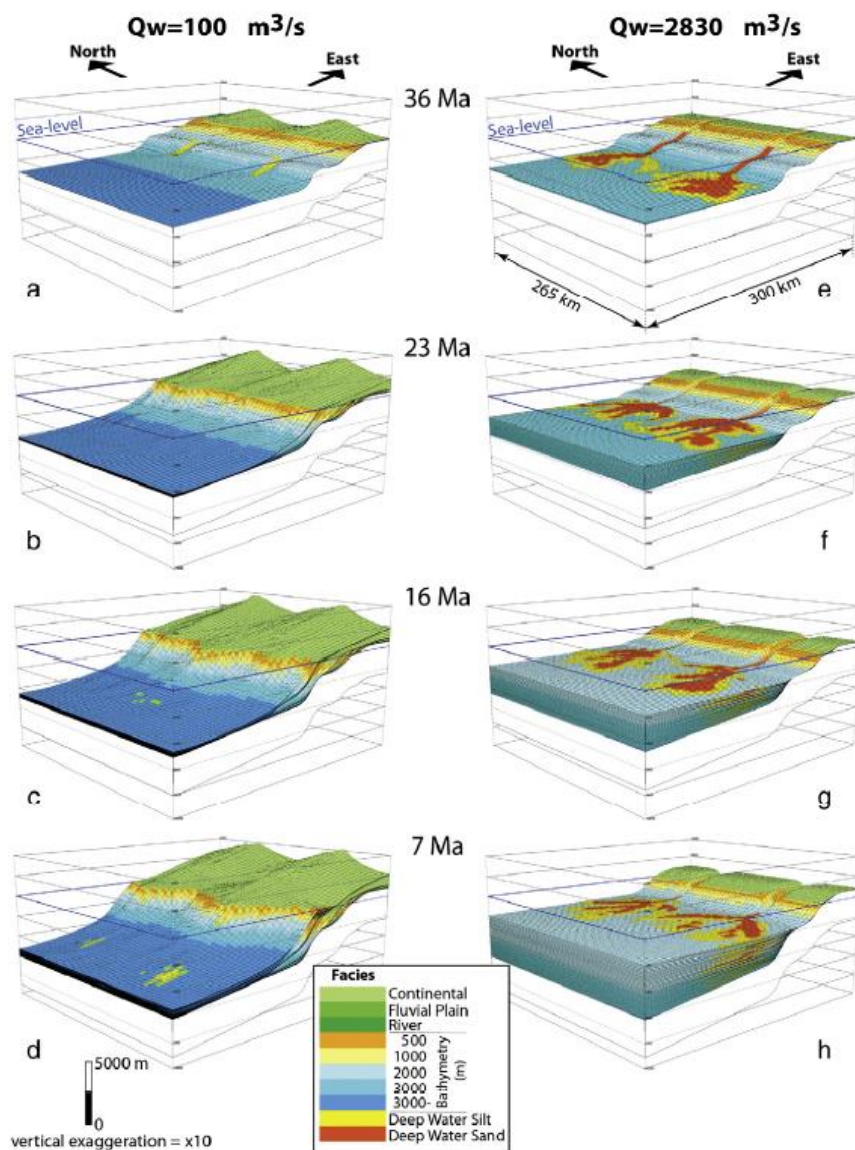
Η προσομοίωση που παράγει ένα επιτυχημένο μοντέλο είναι αυτή που εκτελέστηκε με $Q_w = 52.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Μόνο με αυτή την εξαιρετικά υψηλή τιμή ροής νερού είναι εφικτή η μεταφορά ιζημάτων μέσω των υποθαλάσσιων καναλιών στη βαθιά λεκάνη. Το τελικό αποτέλεσμα αυτού του μοντέλου στα 7 εκατομμύρια χρόνια (εικόνα 20h) ταιριάζει με

τα γεωλογικά δεδομένα, δηλαδή με το τμήμα πάχους περίπου 4 χλμ. στη βαθιά λεκάνη με στήλη νερού 1,9 χλμ. και μόνο μερικές εκατοντάδες μέτρα πάνω στο ηπειρωτικό περιθώριο.



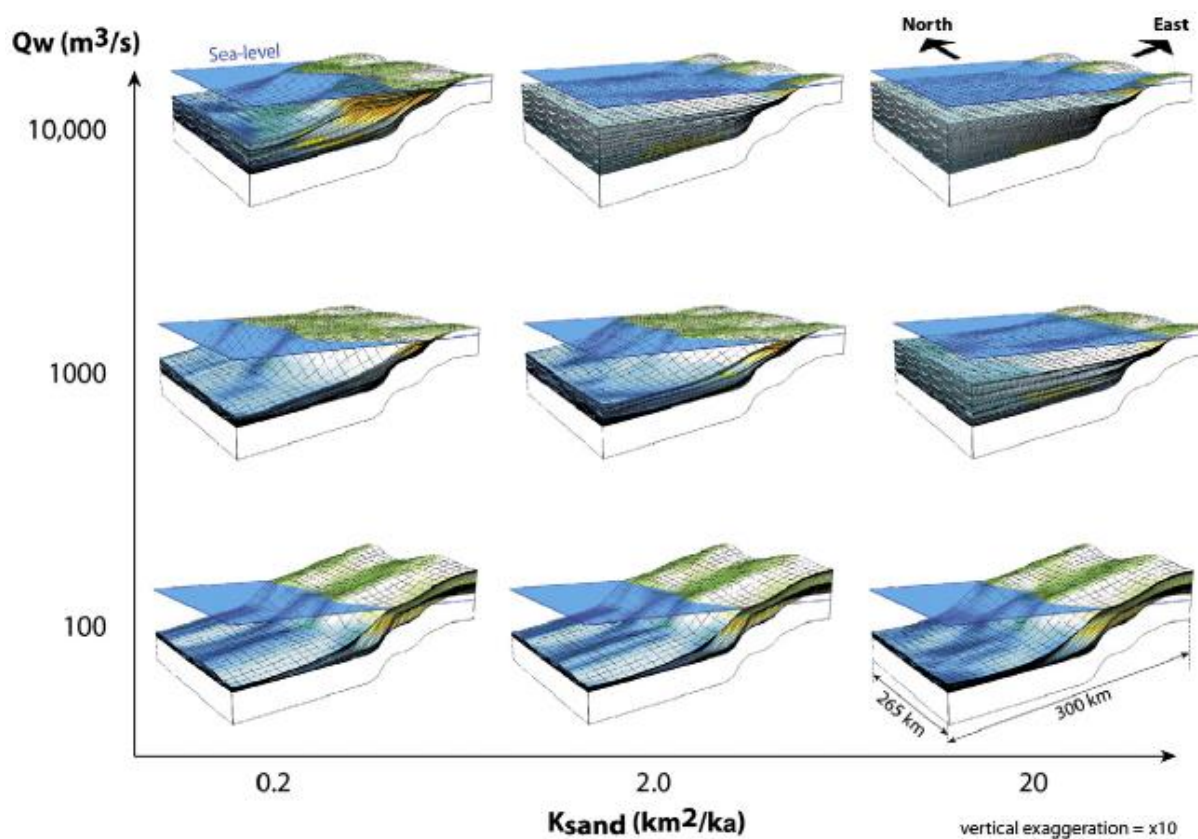
Εικόνα 20: Παράδειγμα προσομοίωσης στο οποίο προέκυψε ένα μη επιτυχημένο μοντέλο (αριστερή μεριά a-d) και ένα επιτυχημένο μοντέλο (δεξιά μεριά e-h) απόθεσης των ιζημάτων στην λεκάνη Λεβαντίνης. (Gvirtzman et al., 2013)

Παραδείγματα με εξαιρετικά μεγάλο συντελεστή διάχυσης με μεταφορά από νερό, K_w άμμου = $20 \text{ km}^2/\text{ka}$ (δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερα από το προηγούμενο παράδειγμα) παρουσιάζονται στην εικόνα 21. Η προσομοίωση που προκύπτει παρουσιάζει επίσης ένα μη επιτυχημένο και επιτυχημένο μοντέλο. Για το $Q_w = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ το μοντέλο δεν ικανοποιεί τις παρατηρήσεις (αριστερή πλευρά της εικόνας 21), ενώ για $Q_w = 2830 \text{ m}^3/\text{s}$ (σημερινός ποταμός Νείλου) επιτυγχάνεται καλή αντιστοίχιση με τους γεωλογικούς περιορισμούς.



Εικόνα 21: Παράδειγμα προσομοίωσης στο οποίο χρησιμοποιήθηκε ένας εξαιρετικά μεγάλος συντελεστής διάχυσης με μεταφορά από νερό, K_w άμμου = $20 \text{ km}^2/\text{ka}$. Προέκυψε ένα μη επιτυχημένο μοντέλο (αριστερή μεριά a-d) και ένα επιτυχημένο μοντέλο (δεξιά μεριά e-h) (Gvirtzman et al., 2013)

Τα αποτελέσματα από την μοντελοποίηση με τις τιμές που δόθηκαν στα παραδείγματα των εικόνων 20 και 21 μαζί με τα αποτελέσματα πολλών άλλων προσομοιώσεων συνοψίζονται στην εικόνα 22. Η εικόνα 22 καταδεικνύει τη στρωματογραφία του τελικού μοντέλου στα 7 εκατομμύρια χρόνια ως συνάρτηση του K και Q_w . Αυτό που προκύπτει είναι ότι για K_w , άμμος = $0,2 \text{ km}^2 / \text{ka}$ τα περισσότερα από τα ιζήματα συσσωρεύονται στη ζώνη κοντά στην ακτή ακόμη και για ένα μεγάλο Q_w της τάξης των $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$., ομοίως για $Q_w = 100 \text{ m}^3/\text{s}$, τα ιζήματα κολλάνε κοντά στην ακτή ακόμη και για αδικαιολόγητα υψηλή K_w , άμμο $20 \text{ km}^2 / \text{ka}$.



Εικόνα 22: Σύνοψη των αποτελεσμάτων μοντελοποίησης στα 7 εκατομμύρια χρόνια για αύξηση των τιμών K (αριστερά) και Q_w (προς τα πάνω). Μοντέλα που ταιριάζουν στις γεωλογικές παρατηρήσεις βρίσκονται μόνο στην πάνω δεξιά γωνία.

(Gvirtzman et al., 2013)

Για να γίνει κατορθωτή η αξιολόγηση του ανατολικού μοντέλου παροχής για τη λεκάνη της Λεβαντίνης, χρησιμοποιούμε τις παγκόσμιες σχέσεις ανάμεσα στα φορτία των ιζημάτων, της ποσότητας του νερού που καταλήγει στην θάλασσα και της περιοχής αποστράγγισης (Milliman and Syvitski, 1992, Dai and Trenberth, 2002, Syvitski and Milliman, 2007). Ωστόσο, οι μεγάλες ποσότητες νερού που απαιτούνται να φτάσουν στην θάλασσα ($2830 - 52.000 \text{ m}^3/\text{s}$) για την ικανοποίηση του παρατηρούμενου μοντέλου απόθεσης περιορίζουν το φάσμα πιθανών περιοχών αποστράγγισης στα $30.000 - 5.000.000 \text{ km}^2$.

Αυτό σημαίνει ότι για να εξηγήσουμε το ιζηματογενές φορτίο της λεκάνης Λεβαντίνης με μια περιοχή αποστράγγισης της τάξης των 30.000 km², δεν χρειάζεται μόνο να έχουμε εξαιρετικά υψηλό συντελεστή διάχυσης (Kw, άμμος = 20 km²/ka) , αλλά πρέπει επίσης να έχουμε μια ανυψωμένη οροσειρά τουλάχιστον 2500 μέτρων πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας που θα παρέχει την απαιτούμενη ποσότητα ιζημάτων από μια σχετικά μικρή περιοχή. Από την άποψη της ποσότητας νερού που χρειάζεται να φτάσει μέχρι την θάλασσα (για 52.000 m³/s) αυτή απαιτεί μια τεράστια ποσότητα νερού από βροχόπτωση, περισσότερο από δέκα φορές το άθροισμα του Τίγρη, του Ευφράτη (1750 m³/s) και του Νείλου (2830 m³/ s) μαζί. Αυτές οι ανάγκες σε νερό προϋποθέτουν, ένα κλίμα το οποίο θα παράγει δέκα φορές περισσότερη ποσότητα νερού από αυτήν που προκύπτει σήμερα από τις βροχοπτώσεις σε όλη την περιοχή της Μέσης Ανατολής.

Το ερώτημα που παραμένει είναι εάν είναι δυνατές οι εναλλακτικές λύσεις με τους συντελεστές διάχυσης υψηλής (Kw, άμμος = 2 km²/ka) και πολύ υψηλό (Kw, άμμος = 20 km²/ka). Λαμβάνοντας υπόψη μόνο το μέγεθος της περιοχής αποστράγγισης, δεν μπορεί να αποκλειστεί η πιθανότητα 250.000 km² έως 30.000 km² του βόρειου τμήματος της Αραβικής Χερσονήσου να αποστραγγίζεται στη Μεσόγειο εκείνη τη στιγμή. Ωστόσο, η απόρριψη νερού 10.000 ή 2800 m³/s, αντίστοιχα, απαιτεί ότι κατακρημνίσεις στις περιοχές αυτές έχουν παραγάγει μια ποσότητα νερού ίση με αυτή που τροφοδοτεί σήμερα το Νείλο. Επιπλέον, απαιτεί η περιοχή αποστράγγισης να βρίσκεται 1200-2500 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας για περιοχή αποστράγγισης με έκταση περίπου 250.000 km² και > 2500m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας για περιοχή αποστράγγισης με έκταση περίπου 30.000 km². Στην πραγματικότητα, αυτή η περιοχή ανυψώνεται από το Άνω Ηώκαινο (Bar, 2009, Anpi et al., 2012) και δεν έχει ακόμη φτάσει σε αυτά τα υψόμετρα με εξαίρεση τις κορυφές των βουνών. Έτσι, αυτή η εναλλακτική λύση είναι απίθανο για την περιοχή μελέτης.

Συνοψίζοντας, η πλήρωση της λεκάνης Λεβαντίνης μόνο από τις ανατολικές πηγές δεν φαίνεται να είναι εφικτή. Ακόμα και η μεταφορά ποσότητας νερού ίση με αυτή του ποταμού Νείλου δεν επαρκεί για την παραγωγή της παρατηρούμενης στρωματογραφίας, εκτός εάν ληφθούν υπόψη ακραίες υδραυλικές συνθήκες. Εναλλακτικά, για υδραυλικά συστήματα κανονικής εμβέλειας, εξαιρετικά μεγάλες ποσότητες νερού και εξαιρετικά μεγάλες περιοχές αποστράγγισης είναι απαραίτητες.

Το συμπέρασμα αυτό είναι σύμφωνο με την προς τα νότια πάχυνση των Άνω Ηωκαινικών έως Κάτω Μειοκαινικών ιζημάτων στο βαθύ τμήμα της λεκάνης Λεβαντίνης (Macgregor, 2011 · Steinberg et al., 2011) που υποδηλώνουν μια σημαντική ιζηματογενή πηγή από την Αφρική. Παρόλα αυτά, κάποια παροχή από την περιοχή της Μέσης Ανατολής έφτασε σίγουρα στη λεκάνη μέσω των υποθαλάσσιων φαραγγιών, όπως υποδεικνύουν σεισμικές μελέτες που δείχνουν τα βορειοδυτικά μοντέλα αποστράγγισης (Gardosh et al., 2008). Ωστόσο, είναι δύσκολο να εκτιμηθεί η ακριβής ποσότητα ιζημάτων που έφτασαν από την ανατολή.

4.3.2. Συμπεράσματα

Στο Άνω Καινοζωικό, μεγάλες ποσότητες εδαφικού υλικού εισήλθαν στην λεκάνη της Λεβαντίνης από δύο κύριες πηγές: (α) ένα ποτάμιο σύστημα του πρώτο-Νείλου ποταμού που μετέφερε ιζήματα από την Αφρική μέσω του ηπειρωτικού περιθωρίου της Αιγύπτου, και β) ένα ανατολικό ποτάμιο σύστημα που μεταφέρει ιζήματα από τις γύρω περιοχές από το Ισραήλ μέσω του ισραηλινού ηπειρωτικού περιθωρίου.

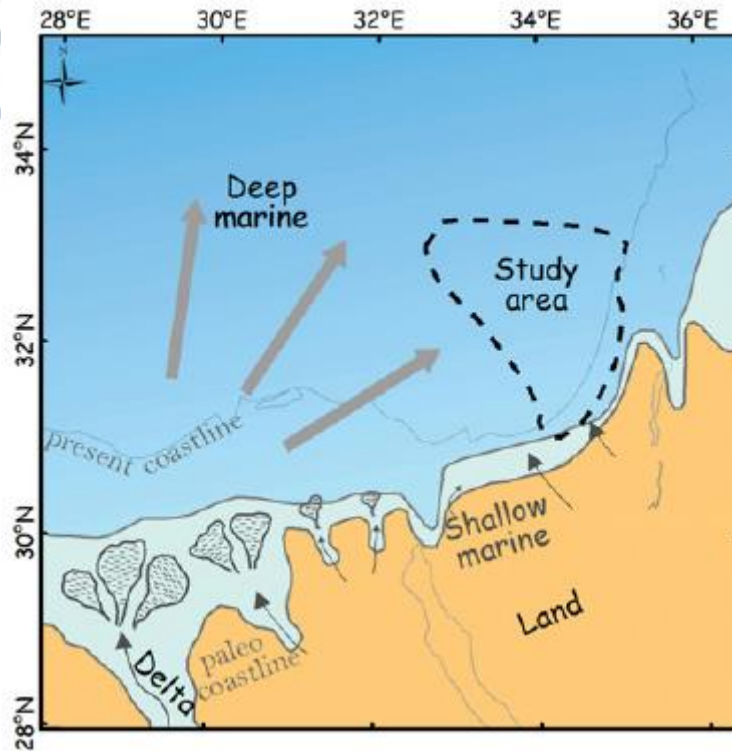
Το ερώτημα που τίθεται εδώ είναι εάν αυτά τα συστήματα μεταφορών, που τροφοδοτούνται από μια ανατολική πηγή, μπορούν να εξηγήσουν το αφύσικα μεγάλο πάχος του τμήματος Ολιγοκαίνου - Μειοκαίνου που προσδιορίστηκε στη λεκάνη της Λεβαντίνης. Ένα τέτοιο σενάριο προϋποθέτει ότι τα περισσότερα από τα μεταφερόμενα ιζήματα παρακάμπτουν το ηπειρωτικό περιθώριο του Ισραήλ πριν συσσωρευτούν στη βαθιά λεκάνη της Λεβαντίνης.

Το 3D στρωματογραφικό μοντέλο εξέλιξης που παρουσιάζεται σε αυτή τη μελέτη, δείχνει ότι η πλήρωση της λεκάνης της Λεβαντίνης μόνο από ιζήματα που μεταφέρθηκαν μέσω των υποθαλάσσιων φαραγγιών είναι δυνατή μόνο αν υποθέσουμε ένα αδικαιολόγητα τεράστιο ποτάμιο σύστημα που φτάνει σε μέγεθος τους μεγαλύτερους ποταμούς που υπάρχουν σήμερα στη γη. Τέτοια ποτάμια προφανώς δεν υπήρχαν στην περιοχή της Λεβαντίνης την εποχή εκείνη.

Εναλλακτικά, μοντέλα με ακραίες υδραυλικές συνθήκες όσον αφορά τους συντελεστές διάχυσης, μπορούν να εξηγήσουν την παρατηρούμενη στρωματογραφία με ποτάμια μεγέθους μικρότερης τάξης, αλλά αυτό απαιτεί ανυψούμενη λεκάνη απορροής που δεν θα μπορούσε να υπήρχε στην περιοχή μελέτης. Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η λεκάνη Λεβαντίνη τροφοδοτήθηκε κυρίως από την Αφρική, όπως επίσης υποδηλώνεται από την πάχυνση των ιζηματογενών μονάδων προς τα νότια.

Ως εκ τούτου, μια ανατολική αραβική πηγή μπορεί να θεωρηθεί ως συνεισφερόμενη πηγή, και όχι η κύρια πηγή του μεγάλου πάχους Ολιγοκαινικών-Μειοκαινικών ιζημάτων πλήρωσης της λεκάνης. Μια προκαταρκτική εκτίμηση της προσφοράς ιζημάτων από τα ανατολικά, η οποία βασίζεται σε παλαιογεωγραφικές ανακατασκευές, δείχνει ότι οι αραβικές πηγές συνέβαλαν κατά πάσα πιθανότητα λιγότερο από το 1/6 της προσφοράς ιζημάτων στη λεκάνη της Λεβαντίνης και μάλλον επηρέασαν μόνο την ανατολική της πλευρά κοντά στα στόματα των φαραγγιών.

Σε αντίθεση με τη σχετικά περιορισμένη κατανομή των πετρωμάτων Ολιγοκαίνου-Μειοκαίνου στο Ισραήλ, τα ιζήματα αυτής της περιόδου καλύπτουν εκατοντάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα στη βόρεια Αίγυπτο. Η κλαστική εισροή στο ηπειρωτικό περιθώριο της Αιγύπτου άρχισε προς το τέλος του Ηώκαινου, περίπου με την αρχή της τοπικής θόλωσης και την άνοδο της Ανατολικής Αφρικής (Εικόνα 23). Σε αντίθεση με το ισραηλινό περιθώριο, οι πολύ μεγαλύτερες ποσότητες εδαφικού υλικού που προμηθεύτηκαν από την Αφρική οδήγησαν σε ένα ευρύτερο σύστημα ποταμών και σε προέλαση της υφαλοκρηπίδας που έσπρωξε τις ακτές της Βόρειας Αφρικής εκατοντάδες χιλιόμετρα προς τον βορρά (Εικόνα 23, Salem, 1976, Burke, 1996).



Εικόνα 23: Παλαιογεωγραφία του βόρειο περιθωρίου της Αφρικής κατά το Ολιγόκαινο, και η μεταφορά ιζήματος από την ανοικτή Αίγυπτο προς την λεκάνη Λεβαντίνη. (Steinberg et al., 2010)

Κεφάλαιο Πέμπτο

5. Δημιουργία και ανάπτυξη κοιτάσματος υδρογονανθράκων

5.1. Εισαγωγή

Η ανακάλυψη ενός πεδίου υδρογονανθράκων απαιτεί να έχει προηγηθεί η μακροχρόνια και επίπονη διαδικασία της έρευνας. Το πρώτο βήμα το οποίο γίνεται είναι με την βοήθεια στρωματογραφικών και παλαιογεωγραφικών δεδομένων να καταστεί εφικτός ο προσδιορισμός θέσεων πιθανών μητρικών πετρωμάτων και θέσεων, στις οποίες μπορεί να έχει αποθηκευτεί ένα κοίτασμα.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την δημιουργία ενός μητρικού πετρώματος από το οποίο να μπορούν να παραχθούν μεγάλες ποσότητες υδρογονανθράκων είναι το ίζημα να είναι πλούσιο σε οργανική ύλη. Προκειμένου να είναι εφικτή η ύπαρξη ενός αποτελεσματικού πετρελαϊκού συστήματος εντός των ιζηματογενών λεκανών θα πρέπει να συνυπάρχουν 5 βασικά στοιχεία.

Σε ένα πετρελαϊκό σύστημα είναι απαραίτητο να υπάρχει: το μητρικό πέτρωμα το οποίο θα προσφέρει τους υδρογονάνθρακες. Ο ταμιευτήρας στον οποίο θα φιλοξενηθούν τα αποθέματα των υδρογονανθράκων. Το πέτρωμα κάλυμμα το οποίο εμποδίζει τη διαφυγή υδρογονανθράκων από το ταμιευτήρα. Η δομή παγίδευσης η οποία μπορεί να είναι στρωματογραφική ή τεκτονική και η οποία εξασφαλίζει την ταυτόχρονη παρουσία του ταμιευτήρα και του καλύμματος έτσι ώστε οι υδρογονάνθρακες να παραμένουν παγιδευμένοι, αντί να διαφεύγουν. Δρόμοι μετανάστευσης των υδρογονανθράκων από το μητρικό πέτρωμα προς τον ταμιευτήρα. Οι δρόμοι αυτοί μπορεί να είναι ρήγματα, διακλάσεις ή το πρωτογενές πορώδες του ταμιευτήρα.

Όλοι αυτοί οι παράγοντες θα πρέπει να τοποθετηθούν με τη σωστή σειρά μέσα στο γεωλογικό χρόνο, έτσι ώστε να έχουμε γένεση και διατήρηση μεγάλης συγκέντρωσης υδρογονανθράκων.

5.2. Απόθεση μητρικών πετρωμάτων και γένεση υδρογονανθράκων

Τα ιζήματα στα οποία δημιουργούνται οι υδρογονάνθρακες ονομάζονται μητρικά πετρώματα. Αυτά τα ιζήματα αποτίθενται σε υδάτινα περιβάλλοντα τα οποία λαμβάνουν μια ορισμένη συμβολή οργανικής ύλης, δηλαδή υπολείμματα νεκρών οργανισμών, μαζί με τους κόκκους ιζημάτων. Οι λιμναίες, δελταϊκές και θαλάσσιες λεκάνες αποτελούν τις κυριότερες αποθετικές θέσεις των μητρικών πετρωμάτων.

Ως μητρικά πετρώματα υδρογονανθράκων καθορίζονται λεπτόκοκκα, πλούσια σε άργιλο πυριτικά πετρώματα (πηλόλιθοι, σχιστόλιθοι) ή σκουρόχρωμα ανθρακικά πετρώματα (ασβεστόλιθοι, λάσπη πλούσια ασβέστιο) τα οποία έχουν δημιουργήσει και έχουν αποβάλλει υδρογονάνθρακες.

Για να μπορεί ένα ίζημα να χαρακτηριστεί ως μητρικό πέτρωμα χρειάζεται να πληρεί τρεις βασικές προϋποθέσεις οι οποίες είναι:

- Να έχει επαρκές περιεχόμενο οργανικών ουσιών βιολογικής προέλευσης,
- Αυτή η οργανική ουσία πρέπει να έχει συγκεκριμένη σύνθεση, δηλαδή να είναι πλούσια σε υδρογόνο, και
- Το μητρικό πέτρωμα πρέπει να ταφεί σε ορισμένα βάθη και να εκτεθεί σε κατάλληλες θερμοκρασίες κάτω από την επιφάνεια, προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία παραγωγής πετρελαίου με τη θερμική αποικοδόμηση του κηρογόνου (kerogen).

Με βάση εμπειρικά στοιχεία, έχουν καθοριστεί ελάχιστα επίπεδα συγκέντρωσης 1,5% και 0,5% ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) σε μητρικά πετρώματα κλασικής και ανθρακικής λιθολογίας αντίστοιχα (Hunt, 1996). Η συγκέντρωση οργανικού άνθρακα είναι ένα κατά προσέγγιση μέτρο της περιεκτικότητας σε οργανική ύλη ενός πετρώματος. Η οργανική ύλη αποτελείται κυρίως από οργανικό άνθρακα, αλλά περιέχει και μικρές ποσότητες ετερο-στοιχείων (N, S και O). Τα περισσότερα μητρικά πετρώματα που έχουν παραγάγει και έχουν αποβάλλει εμπορικές ποσότητες πετρελαίου έχουν συγκεντρώσεις TOC της τάξης του 2-10%.

Μητρικά πετρώματα πετρελαίου ή φυσικού αερίου μπορούν να αποτεθούν σε θαλάσσια ή λιμναία περιβάλλοντα, με την προϋπόθεση ότι τα νερά του πυθμένα είναι ανεπαρκή σε οξυγόνο. Εάν η συγκέντρωση του οξυγόνου που διαλύεται σε αυτά τα νερά είναι μικρότερη από 0,1 ml / l, το περιβάλλον αναφέρεται ως αναερόβιο, αν είναι στο εύρος 0,1-1,0 ml / l, το περιβάλλον αναφέρεται ως δυσαιερόβιο (dysaerobic) και αν επικρατούν υψηλότερες συγκεντρώσεις οξυγόνου, το περιβάλλον είναι γνωστό ως οξικό.

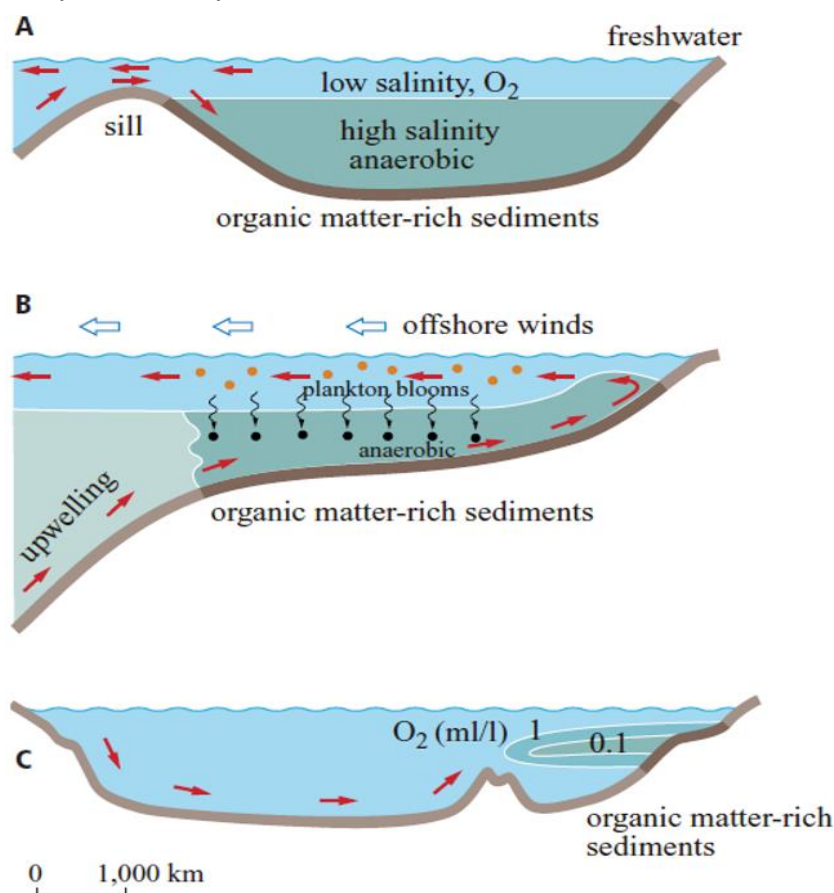
Τα αναερόβια ή δυσαιερόβια περιβάλλοντα απαιτούν στάσιμες συνθήκες ύδατος, ώστε να μην πραγματοποιείται κυκλοφορία του οξυγονωμένου νερού που θα έχει ως αποτέλεσμα την αναπλήρωση του οξυγόνου στα βαθύτερα τμήματα της υδάτινης στήλης. Κανένας οργανισμός εκτός από τα αναερόβια βακτήρια δεν μπορεί να ζήσει κάτω από αυτές τις συνθήκες. Ως εκ τούτου, σε τέτοιες συνθήκες δεν υπάρχει ο

πληθυσμός των οργανισμών που κατοικούν στο βυθό, όπως σκουλήκια, σαλιγκάρια, γαρίδες κλπ. (Βενθική πανίδα), η δραστηριότητα της οποίας βοηθά στην καταστροφή του οργανικού υλικού. Επιπλέον, ο ρυθμός αποικοδόμησης της οργανικής ύλης από τα αναερόβια βακτήρια είναι πολύ χαμηλότερος σε σύγκριση με αυτόν των αερόβιων βακτηρίων.

Υπάρχουν τρία βασικά σενάρια απόθεσης που εξασφαλίζουν ευνοϊκές συνθήκες για τη διατήρηση της οργανικής ύλης (Demaison and Moore, 1980).

- 1) Το σύστημα απόθεσης του λεγόμενου μοντέλου στασιμότητας απαιτεί μια θαλάσσια λεκάνη η οποία έχει πολύ περιορισμένη κυκλοφορία νερού με τον ανοικτό ωκεανό (Σχήμα 24Α), π.χ. Μαύρη Θάλασσα, η οποία έχει βάθος έως 2.500 μ. αλλά έχει μια στενή σύνδεση 25 μ. με τη Μεσόγειο Θάλασσα. Λόγω της υψηλής εισροής γλυκού νερού από ποταμούς, τα επιφανειακά νερά έχουν χαμηλότερα επίπεδα αλατότητας. Αυτές οι επιφανειακές υδάτινες μάζες εισρέουν στην ανοικτή θάλασσα, ενώ οι ροές νερού υψηλότερης αλατότητας και επομένως υψηλότερης πυκνότητας επιστρέφουν ως ρεύμα πυθμένα στην λεκάνη αυτή. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια στρωματοποιημένη στήλη νερού με μια οξεία επαφή μεταξύ της υψηλότερης αλατότητας και επομένως των πυκνότερων μαζών νερού κάτω και των υδάτων χαμηλής αλατότητας πάνω. Αυτό το είδος επαφής, αναφέρεται ως αλοκλινές (halocline). Κάτω από το αλοκλινές βρίσκεται μια τεράστια, στάσιμη μάζα νερού που παρέχει ευνοϊκές συνθήκες για τη διατήρηση του οργανικού υλικού.
- 2) Το δεύτερο κύριο σύστημα απόθεσης είναι το λεγόμενο μοντέλο παραγωγικότητας (Σχήμα 24Β). Σε ορισμένες περιοχές των σημερινών ωκεανών, πλούσια σε θρεπτικά συστατικά ρεύματα νερού από τον πυθμένα ανέρχονται κατά μήκος της άκρης της υφαλοκρηπίδας από βαθύτερα τμήματα της ηπειρωτικής κατωφέρειας. Όταν φθάσουν στο τμήμα κοντά στην επιφάνεια του νερού που διαπερνάτε από το ηλιακό φως (φωτοτική ζώνη), εμφανίζεται μια μαζική ανάπτυξη θαλάσσιων φυκών (φυτοπλαγκτονική ανθοφορία). Με αυτή τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα παράγονται τεράστιες ποσότητες φυτοπλαγκτού. Αυτή είναι η βάση της θαλάσσιας τροφικής αλυσίδας, δηλαδή το φυτοπλαγκτόν τρώγεται από το ζωοπλαγκτόν, το οποίο με τη σειρά του τρώγεται από τα ψάρια κ.λπ. Αφού τα υπολείμματα όλων αυτών των νεκρών οργανισμών βυθίζονται στη στήλη νερού, αρχίζει η αποικοδόμηση και η αποσύνθεση. Λόγω της μεγάλης ποσότητας της αποσυντιθέμενης οργανικής ύλης, το οξυγόνο καταναλώνεται με τέτοιο ρυθμό ώστε να δημιουργούνται δυσάροβες (dysaerobic) και αναερόβιες (anaerobic) συνθήκες εντός της στήλης ύδατος. Επίσης δημιουργείται και πάλι η απότομη επαφή μεταξύ των υδάτων πυθμένα με έλλειψη οξυγόνου και της μάζας νερού κοντά στην επιφάνεια η οποία είναι πλούσια σε οξυγόνο. Αυτό είναι γνωστό ως όριο redox. Στο δάπεδο του ωκεανού η οργανική ύλη αποσυντίθεται εν μέρει από μικροοργανισμούς. Οι περιεκτικότητες σε TOC των ιζημάτων που αποτίθενται σε αυτές τις περιβαλλοντικές συνθήκες είναι της τάξης του 2-4%.

3) Το τρίτο κύριο σενάριο που οδηγεί στην απόθεση ιζημάτων πλούσιων σε οργανική ύλη ελέγχεται από το παγκόσμιο βαθύ σύστημα ωκεάνιας κυκλοφορίας (Εικόνα 24C). Ρεύματα υδάτινης μάζας υψηλότερης πυκνότητας τα οποία προέρχονται από τις περιοχές της αρκτικής και της ανταρκτικής ρέουν κατά μήκος της βαθιάς ωκεάνιας τοπογραφίας προς τα μικρότερα γεωγραφικά πλάτη. Όπου συναντούν μεγάλες τοπογραφικές αυξήσεις, εκτοπίζουν πλούσιες σε θρεπτικές ουσίες μάζες νερού προς την επιφάνεια του ωκεανού. Με αυτόν τον τρόπο, ξεκινά μια σειρά διαδικασιών και αποτελεσμάτων που είναι παρόμοιες με εκείνες του ανοδικού (upwelling) καθεστώτος που οδηγούν στην δημιουργία μιας ανοικτού ωκεανού ζώνης ελάχιστου οξυγόνου (open - ocean oxygen - minimum zone). Όπου αυτή η ελάχιστη ζώνη οξυγόνου προσκρούει σε υφαλοκρηπίδα, αποτίθενται ιζήματα πλούσια σε οργανική ύλη. Τέτοιες συνθήκες μπορούν να παρατηρηθούν στους σημερινούς ωκεανούς, π.χ. κατά μήκος τμημάτων της βαθιάς υφαλοκρηπίδας ανοικτά της Ινδίας και του Πακιστάν. Αυτό που περιεγράφηκε εδώ όσον αφορά τον τύπο εισόδου οργανικής ύλης για θαλάσσια συστήματα ιζημάτων εφαρμόζεται με παρόμοιο τρόπο σε μεγάλες λίμνες στις ηπείρους, π.χ. τις λίμνες στην κοιλάδα διάρρηξης της Ανατολικής Αφρικής. Η βιομάζα που προέρχεται από τα φύκια και τα βακτήρια του γλυκού νερού αποτίθεται σε δύσαερόβια ή αναερόβια (dysaerobic or anaerobic) νερά βαθιάς λίμνης, οι μάζες των οποίων ποτέ δεν ανατρέπονται (overtured).



Εικόνα 24: Σχηματική απεικόνιση των τριών βασικών σεναρίων απόθεσης που ευνοούν την διατήρηση του οργανικού υλικού σε θαλάσσιες λεκάνες.

([http://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre_aree/Tecnologia_e Scienze_applicate/en_ciclopedia/inglese/inglese_vol_1/pag065-84ing3.pdf](http://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre_aree/Tecnologia_e_Sienze_applicate/en_ciclopedia/inglese/inglese_vol_1/pag065-84ing3.pdf))

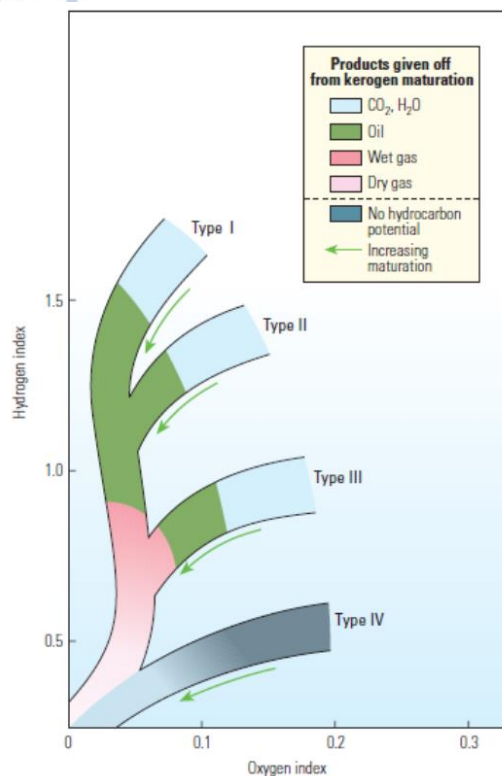
Όλα τα περιβάλλοντα απόθεσης θαλάσσιων και γλυκών υδάτων μπορούν να λάβουν εισροή οργανικής ύλης που προέρχεται από ανώτερης τάξης φυτά ξηράς που μεταφέρονται από ποτάμια ή παγετώνες ή από τον άνεμο. Σε αντίθεση με τη βιολογική ποικιλία φυκών ή βακτηρίων, η οποία είναι πλούσια σε υδρογόνο, η οργανική ύλη που προέρχεται από χερσαία φυτά τείνει, λόγω της μεγάλης συμβολής της κυτταρίνης και των προδρόμων υλικών που προέρχονται από την λιγνίνη, να είναι πλούσια σε οξυγόνο. Εξαιρέσεις είναι οι σπόροι και οι επιδερμίδες φυτικών φύλλων που είναι πλούσιες σε υδρογόνο.

Στην πραγματικότητα, η οργανική ύλη των περισσότερων μητρικών πετρωμάτων προέρχεται από μίγματα υπολειμμάτων που προέρχονται από θαλάσσιους οργανισμούς καθώς και από χερσαία βλάστηση. Είναι η σχετική αφθονία καθενός από αυτά τα οργανικά υλικά που καθορίζει αν το προκύπτουν μητρικό πέτρωμα θα παράγει κατά κύριο λόγο πετρέλαιο ή φυσικό αέριο.

Η οργανική ύλη στα μητρικά πετρώματα υδρογονανθράκων υποδιαιρείται σε δύο κλάσματα. Το διαλυτό οργανικό υλικό σε οργανικούς διαλύτες ονομάζεται βιτουμένιο και αντιστοιχεί σε ένα μικρό ποσοστό της οργανικής ύλης. Η στερεή οργανική ύλη η οποία είναι αδιάλυτη σε οργανικούς διαλύτες, ονομάζεται κηρογόνο (kerogen). Το κηρογόνο σχηματίζεται στα ιζήματα κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας που ονομάζεται διαγένεση και υποδηλώνει όλες τις γεωχημικές και ορυκτολογικές διεργασίες που συμβαίνουν στο ανώτατο τμήμα μιας ιζηματογενούς στήλης.

Τα βασικά βιολογικά συστατικά των ζώντων οργανισμών είναι οι πρωτεΐνες (proteins), οι υδατάνθρακες (carbohydrates), τα λιπίδια (lipids) και η λιγνίνη (lignin). Μετά το θάνατο του οργανισμού, αυτά τα βιοπολυμερή αποικοδομούνται εύκολα στα βιομονομερή συστατικά τους, π.χ. οι υδατάνθρακες σε σάκχαρα, οι πρωτεΐνες σε αμινοξέα κ.λπ. Αυτά τα βιομονομερή δεν είναι σταθερά σε ένα ιζηματογενές περιβάλλον. Ανακατατάσσονται από μια πληθώρα αντιδράσεων που ελέγχονται από βακτηριακά ένζυμα σε πολυ-συμπυκνωμένα πολυμερή οργανικά υλικά, όπως τα χουμικά οξέα, τα φουλβικά οξέα και οι χουμικές ουσίες. Αυτά μετατρέπονται σταδιακά στο «γεωπολυμερές» (geopolymer) κηρογόνο μέσα σε λίγες εκατοντάδες μέτρα από την ταφή (Tissot and Welte, 1984). Οι πιο σημαντικοί παράγοντες για τη διάσπαση του κηρογόνου είναι η θερμοκρασία και ο χρόνος.

Συνοπτικά, το κηρογόνο αποτελείται από ένα φυσικό μείγμα διαγενοποιητικά αναδιαρθρωμένης βιομάζας καθώς και από συντηρημένες βιοσυνθετικές ενώσεις (Killips and Killips, 1993). Μια χρήσιμη και αρχική γεωχημική προσέγγιση για τον προσδιορισμό της σύνθετης σύνθεσης του κηρογόνου είναι με στοιχειακή ανάλυση και εξέταση της σχέσης μεταξύ του λόγου ατομικού υδρογόνου / άνθρακα (H / C) και του λόγου ατομικού οξυγόνου / άνθρακα (O / C) (Εικόνα 25). Με τον τρόπο αυτό, η μεγάλη ποικιλία κηρογόνων που απαντώνται στη φύση μπορεί να ταξινομηθεί σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες που αναφέρονται ως κηρογόνο τύπου I, τύπου II, τύπου III και τύπου IV (Tissot and Welte, 1984).



Εικόνα 25: Διάγραμμα Van Krevelen στο οποίο γίνεται η ταξινόμηση του κηρογόνου σε τέσσερεις κύριους τύπους με βάση τους λόγους H/C και O/C του οργανικού υλικού από το οποίο προέρχονται.

(<http://petroleumgeo.blogspot.gr/2016/09/pgng-hydrocarbon-generation.html>)

Η υψηλή αναλογία υδρογόνου / άνθρακα ($H/C > 1.25$) και ο χαμηλός λόγος οξυγόνου / άνθρακα ($O/C < 0.15$) των κηρογόνων τύπου I, αντικατοπτρίζουν μια υψηλή εισροή φυκών και βακτηριδιακής βιομάζας. Χημικά το κηρογόνου αυτού του τύπου συνίσταται από ένα μεγάλο ποσοστό μακρών αλιφατικών αλυσίδων. Σχηματίζεται σε λίμνες και λιμνοθάλασσες και εμφανίζει μεγάλη δυνατότητα γένεσης πετρελαίου.

Ο τύπος II κηρογόνου έχει και αυτός υψηλό λόγο υδρογόνου / άνθρακα (χαμηλότερο όμως από αυτόν του τύπου I) και μέτριο λόγο οξυγόνου / άνθρακα ($O/C 0.03 - 0.15$). Προέρχεται κατά κύριο λόγο από υψηλή συνεισφορά βιομάζας φυκών και αποτελείται από ένα μίγμα κορεσμένων ανθρακικών δακτυλίων (ναφθένες) και αλειφατικών αλυσίδων, καθώς και μερικούς αρωματικούς δακτυλίους. Πλούσια σε θείο κηρογόνα (που δεν φαίνονται στην εικόνα 25). Προέρχονται από ανθρακικά περιβάλλον απόθεσης. Συνεπώς, τα πετρέλαια που παράγονται από ανθρακικά μητρικά πετρώματα τείνουν να είναι πλούσια σε θείο (περισσότερο από 1,5% S). Αυτός ο τύπος κηρογόνου έχει την τάση να παράγει πετρέλαιο και φυσικό αέριο αλλά το δυναμικό του είναι χαμηλότερο του κηρογόνου τύπου I.

Τα κηρογόνα τύπου III, αντίθετα, έχουν υψηλό λόγο οξυγόνου / άνθρακα (O/C) και χαμηλό λόγο υδρογόνου / άνθρακα (H/C). Η αυξημένη περιεκτικότητα σε οξυγόνο, η οποία υπάρχει κυρίως με τη μορφή καρβοξυλικών ομάδων ($-COOH$), οφείλεται είτε σε υψηλή εισροή υπολειμμάτων ανώτερων φυτών της γης, τα οποία είναι πάντοτε πλούσια σε δομές που προέρχονται από κυτταρίνη και λιγνίνη είτε στην απόθεση

οργανικής ύλης που προέρχεται από θαλάσσιους οργανισμούς κάτω από συνθήκες δισαερόβιες έως οξικές (dysaerobic to oxic environments). Τα μητρικά πετρώματα που φέρουν κηρογόνο τύπου III παράγουν λίγο πετρέλαιο, αλλά έχουν μεγάλη δυνατότητα για τη γένεση αέριων υδρογονανθράκων.

Τέλος το κηρογόνο Τύπου IV αποτελεί το υπόλειμμα της οργανικής ύλης, παρουσιάζει αναλογία υδρογόνου / άνθρακα ($H/C < 0,5$), περιέχει ως επί το πλείστον οργανική ύλη που έχει αποσυντεθεί και εμφανίζεται με τη μορφή πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων. Αυτός ο τύπος κηρογόνου δεν μπορεί να παράξει υδρογονάνθρακες.

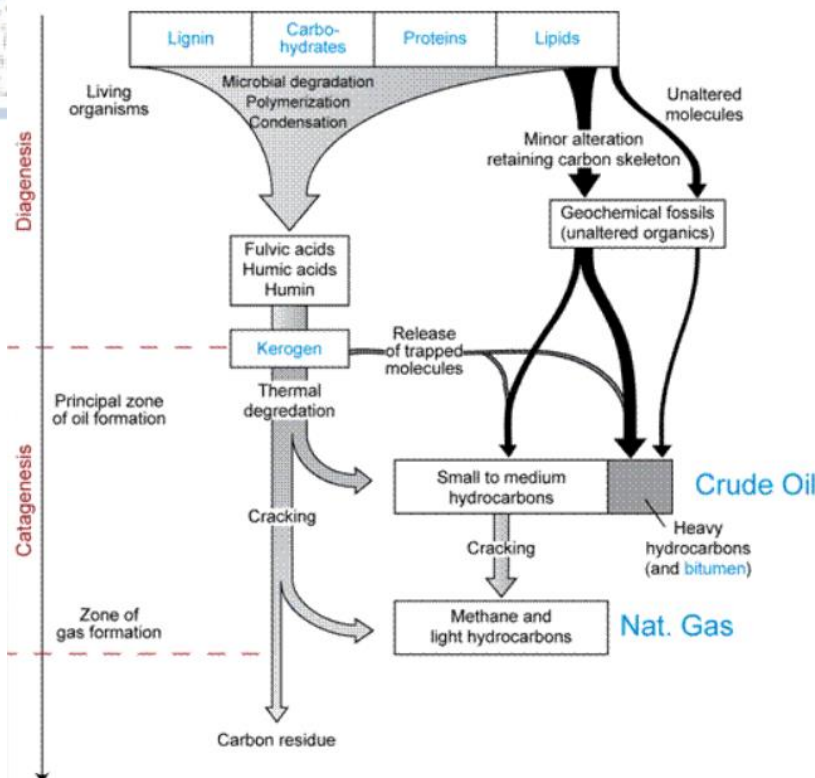
5.2.1. Θερμογενής προέλευση υδρογονανθράκων

Σε μια ιζηματογενή λεκάνη όπου έχουν αποτεθεί ιζήματα πλούσια σε οργανική ύλη, αυτή αρχίζει να εξελίσσεται. Αρχικά στο πρώτο στάδιο, στάδιο της διαγένεσης το οποίο γίνεται σε μικρά βάθη έχουμε την βακτηριδιακή δραστηριότητα από την οποία προκύπτει το κηρογόνο. Το βάθος της ιζηματογενούς στήλης στο οποίο γίνεται η μετατροπή της οργανικής ύλης σε κηρογόνο θεωρείται ως ανώριμη ζώνη (Εικόνα 26).

Ακολουθώντας, και ενώ η απόθεση ιζημάτων στην λεκάνη συνεχίζεται με αποτέλεσμα το πλούσιο σε οργανικό υλικό ίζημα να θάβεται σε μεγαλύτερα βάθη προχωράμε στο στάδιο της καταγένεσης (ώριμη ζώνη). Στάδιο κατά το οποίο το κηρογόνο υφίσταται θερμική διάσπαση (thermal cracking) και αρχίζει να αποσυντίθεται.

Όταν η θερμοκρασία στο βάθος που βρίσκεται η οργανική ύλη ξεπεράσει τους 60°C τότε μπαίνουμε σε αυτό που ονομάζεται παράθυρο πετρελαίου (oil window). Το παράθυρο πετρελαίου εκτείνεται από την θερμοκρασία των 60°C έως τους 150°C. Το φυσικό αέριο αρχίζει να δημιουργείται από τους 100°C και συνεχίζει μέχρι τους 220°C, θερμοκρασιακό διάστημα το οποίο ονομάζεται παράθυρο αερίου (gas window). Η γένεση του αερίου εκτείνεται μέχρι το στάδιο της μεταγένεσης (Εικόνα 26).

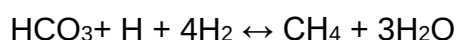
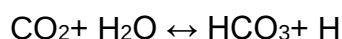
Αρχικά στο παράθυρο πετρελαίου έχουμε την διάσπαση βαρύτερων κλασμάτων ενώ με την αύξηση της θερμοκρασίας προχωράμε σε διάσπαση ελαφρύτερων κλασμάτων πετρελαίου και σχηματισμό φυσικού αερίου. Υπάρχει ένα θερμοκρασιακό διάστημα όπου έχουμε ταυτόχρονα σχηματισμό πετρελαίου αλλά και φυσικού αερίου. Ενώ στο τελευταίο στάδιο της παραγωγής υδρογονανθράκων (μεταγενετικό στάδιο) το φυσικό αέριο είναι κυρίαρχο και προέρχεται από την διάσπαση είτε του πετρελαίου είτε του πυρίμαχου κηρογόνου.



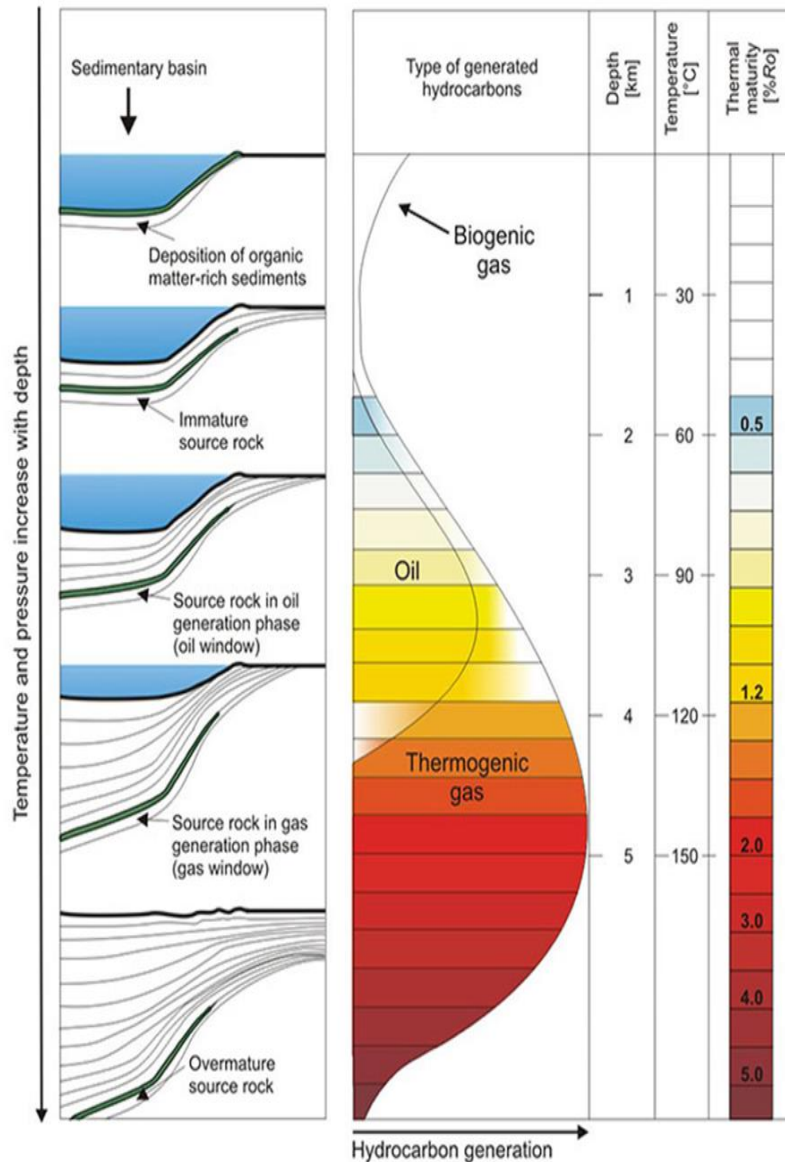
Εικόνα 26: Αποτύπωση των κύριων συνθηκών και διαδικασιών για την εξέλιξη της οργανικής ύλης και μετατροπή της σε υδρογονάνθρακες (https://www.ems.psu.edu/~pisupati/ACSO Outreach/Petroleum_2.html)

5.2.2. Βιογενείς προέλευση φυσικού αερίου

Οι αέριοι υδρογονάνθρακες που βρίσκονται μέσα σε θαλάσσια ιζήματα μπορεί να είναι είτε βιογενούς είτε θερμογενούς προέλευσης. Στην περίπτωση της βιογενούς προέλευσης οι αέριοι υδρογονάνθρακες (οι οποίοι συντριπτικά αποτελούνται κατά 99% από μεθάνιο) είναι αποτέλεσμα βακτηριακής δραστηριότητας κατά τα την διάρκεια της πρόωρης διαγένεσης. Οι αέριοι υδρογονάνθρακες που προκύπτουν είναι υποπροϊόν του μεταβολισμού μεθανογόνων βακτηρίων (αρχαιοβακτηρίδια), οι οποίοι στην πλειοψηφία τους μπορούν να σχηματίσουν μεθάνιο, χρησιμοποιώντας υδρογόνο:



Περιοχές οι οποίες παρουσιάζουν ραγδαία συσσώρευση λεπτόκοκκου ιζήματος πλούσιου σε οργανική ύλη αποτελούν ιδανικό περιβάλλον για τον σχηματισμό βιογενούς αερίου. Οι θύλακες μεθανίου βιογενούς προέλευσης δημιουργούνται σε μικρά βάθη, λίγες δεκάδες μέτρα κάτω από τον πυθμένα και σε χαμηλή θερμοκρασία (< 70°C).



Εικόνα 27: Διάγραμμα φάσεων παραγωγής υδρογονανθράκων σε σχέση με την θερμοκρασία και το βάθος ταφής

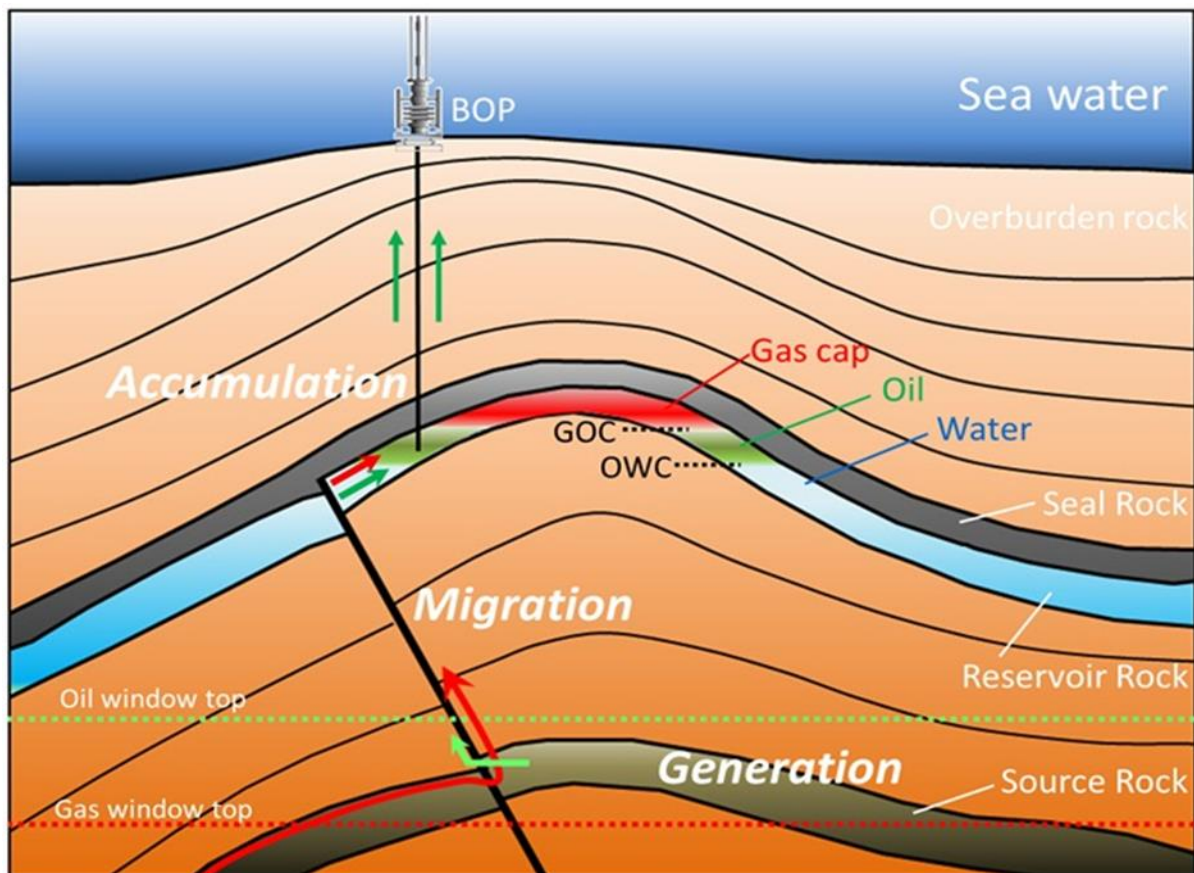
(<http://infolupki.pgi.gov.pl/en/gas/thermal-maturity-organic-matter-and-gas-exploration>)

5.3. Πετρελαϊκό σύστημα

Για να μπορέσει να δημιουργηθεί ένα συμβατικό πετρελαϊκό σύστημα είναι απαραίτητο να συνυπάρχουν οι πιο κάτω παράμετροι:

- Ύπαρξη μητρικού πετρώματος (Source rock)
- Πραγματοποίηση μετανάστευσης (Migration)
- Ύπαρξη πετρώματος ταμιευτήρα (reservoir rock)
- Ύπαρξη πετρώματος καλύμματος (Seal ή cap rock)
- Ύπαρξη δομής παγίδευσης (Trap)

Η ύπαρξη των παρά πάνω παραγόντων στην σωστή σειρά μέσα στον γεωλογικό χρόνο θα έχει ως τελικό αποτέλεσμα την δημιουργία και διατήρηση ενός πεδίου υδρογονανθράκων (Εικόνα 28).



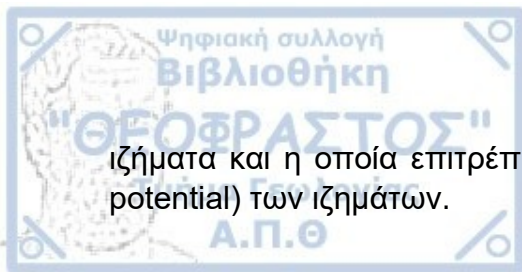
Εικόνα 28: Σχηματική απεικόνιση ενός συμβατικού πετρελαϊκού συστήματος (http://www.iogmec.go.jp/english/oil/oilgas_10_00012.html)

5.3.1. Μητρικό πέτρωμα

Πρόκειται για το πέτρωμα από το οποίο προέρχονται οι υδρογονάνθρακες ενός πεδίου υδρογονανθράκων. Τα μητρικά πετρώματα είναι λεπτόκοκκα ιζηματογενή πετρώματα τα οποία κατά την απόθεση των κόκκων του πετρώματος υπήρξε ταυτόχρονη απόθεση μεγάλης ποσότητας οργανικής ύλης (θαλάσσια ή λιμναία φύκη και χερσαία φυτά).

Για να είναι εφικτή η διατήρηση της οργανικής ύλης είναι απαραίτητο η απόθεση να πραγματοποιηθεί σε ανοξικό περιβάλλον. Η γένεση υδρογονανθράκων σε ένα μητρικό πέτρωμα προϋποθέτει αυτό να βρίσκεται σε ένα βάθος μεγαλύτερο των 3 χλμ. και η θερμοκρασία να ξεπερνά τους 60°C.

Η πλουσιότητα ή το ενδεχόμενο γένεσης πετρελαίου ενός μητρικού πετρώματος, μπορεί να προσδιοριστεί με μετρήσεις του συνολικού οργανικού άνθρακα (TOC). Η πυρόλυση Rock-Eval είναι μια μέθοδος της γεωχημείας, η οποία επιτρέπει τον χαρακτηρισμό του τύπου και του βαθμού ωρίμανσης της οργανικής ύλης μέσα στα



ιζηήματα και η οποία επιτρέπει την εκτίμηση του πετρελαϊκού δυναμικού (petroleum potential) των ιζημάτων.

5.3.2. Μετανάστευση

Η μετανάστευση είναι η διαδικασία κατά την οποία οι παραγόμενοι υδρογονάνθρακες αποβάλλονται από το μητρικό πέτρωμα με την βοήθεια διόδων (ρήγματα, μικροσπασίματα) και εισέρχονται στον ταμιευτήρα. Η αρχική κίνηση από το μητρικό πέτρωμα προς τον ταμιευτήρα ονομάζεται πρωτογενής μετανάστευση ενώ η περεταίρω κίνηση εντός του ταμιευτήρα ονομάζεται δευτερογενής μετανάστευση.

Η αποβολή των υδρογονανθράκων από το μητρικό πέτρωμα οφείλεται στην εκτόνωση της υπερπίεσης η οποία αναπτύσσεται εντός αυτών των πετρωμάτων. Τα αιτία ανάπτυξης υπερπίεσης στο μητρικό πέτρωμα μπορεί να είναι η γένεση πετρελαίου και αερίων, η διαστολή των ρευστών σε αυξημένες θερμοκρασίες, η συμπίκνωση του μητρικού πετρώματος και η απελευθέρωση του νερού σε αφυδατωμένα αργιλικά ορυκτά.

Όταν οι υδρογονάνθρακες εισέλθουν στον ταμιευτήρα αρχίζει η δευτερογενής μετανάστευση. Η δευτερογενής μετανάστευση εμφανίζεται με τη μορφή πολυφασικών ροών, δηλαδή ως σταγόνες πετρελαίου ή φυσαλίδες αερίου στο νερό των πόρων που τείνουν να κινηθούν προς τα πάνω λόγω της πλευστότητας ή οδηγούμενες από υδροδυναμικές συνθήκες. Τα τελευταία σημεία της δευτερογενούς μετανάστευσης είναι οι παγίδες όπου θα συσσωρευθούν και θα δημιουργηθεί το κοίτασμα. Αν οι υδρογονάνθρακες δεν συναντήσουν κάποια δομή παγίδευσης θα αποβληθούν ως ή εκροές στην επιφάνεια.

5.3.3. Πέτρωμα ταμιευτήρας

Πρόκειται για ιζηματογενή πετρώματα τα οποία είναι απαραίτητο να διαθέτουν υψηλό πορώδες και καλή διαπερατότητα. Το πορώδες και η διαπερατότητα ενός ταμιευτήρα επηρεάζονται από την αποθετική γεωμετρία των πόρων των ιζημάτων και τις διαγενετικές αλλαγές που προκύπτουν μετά από την απόθεση του.

Η ύπαρξη υψηλού πορώδους στους ταμιευτήρες έγκειται στην ανάγκη να υπάρχει διαθέσιμος χώρος στον οποίο θα αποθηκευτούν οι ποσότητες των υδρογονανθράκων που αποβάλλονται από το μητρικό πέτρωμα. Η διαπερατότητα από την άλλη έχει να κάνει με την ευκολία με την οποία ρέουν τα ρευστά τα οποία βρίσκονται μέσα στον ταμιευτήρα.

Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ένα πέτρωμα για να χαρακτηριστεί ως οικονομικά βιώσιμος ταμιευτήρας υδρογονανθράκων (economically viable hydrocarbon reservoir) δεν πρέπει απλά να παρουσιάζει ικανοποιητικό πορώδες αλλά πρέπει να έχει καλή διαπερατότητα και μεγάλο όγκο παγιδευμένων υδρογονανθράκων.

Τα πετρώματα ταμιευτήρες ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες οι οποίες είναι οι ανθρακικοί και κλαστικοί ταμιευτήρες.

5.3.1.1. Ανθρακικοί ταμιευτήρες

Οι ανθρακικοί ταμιευτήρες χαρακτηρίζονται από υπερβολικά ανομοιογενές πορώδες και διαπερατότητα τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κάθετη διεύθυνση. Αυτές οι ανομοιογένειες εξαρτώνται από το περιβάλλον απόθεσης των ανθρακικών φάσεων και πολύ περισσότερο από τη δευτερογενή μετατροπή της πρωτογενούς δομής του πετρώματος. Οι κύριοι τύποι πορώδους, είναι:

- Vuggy (πόροι μεγαλύτεροι των κόκκων)
- Intergranular (πόροι ανάμεσα στους κόκκους)
- Intragranular (πόροι εσωτερικά των κόκκων)
- Chalky (κιμωλία)

Τα διαγενετικά γεγονότα που οδηγούν σε αλλαγές στο πορώδες και την διαπερατότητα μπορούν να συνοψιστούν κάτω από πέντε αιτίες: διαλυτοποίηση, δολομιτοποίηση, κατακερματισμό, τσιμεντοποίηση και επανακρυστάλλωση

5.3.1.2. Κλαστικοί (ψαμμιτικοί) ταμιευτήρες

Το αρχικό πορώδες και η διαπερατότητα των ψαμμιτικών ταμιευτήρων εξαρτάται από το μέγεθος και τη μορφή των κόκκων τους. Οι ψαμμιτικοί ταμιευτήρες είναι σπάνια ισότροποι, καθώς κατά την ιζηματογένεση συνήθως συγκεντρώνονται κόκκοι διαφορετικού μεγέθους σε διαφορετικά στρώματα.

Η κάθετη κυρίως αλλά και η οριζόντια διαπερατότητα επηρεάζονται από την διαβάθμιση των κόκκων σε στρώσεις, την ύπαρξη κόκκων μεγέθους αργίλου, την κατά στρώσεις συμπαγοποίηση και την επιλεκτική συγκέντρωση κάποιου μεγέθους κόκκων σε ορισμένα σημεία.

Συγκριτικά με τους ανθρακικούς ταμιευτήρες οι ψαμμιτικοί παρουσιάζουν πιο ομοιογενές πορώδες και διαπερατότητα τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κάθετη διεύθυνση.

5.3.4. Πέτρωμα κάλυμμα

Για να μπορέσει να υπάρξει μια μεγάλη συγκέντρωση υδρογονανθράκων σε έναν ταμιευτήρα ώστε να δημιουργηθεί ένα κοίτασμα υδρογονανθράκων είναι απαραίτητη η παρουσία πάνω από αυτόν ενός αδιαπέρατου πετρώματος (Εικόνα 29, impermeable trap rock). Ένα πέτρωμα κάλυμμα είναι αποτελεσματικό εάν η ισχύς του ή η κατανεμημένη πίεσή του υπερβαίνει την προς τα πάνω πίεση της πλευστότητας που παράγεται από την υποκείμενη στήλη υδρογονανθράκων.

Ως πέτρωμα κάλυμμα μπορούν να λειτουργήσουν διαφορετικής λιθολογικής σύστασης πετρώματα. Τα συνηθέστερα πετρώματα τα οποία συναντώνται πάνω από του ταμιευτήρες είναι οι εβαπορίτες (π.χ. αλάτι, ανυδρίτης) και πλούσια σε άργιλο πετρώματα (π.χ. σχιστόλιθοι). Το πέτρωμα κάλυμμα δεν είναι απαραίτητο να έχει μεγάλο πάχος για να είναι αποτελεσματικό, φτάνει να διατηρείται πλευρικά σε μεγάλες αποστάσεις. Ομοίως το βάθος ταφής δεν φαίνεται να είναι κρίσιμο, διότι η μόνωση μπορεί να είναι αποτελεσματική σε όλα τα βάθη.

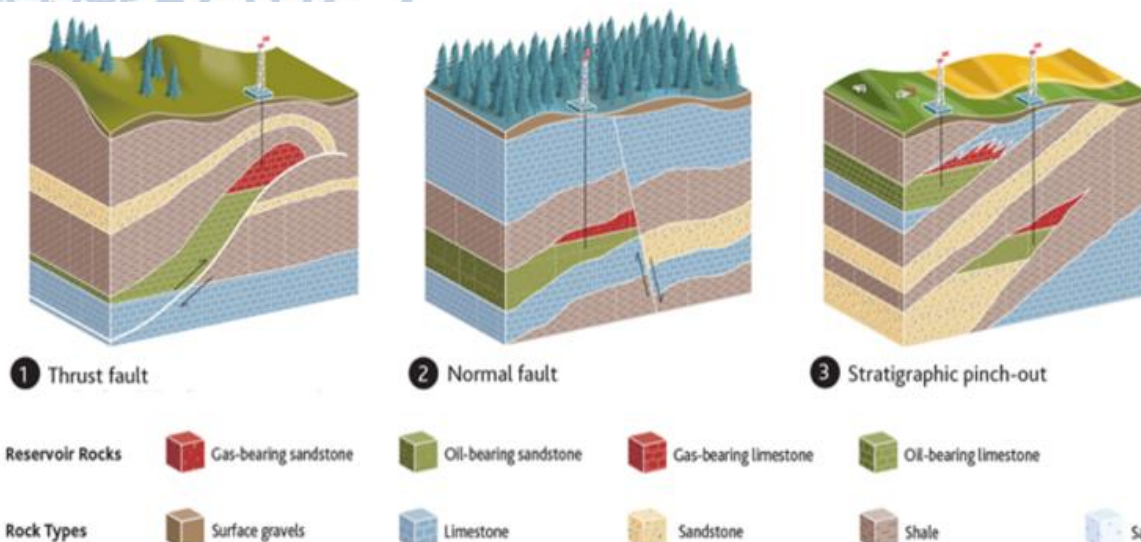
5.3.4. Δομή παγίδευσης

Οι παγίδες των υδρογονανθράκων (hydrocarbon traps) είναι ένας γεωμετρικός συνδυασμός ενός διαπερατού (reservoir) και ενός αδιαπέρατου πετρώματος (seal or cap-rock) τα οποία όταν συνδυάζονται με κατάλληλες φυσικές και χημικές ιδιότητες των υπεδάφιων ρευστών, επιτρέπουν στους υδρογονάνθρακες να συσσωρεύονται δημιουργώντας κοίτασμα.

Οι παγίδες ταξινομούνται με βάση την γεωμετρία τους, τη σύνθεση τους και των τρόπου που δημιουργήθηκαν σε τρεις κατηγορίες.

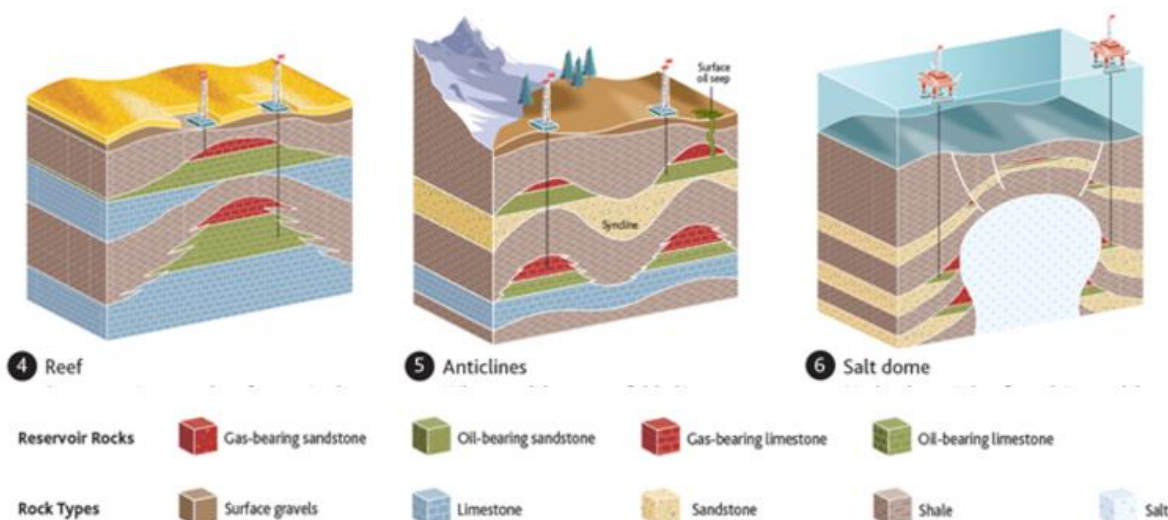
1. Τεκτονικές παγίδες (straturl traps) (Εικόνα 29 σχήμα 1 και 2 και Εικόνα 30 σχήμα 5 και 6), προέρχονται από τεκτονική δράση, διαπυρικές και βαρυτικές διαδικασίες. Χαρακτηριστικές τεκτονικές παγίδες είναι τα αντίκλινα, οι δόμοι άλατος και οι παγίδες ρηγμάτων (fault traps).
2. Στρωματογραφικές παγίδες (Εικόνα 29 σχήμα 3 και Εικόνα 30 σχήμα 4), σχηματίστηκαν από την πρωτογενή αποθετική μορφολογία ή από μεταγενέστερες διαγενετικές επιδράσεις. Αυτή η κατηγορία παγίδων περιλαμβάνει τους υφάλους (reefs), τις παγίδες ασυμφωνιών (unconformity traps) και τις παγίδες αποσφήνωσης (pinch-out traps).
3. Συνδυασμός των δύο πιο πάνω κατηγοριών

Η σπουδαιότερη και σημαντικότερη παράμετρος των παγίδων είναι ότι, δεν φτάνει μόνο να υπάρχει μια ιδανικής γεωμετρίας μονωτήρια παγίδα για την ύπαρξη μιας παγίδας υδρογονανθράκων, αλλά η ανάπτυξή της θα πρέπει να συμβεί σύγχρονα η πριν την μετανάστευση των υδρογονανθράκων από το μητρικό πέτρωμα. Έτσι η κατανόηση της ιστορίας ανάπτυξης των ανεξάρτητων παγίδων, μαζί με την ιστορία ταφής και θέρμανσης της λεκάνης, είναι βασική για την ανάπτυξη πιθανών πεδίων υδρογονανθράκων.



Εικόνα 29: Απεικονίζονται τεκτονικές παγίδες υδρογονανθράκων από την δράση ρηγμάτων (αριστερό και μεσαίο σχήμα) καθώς και στρωματογραφική παγίδα τύπου αποσφήνωσης (δεξί σχήμα). Οι ταμειευτήρες των παγίδων μπορεί να είναι είτε ανθρακικοί είτε κλαστικοί

(<http://www.history.alberta.ca/energyheritage/gas/premodern-global-history/location-of-natural-gas/default.aspx>)



Εικόνα 30: Απεικονίζεται μια στρωματογραφική παγίδα υδρογονανθράκων με την δημιουργία ενός ανθρακικού υφάλου (αριστερό σχήμα) καθώς και τεκτονικές παγίδες με την δημιουργία αντικλίνων και από την δράση ενός δόμου άλατος (μεσαίο και δεξί σχήμα)

(<http://www.history.alberta.ca/energyheritage/gas/premodern-global-history/location-of-natural-gas/default.aspx>)

6. Εφαρμογές στην Λεκάνη της Λεβαντίνης κοιτάσματα υδρογονανθράκων και προοπτικές

6.1. Εισαγωγή

Η παλαιογεωγραφική και τεκτονική εξέλιξη της λεκάνης Λεβαντίνης από την εποχή του Μεσοζωικού μέχρι σήμερα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της κατανομής των μητρικών πετρωμάτων και των ταμειυτήρων σε αυτήν. Προέκταση της γεωδυναμικής εξέλιξης είναι και η δημιουργία ενός μεγάλου αριθμού στρωματογραφικών και τεκτονικών παγίδων που αποθηκεύουν, σε διάφορα στρωματογραφικά επίπεδα, αρκετά γιγάντια πεδία υδρογονανθράκων.

Το γεγονός πως η λεκάνη Λεβαντίνη έχει πληρωθεί από μεγάλο πάχος ιζημάτων από το Τριαδικό μέχρι σήμερα και έχει βρεθεί σε συνθήκες παθητικού περιθωρίου για πάνω από 100 εκατομμύρια χρόνια έχουν δημιουργήσει ένα ευνοϊκό καθεστώς για την παραγωγή και παγίδευση υδρογονανθράκων.

Οι πρόσφατες ανακαλύψεις κοιτασμάτων φυσικού αερίου (Εικόνα 31) στην αποκλειστική οικονομική ζώνη του Ισραήλ (κοιτάσματα Λεβιάθαν, Νταλί και Ταμάρ) και της Κύπρου (κοίτασμα Αφροδίτη) αλλά και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από σεισμικές έρευνες που διεξήχθησαν στην περιοχή κατέδειξαν πολυάριθμες θέσεις όπου είναι πιθανών να υπάρχουν κοιτάσματα υδρογονανθράκων.



Εικόνα 31: Τοπογραφικός χάρτης της ανατολικής Μεσογείου στον οποίο αποτυπώνονται τα πρόσφατα ανακαλυφθέντα κοιτάσματα υδρογονανθράκων σε Κύπρο και Ισραήλ.

(<http://greece.greekreporter.com/2015/06/08/cyprus-gas-field-declared-commercially-viable-by-joint-venture-researching-the-area/>)

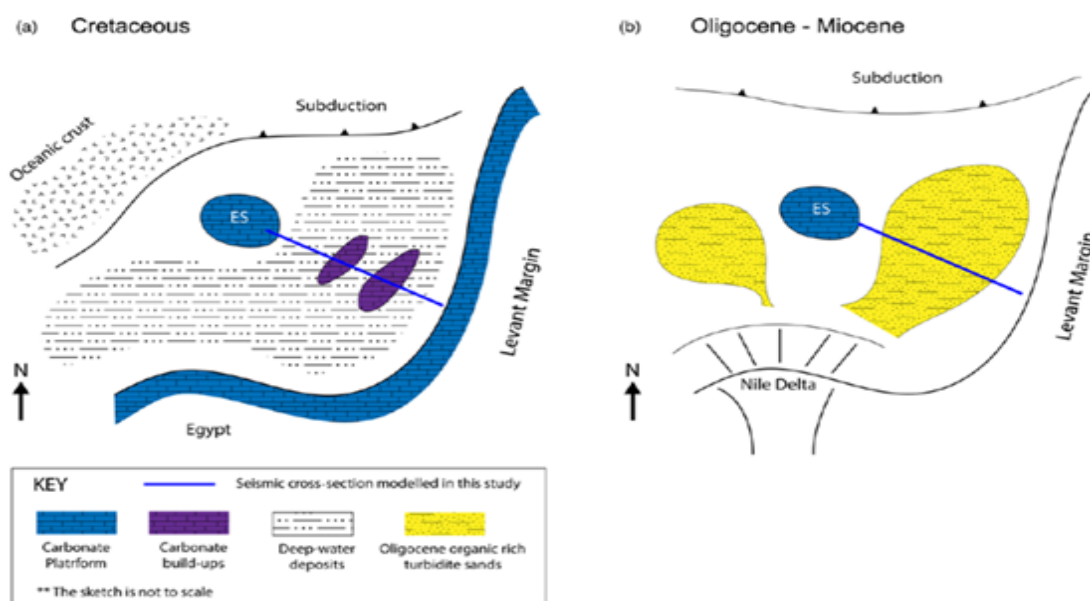
6.2. Ανάπτυξη πετρελαϊκών συστημάτων και πιθανές θέσεις υδρογονανθράκων

Τα πεδία υδρογονανθράκων τα οποία έχουν ανακαλυφθεί στα περιθώρια της λεκάνης υποδεικνύουν την ανάπτυξη βιογενούς αλλά και θερμογενούς συστήματος υδρογονανθράκων. Συνεπώς, για να αποδοθούν τα πετρελαϊκά συστήματα της λεκάνης είναι απαραίτητο να καθοριστούν, τα μητρικά πετρώματα, τα πετρώματα ταμιευτήρες και τα πετρώματα καλύμματα.

6.2.1. Μητρικά πετρώματα

Βασική προϋπόθεση ώστε να δημιουργηθεί ένα κοίτασμα υδρογονανθράκων είναι η ύπαρξη και ο βαθμός ωρίμανσης ενός μητρικού πετρώματος. Με βάση τα ανακαλυφθέντα κοιτάσματα στην λεκάνη προκύπτει ότι τα μητρικά πετρώματα ανήκουν είτε σε θερμογενές είτε σε βιογενές σύστημα υδρογονανθράκων.

Ένας σχηματικός χάρτης παλαιοφάσεων που αντιπροσωπεύει ένα εννοιολογικό πρότυπο για την κατανομή των φάσεων στην λεκάνη της Ανατολικής Μεσογείου κατά τη διάρκεια του Κρητιδικού και του Ολιγοκαίνου - Μειοκαίνου παρουσιάζεται στην εικόνα 32. Κατά τη διάρκεια του Κρητιδικού, στο περιθώριο της λεκάνης κυριαρχούσαν οι ανθρακικές πλατφόρμες. Κατά τη διάρκεια του Ολιγοκαίνου-Μειοκαίνου, όμως, ένα βαθιάς θάλασσας τουρβυδικό σύστημα απέθεσε υψηλής ποιότητας ταμιευτήρες άμμων και βιογενή μητρικά πετρώματα.



Εικόνα 32: Χάρτης κατανομής παλαιοφάσεων μετά την διαρριξηγενή τεκτονική στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου. (α) Παθητικό περιθώριο το οποίο κυριαρχείται από ανθρακική ιζηματογένεση κατά το Κρητιδικό. (β) Περιθώριο το οποίο κυριαρχείται από την απόθεση κλαστικών Ολιγοκαινικής – Μειοκαινικής ηλικίας.

(Al-Balushi et al., 2016)

Τα μητρικά πετρώματα του Ολιγοκαίνου και του Νεογενούς βρίσκονται διάσπαρτα στην λεκάνη και περιείχαν μεγάλη ποσότητα χερσαίας φυτικής οργανικής ύλης. Αυτή η οργανική ύλη προέρχεται από την πεδιάδα του Δέλτα του Νείλου, όταν η βόρεια Αφρική βιώνει ένα πιο υγρό κλίμα και μεταφέρθηκε σε περιοχές της Ανατολικής Μεσογείου με βαθιά νερά μέσω των τουρβυδικών καναλιών (Villinski 2013) .

Οι Πλειοκαινικοί σχιστόλιθοι που βρίσκονται στην λεκάνη Λεβαντίνη αποτελούν μητρικά πετρώματα ξηρού βιογενούς αερίου το οποίο βρίσκεται μέσα σε βαθιάς θάλασσας ψαμμίτες στο Δέλτα του Νείλου και στη νοτιοανατολική Μεσόγειο. Τα ιζήματα αυτά προήλθαν από φαράγγια που αποστράγγιζαν τις παράκτιες περιοχές (Maddox, 2000). Μέχρι σήμερα περισσότερα από 1.0-2.0 τρισεκατομμύρια κυβικά πόδια (TCF) αερίου έχουν αποδειχθεί στη λεκάνη της νότιας Λεβαντίνης σε αυτά τα συστήματα βιογενούς αερίου.

Πέρα όμως από τα Πλειοκαινικής ηλικίας μητρικά πετρώματα στην λεκάνη υπάρχουν σε βαθύτερα τμήματα μητρικά πετρώματα Μεσοζωικής ηλικίας. Τα πετρελαιοφόρα μητρικά πετρώματα εντοπίζονται στο Άνω Κρητιδικό (Καινομάνιο, Τουρόνιο, Σενόνιο – Lipson - Benitah, 1988, Tannenbaum and Lewan, 2003). Αντιθέτως από τα μητρικά πετρώματα Τριαδικής - Ιουρασικής ηλικίας μπορούν να παραχθεί φυσικό αέριο (Nader and Swennen, 2004).

Ενδείξεις για την ύπαρξη ενός μεσοζωικού συστήματος υδρογονανθράκων έχουν βρεθεί στο Λίβανο. Σενόνιας ηλικίας υδρογονάνθρακες (άσφαλτος) έχουν καταγραφεί σε ανθρακικά, που είναι πλούσια σε οργανικό υλικό και πιστεύεται ότι έχουν αποτεθεί σε μια ανοδική λεκάνη. Οι υδρογονάνθρακες αυτοί που βρίσκονται στην ξηρά και δεν είναι ώριμοι, πιθανώς λόγω του μικρού βάθους ταφής (Nader and Swennen, 2004). Εμφανίσεις υδρογονανθράκων έχουν επίσης αναφερθεί σε Καινομάνιας ηλικίας πετρώματα (γεώτρηση El Qaa) και σε Κιμμερίδιας ηλικίας (γεώτρηση Terbol-1 όπου ο ολικός οργανικός άνθρακας Total Organic Carbon ήταν 10%). Υπεράκτια και οι δύο αυτές πηγές θα μπορούσαν να δημιουργήσουν υδρογονάνθρακες λόγω αυξημένης ωριμότητας.

Αυτή η δυνατότητα στηρίζεται στο γεγονός ότι η γεώτρηση Mango-1 στο νότιο τμήμα της λεκάνης Λεβαντίνης παράγει 10.000 βαρέλια πετρέλαιο / ημέρα (BOPD) από ψαμμίτη Κάτω Κρητιδικής ηλικίας. Δύο άλλα πηγάδια στην περιοχή παράγουν ελαφρύ πετρέλαιο σε επίπεδα 500 BOPD από μικρές σύνθετες δομές, δείχνοντας περαιτέρω στοιχεία για εξαιρετικό πετρελαϊκό δυναμικό σε πιο βαθιά τμήματα της λεκάνης. Άλλα πηγάδια σε αυτή την περιοχή παράγουν θερμογενές αέριο από Πλειο-Πλειστοκαινικά πετρώματα. Αυτό το αέριο πιστεύεται ότι σχετίζεται με βαθύτερες συσσωρεύσεις πετρελαίου (Feinstein et al., 1993, Horscroft and Peck, 2005), πιθανώς από το Μέσο Ιουρασικό.

6.2.2. Πετρώματα ταμιευτήρες

Οι πρόσφατες ανακαλύψεις Κάτω Μειοκαινικής ηλικίας αερίων στην λεκάνη (κοιτάσματα Ταμάρ, Λεβιάθαν και Αφροδίτης) έχουν αποκαλύψει ότι το τμήμα Ολιγόκαινο - Μειόκαινο αποτελείται από ποιοτικούς ταμιευτήρες άμμου βαθιών υδάτων (Skipple et al., 2012 Durham 2013). Αυτοί οι ψαμμίτες εμφανίζουν πλευρικά συνεχείς στρώσεις (laterally continuous sheets), εκφρασμένα σε σεισμικά δεδομένα ως πακέτα συνεχών και παράλληλων αντανάκλασεων, που εκτείνονται από την περιοχή του Νείλου μέχρι το Βόρειο Λίβανο (Roberts & Peace 2007, Steinberg et al., 2011). Η υψηλή πλευρική συνέχεια αυτών των ψαμμιτών σημαίνει ότι μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά ως στρώματα φορείς (effective carrier beds) που βοηθούν τη μετανάστευση υδρογονανθράκων σε παγίδες.

Οι ταμιευτήρες έχουν κατανεμηθεί σε τρία στρωματογραφικά διαστήματα τα οποία είναι:

- Πετρώματα ηλικίας Μέσο Ιουρασικό,
- Πετρώματα Κρητιδικής ηλικίας και
- Πετρώματα Καινοζωικής ηλικίας.

Ως κατάλληλοι Καινοζωική ταμιευτήρες θεωρούνται οι ψαμμίτες του Πλείο – Πλειστοκαινού, του ενδο – Μεσσηνίου, του Ολιγοκαίνου, του Ηωκαίνου και του Παλαιοκαίνου. Οι Κρητιδικοί ταμιευτήρες μπορεί να περιλαμβάνουν τόσο ψαμμίτες όσο και ασβεστόλιθους (συμπεριλαμβανομένων των ανθρακικών υφάλων). Οι Ιουρασικοί ταμιευτήρες αποτελούνται από ψαμμίτες και ασβεστόλιθους, συμπεριλαμβανομένων δολομιτών και οωλιθικών ασβεστόλιθων. Οι παλαιότεροι δυνητικοί ταμιευτήρες βρίσκονται σε Τριαδικά πετρώματα και είναι ψαμμίτες.

6.2.3. Πετρώματα καλύμματα

Το Μεσσηνιακό άλας θεωρείται ότι αποτελεί το πέτρωμα κάλυμμα για ολόκληρη την περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου, σχηματίζοντας ένα φράγμα μεταξύ των κυρίαρχων βιογενών, μετά – Μεσσηνιακών Πλειοκαινικών πετρελαϊκών συστημάτων και των κυρίαρχων θερμικών, προ-Μεσσηνιακών πετρελαϊκών συστημάτων στο Δέλτα του Νείλου. Παρόλο που το Μεσσηνιακό άλας είναι ένα πολύ αποτελεσματικό πέτρωμα κάλυμμα, έχει αποθεθεί πολύ πρόσφατα και ως εκ τούτου μπορεί να λειτουργήσει μόνο ως κάλυμμα για τους υδρογονάνθρακες που έχουν μεταναστεύσει στα τελευταία 5 εκατομμύρια χρόνια.

Για το προ-Μεσσηνιακό τμήμα της ιζηματογενούς στήλης της λεκάνης Λεβαντίνης, οι σχιστόλιθοι που αποτέθηκαν μπορεί να λειτουργήσουν αποτελεσματικά ως κάλυμμα όπως αυτοί έχουν συναντηθεί σε πολλές περιοχές της Μεσογείου. Ο Dolson et al. (2001) δήλωσε ότι η εκτεταμένη επίκληση (transgression) κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του Άνω Κρητιδικού παθητικού περιθωρίου οδήγησε στην απόθεση στην περιοχή των σχιστόλιθων που λειτούργησαν τόσο ως μητρικό πέτρωμα όσο και ως πέτρωμα κάλυμμα. Στο Ολιγόκαινο – Μειόκαινο, τα λεπτοστρωματόδη μητρικά

πετρώματα, που παρεμβάλλονται μέσα στους τουρβηδितικούς ψαμμίτες, υποθέτετε ότι δρουν και ως πέτρωμα κάλυμμα.

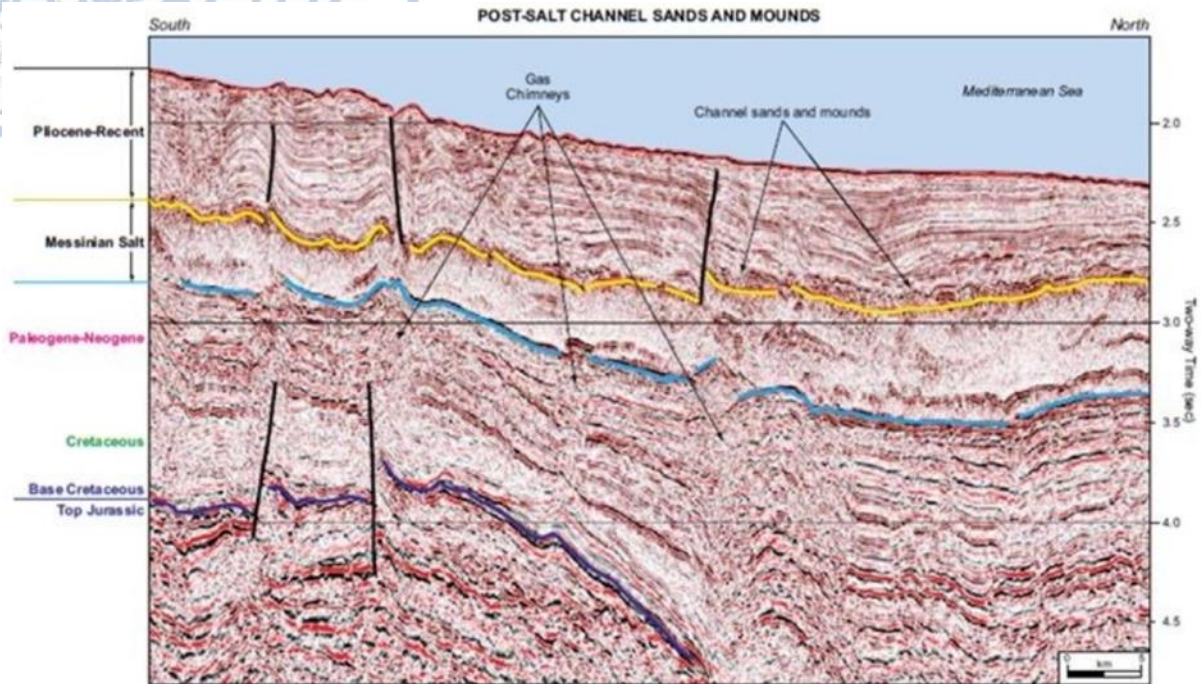
Γενικά ως πετρώματα καλύμματα για την λεκάνη Λεβαντίνη μπορούν να δράσουν οι μεσσηνιακοί εβαπορίτες, οι Παλαιογενείς, οι Νεογενείς και οι Κρητιδικοί άργιλοι και μάργες και τέλος η Τριαδική και η Ιουράσικοί εβαπορίτες. Οι μεταναστεύσεις οφείλονται σε ρήγματα που υπάρχουν στη λεκάνη. Οι παγίδες είναι στρωματογραφικές και δομικές, όπως είναι τα αντίκλινα και οι παγίδες αποσφήνωσης (pinch-out traps).

6.2.4 Πιθανές θέσεις υδρογονανθράκων

Με βάση τη μελέτη δορυφορικών δεδομένων διαπιστώθηκε η ύπαρξη μεγάλου αριθμού και ποικιλίας διαρροών στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου. Οι διαφυγές ρευστών στον πυθμένα σε συνδυασμό με τα σεισμικά δεδομένα ενισχύουν την πεποίθηση για την παρουσία ενός «βαθιού» λειτουργικού πετρελαϊκού συστήματος στην λεκάνη Λεβαντίνη.

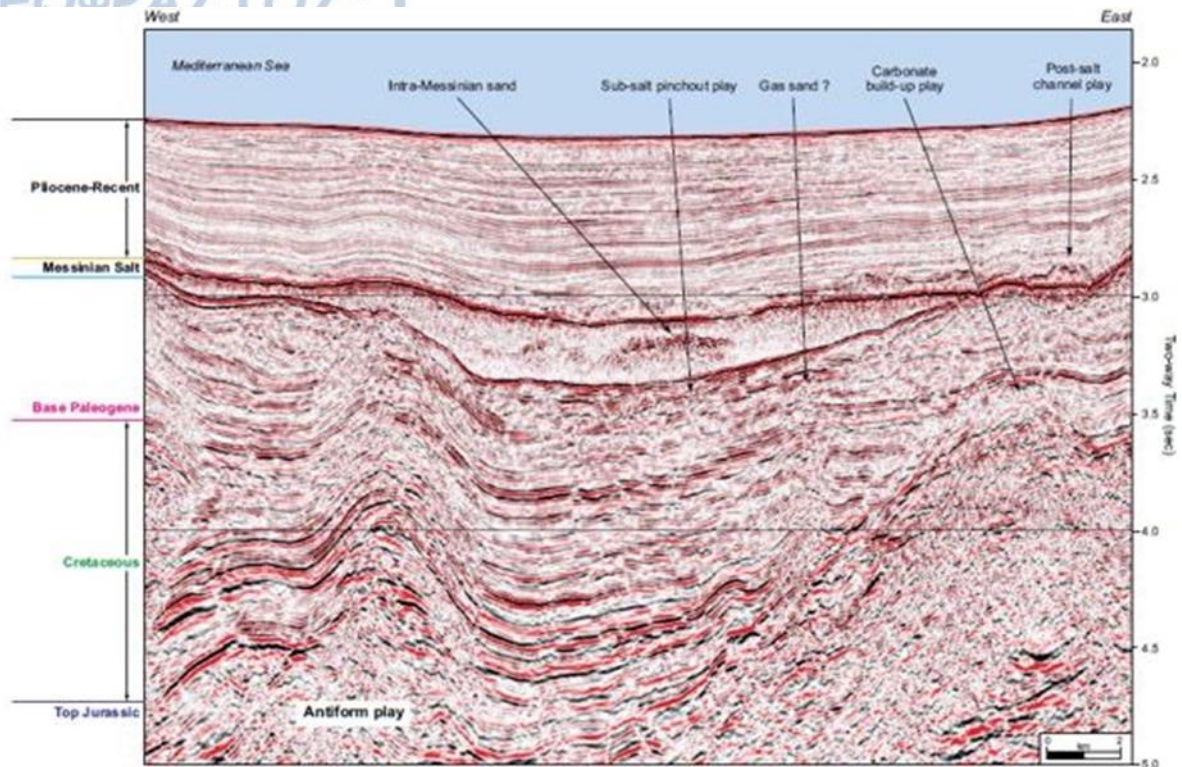
Συχνά οι διαρροές έχουν στενή συσχέτιση με τους άμεσους δείκτες υδρογονανθράκων (Direct Hydrocarbon Indicators - DHI), όπως τα φωτεινά σημεία (bright spots), οι επίπεδες κηλίδες (flat spots) και οι καμινάδες αερίων (gas chimneys) που παρατηρούνται στα σεισμικά δεδομένα. Ορισμένες από τις διαρροές σχετίζονται με σαφείς μεταναστευτικές οδούς μέσω βαθιών ρηγμάτων. Ένας μεγάλος αριθμός πιθανών θέσεων υδρογονανθράκων έχουν αναγνωριστεί στα σεισμικά δεδομένα.

Αρχίζοντας από τις νεότερες προς τις παλαιότερες θέσεις, κοιτάσματα υδρογονανθράκων είναι πιθανά να βρεθούν μέσα σε Πλειοκαινικά έως πρόσφατα κανάλια άμμων τα οποία αποτέθηκαν κοντές στις ακτές (Εικόνα 33). Τα κανάλια αυτά δεν είναι τόσο βαθιά ή εκτεταμένα όπως τα κανάλια στο Δέλτα του Νείλου τα οποία οφείλονται στην τεράστια εισροή δελταϊκών αποθέσεων. Οι πιθανοί ταμιευτήρες θα μπορούσαν να τροφοδοτούνται είτε από του κοντινούς Πλειοκαινικούς σχιστόλιθους, είτε από βαθύτερα επίπεδα αν απουσιάζει το Μεσσηνιακό αλάτι ή έχει ρηγματωθεί όπως φαίνεται στο νότιο τμήμα της Λεβαντινής λεκάνης (Feinstein et al., 1993, Horscroft and Peck, 2005) .



Εικόνα 33: Κανάλια άμμου Πλειοκαινικής ηλικίας με πιθανές καμινάδες αερίου. Πλάτος τομής περίπου 65χλμ.
(Roberts and Peace 2007)

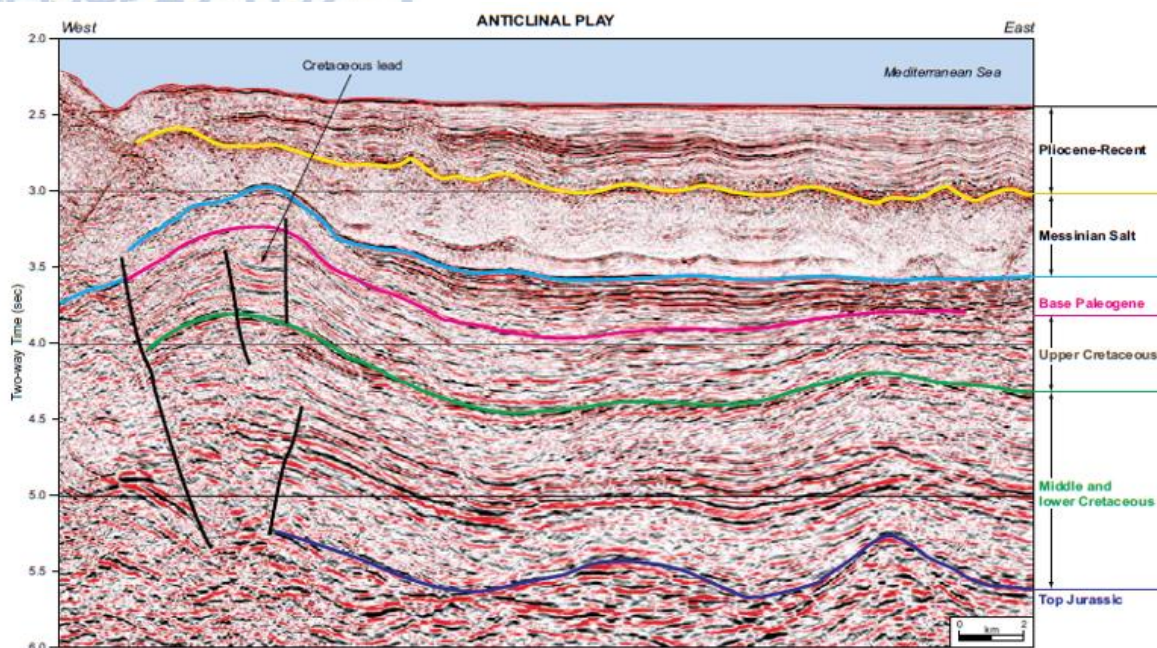
Η ιζηματογένεση στο Μεσσήνιο φαίνεται να ελέγχεται από την τοπογραφία της λεκάνης και είναι πιθανόν να έχουν αποτεθεί σώματα άμμου μέσα στο αλάτι. Μια ερμηνεία είναι ότι υπήρχε ένα παλαιό - περιβάλλον ρηχής θάλασσα ή **sabkha** με παρεμβολή κλαστικού υλικού στο σύστημα. Μια εναλλακτική ερμηνεία των γεγονότων μεγαλύτερου εύρους μέσα στους εβαπορίτες είναι επίσης δυνατή. Για παράδειγμα, θα μπορούσαν να οφείλονται σε εναλλασσόμενες διαδοχές διαφορετικών τύπων εβαποριτών όπως ο αλίτης (halite) και ο ανυδρίτης / γύψος ως αποτέλεσμα πολλών διαφορετικών επικλυσιογενών γεγονότων (Gradmann et al., 2005). Για αυτές τις θέσεις προϋπόθεση είναι να ρηγματωθεί το υποκείμενο αλάτι ώστε να επιτρέπεται η μετανάστευση πετρελαίου (Εικόνες 33 και 34).



Εικόνα 34: Θέσεις ταμιευτήρων εσωτερικά και κάτω από τους Μεσσηνιακούς εβαπορίτες. Πλάτος τομής περίπου 27 χλμ.
(Roberts and Peace 2007)

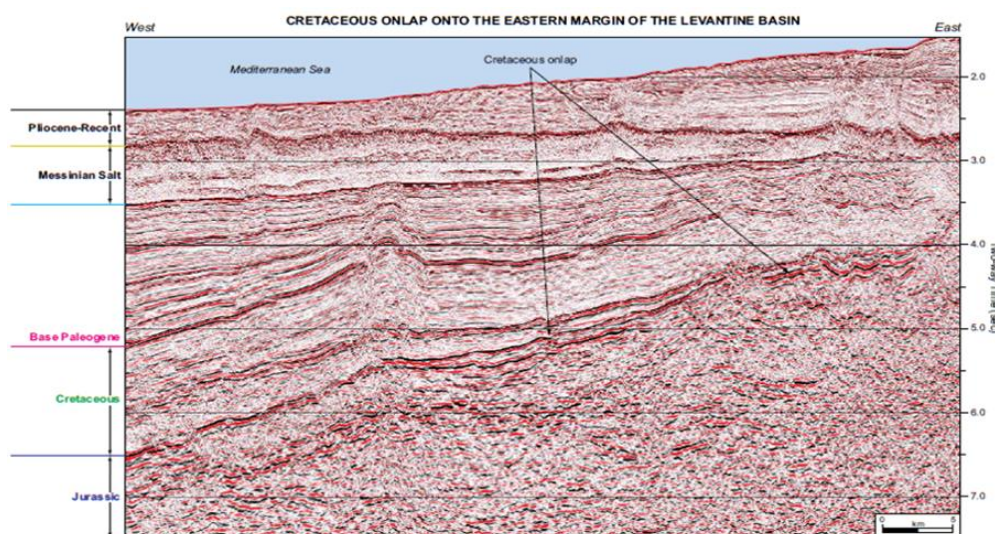
Πέρα από τις θέσεις εντός του Μεσσηνιακού εβαπορίτη, ευνοϊκές θέσεις για την ύπαρξη κοιτάσματος υδρογονανθράκων παρουσιάζονται αμέσως κάτω από τη βάση του. Το Μεσσηνιακό αλάτι παρέχει μια πρώτη τάξης σφράγιση για τους πιθανούς Μειοκαινικούς ταμιευτήρες. Σε πολλές περιπτώσεις, τα πετρώματα αυτά είναι ήπια πτυχωμένα, δημιουργώντας τετράγωνα πώματα κλεισίματος (four-way dip closures) είτε δομές αποσφηνώσεις (pinch-out) στην επαφή κάτω από την βάση του αλατιού (Εικόνα 34).

Σε βαθύτερα στρωματογραφικά τμήματα της λεκάνης πεδία υδρογονανθράκων πιθανός να βρίσκονται σε αντίκλινα και ρηγματωμένα αντίκλινα που έχουν ηλικία Μέσο Κρητιδικό μέχρι Παλαιογενές (Εικόνα 35). Στην περιοχή της λεκάνης, τα Κρητιδικά μέχρι τα Καινοζωικά πετρώματα φαίνονται να είναι πτυχωμένα ή ελαφρώς ρηγματωμένα. Η τεκτονική τάση είναι ΝΔ-ΒΑ και πιστεύεται ότι οφείλεται στην παραμόρφωση του Συριακού Τόξου και στην αναστροφή τοπικά της λεκάνης, η οποία παρατηρήθηκε σε διάφορες φάσεις από το Άνω Κρητιδικό (Τουρώνιο) έως το Ηώκαινο (Moustafa, 2002).



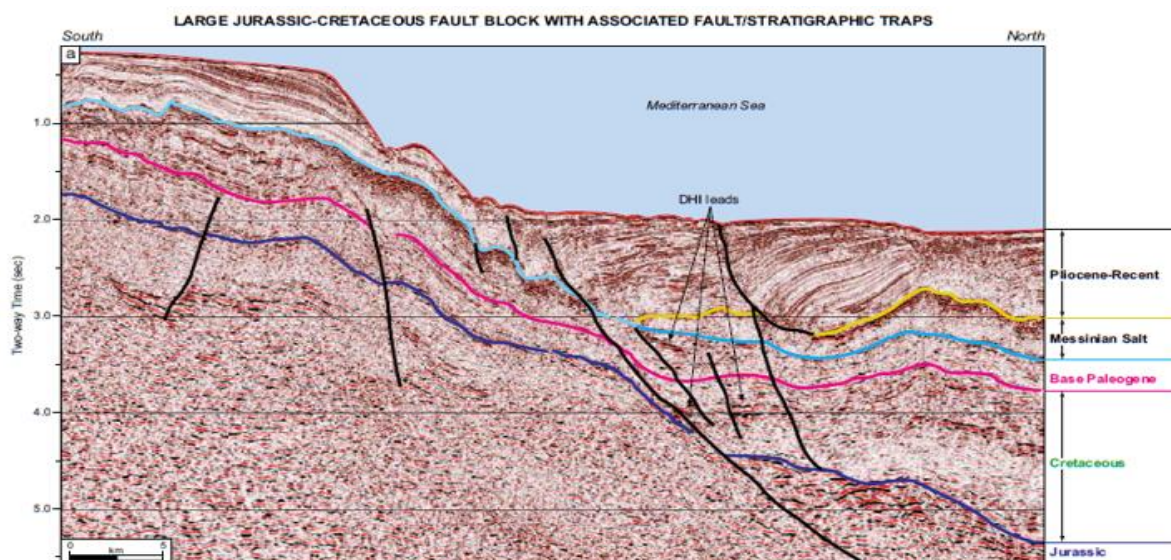
Εικόνα 35: Ένδειξη για ύπαρξη υδρογονανθράκων σε Κρητιδικό ρηγματωμένο αντίκλινο, που υποδεικνύεται από την αλλαγή του σεισμικού χαρακτήρα. Πλάτος τομής περίπου 30χλμ.
(Roberts and Peace 2007)

Άλλες πιθανές θέσεις όπου μπορούν να εντοπισθούν κοιτάσματα υδρογονανθράκων βρίσκονται στις αλληλοκαλυπτόμενες ακολουθίες (Onlapping sequences) ηλικίας από Κρητιδικό μέχρι Παλαιογενές. Αυτές οι αλληλοκαλυπτόμενες ακολουθίες παρουσιάζονται εκτεταμένες κατά μήκος του ανατολικού και δυτικού περιθωρίου της Λεβαντινής λεκάνης (όπως φαίνεται στις Εικόνα 36) καθώς επίσης και σε βαθύτερα σημεία πάνω από τις κορυφές του Ιουρασικού (Εικόνα 41). Κατά συνέπεια, θα μπορούσαν να βρεθούν πιθανοί ταμειυτήρες εάν υπάρχουν κατάλληλα πετρώματα καλύμματα πάνω και κάτω από αυτούς.

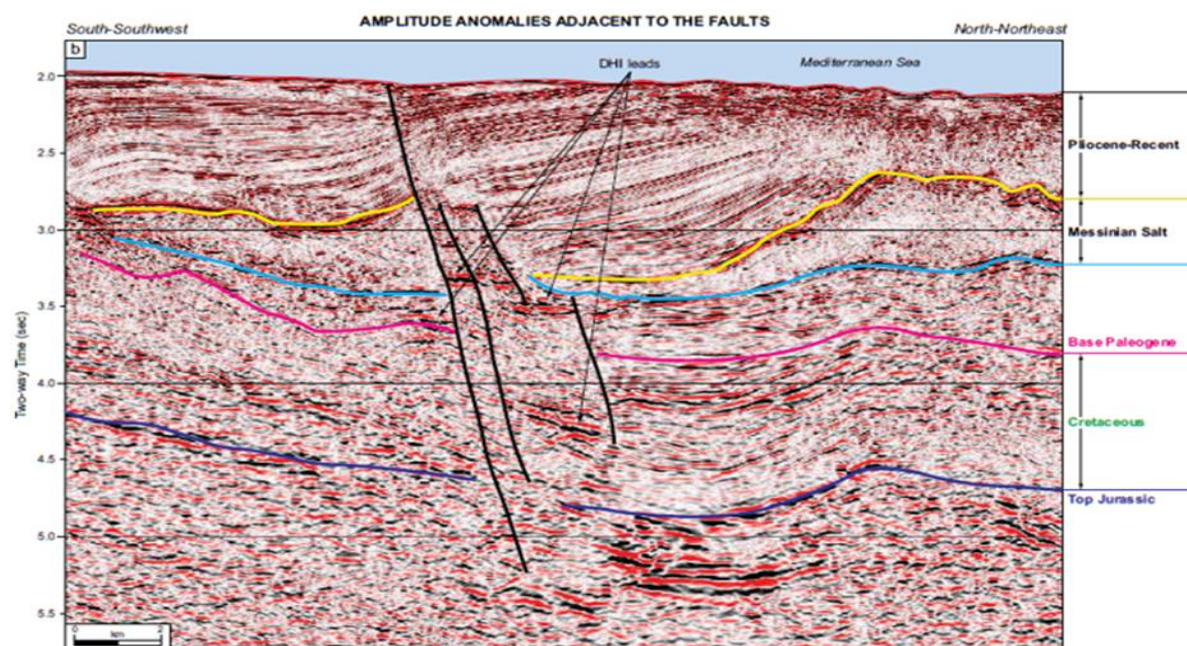


Εικόνα 36: Επικαλύψεις Κρητιδικής ηλικίας, ταμειυτήρας πάνω και κάτω από τον οποίο υπάρχει πέτρωμα κάλυμμα. Πλάτος τομής περίπου 60 χλμ.
(Roberts and Peace 2007)

Εκτός από τις αλληλοκαλυπτόμενες ακολουθίες από το Κρητιδικό έως το Παλαιογενές στην λεκάνη εντοπίζονται ρηγματωμένα μπλοκ με συνδυασμό δομικών (ρήγματα) και στρωματογραφικών παγίδων (Εικόνες 37 και 38). Στις εικόνες παρουσιάζεται μια συν τεκτονική (syn-rift) θέση στο ανατολικό περιθώριο της λεκάνης Λεβαντίνης. Οι δυνητικοί ταμειευτήρες άμμου εμφανίζουν φωτεινότερα πλάτη και είναι πρωταρχικοί υποψήφιοι για περαιτέρω γεωφυσική εξέταση.

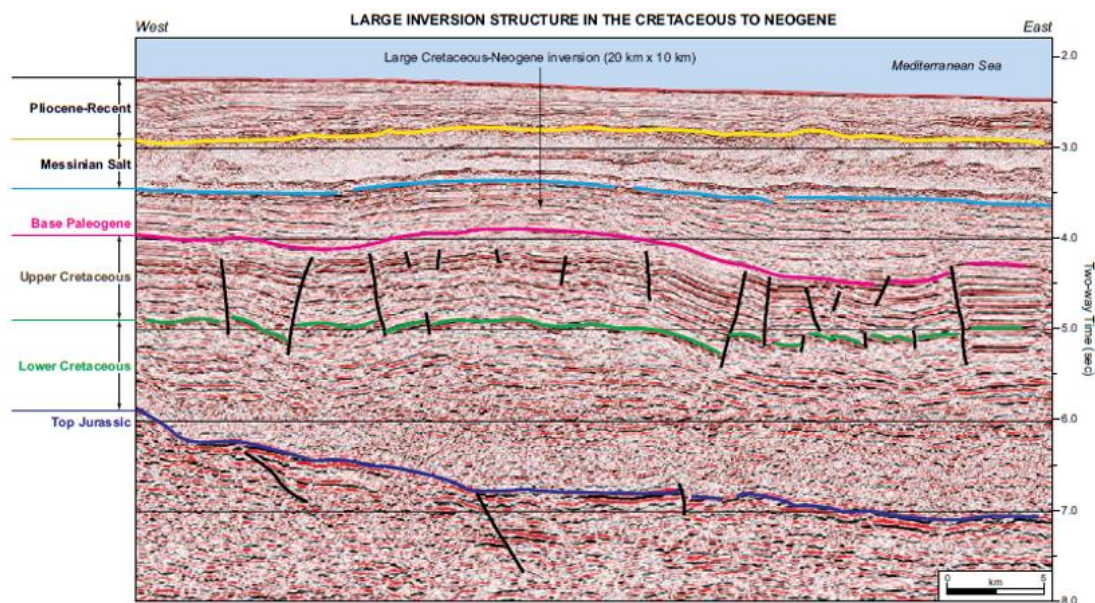


Εικόνα 37: Παγίδες από ρήγματα και συνδυασμός δομικών και στρωματογραφικών παγίδων κατά το Κρητιδικό μέχρι το Παλαιογενές. Η έντονη φωτεινότητα κοντά στα ρήγματα μπορεί να είναι άμεσοι δείκτες υδρογονανθράκων (DHI = Direct Hydrocarbons Indicators). Πλάτος τομής περίπου 53 χλμ.
(Roberts and Peace 2007)



Εικόνα 38: Παγίδες από ρήγματα και συνδυασμός δομικών και στρωματογραφικών παγίδων κατά το Κρητιδικό μέχρι το Παλαιογενές. Σε αυτή την εικόνα φαίνονται πιο καθαρά οι δείκτες υδρογονανθράκων (DHI). Πλάτος τομής περίπου 23 χλμ.
(Roberts and Peace 2007)

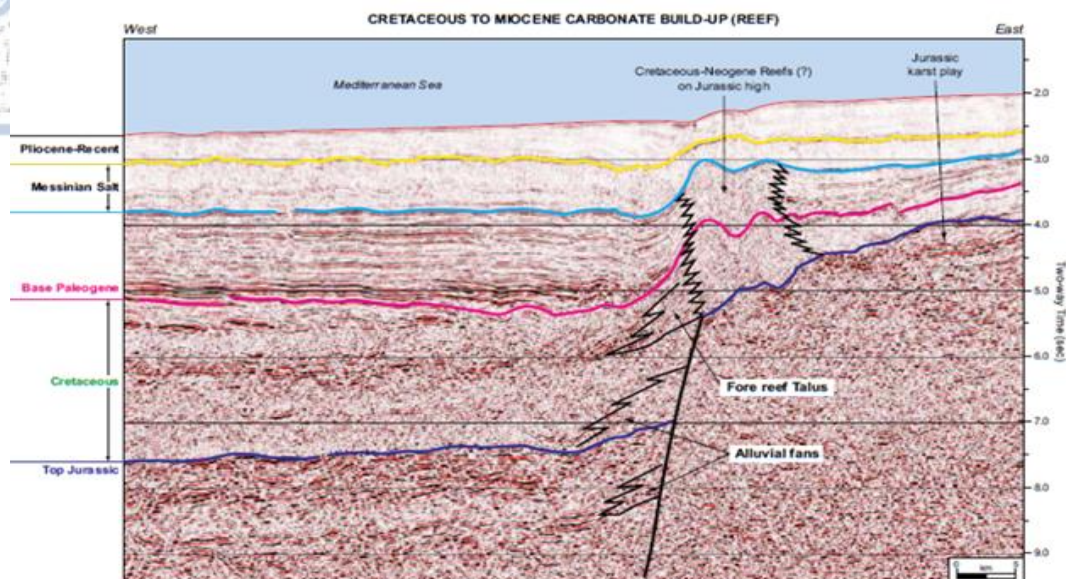
Αξιολογώντας σε μια μεγαλύτερη κλίμακα τα Κρητιδικά έως Παλαιογενή πετρώματα της λεκάνης προσδιορίζονται μεγάλες δομές αναστροφής (Εικόνα 39). Ουσιαστικά πρόκειται για μια μεγαλύτερη έκδοση της δομής που περιγράφεται στην εικόνα 35, οι δομές αυτές έχουν περίπου 10 χλμ. πλάτος και 20 - 30 χλμ. μήκος.



Εικόνα 39: Μεγάλη δομή αναστροφής στο Κρητιδικό – Νεογενές. Πλάτος τομής περίπου 45 χλμ.

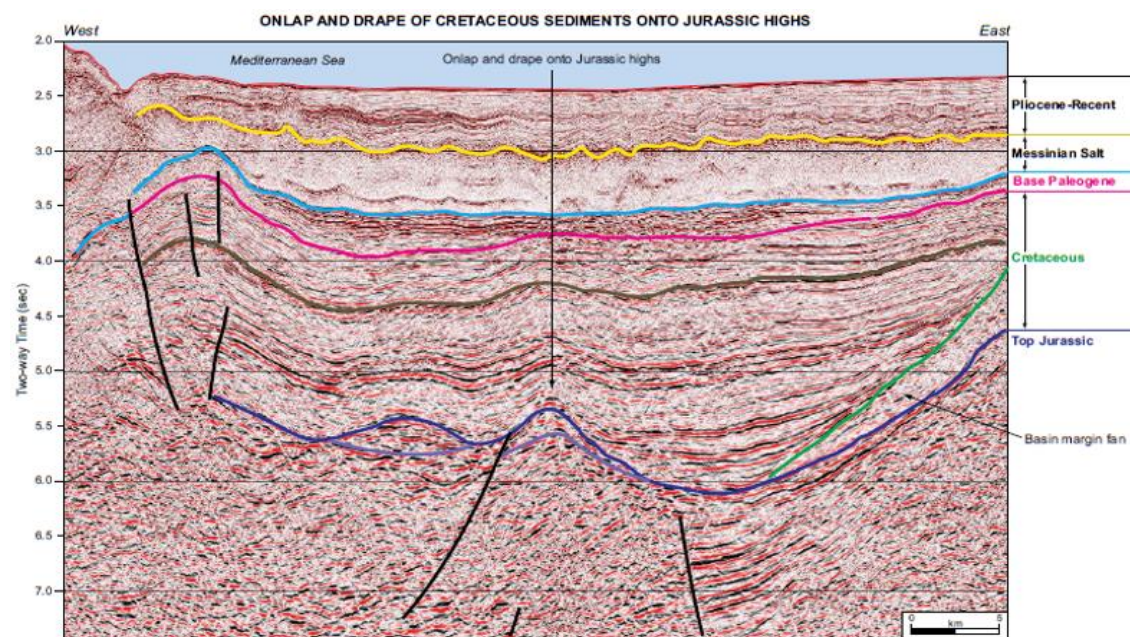
(Roberts and Peace 2007)

Κατά την περίοδο του Κρητιδικού μέχρι το Μειόκαινο συσσωρεύσεις ανθρακικών εμφανίζονται στο περιθώριο της πλατφόρμας σε αρκετές περιοχές, συμπεριλαμβανομένων των παρυφών ενός μεγάλου Ιουρασικού υψόματος στο νότιο τμήμα υπεράκτια του Λίβανου (Εικόνα 40). Είναι πιθανόν κάποιες από αυτές τις συσσωρεύσεις να προέρχονταν από υφάλους ρουδιστών (rudist reefs). Ύφαλοι ρουδιστών ηλικίας Άλβιου έως Τουρώνιου έχουν εντοπιστεί στην περιοχή Carmel (Bein, 1976) και αλλού στη Μεσόγειο (Philip, 1988). Η διάλυση των αραγωνιτηκών σκελετών και η δολομίτιωση μπορούν να παράγουν εκτεταμένο δευτερογενές πορώδες. Με τους ρουδιστές να εξαφανίζονται στο Τουρώνιο, το κτίσιμο της ανθρακικής ακολουθίας συνεχίζεται στο Παλαιογενές - Νεογενές από άλλους οργανισμούς, μέχρι την έναρξη της Μεσσηνιακής κρίσης αλατότητας.



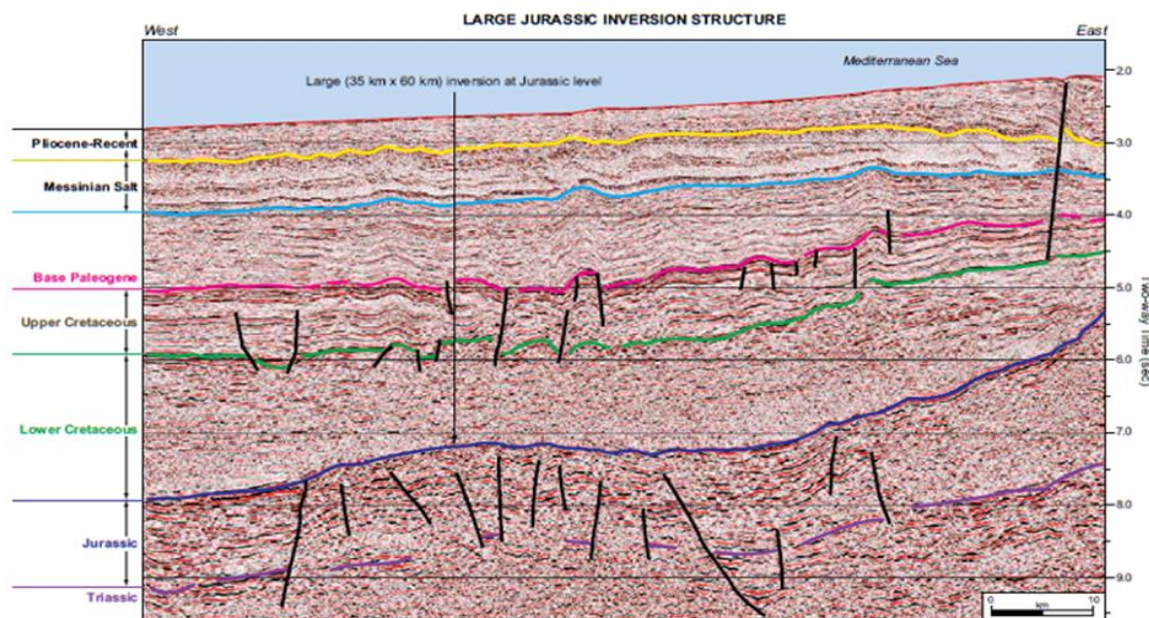
Εικόνα 40: Ανθρακικές συσσωρεύσεις Κρητιδικής – Μειόκαινικής ηλικίας πάνω από ύψωμα του Ιουρασικού στο νότιο υπεράκτιο τμήμα του Λίβανου. Ο ύφαλος βρίσκεται στο περιθώριο του υψώματος. Επίσης είναι πιθανό να υπάρχει καρστικοποιημένος ταμιευτήρας στα ανατολικά. Το πλάτος τομής είναι περίπου 75χλμ.
(Roberts and Peace 2007)

Πιθανές θέσεις όπου μπορούν να εντοπιστούν πεδία υδρογονανθράκων, βρίσκονται στα Κρητιδικά πετρώματα που αποτίθενται με γωνιώδη ασυμφωνία πάνω στο ρηγματωμένο έδαφος Ιουρασικής ηλικίας (Εικόνα 41). Οι δομικές ή στρωματογραφικές παγίδες που προκύπτουν βασίζονται στην ύπαρξη Κρητιδικού ταμιευτήρα και πετρώματος σφράγισης ενώ το μητρικό πέτρωμα από το οποίο θα προέρχονται οι υδρογονάνθρακες μπορεί να είναι είτε Ιουρασικής είτε Κρητιδικής ηλικίας.



Εικόνα 41: Απόθεση Κρητιδικού ιζήματος πάνω από Ιουρασικό ύψωμα. Επίσης σημειώνεται ακόμα μια πιθανή θέση ενός πεδίου στο ανατολικό περιθώριο της λεκάνης σε ένα ριπίδιο περιθωρίου. Πλάτος τομής περίπου 50 χλμ.
(Roberts and Peace 2007)

Θέσεις όπου μπορούν να φιλοξενηθούν υδρογονάνθρακες σε Ιουρασικής ηλικίας ιζημάτα προέκυψαν με την έκθεση τους στον αέρα και την διάβρωση την οποία υπέστησαν (Εικόνες 41 και 42). Αποτέλεσμα της έκθεσης αυτής ήταν να ενισχυθούν οι ιδιότητες των πετρωμάτων για αποθήκευση σχηματίζοντας talus και προσχωσιγενείς θέσεις. Οι υπερκείμενες κρητιδικές μάργες λειτουργούν ως σφραγίδα (πέτρωμα κάλυμμα) ενώ η τροφοδοσία του ταμιευτήρα μπορεί να προκύψει είτε από τις υποκείμενες Ιουρασικές, είτε από τις δομικά βαθύτερες Κρητιδικές ακολουθίες.

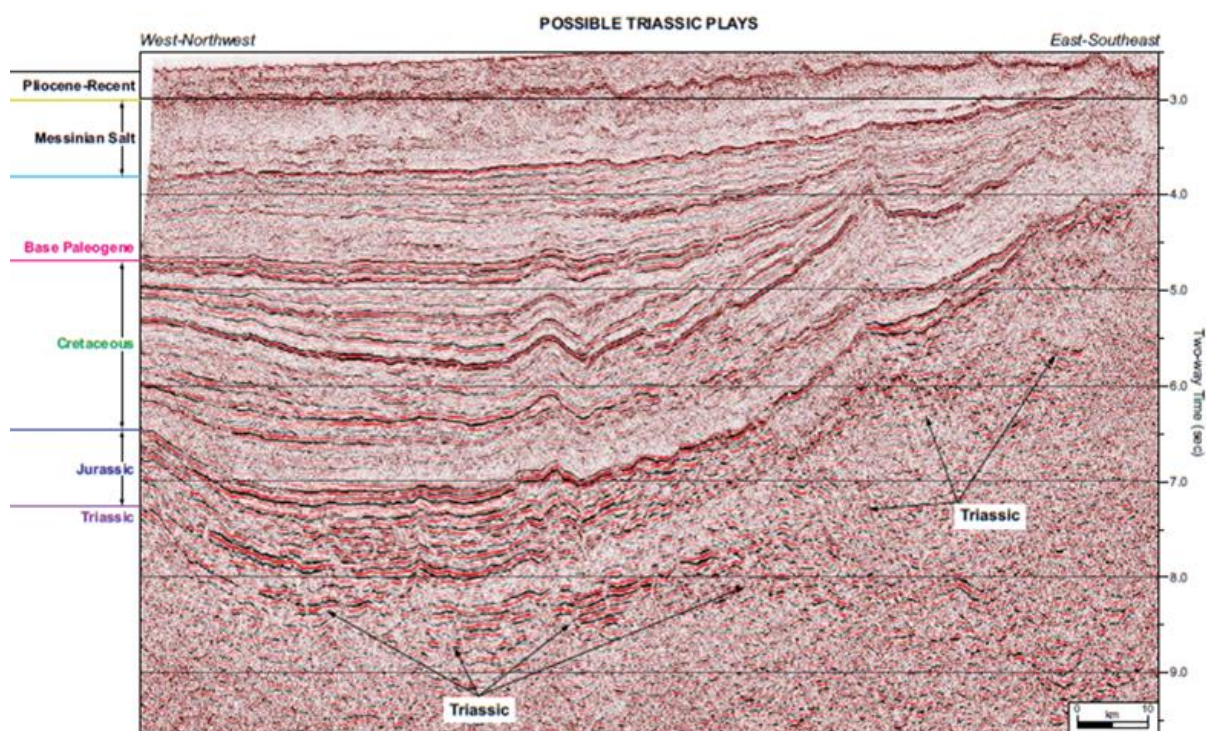


Εικόνα 42: Μεγάλη αναστροφή (35 χλμ. × 60 χλμ.) Ιουρασικής ηλικίας. Το πλάτος της τομής είναι περίπου 95χλμ.
(Roberts and Peace 2007)

Περαιτέρω θέσεις στο Ιουρασικό τμήμα της στρωματογραφικής στήλης της λεκάνης στην οποία είναι πιθανόν να υπάρχουν κοιτάσματα υδρογονανθράκων, αποτελούν οι ανθρακικές συσσωρεύσεις πάνω σε υψώματα (Εικόνα 34). Τέτοια πεδία βασίζονται στην παρουσία προ-Ιουρασικών ή Κάτω Ιουρασικών υψωμάτων στα οποία χτίστηκαν οι ανθρακικοί ύφαλοι.

Παράλληλα με το χτίσιμο των ανθρακικών δομών, διαπιστώνεται αλλαγές στον σεισμικό χαρακτήρα στις κορυφές των Ιουρασικών υψωμάτων (Jurassic highs). Η αλλαγή αυτή υποδεικνύει πιθανή έντονη καρστικοποίηση (Εικόνα 40), με τον ταμιευτήρα να μονώνεται από υπερκείμενους Κάτω κρητιδικούς πηλόλιθους (Bremner, 2006).

Τέλος, τα παλαιότερα κοιτάσματα που μπορούν να ανακαλυφθούν βρίσκονται σε Τριαδικής ηλικίας θέσεις. Τέτοιες θέσεις είναι συχνές στο χερσαίο τμήμα της Συρίας αλλά θα μπορούσαν να εντοπιστούν και κατά μήκος του ηπειρωτικού περιθωρίου (Εικόνα 43). Στο βαθύ τμήμα της λεκάνης, προκύπτουν στοιχεία ενός ρηγματωμένου προ-Ιουρασικού εδάφους, το οποίο θα μπορούσε να σχετίζεται με το πρώιμο άνοιγμα της λεκάνης της ανατολικής Μεσογείου στη διάρκεια του Τριαδικού. Ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες αυτών των πεδίων είναι το βάθος ταφής και η πιθανότητα υπερ - ωρίμανσης στα βαθύτερα τμήματα της λεκάνης.



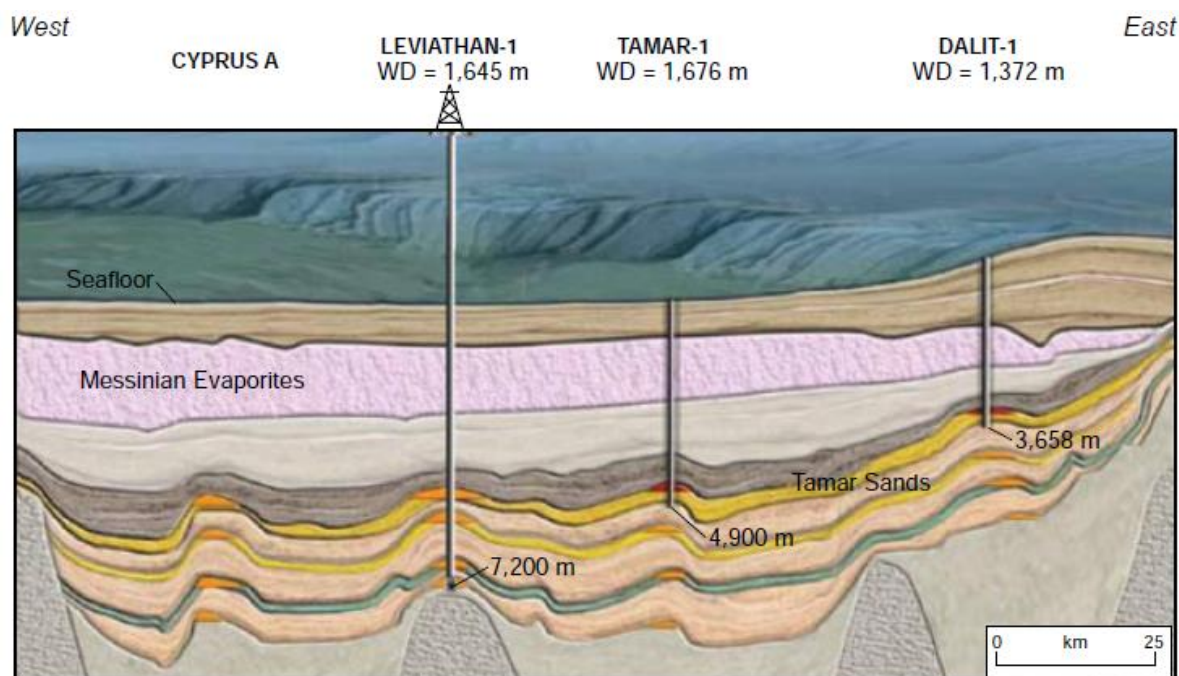
Εικόνα 43: Πιθανά πεδία υδρογονανθράκων Τριαδικής ηλικίας, αυτά που βρίσκονται σε πιο ρηχές θέσεις θα μπορούσαν να διατηρηθούν, Η τομή έχει πλάτος περίπου 140 χλμ.

(Roberts and Peace 2007)

6.3. Πρόσφατα ανακαλυφθέντα κοιτάσματα

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας τα τελευταία 20 χρόνια έπαιξε καθοριστικό παράγοντα ώστε η εξερεύνηση και εκμετάλλευση υδρογονανθράκων να προχωρήσει σε περιοχές που μέχρι πριν κάποια χρόνια φάνταζε απίθανο. Ο προσδιορισμός δομών κάτω από το μεγάλου πάχους εβαποριτικό στρώμα αλλά και η πρόοδος στην διάνοιξη υπεράκτιων γεωτρήσεων σε μεγάλα βάθη, κατέστησαν εφικτή την έρευνα υδρογονανθράκων στην Ανατολική Μεσόγειο.

Η αναθέρμανση της έρευνα στην λεκάνη Λεβαντίνη είχε ως αποτέλεσμα την ανακάλυψη αρκετών πεδίων φυσικού αερίου στην αποκλειστική οικονομική ζώνη του Ισραήλ, εκ των οποίων τα κυριότερα είναι τα πεδία Ταμάρ και Λεβιάθαν. Πέρα από το Ισραήλ σημαντική ανακάλυψη έγινε και στην αποκλειστική οικονομική ζώνη της Κύπρου με το κοίτασμα Αφροδίτη στο οικόπεδο 12 (Εικόνα 44).

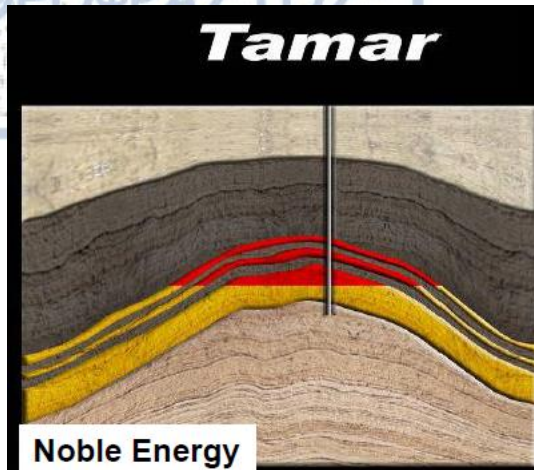


Εικόνα 44: Πρόσφατα ανακαλυφθέντα κοιτάσματα υδρογονανθράκων στην λεκάνη Λεβαντίνη. Στο σχήμα παρουσιάζεται το βάθος νερού και το συνολικό βάθος που έφθασε η κάθε γεώτρηση.

(Bowman 2011)

6.3.1. Κοίτασμα Ταμάρ

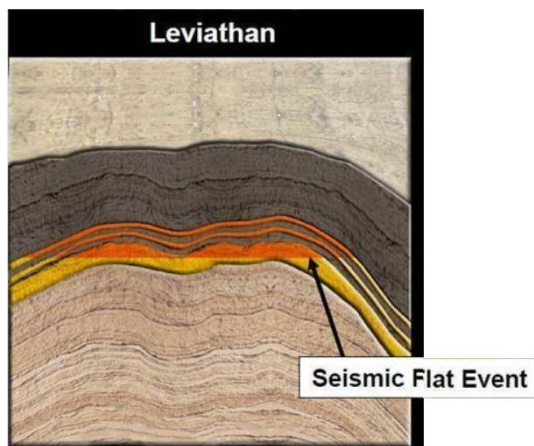
Το κοιτάσμα Ταμάρ ανακαλύφθηκε το 2009 στην αποκλειστική οικονομική ζώνη του Ισραήλ. Η υδάτινη στήλη της λεκάνης στην θέση του κοιτάσματος είναι 1676 μέτρα ενώ το συνολικό βάθος γεώτρησης φτάνει τα 4900 μέτρα. Η έκταση του είναι 97 τετρ. χλμ. και το μέγεθος του εκτιμάται στα 8.4 τρισ. κυβικά πόδια. Πρόκειται για ένα κοιτάσμα βιογενούς αερίου το οποίο βρίσκεται σε μια αντικλινική δομή παγίδευσης, κάτω από το εβαπορητικό στρώμα του Μεσσηνίου. Μέσα από τα τρισδιάστατα σεισμικά, η δομή παγίδευσης παρουσιάζεται έντονα τεκτονισμένη από την δράση κανονικών ρηγμάτων (Εικόνα 45). Ο ταμιευτήρας του κοιτάσματος είναι ένας Κάτω Μειοκαινικής ηλικίας ψαμμίτης ενώ ως πέτρωμα κάλυμμα ορίζεται ο υπερκείμενος σχιστόλιθος Μέσο Μειοκαινικής ηλικίας. Το κοιτάσμα Ταμάρ ανακαλύφθηκε από την εταιρία Noble Energy και αποτέλεσε την μεγαλύτερη ανακάλυψη φυσικού αερίου για το 2009.



Εικόνα 45: Αντικλινική δομή του κοιτάσματος Ταμάρ (αριστερά) και αποτύπωση του έντονου τεμαχισμού του από την δράση κανονικών ρηγμάτων από 3D σεισμικά (δεξιά) (Ben-Gai and Druckman)

6.3.2. Κοίτασμα Λεβιάθαν

Το κοιτάσμα Λεβιάθαν ανακαλύφθηκε το 2010 στην αποκλειστική οικονομική ζώνη του Ισραήλ σε βάθος νερού 1645 μέτρων και συνολικό βάθος γεώτρησης τα 7200 μέτρα. Η έκταση του φτάνει τα 323 τετρ. χλμ. και τα απολήψιμα αποθέματα φυσικού αερίου υπολογίζονται σε 16 τρισ. κυβικά πόδια. Πρόκειται για ένα κοιτάσμα βιογενούς αερίου το οποίο βρίσκεται και αυτό σε μια αντικλινική δομή παγίδευσης κάτω από το εβαπορητικό στρώμα του Μεσσηνίου (Εικόνα 46). Ο ταμιευτήρας του κοιτάσματος είναι ένας Κάτω Μειοκαινικής ηλικίας ψαμμίτης ενώ ως πέτρωμα κάλυμμα ορίζεται ο υπερκείμενος σχιστόλιθος Κάτω Μειοκαινικής ηλικίας. Το κοιτάσμα Λεβιάθαν ανακαλύφθηκε από την εταιρία Noble Energy και αποτέλεσε την μεγαλύτερη ανακάλυψη φυσικού αερίου παγκοσμίως για την πρώτη δεκαετία τις νέας χιλιετίας.

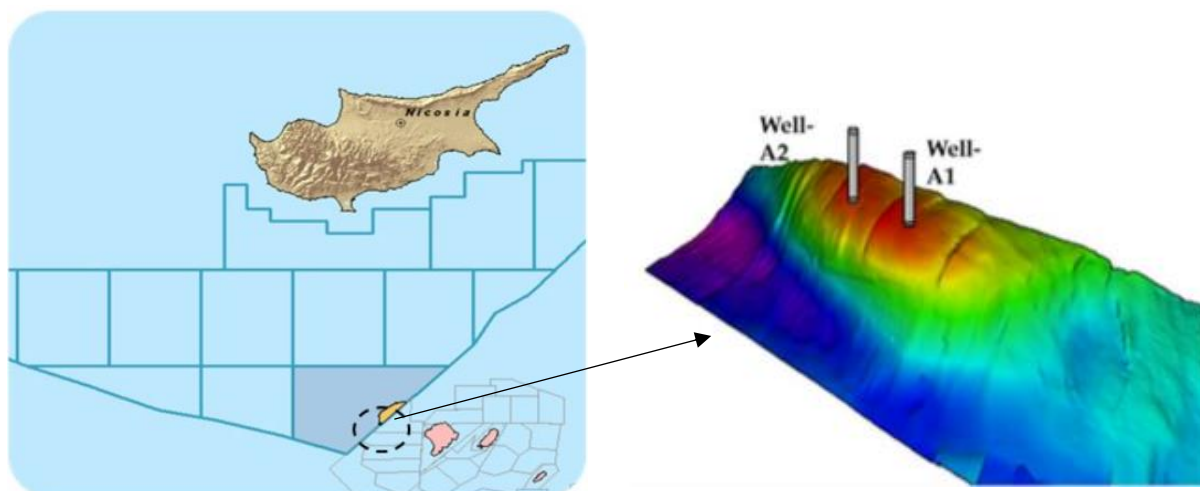


Εικόνα 46: Αντικλινική δομή παγίδευσης του κοιτάσματος Λεβιάθαν και επίπεδη ανάκλαση που προκύπτει από την διαφορά φάσης στον σεισμικό χαρακτήρα στην επαφή αερίου/νερού.

(<https://www.energy-pedia.com/news/israel/noble-energys-leviathan-gas-field-reserves-may-hit-21.1-tcf>)

6.3.3. Κοίτασμα Αφροδίτη

Το κοίτασμα Αφροδίτη ανακαλύφθηκε το 2012 στο τεμάχιο 12 στην αποκλειστική οικονομική ζώνη της Κύπρου από την εταιρία Noble Energy. Αρχικά τον Σεπτέμβριο του 2011 πραγματοποιήθηκε η πρώτη ερευνητική γεώτρηση η οποία έφτασε σε συνολικό βάθος 5860 μέτρων εκ των οποίων τα πρώτα 1688 μέτρα αποτελούσαν την υδάτινη στήλη της λεκάνης. Ακολούθως πραγματοποιήθηκε μια δεύτερη επιβεβαιωτική γεώτρηση η οποία έφτασε σε συνολικό βάθος τα 5950 μέτρα με τα πρώτα 1730 μέτρα να αποτελούν την υδάτινη στήλη. Μετά και την δεύτερη γεώτρηση η εταιρία ανακοίνωσε ότι έκταση του κοιτάσματος φτάνει τα 40 τετρ. χλμ. και η εκτιμώμενες ποσότητες φυσικού αερίου κυμαίνονται στα 5 τρισ. κυβικά πόδια. Πρόκειται για ένα βιογενές κοίτασμα το οποίο βρίσκεται μέσα σε μια αντικλινική δομή παγίδευσης κάτω από το εβαπορητικό στρώμα του Μεσσηνίου. Ο ταμιευτήρας του κοιτάσματος είναι ένας φαμμίτης Κάτω Μειοκαινικής ηλικίας του οποίου το καθαρό πάχος είναι περίπου 120 μέτρα. Οι σχιστόλιθοι που βρίσκονται πάνω από αυτόν τον φαμμίτη παρέχουν την κατάλληλη μόνωση ώστε το αέριο να μπορεί να συγκεντρωθεί σε μεγάλες ποσότητες.



Εικόνα 47: Αποκλειστική οικονομική ζώνη της Κύπρου με σκιασμένο το τεμάχιο 12 και κυκλωμένο το κοίτασμα Αφροδίτη (αριστερά), Τρισδιάστατη αποτύπωση του κοιτάσματος Αφροδίτη καθώς και οι θέσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκαν η ερευνητική και επιβεβαιωτική γεώτρηση (δεξιά)

(<http://slideplayer.com/slide/747835/> και http://www.kassinis-consulting.com/upload-files/2014%2004%2030_presentation_Summaxia%20Politwn.pdf)

Κεφάλαιο Έβδομο

7. Συμπεράσματα

Αξιολογώντας όχι μόνο την εξέλιξη της λεκάνης αλλά και σε μια μεγαλύτερη κλίμακα την γεωτεκτονική εξέλιξη της περιοχής διαπιστώνεται ότι κατά την διάρκεια του γεωλογικού χρόνου υπήρχαν οι κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη και λειτουργία θερμογενών και βιογενών συστημάτων.

Κατά τη διάρκεια του Φανεροζωικού η γεωδυναμική εξέλιξη της Παγγαίας και των ωκεανών της Νέο και Πάλαιο – Τηθύς ευνοούσε τη δημιουργία μεγάλων λεκανών ιζηματοπόθεσης. Η στερεοπαροχή στην Λεβαντίνη λεκάνη ήταν πολύ μεγάλη όπως αποτυπώνεται και στο πάχος της ιζηματογενούς της στήλης που σε κάποια σημεία φτάνει μέχρι και τα 14 χλμ.

Η ύπαρξη μεγάλων ποσοστών οργανικής ύλης μαζί με τα λεπτόκοκκα ιζήματα που αποτέθηκαν στην λεκάνη, μπορούν να δημιουργήσουν μητρικά πετρώματα όταν αυτά βρεθούν σε κατάλληλες θερμοκρασίες και βάθη. Επίσης τα κλαστικά (μεγάλης διαμέτρου κόκκων) και τα ανθρακικά πετρώματα είναι ικανά να λειτουργήσουν ως ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, ενώ υπερκείμενα λεπτόκοκκα ιζήματα αλλά και ο μεγάλου πάχους εβαπορίτης Μεσσήνιας ηλικίας μπορούν να λειτουργήσουν ως κάλυμμα.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ της ιζηματογένεσης και της τεκτονικής στην Λεβαντίνη ελεγχόταν τόσο από την ανάπτυξη της λεκάνης όσο και από τις παραμορφώσεις μετά την απόθεση, ευνοώντας τη δημιουργία μεγάλου αριθμού δομικών και στρωματογραφικών παγίδων. Ενώ η παρουσία ρηγμάτων λειτούργησε ως μεταναστευτική οδός για τους υδρογονάνθρακες ώστε να καταλήξουν σε δομές παγίδευσης.

Η ισχυροποίηση της άποψης για ύπαρξη συστημάτων υδρογονανθράκων προέρχεται από τις πρόσφατες ανακαλύψεις στην λεκάνη Λεβαντίνη (κοιτάσματα Ταμάρ, Λεβιάθαν, Αφροδίτη). Πέρα όμως από αυτές τις ανακαλύψεις η ανακάλυψη του τεράστιου κοιτάσματος Ζορ στον δελταϊκό κώνο του Νείλου επιβεβαιώνει ότι η Ανατολική Μεσόγειος αποτελεί μια περιοχή με τεράστιες προοπτικές.

Η διαπίστωση ότι οι τεράστιες ποσότητες ιζημάτων τις οποίες απέθεσε ο ποταμός Νείλος περιέχουν και μεγάλη ποσότητα οργανικής ύλης οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα προκύπτοντα μητρικά πετρώματα μπορούν να παράξουν τεράστιες ποσότητες υδρογονανθράκων και να τροφοδοτήσουν πολλές δομές παγίδευσης σε όλη την Ανατολική Μεσόγειο.

ΓΕΩΡΓΑΚΟΠΟΥΛΟΣ Α. : Κοιτασματολογία Πετρελαίου, Πανεπιστημιακές σημειώσεις

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Al-Balushi, A.N., Neumaier, M., Fraser, A.J. and Jackson, C.A., 2016. The impact of the Messinian salinity crisis on the petroleum system of the Eastern Mediterranean: a critical assessment using 2D petroleum system modelling. *Petroleum Geoscience*, 22(4), pp.357-379.

Ben-Gai, Y. and Druckman, Y., Mega-Scale Swells and Diapirs in the Deep Levant Basin, Eastern Mediterranean, and their Association with Recent World-Class Gas Discoveries.

Berra, F. and Angiolini, L., 2014. The evolution of the Tethys region throughout the Phanerozoic: A brief tectonic reconstruction.

Bowman, S.A., 2011. Regional seismic interpretation of the hydrocarbon prospectivity of offshore Syria. *GeoArabia*, 16(3), pp.95-124.

Cavazza, W. and Wezel, F.C., 2003. The Mediterranean region-a geological primer. *Episodes*, 26(3), pp.160-168.

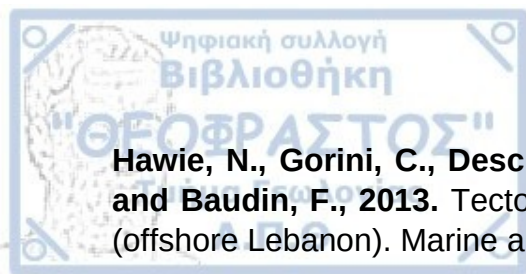
Elia, C., Konstantopoulos, P., Maravelis, A. and Zelilidis, A., 2013. THE TECTONO-STRATIGRAPHIC EVOLUTION OF EASTERN MEDITERRANEAN WITH EMPHASIS ON HERODOTUS BASIN PROSPECTIVITY FOR THE DEVELOPMENT OF HYDROCARBON FIELDS. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 47(4), pp.1970-1979.

Fürstenau, J., Hawie, N., Comstock, J. and Lowrey, C.J., 2013. Aspects of the depositional history of the Levant Basin offshore Cyprus and Lebanon. In *Offshore Mediterranean Conference*, Ravenna, Italy.

Gardosh, M., Druckman, Y., Buchbinder, B. and Rybakov, M., 2008. The Levant Basin offshore Israel: stratigraphy, structure, tectonic evolution and implications for hydrocarbon exploration (p. 118). *Geophysical Institute of Israel*.

Gardosh, M.A. and Druckman, Y., 2006. Seismic stratigraphy, structure and tectonic evolution of the Levantine Basin, offshore Israel. *Geological Society, London, Special Publications*, 260(1), pp.201-227.

Gvirtzman, Z., Csato, I. and Granjeon, D., 2014. Constraining sediment transport to deep marine basins through submarine channels: The Levant margin in the Late Cenozoic. *Marine Geology*, 347, pp.12-26.



Hawie, N., Gorini, C., Deschamps, R., Nader, F.H., Montadert, L., Granjeon, D. and Baudin, F., 2013. Tectono-stratigraphic evolution of the northern Levant Basin (offshore Lebanon). *Marine and Petroleum Geology*, 48, pp.392-410.

Muttoni, G., Gaetani, M., Kent, D.V., Sciunnach, D., Angiolini, L., Berra, F., Garzanti, E., Mattei, M. and Zanchi, A., 2009. Opening of the Neo-Tethys Ocean and the Pangea B to Pangea A transformation during the Permian. *GeoArabia*, 14(4), pp.17-48.

Roberts, G. and Peace, D., 2007. Hydrocarbon plays and prospectivity of the Levantine Basin, offshore Lebanon and Syria from modern seismic data. *GEOARABIA-MANAMA*, 12(3), p.99.

Stampfli, G.M. and Borel, G.D., 2002. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1), pp.17-33.

Stampfli, G.M., Borel, G.D., Marchant, R. and Mosar, J., 2002. Western Alps geological constraints on western Tethyan reconstructions. *Journal of the Virtual Explorer*, 8, p.77.

Steinberg, J., Gvirtzman, Z., Folkman, Y. and Garfunkel, Z., 2011. Origin and nature of the rapid late Tertiary filling of the Levant Basin. *Geology*, 39(4), pp.355-358.

Torsvik, T.H., Carlos, D., Mosar, J., Cocks, L.R.M. and Malme, T.N., 2002. Global reconstructions and North Atlantic paleogeography 440 Ma to recent. *BATLAS—Mid Norway plate reconstruction atlas with global and Atlantic perspectives*, pp.18-39.

Vidal, N., Alvarez-Marron, J. and Klaeschen, D., 2000. Internal configuration of the Levantine Basin from seismic reflection data (eastern Mediterranean). *Earth and Planetary Science Letters*, 180(1), pp.77-89.

ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ

<https://virtualexplorer.com.au/article/2002/57/western-alps-reconstruction/geo.html>

http://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre_aree/Tecnologia_e_Scienze_applicate/enciclopedia/inglese/inglese_vol_1/pag065-84ing3.pdf

<http://petroleumgeo.blogspot.gr/2016/09/pgng-hydrocarbon-generation.html>

https://www.ems.psu.edu/~pisupati/ACSO Outreach/Petroleum_2.html

<http://infolupki.pgi.gov.pl/en/gas/thermal-maturity-organic-matter-and-gas-exploration>

http://www.jogmec.go.jp/english/oil/oilgas_10_000012.html

<https://www.dnr.wa.gov/programs-and-services/geology/energy-mining-and-minerals/oil-and-gas-resources>

<https://www.slideshare.net/petroshahnawaz/basics-of-petroleum-geology>

<https://data.geus.dk/nordiccs/terminology.xhtml>



<http://www.gsi.gov.il/uploads/ftp/GsiReport/2006/Gardosh-Michael-GSI-14-2006.pdf>

<https://www.energy-pedia.com/news/israel/noble-energys-leviathan-gas-field-reserves-may-hit-21.1-tcf>

http://www.kassinis-consulting.com/upload-files/2014%2004%2030_presentation_Summaxia%20Politwn.pdf

<http://slideplayer.com/slide/747835/>

<http://www.history.alberta.ca/energyheritage/gas/premodern-global-history/location-of-natural-gas/default.aspx>

<http://greece.greekreporter.com/2015/06/08/cyprus-gas-field-declared-commercially-viable-by-joint-venture-researching-the-area/>