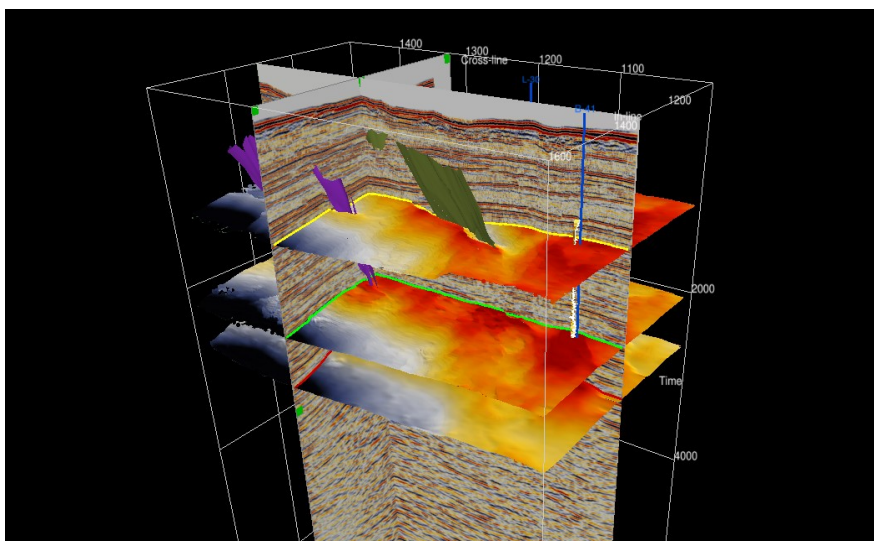




Διπλωματική Εργασία

"Απεικόνιση δομών και τεκτονικών χαρακτηριστικών τους σε τρισδιάστατα δεδομένα σεισμικής ανάκλασης από την περιοχή Scotian Basin, Nova Scotia του Καναδά"



Σουρλάς Βασίλειος
Χανιά 2020

Τριμελής Επιτροπή:
Βαφείδης Α. (Επιβλέπων), Μανούτσογλου Ε., Κρητικάκης Γ.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την απεικόνιση δομών και τεκτονικών χαρακτηριστικών τους σε τρισδιάστατα σεισμικά δεδομένα ανάκλασης από την περιοχή Scotian Basin, Nova Scotia του Καναδά με χρήση του προγράμματος OpendTect.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης που αποδέχτηκε το αίτημα μου να εκπονήσω τη διπλωματική εργασία στο εργαστήριο καθώς και για την θερμή υποδοχή και τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσαν τα μέλη του για την ολοκλήρωσή της.

Στην παρούσα διπλωματική καταλυτικό ρόλο έπαιξε ο επιβλέπων καθηγητής κ.Βαφείδης Αντώνιος, ο οποίος με την καθοδήγηση και τις παρατηρήσεις του έδωσε λύσεις στις δυσκολίες που παρουσιάστηκαν.

Επίσης, δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τον κ.Κρητικάκη Γεώργιο και κ. Ανδρονικίδη Νικόλαο οι οποίοι συνέβαλαν καθοριστικά στην εξέλιξη της διπλωματικής εργασίας καθ' όλη την διάρκεια της επεξεργασίας καθώς και στην επίλυση διαφόρων τεχνικών θεμάτων που προέκυψαν.

Ακόμα, η εργασία θα ήταν αδύνατον να εκπονηθεί χωρίς την παροχή των τρισδιάστατων σεισμικών δεδομένων και του λογισμικού από την OpendTect.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ηθική και οικονομική υποστήριξη που μου παρείχαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν προ-επεξεργασμένα τρισδιάστατα σεισμικά δεδομένα σεισμικής χωροθέτησης (time-migrated) καθώς και οι διαγραφίες από μια γεώτρηση, από την περιοχή Penobscot, Nova Scotia του Καναδά. Τα δεδομένα αυτά ελέγχθηκαν ως προς τον θόρυβο και τις ελαττωματικές καταγραφές. Έπειτα, υπολογίστηκε η διευθύνουσα γωνία (Dip steering) ώστε να δημιουργηθούν 2 νέα σετ δεδομένων (Background και Detail Steering Cube). Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την αναβάθμιση δομών ενδιαφέροντος (στρωματογραφικοί ορίζοντες, ρήγματα κλπ.) χρησιμοποιώντας μια σειρά από ημιαυτόνομα φίλτρα (Structural Oriented Filters- SOF). Τα αρχικά δεδομένα καθώς και τα δεδομένα μετά από επεξεργασία συσχετίστηκαν με τις διαγραφίες της γεώτρησης L-30 για την δημιουργία συνθετικών σεισμικών δεδομένων, ώστε να είναι δυνατή η βαθμονόμηση του χρόνου καταγραφής με το βάθος, καθώς και για να συσχετιστούν οι γεωλογικοί ορίζοντες με συγκεκριμένες σεισμικές ανακλάσεις. Αφού ολοκληρώθηκε η επεξεργασία των δεδομένων, πραγματοποιήθηκε η χαρτογράφηση των δομών ενδιαφέροντος. Κατά τη φάση αυτή, πραγματοποιήθηκε οριοθέτηση των στρωματογραφικών οριζόντων του υπεδάφους και αναδείχθηκαν δομές με μεγάλη κλίση (ρήγματα). Διενεργώντας τέτοιου είδους επεξεργασία, ήταν εφικτή η καλύτερη απεικόνιση, επομένως και ερμηνεία, των γεωμορφολογικών δομών του υπεδάφους. Για όλα τα παραπάνω χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης, το πρόγραμμα OpendTect. Για τον λόγο αυτό, εκτός των άλλων, η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην αξιολόγηση του εν λόγω λογισμικού όσον αφορά στην επεξεργασία, απεικόνιση και ερμηνεία τρισδιάστατων και δισδιάστατων σεισμικών δεδομένων, με σκοπό την περαιτέρω χρήση του OpendTect σε αντίστοιχες εργασίες.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	ii
Περίληψη.....	iii
1. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	5
2. Περιοχή Μελέτης και σεισμικά δεδομένα.....	6
2.1 Θέση και γεωλογία της περιοχής μελέτης	6
2.2 Ιστορία Ερευνών	11
2.3 Περιγραφή πειράματος τρισδιάστατης σεισμικής ανάκλασης και γεωτρητικών δεδομένων	12
2.3.1. Απόκτηση τρισδιάστατων δεδομένων ανάκλασης	12
2.3.1.1. Βασικές αρχές στην απόκτηση 3D δεδομένων ανάκλασης	13
2.3.1.2. Περιγραφή γεωμετρίας πειράματος.....	17
2.3.2. Γεωτρητικά δεδομένα.....	25
2.4 Ιστορικό επεξεργασίας των δεδομένων ανάκλασης.....	25
2.5 Έλεγχος κατάστασης των δεδομένων.....	26
3. Υπολογισμός διευθύνουσας γωνίας κλίσης (dip steering)	27
3.1. Βασικές αρχές θεωρίας Dip-Steering και είδη Steering Cube	28
3.2. Detailed & Background Steering Cube.....	30
4. Αναβάθμιση των 3D δεδομένων σεισμικής ανάκλασης στο χώρο.....	32
4.1. 3D δεδομένα ενδιάμεσων τιμών (Dip-steered Median Filter - DSMF).....	32
4.2. 3D δεδομένα διάχυσης (Dip-steered Diffusion Filter -DSDF)	34
4.3. 3D δεδομένα ανάδειξης ρηγμάτων (Dip-steered Fault Enhancement Filter - FEF)	37
4.4. Ανάλυση των χαρακτηριστικών	38
5. Απεικόνιση 3D σεισμικού ορίζοντα και ρηγμάτων	40
5.1. Απεικόνιση σεισμικού ορίζοντα στις 3 διαστάσεις (3D).....	40
6. Συσχέτιση σεισμικών και γεωτρητικών (L-30) δεδομένων	44
6.1. Εξαγωγή Wavelet.....	44
6.2 Συσχέτιση των σεισμικών και συνθετικών δεδομένων την γεώτρηση L-30.....	45
7. Επεξεργασία, Απεικόνιση και Ερμηνεία 2Dσεισμικής τομής από την λεκάνη της Φολεγάνδρου.....	47
8. Συμπεράσματα- Μελλοντικές Προτάσεις.....	52
Βιβλιογραφία.....	53

1. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η απεικόνιση και δομική αναβάθμιση των τρισδιάστατων σεισμικών δεδομένων, από τη περιοχή Penobscot, Nova Scotia του Καναδά με απώτερο σκοπό την τρισδιάστατη χαρτογράφηση της γεωλογίας του υπεδάφους, μέσω της αναγνώρισης των κύριων ανακλαστήρων της περιοχής μελέτης αλλά και την ανάδειξη δομών μεγάλης κλίσης (ρήγματα), μέσω του προγράμματος OpendTect. Με αφορμή την άδεια πρόσβασης στο συγκεκριμένο λογισμικό που χρησιμοποιείται για πρώτη φορά στο Πολυτεχνείο Κρήτης έγινε αξιολόγηση του προγράμματος, μέσω απεικόνισης και ερμηνείας τρισδιάστατων και δισδιάστατων σεισμικών δεδομένων ανάκλασης από την λεκάνη της Φολεγάνδρου και σύγκρισης με υπάρχοντα δεδομένα με στόχο την χρήση του σε αντίστοιχες εργασίες.

2. Περιοχή Μελέτης και σεισμικά δεδομένα

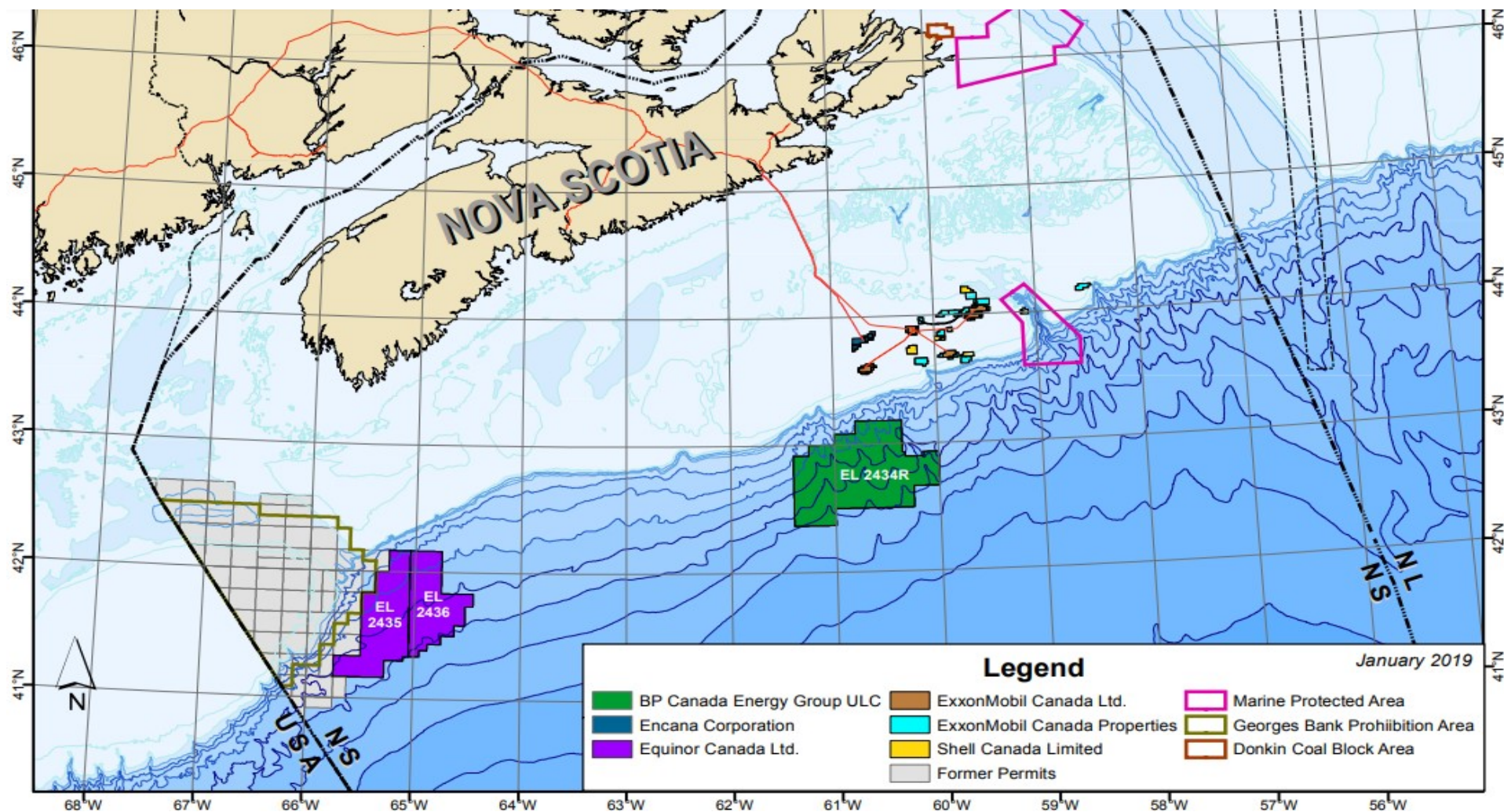
2.1 Θέση και γεωλογία της περιοχής μελέτης

Η Λεκάνη της Σκωτίας (Scotian Basin), βρίσκεται νοτιοανατολικά της Νέας Σκωτίας (Nova Scotia) του Καναδά, καλύπτοντας τη Σκωτσέζικη υφαλοκρηπίδα και υφαλοπρανές (Scotian Shelf and Slope). Η περιοχή μελέτης Penobscot αναπτύσσεται από το δυτικό άκρο της υπολεκάνης του Abenaki μέχρι το βόρειο επικλινές τμήμα της υφαλοκρηπίδας του Sable και 25km βορειοδυτικά από το νησί Sable (**Εικόνα 2.1, 2.2**).

Η Λεκάνη της Σκωτίας έχει εμβαδόν 300.000 km^2 και το βάθος των ιζημάτων φτάνει πάνω από 18km. Αποτελείται από διάφορα διασυνδεδεμένα μεσοζωικά και κενοζωικά βαθειά σημεία απόθεσης ιζημάτων, όπως των υπολεκάνων Shelburne, Sable, Abenaki, Laurentian, South Whale, και την τάφρο του Orpheus. (**Wade and MacLean, 1990; Alberty et al., 2010; Kettanah, 2013**). Η λεκάνη υπέρκειται πάνω από τα κατώτερα παλαιοζωικά πετρώματα του υποβάθρου. Αρκετοί συγγραφείς έχουν παρουσιάσει εκτενείς αναφορές για την γεωλογία της λεκάνης (**Wade and MacLean, 1990; Grist et al., 1992; Wade et al., 1995; Alberty and Beaumont, 2010; Kettanah, 2013; Campbell et al., 2015**). Ωστόσο, παρακάτω γίνεται μια σύντομη επισκόπηση των Κρητιδικών ενοτήτων της περιοχή μελέτης.

Στην περιοχή μελέτης, διαπιστώνεται η ύπαρξη διαφόρων γεωλογικών δομών πχ. τάφροι, τεκτονικά κέρατα και αρκετά συχνά ζώνες ρηγμάτων, οι οποίες αναπτύχθηκαν μετά την διάσπαση της Παγγαίας λόγω της έντονης τεκτονικής δραστηριότητας στην περιοχή. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, μια πολύπλοκη ιζηματογένεση από την περίοδο του Τριαδικού μέχρι σήμερα (**Εικόνα 2.3**) (**McIver, 1972; Jansa and Wade, 1975; Grist et al., 1992; Alberty et al., 2010**).

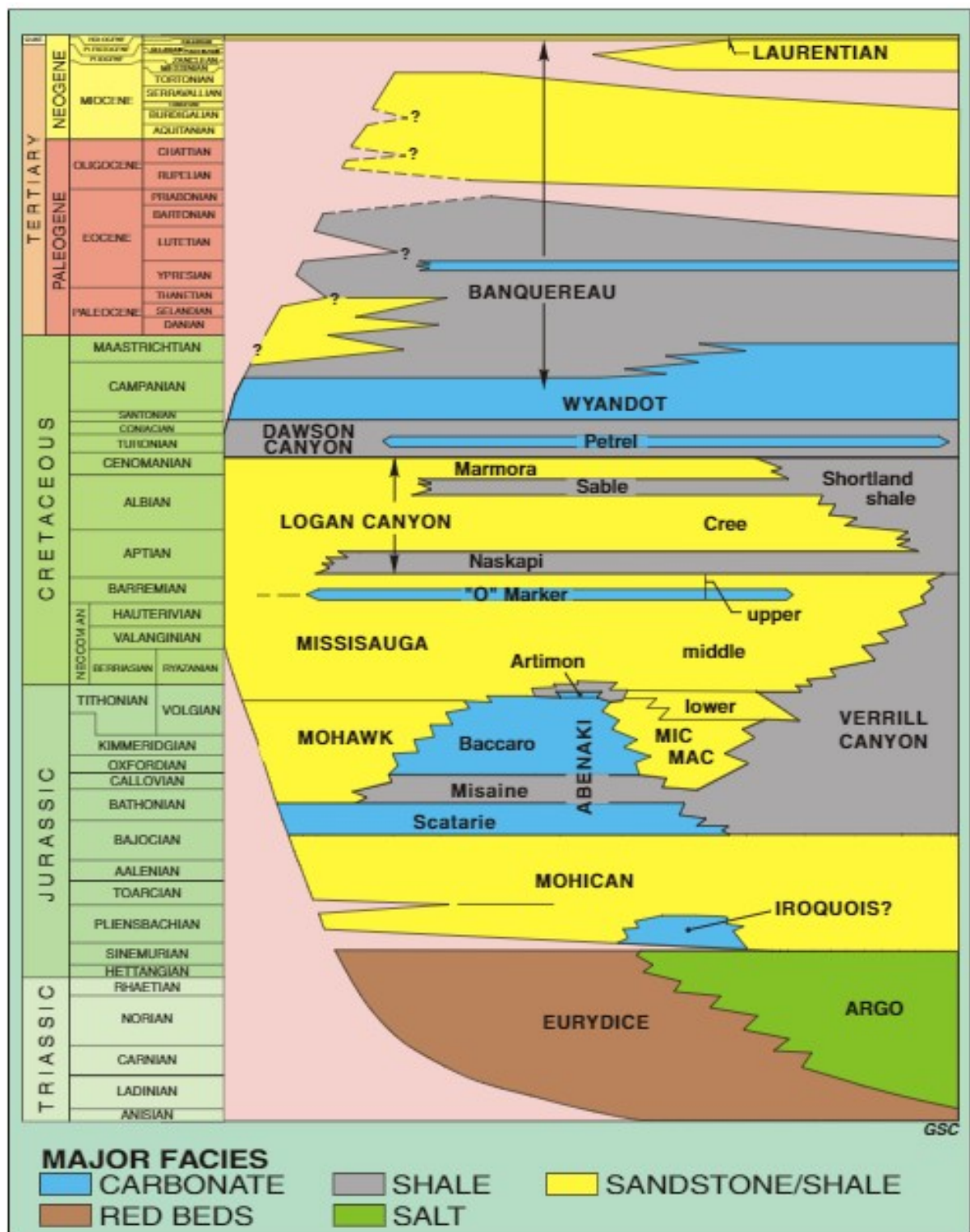
Στα όρια της Ιουρασικής- Κρητιδικής περιόδου παρατηρείται μια μεγάλη ταπείνωση της θαλάσσιας στάθμης. Μια τέτοια δραστηριότητα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή και την εναπόθεση προσχωσιγενών και δελταδικών ιζημάτων του σχηματισμού Mississauga κατά την διάρκεια της πρώιμης Κρητιδικής περιόδου. Επίσης, καθ' όλη την διάρκεια της Κρητιδικής περιόδου σημειώνεται εναπόθεση ψαμμιτών, σχιστόλιθου, μαργών και ασβεστιτών, μια διαδικασία που οδηγεί στην δημιουργία των σχηματισμών Logan Canyon Formation (LCF), Dawson Canyon Formation (DCF) και Wyandot Formation (WF) (**McIver, 1972; King et al., 1974**). Οι διεπιφάνειες των προαναφερόμενων σχηματισμών φαίνονται στην σεισμική τομή χωροθέτησης της **Εικόνα 2.3** όπου οι διαθέσιμες γεωτρήσεις (L-30 & B-41) (**Εικόνα 2.2**) έχουν υπερτεθεί με τα σεισμικά δεδομένα. Τα στρώματα από το Ιουρασικό προς το Κρητιδικό και το Τριαδικό απεικονίζονται με διαφορετικά χρώματα. Στα 0,25s (TWT) αποτυπώνεται ο πυθμένας της θάλασσας ενώ στην συνέχεια αποτυπώνονται οι σχηματισμοί Wyandot, Dawson, Logan με πράσινο, κόκκινο και κίτρινο χρώμα αντίστοιχα. Ακόμα αποτυπώνονται οι σχηματισμοί Mississauga και Abenaki με μπλε και κόκκινο χρώμα αντίστοιχα. Ένα κύριο ρήγμα έχει οριοθετηθεί με διακεκομμένη μαύρη γραμμή.



Εικόνα 2. 1: Ακριβής θέση της περιοχής μελέτης. Στην συγκεκριμένη εικόνα παρατηρείται η ακριβής τοποθεσία της περιοχής Penobscot καθώς επίσης και οι εταιρίες που δραστηριοποιούνται στην έρευνα και αναζήτηση υδρογονανθράκων στο νησί Sable, Nova Scotia (Πηγή: CNSOPB)



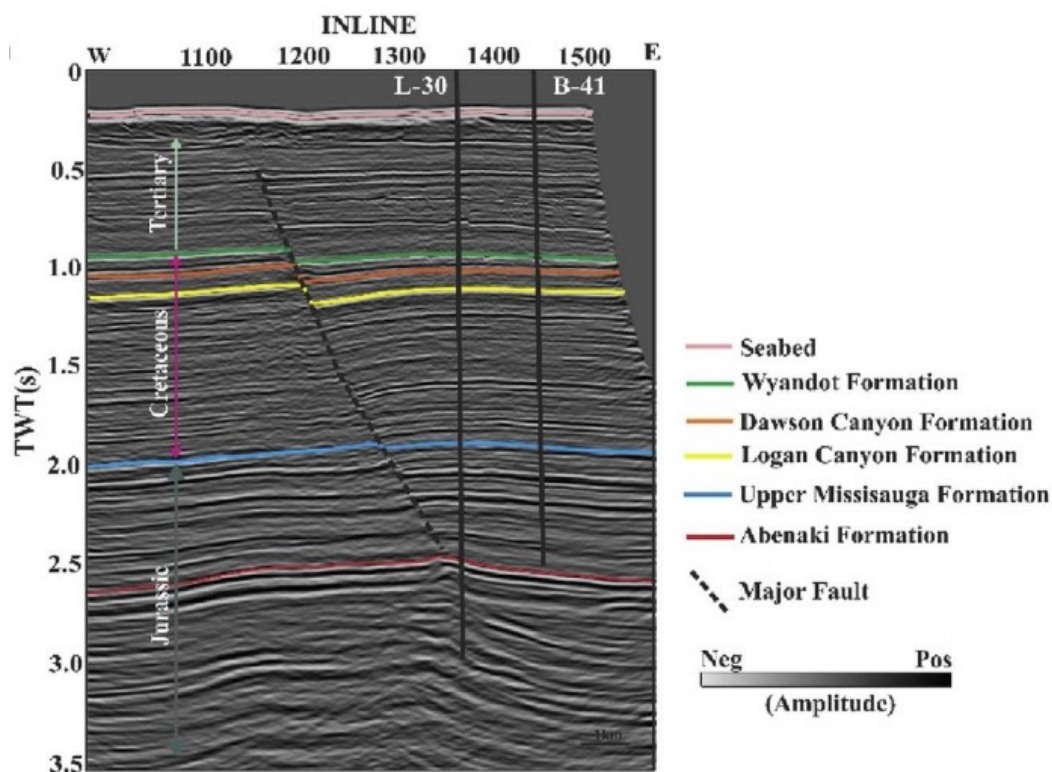
Εικόνα 2.2: Θαλάσσιες γεωτρήσεις στην λεκάνη της Σκωτίας (Πηγή: **CNSOPB**). Κάτω δεξιά, στο κόκκινο πολύγωνο απεικονίζονται τα όρια της περιοχής μελέτης Penobscot στην λεκάνη της Σκωτίας ενώ με μπλέ γραμμές απεικονίζονται σεισμικές γραμμές. Με κίτρινο ορθογώνιο απεικονίζεται η περιοχή που έχει πραγματοποιηθεί τρισδιάστατη σεισμική έρευνα που καλύπτει έκταση 66.5 km^2 εντός του οποίου έχουν γίνει 2 γεωτρήσεις (Πηγή: **Terranubis 2019**).



Εικόνα 2.3: Στρωματογραφική στήλη. Γενικευμένος χάρτης λιθοστρωματογραφίας του Scotian Basin, επεξεργασμένος από τους MacLean και Waden(1993) (Πηγή: Fensome et al., 2008)

Αναλυτικότερα για αυτούς τους σχηματισμούς γνωρίζουμε ότι:

- Ο σχηματισμός Logan Canyon Formation (LCF) ανήκει στην ομάδα Nova Scotia Group (McIver, 1972; King et al., 1974) και αποτελείται από εναλλαγές ψαμμίτη και σχιστόλιθου. Αυτή η ακολουθία αποτέθηκε κυρίως κατά μήκος της ανατολικής υφαλοκρηπίδας Nova Scotia. Ο McIver (1972) θεώρησε ότι το πρώτο χαμηλότερο μισό του LCF αποτελείται από λεπτόκοκκο, μέτριο έως καλά ταξινομημένο αργιλικό ψαμμίτη. Ωστόσο, προς την βάση του LCF αυτές οι αποθέσεις τείνουν να είναι πιο χονδροειδείς (Εικόνα 2.4).
- Ο σχηματισμός Dawson Canyon Formation (DCF) ανήκει στον Gully Group (McIver, 1972; King et al., 1974) και αποτελείται κυρίως από αποθέσεις θαλάσσιου σχιστόλιθου που εκτείνονται σε ολόκληρο το πλάτος της σκωτσέζικης υφαλοκρηπίδας. Το ανώτερο τμήμα του DCF είναι ανθρακικής ή μαργαϊκής σύστασης ενώ προς τα κάτω αναπτύσσεται ενότητα αργιλικών σχιστόλιθων που γίνονται ιλυόλιθοι στα μεγαλύτερα βάθη. Διάκενα (burrowing) και αποθέσεις απολιθωμάτων εμφανίζονται συχνά σε όλο τον όγκο της δομής (McIver, 1972) (Εικόνα 2.4).
- Ο σχηματισμός Wyandot Formation (WF) ανήκει επίσης στο Gully Group (McIver, 1972; King et al., 1974) και είναι το πιο διακριτό λιθολογικά στρώμα που έχει αποτεθεί στην σκωτσέζικη υφαλοκρηπίδα. Αποτελείται από ασβεστολιθικούς σχηματισμούς έως εκατό τις εκατό μάργα και ασβεστίτη (Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2. 4: Σεισμική τομή χωροθέτησης (cross line 1153) από την περιοχή του Penobscot όπου πάνω της έχουν υπερτεθεί 2 γειτονικές γεωτρήσεις (η L-30 και η B-41). Στο κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος ενώ στο οριζόντιο άξονα η inline γραμμή με κατεύθυνση Δ-Α (Πηγή: Mandal and Srivastava, 2017).

2.2 Ιστορία Ερευνών

Όπως προκύπτει από την ιστοσελίδα της CNSOPB (2012) η έρευνα και η αναζήτηση υδρογονανθράκων στην Nova Scotia ξεκίνησε το 1959 και έκτοτε έχουν ολοκληρωθεί τρεις κύκλοι δραστηριοτήτων. Πραγματοποιήθηκαν 207 γεωτρήσεις εκ των οποίων οι 127 ήταν εξερευνητικές. Μέχρι σήμερα έχουν ανακαλυφθεί 23 περιοχές μεγάλου και 8 κοινού ενδιαφέροντος, με σημαντικές εμφανίσεις υδρογονανθράκων, τόσο πετρελαίου όσο και αερίου. Το συνολικό μήκος των 2D σεισμικών δεδομένων που αποκτήθηκαν είναι 401000km ενώ η περιοχή των 3D δεδομένων καλύπτει 29,512 km^2 .

1ος Εξερευνητικός Κύκλος

Η εταιρία Mobil Oil Canada το 1959 απέκτησε εξερευνητική άδεια για την περιοχή κοντά στο νησί Sable, στα ρηχά νερά του Scotian Shelf. Ακολούθησαν μαγνητικές και βαρυτικές έρευνες, που οδήγησαν στην διάτρηση της πρώτης γεώτρησης το 1967, όπου επιβεβαιώθηκε η ύπαρξη φυσικού αερίου και πετρελαίου. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να δοθούν περαιτέρω άδειες στις εταιρίες πετρελαίου για να γίνουν σεισμικές έρευνες πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος. Από το 1967 έως το 1978, πραγματοποιήθηκαν 71 γεωτρήσεις και αποκτήθηκαν 140000 km 2D σεισμικών δεδομένων. Από τις 28 γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν πάνω στους δόμους άλατος (salt structure play), οι 3 θεωρήθηκαν σημαντικές ανακαλύψεις: α) Onondaga (Shell, 1969 - gas) β) Primrose (1972, Shell - oil & gas) γ) West Sable (Mobil, 1971 - oil & gas).

Στην γεώτρηση Thebaud P-84 έγινε μια σημαντική ανακάλυψη φυσικού αερίου. Το 1973 δοκιμάστηκε ακόμα ένα νέο σενάριο με αποτέλεσμα την ανακάλυψη στην γεώτρηση Mobil Cohasset D-42 φυσικού αερίου σε μια κυματοειδή δομή (subtle drape) υπερκείμενη του ορίου των ασβεστολιθικών αποθέσεων του σχηματισμού Abenaki. Στο τέλος αυτού του εξερευνητικού κύκλου προέκυψαν, με την εξερεύνηση rollover αντικλινικών δομών σημαντικές ανακαλύψεις αερίων στις περιοχές Citnalta και Intrepid.

2ος Εξερευνητικός Κύκλος

Ο δεύτερος εξερευνητικός κύκλος χρονολογείται από το 1979 έως το 1989 και σηματοδοτήθηκε με τη μεγάλη ανακάλυψη φυσικού αερίου στη περιοχή Venture που βρίσκεται ανατολικά της νήσου Sable από τις εταιρίες Petro-Canada και Mobil. Αυτή η ανακάλυψη αποτελεί συνέχεια των προγενέστερων ανακαλύψεων σε δομές rollover αντικλινών, και με τη γεώτρηση Venture D-23 να αποκαλύπτει πολλούς ταμιευτήρες ψαμμιτών της Κρητιδικής και Ιουρασικής περιόδου, με πολύ υψηλές ταχύτητες ροής (e.g. 22.6 MMscf/d, 278 Bbls/d condensate). Στην γεώτρηση Venture D-23 ανακαλύφθηκαν περίπου οι ίδιες ποσότητες φυσικού αερίου με όσες είχαν ανακαλυφθεί συνολικά μέχρι τότε στο Sable Subbasin.

Η Mobil και άλλες εταιρίες οριοθέτησαν τις υπάρχουσες ανακαλύψεις και στην συνέχεια έκαναν γεωτρήσεις σε βαθύτερα νερά, σε υπέρ-πιεσμένους ταμιευτήρες καθώς και σε νέες δομές αντικλινών. Σημαντικές ανακαλύψεις έγιναν στα πεδία: Νότια Venture, Δυτική Venture, Olympia, Δυτική Olympia, Arcadia και Νότια Sable (Mobil), Glenelg, Alma, NorthTriumph, Uniacke, Eagle (Shell), Banquereau (Petro-Canada) και στο Chebucto (Husky-

Bow Valley). Καθ' όλη την διάρκεια της δεύτερης φάσης διατρήθηκαν 54 γεωτρήσεις και σε 15 από αυτές επιβεβαιώθηκαν σημαντικές ανακαλύψεις.

3ος Εξερευνητικός Κύκλος

Κατά τον τρίτο εξερευνητικό κύκλο έγιναν γεωτρήσεις ρηχής θάλασσας στην περιοχή Scotia Shelf και βαθιάς θάλασσας στην περιοχή του Scotia Slope. Από το 2000-2004 η Mobil και οι συνεργάτες της ξεκίνησαν εξερευνητικό πρόγραμμα για να ελέγξουν ένα αριθμό μεγάλων δομών rollover αντικλίνων για το Sable Gas Project. Σε δυο από τις γεωτρήσεις βρέθηκαν εμφανίσεις αερίου στις δελταϊκές άμμους του σχηματισμού Missisauga. Παρόλα αυτά οι ζώνες αυτές δεν θεωρούνται οικονομικά εκμεταλλεύσιμες. Στα τέλη του 1990, δόθηκε άδεια στις εταιρίες πετρελαίου, για την εκτέλεση εργασιών έρευνας και απόκτησης 2D και 3D σεισμικών δεδομένων στην περιοχή του Scotian Slope καθώς και για την διάτρηση 6 γεωτρήσεων μεταξύ 2002 και 2004. Οι τέσσερις γεωτρήσεις εξ αυτών είχαν στόχο τα μεγάλα αντίκλινα που σχετίζονται με την επίκληση δομών άλατος (salt with drawal). Τα αρχικά αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά με την εταιρία Marathon να ανακαλύπτει πιθανά αποθέματα (net gas pay) στην γεώτρηση Annapolis G-24 και την εταιρία Chevron να εντοπίζει αρκετούς λεπτούς ψαμμιτικούς ταμιευτήρες φυσικού αερίου στο πεδίο Newburn.

2.3 Περιγραφή πειράματος τρισδιάστατης σεισμικής ανάκλασης και γεωτρητικών δεδομένων

2.3.1. Απόκτηση τρισδιάστατων δεδομένων ανάκλασης

Η περιοχή Penobscot αρχικά αξιολογήθηκε κάνοντας χρήση των 2D σεισμικών δεδομένων που αποκτήθηκαν κατά την δεκαετία 1970 και το 1980. Περίπου οι 20 τομές από τις προαναφερόμενες έρευνες απεικονίστηκαν και ερμηνεύτηκαν, αναδεικνύοντας μία ανασηκωμένη και ρηγματωμένη δομή. Αυτή η ερμηνεία ελέγχθηκε από δύο εξερευνητικές γεωτρήσεις, την L-30 και την B-41. Το αποτέλεσμα αυτής της έρευνας χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό της 3D σεισμικής έρευνας. Η Εταιρία HGS Canada Ltd., διεξήγαγε την θαλάσσια σεισμική έρευνα στην περιοχή Sable Island. Το πλοίο M/V Edward O. Vetter Party No.2472 συνέλεξε συνολικά 161.100km (πλάτος πλέγματος: 5,5 km, μήκος πλέγματος: 12km) σεισμικά δεδομένα ανάκλασης από την 1 Ιουνίου 1991 έως 8 Ιουλίου 1991 (**Crane and Clack, 1992**).

Καταγράφηκαν συνολικά 241 γραμμές με κατεύθυνση ΒΔ-ΝΑ με σκοπό να επιβεβαιώσουν τις γνωστές από την 2D έρευνα δομές και να τις ταυτοποιήσουν με τα ευρήματα των δυο γεωτρήσεων καλύπτοντας έκταση 66 km^2 τρισδιάστατης σεισμικής απεικόνισης .

Τα αρχικά δεδομένα καταγράφηκαν με διακριτική ικανότητα (bin) 6,25x50m Bin, ενώ επεξεργάστηκαν και χαρτογραφήθηκαν δομές σε μέγεθος bin 12,5x50m.

2.3.1.1. Βασικές αρχές στην απόκτηση 3D δεδομένων ανάκλασης

Οι τρισδιάστατες σεισμικές έρευνες ξεκίνησαν τα μέσα του 1970 με σκοπό την χαρτογράφηση γεωλογικών δομών εγκάρσια στις 2D γραμμές μελέτης και αποτελούν εξέλιξη της δισδιάστατης σεισμικής έρευνας. Η ευρεία χρήση της μεθόδου μέχρι σήμερα και η ταχύτατη εξέλιξη της, οφείλεται στο γεγονός ότι επιτρέπει την χαρτογράφηση των γεωλογικών δομών και ασυνεχειών με ακρίβεια σε μεγάλο βάθος καθιστώντας την πολύ αποτελεσματική. Ένας ακόμα λόγος χρήσης της μεθόδου αυτής, ιδιαίτερα στην έρευνα και ανίχνευση υδρογονανθράκων, είναι το μικρό κόστος απόκτησης τους. Το οικονομικό κόστος τρισδιάστατης σεισμικής έρευνας για μια περιοχή 20km*20km ανέρχεται στα 3 εκατομμύρια δολάρια. Επιπλέον, απαιτούνται 0,5 με 1 εκατομμύριο δολάρια για επεξεργασία (Cordesen, Galbraith and Peirce, 2000).

Η γένεση των σεισμικών κυμάτων στις θαλάσσιες διασκοπίσεις γίνεται με τη χρήση εκρηκτικής ύλης ή την εκτόνωση αερίου. Κατά την διάδοση τους μέσα από την θάλασσα και από τα εδαφικά στρώματα διαφορετικής πυκνότητας, υφίστανται ανακλάσεις, διαθλάσεις στις διαχωριστικές επιφάνειες των στρωμάτων καθώς και περιθλάσεις σε σημειακούς στόχους.

Η απόκτηση των δεδομένων σεισμικής ανάκλασης σε θαλάσσιο περιβάλλον γίνεται με την χρήση πλοίου το οποίο διασχίζει την περιοχή ενδιαφέροντος. Το πλοίο στο πίσω μέρος φέρει μια ή περισσότερες σεισμικές πηγές (σε συστοιχία) καθώς και σειρές με παράλληλα μεταξύ τους καλώδια στα οποία έχουν τοποθετηθεί σεισμικοί δέκτες (πχ. υδρόφωνα). Οι απλούστερες διατάξεις πηγών- δεκτών οροθετούνται από παράλληλες μεταξύ τους γραμμές πηγών (cross-lines) και παράλληλες μεταξύ τους γραμμές δεκτών (in-lines). Στις δύο από τις απλούστερες διατάξεις, οι γραμμές (cross-lines & in-lines) είναι ταυτόχρονα και παράλληλες μεταξύ τους (διάταξη SWATH) ή οι γραμμές αυτές είναι κάθετες μεταξύ τους (ορθογωνική διάταξη).

Κατά την ενεργοποίηση της πηγής, παράγονται σεισμικά κύματα τα οποία διαδίδονται στους γεωλογικούς σχηματισμούς κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, ανακλώνται στις διαχωριστικές επιφάνειες των στρωμάτων και καταγράφονται στους δέκτες τα πλάτη τους συναρτήσει του χρόνου διάδοσης τους. Κατά την καταγραφή τους, τα σεισμικά κύματα, ενισχύονται, ψηφιοποιούνται και μεταφέρονται σε μέσα ψηφιακής αποθήκευσης.

Στις θαλάσσιες διασκοπήσεις, η σεισμική πηγή που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το αεροβόλο όπλο (air-gun), το οποίο αποτελείται από: α)δοχείο υψηλής πίεσης β) θάλαμο πυροδότησης και γ) έμβολο εκτόνωσης. Για την ενεργοποίηση του όπλου εισάγεται αέρας υψηλής πίεσης με χρήση αεροσυμπιεστών. Ακολουθώντας, ο αέρας διοχετεύεται κάτω από την επιφάνεια του εμβόλου προκαλώντας απότομη εκτόνωση του αέρα στον θάλαμο πυροδότησης. Στην συνέχεια, ο αέρας που βρίσκεται στο κάτω θάλαμο απελευθερώνεται στο νερό προκαλώντας κρουστικό παλμό.

Οι βασικοί όροι που χρησιμοποιούνται κατά την διασκόπηση τρισδιάστατης σεισμικής έρευνας είναι οι εξής:

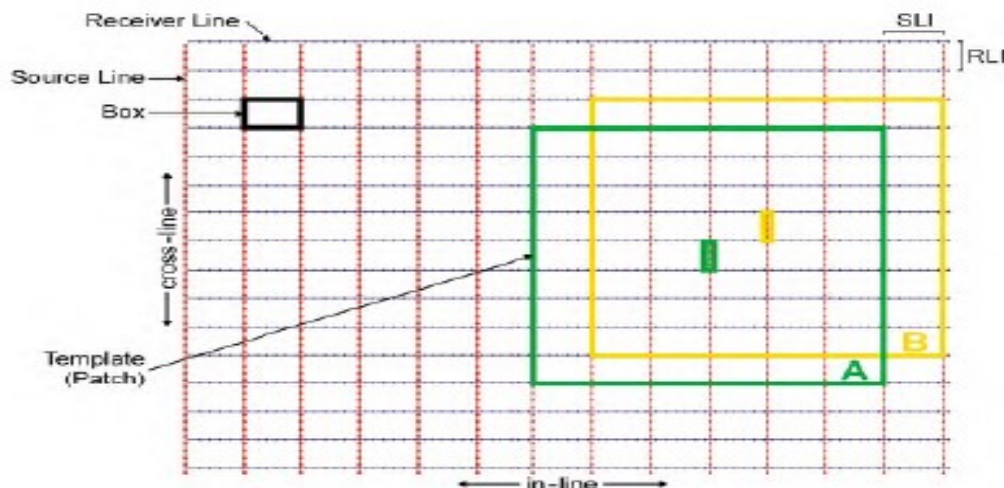
Γραμμή δεκτών (Receiver line): Μια γραμμή κατά μήκος της οποίας τοποθετούνται οι δέκτες σε τακτά χωρικά διαστήματα (ισαπόσταση δεκτών – RI). Συνήθως τα καλώδια των δεκτών απλώνονται κατά μήκος αυτών των γραμμών και φέρουν τα υδρόφωνα. Η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών γραμμών των δεκτών αναφέρεται ως ισαπόσταση των γραμμών των δεκτών receiver line interval (ή RLI). Η μέθοδος σχεδιασμού πηγής και δέκτη μπορεί να ποικίλει, αλλά η γεωμετρία πρέπει να υπακούει σε απλές οδηγίες.

Γραμμή Πηγών (Source line): Μια γραμμή κατά μήκος της οποίας είναι τοποθετημένες οι πηγές σε τακτά χωρικά διαστήματα (ισαπόσταση πηγών – SI). Η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών γραμμών πηγών ονομάζεται ισαπόσταση γραμμών πηγών (SLI). Η ισαπόσταση των γραμμών πηγών και η ισαπόσταση των πηγών (SI) κατά μήκος μιας γραμμής πηγών ορίζει την πυκνότητα τοποθέτησης των πηγών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο.

Cross-line direction: Η κατεύθυνση που είναι παράλληλη ως προς τις γραμμές των πηγών.

In-line direction: Η κατεύθυνση που είναι παράλληλη ως προς τις γραμμές των δεκτών.

Κύβος (Box): Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει περιοχές που περιβάλλονται ανάμεσα σε δύο παρακείμενες γραμμές πηγών και δύο παρακείμενες γραμμές δεκτών (**Εικόνα 2.5**). Ο κύβος συνήθως αντιπροσωπεύει την μικρότερη περιοχή μίας σεισμικής έρευνας που περιέχει όλα τα στατιστικά στοιχεία της έρευνας. Σε μια συμμετρική τρισδιάστατη γεωφυσική διασκόπηση (swath, ορθογωνική, κλπ), η μικρότερη δομική μονάδα(bin) με την μέγιστη υπεδαφική κάλυψη βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο του κύβου με την συνεισφορά ανακλάσεων από πολλά ζευγάρια πηγών-δεκτών. Το σημειακό ίχνος με την μικρότερη απόσταση από το κέντρο της εν λόγω δομικής μονάδας(bin) έχει την μεγαλύτερη ελάχιστη απόσταση(X_{min}) πηγή- δέκτης της διασκόπησης.

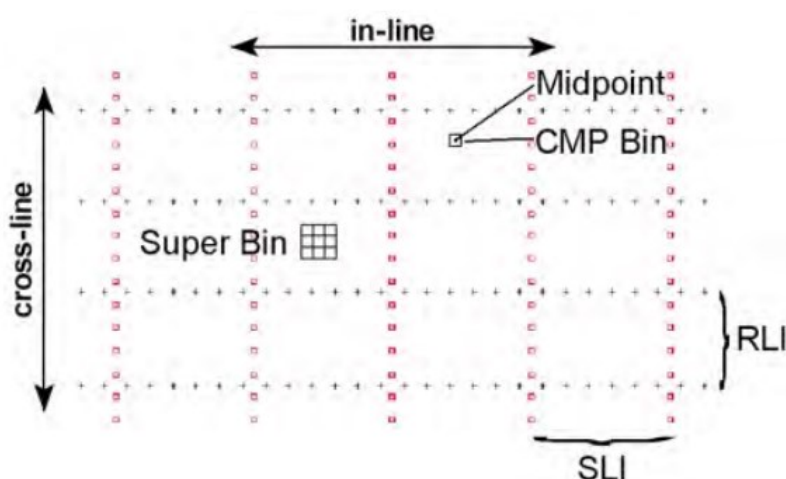


Εικόνα 2.5: Ορθογωνική διάταξη τρισδιάστατης διασκόπησης όπου απεικονίζονται α) οι inline γραμμές των δεκτών β) οι crossline γραμμές των πηγών γ) ο κύβος δ) το patch ε) ισαπόσταση γραμμών πηγών (SLI) ζ) ισαπόσταση γραμμών υδρόφωνων (RLI) (**Πηγή: Cordesen, Galbraith, Peirce, 2000**)

Ενδιάμεσο σημείο (Midpoint): Το σημείο που βρίσκεται ακριβώς στην μισή απόσταση από την θέση της πηγής και την θέση του δέκτη.

CMP Bin (Bin): Μια μικρή περιοχή που συνήθως έχει διαστάσεις $(SI/2)*(RI/2)$. Όλα τα ενδιάμεσα σημεία (midpoints) που βρίσκονται εντός αυτής της περιοχής (bin), θεωρούνται ότι ανήκουν στο ίδιο (κοινό) ενδιάμεσο σημείο (**Εικόνα 2.6**). Με άλλα λόγια, όλα τα ίχνη που βρίσκονται στον ίδιο bin θα έχουν ένα κοινό ενδιάμεσο σημείο και θα συμβάλουν στην υπεδαφική κάλυψη του bin. Περιστασιακά χρησιμοποιείται περιοχή μεγαλύτερη από αυτή του bin (super bin—**Εικόνα 2.6**) για την σεισμική υπέρθεση με σκοπό την αύξηση της υπεδαφικής κάλυψης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξομάλυνση μερικών δεδομένων και θα πρέπει να γίνεται με προσοχή επειδή επηρεάζει την χωρική ανάλυση (spatial resolution).

Υπεδαφική κάλυψη (Fold): Ο αριθμός των ενδιάμεσων σημείων που αθροίζονται σε ένα bin. Παρόλο που δίνεται ένας μέσος όρος υπεδαφικής κάλυψης σε κάθε έρευνα, η υπεδαφική κάλυψη ποικίλει από το ένα bin στο άλλο καθώς και για τις διαφορετικές αποστάσεις πηγής-δεκτών.



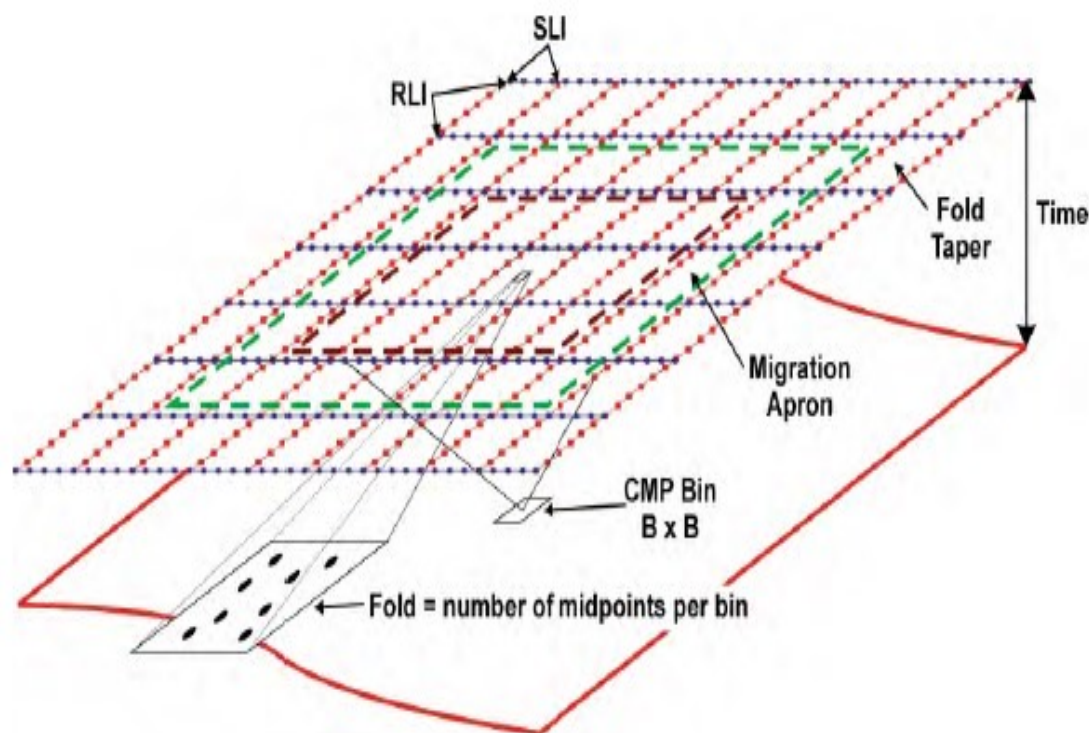
Εικόνα 2. 6: Στην εικόνα της 3D έρευνας αναπαρίστανται α) οι inline, β) οι cross-line, γ) το super Bin, δ) το Midpoint, ε) CMP Bin, ε) το RLI και ζ) η SRL (**Πηγή: Cordesen, Galbraith, Peirce, 2000**).

Patch: Αναφέρεται σε όλους τους ενεργούς σταθμούς δεκτών που καταγράφουν δεδομένα από μια δεδομένη πηγή σε μια τρισδιάστατη έρευνα. Συχνά σχηματίζει ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο από διαφορετικές γραμμές δεκτών. Βρίσκεται εντός της περιοχής της έρευνας και καταλαμβάνει διαφορετικές θέσεις εντός πλέγματος καθώς η έρευνα μετακινείται σε διαφορετικούς σταθμούς πηγών.

Migration Apron: Το πλάτος της περιθωριακής περιοχής που πρέπει να προστεθεί στην τρισδιάστατη σεισμική έρευνα για να επιτρέψει την κατάλληλη μετακίνηση οποιουδήποτε κεκλιμένου ανακλαστήρα dipping event (**Εικόνα 2.7**) εντός του τρισδιάστατου κύβου των χωροθετημένων δεδομένων.

Το πλάτος αυτό δεν απαιτείται να είναι το ίδιο σε όλες τις πλευρές της σεισμικής έρευνας. Παρόλο που η παράμετρος αυτή είναι απόσταση και όχι γωνία συχνά αναφέρεται ως εύρος χωροθέτησης migration aperture. Η ποιότητα των εικόνων που επιτυγχάνεται με το 3D-

migration είναι το σημαντικότερο πλεονέκτημα της τρισδιάστατης σε σχέση με την δισδιάστατη σεισμική απεικόνιση.



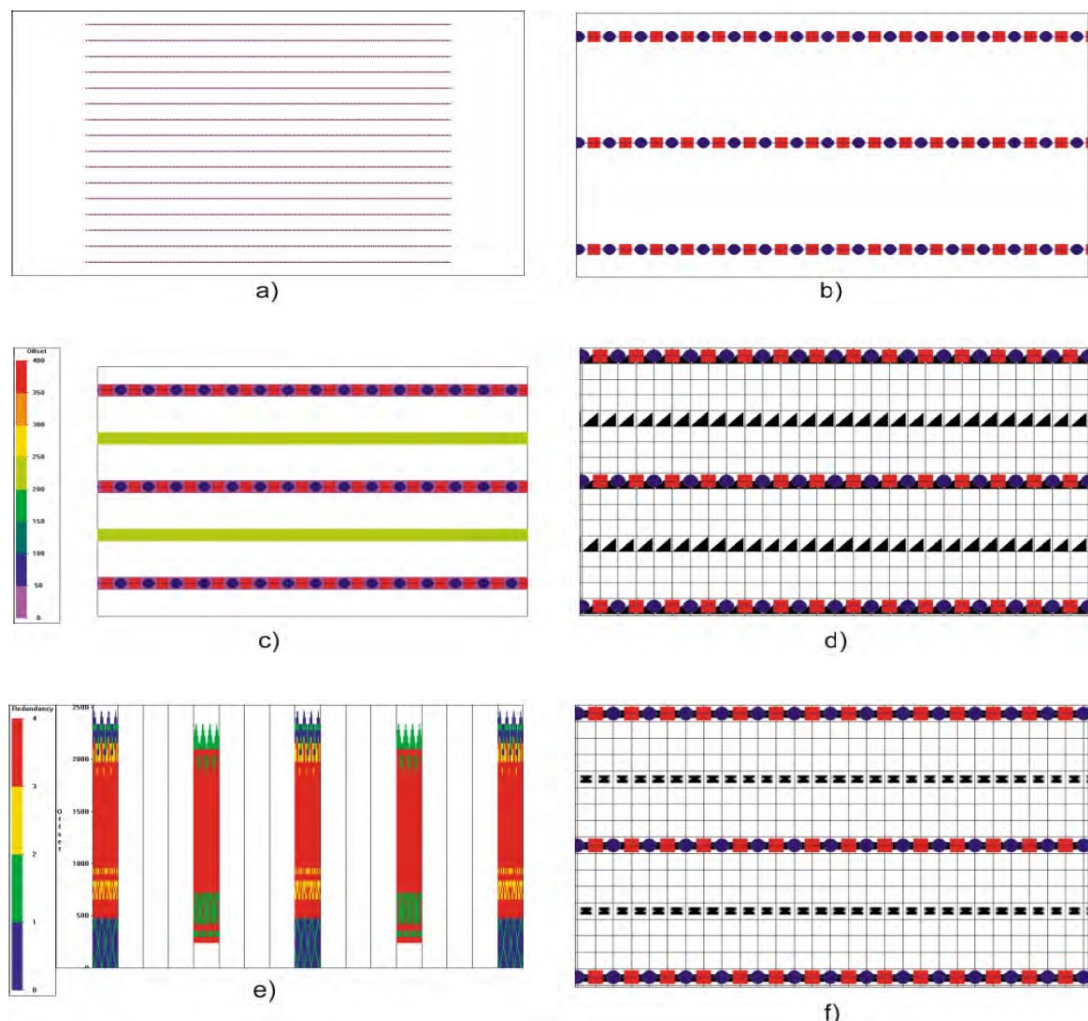
Εικόνα 2. 7: Αναπαρίσταται η α) υπεδαφική κάλυψη (fold), β) CMP Bin και γ) Migration Apron δ) Fold Taper (Πηγή: Cordesen, Galbraith, Peirce, 2000).

Fold Taper: Το επιπρόσθετο πλάτος περιφερικά της περιοχής έρευνας που πρέπει να προστεθεί στην τρισδιάστατη σεισμική επιφάνεια για την επίτευξη της μέγιστης υπεδαφικής κάλυψης εντός της περιοχής έρευνας (**Εικόνα 2.7**). Συχνά παρατηρείται μερική επικάλυψη μεταξύ του fold taper και του migration apron επειδή μπορεί να επιτραπεί η μειωμένη υπεδαφική κάλυψη στις εξωτερικές άκρες του migration apron.

Swath: Ο όρος swath χρησιμοποιείται με διαφορετικές σημασίες. Πρώτον, ο πιο διαδεδομένος ορισμός είναι, ότι το swath ισούται με το πλάτος της περιοχής πάνω στην οποία οι σταθμοί των πηγών καταγράφονται χωρίς cross-line rolls. Εναλλακτικά, ο όρος περιγράφει μια παράλληλη γεωμετρία (διάταξη) γραμμών inline και cross-line πάρα μια ορθογωνική γεωμετρία, στην οποία οι γραμμές των πηγών και των δεκτών μετακινούνται παράλληλα.

Διάταξη Swath: Η μέθοδος απόκτησης δεδομένων swath χρησιμοποιήθηκε κατά τα πρώτα στάδια της εμφάνισής του τρισδιάστατου σχεδιασμού (**Εικόνα 2.8a, b**). Σε αυτήν την γεωμετρία οι γραμμές των πηγών και των δεκτών είναι παράλληλες και συνήθως συμπίπτουν. Ενώ τα σημεία πηγής λαμβάνονται πάνω σε μια γραμμή, οι δέκτες καταγράφουν όχι μόνο κατά μήκος της γραμμής της πηγής αλλά και κατά μήκος των γειτονικών παράλληλων γραμμών των δεκτών. Η κατανομή X-min παίρνει σχεδόν μηδενική τιμή στις γραμμές των πηγών και τιμή ίση με την ισαπόσταση των γραμμών των πηγών (SLI) κατά μήκος μιας γραμμής ενδιάμεσα στις γραμμές πηγών (**Εικόνα 2.8c**). Η κατανομή της

απόστασης πηγών γεωφώνων (offset) πάνω στις γραμμές των bin είναι εξαιρετική (**Εικόνα 2.8d, e**). Παρόλα αυτά, η ανεπαρκής δειγματοληψία κατά την διεύθυνση cross-line καθιστά αυτό το τρισδιάστατο σχέδιο διασκόπησης ανεπαρκές, διότι πολλά από τα bin είναι άδεια. Η αζιμουθιακή κατανομή των κοινών ενδιάμεσων σημείων είναι περιορισμένη (για αρκετές γραμμές δεκτών) και εξαρτάται από τον αριθμό των γραμμών των ενεργών δεκτών (live receiver line) κατά την εγγραφή του patch και από την ισαπόσταση των γραμμών inline (**Εικόνα 2.8f**). Η διάταξη swath χρησιμοποιείται σε χερσαίες έρευνες όταν υπάρχουν σοβαροί περιορισμοί στην επιφάνεια ή όταν απαιτείται να ελαχιστοποιηθεί το κόστος. Τα λειτουργικά πλεονεκτήματα είναι ελκυστικά αλλά αυτό επιφέρει ένα συνδυασμό φτωχής αζιμουθιακής κάλυψης και φτωχής δειγματοληψίας κατά τη διεύθυνση crossline.



Εικόνα 2. 8: Διάταξη swath a) πλήρης διάταξη b)μεγεθυμένη διάταξη c) κατανομή X-min d)κατανομή των offset μέσα σε κάθε bin e)κατανομή των offset σε παράλληλες σειρές των bin(μέσα στον κύβο) f) αζιμουθιακή κατανομή μέσα σε κάθε bin (**Πηγή: Cordesen, Galbraith, Peirce, 2000.**).

2.3.1.2. Περιγραφή γεωμετρίας πειράματος

Στην περιοχή μελέτης έχουν χρησιμοποιηθεί σεισμικά δεδομένα που αποτελούνται από 600 in-lines (Line no. 1000 μέχρι 1600) και 481 cross-lines (Line no. 1000 μέχρι 1481). Η αναζήτηση του κοιτάσματος έγινε εντός της ζώνης μετάβασης, από το δυτική πλευρά της

λεκάνης του Abenaki έως τη βόρεια πλευρά της λεκάνης Sable, όπου βρίσκεται 25km περίπου από το νησί Sable (**Εικόνα 2.2**). Τα σεισμικά δεδομένα καλύπτουν έκταση 66 km^2 (μήκος πλέγματος 5,5km και πλάτος πλέγματος 12km) με την αρχική διάσταση του bin να είναι 6,25 m*25 m (inline *cross-line) και με μέγιστη υπεδιαφική κάλυψη 60.

Πλοίο (Vessel)

Για την απόκτηση των δεδομένων τρισδιάστατης σεισμικής ανάκλασης που παρουσιάζονται στην εν λόγω διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το πλοίο "M/V Edward O.Vetter" με καναδική σημαία, συνολικού βάρους 997,18 τόνων και συνολικού μήκους 55,6 μέτρων (**Εικόνα 2.9**).

I VESSEL		Streamer	
Owner	HGS Canada Ltd.	Type	TITAN 1000
Flag	Canadian	Number of Channels	480
Built	1973 Ferguson's Shipyard	Group Length	6.25, 12.5 or 25 m
	Pictou, Nova Scotia	Max. Length	4800 m Single, 3000 m Dual
	Canada	Hydrophones	HGS Dish Phone
Country of Registry	Canada		Acceleration Cancelling
Registration Number	329550	Number of Hydrophones	32 per 12.5 m Group Length
Classification	Lloyd's 100 A1, Dot Ice VII, CSI 1X	Group Sensitivity	53.4 volts/bar, +/- 1.2 dB
Home Port	Pictou, Nova Scotia	Data Transmission	Fiber-Optic Channel from Streamer
Tonnage - Gross	Gross 997.18 tons		Electronic Modules
Dimensions	a. Length 185 ft.	Number of Streamer	40 max
	b. Beam 39 ft.	Electronic Modules	1 msec
	c. Draught, Medium 13.5 ft.	Sample	
Engines	2 - EWSL 16 MGR 2000 HP each	Recording Filters	
Speed	6.9 m/s (13.5 knots)	Low Cut	0/6, 8/18, 8/12, 18/12 Hz
Generators	2 Cat D343 250 KW 1 Cat D330 112 KW	High Cut	256/72 Fixed
Radios	SSB - Marconi & Kelvin Hughes	Amplifiers	I.F.P. Binary Gain, 0-84 dB
	VHF CMS DN42	System Dynamic Range	114 dB (Lo Pre-Amp Gain)
Endurance	35 days	Pre-Amp Gain	-6 +6 dB
Berth Facilities	30 Bunks	A/D Converter	14 Bit + Sign
Call Sign	VC 8857	Auxiliary Sensors	Dynamic Range 78 dB
Radar	2 - Decca 914	Compasses	40 max
Fathometer	Simrad M2R	Depth Sensors	Digicourse max 20
Navigation	Transit & Trisponder	Trace Summings	20 max
			1,2,3 or 4
II EQUIPMENT SPECIFICATIONS		III RECORD INSTRUMENTS	
Source		Data Acquisition Unit	FCS III
Type	PNUCON/Sleeve Hybrid Array	Number of Channels	480 Seismic
Capacity	3616 cu. in. Active, 852 cu. in. Spare	Auxiliary Channels	24
Number of Guns	57 Active, 7 Spare	Resample	2 or 4 msec
Performance	105 BARMS P-P, 0 - 128 Hz	Filters	64, 90, 128, 180, 256 Hz (72/oct.)
Number of Strings	Inners - 2 x 19,225 m	Format	SEG D, 6250 BPI
	Outers - 2 x 17,286 m		
Depth	7.0 m +/- 1 m		
Compressors		IV CONTROL SYSTEM	
Type	2 LMF 1200 CFM	Type	CMS IV
	1 LMF 1040 CFM	Navigation	12 RPS Control
	2 Sullair Model 300	Streamer Tracking	HGS On Board Binning
Capacity	3440 CFM	Binning System	HGS Real Time Binning
		Source Controller	TIGER II
		Resolution	0.1 msec
		Standard Deviation	0.6 msec
		Data Logging	Automatic Recording

Εικόνα 2.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά του γεωφυσικού πλοίου και του εξοπλισμού απόκτησης των σεισμικών δεδομένων (**Πηγή: Crane and Clack, 1992**)

Σύστημα Καταγραφής (Recording System)

Για την απόκτηση θαλάσσιων δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το σύστημα HGSTITAN 1000 που αποτελείται από τέσσερα κύρια υποσυστήματα:

- DFOS- Digital Fibre Optic Streamer. Ψηφιακό καλωδίο οπτικών δεκτών
- SCS- Streamer Control System. Σύστημα ελέγχου δεκτών

- c. FCS- Field Computer System. Υπολογιστικό σύστημα πεδίου
- d. RAWPS- Read After Write Plotter System. Σύστημα απεικόνισης των δεδομένων μετά την καταγραφή

Κατά την καταγραφή χρησιμοποιήθηκαν 240 ενεργά κανάλια. Το διάστημα δειγματοληψίας είναι 2ms ενώ η διάρκεια καταγραφής είναι 6s. Επίσης έγινε εφαρμογή φίλτρου για την διατήρηση των συχνοτήτων απο 8 εως 128Hz (**Εικόνα 2.10**). Τα δεδομένα καταγράφηκαν σε τρεις ταινίες αποθήκευσης StorageTec1950 σε μορφή SEG D.

System	DFOS 480 (TITAN)
Tape Format	SEG D, GCR
Packing Density	6250 bpi
Tape Speed	125 ips
Number of Seismic Channels	240
Number of Q.C. Channels	2
Gain Control	I.F.P.
Sample Rate	2 msec
Record Length	6 sec
Gain Constant	Low = 12 dB
Total System Dynamic Range	> 10 dB
Final Gain	84 dB
Filters	High Cut - 128 Hz at 72 dB/octave Low Cut - 8 Hz at 18 dB/octave
System Polarity	Increase in pressure on hydrophone produces a negative number on the tape and a down break on the camera.

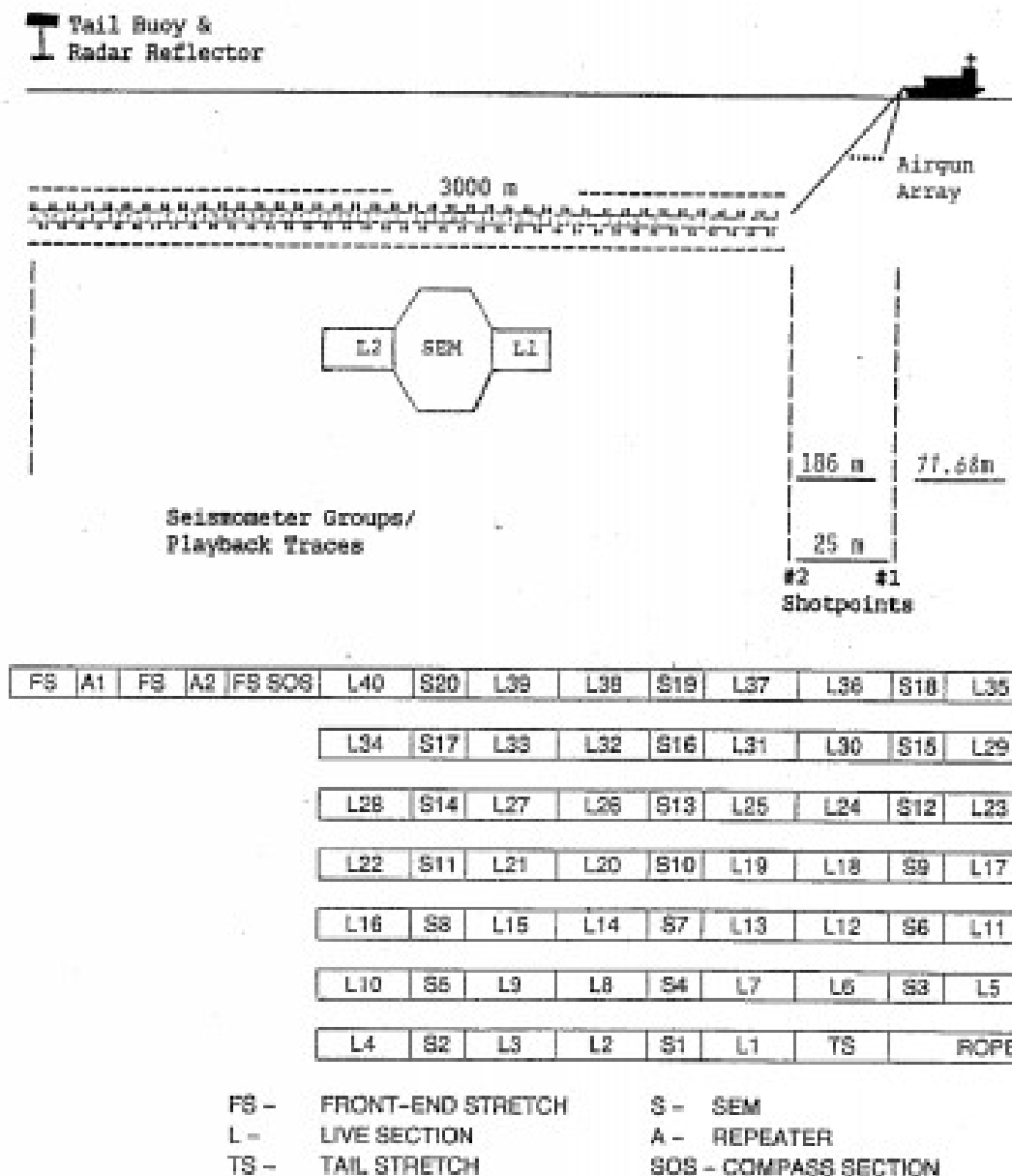
Εικόνα 2.10: Πληροφορίες συστήματος Καταγραφής (Πηγή: Crane and Clack, 1992)

Υδροφώννα (Streamer)

Χρησιμοποιήθηκε "Ψηφιακό καλώδιο οπτικών ινών" (Digital Fiber Optic streamer) συνολικού μήκους 3000m με 240 συστοιχίες υδροφώννων όπου κάθε συστοιχία απέχει 12,5m. Επίσης κάθε συστοιχία περιλαμβάνει 32 υδροφώννα σε ισαποστάσεις των 0,4m. Η πλησιέστερη προς την πηγή συστοιχία υδροφώννων είναι το νούμερο 240 (**Εικόνα 2.11**). Στην **Εικόνα 2.12** απεικονίζεται η διάταξη του καλωδίου των υδροφώννων.

Length	3000 m
Length of Centre Near Group 240 to 1	2977.5 m
Number of Groups	240
Group Interval	12.5 m
Hydrophone Interval	0.4 m
Number of Hydrophones per Group	32
Hydrophone Type	D-2B Dish Type
Live Section Length	74.5 m
Stretch Section Length	2 @ 50 m 1 @ 100 m
SEM Module Length	0.50 m
Repeater Module Length	0.33 m
Stretch Sections in Use	3 Front, 2 Tail
Streamer Skin Type	P.U.
Numbering Convention	Near Group is #240
Streamer Sensitivity	53.4 $\mu\text{V}/\mu\text{Bar}$

Εικόνα 2.11: Πληροφορίες υδροφώννων (Πηγή: Crane and Clack, 1992)



Εικόνα 2.12: Απεικόνιση διάταξης του καλωδίου των υδροφώνων (streamer) (Πηγή: Crane and Clack, 1992)

Πηγή (Source)

Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση της θαλάσσιας διασκόπησης είναι τέσσερις σειρές/συστοιχίες stiring guns. Οι σειρές περιλαμβάνουν 57 ενεργά αεροβόλα όπλα (airguns) συνολικού όγκου ανά συστοιχία 59,25 L και 7 εφεδρικά αεροβόλα συνολικού όγκου 13,96 L (**Εικόνα 2.13 και 2.14**). Το βάθος των συστοιχιών των πηγών είναι 7m.

Ο συγχρονισμός και η εκτόνωση των συστοιχιών ελέγχονταν από το σύστημα έλεγχου Texas Instrument Airgun (TIGERII). Το σύστημα αυτό ρύθμιζε την πυροδότηση κάθε όπλου, προκαλώντας σε ολόκληρη την σειρά ταυτόχρονη εκτόνωση. Οι καθυστερήσεις μεταξύ των

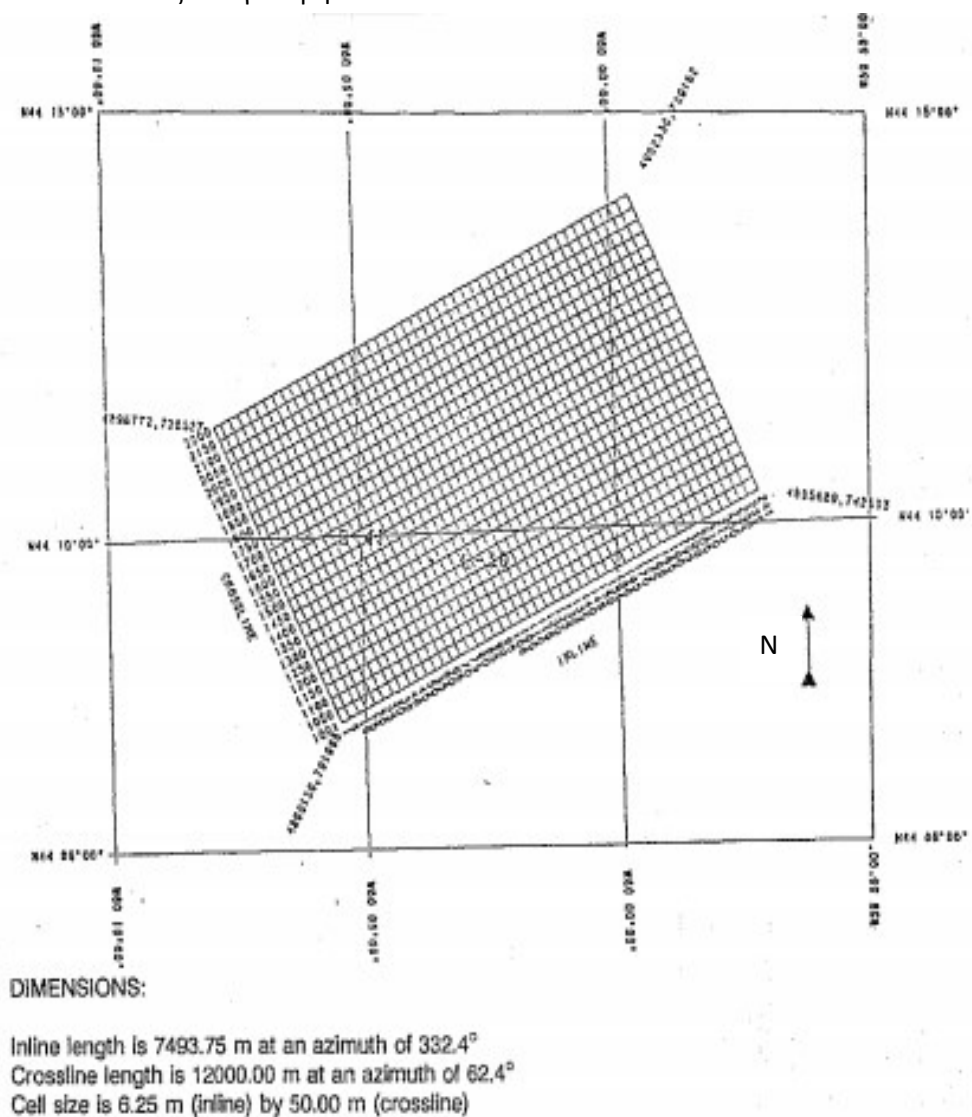
συστοιχιών ελέγχονταν συνεχώς για να διατηρήσουν τον χρόνο καθυστέρησης πυροδότησης μεταξύ των συστοιχιών στα 51,2ms+/-2 ms. Στην **Εικόνα 2.14** απεικονίζεται το διάγραμμα του πλοίου, των συστοιχιών των πηγών και του καλωδίου των υδροφώνων.

Type	PNUCON/Sleeve Hybrid Array
Total Array Volume (active)	59.25 L (3616 cu in)
Total Volume of Spares	13.96 L (852 cu in)
Operating Pressure	13.1 - 13.8 MPa (1900 - 2000 psi)
Operating Depth	7 m +/- 1
Timing Controller	TIGER II
Firing Delay	51.2 msec
Distance, Stern to centre of array	46.20 m
Array Spread from Outer to Outer	32 m
Array String Length	
Inners	19.225 m
Outers	17.286 m
Compressor Types	<p>1 LMF compressor rated at 490.78 L/s at 13.8 MPa. This is driven by a V-12 Deutz engine direct on the two stage screw end which supplies 2.1 MPa to the reciprocal end which is a two stage piston with a final discharge pressure of 13.8 MPa.</p> <p>1 LMF compressor rated at 566.28 L/s at 13.8 MPa. This is driven by V-12 Deutz engine direct on the screw end which supplies 1.4 MPa to the reciprocal end which is a three stage piston with a final discharge pressure of 13.8 MPa.</p> <p>1 LMF booster compressor rated at 566.28 L/s at 13.8 MPa. This is driven by a 3406B CAT engine. Low pressure air (2.1 MPa) is supplied by two Sullair 300 screw stand alone compressors driven by individual 3406B cat engines.</p> <p>2 Sullair 300 compressors driven by 3406 CAT engines.</p>

Εικόνα 2. 13: Πληροφορίες πηγής (Πηγή: Crane and Clack, 1992).

Περιοχή μελέτης

Στην **Εικόνα 2.15** αναπαριστάται η θέση της περιοχής μελέτης. Η περιοχή αυτή καλύπτεται από 600 γραμμές in-line (Line no. 1000 μέχρι 1600) συνολικού μήκους 7493,75m με διεύθυνση (αζιμούθιο) $332,4^\circ$ και 481 γραμμές cross-lines (Line no. 1000 μέχρι 1481) συνολικού μήκους 12000m με διεύθυνση (αζιμούθιο) $62,4^\circ$. Στην ίδια εικόνα, αποτυπώνονται οι θέσεις των γεωτρήσεων L-30 και B-41.



Corners	Inline	Crossline	Northing	Easting	y	x
P1	1	1001	44°07'46"N	60°06'00"W	4890130.78	731998.45
P2	1	2200	44°11'25"N	60°06'26"W	4896772.05	728527.16
P3	241	1001	44°10'34"N	59°57'53"W	4895689.47	742633.34
P4	241	2200	44°14'13"N	60°00'19"W	4902330.74	739162.05

(Note: UTM coordinates are based on the Clarke 1866 spheroid with central meridian -63°).

Εικόνα 2.15: Κάτοψη της περιοχής Penobscot όπου φαίνονται οι inline και οι cross-line γραμμές, καθώς και οι θέσεις των γεωτρήσεων B-41 και L-30 (Πηγή: Crane and Clack, 1992)

2.3.2. Γεωτρητικά δεδομένα

Στην περιοχή έχουν γίνει δύο γεωτρήσεις από την Petro-Canada/ Shell Penobscot, η L-30 με βάθος 4267 m και η B-41 με βάθος 3444 m, διαπερνώντας τους σχηματισμούς Misaine και Baccara που αποτελούν μέρος του σχηματισμού Abenaki.

Η L-30 εντόπισε θέσεις με πετρέλαιο αλλά με μικρό πορώδες. Οι διαγραφίες που έχουν γίνει στις γεωτρήσεις (well log) είναι οι ακόλουθες: πυκνότητας, ακουστικές, ακτίνων γάμμα, φυσικού δυναμικού (spontaneous potential), νετρονίων, και ηλεκτρικές διαγραφίες (Εικόνα 2.16).

Η γεώτρηση B-41 διατρήθηκε σε ρηχή δομή ψαμμιτών της πρώιμης Κρητιδικής περιόδου πάνω από το σχηματισμό Abenaki όπου ανακαλύφθηκαν εμφανίσεις υδρογονανθράκων μη εμπορικά εκμεταλλεύσιμες (Εικόνα 2.16).

Penobscot B-41		Penobscot L-30	
Well Summary		Well Summary	
<u>GENERAL INFORMATION</u>		<u>GENERAL INFORMATION</u>	
D #	169	D #	165
Company	Shell Canada Resources	Company	Petro-Canada
Location	44°10'02".44" N 60°06'32.72" W	Location	44°09'43".55" N 60°04'09.33" W
UWI	300B414420060300	UWI	300L304410060000
Area	Scotian Shelf	Area	Scotian Shelf
Spud Date	February 18, 1977	Spud Date	July 18, 1976
Well Term. Date	March 30, 1977	Well Term. Date	September 23, 1976
Drilling Rig	Sedco H	Drilling Rig	Sedco H
Total Depth (m)	3444	Total Depth (m)	4267
Water Depth MD (m)	118	Water Depth MD (m)	137.5
Rotary Table (m)	30	Rotary Table (m)	29.9
Well Status	P&A	Well Status	P&A
Well Type	Exploratory	Well Type	exploratory
Info. Release Date	released	Info. Release Date	released

Εικόνα 2.16 : Γενικές πληροφορίες των γεωτρήσεων B-41 και L-30 (Πηγή: Crane and Clack, 1992)

2.4 Ιστορικό επεξεργασίας των δεδομένων ανάκλασης

Τα βήματα επεξεργασίας* που έχουν πραγματοποιηθεί στα δεδομένα πιστοποιήθηκαν από τα headers files των δεδομένων με την χρήση του προγράμματος Opendtect και είναι τα ακόλουθα:

- 1 Ανασχηματισμός των αρχικών δεδομένων
- 2 Διορθώσεις στα δεδομένα πλοήγησης
- 3 Αφαίρεση της φάσης της κυματομορφής της πηγής (Designature Processing)

*Τα βήματα επεξεργασίας αφορούν τα δισδιάστατα δεδομένα όπως αυτά αποκτήθηκαν πριν και όχι τα τρισδιάστατα σεισμικά δεδομένα της ίδιας περιοχής καθώς δεν κατέστη δυνατόν να ανακτηθούν τα βήματα προ-επεξεργασίας των σεισμικών 3D δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική.

- 4 Απομάκρυνση ανακλάσεων προερχόμενων από την επιφάνεια της θάλασσας (De-gosting)
- 5 Απαλοιφή του τυχαίου θορύβου
- 6 Άθροιση γειτονικών σεισμικών ιχνών
- 7 Αποσυνέλιξη πρόβλεψης: Μήκος φίλτρου(Length): 164, Χρόνος πρόβλεψης (lag): 32ms
- 8 Διόρθωση γεωμετρικής διασποράς που οφείλεται στην απόσταση πηγής γεωφώνου (Surface consistence Scaling)
- 9 Ανάλυση ταχύτητας ανά 0,5 km
- 10 Απομάκρυνση συναφούς θορύβου(Linear noise subtraction)
- 11 Εξασθένηση πολλαπλών (μετασχηματισμός Radon υπερβολικού τύπου)
- 12 Ανάλυση ταχύτητας ανά 0,5km
- 13 Παρεμβολή μεταξύ Bin με την μέθοδο Delaunay
- 14 Σεισμική χωροθέτηση πριν την υπέρθεση με την μέθοδο Kirchhoff -Μέγιστη γωνία 65 μοίρες, μήκος (aperture) 4100m, επιλογή απόστασης πηγής γεωφώνων από 175m έως 3175m (μέγεθος bin 50m)
- 15 Ανάλυση ταχύτητας ανά 0,5km
- 16 Διόρθωση της κανονικής χρονικής απόκλισης (Normal MoveOut–NMO)
- 17 Αποθήκευση σε μορφή seg-γ

2.5 Έλεγχος κατάστασης των δεδομένων

Κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα και πριν αρχίσει η επεξεργασία οι παράμετροι που ελέγχθησαν είναι οι ακόλουθοι:

- Η επικεφαλίδα του αρχείου των δεδομένων (3D/2D)
- Η επικεφαλίδα κάθε ίχνους
- Το ιστόγραμμα των τιμών των δειγμάτων

3. Υπολογισμός διευθύνουσας γωνίας κλίσης (dip steering)

Τα σεισμικά χαρακτηριστικά (attributes) αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι για την ερμηνεία των σεισμικών δεδομένων. Διευκολύνουν τη δομική και στρωματογραφική αναβάθμιση των δεδομένων, καθώς επίσης παρέχουν ενδείξεις για την λιθολογία και την εκτίμηση της περιεκτικότητας του περιεχόμενου ρευστού (π.χ. φυσικό αέριο), με σκοπό τον λεπτομερή χαρακτηρισμό του ταμιευτήρα. Για παράδειγμα, ρηγματομένες δομές μεγάλης κλίμακας ή/και διακλάσεις (subtle faults) μπορούν να ερμηνευθούν πιο αποτελεσματικά με την βοήθεια των σεισμικών χαρακτηριστικών ενός τρισδιάστατου σεισμικού κύβου.

Αν και τα μεγάλα ρήγματα μπορούν να ερμηνευθούν με χρήση παραδοσιακών διαγνωστικών κριτηρίων (π.χ απότομη διακοπή ανακλαστήρων, ανακλαστήρες μεγάλης κλίσης κλπ), τα μικρότερα ρήγματα (subtle faults), τα οποία συχνά είναι σημαντικής εξερευνητικής ή γεωλογικής σημασίας, συνήθως δεν είναι ορατά από τα συμβατικά εργαλεία σεισμικής απεικόνισης (π.χ. σεισμικές τομές χωροθέτησης ή οριζόντιες τομές). Αυτό συμβαίνει γιατί οι δομές αυτές εμφανίζουν μικρότερα «αποτυπώματα» στις καταγραφές από την διακριτική ικανότητα της σεισμικής μεθόδου η οποία εξαρτάται από την συχνότητα, τον λόγο σήματος προς θόρυβο του συνόλου των δεδομένων και από το βάθος του ορίζοντα ανάκλασης (Ifeanyi Odoh B., et al 2014). Στην παρούσα εργασία έχει χρησιμοποιηθεί το σεισμικό χαρακτηριστικό της διευθύνουσας κλίσης (dip steering). Ακόμα, η ανάλυση του εν λόγω σεισμικού χαρακτηριστικού βοηθάει στον προσδιορισμό των ρηγμάτων που δεν είχαν ταυτοποιηθεί με συμβατικές μεθόδους ερμηνείας. Η ταυτοποίηση των ρηγμάτων είναι απαραίτητη για τον αποτελεσματικό προσδιορισμό και την χαρτογράφηση του υπεδάφους. Η δομική ερμηνεία (structural interpretation) των σεισμικών δεδομένων, που προέρχονται από σεισμικές ανωμαλίες που σχετίζονται με τα μικρής κλίμακας ρήγματα και έχουν σεισμική απόκριση παρόμοια με τον σεισμικό θόρυβο, είναι περίπλοκη. Σεισμικά χαρακτηριστικά έχουν χρησιμοποιηθεί επί χρόνια για τον προσδιορισμό ρηγμάτων και στρωματογραφικών χαρακτηριστικών που είναι δύσκολο να χαρτογραφηθούν με την συμβατική χρήση των σεισμικών πλατών. Στη παρούσα εργασία έχουν εφαρμοσθεί σεισμικά χαρακτηριστικά που επιτρέπουν τον ακριβή εντοπισμό και χαρτογράφηση των ρηγμάτων και των διακλάσεων.

Σεισμικά χαρακτηριστικά ορίζονται ως όλες οι πληροφορίες που λαμβάνονται από σεισμικά δεδομένα, είτε κάνοντας άμεσες μετρήσεις είτε με την λογική ή με βάση την εμπειρία. Τα σεισμικά χαρακτηριστικά είναι παράγωγα των βασικών σεισμικών μετρήσεων που είναι ο χρόνος, το πλάτος, η συχνότητα και η εξασθένιση των σεισμικών κυμάτων. Επίσης έχουν οριστεί ως οι μετρήσεις που βασίζονται στα σεισμικά δεδομένα όπως είναι το στιγμιαίο πλάτος (envelop), η στιγμιαία φάση (instantaneous phase) , η στιγμιαία συχνότητα (instantaneous frequency) , η κλίση (dip), η κλίση αζιμούθιου (dip azimuth) και άλλα (Ifeanyi OdohB., et al 2014). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ερμηνεία των χαρακτηριστικών συμπληρώνει/ενισχύει τη γεωλογική ερμηνεία.

Στο επόμενο βήμα της προετοιμασίας των δεδομένων υπολογίστηκε η διευθύνουσα κλίση με χρήση του εργαλείου Steering cube. Στον τρισδιάστατο όγκο των δεδομένων της

διευθύνουσας κλίσης (Steering Cube) περιλαμβάνονται πληροφορίες για τις τιμές της κλίσης σε κάθε προσανατολισμό (αζιμούθιο). Σε αυτήν την διεργασία δημιουργούνται δύο steering cubes: (1) Ο **"Detailed steering cube"** ο οποίος διατηρεί στα δεδομένα όλες τις απότομες εναλλαγές κλίσεων των σεισμικών ανακλάσεων και (2) ο **"Background steering cube"** ο οποίος αποθηκεύει την συνολική τάση της κλίσης στα τρισδιάστατα σεισμικά δεδομένα. Περισσότερες πληροφορίες παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

3.1. Βασικές αρχές θεωρίας Dip-Steering και είδη Steering Cube

Ο υπολογισμός της διευθύνουσας κλίσης (Dip-Steering) των σεισμικών δεδομένων (dip-field) σε μια δεδομένη αρχική θέση αποτελεί απαραίτητη διεργασία για την χαρτογράφηση των σεισμικών ανακλαστών με χρήση αυτόματης επιλογής (auto-tracking). Οι υπολογισμένες κλίσεις στο OpendTect αποθηκεύονται σε όγκο δεδομένων, που αφορούν την διευθύνουσα κλίση (Steering-Cube), ο οποίος περιέχει δύο τιμές για κάθε σεισμική θέση: την κλίση στην in-line και την κλίση στην cross-line διεύθυνση.

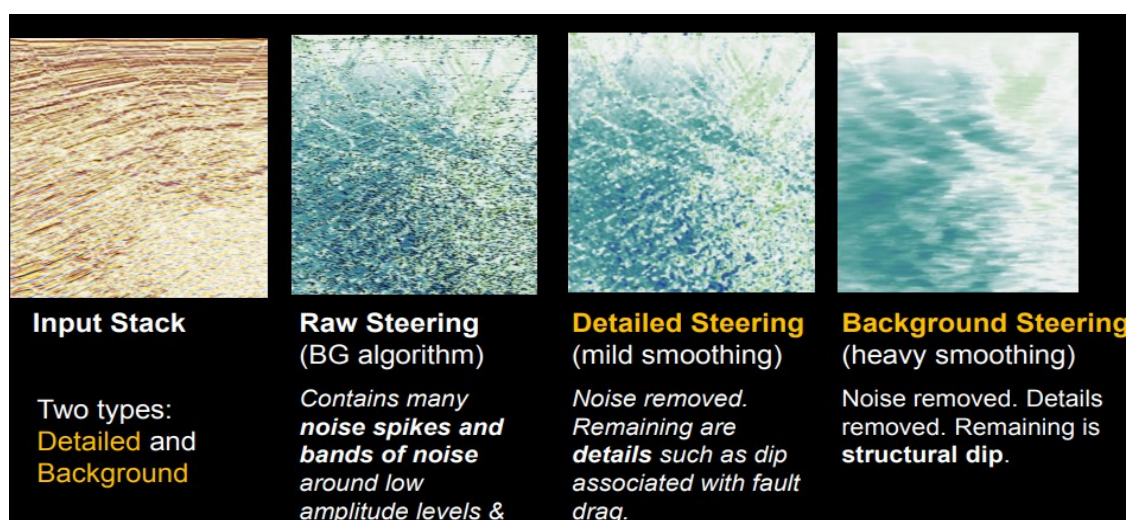
Όπως προκύπτει από την ιστοσελίδα του OpendTect (**OpendTect, Dip- Steering, 2002-2015**), οι βασικές χρήσεις του Dip-steering είναι:

1. Ο υπολογισμός άλλων σεισμικών χαρακτηριστικών (attributes) από τις τιμές των προσανατολισμένων κλίσεων των δεδομένων. Για παράδειγμα, η εξαγωγή χαρακτηριστικών ομοιότητας (Similarity), υφής (Texture), τρισδιάστατων στατιστικών δεδομένων (Volume Statistics) και άλλα. Επίσης, τα Νευρωνικά Δίκτυα βασίζονται σε όγκους "πιθανότητας" όπως είναι ο Chimney Cubes και Fault Cubes που συμπεριλαμβάνουν πολλά σεισμικά χαρακτηριστικά (attributes) από τα dip-steered δεδομένα.
2. Για την εισαγωγή φίλτρων στα dip-steered δεδομένα.
3. Για αυτόματη παρακολούθηση οριζόντων (Auto-track horizons). Για παράδειγμα: Ο Horizon Cube auto-tracker που μπορεί να ανιχνεύσει σεισμικούς ορίζοντες απευθείας στα dip-steered δεδομένα, ο Conventional Amplitude and Similarity Tracker που μπορεί περιοδικά να λαμβάνει υπόψη του τις τιμές της κλίσης για να περιορίσει τον ανιχνευτή (tracker).
4. Για δημιουργία ενός αραιού πλέγματος χαρτογράφησης οριζόντων. Ο dip-steered αλγόριθμος πλέγματος γεμίζει τα κενά των απεικονισμένων τμημάτων καθώς και των αχαρτογράφητων τμημάτων (unmapped parts) δημιουργώντας έναν σεισμικό ορίζοντα που δεν περιέχει κενά σε όλη την έκταση της σεισμικής έρευνας.

Είδη Steering-Cube

Ανάλογα με το είδος της επεξεργασίας προτείνεται η χρήση περισσότερων από έναν Steering-Cube. Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο Steering Cubes (**Opentect, Background, 2002-2015**). Υπάρχουν τα εξής είδη:

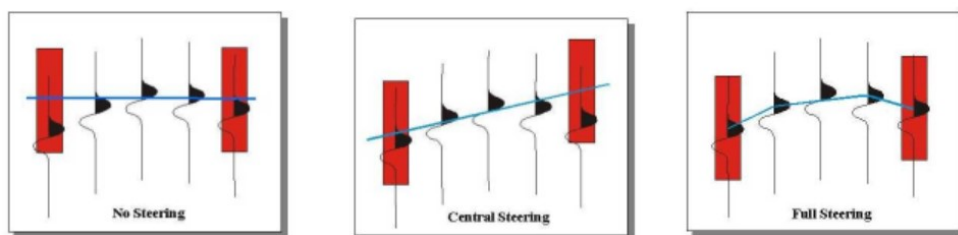
1. Ο **"Detailed Steering Cube"** περιέχει κλίσεις οι οποίες υπολογίζονται από τον αλγόριθμο "dip-computation". Ο "Detailed Steering Cube" χρησιμοποιείται για να διατηρηθούν οι λεπτομέρειες στα δεδομένα (**Εικόνα 3.1**).
2. Ο **"Background Steering Cube"** ουσιαστικά είναι μια εξομαλυσμένη έκδοση του "Detailed Steering Cube". Ο "Background Steering Cube" περιέχει λιγότερο θόρυβο και οι κλίσεις ακολουθούν μεγαλύτερες δομικές τάσεις. Συνήθως επιλέγεται για διεργασίες εφαρμογής φίλτρων στα δεδομένα (**Εικόνα 3.1**).



Εικόνα 3.1: Απεικόνιση των διαφορετικών ειδών Steering Cube (Πηγή:Opentect, Qayyum & Groot/ Introduction to the Steering Cube)

Κατά τη δημιουργία του Steering Cube δίνεται η δυνατότητα επιλογής από το Opentect δύο τρόπων επεξεργασίας των δεδομένων οι οποίοι είναι οι ακόλουθοι:

- α) Στο **"Central Steering"** υπολογίζεται η κλίση ανά κατεύθυνση σε κάθε σημείο των δεδομένων από ένα πλήθος γειτονικών σεισμικών ίχνων (**Εικόνα 3.2**).
- β) Στο **"Full Steering"** οι κλίσεις και το αζιμούθιο υπολογίζονται σε κάθε σημείο των δεδομένων από τα γειτονικά τους σεισμικά ίχνη (**Εικόνα 3.2**).



Εικόνα 3.2: Τα σχήματα απεικονίζουν τις διαφορές ανάμεσα στο 'No Steering', 'Central Steering' και 'Full Steering' και περιγράφουν την ισοδύναμη διαδικασία του υπολογισμού της κλίσης στις 2 διαστάσεις. Στην πραγματικότητα είναι μια διαδικασία που εφαρμόζεται στις 3 διαστάσεις (Πηγή: **Opentect, Background 2002-2015**)

Μετά την επιλογή του είδους του "Steering Cube" (Background, Detail steering cube) για την δημιουργία του απαιτείται η επιλογή του είδους του αλγόριθμου με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός της κλίσης "Steering algorithm ". Τα είδη αυτά είναι τα ακόλουθα:

- 1 **PCA (Principal Component Analysis)**
- 2 **Ο Phase- gradient Steering**
- 3 **Ο FFT Steering**

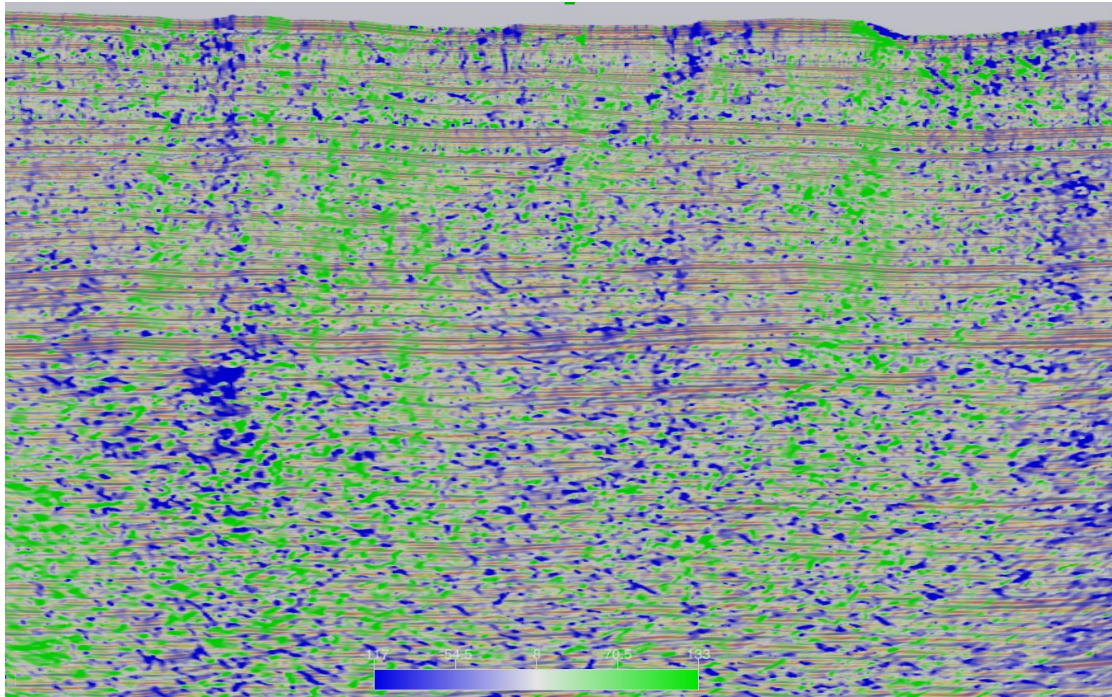
Σύμφωνα με τον Οδηγό χρήσης του OpendTect ο αλγόριθμος "**Phase- gradient Steering**" συστήνεται να χρησιμοποιείται όταν εισάγονται dip-steered φίλτρα καθώς και για τον υπολογισμό των dip-steered χαρακτηριστικών τους. (**OpendTect, Create Steering Cube, 2002-2018**). Για τον λόγο αυτό ο εν λόγω αλγόριθμος επιλέχθηκε για την δημιουργία του "Detail Steering Cube" καθώς και του "Background Steering Cube".

3.2. Detailed & Background Steering Cube

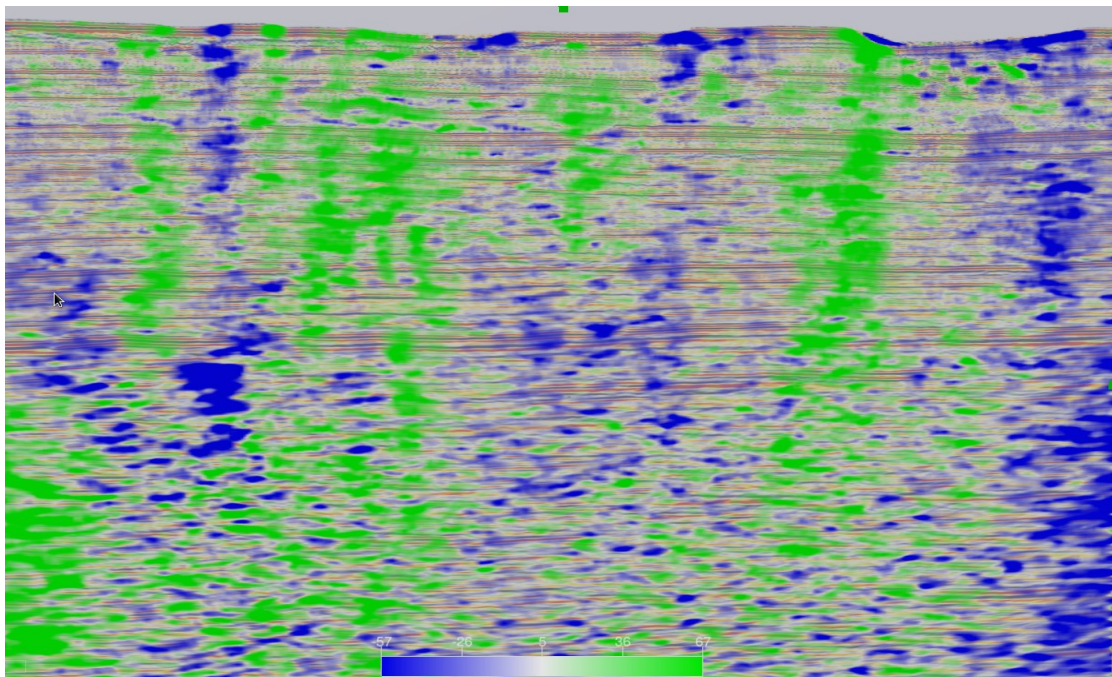
Για τη δημιουργία τόσο του Detailed Steering Cube όσο και του Background Steering Cube χρησιμοποιούνται τα αρχικά δεδομένα και για τον υπολογισμό της κλίσης του ανακλαστήρα ο αλγόριθμος "**Phase- gradient**". Ο υπολογισμός της κλίσης γίνεται μέσα σε έναν μικρό κύβο $3*3*3$ δειγμάτων γύρω από κάθε ένα δείγμα .

Στην **Εικόνα 3.3** διακρίνεται ο "Detailed Steering Cube" μετά την εφαρμογή απλού φίλτρου ενδιάμεσης τιμής (mild median filter) και στον οποίο διατηρούνται στα δεδομένα όλες οι απότομες εναλλαγές κλίσεων του ανακλαστήρα.

Στην **Εικόνα 3.4** διακρίνεται ο "Background Steering Cube" μετά την εφαρμογή έντονου φίλτρου ενδιάμεσης τιμής (heavy median filter) και ο οποίος αποθηκεύει την συνολική τάση της κλίσης του ανακλαστήρα στα τρισδιάστατα σεισμικά δεδομένα. Οι κύβοι αυτοί θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια για την δημιουργία του Dip Steer Median Filter (DSMF), Dip Steer Diffusion Filter (DSDF) και Fault Enchancement Filter (FEF) κύβου, τα οποία αναλύονται παρακάτω.



Εικόνα 3. 3: Γραμμή inline 1300. Με πράσινο-μπλε χρώμα απεικονίζονται οι κλίσεις του ανακλαστήρα εύρος τιμών από -117 έως 133 της εν λόγω γραμμής στην cross-line διεύθυνση ενώ στο πίσω μέρος απεικονίζονται τα αρχικά δεδομένα της εν λόγω γραμμής.



Εικόνα 3. 4: Γραμμή inline 1300. Με έντονο πράσινο-μπλε χρώμα απεικονίζονται οι κλίσεις του ανακλαστήρα με εύρος τιμών από -57 έως 67 μοίρες της εν λόγω γραμμής στην crossline διεύθυνση ενώ στο πίσω μέρος απεικονίζονται τα αρχικά δεδομένα της εν λόγω γραμμής.

4. Αναβάθμιση των 3D δεδομένων σεισμικής ανάκλασης στο χώρο

Η αφαίρεση του τυχαίου θορύβου συνεπάγεται την αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο. Η διαδικασία αυτή ενισχύει περαιτέρω την πλευρική συνέχεια (lateral continuity) των σεισμικών ανακλάσεων και την ευκρίνεια των γεωλογικών χαρακτηριστικών που απεικονίζονται από τα δεδομένα. Αυτό επιτυγχάνεται, με την χρήση χωρικών φίλτρων (Structure-oriented filters-SOF) τα οποία α) εξομαλύνουν τα χωρικά χαρακτηριστικά των ανακλαστήρων και β) ενισχύουν τις ακμές (edges) του κύβου. Η εξομάλυνση επιτυγχάνεται με την εφαρμογή του στατιστικού φίλτρου Dip-steered Median Filter (DSMF) στα αρχικά δεδομένα. Με αυτό το φίλτρο, καθορίζεται ένας κύκλος μελέτης όπου το πλάτος του κεντρικού σημείου αντικαθίσταται με την ενδιάμεση τιμή των πλατών όλων των σημείων που περιέχονται σε αυτόν. Ο εξομαλυμένος κύβος που προκύπτει ονομάζεται Dip-steered Median Filter (DSMF) και μπορεί να διατηρεί την πλευρική συνέχεια των σεισμικών ανακλάσεων εντός του όγκου των δεδομένων. Ακολουθεί η ενίσχυση των ακμών του κύβου μέσω του φίλτρου Dip-Steered Diffusion filter (DSDF). Αυτό το φίλτρο αξιολογεί την ποιότητα των σεισμικών δεδομένων σε ένα υπο-όγκο των δεδομένων, που έχει επίσης τη μορφή ενός κύκλου μελέτης, και ουσιαστικά αντικαθιστά το πλάτος του κεντρικού σημείου με αυτό του οποίου η ποιότητα θεωρείται η καλύτερη. Το αποτέλεσμα αυτής της διεργασίας είναι η δημιουργία του DSDF σεισμικού κύβου.

Στην συνέχεια, οι δύο αυτοί σεισμικοί κύβοι (DSMF & DSDF) συνδυάζονται με ένα προϋπολογισμένο σεισμικό χαρακτηριστικό ομοιότητας (similarity attribute) χρησιμοποιώντας ως τιμή αναφοράς ομοιότητας μια οριακή τιμή. Έπειτα, πραγματοποιείται η επεξεργασία των δεδομένων για την ανάδειξη ρηγμάτων μέσω του φίλτρου Fault Enhancement Filter (FEF). Ειδικότερα, για τη δημιουργία του FEF σεισμικού κύβου χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου ο κύβος DSMF όταν η τιμή της ομοιότητας σε κάποιο σημείο (inline/ crossline/ time sample) είναι υψηλότερη από την οριακή τιμή, αλλιώς χρησιμοποιείται ο DSDF. Ο κύβος που δημιουργείται ονομάζεται FEF σεισμικός κύβος και ενισχύει την ευκρίνεια των ασυνεχών χαρακτηριστικών που υπάρχουν στα δεδομένα μειώνοντας τον τυχαίο θόρυβο. Τελευταία διεργασία αναβάθμισης είναι η εφαρμογή φίλτρου FEF Similarity για περεταίρω μείωση του θορύβου και ενίσχυση των ασυνεχειών.

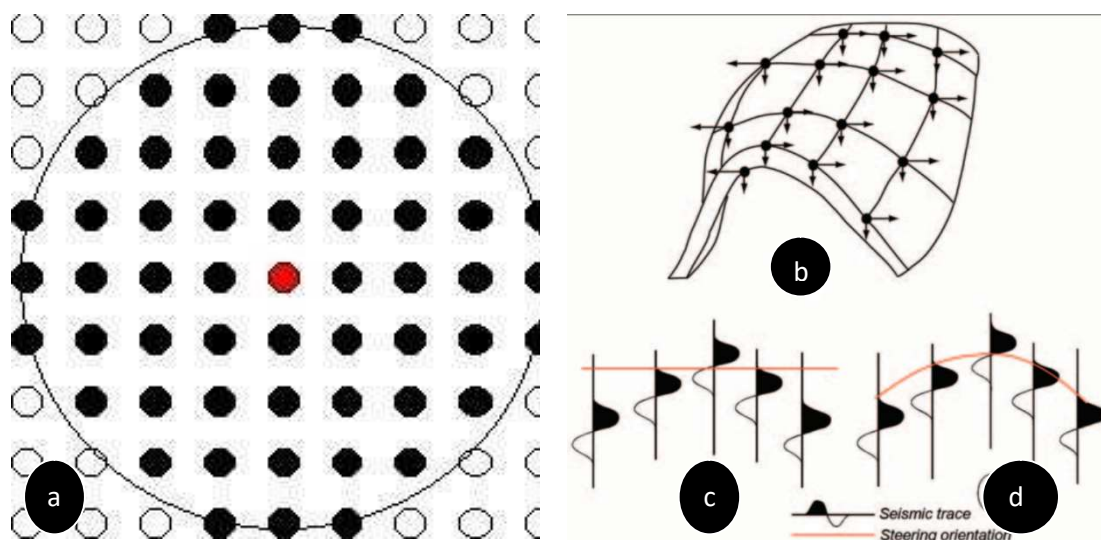
4.1. 3D δεδομένα ενδιάμεσων τιμών (Dip-steered Median Filter - DSMF)

Το DSMF είναι ένα είδος φίλτρου που μειώνει το θόρυβο των σεισμικών δεδομένων του κύβου και ενισχύει την πλευρική συνέχεια των σεισμικών ανακλάσεων. Ουσιαστικά, για κάθε σημείο του αρχικού κύβου δημιουργείται ένας κύκλος μελέτης με κέντρο ένα σεισμικό ίχνος και ακτίνα μεγέθους που καθορίζεται από τον χρήστη (**Εικόνα 4.1a**). Ο κύκλος αυτός κινείται αντλώντας τις πληροφορίες κλίσης και αζιμούθιου από ίχνος σε ίχνος εντός του steering cube (**Εικόνα 4.1b,d**). Το μέγεθος της ακτίνας μελέτης καθορίζεται εξετάζοντας διαφορετικά μεγέθη προκειμένου να εντοπιστεί το βέλτιστο, δηλαδή αυτό στο οποίο δεν εισάγονται σφάλματα και δεν χάνεται σημαντική γεωλογική πληροφορία. Το πλάτος στο

κέντρο του κύκλου μελέτης αντικαθίσταται με την ενδιάμεση τιμή (media value) των πλατών των σεισμικών ανακλάσεων εντός του κύκλου μελέτης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εξομάλυνση των σεισμικών δεδομένων ενώ παράλληλα τα άκρα διατηρούνται (**Opendtect, Dip-steered Median Filter, 2012-2015**).

Το φίλτρο αυτό, όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με έναν "Steering Cube" εκτελεί τις ακόλουθες διεργασίες:

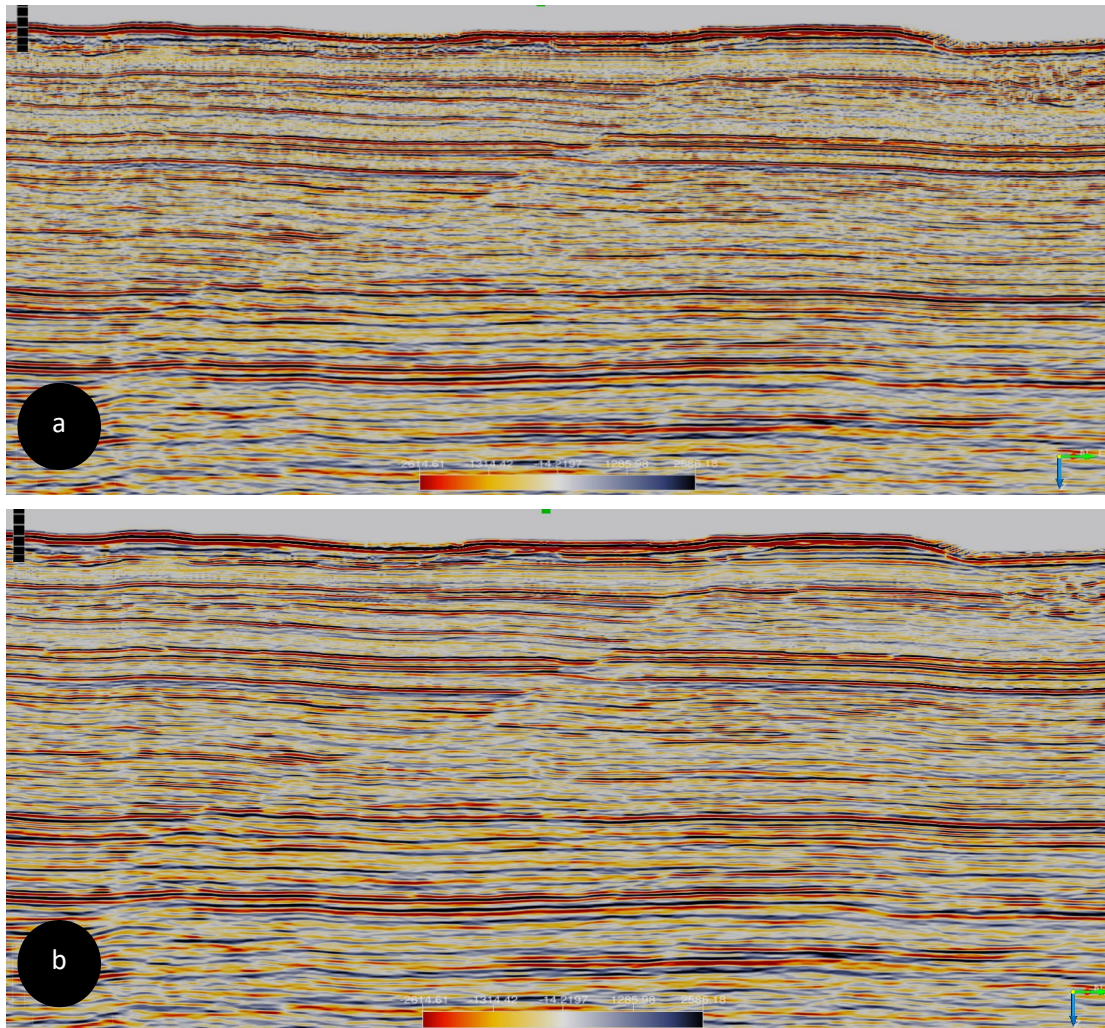
1. Καθορίζεται η ακτίνα αναζήτησης
2. Εξάγεται το πλάτος του σημείου της αρχικής θέσης (**Εικόνα 4.1a** - κόκκινο σημείο).
3. Η τοπική κλίση και το αξιμούθιο του ανακλαστήρα εκτιμώνται στο επόμενο ίχνος.
4. Εξάγεται το πλάτος του σημείου αυτού.
5. Τα βήματα 3 και 4 επαναλαμβάνονται για όλα τα ίχνη (traces) εντός της ακτίνας του κύκλου μελέτης.
6. Το πλάτος της αρχικής θέσης αντικαθίσταται με την ενδιάμεση τιμή των πλατών όλων των σημείων.
7. Τα βήματα 2 μέχρι το 6 επαναλαμβάνονται για όλα τα ίχνη εντός του κύβου, αλλάζοντας κάθε φορά το αρχικό σημείο.



Εικόνα 4.1: **a)** Σχηματική αναπαράσταση του κύκλου μελέτης, του οποίου η ακτίνα αναζήτησης καθορίζεται από το χρήστη. Κάθε μαύρος κύκλος αναπαριστά ένα σεισμικό χαρακτηριστικό (event). Το πλάτος του κόκκινου κύκλου υπολογίζεται ως η ενδιάμεση τιμή των πλατών των μαύρων κύκλων. **b)** Τρισδιάστατη σχηματική απεικόνιση της έννοιας του dip-steering. Τα βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση του steering. **c)** Δισδιάστατη σχηματική απεικόνιση του dip-steering όπου δεν εφαρμόζεται steering στα δεδομένα και τα τμήματα των ιχνών ευθυγραμμίζονται οριζόντια. **d)** Δισδιάστατη σχηματική απεικόνιση του dip-steering όπου γίνεται εφαρμογή διόρθωσης πλήρους steering εξασφαλίζοντας ότι η κλίση και το αξιμούθιο των ιχνών αναβαθμίζονται στην θέση κάθε ίχνους.

Εάν η ακτίνα αναζήτησης του κύκλου είναι 4 ίχνη (traces) αυτό αντιστοιχεί σε 57 σημεία (**Εικόνα 4.1a**). Θα πρέπει να τονιστεί ότι ο δίσκος δεν βρίσκεται ούτε σε οριζόντια ούτε σε κατακόρυφη θέση αλλά ακολουθεί τα σεισμικά χαρακτηριστικά από ίχνος σε ίχνος. Ο δίσκος είναι κεκλιμένος παράλληλος με τα σεισμικά γεγονότα (ανακλαστήρες).

Το στατιστικό φίλτρο DSMF εφαρμόζεται πάνω στο Background Steering Cube. Αρχικά, η ακτίνα μέσα στην οποία γίνεται αναζήτηση των χαρακτηριστικών έχει οριστεί step out [1/1]. Το Step out ορίζει την ακτίνα του κύκλου μελέτης στην inline και cross-line κατεύθυνση, και καθορίζει το μέγεθος του δείγματος. Στην συνέχεια, γίνεται αξιολόγηση και επανεκτίμηση της τυχαίας αρχικής τιμής για την εύρεση του βέλτιστου αποτελέσματος. Στη παρούσα εργασία, διαπιστώθηκε ότι τα σεισμικά δεδομένα απεικονίζονται καλύτερα με ακτίνα αναζήτησης 2 ίχνων (Stepout [2/2]) που αντιστοιχεί σε 21 σημεία (**Εικόνα 4.2b**).

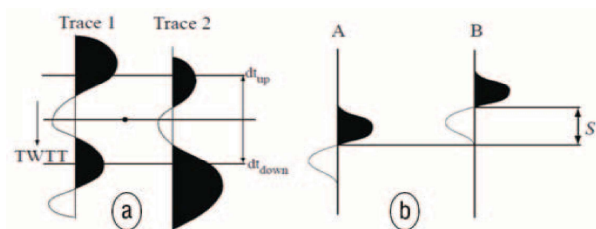


Εικόνα 4.2: **a)** PSTM Σεισμικά Δεδομένα (Pre Stack Time Migration) **b)** Σεισμικά δεδομένα μετά την εφαρμογή του DSMF φίλτρου, όπου η ακτίνα αναζήτησης καθορίστηκε στα 2 ίχνη (Stepout [2,2]), με αποτέλεσμα την αφαίρεση του τυχαίου θορύβου, όπως φαίνεται συγκριτικά με την **Εικόνα 4.2a**.

4.2. 3D δεδομένα διάχυσης (Dip-steered Diffusion Filter - DSDF)

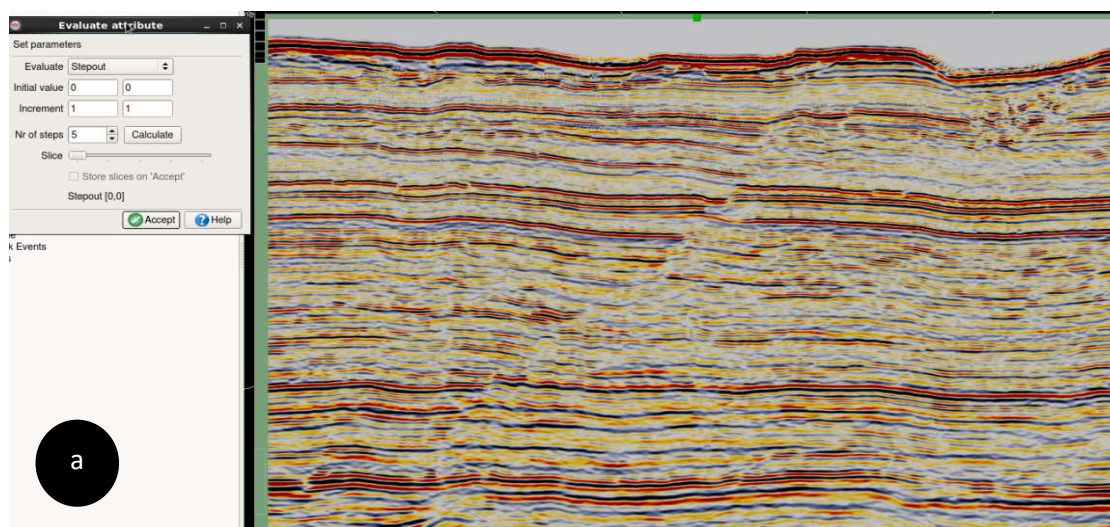
Το φίλτρο DSDF ενισχύει της χαμηλής ποιότητας σεισμικά δεδομένα κοντά στα ρήγματα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ευκρίνεια των ρηγμάτων (**Opendtect, Dip-steered Diffusion Filter, 2002-2018**). Για την εφαρμογή του DSDF, επιλέγεται ως input χαρακτηριστικό η ελάχιστη ομοιότητα (minimum similarity) ανάμεσα σε διαφορετικά ίχνη. Συγκεκριμένα, γίνεται σύγκριση της ομοιότητα ανάμεσα στις κυματομορφές ζευγών γειτονικών ίχνων και στη χρονική διαφορά ανάμεσα στα ίχνη, που ερμηνεύονται ως διανύσματα (**Κεφ. 4.4.1**)

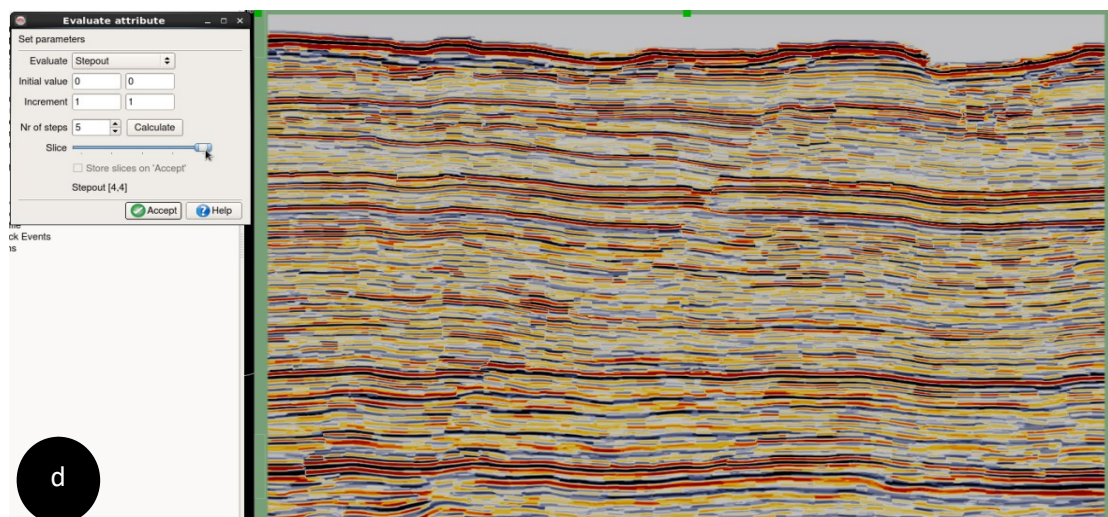
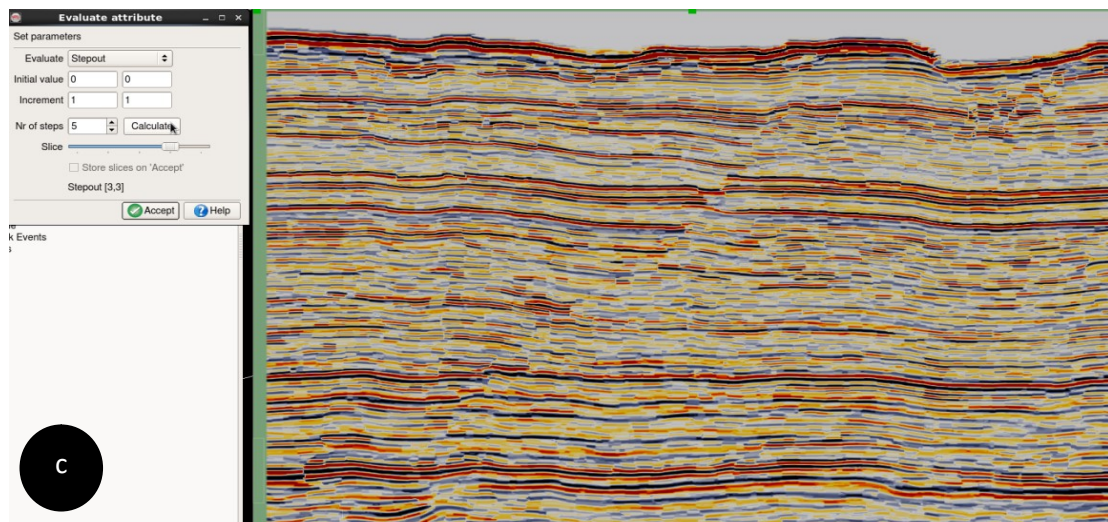
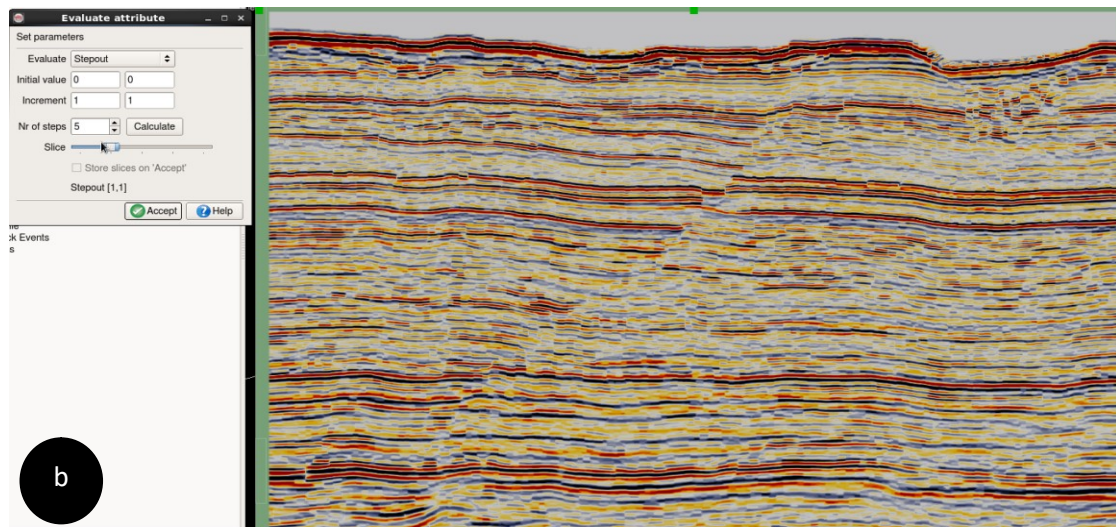
(Εικόνα 4.3a,b). Ουσιαστικά, υψηλή ομοιότητα (μέγιστη ομοιότητα = 1) σημαίνει ότι τα ζεύγη των υπό μελέτη ιχνών είναι όμοια ως προς τη κυματομορφή και το μήκος τους. Αντίθετα, χαμηλή ομοιότητα (ελάχιστη ομοιότητα = 0) σημαίνει ότι τα ζεύγη ιχνών είναι εντελώς ανόμοια, αποτέλεσμα που παρατηρείται σε περιοχές όπου το στρώμα της γης διακόπτεται, όπως συμβαίνει στις περιοχές των ρηγμάτων.



Εικόνα 4.3: Σχηματική απεικόνιση της ομοιότητας ανάμεσα σε δύο ίχνη και η επίδραση της κλίσης στον υπολογισμό της ομοιότητας των ιχνών. **a)** Η ομοιότητα ανάμεσα στα δύο ζευγάρια ιχνών ορίζεται μαθηματικά ως η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των διανυσμάτων των ιχνών κανονικοποιημένη ως προς το άθροισμα των μηκών των διανυσμάτων. **b)** Τα ίχνη A και B είναι διαφορετικά όταν συγκρίνονται οριζοντίως. Το A έχει υψηλές τιμές ενώ το B χαμηλές. Παρολαυτά, εάν συνυπολογίζεται η κλίση, το ίχνος B μετατοπίζεται προς τα κάτω κατά s ms πριν την σύγκριση και τα δύο ίχνη είναι όμοια. Έτσι, εξασφαλίζεται η ελάχιστη επίδραση της κλίσης των ανακλαστήρων στους υπολογισμούς ομοιότητας (Babangida W. Jibrin et. al, 2013).

Στην **Εικόνα 4.4a** απεικονίζονται τα δεδομένα αφού έχει εφαρμοστεί το φίλτρο DSDF. Μεταβάλλοντας το "Stepout" που ορίστηκε αρχικά, παρατηρείται να ενισχύονται και να γίνονται πιο ευκρινείς οι ακμές των σεισμικών ανακλαστήρων κοντά στα ρήγματα. Στην **Εικόνα 4.4b, 4.4c** και **4.4d** αυξάνοντας κι άλλο το Stepout παρατηρείται να ενισχύονται τα χαμηλής ποιότητας σεισμικά δεδομένα και πιο μακριά από τα ρήγματα με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται η τομή. Ύστερα από δοκιμές με διάφορες τιμές "Stepout" συμπεραίνεται ότι η τιμή Stepout [1,1] παρουσιάζει το βέλτιστο αποτέλεσμα (**Εικόνα 4.4a**).

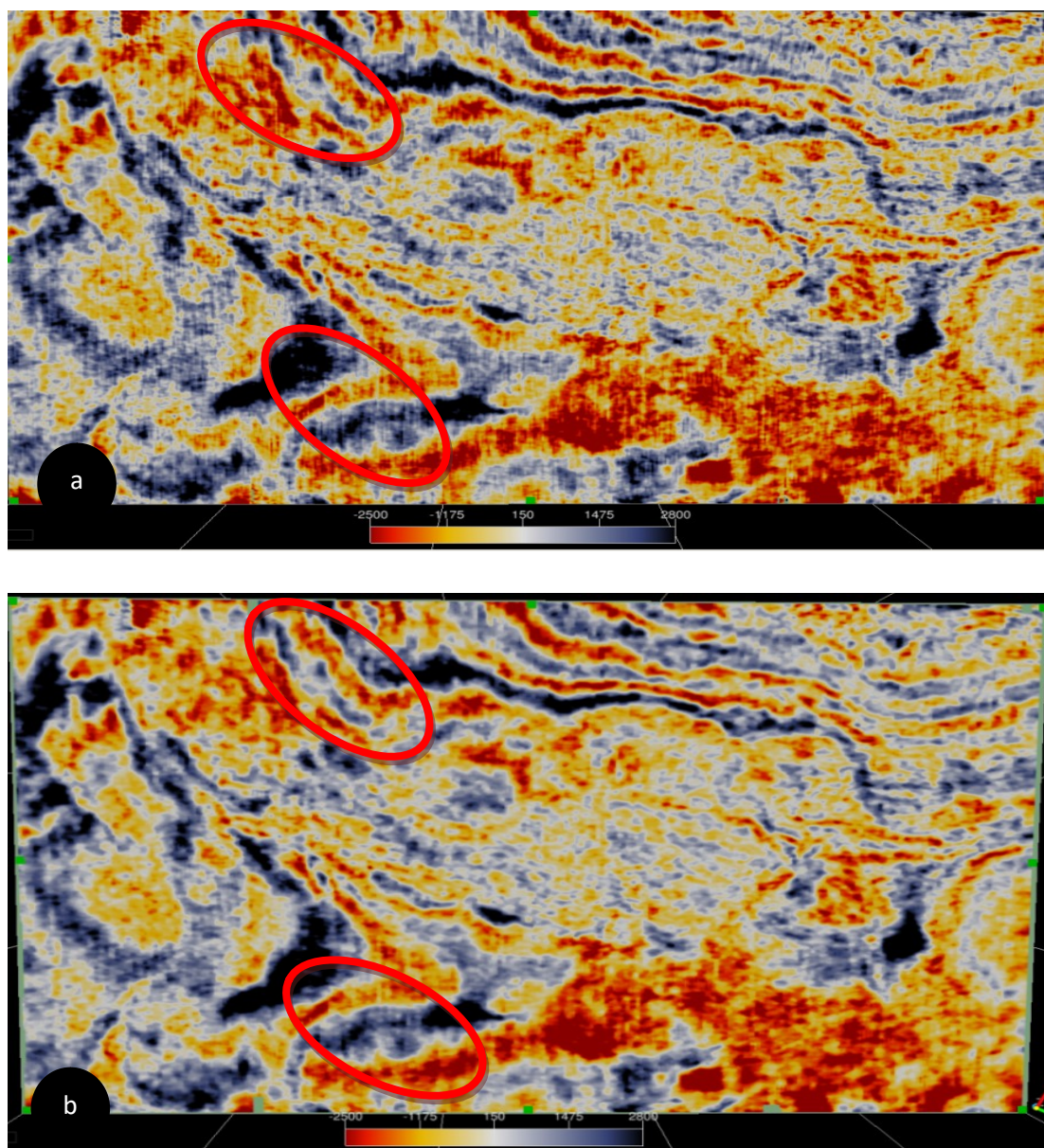




Εικόνα 4.4: Αξιολόγηση διαφορετικών τιμών stepout με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης τιμής, για την καλύτερη απεικόνιση των ρηγμάτων. **a)** Σεισμική τομή μετά την εφαρμογή του φίλτρου DSDF για τη ανάδειξη ρήγματος, In-line-1300, Stepout[0,0]. **b)** Σεισμική τομή μετά την εφαρμογή του φίλτρου DSDF για τη ανάδειξη ρήγματος, In-line-1300, Stepout[1,1]. **c)** Σεισμική τομή μετά την εφαρμογή του φίλτρου DSDF για τη ανάδειξη ρήγματος, In-line-1300, Stepout[3,3]. **d)** Σεισμική τομή μετά την εφαρμογή του φίλτρου DSDF για τη ανάδειξη ρήγματος, In-line-1300, Stepout[4,4].

4.3. 3D δεδομένα ανάδειξης ρηγμάτων (Dip-steered Fault Enhancement Filter - FEF)

Το φίλτρο FEF απομακρύνει τον θόρυβο και κάνει πιο ευκρινείς τις άκρες/ρήγματα. Το FEF ουσιαστικά αποτελεί συνδυασμό του DSMF και του DSDF, τροποποιώντας τους σεισμικούς κύβους έτσι ώστε να ενισχυθεί η ευκρίνεια των ρηγμάτων (**Opendtect, Dip-steered Fault Enhancement Filter, 2002-2018**). Βασιζόμενοι σε ένα κατώτατο όριο ομοιότητας (similarity threshold) τα δεδομένα εξομαλύνονται μακριά από τα ρήγματα με εφαρμογή του φίλτρου DSMF ή ενισχύονται στην περιοχή των ρηγμάτων με εφαρμογή του φίλτρου DSDF. (**Opendtect, Dip-steered Fault Enhancement Filter, 2002-2018**) (Εικόνα 4.5a και b).



Εικόνα 4. 5: Σύγκριση ανεπεξεργαστων και επεξεργασμένων σεισμικών δεδομένων της τομής Z-slice 1800ms. Η απεικόνιση της Z-slice γίνεται για την καλύτερη παρατήρηση των διαφορών ανάμεσα στα αρχικά δεδομένα και τα δεδομένα μετά την εφαρμογή του φίλτρου FEF. Για να γίνει εφικτή η σύγκριση έχει γίνει χρήση του ίδιου εύρους στην χρωματική κλίμακα (-2500/ 2800). **a)** Οριζόντια

σεισμική τομή στα ανεπεξέργαστα σεισμικά δεδομένα. **β)** Οριζόντια σεισμική τομή στα σεισμικά δεδομένα με χρήση του φίλτρου FEF μετά τον καθορισμό της βέλτιστης τιμής ($c_0=0.06$)

Στην συγκεκριμένη εργασία, το βέλτιστο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται για $c_0=0.6$ (**Εικόνα 4.5b**). Βέλτιστη τιμή θεωρείται εκείνη η οποία μειώνει το θόρυβο και ενισχύει τις ασυνέχειες χωρίς να παραμορφώνει τα δεδομένα. Κάνοντας σύγκριση της **Εικόνα 4.5a** και της **4.5b**, σε μερικά σημεία εμφανίζεται μείωση του θορύβου και ήπια ενίσχυση των ρηγμάτων. Το φίλτρο FEF δεν επιφέρει μεγάλες αλλαγές μετά την εφαρμογή σε σχέση με τα αρχικά δεδομένα.

4.4. Ανάλυση των χαρακτηριστικών

Η απεικόνιση των τρισδιάστατων σεισμικών δεδομένων, για τον εντοπισμό συγκεκριμένων δομικών στοιχείων (π.χ. faults) είναι πιο αποτελεσματική όταν χρησιμοποιούνται σεισμικά χαρακτηριστικά όπως η ομοιότητα (similarity) και η καμπυλότητα (curvature).

Το χαρακτηριστικό της ομοιότητας αποτελεί μορφή συνοχής που εκφράζει κατά πόσο δύο ή περισσότερα ίχνη μοιάζουν μεταξύ τους. Ομοιότητα ίση με ένα σημαίνει ότι τα ίχνη είναι πανομοιότυπα, όσον αφορά την κυματομορφή τους και τα πλάτη τους, ενώ ομοιότητα ίση με το 0 σημαίνει ότι τα ίχνη είναι εντελώς ανόμοια. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην ανάδειξη μικρών ρηγμάτων.

Τα πλεονεκτήματα της Similarity είναι τα ακόλουθα:

- Χρησιμοποιείται μια απλή μαθηματική εξίσωση για την επεξεργασία και είναι ξεκάθαρο τι συμβαίνει καθ' όλη την διάρκεια της διεργασίας.
- Συνδυάζοντας διαφορετικών ειδών ομοιότητες και άλλα χαρακτηριστικά, προκύπτουν καλύτερα αποτελέσματα σε μικρό υπολογιστικό χρόνο

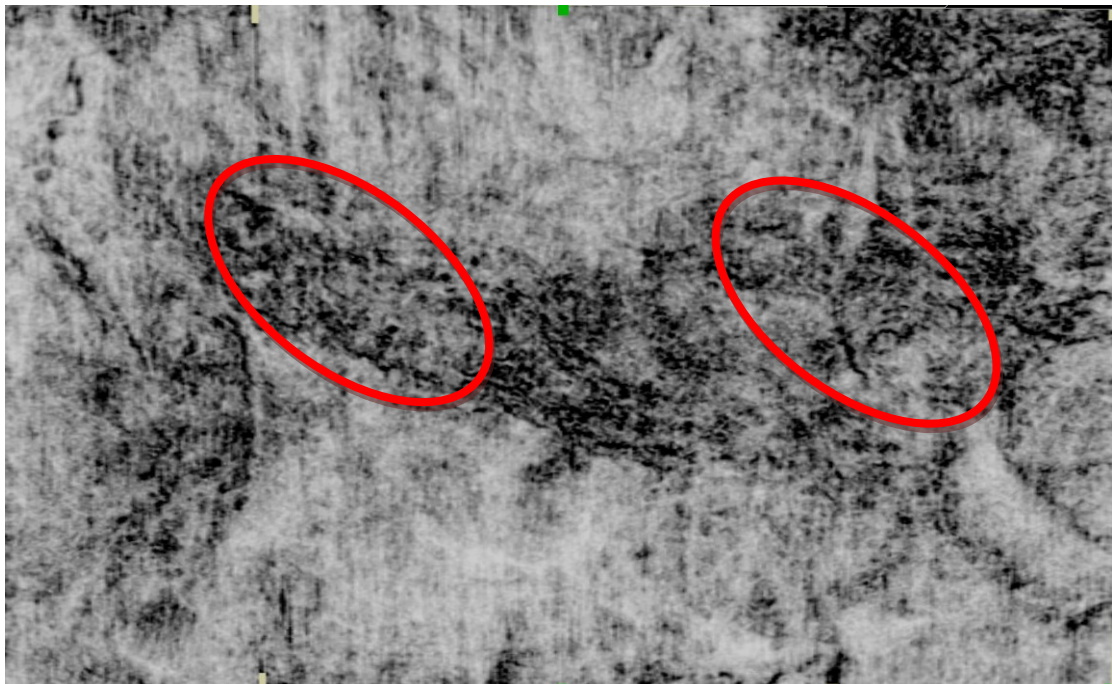
Μαθηματική περιγραφή του Μοντέλου

Η ομοιότητα ορίζεται ως ένα μέτρο την Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των διανυσμάτων διαιρεμένη με το άθροισμα του μήκους του κάθε διανύσματος. Το μήκος του διανύσματος είναι η νόρμα του L_2 , που επίσης καλείται και RMS:

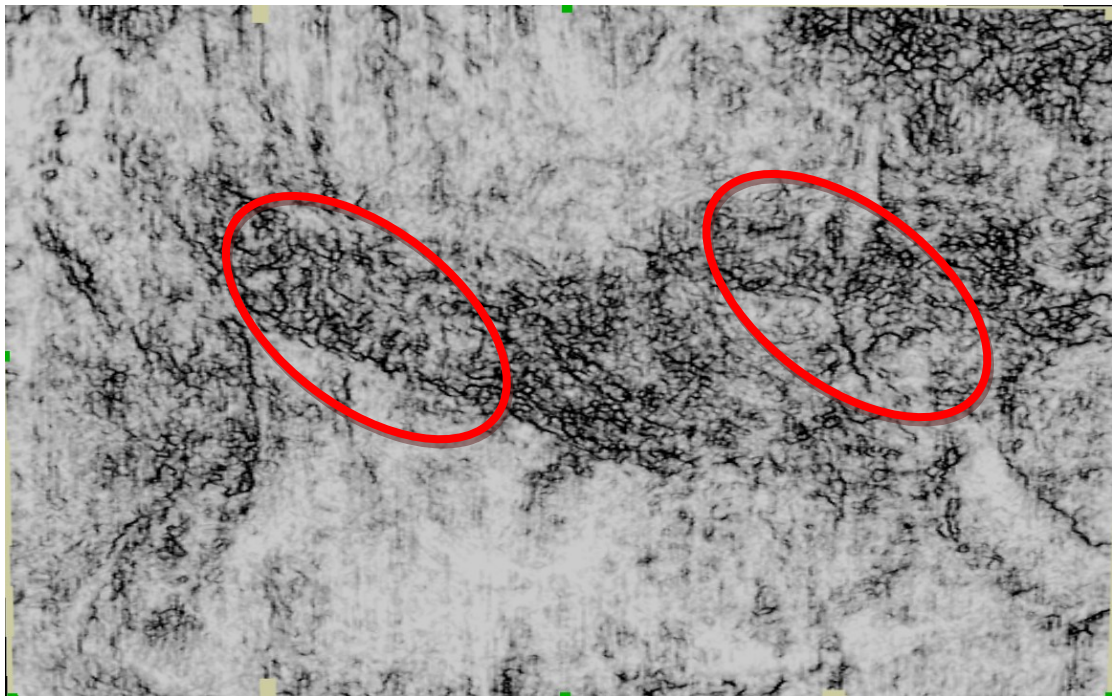
$$sim = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N X_i^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^N Y_i^2}}$$

$$sim = 1 - \frac{\sqrt{\sum x}}{\sqrt{y}}$$

Στις **Εικόνες 4.6 και 4.7** γίνεται σύγκριση του φίλτρου "Similarity". Στην **Εικόνα: 4.6** όπου εισήχθησαν τα αρχικά δεδομένα, παρατηρείται ότι υπάρχει πολύς θόρυβος και δεν φαίνονται καθαρά τα ρήγματα. Σε αντίθεση με την **Εικόνα: 4.7** όπου εισήχθησαν τα δεδομένα FEF παρατηρείται ότι έχει απομακρυνθεί πλήρως ο θόρυβος στα δεδομένα και τα ρήγματα φαίνονται καθαρά.



Εικόνα 4.6: Απεικόνιση αρχικών δεδομένων της τομής z στα 1800ms



Εικόνα 4. 7: Απεικόνιση της τομής z-1800ms αφού έχει εφαρμοστεί το φίλτρο FEF-similarity. Γίνεται πιο εύκολη η ερμηνεία των ρηγμάτων.

5. Απεικόνιση 3D σεισμικού ορίζοντα και ρηγμάτων

5.1. Απεικόνιση σεισμικού ορίζοντα στις 3 διαστάσεις (3D)

Η απεικόνιση 3D σεισμικού ορίζοντα μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο διαφορετικές μέθοδοι στο λογισμικό Opendtect:

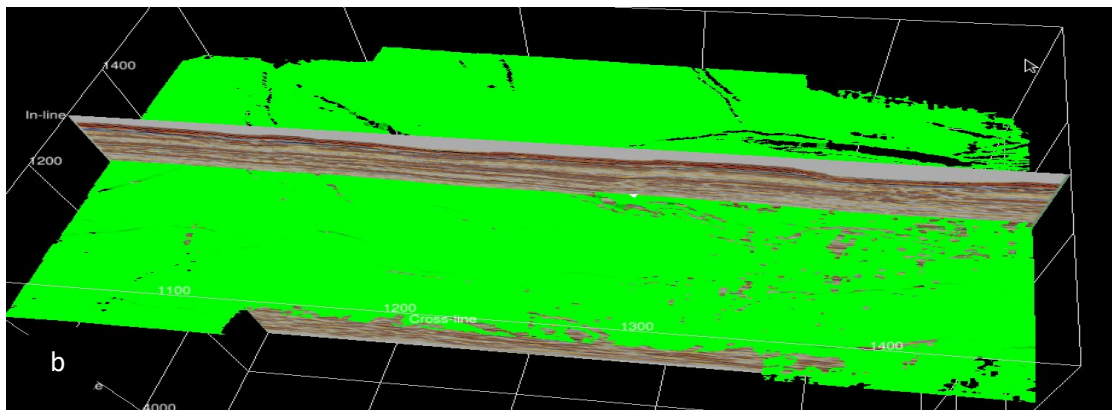
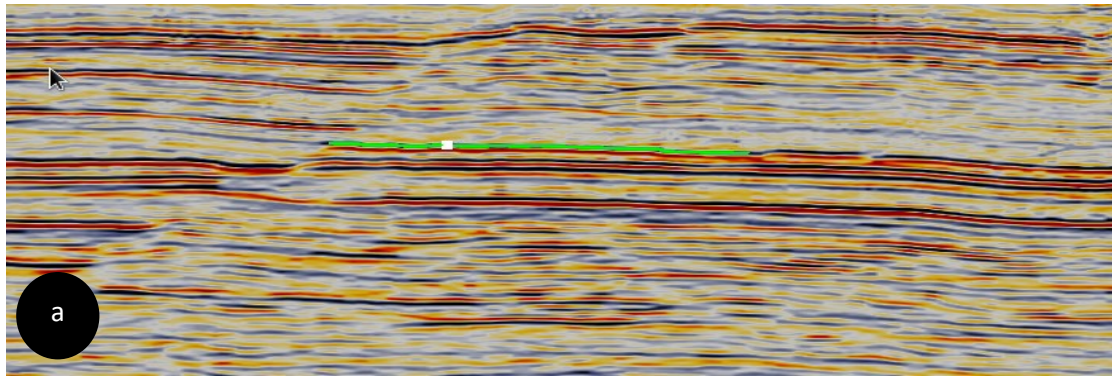
- Αυτόματος εντοπισμός (Auto-tracked)
- Χειροκίνητος εντοπισμός (Manual Draw)

Στην παρούσα εργασία έχει χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του αυτόματου εντοπισμού "Auto-tracked" για την απεικόνιση του σεισμικού ορίζοντα στις 3 διαστάσεις. Τα δεδομένα που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι τα FEF.

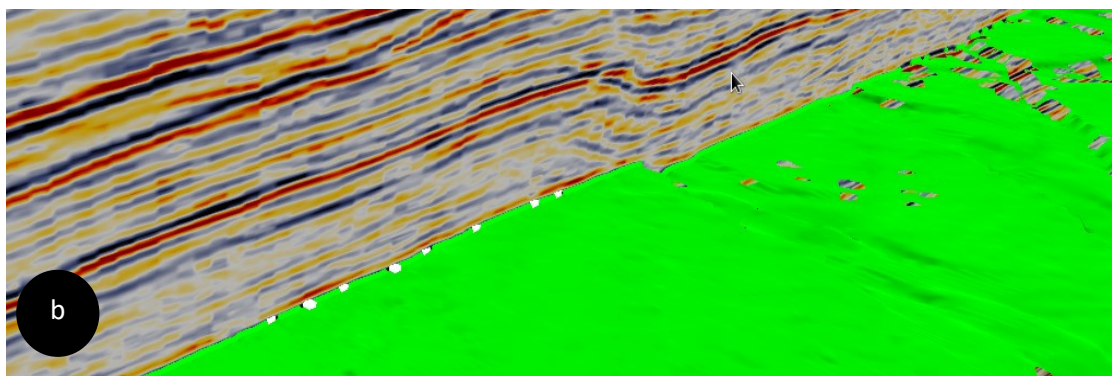
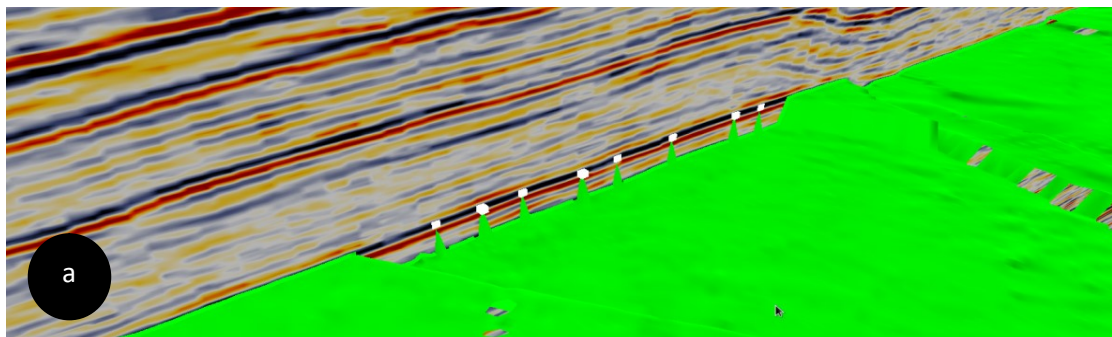
Μέσω του προγράμματος Opendtect μπορούμε να προσδιορίσουμε τους τρόπους εντοπισμού (tracking mode) του σεισμικού ορίζοντα στις 3 διαστάσεις οι οποίοι είναι οι εξής:

1. Ο **Αυτόματος εντοπισμός** (Auto-tracked) χρησιμοποιείται για την αυτόματη ανίχνευση των οριζόντων σε ένα τμήμα (in-line, cross-line, random line) του υπό προσδιορισμό όγκου. Μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε δισδιάστατα όσο και σε τρισδιάστατα δεδομένα. Στην συνέχεια, προσδιορίζονται ο τρόποι αυτόματου εντοπισμού των οριζόντων:
 - Seed Trace: συγκρίνει χαρακτηριστικά μεταξύ των σημείων αναφοράς (seed traces). Συστήνεται για τους περισσότερους ορίζοντες. Έχει χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία.
 - Adjacent parent: συγκρίνει χαρακτηριστικά μεταξύ της τελευταίας ανιχνεύσιμης θέσης (υπάρχει αυξημένη πιθανότητα για loop-skips). Συστήνεται για εύκολους ορίζοντες.
2. Ο **Χειροκίνητος εντοπισμός** (Manual Draw) χρησιμοποιείται για την επιλογή οριζόντων σε δύσκολες περιοχές (π.χ. cross ρήγματα, περιοχές με θόρυβο), όπου ο αυτόματος εντοπισμός δεν είναι εφικτός.

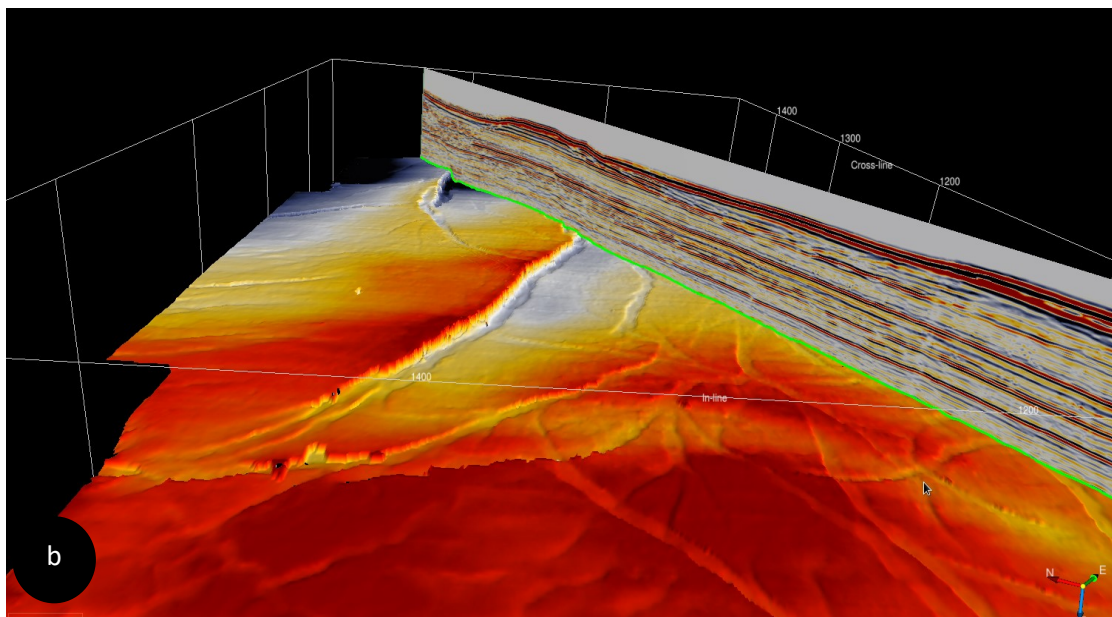
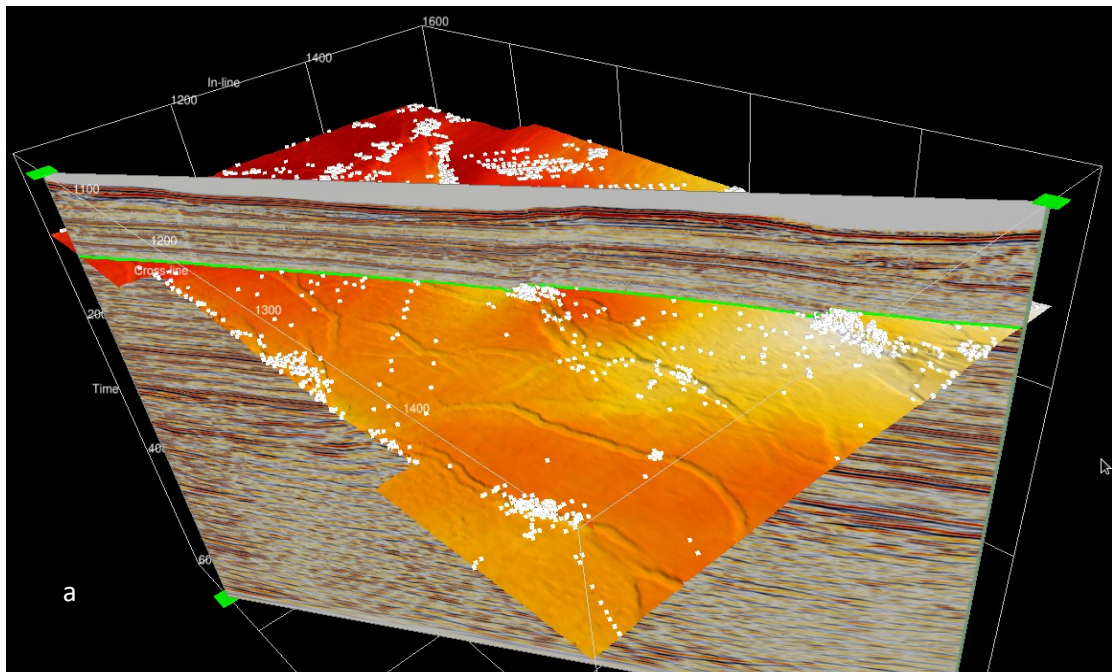
Όπως φαίνεται στην **Εικόνα: 5.1** επιλέγεται ένα σημείο στον ανακλαστήρα τον οποίο επιθυμούμαι να απεικονίσουμε και στην συνέχεια το πρόγραμμα αυτόματα απεικονίζει τον ορίζοντα βάση των περιορισμών που έχουν οριστεί. Επειδή το αποτέλεσμα δεν είναι ικανοποιητικό (**Εικόνα: 5.2**) προσθέτουμε περισσότερα σημεία αναφοράς (seeds) (**Εικόνα: 5.3**) και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία.



Εικόνα 5. 1: Απεικόνιση ορίζοντα. **a)** Επιλογή ενός σημείου για τη δημιουργία του ορίζοντα. **b)** Ο ορίζοντας που προκύπτει μέσω του εργαλείου του αυτόματου εντοπισμού εμπεριέχει ανακρίβειες .

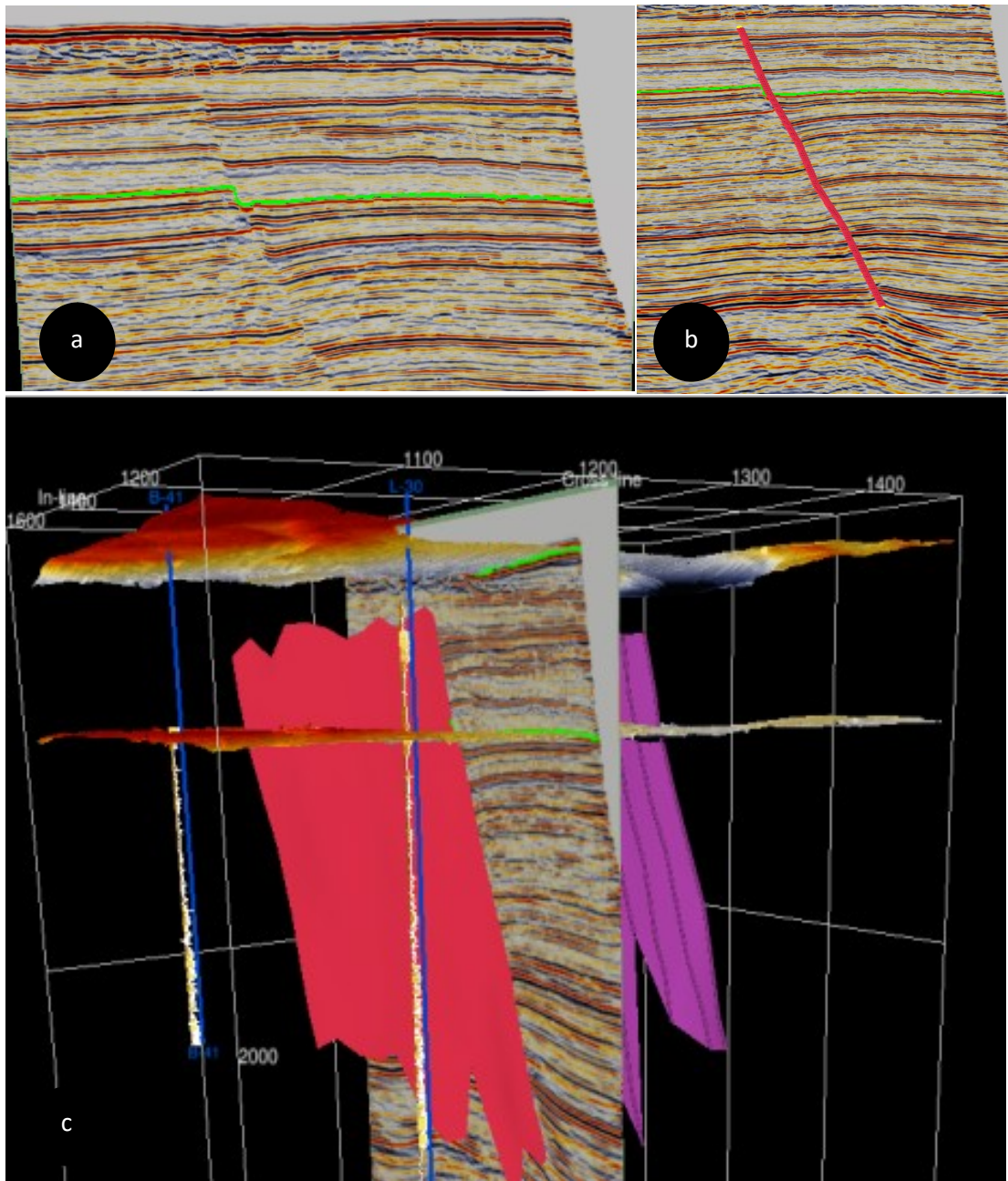


Εικόνα 5. 2: **a)** Ο αυτόματος ανιχνευτής έχει εντοπίσει λάθος ορίζοντα και **b)** έχει πραγματοποιηθεί διόρθωση με χρήση περισσότερων σημείων αναφοράς (seed).



Εικόνα 5.3: Απεικόνιση του ορίζοντα. **α)** Με άσπρο απεικονίζονται τα πολλαπλά σημεία αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διαδικασία του αυτόματου εντοπισμού. **β)** Ο ορίζοντας όπως προκύπτει μετά από την διαδικασία του αυτόματου εντοπισμού έχοντας υποστεί τις κατάλληλες διορθώσεις.

Αφότου έχουμε δημιουργήσει τον ορίζοντα, απεικονίζουμε τα κύρια ρήγματα που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης όπως φαίνεται στην **Εικόνα: 5.4**.



Εικόνα 5.4: **a)** Παρατηρείται ο ανακλαστήρας που απεικονίσαμε προηγουμένως , **b)** Εντοπίζεται το ρήγμα. **c)** Η απεικόνιση γίνεται από τη cross line διεύθυνση. Φαίνονται τα δύο κύρια ρήγματα, οι δυο ανακλαστήρες (ο πάνω είναι ο πυθμένας της θάλασσας, ο κάτω είναι ο ανακλαστήρας που έχουμε απεικονίσει στο α) καθώς και οι δυο γεωτρήσεις (L- 30 και B- 41)

6. Συσχέτιση σεισμικών και γεωτρητικών (L-30) δεδομένων

Τα αρχικά δεδομένα συσχετίστηκαν με τις διαγραφίες από την γεώτρηση L-30 με σκοπό να αφαιρεθούν οι αναντιστοιχίες που παρατηρούνται μεταξύ των παραμέτρων του χρόνου και του βάθους και στην συνέχεια να συσχετιστούν οι ανακλαστήρες που εντοπίζονται στα σεισμικά με τα αντίστοιχα γεωτρητικά δεδομένα. Οι αναντιστοιχίες αυτές, κατά κανόνα, οφείλονται σε ανεπαρκή (μη λεπτομερή) εκτίμηση του μοντέλου ταχυτήτων των σεισμικών δεδομένων με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτός ο ακριβής προσδιορισμός του βάθους των ανακλαστήρων και γενικότερα των σεισμικών δομών. Αυτή η διαδικασία συμβάλλει στην σωστή απεικόνιση των γεωλογικών δομών.

Για την συσχέτιση των σεισμικών δεδομένων με τα δεδομένα από τη γεώτρηση L-30 έγινε εξαγωγή ενός κυματιδίου σεισμικής πηγής (wavelet) διάρκειας 120ms από τα δεδομένα του αρχικού σεισμικού κύβου με χρονικό εύρος (time range) από 0 έως 1500ms. Από τις ακουστικές διαγραφίες (sonic) και τις διαγραφίες πυκνότητας της γεώτρησης L-30, υπολογίζεται η ακουστική εμπέδηση και δημιουργείται διαγραφή συντελεστών σεισμικής ανάκλασης (reflectivity log). Στην συνέχεια, πραγματοποιείται συνέλιξη των συντελεστών σεισμικής ανάκλασης με το κυματίδιο σεισμικής πηγής από τα δεδομένα σεισμικής ανάκλασης για την δημιουργία συνθετικών σεισμικών ιχνών. Τα συνθετικά σεισμικά δεδομένα συγκρίνονται με τα πραγματικά σεισμικά ίχνη που εξήχθησαν από τα σεισμικά δεδομένα γύρω από την περιοχή της γεώτρησης. Σε αυτή την διαδικασία, επιχειρείται η συσχέτιση μεταξύ των συγκεκριμένων ερμηνευμένων ανακλάσεων από τον σεισμικό όγκο.

Κατά την διάρκεια της διαδικασίας αυτής, οι καλύτεροι συντελεστές συσχέτισης (cross-correlation coefficient values) που αποκτήθηκαν ήταν 0,944 μεταξύ των σχηματισμών Wyandot και Dawson, 0,910 **(Εικόνα 6.3)** μεταξύ των σχηματισμών Dawson και Logan **(Εικόνα 6.4)**, και 0,899 μεταξύ των σχηματισμών Wyandot και Logan **(Εικόνα 6.5)**. Όταν τα σεισμικά δεδομένα συσχετιστούν με τα αντίστοιχα δεδομένα από την γεώτρηση (well tie), οι ανακλαστήρες που αντιστοιχούν στις διεπιφάνειες των γεωλογικών σχηματισμών τοποθετούνται στο σωστό τους βάθος σε όλο τον όγκο των δεδομένων.

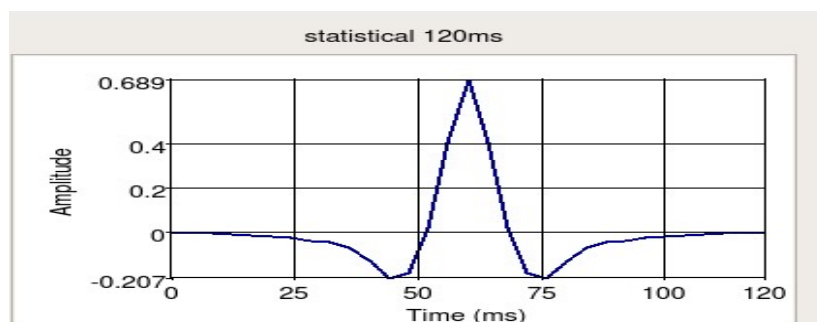
6.1. Εξαγωγή Wavelet

Το κυματίδιο σεισμικής πηγής (wavelet) αποτελεί έναν μονοδιάστατο παλμό, με χαρακτηριστική φάση, πλάτος και συχνότητα, που προσομοιάζει αυτή των σεισμικών δεδομένων της γύρω περιοχής. Παράγεται από μια πηγή, μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ως πακέτο ενέργειας και καταγράφεται από τους δέκτες ως μια σειρά γεγονότων κατανεμημένων στο χρόνο και στην ενέργεια. Η κατανομή αποτελεί συνάρτηση των αλλαγών στην ταχύτητα και στη πυκνότητα του υπεδάφους καθώς και της σχετικής θέσης της πηγής και του δέκτη.

Όπως αναφέρεται στην εισαγωγή του κεφαλαίου 6, οι παράμετροι που επιλέχθηκαν **(Εικόνα 6.1)** είναι:

- Z-range (ms): 0-1500

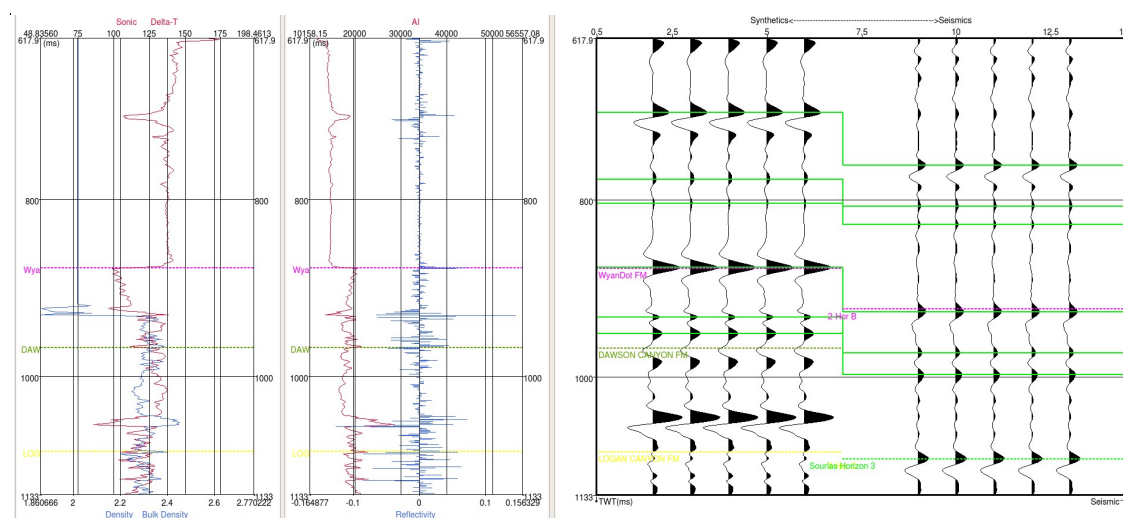
- Χρονική διάρκεια του κυματιδίου σεισμικής πηγής (Wavelet length - ms): 120
Η χρονική διάρκεια του κυματιδίου σεισμικής πηγής (Wavelet length) δεν πρέπει ποτέ να είναι πολύ μικρή (ελάχιστο 50 ms) ή πολύ μεγάλη (μέγιστο 200 ms).



Εικόνα 6.1: Κυματίδιο. Απεικονίζεται το εξαγμένο κυματίδιο με χρονική διάρκεια 120ms και πλάτος από -0,207 έως 0,689.

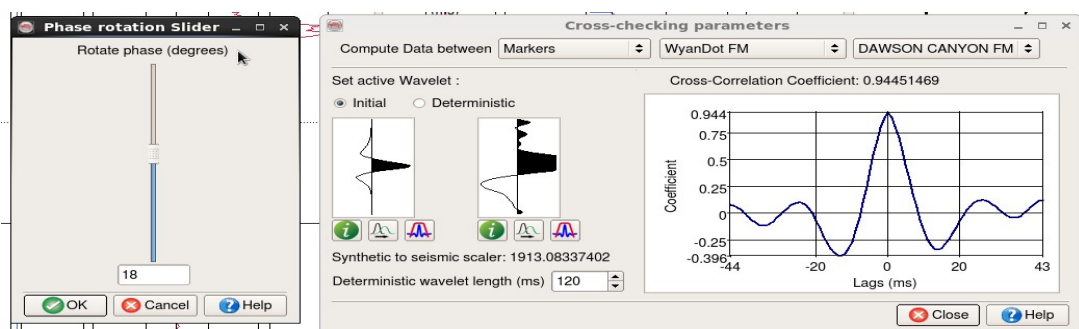
6.2 Συσχέτιση των σεισμικών και συνθετικών δεδομένων την γεώτρηση L-30

Τα συνθετικά δεδομένα παρουσιάζονται σε κάθετη κλίμακα με αντιστοιχία ως προς τα σεισμικά δεδομένα, ώστε να μπορούμε να πραγματοποιήσουμε άμεση σύγκριση. Μπορούμε να προσαρμόσουμε τα συνθετικά δεδομένα έτσι ώστε να συμπίπτουν με τα σεισμικά σε όσον το δυνατό μεγαλύτερο εύρος γίνεται (**Εικόνα 6.2**).

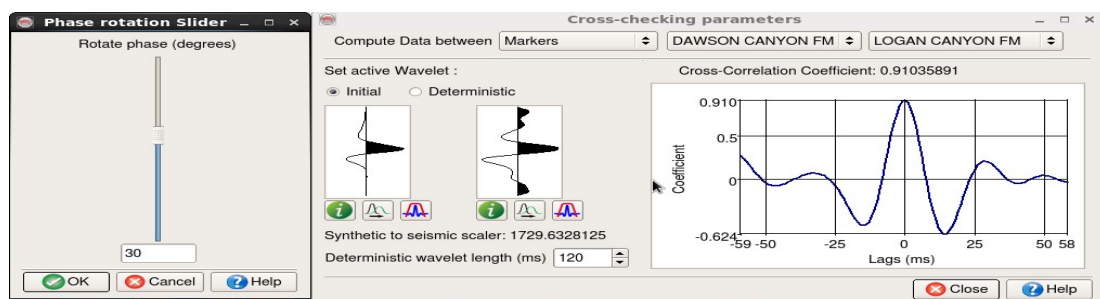


Εικόνα 6.2: Συνθετικά και σεισμικά δεδομένα. Αριστερά απεικονίζονται οι ακουστικές διαγραφίες, οι διαγραφίες πυκνότητας, οι διαγραφίες ακουστικής εμπέδησης καθώς και οι διαγραφίες συντελεστών σεισμικής ανάκλασης. Στην δεξιά πλευρά της εικόνας απεικονίζονται τα συνθετικά και τα σεισμικά δεδομένα πάνω στα οποία έχουν οριστεί οι σχηματισμοί Wayandot, Dawson canyon, Logan canyon. Οι πράσινες γραμμές χρησιμοποιήθηκαν για την αντιστοίχιση των πλατών των συνθετικών ιχνών με τα αντίστοιχα των σεισμικών.

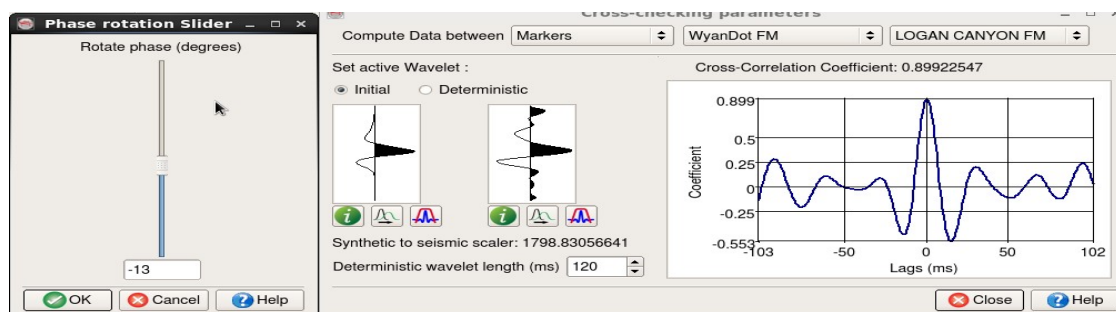
Η συσχέτιση (cross-correlation) αποτελεί μονάδα μέτρησης της ομοιότητας δυο παραμέτρων έτσι ώστε να υπολογιστεί η μετατόπιση της μίας παραμέτρου σε σχέση με την άλλη. Στην παρούσα εργασία τα συνθετικά και τα σεισμικά ίχνη κατά μήκος της γεώτρησης συσχετίζονται και η τιμή που προκύπτει ονομάζεται συντελεστής συσχέτισης και αποτελεί ένδειξη της ευθυγράμμισης και της ομοιότητας των δεδομένων. Επιτυγχάνεται μέγιστη συσχέτιση όταν ο συντελεστής συσχέτισης ισούται με την μονάδα. Η ευθυγράμμιση πραγματοποιείται μετατοπίζοντας τα συνθετικά ίχνη προς τα πάνω ή προς τα κάτω ή επιλέγοντας συγκεκριμένες περιοχές και στα δύο δεδομένα (συνθετικά και σεισμικά) με σκοπό να γίνει διόρθωση των δεδομένων ως προς το χρόνο και το βάθος. Στις **Εικόνες 6.3, 6.4, 6.5** φαίνεται ότι οι συντελεστές συσχέτισης τείνουν στην μονάδα και ως εκ τούτου έχει πραγματοποιηθεί καλή συσχέτιση των δεδομένων διορθώνοντας τις αναντιστοιχίες που υπήρχαν στο χρόνο και στο βάθος.



Εικόνα 6.3: Συντελεστής συσχέτισης των δεδομένων που βρίσκονται μεταξύ του σχηματισμού Way Dot FM και του DAWSON CANYON FM μετά την περιστροφή της φάσης κατά 18 μοίρες είναι 0,944.



Εικόνα 6.4: Συντελεστής συσχέτισης των δεδομένων που βρίσκονται μεταξύ του σχηματισμού DAWSON CANYON FM και του Logan CANYON FM μετά την περιστροφή της φάσης κατά 30 μοίρες είναι 0,910.



Εικόνα 6.5: Συντελεστής συσχέτισης των δεδομένων που βρίσκονται μεταξύ του σχηματισμού Way Dot FM και του Logan CANYON FM μετά την περιστροφή της φάσης κατά -13 μοίρες είναι 0,899.

7. Επεξεργασία, Απεικόνιση και Ερμηνεία 2D σεισμικής τομής από την λεκάνη της Φολεγάνδρου

Προκειμένου να αξιολογηθεί το πρόγραμμα OpendTest όσον αφορά στην αποτελεσματική απεικόνιση, επεξεργασία και ερμηνεία 2D σεισμικών δεδομένων ανάκλασης χρησιμοποιήθηκαν δισδιάστατα σεισμικά δεδομένα ανάκλασης (seismic line AEG-1) της λεκάνης της Φολεγάνδρου και αφού εφαρμόστηκαν οι παραπάνω διεργασίες, στην συνέχεια συγκρίθηκαν με ερμηνευμένη τομή που παρουσιάστηκε στο 8ο Βαλκανικό συνέδριο της Γεωφυσικής Κοινότητας στα Χανιά το 2015 (Andronikidis et. al., 2015).

Περιοχή Μελέτης

Η λεκάνη της Φολεγάνδρου βρίσκεται στο κεντρικό Αιγαίο και περιβάλλεται από τα νησιά Κίμωλος, Σίφνος, Πάρος, Ίος, Σίκινος και Φολέγανδρος (Εικόνα 7.1). Ανήκει στην Αττικό κυκλαδική ζώνη (Attic- Cycladic Massif) η οποία περιλαμβάνει ένα τμήμα της Αττικής, των Κυκλάδων, της Ικαρίας, της Σάμου καθώς και της Νότιας Εύβοια.

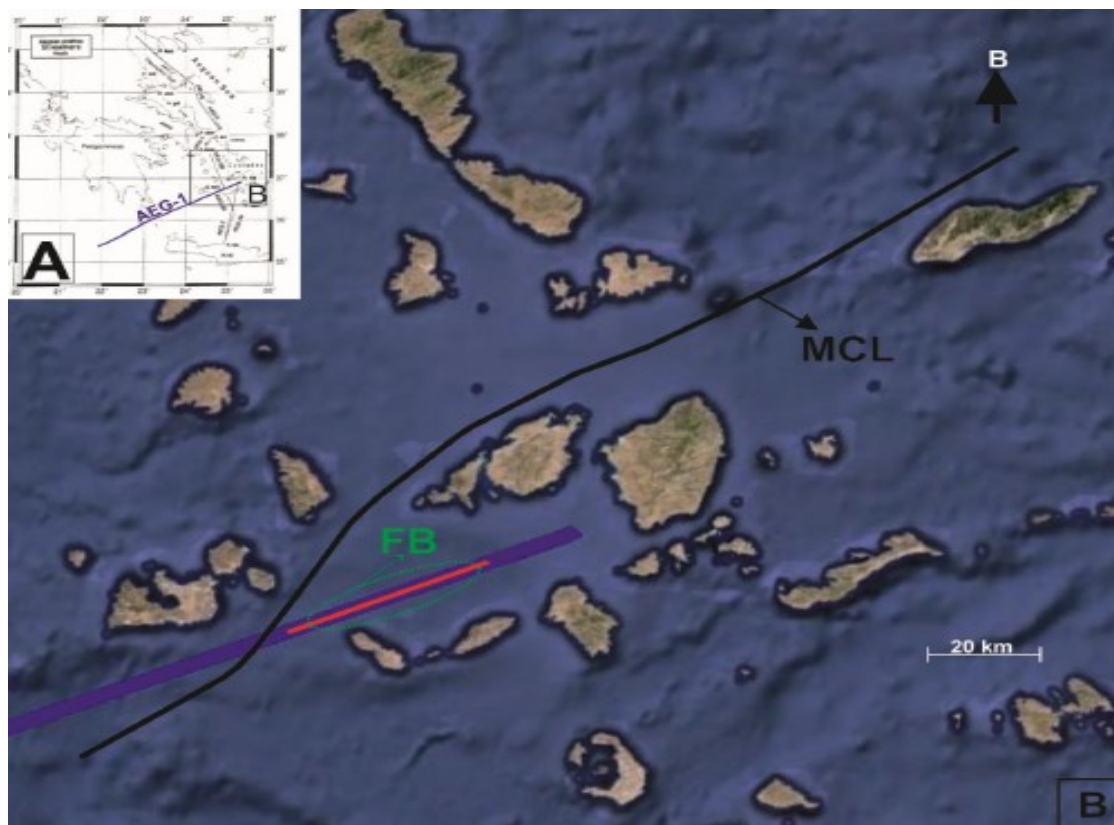
Σύμφωνα με τους Andronikidis et. al., (2015) η Αττικοκυκλαδική ζώνη υπερκαλύπτεται τεκτονικά από την Πελαγονική ζώνη και περιλαμβάνει τουλάχιστον τρία καλύμματα τα οποία από τη βάση προς την κορυφή (δομικά χαμηλότερη προς υψηλότερη) είναι:

(1) Η Βασαλική ακολουθία (Basal unit), η οποία αποτελείται από μια σειρά μεταμορφωμένων μεσοζωικών μαρμάρων. Αυτή η ακολουθία χαρακτηρίζεται στην βάση της από σχιστόλιθους και μεταβασικά πετρώματα που καλύπτονται από μεταφλύσχη πιθανόν της αποθετικής φάσης του Ηωκαίνου.

(2) Η ενότητα των κυανών σχιστολίθων η οποία αποτελείται κυρίως από μια ανώτερη μετα-οφιολίθων ακολουθία που την διαδέχεται μια κατώτερη ακολουθία μαρμάρων-σχιστόλιθων, αντιστοιχεί σε ένα μεταμορφωμένο τμήμα του Παλαιζωικού-Μεσοζωικού.

(3) Η ανώτερη ενότητα, η οποία σπάνια εμφανίζεται, περιλαμβάνει κυρίως τη Πέρμια έως Μεσοζωικά ιζηματογενή πετρώματα, οφειόλιθους και πετρώματα πρασινοσχιστόλιθους-αμφιβολιτικής φάσης του Άνω Κρητιδικού που δεν παρουσιάζουν στοιχεία μεταμόρφωσης υψηλής πίεσης (HP) (Dürr 1986).

Μια τεκτονική ζώνη πάχους 40Km με διεύθυνση ΒΑ έως ΝΔ σηματοδοτεί το όριο μεταξύ των τμημάτων του φλοιού του δυτικού και του ανατολικού Αιγαίου, που έχει ονομαστεί Μεσο-Κυκλαδική Γράμμωση (ΜΚΓ - Mid-Cycladic Lineament MCL) (Kokkalas & Aydin 2013). Η ΜΣΓ ερμηνεύεται ως σημαντικό όριο κλίμακας φλοιού (παρόλο που η ύπαρξή της δεν έχει εξακριβωθεί πλήρως). Χωρίζει την περιοχή σε δύο υπολεκάνες (domains) που εμφανίζουν διαφορετικό γραμμικό προσανατολισμό ορυκτών, διαφορετική γεωχημική σύσταση των μαγματικών διεισδύσεων και αντιθετικούς παλαιομαγνητικούς προσανατολισμούς.



Εικόνα 7. 1: Στον χάρτη Α με μοβ γραμμή απεικονίζονται η σεισμική γραμμή AEG-1. b) Χάρτης μελέτης που περιλαμβάνει την Μεσο-Κυκλαδική γράμμωση MCL και την λεκάνη της Φολεγάνδρου. Η κόκκινη γραμμή αφορά το τμήμα AEG-1 που μελετάται (Andronikidis et. al., 2015).

Τα σεισμικά δεδομένα συλλέχτηκαν από την εταιρία "Ελληνικά Πετρέλαια" στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος "Joule 2 " τον Απρίλιο του 1993. Μια σεισμική γραμμή μήκους 358 χλμ., η AEG-1, που σαρώθηκε κατά την κατεύθυνση ΝΔ-ΒΑ εκτείνεται από τη νότια Πελοπόννησο και τη δυτική Κρήτη (22ο 10 ' , 35ο 25') έως τη Νάξο (25ο 15 ' , 36ο 50') (**Εικόνα 7.1**). Σε αυτό το πείραμα, χρησιμοποιήθηκε μια συστοιχία οκτώ αεροβόλων όπλων. Η ισαπόσταση των πηγών είχε οριστεί στα 50 μ., ενώ των υδροφώνων στα 25 μ. Η κοντινότερη απόσταση πηγής ήταν 260 μέτρα και ο αριθμός των καναλιών 96. Το μήκος του καλωδίου των υδροφώνων ήταν 2375 μέτρα και η υπεδαφική κάλυψη ήταν 24 φορές (fold). Η διάρκεια των καταγραφών ήταν 17s και διάστημα δειγματοληψίας 4 ms. Τα υδρόφωνα και οι πηγές βυθίστηκαν 20 μέτρα κάτω από τη στάθμη της θάλασσας. Κατά την απόκτηση των δεδομένων εφαρμόστηκε φίλτρο για την αφαίρεση συχνοτήτων μεγαλύτερων των 77 Hz (**Andronikidis et. al., 2015**).

Επεξεργασία

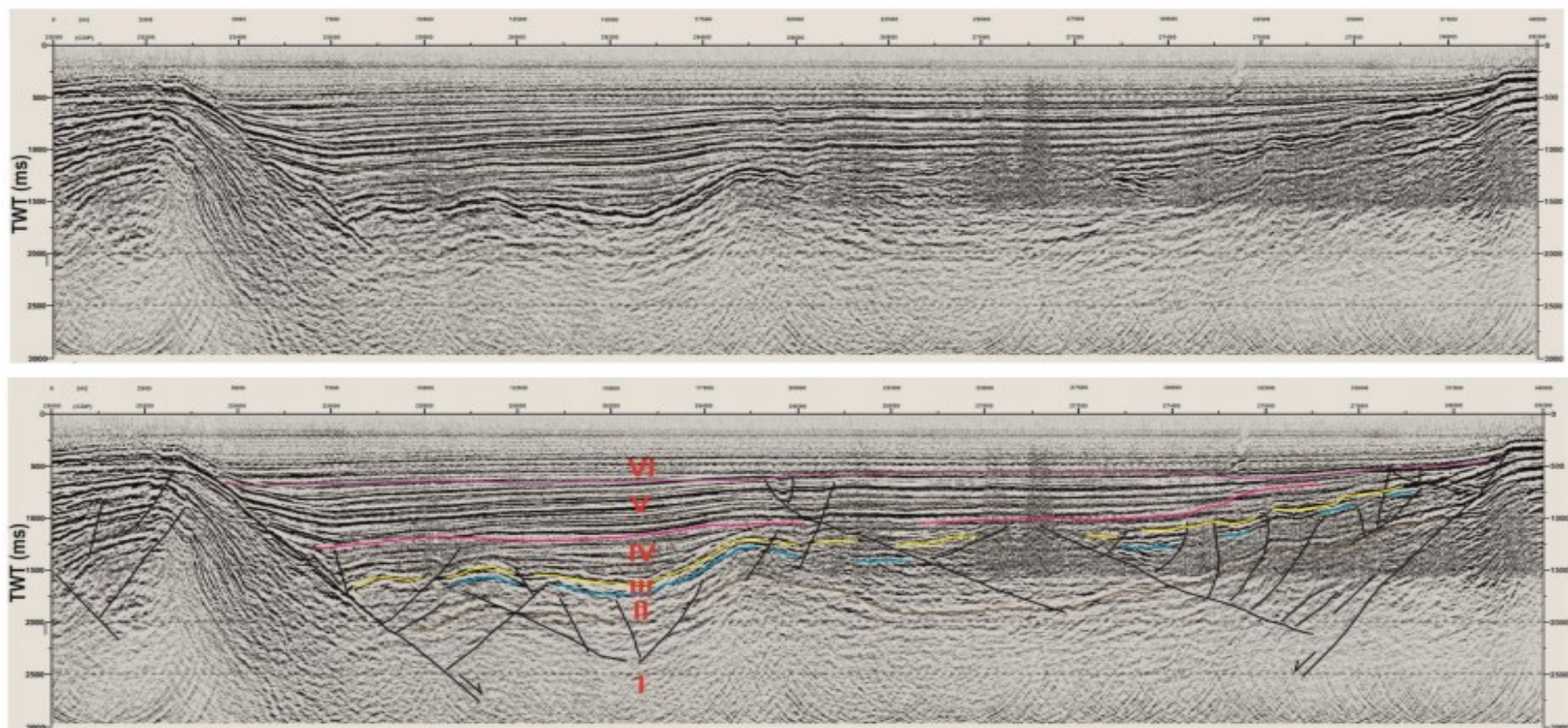
Τα σεισμικά δεδομένα **Εικόνας 7.2** έχουν υποστεί την ακόλουθη επεξεργασία στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων έχει πραγματοποιηθεί κάνοντας χρήση λογισμικού επεξεργασίας και απεικόνισης σεισμικών δεδομένων από την Paradigm (Paradigm 14.1). Πριν την σεισμική χωροθέτηση, πραγματοποιήθηκαν διεργασίες όπως η απαλοιφή τυχαίου θορύβου, ανάλυση ταχύτητας, αποσυνέλιξη πρόβλεψης (gain), NMO διόρθωση, και άθροιση γειτονικών σεισμικών ιχνών (stacking). Στην συνέχεια, μελετήθηκαν οι παράμετροι Kirchhoff και f-x (finite-difference migration). Τέλος συγκρίθηκαν τα χωροθετημένα τμήματα (Gialitaki, 2015) ενώ η χωροθέτηση με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών βελτίωσε την πλευρική ανάλυση της τομής και βοήθησε στην ερμηνεία της.

Σύμφωνα με τους Andronikids et. al. (2015), η ερμηνεία βασίστηκε στα χωροθετημένα δεδομένα που απεικονίζουν την ακόλουθη περίπλοκη δομή. Οι ανακλαστήρες I, II και III αφορούν χαρακτηριστικά τις κύριες τεκτονικές δομές: (I) βασαλτική δομή, (II) δομή του κυανού σχιστόλιθου και (III) η ανώτερη τεκτονική ακολουθία. Οι ανακλαστήρες IV,V,VI διακρίνονται καθαρά στην **Εικόνα 7.2** και σχετίζονται με τα ιζηματογενή πετρώματα του Νεογενούς (IV) και μεταγενέστερα αυτού (V-VI) (**Mouchou, 2014**). Η λεκάνη της Φολεγάνδρου μπορεί να θεωρηθεί ότι δημιουργήθηκε από την ανύψωση μεταμορφωμένων δομών. Οι δόμοι αυτοί βρίσκονται μέσα σε τάφρους μικρών διαστάσεων (Graben) τα οποία περιβάλλονται (delineated) από δύο κύρια ρήγματα. Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης στην λεκάνη της Φολεγάνδρου δίνει πληροφορίες για την ύπαρξη δομών σε μεσαία βάθη τα οποία πιθανόν να συσχετίζονται με τεκτονικές δομές σε μεγαλύτερα βάθη.

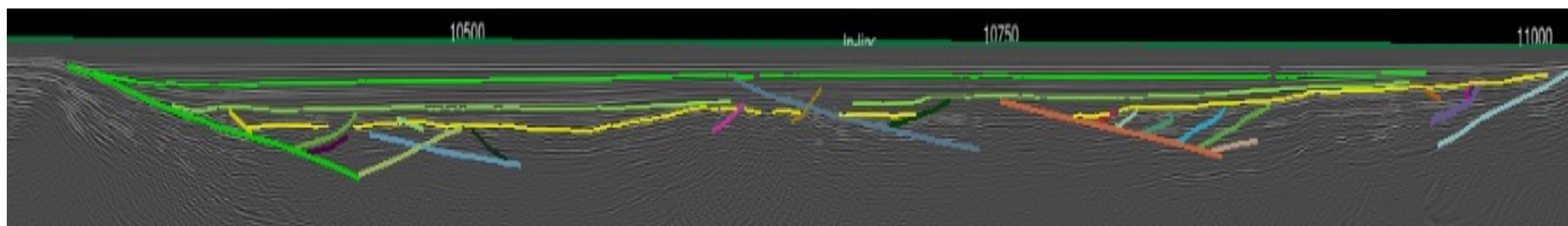
Στην **Εικόνα 7.3** απεικονίζεται η χωροθετημένη σεισμική τομή μετά από ερμηνεία που πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού OpendTect. Ύστερα από επανειλημμένες προσπάθειες που έγιναν να εφαρμοστούν τα dip-steered ημιαυτόματα φίλτρα στα δεδομένα της λεκάνης της Φολεγάνδρου παρουσιάστηκαν προβλήματα, που σχετίζονται με τα δικαιώματα χρήσης των φίλτρων παρά το γεγονός ότι κατείχαμε όλες τις προβλεπόμενες άδειες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα ίδια φίλτρα εκτελέστηκαν αποτελεσματικά στα δεδομένα που παρείχε το OpendTect. Για τον λόγο αυτό δεν κατέστη δυνατό να πραγματοποιηθεί περεταίρω επεξεργασία των δεδομένων που σχετίζονται με την λεκάνη της Φολεγάνδρου. Παρόλα αυτά μερική απεικόνιση της δομής φαίνεται στην Εικόνα 7.3.

Παρατηρήσεις

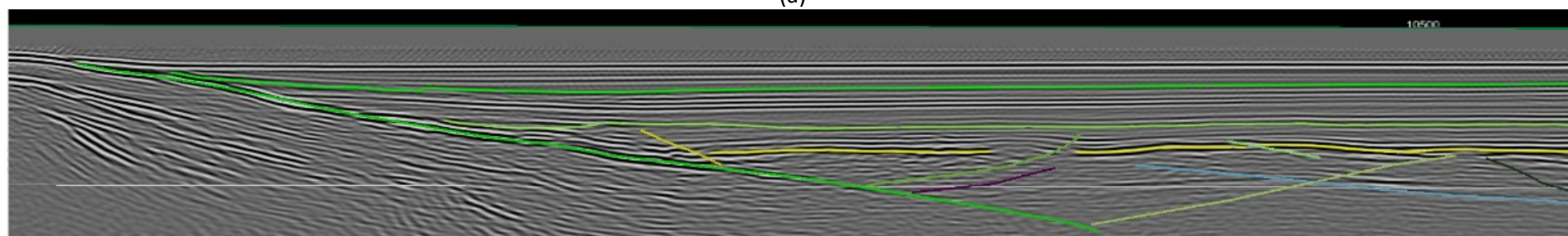
Η ποιότητα των σεισμικών δεδομένων της **Εικόνας 7.2**, όσον αφορά τα ρήγματα και τους ορίζοντες, είναι εμφανώς καλύτερη σε σχέση με την **Εικόνα 7.3** όπου είναι δύσκολη η παρατήρηση των ανακλαστήρων, ιδίως στα μεγαλύτερα βάθη. Όσο αναφορά την χαρτογράφηση των οριζόντων και των ρηγμάτων και τα δύο εργαλεία φαίνεται να είναι εξίσου αποτελεσματικά. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην Εικόνα 7.3, όπως προαναφέρθηκε, δεν κατέστη δυνατό να γίνει περεταίρω επεξεργασία λόγω προβλημάτων με την αδειοδότηση των plugin και αυτός ίσως είναι ένας από τους λόγους της φτωχής απεικόνισης της τομής.



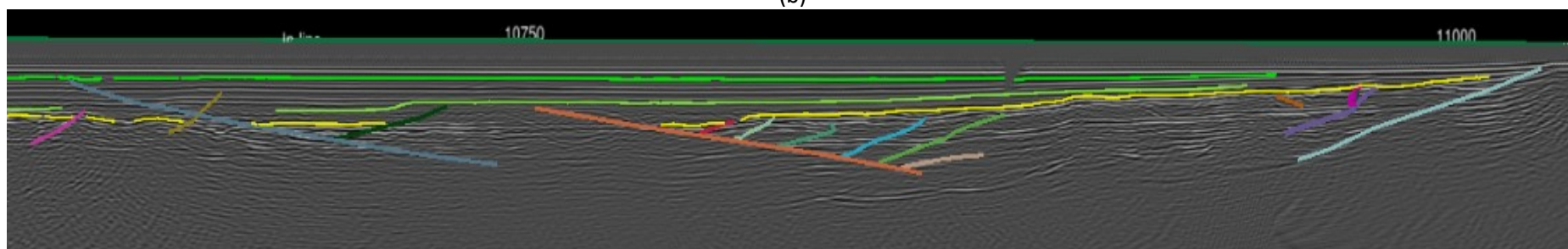
Εικόνα 7. 2: Στην πάνω εικόνα γίνεται απεικόνιση της χωροθετημένης τομής και στην κάτω έχει πραγματοποιηθεί ερμηνεία αυτής (Πηγή: Andronikidis et. al., 2015)



(a)



(b)



(c)

Εικόνα 7. 2: **α)** Ερμηνεία της χωροθετημένης τομής κάνοντας χρήση του λογισμικού Opentect. **β)** Απεικόνιση σε μεγέθυνση του αριστερού μέρους της "τομής α)" **γ)** Απεικόνιση σε μεγέθυνση του δεξιού μέρους της "τομής α)"

8. Συμπεράσματα- Μελλοντικές Προτάσεις

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία, απεικόνιση κα ερμηνεία τόσο των δισδιάστατων όσο και των τρισδιάστατων σεισμικών δεδομένων καθώς επίσης επιχειρείται η αξιολόγηση του λογισμικού OpendTect. Τέλος γίνονται μελλοντικές προτάσεις με στόχο την βελτίωση της απεικόνισης των δεδομένων.

Συμπεράσματα που προκύπτουν όσον αφορά τα τρισδιάστατα σεισμικά δεδομένα:

- Τα δεδομένα εισάγονται εύκολα στο πρόγραμμα
- Μετά την εφαρμογή του φίλτρου FEF δεν παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές
- Για την επεξεργασία των δεδομένων με λογισμικό Opendtect απαιτείται πολύ μικρός υπολογιστικός χρόνος
- Γίνεται εύκολα και αποτελεσματικά η απεικόνιση των οριζόντων και των ρηγμάτων

Συμπεράσματα που προκύπτουν όσον αφορά τα δισδιάστατα σεισμικά δεδομένα:

- Τα δεδομένα εισάγονται εύκολα στο πρόγραμμα
- Δεν έγινε δυνατή η χρήση των dip-steered ημιαυτόματων φίλτρων στα δεδομένα της λεκάνης τη Φολεγάνδρου καθώς παρουσιάστηκαν προβλήματα που σχετίζονται με τα δικαιώματα χρήσης των φίλτρων
- Γίνεται εύκολη η απεικόνιση των οριζόντων και των ρηγμάτων αλλά ή απεικόνιση δεν είναι εξίσου αποτελεσματική με αυτή στα τρισδιάστατα δεδομένα και την αντίστοιχη ερμηνευμένη τομή στην λεκάνη της Φολεγάνδρου

Μελλοντικές προτάσεις:

- Να εξεταστεί ξανά η δυνατότητα επεξεργασίας και απεικόνισης του λογισμικού Opendtect σε δισδιάστατα σεισμικά δεδομένα
- Να ξανά-εφαρμοστεί η διεργασία αναβάθμισης των τρισδιάστατων σεισμικών δεδομένων χρησιμοποιώντας διαφορετικές παραμέτρους (π.χ. Stereout) στα φίλτρα
- Να χρησιμοποιηθούν και οι δύο γεωτρήσεις κατά την συσχέτιση των σεισμικών δεδομένων με τις γεωτρήσεις για να αφαιρεθούν οι αναντιστοιχίες (mismatches) που τυχόν παρατηρούνται μεταξύ του βάθους- χρόνου αντίστοιχων ανακλαστήρων που εντοπίζονται στα σεισμικά και στα γεωτρητικά δεδομένα

Βιβλιογραφία

- Albertz, M., Beaumont, C., 2010. An investigation of salt tectonic structural styles in the Scotian Basin, offshore Atlantic Canada: 2. Comparison of observations with geometrically complex numerical models. *Tectonics* 29 TC4018.
- Albertz, M., Beaumont, C., Shimeld, J.W., Ings, S.J., Gradmann, S., 2010. An investigation of salt tectonic structural styles in the Scotian Basin, offshore Atlantic Canada: 1, Comparison of observations with geometrically simple numerical models. *Tectonics* 29 TC4017.
- Andronikidis N., Gialitaki M., Mouchou A., Kritikakis G., Manoutsoglou E., Vafidis A., 2015. **Imaging Folegandros basin by using seismic reflection data from a part of seismic line AEG-1.** 8th Congress of the Balkan Geophysical Society, 5-8 October, Chania
- Babangida W. Jibrin, Tim J. Reston, Graham K. Westbrook, 2013, Application of **volumetric seismic discontinuity attribute for fault detection: Case study using deep- water Niger Delta 3D seismic data.** *The Leading Edge*, 32, 424-428.
- Campbell, T.J., Richards, F.W.B., Silva, R.L., Wach, G., Eliuk, L., 2015. Interpretation of the Penobscot 3D seismic volume using constrained sparse spike inversion, Sables-Basin, offshore Nova Scotia. *Mar. Petroleum Geol.* 68, 73–93.
- CNSOPB (2012) **Maps and Coordinates** [Internet] Διαθέσιμο URL: <https://www.cnsopb.ns.ca/lands-management/maps-and-coordinates> [Προσβάσιμο 25/2/2018]
- CNSOPB (2012) **Exploration History** [Internet] Διαθέσιμο URL: https://callforbids.cnsopb.ns.ca/2007/01/exploration_history.html [Προσβάσιμο 25/2/2018]
- Cordes A., Galbraith M., Peirce J., 2000. **Planning Land 3-D Seismic Surveys**, Series Editor: Stephen J. Hill, Tulsa.
- Faeukh Qayyum & Paul de Groot, Introduction to the Steering Cube Διαθέσιμο URL: http://static.dgbes.com/images/PDF/Introduction_to_SteeringCube.pdf [Προσβάσιμο: 09/05/2019]
- Fensome, R.A., Crux, J.A., Gard, I.G., MacRae, R.A., Williams, G.L., Thomas, F.C., Fiorini, F., Wach, G., 2008. The last 100 million years on the Scotian Margin, offshore eastern Canada: an event-stratigraphic scheme emphasizing bio-stratigraphic data. *Atl. Geol.* 44, 93–126.
- Grist, A.M., Reynolds, P.H., Zentilli, M., Beaumont, C., 1992. The Scotian Basin offshore Nova Scotia: thermal history and provenance of sandstones from apatite fission track and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data. *Can. J. Earth Sci.* 29 (5), 909–924.
- Ifeanyi Odoh B., Nneamakallechukwu J., Ifeanyi Okoli N., 2014. **The Use of Seismic Attributes to Enhance Fault Interpretation of OT Field, Niger Delta.** *International Journal of Geoscience*, 5, 826-834
- Jansa, L. F., Wade, J. A., 1975. Geology of continental margin off Nova Scotia and Newfoundland, Offshore Geology of eastern Canada, Regional Geology, vol. 2. Geological Survey of Canada (74-30), 51–106.
- JDT Crane, WJF Clack, 1992. **Final Report on the 3-D Seismic Survey On Penobscot E.L. 2353**, Nova Scotia Resources (Ventures) LTD, CNSOPB PROGRAM NO NS 24-N11-1E

- Kettanah, Y.A., 2013. Hydrocarbon fluid inclusions in the Argo salt, offshore CanadianAtlantic margin1. Can. J. Earth Sci. 50 (6), 607–635.
- King, L.H., MacLean, B., Fader, G.B., 1974. Unconformities on the Scotian Shelf. Can. J. Earth Sci. 11 (1), 89–100.
- Mandal, A. and Srivastava, E., 2017. Enhanced structural interpretation from 3D seismic data using hybrid attributes: **New insights into fault visualization and displacement in Cretaceous formations of the Scotian Basin, offshore Nova Scotia.** Marine and Petroleum Geology 89 (2018) 464 - 478.
- McIver, N.L., 1972. Cenozoic and Mesozoic stratigraphy of the Nova Scotia Shelf. Can. J. Earth Sci. 9, 54–70.
- OpendTect (2002-2015) **OpendTect User Documentation -6.0** [Internet]. Διαθέσιμο URL: http://doc.opendtect.org/6.0.0/doc/od_userdoc/Default.htm [Προσβάσιμο:25/02/2018]
- TerraNubis (2019) **Project Penobscot** [Internet] Διαθέσιμο URL: <https://terranubis.com/datainfo/Penobscot> [Προσβάσιμο 25/2/2018]
- Wade, J.A., MacLean, B.C., 1990. Aspects of the geology of the Scotian Basin from recent seismic and well data: geology of the continental margin of eastern Canada. Geological Survey of Canada. Geol. Can. 2, 190–238.
- Wade, J.A., Maclean, B.C., Williams, G.L., 1995. Mesozoic and Cenozoic stratigraphy, eastern Scotian Shelf: new interpretations. Can. J. Earth Sci. 32, 1462–1473.
- Wikipedia (2018) **Rollover anticlines.**[Internet] ΔιαθέσιμοURL:https://en.wikipedia.org/wiki/Rollover_anticles [Προσβάσιμο 25/2/2018]
- Wikiversity (2018) **Amplitude.**[Internet] ΔιαθέσιμοURL:<https://en.wikiversity.org/wiki/Amplitude> [Προσβάσιμο 25/4/2019]
- OpendTect, **Background**, 2002-2015), [Internet] http://doc.opendtect.org/5.0.0/doc/dgb_userdoc/content/ds/bkgrnd/bkgrnd.htm [Προσβάσιμο 25/5/2019]
- OpendTect, Qayyum & Groot, **Introduction to the Steering Cube** [Internet] http://static.dgbes.com/images/PDF/Introduction_to_SteeringCube.pdf [Προσβάσιμο 25/5/2019]
- Opendtect, **Dip-steered Median Filter** 2012-2015, http://doc.opendtect.org/5.0.0/doc/dgb_userdoc/Default.htm#applics/dsmf/dsmf.htm [Προσβάσιμο 25/5/2019]
- Opendtect, 2002-2018, **Dip-steered Median Filter** [Internet] http://doc.opendtect.org/6.2.0/doc/HTML_WF/Default.htm#TM6/workflows/Data_Enhancement/Dip-steered_Median_Filter.htm%3FTocPath%3DData%2520Enhancement%7C_3 [Προσβάσιμο 25/5/2019]
- Opendtect , **Dip-Steered Diffusion Filter**,2002-2015 [Internet] http://doc.opendtect.org/5.0.0/doc/dgb_userdoc/content/def_attr_sets/dsdf/dsdf.htm [Προσβάσιμο 25/5/2019]
- Opendtect **Dip-Steered Diffusion Filter**, 2002-2018 [Internet] http://doc.opendtect.org/6.2.0/doc/HTML_WF/Default.htm#TM6/workflows/Data_Enhancement/Dip-steered_Median_Filter.htm%3FTocPath%3DData%2520Enhancement%7C_3

[Enhancement/Dip-steered Diffusion Filter.htm%3FTocPath%3DData%2520Enhancement%7C_____4](http://doc.opendtect.org/6.0.0/doc/dgb_userdoc/Default.htm#dip-steering/attributes_with_steering/position.htm%3FTocPath%3DData%2520Enhancement%7C_____4)
[Προσβάσιμο 25/5/2019]

- Opendtect , **Position**, 2002-2016 [Internet]
http://doc.opendtect.org/6.0.0/doc/dgb_userdoc/Default.htm#dip-steering/attributes_with_steering/position.htm%3FTocPath%3D3%2520Dip-Steering%7C3.5%2520Attributes%2520with%2520Steering%7C_____4
[Προσβάσιμο 25/5/2019]
- Opendtect, **Dip-steered Fault Enhancement Filter**, 2002-2018. [Internet]
http://doc.opendtect.org/6.2.0/doc/HTML_WF/Default.htm#TM6/workflows/Data Enhancement/Dip-steered Fault Enhancement Filter.htm%3FTocPath%3DData%2520Enhancement%7C_____5 [Προσβάσιμο 25/5/2019]
- Opendtect, **Dip-steered Fault Enhancement Filter**, 2002-2018. [Internet]
http://doc.opendtect.org/6.0.0/doc/dgb_userdoc/Default.htm#default_attribute_sets/fault_enhancement_filter.htm%3FTocPath%3D12%2520Default%2520Attribute%2520Sets%7C_____12 [Προσβάσιμο 25/5/2019]
- Opendtect, **Similarity**, 2002-2015 [Internet]
http://doc.opendtect.org/6.2.0/doc/HTML_WF/Default.htm#TM6/workflows/Attributes/Dip-steered Similarity.htm%3FTocPath%3DAttributes%7C_____4
[Προσβάσιμο 25/5/2019]
- Opendtect, **Tie well to Seismic**, 2002-2015 [Internet]
http://doc.opendtect.org/6.0.0/doc/od_userdoc/content/analysis/wells/tie_well_to_seismic.htm [Προσβάσιμο 25/5/2019]