



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« Επεξεργασία δεδομένων σεισμικής ανάκλασης ακουστικού συστήματος CHIRP στη  
θάλασσα Chukchi βορειοδυτικά της Αλάσκας »

---

Κανελλόπουλος Ιωάννης

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης (Επιβλέπων καθηγητής)

Δρ. Σακελλαρίου Δημήτριος, Διευθυντής Ερευνών ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.

Δρ. Κρητικάκης Γεώργιος, Ε.ΔΙ.Π. Πολυτεχνείο Κρήτης

Χανιά, Μάιος 2021



*“Η εκπαίδευση δεν είναι το γέμισμα ενός κουβά,  
αλλά το ανάμμιγμα μιας φλόγας.”*

William Butler Yeats

*«Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ' αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών»*

## Πρόλογος

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επεξεργασία δεδομένων σεισμικής ανάκλασης ακουστικού συστήματος CHIRP αλλά και η απεικόνιση και ερμηνεία των τελικών αποτελεσμάτων επεξεργασίας των γραμμών μελέτης στη θάλασσα Chukchi στο βορειοδυτικό τμήμα της Αλάσκας.

Απαραίτητο είναι να εκφράσω ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου Αντώνιο Βαφείδη για την εμπιστοσύνη του ως προς το άτομό μου, για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής μου εργασίας, για την καθοδήγηση και τη συνεργασία του, αλλά και για τη στήριξη του στην επιθυμία μου να ασχοληθώ εις βάθος με τον τομέα της Γεωφυσικής.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στο δρ. Δημήτριο Σακελλαρίου γεωλόγο και διευθυντή ερευνών του Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας στο Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ) για τη συμμετοχή του στη τριμελή εξεταστική επιτροπή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία δε θα είχε ολοκληρωθεί δίχως τον αμέριστη βοήθεια και καθοδήγηση που έδειξε Ε.ΔΙ.Π. του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης δρ. Κρητικάκης Γεώργιος. Οι εύστοχες παρατηρήσεις και η στήριξη του κατά τη διεκπεραίωση των απαιτούμενων διαδικασιών συντέλεσαν σημαντικά στην κάλυψη του θέματος της διπλωματικής μου εργασίας και γι' αυτό το λόγο οφείλω να τον ευχαριστήσω.

Ευχαριστώ θερμά επίσης τον καθηγητή του τμήματος Θαλάσσιας Γεωλογίας και Γεωφυσικής του Πανεπιστημίου της Στοκχόλμης Martin Jakobsson για την ανιδιοτελή παραχώρηση των πραγματικών δεδομένων της έρευνάς του, για την επεξεργασία αυτών.

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου Ευθύμιο Κανελλόπουλο και Βασιλική Ανδρέου για την ψυχολογική, ηθική, οικονομική και όχι μόνο, υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, αλλά και μέχρι το παρόν στάδιο της ζωής μου. Τέλος, να ευχαριστήσω όλους μου τους φίλους για τη μέχρι στιγμής στήριξη τους και για τις στιγμές που μοιραστήκαμε και ξεχωριστά το Στυλιανό Βάιλα για τη τεχνολογική του υποστήριξη για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.



## Περίληψη

Η μέθοδος σεισμικής ανάκλασης χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα κατά τη διεκπεραίωση θαλάσσιων γεωφυσικών ερευνών, οι οποίες αποσκοπούν στην ανίχνευση πετρελαιοφόρων κοιτασμάτων. Ωστόσο, η συμβολή των θαλάσσιων γεωφυσικών διασκοπήσεων δεν περιορίζεται μόνο στην ανίχνευση υδρογονανθράκων, αλλά έχει εφαρμογές και σε μικρά βάθη διασκόπησης, όπου πραγματοποιούνται μελέτες χαρακτηρισμού της δομής του πυθμένα και των υποκείμενων σχηματισμών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η συμβολή της μεθόδου σεισμικής ανάκλασης στη χαρτογράφηση του πυθμένα στη θάλασσα Chukchi με τη χρήση του ακουστικού συστήματος CHIRP για τη συλλογή σεισμικών δεδομένων κατά την ερευνητική αποστολή SWERUS-C3.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η επεξεργασία δεδομένων σεισμικής ανάκλασης, η επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων εισαγωγής στους αλγόριθμους που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων, η απεικόνιση των αποτελεσμάτων και τέλος η ερμηνεία των τελικών σεισμικών τομών. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία προτείνονται δύο διαγράμματα ροής επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων ακουστικού συστήματος CHIRP και πάνω σε αυτά στηρίχθηκε το διάγραμμα ροής, το οποίο ακολουθήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για την επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων. Για την ανάγνωση, επεξεργασία και απεικόνιση των σεισμικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό περιβάλλον Matlab.

Σε αρχικό στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων υλοποιήθηκε η ανάγνωση των αρχείων SEG-Y με τη χρήση αλγορίθμων Crewes. Συνολικά στην παρούσα διπλωματική εργασία επεξεργάστηκαν συνολικά επτά αρχείων καταγραφών. Από τα αρχεία καταγραφών αντλήθηκαν οι απαραίτητες πληροφορίες για το χαρακτηρισμό του ακουστικού συστήματος CHIRP που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των δεδομένων. Πραγματοποιήθηκε μετατροπή των πολικών συντεταγμένων των αρχείων καταγραφών σε καρτεσιανές συντεταγμένες UTM με τη χρήση του προγράμματος SURFER και στη συνέχεια δημιουργήθηκε χάρτης των αρχείων καταγραφών στο Google Earth Pro. Μετά την απεικόνιση των αρχείων δημιουργήθηκαν δύο γραμμές μελέτης, οι οποίες αποτελούνται από ενοποιημένα τμήματα των αρχείων καταγραφών. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε η ενοποίηση των σεισμικών δεδομένων και η διόρθωσή τους ως προς το χρόνο καθυστέρησης. Ακολούθησε η διαδικασία επεξεργασίας, η οποία αποτελείται από την εφαρμογή ζωνοπερατού φίλτρου Band-Pass, την εφαρμογή φίλτρου αυτόματης ενίσχυσης σήματος AGC, την εφαρμογή φίλτρου FX Deconvolution, την εφαρμογή αποσυνέλιξης αιχμής και τέλος την εφαρμογή σεισμικής χωροθέτησης με τη μέθοδο Phase-Shift. Για κάθε βήμα επεξεργασίας επιλέχθηκαν οι βέλτιστες παράμετροι κατόπιν δοκιμών για κάθε γραμμή μελέτης και πραγματοποιήθηκε η απεικόνιση των τελικών σεισμικών τομών. Η επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων ολοκληρώθηκε με τη στρωματογραφική ερμηνεία των τελικών σεισμικών τομών που παρουσιάζονται.

Από τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέκυψε ότι τα καταγεγραμμένα σεισμικά δεδομένα του ακουστικού συστήματος CHIRP κατά την ερευνητική αποστολή SWERUS-C3 ήταν απαλλαγμένα από θόρυβο σε μεγάλο βαθμό, ενώ από τα πρώτα στάδια επεξεργασίας των δεδομένων ήταν φανερό η υψηλή ευκρίνεια αυτών σε μικρά βάθη υπό του πυθμένα. Συμπερασματικά από την απεικόνιση των σεισμικών

δεδομένων διαπιστώθηκε ότι τα φίλτρα απομάκρυνσης θορύβου βελτίωσαν τη διακριτική ικανότητα των σεισμικών τομών σε τμήματα γεωλογικής πολυπλοκότητας και ιδιαίτερα κοντά σε ρήγματα. Τα αποτελέσματα της σεισμικής χωροθέτησης με τη μέθοδο Phase-Shift δεν ήταν ορατά σε μεγάλο βαθμό, λόγω της απουσίας κεκλιμένων ανακλαστήρων με μεγάλη κλίση σε σχέση με το συνολικό μήκος των γραμμών μελέτης. Συνολικά αναγνωρίστηκαν πέντε διαφορετικοί σχηματισμοί, οι οποίοι διακόπτονται από την παρουσία ρηγμάτων τόσο σε μικρά όσο και σε μεγαλύτερα βάθη υπό του πυθμένα. Τέλος από τη στρωματογραφική ερμηνεία των τελικών σεισμικών τομών παρατηρήθηκε ότι οι ανακλαστήρες που εντοπίστηκαν στις δύο γραμμές μελέτης που επεξεργάστηκαν εναποτίθενται πάνω σε τμήματα ασυνεχειών με μεγάλη κλίση, ενώ αποτελούν το βαθύτερο καταγεγραμμένο στρωματογραφικό χαρακτηριστικό των τομών.

## Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος.....	iv
Περίληψη.....	v
1ο Κεφάλαιο: Εισαγωγή .....	1
2ο Κεφάλαιο: Θαλάσσιες γεωφυσικές διασκοπήσεις και χρησιμοποιούμενα ακουστικά συστήματα 3	
2.1 Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης .....	3
2.1.1 Ακουστική εμπέδηση και συντελεστής ανάκλασης .....	4
2.1.2 Εξοπλισμός σεισμικής ανάκλασης .....	5
2.1.3 Θαλάσσιες εφαρμογές της σεισμικής ανάκλασης .....	6
2.2 Ηχοεντοπιστικά συστήματα Sonar .....	8
2.3 Σύστημα CHIRP .....	10
2.4 Η σεισμική πηγή Boomer .....	13
2.5 Η σεισμική πηγή Sparker .....	14
2.6 Το σύστημα Pinger .....	15
2.7 Σύγκριση σεισμικών πηγών.....	16
3ο Κεφάλαιο: Περιοχής μελέτης .....	18
3.1 Γεωφυσική διασκόπηση στη θάλασσα Chukchi.....	18
3.1.1 Δειγματοληψία πυρήνων .....	19
3.1.2 Το σκάφος διασκόπησης Oden .....	20
3.2 Τοπική στρωματογραφία και γεωτεκτονική .....	22
3.2.1 Πετρώματα οροσειράς Franklin και πετρώματα Προκάμβριας περιόδου .....	23
3.2.2 Πετρώματα της νήσου Ellesmere .....	24
3.2.3 Πετρώματα της ιζηματογενούς λεκάνης Colville και της οροσειράς Brooks Range 25	
3.2.4 Σχηματισμοί της ιζηματογενούς λεκάνης Hope .....	26
3.3 Το υποθαλάσσιο τόξο Herald.....	27
3.4 Η ζώνη ρωγμάτωσης Herald.....	30
4ο Κεφάλαιο: Περιγραφή βημάτων επεξεργασίας δεδομένων CHIRP .....	33
4.1 Διαγράμματα ροής επεξεργασίας δεδομένων .....	33
4.2 Βήματα προεπεξεργασίας σεισμικών δεδομένων .....	35
4.2.1 Συσχέτιση δεδομένων (Data Correlation) .....	35
4.2.2 Εφαρμογή φίλτρων βελτίωσης διακριτικής ικανότητας δεδομένων .....	36
4.3 Βήματα επεξεργασίας δεδομένων .....	38

4.3.1	Αποσυνέλιξη στο χώρο συχνότητας-απόστασης (F-x Deconvolution).....	38
4.3.2	Ζωνοπερατό φίλτρο συχνοτήτων (Band-pass Filter).....	39
4.3.3	Γεωμετρική διασπορά / σφαιρική απόκλιση (Geometric Spreading / Spherical Divergence).....	40
4.3.4	Αποσυνέλιξη (Deconvolution).....	42
4.3.5	Δυναμικό φίλτρο εξασθένησης θορύβου (Dynamic S/N Filter).....	46
4.3.6	Φίλτρο αυτόματης ενίσχυσης σήματος (Automatic Gain Control - AGC).....	47
4.3.7	Σεισμική χωροθέτηση (Migration) .....	48
4.4	Περιγραφή δεδομένων .....	52
5ο Κεφάλαιο:	Επεξεργασία δεδομένων σεισμικής ανάκλασης.....	53
5.1	Κατασκευή χάρτη απεικόνισης γραμμών μελέτης .....	55
5.2	Ενοποίηση τμημάτων γραμμών μελέτης .....	56
5.3	Εφαρμογή φίλτρου αυτόματης ενίσχυσης σήματος (AGC) .....	60
5.4	Εφαρμογή ζωνοπερατού φίλτρου συχνοτήτων (band-pass filter) .....	63
5.5	Εφαρμογή αποσυνέλιξης στο χώρο συχνότητας- απόστασης (F-X Deconvolution) 68	
5.6	Εφαρμογή αποσυνέλιξης αιχμής (Spiking Deconvolution) .....	71
5.7	Εφαρμογή σεισμικής χωροθέτησης (Migration).....	74
6ο Κεφάλαιο:	Ερμηνεία τελικών χωροθετημένων σεισμικών τομών.....	76
7ο Κεφάλαιο:	Συμπεράσματα - Προτάσεις .....	88
	Δημοσιευμένες πηγές: .....	90
	Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία .....	90
	Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία .....	92
	Πηγές από το διαδίκτυο:.....	92
	Ξενόγλωσση βιβλιογραφία .....	93
	Παράρτημα.....	95

## 1ο Κεφάλαιο: Εισαγωγή

Η μελέτη και η απεικόνιση των υποκείμενων του πυθμένα σχηματισμών αποτελεί το στοιχείο-κλειδί για την ανάλυση και την κατανόηση της γεωλογίας της περιοχής μελέτης ειδικότερα σε περιοχές, όπου είτε οι ήδη υπάρχουσες πληροφορίες για τη στρωματογραφία είναι περιορισμένες είτε είναι επιτακτική η ανάγκη χαρακτηρισμού του θαλάσσιου πυθμένα και των υποκείμενων σχηματισμών. Ανά τα χρόνια έχει αναπτυχθεί μια σειρά τεχνολογιών που στοχεύουν στο χαρακτηρισμό της στρωματογραφίας του πυθμένα. Ανάμεσα σε αυτές τις μεθόδους συμπεριλαμβάνονται :

- Δειγματοληπτικές γεωτρήσεις ιζημάτων και ερευνητικές γεωτρήσεις
- Βαρυτικές και μαγνητικές μετρήσεις
- Γεωφυσικές διασκοπήσεις σεισμικής ανάκλασης
- Γεωλογικός χαρακτηρισμός με γνώμονα επιφανειακούς σχηματισμούς

Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης αποτελεί την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο που εφαρμόζεται με στόχο το χαρακτηρισμό και την ερμηνεία των καταγεγραμμένων γεωλογικών φαινομένων στην περιοχή μελέτης. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη διάδοση ενός ακουστικού κύματος στο υπέδαφος, το οποίο υφίσταται ανακλάσεις και διαθλάσεις ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασής του με σχηματισμούς διαφορετικών φυσικών ιδιοτήτων, δηλαδή την ακουστική τους εμπίδηση (AI - acoustic impedance), αλλά και τη γωνία πρόσπτωσης των εκπεμπόμενων ακουστικών κυμάτων. Από τις καταγραφές των δεδομένων, γεωλόγοι και γεωφυσικοί από κοινού εξετάζουν την απεικόνιση του πυθμένα και των υποκείμενων σχηματισμών εντοπίζοντας πιθανά στοιχεία, τα οποία τους παρέχουν πληροφορίες για τη στρωματογραφία, τις φυσικές ιδιότητες των σχηματισμών, την ύπαρξη παγιδευμένων και προς εκμετάλλευση ρευστών, την ύπαρξη διευσδύσεων και τέλος πληροφορίες για τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, καθώς και τον τρόπο και χρόνο δημιουργίας αυτών.

Οι θαλάσσιες σεισμικές διασκοπήσεις χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στη βιομηχανία πετρελαίου για την ανίχνευση και την οριοθέτηση κοιτασμάτων σε μεγάλα βάθη κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας. Ωστόσο, εξίσου εφαρμόσιμες είναι και οι γεωφυσικές διασκοπήσεις που λαμβάνουν χώρα για μικρά βάθη διείσδυσης, όπου είναι σημαντική η γνώση της μορφολογίας του θαλάσσιου πυθμένα. Ανάλογα με το επιθυμητό βάθος διείσδυσης του σεισμικού κύματος στους σχηματισμούς του πυθμένα, το βάθος του πυθμένα (όποτε αυτό είναι ήδη γνωστό) και το είδος του σχηματισμών που αναμένεται να χαρτογραφηθεί, χρησιμοποιούνται και οι κατάλληλες σεισμικές πηγές. Στις θαλάσσιες διασκοπήσεις ανοιχτής θαλάσσης (Offshore seismic surveys), όπου οι έρευνες πραγματοποιούνται για μεγάλα βάθη διασκόπησης, χρησιμοποιούνται σεισμικές πηγές παλμού μεγάλης ισχύος και χαμηλής συχνότητας, όπως οι πηγές Airgun. Αντίθετα, σε εφαρμογές μικρού βάθους πυθμένα (Nearshore seismic surveys), όπως είναι η χαρτογράφηση του πυθμένα και η μελέτη των εναποτεθέντων στον πυθμένα ιζημάτων, χρησιμοποιούνται σεισμικές πηγές με ευρύ φάσμα συχνοτήτων, καθώς η συχνότητα αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει όχι μόνο το ύψος στήλης νερού που είναι δυνατό να διανύσει ο ακουστικός παλμός, αλλά και τόσο βάθος διείσδυσης αυτού, όσο και την ανάλυση κατά την

απεικόνιση των καταγεγραμμένων σεισμικών ιχνών. Τέτοιες ακουστικές πηγές/ συστήματα είναι :

- Σύστημα CHIRP
- Σύστημα Pinger
- Σύστημα Sonar
- Η σεισμική πηγή Sparker
- Η σεισμική πηγή Boomer

Όπως φαίνεται παραπάνω, παρατηρείται ένας διαχωρισμός σε ακουστικές πηγές και ακουστικά συστήματα. Η διαφορά μεταξύ ακουστικής πηγής και ακουστικού συστήματος είναι η παρουσία ενσωματωμένου δέκτη στην πηγή του ακουστικού παλμού.

Οι πρώτες εφαρμογές της σεισμικής ανάκλασης στις θαλάσσιες διασκοπήσεις χρονολογούνται από το 1914, όταν ο канаδικής καταγωγής εφευρέτης Reginald Fessenden επηρεαζόμενος από το ατύχημα του Τιτανικού το 1912, αποφάσισε να ασχοληθεί με τη διάδοση των ακουστικών κυμάτων στο υδάτινο μέσο. Οι θαλάσσιες διασκοπήσεις για μικρά βάθη πυθμένα είναι εφαρμόσιμες τόσο στον ελλαδικό χώρο τόσο και στο εξωτερικό. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται πολλά παραδείγματα και έργα στα οποία έχει συνεισφέρει η εφαρμογή της σεισμικής ανάκλασης.

Στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα, συγκεκριμένα το 1894, ισχυρός σεισμός στον ελλαδικό χώρο προκάλεσε σοβαρή ρηγμάτωση στο ήδη υπάρχον ρήγμα της Αταλάντης. Το προαναφερθέν ρήγμα βρίσκεται στην κεντρική Ελλάδα και εκτείνεται έως τον Ευβοϊκό κόλπο. Η έρευνα της θαλάσσιας περιοχής του ρήγματος διεξήχθη στις μέρες μας από το σεισμολόγο Βασίλειο Καραστάθη του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και τους συνεργάτες του. Στόχος της έρευνας ήταν η χαρτογράφηση του θαλάσσιου πυθμένα της περιοχής μελέτης, ο καθορισμός της υποθαλάσσιας δομής αυτού και ο εντοπισμός υποθαλάσσιων υδροφορέων. Με την εφαρμογή της μεθόδου σεισμικής ανάκλασης προσδιορίστηκε η θέση και η γεωμετρία του ρήγματος καθώς και η στρωματογραφία του πυθμένα ([Karastathis et al. 2007](#)). Μια δεύτερη έρευνα που πραγματοποιήθηκε στον ελλαδικό χώρο έλαβε χώρα στον κόλπο της Καβάλας. Η έρευνα σχεδιάστηκε και πραγματοποιήθηκε από το Εργαστήριο Θαλάσσιας Γεωλογίας και Φυσικής Ωκεανογραφίας του τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών σε συνεργασία με την εταιρεία Γεωδομική. Κύριος στόχος της έρευνας ήταν η χαρτογράφηση του θαλάσσιου πυθμένα και η μελέτη της στρωματογραφίας μέσω επεξεργασίας και ανάλυσης των αποτελεσμάτων στην περιοχή των μελλοντικών κατασκευών πλατφόρμων πετρελαίου στο εργασιακό πεδίο του Πρίνου στον κόλπο της Καβάλας ([Energean Oil & Gas 2015](#)).

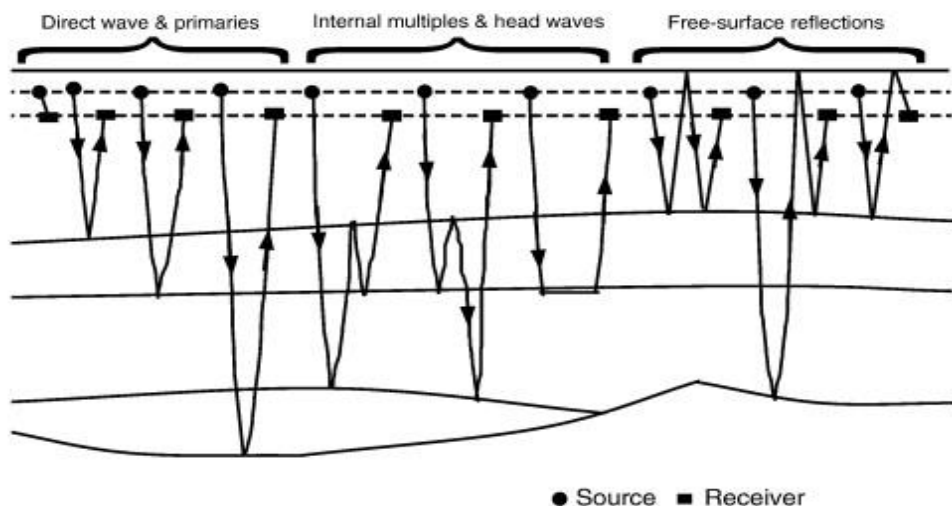
## 2ο Κεφάλαιο: Θαλάσσιες γεωφυσικές διασκοπήσεις και χρησιμοποιούμενα ακουστικά συστήματα

### 2.1 Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης

Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης είναι μία ερευνητική γεωφυσική μέθοδος, η οποία παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την κατανόηση της γεωλογικής δομής της Γης. Βασίζεται στους νόμους διάδοσης των ελαστικών κυμάτων παραγόμενα στην επιφάνεια της Γης, όταν πρόκειται για χερσαίες εφαρμογές, ή σε βάθη κοντά στην επιφάνεια της όταν πρόκειται για μελέτη ερευνητικών γεωτρήσεων και εξέταση του θαλάσσιου πυθμένα. Διαφόρου τύπου ελαστικά σεισμικά κύματα παράγονται με τη χρήση σεισμικών πηγών και τα οποία καταγράφονται με τη χρήση οργάνων-δεκτών, όπως είναι τα γεώφωνα ή τα υδρόφωνα. Στη μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης μελετώνται τα ανακλώμενα κύματα μετά την αλληλεπίδρασή τους με τις διαχωριστικές επιφάνειες των στρωμάτων του υπεδάφους ([Σχήμα 2.1](#)). Με την επεξεργασία των δεδομένων και τις εν λόγω μεταβολές κατά τη διάδοση των τεχνητά παραγόμενων σεισμικών κυμάτων χαρτογραφείται η γεωλογική δομή της περιοχής μελέτης ([Mosher & Simpkin 1999](#)).

Η σεισμική ανάκλαση έχει μεγάλη χρησιμότητα λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει ([Chaubey 2007](#)):

- Οι σεισμικές καταγραφές συλλέγονται σε μικρές αποστάσεις πηγής-δέκτη.
- Οι σεισμικές καταγραφές εμφανίζουν υψηλή ανάλυση παρά τη δυσκολία ερμηνείας του γεωλογικού μοντέλου της υπό μελέτη περιοχής.
- Δεν προϋποθέτει αύξηση της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων συναρτήσει του βάθους.
- Από τις καταγραφές της μεθόδου εξάγεται μια τομή του υπεδάφους ή του πυθμένα.



Σχήμα 2 Σχηματικό παράδειγμα ανακλάσεων σεισμικών ακτίνων σε διαχωριστικές επιφάνειες γεωλογικών σχηματισμών ([Ikelle,Erez & Yang 2009](#)).

### 2.1.1 Ακουστική εμπέδηση και συντελεστής ανάκλασης

Κατά την πρόσπτωση ενός ακουστικού κύματος σε ένα μέσο με διαφορετικές ακουστικές ιδιότητες από το μέσο στο οποίο προέρχεται ένα μέρος της ακουστικής του ενέργειας ανακλάται, ενώ ένα άλλο μέρος συνεχίζει τη διέλευση του στο επόμενο στρωματικό μέσο. Ο συντελεστής, ο οποίος περιγράφει τη σχέση αυτή μεταξύ των φυσικών ακουστικών ιδιοτήτων των μέσων και των χαρακτηριστικών του ακουστικού κύματος ονομάζεται ακουστική εμπέδηση και συμβολίζεται με το γράμμα  $Z$ . Ως ακουστική εμπέδηση ( $Z$ ) ορίζεται το γινόμενο της πυκνότητας του μέσου διάδοσης ( $\rho$ ) με την ταχύτητα διάδοσης του ακουστικού κύματος ( $c$ ). Ο συντελεστής αυτός περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση :

$$Z = \rho \cdot c \quad (2.1)$$

Έστω, ότι ένα ακουστικό κύμα διαδίδεται σε ένα στρωματικό μέσο με ακουστική εμπέδηση  $Z_1$  και προσπίπτει κάθετα στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ αυτού και ενός άλλου στρωματικού μέσου με ακουστική εμπέδηση  $Z_2$ . Το ποσοστό της ακουστικής ενέργειας, το οποίο δεν διαπερνά το προσπίπτον στρώμα, αλλά ανακλάται ονομάζεται συντελεστής ανάκλασης ( $\mu_0$ ) και περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\mu_0 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 \cdot c_2 - \rho_1 \cdot c_1}{\rho_2 \cdot c_2 + \rho_1 \cdot c_1} \quad (2.2)$$

Το ποσό της ενέργειας, το οποίο ανακλάται στη ζώνη μετάβασης μεταξύ δύο στρωματικών μέσων διαφορετικών ακουστικών εμπεδήσεων, και ανιχνεύεται από το δέκτη είναι ανάλογο του πλάτους του παραγόμενου από την πηγή ακουστικού παλμού, καθώς και της απόλυτης τιμής της διαφοράς ακουστικής εμπεδήσεως των δύο μέσων ([Κουή και συνεργάτες 2015](#)).

Στις θαλάσσιες σεισμικές διασκοπήσεις ο συντελεστής ανάκλασης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη τραχύτητα του πυθμένα, καθώς κατά την πρόσπτωση του ακουστικού κύματος σε αυτόν προκαλείται σκέδαση. Σε μία τέτοια περίπτωση ο συντελεστής ανάκλασης περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp\left(\frac{-4 \cdot \pi \cdot h \cdot \sin(\theta)}{\lambda}\right)^2 = \mu_0 \cdot e^{-R^2} \quad (2.3)$$

Στην παραπάνω σχέση, ως  $\mu_0$  ορίζεται ο συντελεστής ανάκλασης που θα υφίσταται εάν η επιφάνεια πρόσπτωσης ήταν λεία, ως  $\mu$  ο συντελεστής ανάκλασης του τραχύ πυθμένα, ο εκθετικός όρος της σχέσης εκφράζει την επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας, όπου  $h$  είναι η υψομετρική διαφορά των ανωμαλιών λόγω τραχύτητας του πυθμένα σε σχέση με τη μέση τοπογραφική επιφάνεια του πυθμένα,  $\theta$  η γωνία πρόσπτωσης του ακουστικού κύματος και  $\lambda$  το μήκος κύματος αυτού, ενώ  $R$  είναι η παράμετρος Rayleigh ([Mosher and Simpkin 1999](#)).



### 2.1.2 Εξοπλισμός σεισμικής ανάκλασης

Ο εξοπλισμός, που χρησιμοποιείται σε διασκοπήσεις σεισμικής ανάκλασης αποτελείται κυρίως από τα εξής μέρη:

- **Σεισμική πηγή** : Πρόκειται για συσκευή, με την οποία επιτυγχάνεται η εκτόνωση σεισμικής ενέργειας στο υπό μελέτη μέσο. Ως σεισμικές πηγές χρησιμοποιούνται εκρηκτικά μέσα, ειδικά αεροβόλα, υδραυλικοί ταλαντωτές (vibroiseis) ή και χειρωνακτικά μέσα που στηρίζονται στη μέθοδο του πίπτοντος βάρους.
- **Γεώφωνα** : Αποτελούν συσκευές ανίχνευσης της κίνησης του εδάφους λόγω σεισμικών κυμάτων παραγόμενων από τεχνητή σεισμική πηγή.
- **Υδρόφωνα** : Αποτελούν συσκευές ανίχνευσης της κίνησης των κυμάτων πίεσης προερχόμενων από σεισμική πηγή και χρησιμοποιούνται για θαλάσσιες εφαρμογές.
- **Σύστημα καταγραφής** : Είναι όργανο κατάλληλα σχεδιασμένο να είναι συμβατό με τους δέκτες (γεώφωνα/υδρόφωνα) για την αποθήκευση των δονήσεων που ανιχνεύονται μέσω των ανωτέρω.

Τα ηλεκτροδυναμικά σεισμόμετρα (γεώφωνα) είναι συσκευές, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της διέγερσης που προκαλείται από την ταλάντωση των σωματιδίων του εδάφους, μετατρέποντας την ανιχνευόμενη κίνηση σε ηλεκτρική τάση σύμφωνα με το νόμο του Faraday περί ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής ([Brincker et al. 2005](#), [Mawa, Ser & Ching 2017](#)). Η διαδικασία εφαρμογής των σεισμικών μελετών σε θαλάσσιες περιοχές διαφέρει σε μικρό βαθμό από τις σεισμικές έρευνες που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια του εδάφους.

Με παρόμοιο τρόπο με τα γεώφωνα λειτουργούν και τα υδρόφωνα, τα οποία καταγράφουν διαφορές πίεσης στο νερό (πυκνώματα-αραιώματα) μετατρέποντας την πίεση που ασκείται σε ηλεκτρική τάση. Δεδομένης της κίνησης των υδροφώνων λόγω των θαλάσσιων ρευμάτων και της ανάγκης ανάκτησης εικόνας υψηλής ακρίβειας της μορφολογίας του πυθμένα είναι απαραίτητη η συνεχής γνώση της θέσης των υδροφώνων. Ο έλεγχος των υδροφώνων επιτυγχάνεται με παρατηρήσεις των θέσεων τους σε σχέση με σταθερή μονάδα παρατήρησης GPS ενσωματωμένη στο πλεούμενο ([Soni 2017](#)).

Η καταλληλότερη θέση των γεωφώνων και των υδροφώνων είναι σε μικρές αποστάσεις από τη σεισμική πηγή. Ιδανικά τοποθετούνται σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους και σε αποστάσεις από την πηγή που είναι σε μικρότερες από το επιθυμητό βάθος διασκόπησης.

Η μέθοδος αυτή είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση ενός γεωλογικού σχηματισμού, όχι μόνο σε μεγάλα βάθη, αλλά και μεγάλων διαστάσεων. Είναι συνεπώς αναμενόμενο να στηρίζεται σε διαφόρους νόμους που αφορούν τη συμπεριφορά των ελαστικών κυμάτων.

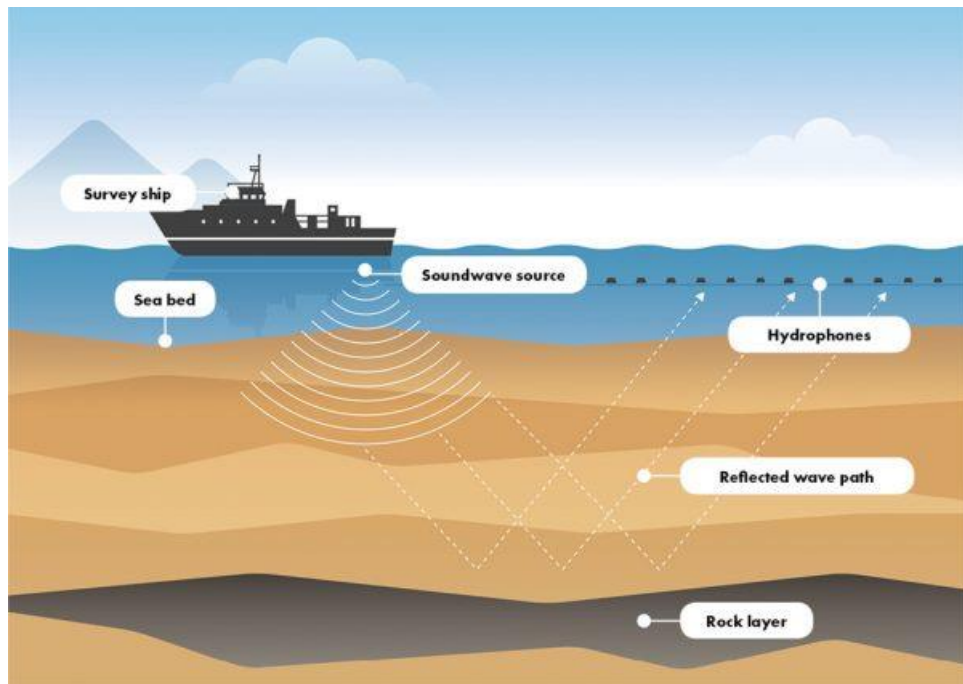
### 2.1.3 Θαλάσσιες εφαρμογές της σεισμικής ανάκλασης

Οι μέθοδοι σεισμικής ανάκλασης υψηλής ανάλυσης χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στις θαλάσσιες έρευνες τις τελευταίες δεκαετίες. Απώτερος σκοπός της χρήσης της μεθόδου της σεισμικής ανάκλασης είναι η χαρτογράφηση των σχηματισμών της περιοχής μελέτης και η δημιουργία γεωλογικού μοντέλου. Συγκεντρωτικά, οι εφαρμογές των θαλάσσιων διασκοπήσεων βασιζόμενες στην αρχή της σεισμικής ανάκλασης είναι ([INNOMAR Technologie n.d](#)) :

- Γεωλογικές μελέτες υποκειμένων του πυθμένα σχηματισμών
- Γεωφυσικές διασκοπήσεις
- Μελέτη ιζηματογενών σχηματισμών στον πυθμένα
- Αναζήτηση ορυκτών πόρων
- Χαρτογράφηση πυθμένα
- Αναζήτηση αντικειμένων (αγωγοί, ναυάγια, ογκόλιθοι)
- Έρευνες για ναυάγια, ιστορικά κτίρια και ευρήματα στα πλαίσια της υποθαλάσσιας αρχαιολογίας
- Χάραξη περιοχής εγκατάστασης υποθαλάσσιων αγωγών
- Παλαιοπεριβαλλοντική και παλαιοοικολογική αναπαράσταση και ανακατασκευή του γεωλογικού υποβάθρου

Σύμφωνα με το Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας του Γουντς Χολ ([Woods Hole Oceanographic Institution](#)) τα συστήματα χαρτογράφησης πυθμένα δεν εντοπίζουν τα ιζηματογενή υλικά της περιοχής μελέτης, αλλά τις μεταβολές της ακουστικής εμπεδήσης που χαρακτηρίζει τους υποκειμένους σχηματισμούς της υποθαλάσσιας γεωλογίας. Μεταβολές στην ακουστική εμπεδήση μεταφράζονται και ως μεταβολές στην πυκνότητα του σχηματισμού, παρατήρηση που μεταφράζεται ως ένδειξη μετάβασης από το ένα στρωματογραφικό μέσο στο άλλο.

Στις γεωφυσικές διασκοπήσεις ανοιχτής θαλάσσης χρησιμοποιείται πλεούμενο, το οποίο φέρει στην πρύμνη του καλώδια μερικών χιλιομέτρων με ενσωματωμένα υδρόφωνα. Τα υδρόφωνα αυτά ανιχνεύουν τα ίχνη των ανακλώμενων κυμάτων και εν συνεχεία το καταγραφικό καταγράφει τους χρόνους άφιξης των ανακλώμενων κυμάτων, ενώ ακολουθεί η επεξεργασία των δεδομένων και δημιουργείται μια σεισμική τομή της υπό μελέτη περιοχής. Σε μικρότερα βάθη χρησιμοποιούνται πλεούμενα μικρότερης κλίμακας με συστοιχίες υδροφώνων μικρότερου μήκους, χρησιμοποιώντας βυθιζόμενα όργανα καταγραφής, των οποίων το βάθος βύθισης διαφέρει ανάλογα με τη μορφολογία του πυθμένα, με μέσο ύψος τα 15 m από την επιφάνεια του θαλάσσιου πυθμένα. Τέτοια όργανα είναι οι πλευρικοί ισομετρικοί ηχοβολιστές και τα μαγνητόμετρα. Για την κατασκευή προφίλ του πυθμένα με πολύ υψηλές αναλύσεις χρησιμοποιούνται ακουστικές μέθοδοι όπως η σεισμική πηγή CHIRP (Compressed High Intensity Radar Pulse). Στο [Σχήμα 2.2](#) παρουσιάζεται η βασική αρχή γεωφυσικής διασκόπησης σε θαλάσσιο περιβάλλον.



Σχήμα 2.2 Θαλάσσια γεωφυσική διασκόπηση σεισμικής ανάκλασης ([ENERGY INFORMATION AUSTRALIA n.d.](#)).

## 2.2 Ηχοεντοπιστικά συστήματα Sonar

Η λέξη Sonar είναι ένα ακρωνύμιο της φράσης **SOund NAvigations and Ranging**, δηλαδή Σύστημα Ηχητικής Πλοήγησης και Εντοπισμού. Αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του Α' Παγκοσμίου Πολέμου από τους Βρετανούς ονομαζόταν ASDIC, και χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση εχθρικών υποβρυχίων. Αργότερα, αναπτύχθηκε σε μεγαλύτερο βαθμό από τις ΗΠΑ, αυξάνοντας την εμβέλεια και τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών Sonar ([Hempstead and Worthington 2004](#)).

Πρόκειται για εξοπλισμό, ο οποίος επιτρέπει στο χρήστη της συσκευής να ανιχνεύσει και να παρατηρήσει αντικείμενα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας με τη εκπομπή υπερηχητικών κυμάτων UHF/VHF (Ultra High Frequency/Very High Frequency). Τα ακουστικά συστήματα Sonar χωρίζονται σε πηγές παραγωγής κύματος μονής ακτίνας (single beam sonar, SBS) και σε πηγές παραγωγής κύματος πολλαπλής ακτίνας (multi beam sonar, MBS). Τόσο τα SBS όσο και τα MBS συστήματα χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στις θαλάσσιες διασκοπήσεις, καθώς παρουσιάζουν υψηλή ακρίβεια στην αποτύπωση του πυθμένα. Τα συστήματα MBS ωστόσο χαρακτηρίζονται από υψηλότερη ανάλυση, καλύτερη ακρίβεια και επίσης καλύτερη κάλυψη σε σύγκριση με τα συστήματα SBS. Επίσης σημαντικό πλεονέκτημα των MBS είναι το ότι με τη χρήσης τους κατασκευάζεται τρισδιάστατο μοντέλο του πυθμένα της θάλασσας σε αντίθεση με τα συστήματα SBS. Από την άλλη πλευρά το κόστος λειτουργίας των συστημάτων MBS είναι αυξημένο σε σχέση με τα SBS, τα οποία είναι και πιο εύχρηστα, καθώς προσφέρουν τη δυνατότητα πραγματοποίησης μεγαλύτερων γραμμών μελέτης. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι το κόστος είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες επιλογής ενός συστήματος Sonar, καθώς η παρουσία ενσωματωμένου συστήματος GPS είναι απαραίτητη σε έρευνες όπου απαιτείται να είναι γνωστή η θέση του σκάφους καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας ([L-3 Communications Sea Beam Instruments, n.d](#)).

Το ακουστικό κύμα που παράγεται από τα Sonar διαδίδεται εντός της στήλης νερού, ενώ ένα μέρος της ενέργειας αυτής ανακλάται όταν συναντήσει αντικείμενα μέσα στο νερό. Η ποσότητα της ακουστικής ενέργειας που ανακλάται πίσω στον πομπό από τον πυθμένα της θάλασσας ποικίλει και εξαρτάται από ([Penn State University, n.d](#)) :

- Την τοπογραφία του πυθμένα
- Τη σύνθεση των ιζηματογενών αποθέσεων στον πυθμένα
- Τη γωνία πρόσπτωσης του ακουστικού κύματος
- Τη συχνότητα του σήματος

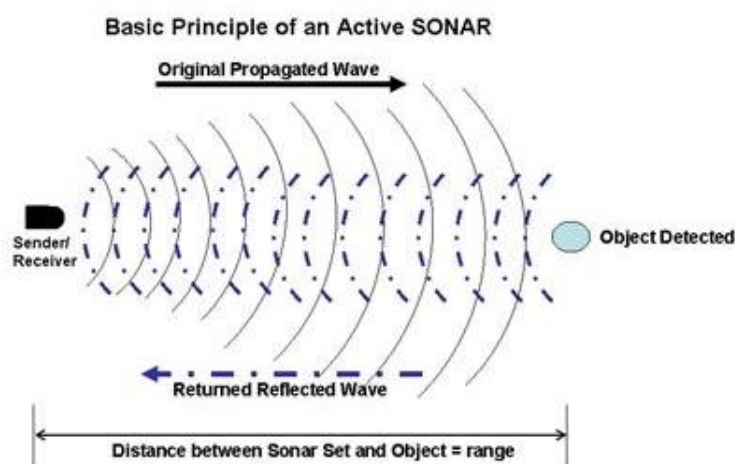
Ένα μέρος της ακουστικής ενέργειας ανακλάται ομαλά όταν προσπίπτει σε επίπεδη επιφάνεια. Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγάλη, ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας διαχέεται σε πολλές κατευθύνσεις και μακριά από την ακουστική πηγή/δέκτη. Αυτό συμβαίνει κυρίως, σε τραχιές επιφάνειες, όπου λόγω της υψομετρικής διαβάθμισης του πυθμένα, η χαρτογράφηση αυτού είναι περισσότερο απαιτητική. Ταυτόχρονα, ένα μέρος της ακουστικής ενέργειας χάνεται στον πυθμένα της θάλασσας. Η διεισδυτική ικανότητα μίας συσκευής Sonar με συχνότητα μεγαλύτερη των 10 kHz είναι πολύ μικρή. Με τη μείωση της συχνότητας αυξάνεται το βάθος διείσδυσης του ακουστικού παλμού. Ενδεικτικά εκτιμάται ότι το βάθος αυτό για συχνότητα από 1 kHz έως 10 kHz είναι της τάξης των μερικών μέτρων, ενώ για

συχνότητα από 100 Hz έως και 1 kHz είναι της τάξης δεκάδων μέτρων. Τέλος για συχνότητες κάτω των 100 Hz το βάθος διείσδυσης αυξάνεται περισσότερο ([Penn State University, n.d.](#)).

Ο ρόλος των ηχοεντοπιστικών συστημάτων δεν περιορίζεται μόνο στη διάδοση του ακουστικού παλμού, αλλά λειτουργούν και ως δέκτες του ανακλώμενου κύματος. Το μέρος της ακουστικής ενέργειας που ανακλάται ονομάζεται ηχώ (echo). Στο [Σχήμα 2.3](#) παρουσιάζεται η βασική αρχή λειτουργίας των ηχοεντοπιστικών συστημάτων Sonar και το φαινόμενο της αντήχησης. Μέσω της μεταβολής της ισχύος και της συχνότητας του ανακλώμενου κύματος μπορεί να ανιχνευθεί η παρουσία αντικειμένου/στόχου, καθώς και το μέγεθος αυτού. Επίσης, από τη μεταβολή της συχνότητας με την εφαρμογή του φαινομένου Doppler και υπολογίζοντας το χρόνο διάδοσης του ανακλώμενου κύματος από το στόχο έως και το δέκτη μπορεί να προσδιοριστεί με έμμεσο τρόπο η απόσταση τους, καθώς η ταχύτητα διάδοσης ακουστικού κύματος στο νερό είναι γνωστή (περίπου 1500 m/s).

Συμπερασματικά τα ηχοεντοπιστικά συστήματα Sonar χρησιμοποιούνται για :

- Χαρτογράφηση πυθμένα
- Εντοπισμό αντικειμένων στο πυθμένα της θάλασσας, είτε ανθρωπογενούς (αγωγοί, καλώδια, μεταλλικά αντικείμενα) είτε φυσικής προέλευσης (υποθαλάσσια υψώματα και κοιλάδες)
- Εντοπισμό ευνοϊκών περιοχών για αλιεία
- Στρατιωτικές εφαρμογές



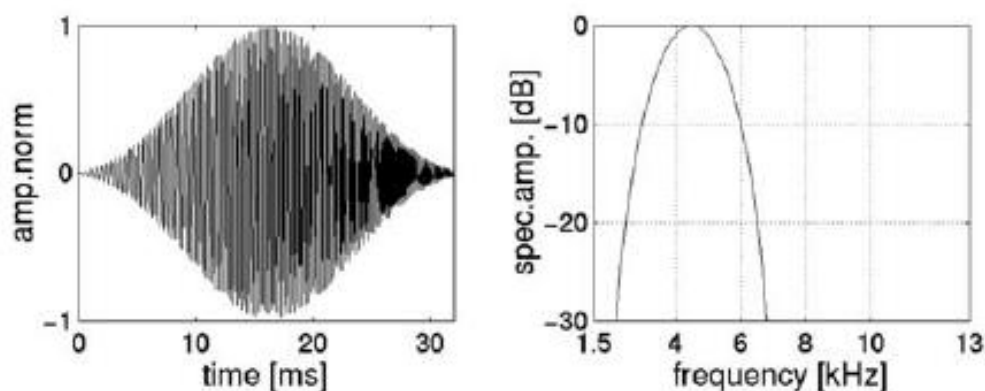
Σχήμα 2.3 Αρχή λειτουργίας Sonar ([Penn State University n.d.](#)).

## 2.3 Σύστημα CHIRP

Η ανάπτυξη του συστήματος CHIRP ξεκίνησε από την κάλυψη των αναγκών δημιουργίας ενός συστήματος, το οποίο να χαρακτηρίζεται από μεγάλη διεισδυτική ικανότητα και ταυτόχρονα από υψηλή ανάλυση. Υπάρχουν τρεις λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιούνται τα συστήματα CHIRP στις θαλάσσιες διασκοπήσεις :

- Παρέχει μια σταθερή πηγή ακουστικής ενέργειας
- Λόγω της υψηλής μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε ακουστική αυξάνεται η αποδοτικότητα της χαρτογράφησης.
- Επιτυγχάνεται αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio) για εφαρμογές μεγάλων γραμμών μελέτης και μείωση της απαιτούμενης ενέργειας λειτουργίας του συστήματος

Τα συστήματα CHIRP εκπέμπουν ακουστικούς παλμούς με γραμμικά μεταβαλλόμενο εύρος συχνοτήτων και πλάτος ταλάντωσης. Οι μεταβαλλόμενες τιμές της συχνότητας συναρτήσει του χρόνου δημιουργούν το φαινόμενο ρυθμιζόμενης συχνότητας (Frequency Modulated Sweep). Ενδεικτικά, στο [Σχήμα 2.4](#) παρουσιάζεται ένας παλμός CHIRP μεταβαλλόμενου εύρους συχνοτήτων από 2 έως 8 kHz και μέσης συχνότητας 4.5 kHz (αριστερά) και το αντίστοιχο ενεργειακό φάσμα του παλμού (δεξιά). Οι παλμοί του συστήματος CHIRP παράγονται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή και αποθηκεύονται σε μικροεπεξεργαστή στο εσωτερικό της διάταξης, ο οποίος ελέγχει ολόκληρο το σύστημα. Χαρακτηρίζονται από ευρύ εύρος τιμών συχνότητας διασφαλίζοντας με αυτό το τρόπο υψηλή ανάλυση και από παλμό μεγάλου μήκους (συνήθως 16 ms ή 32 ms) επιτυγχάνοντας με αυτό το τρόπο μεγαλύτερη μετατροπή ενέργειας σε ισχύ παρά τη μικρή κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για τη δημιουργία του κάθε παλμού. Το χαρακτηριστικό αυτό του σήματος διασφαλίζει τη μεγάλη διεισδυτική ικανότητα του παλμού στο εδαφικά ιζήματα του θαλάσσιου πυθμένα ([Plets et al., 2013](#)).



Σχήμα 2.4 Κυματομορφή γραμμικά μεταβαλλόμενης συχνότητας CHIRP (αριστερά) και το αντίστοιχο ενεργειακό φάσμα του συστήματος (δεξιά) ([Gutowski et al. 2002](#)).

Τα συστήματα CHIRP λειτουργούν σε συχνότητες από 500 Hz έως και 200 kHz. Ο ακουστικός παλμός διαδίδεται μέσα στη στήλη νερού και όταν συναντήσει κάποιο υλικό με διαφορετικές ακουστικές ιδιότητες, ένα μέρος της ενέργειας ανακλάται. Οι ανακλάσεις αυτές του ακουστικού κύματος καταγράφονται και δημιουργείται το προφίλ του πυθμένα, το οποίο απεικονίζεται σε πραγματικό χρόνο. Ουσιαστικά πρόκειται για μια πηγή Sonar από τα



καταγεγραμμένα σεισμικά ίχνη της οποίας παράγεται μία δισδιάστατη τομή βάσει της ανακλώμενης ακουστικής ενέργειας από θαλάσσιο περιβάλλον. Η τομή κατασκευάζεται από δεδομένα βασισμένα σε φαινόμενα σεισμικής ανάκλασης, δηλαδή σε μετρήσεις του χρόνου διάδοσης του ακουστικού κύματος, καθώς και του ανακλώμενου κύματος (διπλός χρόνος διαδρομής, Two-Way Travel Time, TWTT), το οποίο επιστρέφει στην πηγή. Γνωρίζοντας λοιπόν το χρόνο διάδοσης του ανακλώμενου κύματος και την ταχύτητα διάδοσης ακουστικών κυμάτων δια μέσω του νερού, είναι δυνατός ο υπολογισμός του βάθους του υπό μελέτη σχηματισμού. Η χρήση των ακουστικών πηγών CHIRP προσφέρει αξιόπιστες μετρήσεις μεγάλης ακρίβειας έως και τα πρώτα 20 m με 30 m κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα, όταν απαντώνται χαλαρά εδαφικά ιζήματα. Έτσι ανάλογα με τον τύπο ιζημάτων που καταγράφονται στον πυθμένα, διακρίνονται δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις :

- Αν ο πυθμένα αποτελείται από σκληρά και συμπαγή ιζήματα, τότε το μεγαλύτερο μέρος της ακουστικής ενέργειας ανακλάται προς την επιφάνεια και έτσι δεν μπορεί να κατασκευαστεί προφίλ της στρωματογραφίας του πυθμένα.
- Εάν ο πυθμένας αποτελείται από μαλακά και χαλαρά ιζήματα, τότε ένα μέρος της ακουστικής ενέργειας ανακλάται προς την ακουστική πηγή και ανάλογα με την ένταση του ανακλώμενου κύματος που επιστρέφει στην πηγή είναι δυνατός ο προσδιορισμός του πάχους των ιζημάτων στο πυθμένα.

Ωστόσο, για τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου, πραγματοποιούνται διορθώσεις του εκπεμπόμενου ακουστικού σήματος ως προς τη φάση της πηγής και του δέκτη. Η κυματομορφή του ακουστικού παλμού CHIRP εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εξής παραμέτρους:

- Τη συχνότητα του κύματος
- Την παρουσία και το είδος της μεθόδου ομαδοποίησης / κατηγοριοποίησης των δεδομένων
- Η διάρκεια του παλμού
- Τη στιγμιαία συνάρτηση συχνότητας (Instantaneous Frequency Function IFF)

Επηρεάζοντας τις παραπάνω παραμέτρους του ακουστικού κύματος CHIRP από το εκπεμπόμενο κύμα μπορεί να προκύψει η επιθυμητή ανάλυση και διεύθυνση του κύματος στους υποκείμενους σχηματισμούς του πυθμένα και η επιθυμητή τιμή λόγου σήματος προς θόρυβο ([Gutowski et al. 2002](#)).

Η σεισμική πηγή CHIRP βρίσκει εφαρμογές :

- Στην κατηγοριοποίηση των ιζημάτων στο πυθμένα της θάλασσας
- Στην κατασκευή πλατφόρμων και λιμένων
- Στην τοποθέτηση υποθαλάσσιων αγωγών και σωλήνων
- Στην παρακολούθηση περιβαλλοντικού αντίκτυπου
- Στην αρχαιολογία

Τα όργανα βαθυμετρίας όπως οι συσκευές απεικόνισης προφίλ του πυθμένα και των υποκείμενων στρωμάτων (SBP – Sub Bottom Profilers) και οι ακουστικές πηγές τύπου

CHIRP, χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό καθώς παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως:

- Αρκετά υψηλή οριζόντια και κατακόρυφη ανάλυση (έως και 7.5 cm)
- Χρησιμοποιούνται, τόσο σε θαλάσσιες εφαρμογές μέσου βάθους (near shore) όσο και σε εφαρμογές ρηχού πυθμένα.
- Έχουν τη δυνατότητα εντοπισμού αντικειμένων ακόμη και της τάξης των μερικών dm.
- Εύκολη χρήση τους ακόμη και από μικρού μεγέθους πλεούμενα.
- Η παραγωγή ακουστικού σήματος με δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας του συναρτήσει του χρόνου.
- Υψηλή αποδοτικότητα μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε ακουστική.

Η ακουστική πηγή τοποθετείται σε ένα κέλυφος, το οποίο σύμφωνα με τη βιβλιογραφία ονομάζεται tow-fish. Το κέλυφος αυτό μαζί με το όργανο βυθίζεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και με τη χρήση καλωδίου τοποθετείται σε ένα επιθυμητό βάθος σε σχέση με τον πυθμένα.



## 2.4 Η σεισμική πηγή Boomer

Η σεισμική πηγή Boomer είναι μια πηγή χαμηλότερης συχνότητας, της τάξης των 200 Hz έως 8000 Hz. Ανήκει στην ευρεία κατηγορία των ηλεκτροδυναμικών πηγών και λειτουργεί ως επιταχυντής της υδάτινης μάζας γύρω από την πηγή. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για ρηχά όσο και για βαθιά ύδατα, ενώ η ικανότητα διείσδυσης του ακουστικού κύματος είναι στα 50 m με 70 m κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα της θάλασσας. Στηρίζεται στη διάδοση ενός ακουστικού παλμού μηχανικά παραγόμενου με χαρακτηριστική συχνότητα προς το πυθμένα της θάλασσας. Ο παραγόμενος παλμός προκαλείται από την ηλεκτρική εκκένωση ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενέργεια είναι αποθηκευμένη σε πυκνωτές εντός της διάταξης της συσκευής, ενώ η εκκένωση πραγματοποιείται σε ηλεκτρομαγνητικά πηνία. Στα τεχνικά χαρακτηριστικά της διάταξης συμπεριλαμβάνεται μία μεταλλική πλάκα πάνω στην οποία είναι τοποθετημένη μια λαστιχένια μεμβράνη τύπου διαφράγματος, η οποία παράγει τον ακουστικό παλμό ([Mosher and Simpkin 1999](#); [Ning 1967](#)). Η συσκευή Boomer τοποθετείται στο νερό και μέσω της κίνησης της μεμβράνης διαχέεται το παραγόμενο κύμα που μεταδίδεται στη στήλη του νερού ([Σχήμα 2.5](#)).



Σχήμα 2.5 Ηλεκτρομαγνητικός αναμεταδότης ακουστικών κυμάτων Boomer ([GEODEVICE n.d.](#)).

Παρά την χαμηλή μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε ακουστική, στις θαλάσσιες διασκοπήσεις χρησιμοποιείται συχνά η ακουστική πηγή Boomer λόγω των εξής πλεονεκτημάτων :

- Καθαρός παλμός
- Μεγάλο συχνотικό εύρος
- Σημαντικές εφαρμογές σε χαρτογραφήσεις πυθμένα με πυκνά ιζήματα

## 2.5 Η σεισμική πηγή Sparker

Ιστορικά, οι σεισμικές πηγές Sparker χρησιμοποιούνταν για θαλάσσιες έρευνες, όπου απαιτείται υψηλή διεισδυτική ικανότητα του ακουστικού σήματος, μεγαλύτερη ακόμα και από αυτή που προσφέρει η ακουστική πηγή Boomer ([Fugro Marine Geoservices 2017](#)). Η λειτουργία της σεισμικής πηγής Sparker ([Σχήμα 2.6](#)) στηρίζεται στη δημιουργία ηλεκτρικού σπινθήρα μεταξύ ενός θετικού και ενός αρνητικού ηλεκτροδίου. Ο σπινθήρας αυτός προκαλεί απότομη εξάτμιση στην ποσότητα του νερού γύρω από τα ηλεκτρόδια με αποτέλεσμα να δημιουργείται κρουστικός παλμός. Η απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή του σπινθήρα αποθηκεύεται σε έναν πυκνωτή. Η ενέργεια και το σχήμα της κυματομορφής επηρεάζονται από τη χωρητικότητα που πυκνωτή, καθώς και από τη τάση του ([Dondurur 2018](#); [Mosher and Simpkin 1999](#)).

Οι συνηθέστερες σεισμικές πηγές Sparker λειτουργούν σε συχνότητες μεταξύ των 50 Hz και των 4 kHz, ενώ ο παλμός έχει διάρκεια από 1 έως 5 ms. Η χρήση της σεισμικής πηγής Sparker ποικίλει ανάλογα με το επιθυμητό βάθος διείσδυσης και το βάθος βύθισης του εξοπλισμού. Χρησιμοποιούνται για γεωφυσικές διασκοπήσεις σε μικρά βάθη πυθμένα της τάξης των 5 μέτρων, ενώ επίσης και μεγάλα βάθη έως και 4500 m. Σημαντικό χαρακτηριστικό των σεισμικών πηγών Sparker είναι ότι προσφέρουν υψηλή διείσδυση του σήματος στους σχηματισμούς του πυθμένα, επιτυγχάνοντας καλή ανάλυση έως και 750 m κάτω από το βυθό. Βέβαια, η υψηλή αυτή διεισδυτική ικανότητα παρατηρείται μόνο για μικρές τιμές συχνότητας των εκπεμπόμενων ακουστικών κυμάτων. Ωστόσο, σε πολύ μικρά βάθη πυθμένα, μικρότερα των πέντε μέτρων, ο εξοπλισμός θεωρείται αναξιόπιστος, καθώς η διάταξη των δεκτών των ακουστικών κυμάτων προκαλεί τη συγχώνευση των σημάτων, δυσκολεύοντας με αυτό τον τρόπο την ερμηνεία των αποτελεσμάτων ([Gron & Missiaen 2013](#)).

Το σήμα της πηγής Sparker μπορεί να μεταβληθεί κατά τη διάρκεια μιας έρευνας, με αποτέλεσμα να επηρεαστούν τα δεδομένα της έρευνας. Η συνεχόμενη χρήση και η υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την εκτόνωση της πηγής οδηγούν σε μείωση της απόδοσης και της διάρκειας ζωής των ηλεκτροδίων με αποτέλεσμα να επηρεάζεται το σήμα της πηγής. Για να αποφευχθεί τυχόν σφάλμα στις μετρήσεις, συνίσταται η αντικατάσταση των πυκνωτών με καινούργιους. Ωστόσο, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, η συχνότητα εμφάνισης περιστατικών καμένων εξαρτημένων έχει ελαττωθεί ([Fugro Marine Geoservices, 2017](#)).



Σχήμα 2.6 Σεισμική πηγή Sparker ([GEO Marine Survey Systems n.d.](#)).

## 2.6 Το σύστημα Pinger

Το σύστημα Pinger χρησιμοποιείται για χαρτογράφηση του πυθμένα και εφαρμόζεται κυρίως σε θαλάσσιες διασκοπήσεις για ρηχά σχετικά βάθη πυθμένα από 4 m έως και 300 m σε ιδανικές συνθήκες. Αποτελούνται από έναν κεραμικό μορφοτροπέα (transducer) για σεισμική πηγή, μια μονάδα καταγραφής, ενώ ως δέκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο η ακουστική πηγή, όσο ένα υδρόφωνο είτε συστοιχία υδροφώνων ([BENTOS, SUB BOTTOM PROFILERS](#)). Στο [Σχήμα 2.7](#) παρουσιάζεται μία εικόνα από το σύστημα Pinger, το οποίο είναι κατασκευασμένη από την εταιρεία KNUDSEN. Πρόκειται για ένα σύστημα, το οποίο μπορεί να προσφέρει υψηλότερη ανάλυση σε μεγαλύτερα βάθη διασκόπησης ακόμα και σε σχέση με πηγές χαμηλής συχνότητας, όπως η σεισμική πηγή Boomer, καθώς, το σύστημα Pinger συνδυάζει υψηλή ανάλυση και μεγάλη διεισδυτική ικανότητα. Ο συνδυασμός αυτός του ακουστικού συστήματος Pinger πηγάζει από τη χρήση σήματος μεταβλητής συχνότητας συνάρτησης χρόνου εκπομπής (όπως το σύστημα CHIRP).

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος χαρτογράφησης πυθμένα Pinger βασίζεται στην εκπομπή ακουστικών κυμάτων από τον ακουστικό μορφοτροπέα (ή μέσω μίας συστοιχίας ακουστικών μορφοτροπέων) προς τον πυθμένα. Τα κύματα αυτά έχουν χαρακτηριστική συχνότητα. Μέσω του χρόνου καταγραφής των ανακλώμενων κυμάτων που παράγονται από την πρόσπτωση του ακουστικού κύματος στους γεωλογικούς σχηματισμούς του πυθμένα κατασκευάζεται το προφίλ της μορφολογίας αυτού.

Η πηγή του συστήματος Pinger εκπέμπει σε συγκεκριμένες συχνότητες προκειμένου να διατηρηθούν τα πλεονεκτήματα έναντι άλλων σεισμικών πηγών. Οι συχνότητες αυτές είναι της τάξης των 3.5 kHz και 15 kHz, ενώ κατασκευάζονται και υψίσυχρες πηγές (200 kHz) για την επίτευξη καλύτερης ανάλυσης του πυθμένα.



Σχήμα 2.7 Η σεισμική πηγή Pinger ([Knudsen n.d.](#)).

## 2.7 Σύγκριση σεισμικών πηγών

Οι απαιτήσεις σεισμικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης για τη χαρτογράφηση των σχηματισμών του θαλάσσιου πυθμένα είναι διαφορετικές από τις συνηθισμένες μετρήσεις για ανίχνευση πετρελαίου. Γι' αυτό το λόγο παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των οργάνων καταγραφής των μετρήσεων και επομένως και στο τρόπο επεξεργασίας των δεδομένων. Ο κύριος παράγοντας επιλογής εξοπλισμού για τη χαρτογράφηση πυθμένα είναι το είδος του ιζηματογενών σχηματισμών που αναμένονται. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικά τα κυριότερα χαρακτηριστικά των σεισμικών πηγών που περιγράφηκαν ανωτέρω ([Mosher & Simpkin 1999](#)) ([Πίνακας 2-1](#)):

Πίνακας 2-1 Κυριότερα χαρακτηριστικά των σεισμικών πηγών θαλάσσιας διασκόπησης.

	<b>Sonar</b>	<b>Sparker</b>	<b>Boomer</b>	<b>Chirp</b>	<b>Pinger</b>
<b>Κόστος</b>	<i>Χαμηλό</i>	<i>Χαμηλό</i>	<i>Χαμηλό</i>	<i>Χαμηλό</i>	<i>Χαμηλό</i>
<b>Ενσωματωμένος δέκτης</b>	<i>Ναι</i>	<i>Όχι</i>	<i>Όχι</i>	<i>Ναι</i>	<i>Ναι</i>
<b>Ικανότητα διεξόδου σήματος</b>	<i>Χαμηλή</i>	<i>Υψηλή</i>	<i>Περιορισμένη</i>	<i>Χαμηλή</i>	<i>Περιορισμένη</i>
<b>Ανάλυση</b>	<i>Υψηλή</i>	<i>Χαμηλή</i>	<i>Υψηλή</i>	<i>Υψηλή</i>	<i>Χαμηλή</i>
<b>Κατευθυντικότητα σήματος</b>	<i>Περιορισμένη</i>	<i>Χαμηλή</i>	<i>Περιορισμένη</i>	<i>Περιορισμένη</i>	<i>Περιορισμένη</i>
<b>Δυνατότητα καταβύθισης οργάνου</b>	<i>Υψηλή</i>	<i>Υψηλή</i>	<i>Περιορισμένη</i>	<i>Υψηλή</i>	<i>Υψηλή</i>
<b>Επαναληψιμότητα</b>	<i>Υψηλή</i>	<i>Υψηλή</i>	<i>Υψηλή</i>	<i>Υψηλή</i>	<i>Υψηλή</i>
<b>Αποδοτικότητα</b>	<i>Υψηλή</i>	<i>Υψηλή</i>	<i>Υψηλή</i>	<i>Υψηλή</i>	<i>Υψηλή</i>

Παρά τα κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ των διαφόρων σεισμικών πηγών υπάρχουν και άλλα που αναφέρονται σε κάθε μία ξεχωριστά. Το σύστημα Sonar και η ακουστική πηγή Boomer έχουν τη δυνατότητα δημιουργίας τρισδιάστατου προφίλ του πυθμένα σε αντίθεση με τη σεισμική πηγή Sparker. Επίσης, η σεισμική πηγή Boomer παρουσιάζει επιπλέον μειονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες σεισμικές πηγές ως προς το τρόπο δημιουργίας του

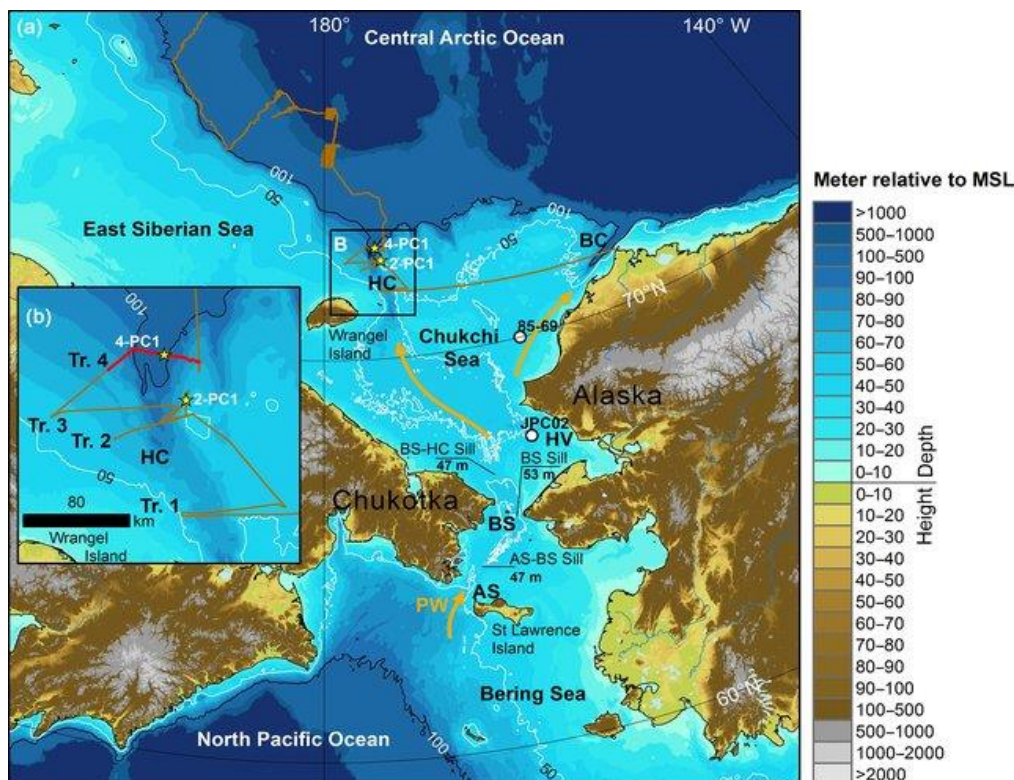
ακουστικού παλμού και ως προς το μέγεθος της πηγής, λόγω της χρήσης της μεταλλικής πλάκας. Για τη δημιουργία ακουστικού παλμού απαιτούνται υψηλά ποσά ενέργειας, ενώ οι υψηλές τιμές τάσης και ρεύματος περιορίζουν τη χρησιμότητα του συστήματος αυτού.

Οι ακουστικές πηγές Boomer χρησιμοποιούνται για περιοχές όπου αναμένεται η διεύρυνση του ακουστικού κύματος σε ιζηματογενείς σχηματισμούς με μέγεθος κόκκων μεγαλύτερο από αυτό της χοντρόκοκκης άμμου, ενώ σε σχηματισμούς με λεπτόκοκκα ιζήματα το σύστημα CHIRP παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια.

## 3ο Κεφάλαιο: Περιοχής μελέτης

### 3.1 Γεωφυσική διασκόπηση στη θάλασσα Chukchi

Η ερευνητική αποστολή SWERUS-C3 2014 αποτελούνταν από δύο σκέλη 45 ημερών και πραγματοποιήθηκε από το παγοθραυστικό σουηδικής κατασκευής Oden. Η γεωφυσική διασκόπηση που έλαβε χώρα στο νότιο τμήμα της θάλασσας Chukchi με σκοπό τη χαρτογράφηση του υποθαλάσσιου φαράγγιου Herald ξεκίνησε στις 21 Αυγούστου 2014 από την πόλη Μπάροου της Αλάσκας, ενώ ολοκληρώθηκε στις 3 Οκτωβρίου 2014 στην πόλη Τρόμσο της Νορβηγίας, όπου το χρονικό διάστημα αυτό αποτελούσε το δεύτερο σκέλος της ερευνητικής αποστολής. Κατά την ερευνητική αποστολή πραγματοποιήθηκαν 4 γραμμές μελέτης όπως φαίνεται και στο [Σχήμα 3.1](#). Στον ίδιο χάρτη φαίνεται και το υψόμετρο σε σχέση με τη μέση στάθμη της θάλασσας, τόσο του πυθμένα των θαλάσσιων περιοχών, όσο και τις ηπειρωτικών περιοχών. Το τμήμα (a) στο [Σχήμα 3.1](#) αποτελεί τη γενική εικόνα του χάρτη, ενώ στο τμήμα (b) φαίνεται σε μεγέθυνση η περιοχή της θαλάσσιας γεωφυσικής διασκόπησης στη θάλασσα Chukchi, συγκεκριμένα στο φαράγγι Herald, όπου με καφέ χρώμα αναπαρίστανται οι γραμμές μελέτης. Η ενσωμάτωση των στοιχείων βαθυμετρικού χάρτη αποτελεί τμήμα του ψηφιακού μοντέλου βαθυμετρίας της Αλάσκας (ARDEM – Alaska Region Digital Elevation Model) ([Jakobsson et al. 2017](#)).

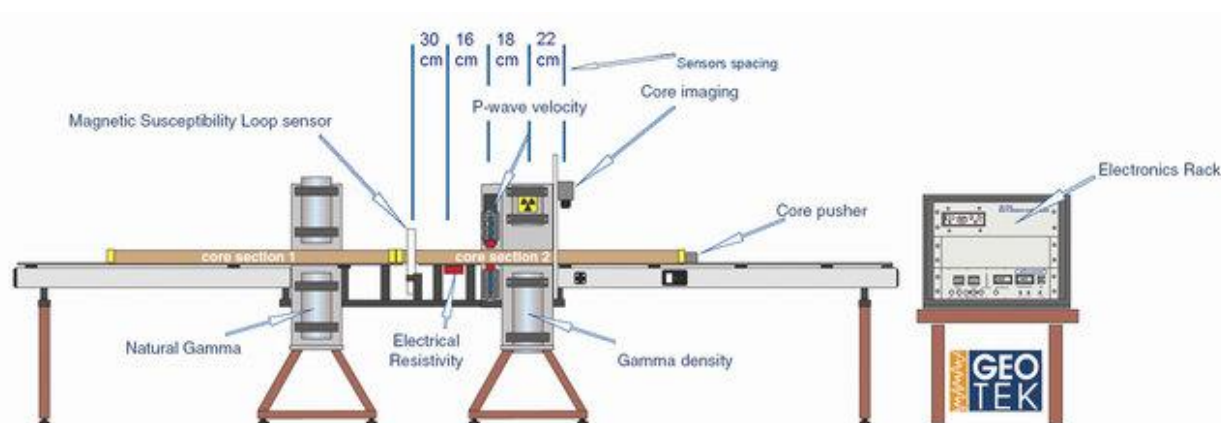


Σχήμα 3.1 Χάρτης του δυτικού τμήματος του Αρκτικού Ωκεανού και του βόρειου τμήματος Ειρηνικού Ωκεανού. Δεξιά φαίνεται η χρωματική κλίμακα που αντιστοιχεί στο υψόμετρο σε σχέση με τη μέση στάθμη της θάλασσας. Οι μπλε αποχρώσεις αντιστοιχούν στο βάθος, ενώ οι καφέ και γκρι αποχρώσεις στο ύψος για τις θαλάσσιες και τις ηπειρωτικές περιοχές του χάρτη αντίστοιχα. Με κίτρινα αστέρια φαίνονται στο σχήμα και οι γεωτρήσεις πυρηνοληψίας (4-PC1 και 2-PC1) που πραγματοποιήθηκαν στην ερευνητική αποστολή SWERUS-C3 ([Jakobsson et al. 2017](#)).



### 3.1.1 Δειγματοληψία πυρήνων

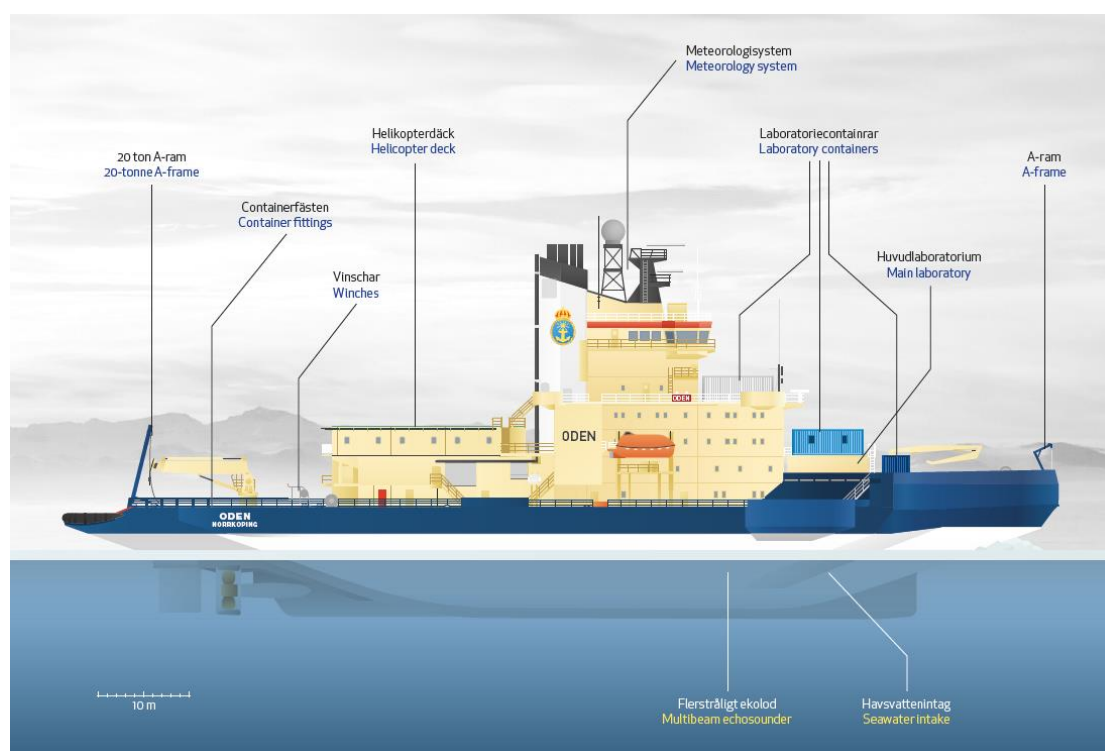
Κατά την ερευνητική αποστολή SWERUS-C3 πραγματοποιήθηκαν δύο δειγματοληπτικές γεωτρήσεις πυρήνων, των οποίων η θέση φαίνεται στο [Σχήμα 3.1](#), χρησιμοποιώντας τον πυρηνολήπτη του Πανεπιστημίου της Στοκχόλμης, ο οποίος ήταν εδραιωμένος στο παγοθραυστικό σκάφος Oden. Το σύστημα εκτόξευσης της κεφαλής πυρηνοληψίας σχεδιάστηκε κατάλληλα για την ενσωμάτωση του στο σκάφος Oden με δυνατότητα υποστήριξης πυρήνων μέγιστου μήκους 12 m από την πρυμναία μεριά του σκάφους. Ο πυρηνολήπτης διαθέτει εξωτερική και εσωτερική διάμετρο 110 και 100 mm αντίστοιχα, επενδυμένος εσωτερικά με πολυβινυλοχλωρίδιο και ενσωματωμένος κατά τη διάρκεια της ερευνητικής αποστολής SWERUS-C3 με διατρητική κεφαλή βάρους 1360 kg. Ο πυρήνας δειγματοληψίας 2-PC1 μήκους 8,2 m ανακτήθηκε σε βάθος στήλης νερού 57 m και με συντεταγμένες θέσης 175°19.2'W, 72°30.0'N, ενώ ο πυρήνας δειγματοληψίας 4-PC1 μήκους 6,1 m ανακτήθηκε σε βάθος στήλης νερού 120 m με συντεταγμένες θέσης 175°43.6'W, 72°50.3'N. Στις γεωτρήσεις δειγματοληψίας που πραγματοποιήθηκαν, διεξήχθησαν και μετρήσεις φυσικών ιδιοτήτων των σχηματισμών με στόχο τον χαρακτηρισμό των σχηματισμών υπό την επιφάνεια του θαλάσσιου πυθμένα. Στις μετρήσεις αυτές υψηλής ανάλυσης συμπεριλαμβάνονται μετρήσεις πυκνότητας, μαγνητικής επιδεκτικότητας και ταχύτητας διάδοσης ανακλώμενων κυμάτων. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν με τον καταγραφέα πυρήνων πολλαπλών αισθητήρων (Multi-Sensor Core Logger-MSCL) της εταιρείας Geotek, ο οποίος φαίνεται στο [Σχήμα 3.2](#). Οι πυρήνες δειγματοληψίας πριν χωριστούν σε επιμέρους δοκίμια, περιγράφηκαν οπτικά σύμφωνα με τα γεωλογικά δεδομένα λιθολογίας και από την υποκείμενες του πυθμένα ιζηματολογικές δομές, ενώ στη συνέχεια χωρίστηκαν σε δείγματα για περισσότερες αναλύσεις. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μέτρησης διατμητικής αντοχής στα επιμέρους δείγματα του πυρήνα δειγματοληψίας, με συσκευή πίπτοντος βάρους σχήματος κώνου ([Jakobsson et al. 2017](#)).



Σχήμα 3.2 Καταγραφέας πυρήνων πολλαπλών αισθητήρων (Multi-Sensor Core Logger-MSCL) της εταιρείας Geotek ([Vatandoost et al. 2009](#)).

### 3.1.2 Το σκάφος διασκόπησης Oden

Το παγοθραυστικό σκάφος Oden κατασκευάστηκε το 1988 από την Σουηδική Ναυτική Αρχή (Swedish Maritime Administration) και εξοπλίστηκε με το ηχοεντοπιστικό σύστημα Sonar πολλαπλών ακτίνων και το σύστημα CHIRP το 2007. Στον [Πίνακα 3-1](#) φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εγκατεστημένων ηχοεντοπιστικών συστημάτων EM 120 και EM 122, όπου το δεύτερο αντικατέστησε το σύστημα EM 120 το 2008. Στον [Πίνακα 3-2](#) φαίνονται τα χαρακτηριστικά του συστήματος CHIRP SBP 120, το οποίο είναι ενσωματωμένο στο σύστημα EM 122. Στο [Σχήμα 3.3](#) παρουσιάζεται σχηματική απεικόνιση των εγκατεστημένων συστημάτων και του σκάφους Oden ([Stockholm University n.d.](#)).



Σχήμα 3.3 Σχηματική απεικόνιση του παγοθραυστικού σκάφους Oden ([Swedish Polar Research Secretariat, n.d.](#)).



Πίνακας 3-1 Χαρακτηριστικά των ηχοεντοπιστικών συστημάτων Sonar που εγκαταστάθηκαν στο παγοθραυστικό σκάφος Oden.

	EM 120	EM 122
<b>Βάθος εφαρμογής</b>	20 έως 11000 m	20 έως 11000 m
<b>Συχνότητα λειτουργίας</b>	12 kHz	12 kHz
<b>Εύρος χαρτογράφησης</b>	Έως και 5 φορές το ύψος στήλης νερού	Έως και 25% καλύτερο του συστήματος EM 120
<b>Εύρος ακτινών</b>	150° x 1°	150° x 1°
<b>Αριθμός εκπεμπόμενων ακτινών</b>	191 ακτίνες που καλύπτουν τομέα έως και 150°	288 ταυτόχρονες ακτίνες που καλύπτουν τομέα έως και 150°

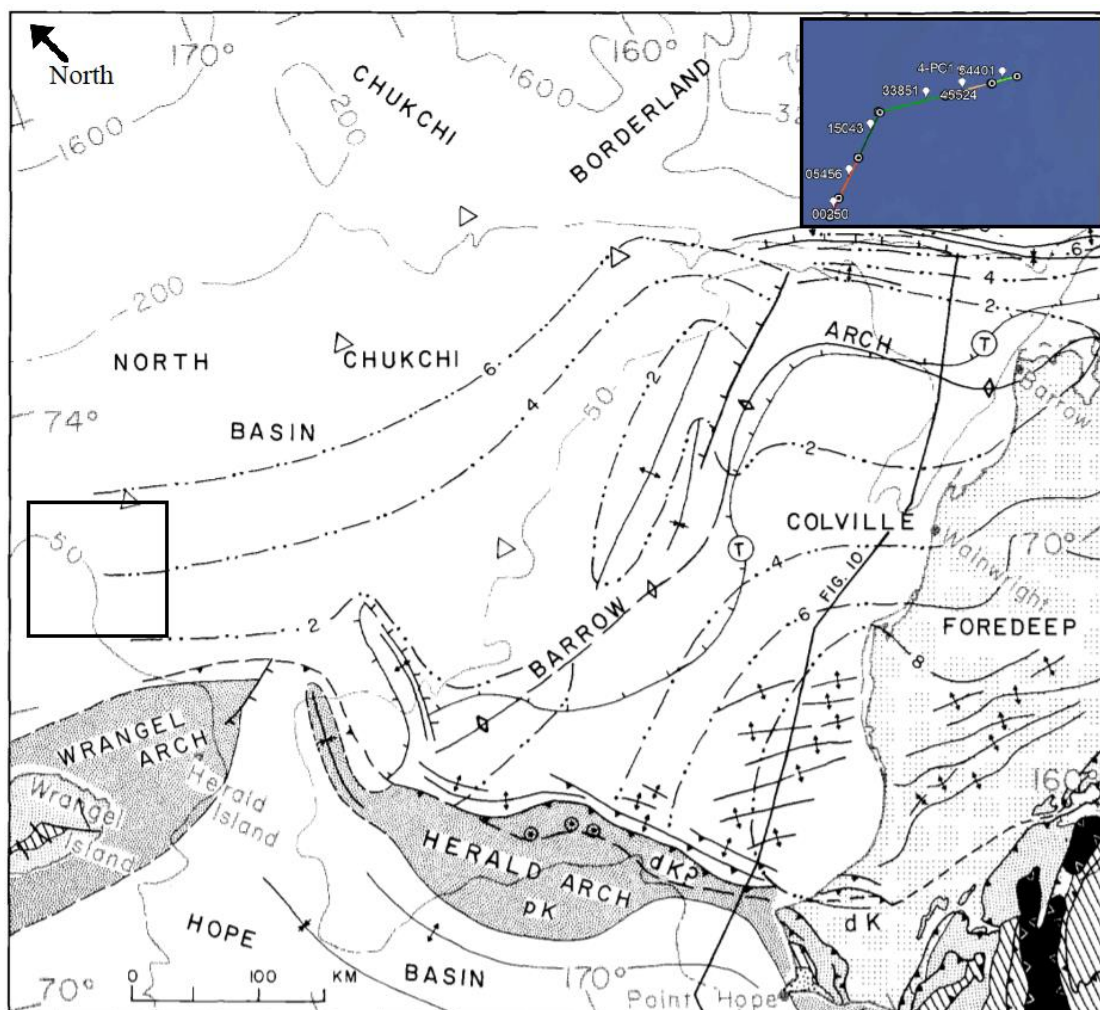
Πίνακας 3-2 Χαρακτηριστικά του συστήματος CHIRP που εγκαταστάθηκε στο παγοθραυστικό σκάφος Oden.

	SBP 120
<b>Συχνотικό εύρος λειτουργίας</b>	3-7 kHz
<b>Κατακόρυφη ανάλυση</b>	0.35 ms
<b>Οριζόντια ανάλυση</b>	3° x 3°

Λόγω της αναγκαιότητας υψηλής ακρίβειας στη γνώση της ταχύτητας διάδοσης των ηχητικών κυμάτων εντός της στήλης νερού, χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, θερμοκρασίας και βάθους που ήταν εγκατεστημένοι αμέσως μετά τις διατάξεις των ακουστικών μορφοτροπέων. Οι διατάξεις των συστημάτων ήταν τοποθετημένες στο κύτος του σκάφους και ήταν καλυμμένες με πλάκες κατασκευασμένες από πλαστικό πολυουρεθάνης ενισχυμένο από ενσωματωμένες σε αυτό βέργες τιτανίου, προκειμένου να προστατεύονται από τις συγκρούσεις με τον πάγο. Ωστόσο, η ενίσχυση της διάταξης με το πλαστικό υλικό είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του εύρους χαρτογράφησης πυθμένα σε τέσσερις φορές το ύψος της στήλης νερού ([Stockholm University n.d.](#)).

### 3.2 Τοπική στρωματογραφία και γεωτεκτονική

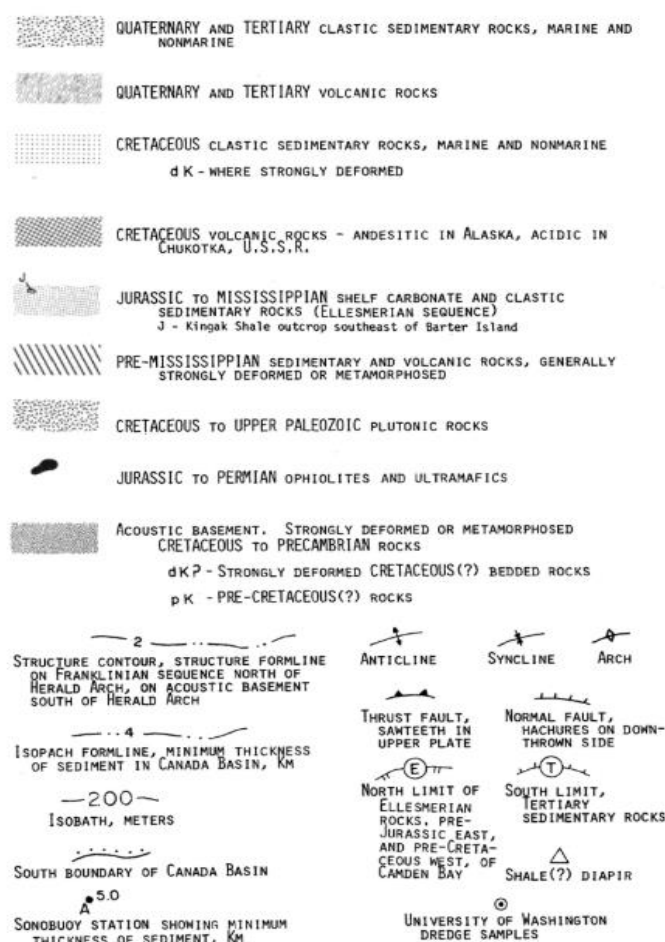
Οι γεωλογικοί σχηματισμοί στο βόρειο τμήμα της Αλάσκας και της γύρω περιοχής χωρίζονται σε τέσσερις τεκτονικούς σχηματισμούς (πετρώματα της νήσου Ellesmere, πετρώματα της οροσειράς Franklin, πετρώματα της οροσειράς Brooks Range και πετρώματα της ιζηματογενούς λεκάνης Hope), οι οποίοι συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με τα κύρια γεωλογικά φαινόμενα που έχουν λάβει χώρα στην περιοχή. Τα πετρώματα της νήσου Ellesmere, καθώς και των οροσειρών Brooks Range και Franklin χαρακτηρίστηκαν από σχηματισμούς που εντοπίζονται στον Αρκτικό αρχιπέλαγος του Καναδά και στην οροσειρά Brooks Range της Αλάσκας ([Grantz & Eittreim 1979](#)). Στο [Σχήμα 3.5](#) παρουσιάζεται το υπόμνημα των γεωλογικών χαρτών στο [Σχήμα 3.4](#) και στο [Σχήμα 3.6](#).



Σχήμα 3.4 Χάρτης γεωλογικών σχηματισμών στο βόρειο τμήμα της θάλασσας Chukchi. Στο μαύρο πλαίσιο περιχαράσσεται η θέση των γραμμών μελέτη, ενώ πάνω δεξιά στο σχήμα παρουσιάζεται σε μικρογραφία η θέση των γραμμών μελέτης ανακτημένη από το Google Earth ([Grantz & Eittreim 1979](#)).

### 3.2.1 Πετρώματα οροσειράς Franklin και πετρώματα Προκάμβριας περιόδου

Τα πετρώματα Προκάμβριας γεωλογικής περιόδου (542 mya – million years ago) είναι κυρίως σχιστόλιθοι, φυλλίτες, γνεύσιοι, σχίστες και μάρμαρα. Τα πετρώματα της οροσειράς Franklin έλαβαν την ονομασία τους από το γεωσύγκλινο που δημιούργησε την οροσειρά Franklin. Στο Αρκτικό αρχιπέλαγος οι σχηματισμοί μέσης Κάμβριας περιόδου είναι κατά κύριο λόγο βόρειας προέλευσης από γειτονικούς σχηματισμούς, ενώ στο νότιο τμήμα του αρχιπελάγους εντοπίζονται κυρίως ανθρακικά πετρώματα. Στο βόρειο τμήμα της Αλάσκας τα πετρώματα της οροσειράς Franklin που εντοπίζονται αποτελούνται κυρίως από ισχυρά μεταμορφωμένα πετρώματα Κάμβριας περιόδου, τα οποία διακόπτονται από ρήγματα επώθησης που εντοπίζονται στην οροσειρά Brooks Range και στις χερσονήσους Seward και Chukotsk. Σε μερικά τμήματα οι σχηματισμοί έχουν υποστεί μεταμόρφωση, ενώ εντοπίζονται και εμφανίσεις πλουτωνικών πετρωμάτων. Τέλος, θεωρείται πιθανό να εκτείνεται η εμφάνιση των σχηματισμών αυτών ακόμη και κάτω από τα όρια της θάλασσας Chukchi ([Thurston & Theiss 1987](#)).



Σχήμα 3.5 Περιγραφή γεωλογικών σχηματισμών που απεικονίζονται στο γεωλογικό χάρτη στο [Σχήμα 3.4](#) και στο [Σχήμα 3.6](#) ([Grantz & Eittreim 1979](#)).

### 3.2.2 Πετρώματα της νήσου Ellesmere

Τα πετρώματα της οροσειράς Franklin είναι ισχυρά παραμορφωμένα λόγω της διάβρωσης που έλαβε χώρα κατά την πρώτη ορογένεση που συντέλεσε στη δημιουργία της νήσου Ellesmere κατά τη Δεβόνια γεωλογική περίοδο, δημιουργώντας μια υποθαλάσσια πλάκα υψηλής σταθερότητας, την Αρκτική πλατφόρμα στο βόρειο τμήμα της Αλάσκας. Ο εν λόγω σχηματισμός θεωρείται ότι διατήρησε τη σταθερότητα του για περίπου 200 εκατομμύρια χρόνια, από την πρώτη Μισσισσίπιο εποχή έως και την Κρητιδική περίοδο. Πετρώματα της νήσου Ellesmere που εναποτέθηκαν στην υποθαλάσσια πλατφόρμα παρατηρούνται στην ιζηματογενή λεκάνη Sverdrup στο Αρκτικό αρχιπέλαγος, το οποίο αποτελείται κατά κύριο λόγο από πετρώματα Μισσισσίπιας και Ιουρασικής περιόδου. Στο βόρειο τμήμα της Αλάσκας εντοπίζονται σε μικρά βάθη σχιστόλιθοι οργανικής προέλευσης, που επικαλύπτονται από σχιστόλιθους πρώιμης Κρητιδικής περιόδου. Λόγω της παρουσίας επανθημάτων (outcropping rocks) Ιουρασικής και πρώιμης Κρητιδικής περιόδου στο βόρειο τμήμα της περιοχής του ποταμού Yukon, καθώς και λόγω της παρουσίας σχιστόλιθων του λόφου Kingak (Kingak Shale) Ιουρασικής και πρώιμης Κρητιδικής περιόδου, θεωρείται ότι τα γεωλογικά στρώματα που απαντώνται στην περιοχή γίνονται πιο ρηχά στο βόρειο τμήμα τους ([Thurston & Theiss 1987](#)).

Το όριο μεταξύ των πετρωμάτων της νήσου Ellesmere και των υπερκείμενων πετρωμάτων της οροσειράς Brooks Range θα μπορούσε να το οριστεί είτε μέσω των παλαιότερων πετρωμάτων μέσης Ιουρασικής περιόδου που έλαβαν ιζήματα από σχηματισμούς νότια προέλευσης είτε μέσω νεότερων σχηματισμών πρώιμης Κρητιδικής περιόδου που έλαβαν ιζήματα από σχηματισμούς βόρεια προέλευσης ([Thurston & Theiss 1987](#)).

### 3.2.3 Πετρώματα της ιζηματογενούς λεκάνης Colville και της οροσειράς Brooks Range

Η περίοδος τεκτονικής στασιμότητας και ηρεμίας που καταγράφεται από την αλληλουχία των πετρωμάτων της νήσου Ellesmere διακόπηκε κατά την Ιουρασική και την πρώιμη Κρητιδική περίοδο κατά την οποία λόγω των υφιστάμενων παραμορφώσεων έλαβε χώρα η ορογένεση της οροσειράς Brooks Range στο νότιο τμήμα της Αρκτικής υποθαλάσσιας πλατφόρμας. Πετρώματα Παλαιοζωικής και Μεσοζωικής περιόδου υφιστάμενης επώθησης με βόρεια κατεύθυνση δημιούργησαν μία ζώνη καταβύθισης στην οποία εκβάλλει και ο ποταμός Colville στο βόρειο τμήμα της αρχικής κατάστασης της οροσειράς Brooks Range. Το υφιστάμενο στη ζώνη φορτίο λόγω πτυχώσεων και επωθήσεων, καθώς και λόγω της εναπόθεσης ιζηματογενών πετρωμάτων Ιουρασικής και Κρητιδικής περιόδου είχε ως αποτέλεσμα να καταβυθιστεί και να διευρυνθεί η Αρκτική πλατφόρμα και να αποκτήσει κλίση στη νότια μεριά της ([Thurston & Theiss 1987](#), [Decker et al. 1989](#)).

Τα παλαιότερα στρώματα στην ιζηματογενή λεκάνη Colville είναι αποθέσεις τόφφων μέσης Ιουρασικής περιόδου και τουρβιδίτες ύστερης Ιουρασικής περιόδου νότιας προέλευσης, τα οποία είναι εκτεθειμένα στο βόρειο τμήμα της οροσειράς Brooks Range. Οι αποθέσεις αυτές εκτιμώνται ότι είναι αντίστοιχης περιόδου με (συμπιεσμένο) ασβεστόλιθο που εναποτέθηκε στο πάνω τμήμα του γεωλογικής ακολουθίας των πετρωμάτων της νήσου Ellesmere στο βόρειο τμήμα της λεκάνης. Τα ιζηματογενή πετρώματα Κρητιδικής περιόδου στη λεκάνη του ποταμού Colville εκτείνονται σε πάχος 6000 m στο νότιο τμήμα, τα οποία αποτελούνται κυρίως από τουρβιδίτες. Αυτά τα πετρώματα λεπταίνουν προς το βόρειο τμήμα από 500 με 2000 m, όπου επικαλύπτουν το τόξο Barrow ([Thurston & Theiss 1987](#), [Decker et al. 1989](#)).

Στο βορειοδυτικό τμήμα της Αλάσκας και της υφαλοκρηπίδας της θάλασσας Chukchi περιλαμβάνονται δελτοειδείς αποθέσεις ποταμών επικαλυμμένες με παχιά στρώματα άνθρακα. Στο βόρειο τμήμα της θάλασσας Chukchi τμήματα σχηματισμών ιζηματογενούς προέλευσης της Τεταρτογενούς περιόδου επικαλύπτουν τα πετρώματα Κρητιδικής περιόδου στο βόρειο τμήμα της λεκάνης του ποταμού Colville ([Thurston & Theiss 1987](#), [Decker et al. 1989](#)).

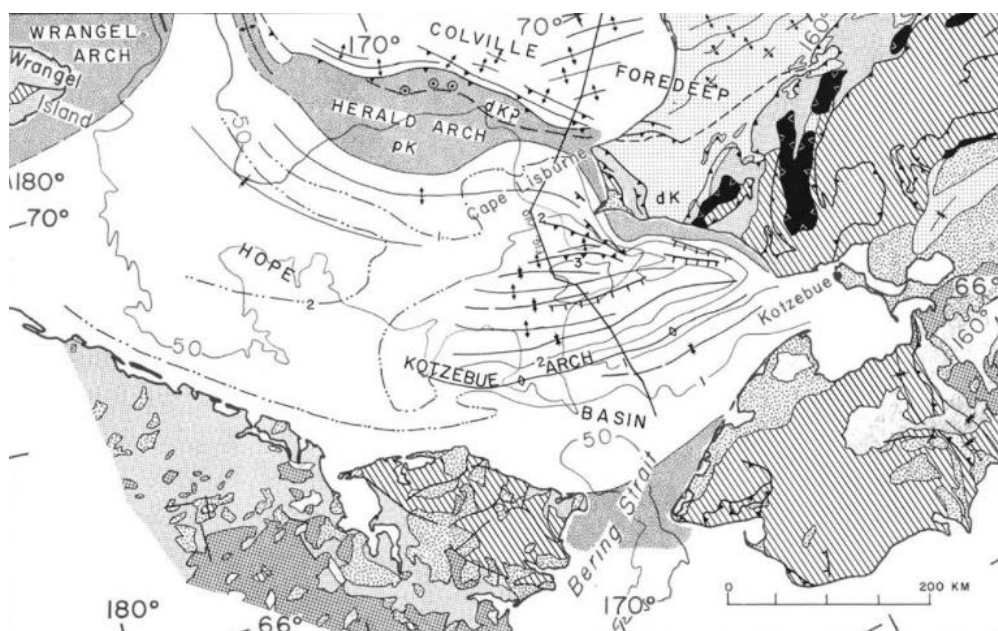
### 3.2.4 Σχηματισμοί της ιζηματογενούς λεκάνης Hope

Τα νεότερα ιζηματογενή πετρώματα της ιζηματογενούς λεκάνης Hope στην νότια μεριά της πλάκας στη θάλασσα Chukchi δεν έχουν ακόμη χρονολογηθεί, ενώ ο μέχρι στιγμής συσχετισμός τους με τα στρωματοποιημένα πετρώματα των γειτονικών ηπειρωτικών περιοχών αποτελεί μία υπόθεση της πραγματικής προέλευσης αυτών. Επανθήματα (υδάτινης) ιζηματογενούς προέλευσης της ανώτερης Νεογενούς περιόδου και διεσπαρμένα επανθήματα ηπειρωτικής ιζηματογενούς προέλευσης Νεογενούς και Παλαιογενούς περιόδου στο βόρειο τμήμα της χερσονήσου Seward και στην ηπειρωτική περιοχή της λίμνης Selawik, ανήκουν σε σχηματισμούς που πιθανά να εκτείνονται μέχρι την ιζηματογενή λεκάνη Hope. Είναι επίσης πιθανό και το σενάριο, πετρώματα της ύστερης Κρητιδικής και της πρώιμης Τεταρτογενούς περιόδου στο ανατολικό τμήμα της χερσονήσου Seward να εκτείνονται μέχρι και την ιζηματογενή λεκάνη. Τα πετρώματα της λεκάνης εναποτέθηκαν στις διηπειρωτικές λεκάνες στο τμήμα της οροσειράς Brook Range, ενώ πρόκειται για μία ακολουθία πετρωμάτων με διαφορετικά τεκτονικά χαρακτηριστικά από αυτά της οροσειράς Brook Range στο βόρειο τμήμα της Αλάσκας ([Thurston & Theiss 1987](#)).



### 3.3 Το υποθαλάσσιο τόξο Herald

Η ζώνη ρηγμάτωσης και το υποθαλάσσιο τόξο στην παράκτια περιοχή της νήσου Herald είναι η κυρίαρχη γεωλογική δομή στο κεντρικό κομμάτι της θάλασσας Chukchi, στον Αρκτικό Ωκεανό, όπως φαίνεται στο [Σχήμα 3.6](#). Βρίσκεται στη βόρεια περιοχή της λεκάνης Hope και νοτιοανατολικά της νήσου Wrangel. Το τόξο Herald είναι μια υποθαλάσσια ράχη που δημιουργήθηκε από επωθούμενες μάζες προερχόμενες από τα βορειοανατολικά ([Thurston & Theiss 1987](#)). Το κύριο ρήγμα που εντοπίζεται στην περιοχή, εκτείνεται από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά. Αναδύεται σε χερσαίο περιβάλλον, όπου μέσω ανύψωσης πετρωμάτων στο ακρωτήριο Point Hope παρόμοιων με αυτών της νήσου Ellesmere και της οροσειράς Franklin, ως αποτέλεσμα καταβύθισης γεωλογικών σχηματισμών, εκθέτοντας στην ανατολική περιοχή πλάκες ερίπλευσης στη χερσόνησο Lisburne ([Grantz & Eittreim 1979](#)). Οι επιπτεύσεις αυτές έχουν ηλικία ύστερης Κρητιδικής περιόδου, καθώς παραμορφώνουν πετρώματα που ανήκουν στην Άλβιο βαθμίδα της ανώτερης Κρητιδικής περιόδου και στην Κενομάνιο βαθμίδα της κατώτερης Κρητιδικής περιόδου. Ωστόσο, οι επιπτεύσεις αυτές δεν προκαλούν παραμόρφωση στα ιζηματογενή πετρώματα παρόμοια με αυτά της λεκάνης Hope. Τα πετρώματα αυτά Τριαδικής περιόδου της ιζηματογενούς λεκάνης Hope επικαλύπτουν τα του υποθαλάσσιου τόξου Herald. Επειδή τα πετρώματα της οροσειράς Brooks Range είναι υπό-παράλληλα του τόξου Herald στην υπεράκτια περιοχή είναι δύσκολος ο ακριβής χαρακτηρισμός των υποθαλάσσιων δομών της περιοχής μελέτης ([Cowie 1983](#), [Klemperer et al. 2002](#)).

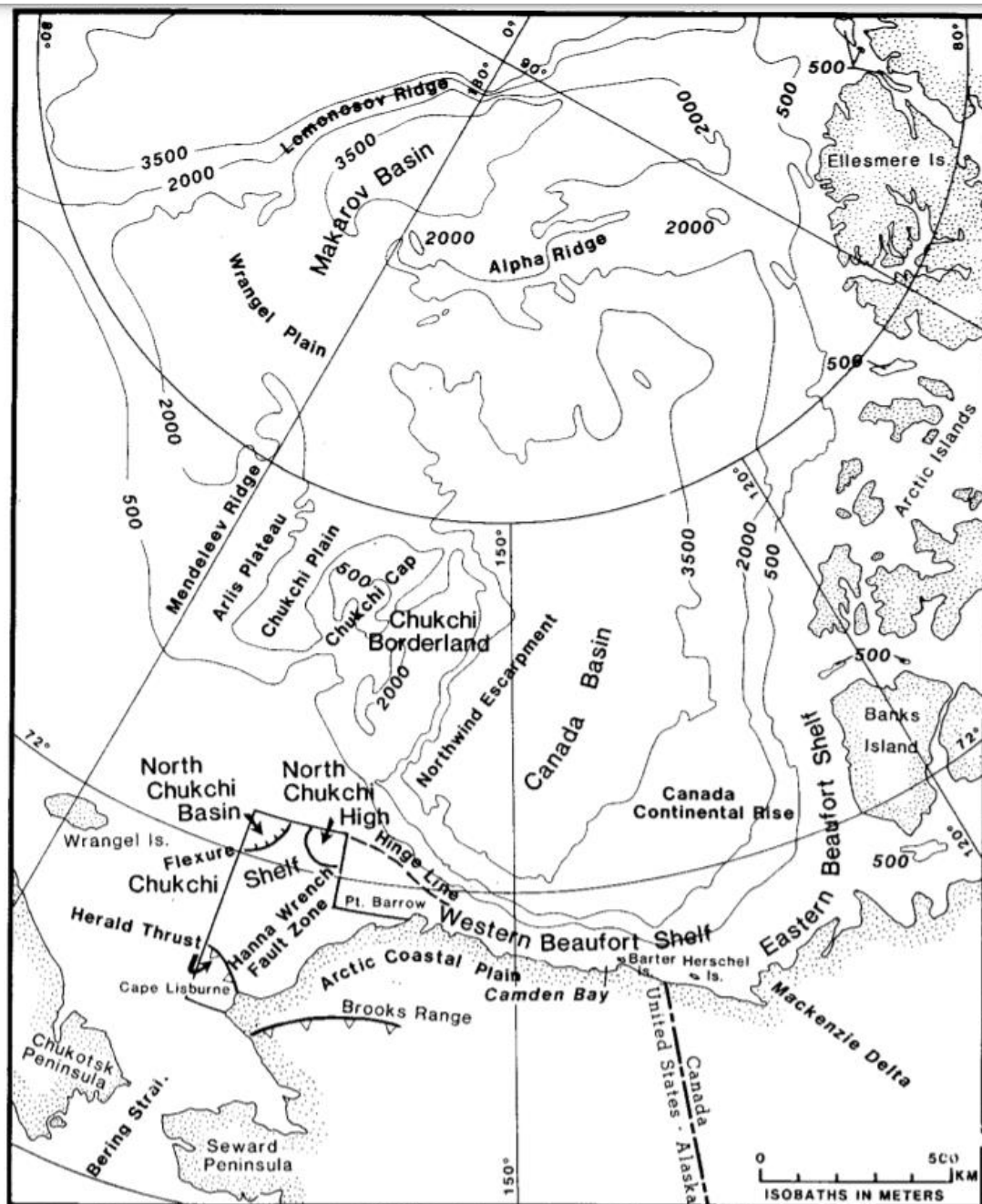


Σχήμα 3.6 Χάρτης γεωλογικών σχηματισμών στο νότιο τμήμα της θάλασσας Chukchi ([Grantz & Eittreim 1979](#)).

Το νότιο τμήμα του υποθαλάσσιου τόξου σχηματίστηκε από τη ζώνη ρηγμάτωσης Herald, η οποία έχει κλίση προς τα βορειοανατολικά και κατεύθυνση προς τα βορειοδυτικά. Ο χαρακτηρισμός των πετρωμάτων υψηλής ανακλαστικής ιδιότητας του τόξου Herald έγινε έως ενός βαθμού από εμφανίσεις σχηματισμών στο ακρωτήριο Lisburne, όπου παρατηρήθηκαν πλουτωνικά πετρώματα πιθανά Ιουρασικής περιόδου. Στο βόρειο τμήμα του

τόξου γεωτρήσεις έδειξαν την ύπαρξη ασβεστιτικού γραουβάκη και ιλυολίθων, πετρώματα παρόμοια με γραουβάκες κατώτερης Κρητιδικής περιόδου, αλλά και με σχιστολίθους, που εντοπίζονται στο ακρωτήριο Lisburne ([Cowie 1983](#), [Grantz & Eittreim 1979](#)). Στο βορειοδυτικό τμήμα το τόξο Herald ενώνεται με το νότιο τμήμα της κρηπίδας Chukchi. Η ένωση αυτή του συστήματος επωθήσεων του τόξου Herald πιθανά να οριοθετείται από ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης, τα οποία χωρίζουν την κρηπίδα Chukchi σε δύο τμήματα. Η σχέση αυτή μεταξύ της κρηπίδας Chukchi και της ζώνης πτυχών και επωθήσεων του υποθαλάσσιου τόξου Herald πιθανά να είναι μέρος ενός μεγαλύτερου τεκτονικού συστήματος ρηγμάτων συστροφικής μετατόπισης (wrench faults), το οποίο έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην καθίζηση της βορειοκεντρικής ιζηματογενούς λεκάνης στη θάλασσα Chukchi, καθώς και στην παραμόρφωση της ζώνης ρηγμάτων συστροφικής μετατόπισης Hanna στο βορειοανατολικό τμήμα του ακρωτηρίου Lisburne ([Thurston & Theiss 1987](#)). Στο [Σχήμα 3.7](#) παρουσιάζεται η θέση της ζώνης Hanna, τεκτονικά χαρακτηριστικά μεταξύ Ύστερης Κρητιδικής περιόδου (100-66 Mya) και Τριτογενούς περιόδου (66-2.6 Mya) στη θάλασσα Chukchi και κύρια φυσιογραφικά χαρακτηριστικά του Αρκτικού Ωκεανού. Στο νοτιοδυτικό τμήμα της ζώνης των μετατοπισμένων γεωλογικών σχηματισμών του πυθμένα εμφανίζονται τμήματα, τα οποία πιθανά να αποτελούνται από ανθρακικά και κλαστικά πετρώματα της νήσου Ellesmere, καθώς και από ισχυρά παραμορφωμένα κλαστικά πετρώματα της οροσειράς Franklin ([Cowie 1983](#), [Grantz & Eittreim 1979](#)).

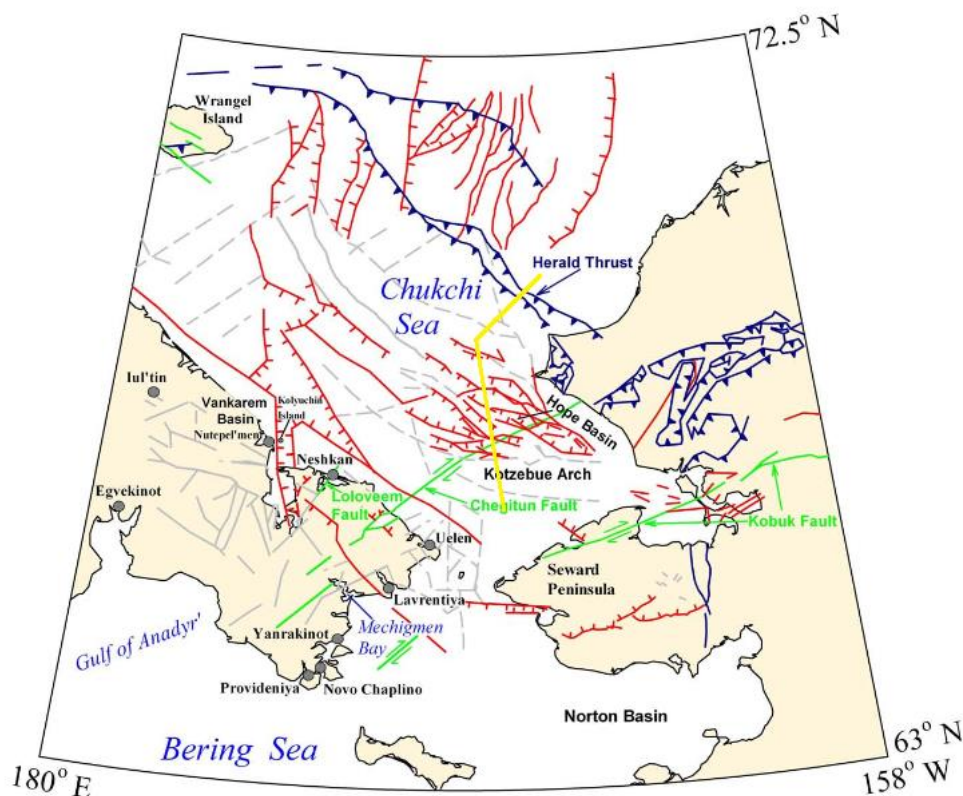




Σχήμα 3.7 Τεκτονικά χαρακτηριστικά Ύστερης Κρητιδικής περιόδου με Τριτογενούς περιόδου στη θάλασσα Chukchi και κύρια φυσιογραφικά χαρακτηριστικά του Αρκτικού Ωκεανού.

### 3.4 Η ζώνη ρωγμάτωσης Herald

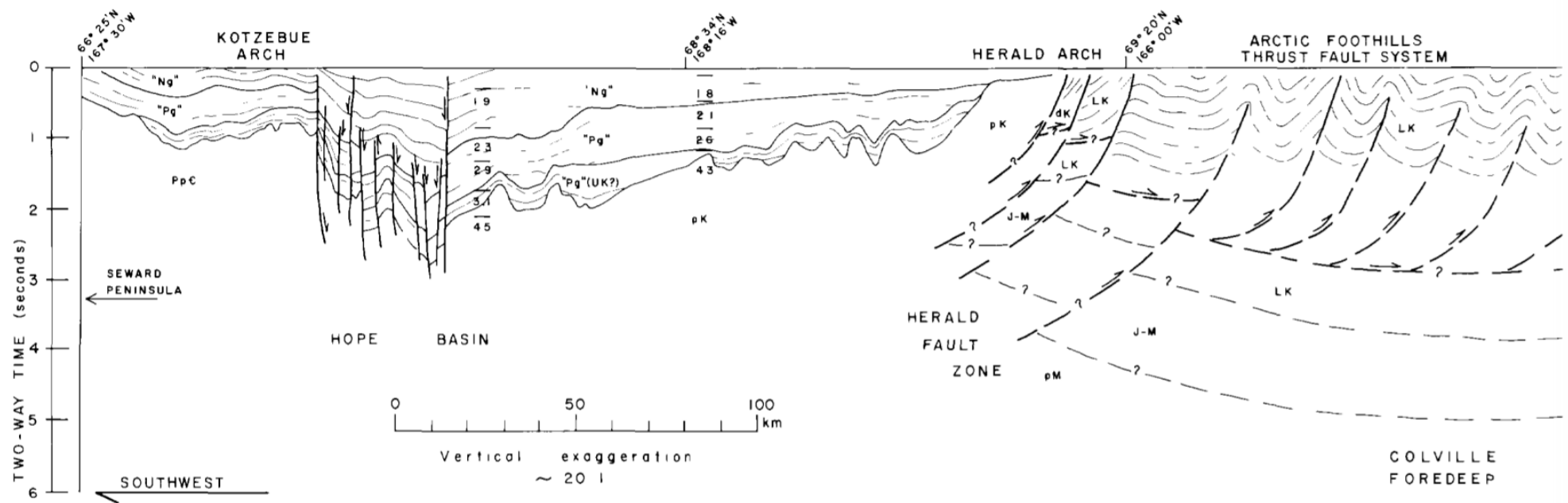
Το υποθαλάσσιο τόξο της νήσου Herald οριοθετείται στο βόρειο τμήμα από μια ζώνη ρωγμάτωσης, η οποία έλαβε το όνομα της από το νησί Herald. Η ζώνη αυτή αποτελείται από ρήγματα με μικρή κλίση στα νοτιοδυτικά. Οι ζώνες πτυχών και επωθήσεων αναπτύσσονται κυρίως στο νοτιοανατολικό άκρο της ζώνης ρωγμάτωσης, όπου εμπεριέχονται καλά στρωματωμένα πετρώματα γεωλογικής ομάδας Nanushuk Κρητιδικής περιόδου. Στο βορειοδυτικό τμήμα της ζώνης ρωγμάτωσης η κλίση δεν μπορεί να χαρτογραφηθεί με ευκολία λόγω της απότομης αλλαγής αυτής. Επίσης, στο βορειοανατολικό τμήμα της ζώνης ρωγμάτωσης παρατηρείται μείωση του πλάτους των πτυχών, η οποία πιθανά να οφείλεται σε μεταβολές της λιθολογίας. Στο [Σχήμα 3.8](#) φαίνονται τα χαρτογραφημένα ρήγματα της θάλασσας Chukchi και των γύρω περιοχών. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα κανονικά ρήγματα, με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα μη ευθύγραμμα ανάστροφα ρήγματα μαζί με την κατεύθυνση της κλίσης τους, με πράσινο χρώμα απεικονίζονται ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, ενώ με γκρι χρώμα απεικονίζονται ρήγματα αγνώστου χαρακτήρα ([Mackey et al. 2009](#)).



Σχήμα 3.8 Χάρτης ρηγμάτων της θάλασσας Chukchi και των γειτονικών ηπειρωτικών περιοχών ([Mackey et al. 2009](#)).

Εκ των αποτελεσμάτων ερευνών σεισμικής ανάκλασης ([Σχήμα 3.9](#)) εκτιμάται ότι τα πετρώματα που εντοπίζονται βορειοδυτικά του ακρωτηρίου Lisburne, παρόμοια με αυτά της ιζηματογενούς λεκάνης του ποταμού Colville, πιθανά να αλλάζουν από καλά στρωματοποιημένο ψαμμίτη και πηλίτη της γεωλογικής ομάδας Nanushuk, σε σκληρότερα και αμυδρά στρωματοποιημένα πετρώματα, τα οποία ανήκουν στην ομάδα σχηματισμών Torok Κρητιδικής περιόδου ή στην ομάδα σχηματισμών σχιστολίθων Kingak πρώιμης

Ιουρασικής περιόδου. Το σύστημα ρωγμάτωσης της ζώνης πιθανά να μεταβάλλεται από ανάστροφα ρήγματα μικρής κλίσης με κατεύθυνση προς τα ανατολικά σε ανάστροφα ρήγματα μεγάλης κλίσης κοντά στη χερσόνησο Lisburne. Στην υπεράκτια βορειοανατολική πλευρά της ζώνης ρηγμάτωσης Herald, παρατηρείται ο διαχωρισμός του αρκετά παραμορφωμένου ψαμμίτη και πηλίτη Κρητιδικής περιόδου με τα κλαστικά πετρώματα Κρητιδικής περιόδου υψηλότερης παραμόρφωσης ([Mackey et al. 2009](#)).

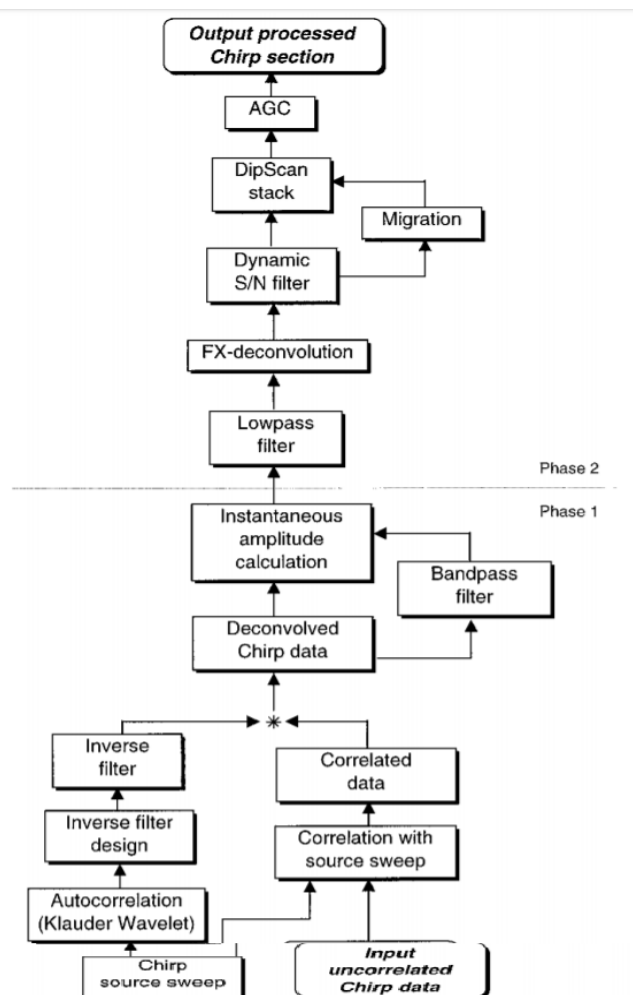


Σχήμα 3.9 Ερμηνευμένη σεισμική τομή του θαλάσσιου πυθμένα της θάλασσας Chukchi, όπου απεικονίζονται οι ζώνες ρωγμάτων της περιοχής και τα υφιστάμενα υποθαλάσσια τόξα. Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται ο διπλός χρόνος διαδρομής των ακουστικών κυμάτων σε δευτερόλεπτα και στον οριζόντιο άξονα η απόσταση σε χιλιόμετρα. Η θέση της γραμμής μελέτης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7 με κίτρινο χρώμα (Grantz & Eittreim 1979).

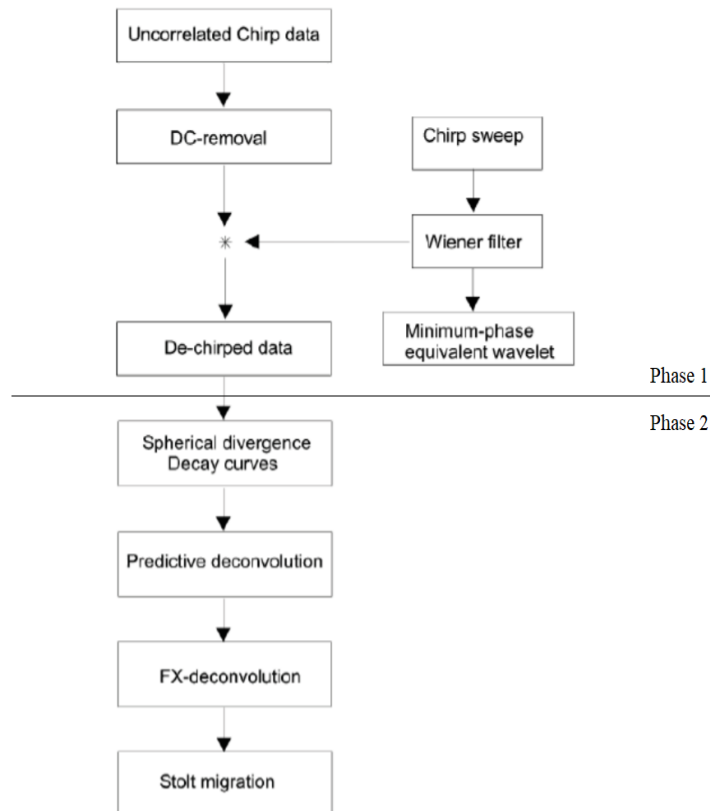
## 4ο Κεφάλαιο: Περιγραφή βημάτων επεξεργασίας δεδομένων CHIRP

### 4.1 Διαγράμματα ροής επεξεργασίας δεδομένων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προτείνονται δύο διαγράμματα ροής επεξεργασίας δεδομένα με παρόμοια βήματα επεξεργασίας. Τόσο το διάγραμμα ροής κατά Quinn ([Quinn et al. 1998](#)) που παρουσιάζεται στο [Σχήμα 4.1](#), όσο και κατά Baradello ([Baradello 2014](#)), το οποίο παρουσιάζεται στο [Σχήμα 4.2](#) χωρίζονται σε δύο φάσεις (Phase 1 & 2) επεξεργασίας δεδομένων. Το πρώτο στάδιο αποτελεί την προεπεξεργασία των αρχικών δεδομένων με σκοπό την προετοιμασία αυτών για το δεύτερο στάδιο, κατά το οποίο γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων και η εφαρμογή των κατάλληλων φίλτρων με στόχο την καλύτερη απεικόνιση, αλλά και την ερμηνεία των δεδομένων.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα ροής επεξεργασίας δεδομένων ακουστικού συστήματος CHIRP κατά Quinn ([Quinn et al. 1998](#)).



**Σχήμα 4.2** Διάγραμμα ροής επεξεργασίας δεδομένων ακουστικού συστήματος CHIRP κατά Baradello (Baradello 2014).

Στο στάδιο προεπεξεργασίας των δεδομένων πραγματοποιείται η συσχέτιση (correlation) των δεδομένων με την κυματομορφή μεταβαλλόμενου εύρους συχνοτήτων του ακουστικού συστήματος CHIRP, καθώς και η εφαρμογή προσαρμοζόμενου φίλτρου (match-filtering) και φίλτρα περιορισμού του εύρους συχνοτήτων (band-pass filter) με στόχο την απαλλαγή των δεδομένων από θόρυβο και την αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο (S/N ratio). Στο δεύτερο στάδιο επεξεργασίας των δεδομένων πραγματοποιείται η εφαρμογή των κατάλληλων φίλτρων που αποσκοπούν στη βελτίωση της απεικόνισης των δεδομένων. Η βελτίωση αυτή επιτυγχάνεται μέσω της μείωσης του περιεχομένου στα δεδομένα θορύβου με φίλτρα όπως το φίλτρο αυτόματης ενίσχυσης (Automatic Gain Control-AGC) και το φίλτρο εξασθένησης θορύβου (Dynamic S/N filter). Τέλος, καθοριστικό ρόλο στην επεξεργασία των δεδομένων κατέχει και η σεισμική χωροθέτηση (migration) που αποσκοπεί στη βελτίωση της διακριτικής ικανότητας μέσω της τοποθέτησης των ανακλάσεων των ακουστικών κυμάτων στην πραγματική τους θέση.

## 4.2 Βήματα προεπεξεργασίας σεισμικών δεδομένων

### 4.2.1 Συσχέτιση δεδομένων (Data Correlation)

Η συσχέτιση δεδομένων είναι η διαδικασία που ακολουθείται για την ανίχνευση μίας γνωστής στο χρήστη κυματομορφής μέσα σε τυχαίο θόρυβο. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή και ως μέθοδος προσαρμοζόμενου φίλτρου (Match Filter).

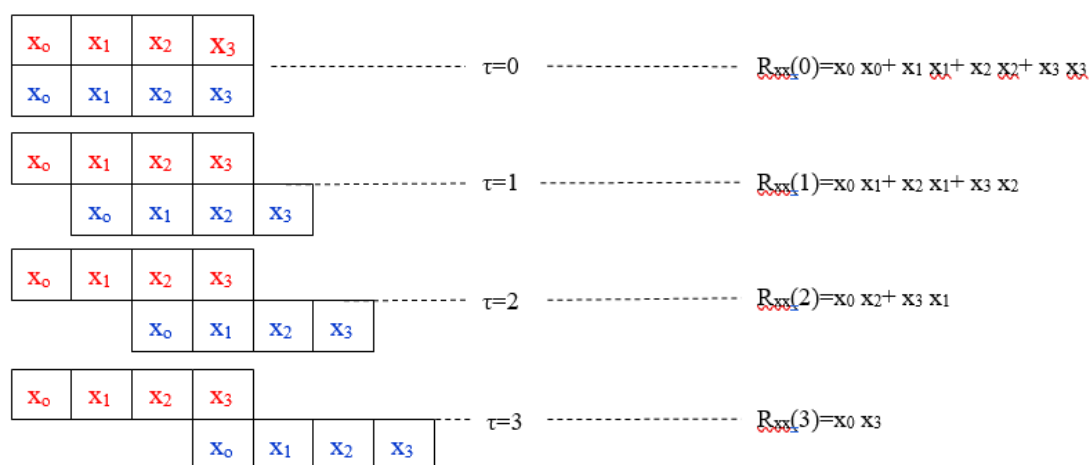
Το στάδιο της συσχέτισης δεδομένων είναι μία μαθηματική διαδικασία παρόμοια με τη συνέλιξη (convolution). Όπως και στη συνέλιξη, κατά τη συσχέτιση δεδομένων χρησιμοποιούνται δύο χρονοσειρές για να παραχθεί μία καινούργια, τρίτη χρονοσειρά. Η παραγόμενη αυτή χρονοσειρά ονομάζεται ετεροσυσχέτιση (cross-correlation) των δύο διαφορετικών χρονοσειρών. Εάν η χρονοσειρά έχει υποστεί διαδικασία συσχέτισης με τον εαυτό της, τότε η παραγόμενη χρονοσειρά ονομάζεται αυτοσυσχέτιση (autocorrelation) του αρχικού σήματος ([Dondurur 2018](#)).

#### 4.2.1.1 Αυτοσυσχέτιση δεδομένων (Autocorrelation)

Η αυτοσυσχέτιση δεδομένων χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί ο βαθμός ομοιότητας μίας χρονοσειράς με τον εαυτό της, αναδεικνύοντας έτσι τα περιοδικά στοιχεία που εμπεριέχονται στα δεδομένα. Η αναλυτική έκφραση της αυτοσυσχέτισης μίας χρονοσειράς  $x(t)$  εκφράζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x(\tau + t)dt \quad (4.1)$$

Όπου  $\tau$  είναι ο χρόνος καθυστέρησης. Σύμφωνα με τη σχέση (4.1) η αναλυτική εξίσωση της χρονοσειράς  $x(t)$  υπέστη χρονική καθυστέρηση ίση με  $\tau$ , έπειτα πολλαπλασιάζεται με την ίδια και τέλος προστίθεται ως αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης. Στο [Σχήμα 4.3](#) παρουσιάζεται σχηματική απεικόνιση υπολογισμού αυτοσυσχέτισης διακριτών χρονοσειρών. ([Dondurur 2018](#))



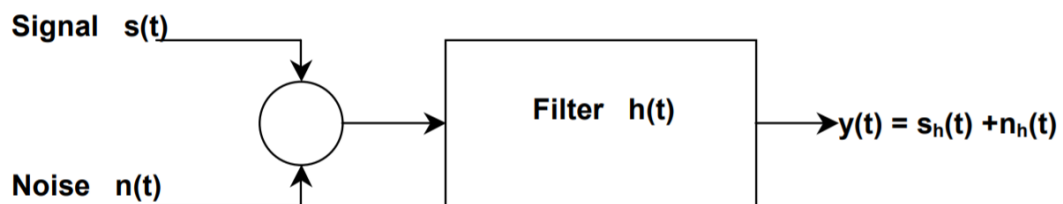
Σχήμα 4.3 Σχηματική απεικόνιση υπολογισμού αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς  $x(t)$  αποτελούμενη από τέσσερα διακριτά στοιχεία. Τα κοινά στοιχεία των χρονοσειρών, τα οποία παρουσιάζονται με πλαίσια κίτρινου χρώματος πολλαπλασιάζονται και προστίθενται, ενώ  $\tau$  είναι ο χρόνος καθυστέρησης της διαδικασίας αυτοσυσχέτισης ([Dondurur 2018](#)).



## 4.2.2 Εφαρμογή φίλτρων βελτίωσης διακριτικής ικανότητας δεδομένων

### 4.2.2.1 Μέθοδος προσαρμοζόμενου φίλτρου (Match Filtering)

Η μέθοδος προσαρμοζόμενου φίλτρου πρόκειται για μία διαδικασία κατά την οποία ανιχνεύεται στην «μολυσμένη» από θόρυβο καταγραφή, μία γνωστή κυματομορφή. Στόχος εφαρμογής του φίλτρου είναι η μεγιστοποίηση του λόγου σήματος προς θόρυβο (S/N ratio), η οποία επιτυγχάνεται μέσω της συσχέτισης της κυματομορφής που ανιχνεύθηκε με το σήμα της καταγραφής. Στο [Σχήμα 4.4](#) παρουσιάζεται η διαδικασία εφαρμογής του φίλτρου, όπου οι συναρτήσεις του σήματος και θορύβου συναρτήσει του χρόνου είναι  $s(t)$  και  $n(t)$  αντίστοιχα. Η μεγιστοποίηση του λόγου σήματος προς θόρυβο της παράγουσας κυματομορφής ( $y(t)$ ) επιτυγχάνεται σχεδιάζοντας και εφαρμόζοντας ένα κατάλληλο φίλτρο  $h(t)$ .



Σχήμα 4.4 Απλοποιημένο μοντέλο δημιουργίας φίλτρου ([Bancroft 2002](#)).

Στην περίπτωση όπου η κυματομορφή του σήματος  $s(t)$  είναι ένα μικρό κύμα (wavelet)  $w(t)$ , τότε, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και τη θεωρία προσαρμοζόμενων φίλτρων, ο μέγιστος λόγος σήματος προς θόρυβο προκύπτει όταν το φίλτρο παράγει παλμό, ο οποίος είναι η αρχική κυματομορφή συναρτήσει του αντίστροφου χρόνου ([Bancroft 2002](#)). Δεδομένου ότι η συνέλιξη της κυματομορφής συναρτήσει του αντίστροφου χρόνου είναι παρόμοια με την αυτοσυσχέτιση του σήματος εισαγωγής, τότε για περίοδο ταλάντωσης  $T$  το προσαρμοζόμενο φίλτρο περιγράφεται από τη σχέση:

$$h(t) = w(T-t) \quad (4.2)$$

#### 4.2.2.2 Μέθοδος αντίστροφου φίλτρου (Inverse Filtering)

Το μοντέλο ενός σειсмоγράμματος δίχως θόρυβο παραγόμενο από τη συνέλιξη της χρονοσειράς των συντελεστών ανάκλασης  $e(t)$  και της αρχικής κυματομορφής της πηγής  $w(t)$ . Το μοντέλο αυτό περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$x(t) = w(t) * e(t) \quad (4.3)$$

Όπου με  $*$  υποδηλώνεται η διαδικασία της συνέλιξης.

Έστω ότι ορίζεται η χρονοσειρά φίλτρου  $a(t)$ , της οποίας η συνέλιξη με ένα γνωστό σεισμόγραμμα της μορφής  $x(t)$  αποδίδει μια εκτίμηση χρονοσειράς των συντελεστών ανάκλασης  $e(t)$ :

$$e(t) = a(t) * x(t) \quad (4.4)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (4.4) στην (4.3) προκύπτει:

$$x(t) = w(t) * a(t) * x(t) \quad (4.5)$$

Επαλείφοντας τη συνάρτηση  $x(t)$  από τις δύο πλευρές της εξίσωσης προκύπτει η σχέση:

$$\delta(t) = w(t) * a(t) \quad (4.6)$$

Όπου  $\delta(t)$  είναι η συνάρτηση Δέλτα κατά Kronecker:

$$\delta(t) = \begin{cases} 1, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

Ενώ επιλύοντας την εξίσωση (4.6) για την παραγωγή της χρονοσειράς φίλτρου  $a(t)$  προκύπτει η σχέση:

$$a(t) = \delta(t) * w'(t) \quad (4.8)$$

Όπου  $w'(t)$  είναι η αντίστροφη συνάρτηση της κυματομορφής της πηγής  $w(t)$ . Αυτό σημαίνει ότι το κατάλληλο φίλτρο που χρειάζεται για να υπολογιστεί η χρονοσειρά των συντελεστών ανάκλασης από ένα καταγεγραμμένο σεισμόγραμμα, πρόκειται για μία μαθηματική έκφραση της κυματομορφής  $w(t)$ . Το συμπέρασμα της εξίσωσης (4.8) είναι ότι η εφαρμογή ενός αντίστροφου φίλτρου μετατρέπει την κυματομορφή της πηγής σε μία αιχμή για  $t=0$ , ένα αποτέλεσμα παρόμοιο, με αυτό που προκύπτει από τη διαδικασία της αποσυνέλιξης αιχμής (spike deconvolution). Επομένως, η εφαρμογή αντίστροφων φίλτρων χρησιμοποιείται ως μια μέθοδο αποσυνέλιξης δεδομένων ([Yilmaz 1987](#)).

## 4.3 Βήματα επεξεργασίας δεδομένων

### 4.3.1 Αποσυνέλιξη στο χώρο συχνότητας-απόστασης (F-x Deconvolution)

Η αποσυνέλιξη στο χώρο συχνότητας-απόστασης είναι ένα στάδιο επεξεργασίας των σεισμικών δεδομένων με τη χρήση του οποίου επιτυγχάνεται η απομάκρυνση θορύβου από τα σεισμικά δεδομένα, αυξάνοντας έτσι το λόγο σήματος προς θόρυβο (S/N ratio). Είναι μια τεχνική που προτάθηκε από τον Canales το 1984, ο οποίος ανέφερε ότι με την εφαρμογή φίλτρων πρόβλεψης η μείωση του τυχαίου θορύβου στα δεδομένα είναι αισθητή. Λίγο αργότερα το 1986 ο Gulunay ανέφερε ότι η αποσυνέλιξη F-x αποτελεί μια παρόμοια διαδικασία με την τεχνική εφαρμογής φίλτρων πρόβλεψης που πρότεινε ο Canales ([Liu et al. 2012](#)).

Για την περιγραφή του μοντέλου απομάκρυνσης τυχαίου θορύβου στο χώρο συχνότητας-απόστασης αρχικά γίνεται η θεώρηση σεισμική τομής  $S(t,x)$ , της οποίας η έκφραση στο χώρο των συχνοτήτων δίνεται από τη σχέση :

$$S(f, x) = A(f)e^{j2\pi f x p} \quad (4.9)$$

Στην ανώτερη σχέση  $A(f)$  ορίζεται το φάσμα της κυματομορφής της πηγής,  $f$  η συχνότητα,  $p$  η κλίση των στρωμάτων στη τομή και  $x$  η απόσταση. Εάν η συνολική απόσταση για τη σεισμική τομή δίδεται από τη σχέση  $x=n\Delta x$ , όπου  $n$  είναι ο αριθμός των καταγεγραμμένων σεισμικών ιχνών, τότε η σχέση του  $n$ -οστού ίχνους με το ίχνος  $n-1$  περιγράφεται ως εξής:

$$S_n(f) = a_1(f)S_{n-1}(f), \quad (4.10)$$

όπου  $a_1=\exp(j2\pi fp)$ . Εάν υπάρχουν γραμμικά φαινόμενα  $M$  στο χώρο απόστασης-χρόνου τότε η Σχέση (4.10) μπορεί να εκφραστεί ως σειρά  $M$  όρων:

$$S_n(f) = \sum_{i=1}^M a_i(f)S_{n-i}(f) \quad (4.11)$$

Για σεισμικά δεδομένα με πρόσθετο τυχαίο θόρυβο που περιγράφονται μέσω εξισώσεων πρόβλεψης προς τα μπρος και προς τα πίσω, δηλαδή τάξης  $2M$  παράγεται η σχέση:

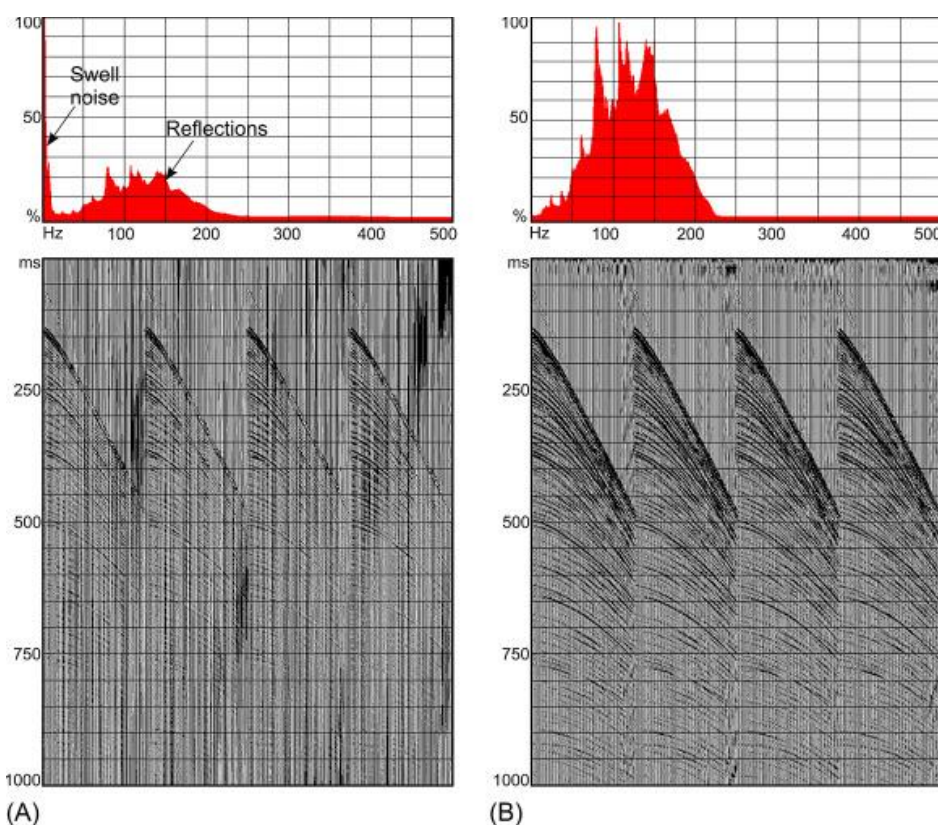
$$\varepsilon_n(f) = S_n(f) - \sum_{i=1}^M a_i S_{n-i}(f) - \sum_{i=-1}^{-M} a_i S_{n-1}(f), \quad (4.12)$$

όπου στην ανώτερη σχέση ως  $\varepsilon_n(f)$  ορίζεται η συνάρτηση θορύβου. Σύμφωνα με τον Canales η έκφραση  $\sum_{i=1}^M a_i S_{n-i}(f)$  είναι το μέρος των σεισμικών δεδομένων, το οποίο προκύπτει από τη διαδικασία πρόβλεψης των δεδομένων. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή και ως αποσυνέλιξη στο χώρο συχνότητας-απόστασης (F-x Deconvolution) ([Liu et al. 2012](#)).

### 4.3.2 Ζωνοπερατό φίλτρο συχνοτήτων (Band-pass Filter)

Η εφαρμογή φίλτρων στον τομέα της συχνότητας περιλαμβάνει ζωνοπερατά φίλτρα συχνοτήτων (Band-pass Filters), φίλτρα αποκοπής υψηλών (Low-pass Filters) ή αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (High-pass Filters). Το φίλτρο, το οποίο χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις είναι το ζωνοπερατό φίλτρο συχνοτήτων. Μέσω της εφαρμογής του φίλτρου, πραγματοποιείται απαλλαγή των καταγεγραμμένων σεισμικών ιχνών από ένα εύρος συχνοτήτων, που μεταφράζεται σε πιθανό θόρυβο χαμηλής συχνότητας, όπως είναι τα επιφανειακά κύματα τύπου Rayleigh (ground-roll noise), αλλά και θόρυβο υψηλής συχνότητας προερχόμενης από το περιβάλλον.

Η εφαρμογή ζωνοπερατών φίλτρων συχνοτήτων πραγματοποιείται συχνά πριν από το στάδιο της αποσυνέλιξης, προκειμένου να εξαλειφθεί ο περιεχόμενος στα καταγεγραμμένα σεισμικά ίχνη θόρυβος, ο οποίος αλλοιώνει την αυτοσυσχέτιση του σήματος της πηγής. Αντίστοιχα φίλτρα, με στενό εύρος αποκοπής συχνοτήτων εφαρμόζονται πριν από τη συσχέτιση των ιχνών της πηγής κατά τη σεισμική υπέρθεση ([Yilmaz 1987](#)). Στο [Σχήμα 4.5](#) φαίνεται το αποτέλεσμα επεξεργασίας θαλάσσιων δεδομένων σεισμικής ανάκλασης πριν (τμήμα A) και μετά (τμήμα B) την εφαρμογή ζωνοπερατού φίλτρου συχνοτήτων.



**Σχήμα 4.5** Απεικόνιση δεδομένων (κάτω) πριν (τμήμα A) και μετά (τμήμα B) την εφαρμογή ζωνοπερατού φίλτρου συχνοτήτων και των αντίστοιχων φασμάτων (πάνω) ([Dondurur 2018](#)).

### 4.3.3 Γεωμετρική διασπορά / σφαιρική απόκλιση (Geometric Spreading / Spherical Divergence)

Σε ένα μέσο ομοιόμορφης ταχύτητας διάδοσης των ακουστικών κυμάτων η ενέργεια διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις με τον ίδιο ρυθμό. Σε μία χρονική στιγμή  $t_1$  το μέτωπο του κύματος μέσα στο μέσο διάδοσης, δεδομένης της ταχύτητας διάδοσης των ακουστικών κυμάτων, θα είναι  $4\pi(V*t_1)^2$ . Σε μεταγενέστερη χρονική στιγμή  $t_2$  η αντίστοιχη επιφάνεια θα βρίσκεται σε επιφάνεια εμβαδού  $4\pi(V*t_2)^2$ , ενώ θεωρείται ότι κατά τη διάδοση του ακουστικού κύματος δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας. Το πλάτος ταλάντωσης είναι ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας της ενέργειας διάδοσης του κύματος ανά μονάδα επιφάνειας του αντίστοιχου κύματος. Το πλάτος ταλάντωσης που αντιστοιχεί σε χρονική στιγμή  $t_1$  είναι  $A_1$  και σε χρονική στιγμή  $t_2$  είναι  $A_2$ , ενώ ο λόγος τους είναι:

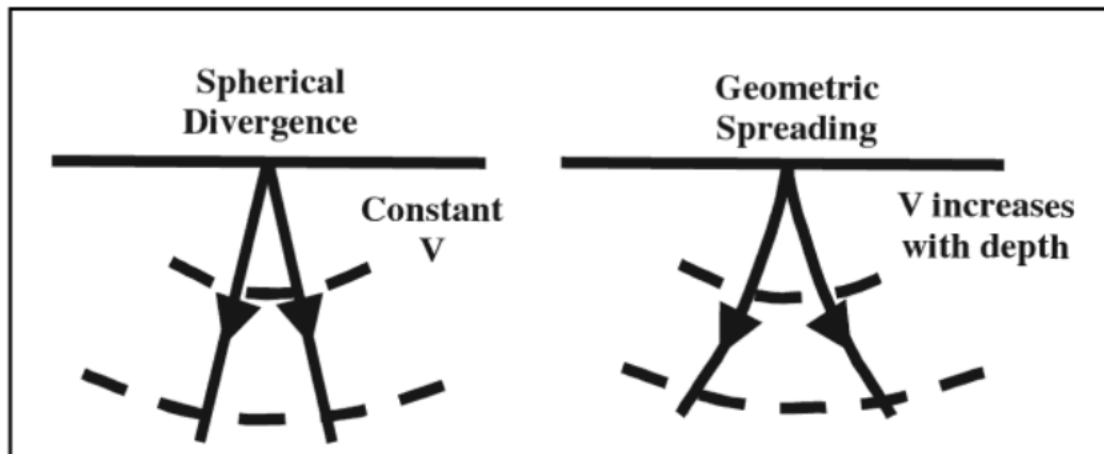
$$\frac{A_1}{A_2} = \sqrt{\frac{\frac{E}{4\pi(V*t_1)^2}}{\frac{E}{4\pi(V*t_2)^2}}} = \frac{t_2}{t_1} \quad (4.13)$$

Από την παραπάνω εξίσωση συνεπάγεται ότι τα γινόμενα  $A_1*t_1$  και  $A_2*t_2$  είναι σταθερά. Στην περίπτωση ενός μέσου με ομοιόμορφη ταχύτητα διάδοσης ακουστικών κυμάτων οι απώλειες του πλάτους οφειλόμενες στη γεωμετρική διασπορά μπορούν να διορθωθούν πολλαπλασιάζοντας με χρόνο  $t$ . Στην πραγματικότητα όμως, η ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών κυμάτων αυξάνεται με το βάθος, όπως φαίνεται και στο [Σχήμα 4.6](#).

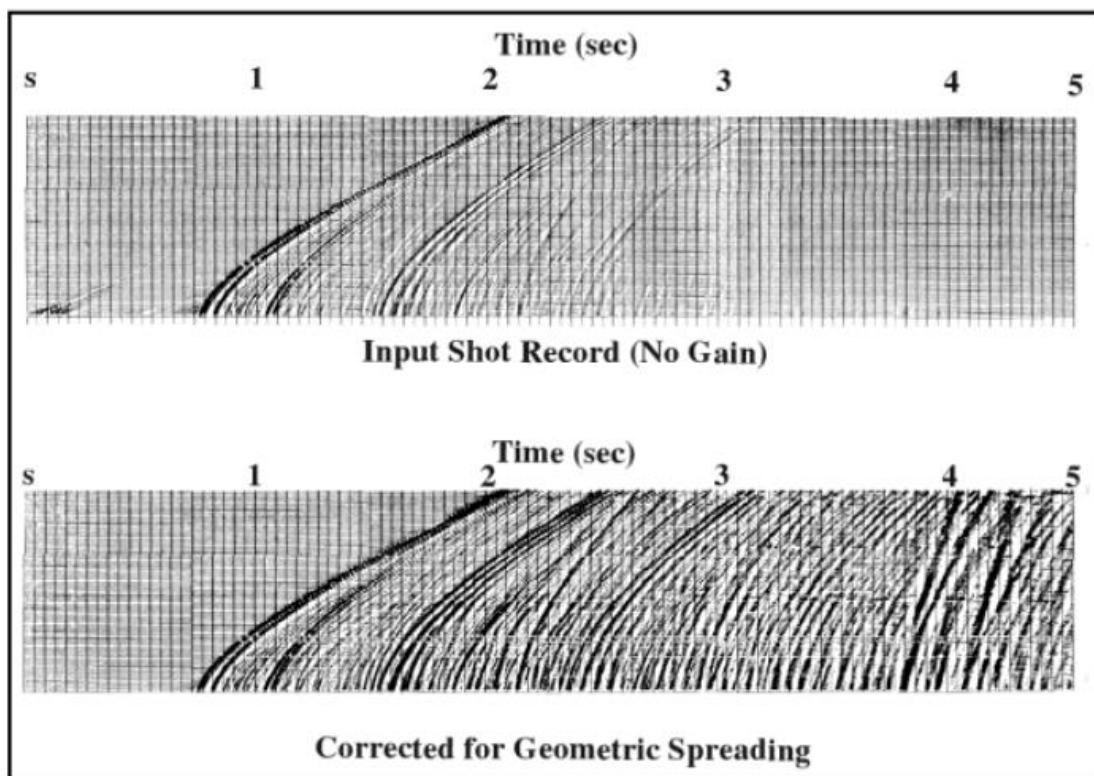
Προκειμένου να περιγραφεί η διεύρυνση του μετώπου του ακουστικού κύματος, καθώς η ταχύτητα διάδοσης αυτού αυξάνεται συναρτήσει του βάθους, και συνεπώς του χρόνου, η διόρθωση γεωμετρικής διασποράς ορίζεται ως:

$$g(t) = \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 * t \quad (4.14)$$

όπου  $V$  ορίζεται μια τοπική μέση συνάρτηση ταχύτητας, ενώ  $V_0$  ορίζεται η ταχύτητα διάδοσης του ακουστικού κύματος που αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή μηδέν. Στο [Σχήμα 4.7](#) φαίνεται το αποτέλεσμα της διόρθωσης γεωμετρικής διασποράς ([Gadallah & Fisher 2005](#)).



Σχήμα 4.6 Γεωμετρική διασπορά και σφαιρική απόκλιση (Gadallah & Fisher 2005).

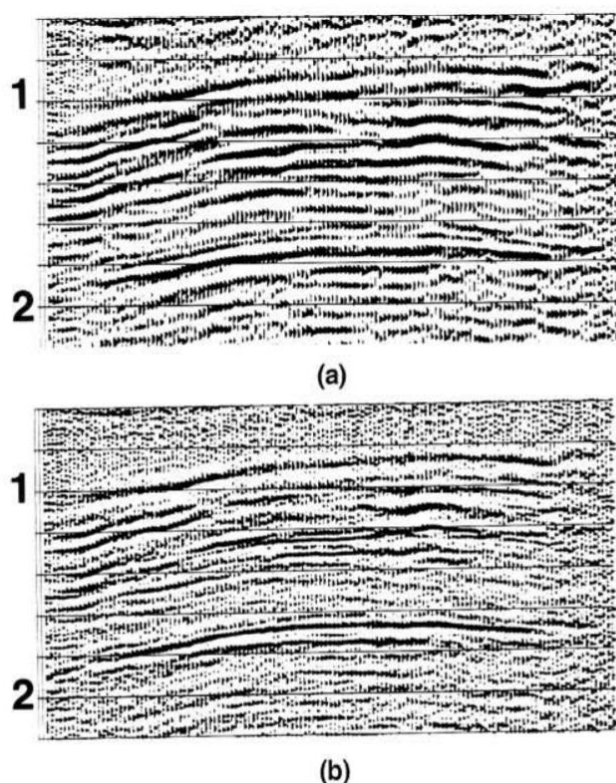


Σχήμα 4.7 Απεικόνιση καταγεγραμμένων σεισμικών ιχνών πριν (πάνω τμήμα) και μετά (κάτω τμήμα) τη διόρθωση γεωμετρικής διασποράς (Gadallah & Fisher 2005).



#### 4.3.4 Αποσυνέλιξη (Deconvolution)

Αποσυνέλιξη είναι μία διαδικασία με τη χρήση της οποίας επιτυγχάνεται βελτίωση της διακριτικής ικανότητας των σεισμικών δεδομένων, συμπερίζοντας την αρχική κυματομορφή της πηγής (Βαφείδης 2011). Με άλλα λόγια, η αποσυνέλιξη χρησιμοποιείται για την αφαίρεση της κυματομορφής της πηγής από τα καταγεγραμμένα σεισμικά ίχνη, αφήνοντας μόνο τις ανακλάσεις των υποκείμενων του πυθμένα στρωμάτων (Jol 2009). Συνήθως το στάδιο επεξεργασίας αποσυνέλιξης δεδομένων πραγματοποιείται πριν από τη σεισμική υπέρθεση, αλλά μερικές φορές εφαρμόζεται και μετά την άθροιση σεισμικών τομών υπέρθεσης. Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται μια τομή συγκρίνοντας την απεικόνιση των δεδομένων, στα οποία έχει εφαρμοσθεί σεισμική υπέρθεση, πριν αλλά και μετά το στάδιο επεξεργασίας της αποσυνέλιξης. Όπως φαίνεται και στο τμήμα b του Σχήματος, ο λόγος για τον οποίο προτιμάται η απεικόνιση δεδομένων υφιστάμενης αποσυνέλιξης είναι επειδή τα αποτελέσματα είναι πιο ευδιάκριτα, περισσότερο λεπτομερή απ'ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο τμήμα a που είναι περισσότερο θολά και ασαφή (Yilmaz 1987). Επίσης, κατά τη χρήση του αλγόριθμου της αποσυνέλιξης θεωρείται ότι υποκείμενοι του πυθμένα σχηματισμοί είναι οριζόντια στρωματοποιημένοι, ότι έχουν μία ενιαία ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών κυμάτων και ότι οι ανακλάσεις των ακουστικών κυμάτων δεν υφίστανται διάχυση εντός του σχηματισμού, αλλά διατηρούν τη συνέχειά τους (Jol 2009).



Σχήμα 4.8 Απεικόνιση καταγεγραμμένων σεισμικών δεδομένων πριν (a) και μετά (b) το στάδιο επεξεργασίας αποσυνέλιξης δεδομένων (Yilmaz 1987).



#### 4.3.4.1 Αποσυνέλιξη πρόβλεψης (Predictive Deconvolution)

Το μοντέλο της αποσυνέλιξης πρόβλεψης κατά Peacock και Treitel αποτελεί το πιο ευρέως διαδεδομένο και εφαρμόσιμο μοντέλο που χρησιμοποιείται κατά την επεξεργασία σεισμικών δεδομένων ([Ulrych et al., 1988](#)). Η αποσυνέλιξη πρόβλεψης πρόκειται για ένα στάδιο επεξεργασίας στο οποίο στόχος είναι η εξάλειψη πιθανών πολλαπλών ανακλάσεων ενός ανακλαστήρα ([Onajite 2014](#)). Για τη χρήση του αλγόριθμου αποσυνέλιξης πρόβλεψης είναι απαραίτητη η εισαγωγή τριών καθοριστικών παραμέτρων:

- Διάρκεια φίλτρου (Operator Length)
- Χρόνος πρόβλεψης (Prediction Lag)
- Επίπεδο τεχνητού θορύβου (Prewhitening)

Αποδείχθηκε από τους Robinson και Treitel ότι η λύση της ακόλουθης σχέσης είναι το φίλτρο αποσυνέλιξης πρόβλεψης :

$$\begin{pmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \cdots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \cdots & r_{n-2} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \cdots & r_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n-1} & r_{n-2} & r_{n-3} & \cdots & r_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_{n-1} \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

Όπου στην παραπάνω σχέση  $r_i$ ,  $a_i$  και  $g_i$  για  $i=0,1,2,3, \dots, n-1$  είναι ο πίνακας αυτοσυσχέτισης του σειсмоγράμματος, οι επιθυμητοί συντελεστές του εφαρμοζόμενου φίλτρου και η συσχέτιση αντίστοιχα ([Yilmaz 1987](#)).

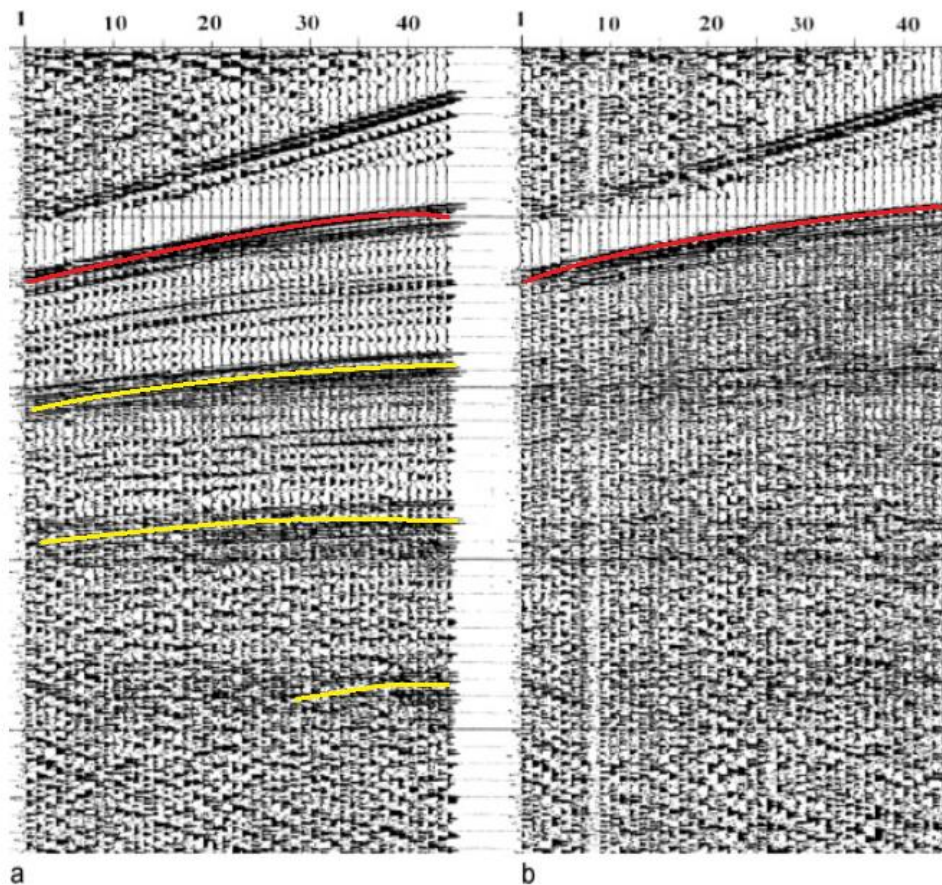
Μέσω της εφαρμογής της αποσυνέλιξης πρόβλεψης γίνεται εκτίμηση της περιοδικότητας που εμφανίζει το σήμα εισαγωγής  $x(t)$  σε μία μελλοντική στιγμή  $x(t+a)$ , όπου  $a$  είναι ο χρόνος πρόβλεψης (prediction lag) ([Yilmaz 1987](#)). Η τρίτη παράμετρος εισαγωγής στον αλγόριθμο αποσυνέλιξης πρόβλεψης που πρέπει να μελετηθεί είναι το επίπεδο τεχνητού θορύβου (prewhitening). Πρόκειται για μια παράμετρο, η οποία λαμβάνοντας μια μικρή τιμή επιβάλλει αριθμητική σταθερότητα στα δεδομένα ([Yilmaz 1987](#)). Στο [Σχήμα 4.9](#) φαίνεται το αποτέλεσμα εφαρμογής της διαδικασίας αποσυνέλιξης πρόβλεψης σε σεισμικές καταγραφές. Όπως φαίνεται και στο τμήμα  $b$  του [Σχήματος 4.9](#) έχουν εξαλειφθεί οι πολλαπλές ανακλάσεις που αλλοιώνουν τα αποτελέσματα στο τμήμα  $a$ .

#### 4.3.4.2 Αποσυνέλιξη αιχμής (Spiking Deconvolution)

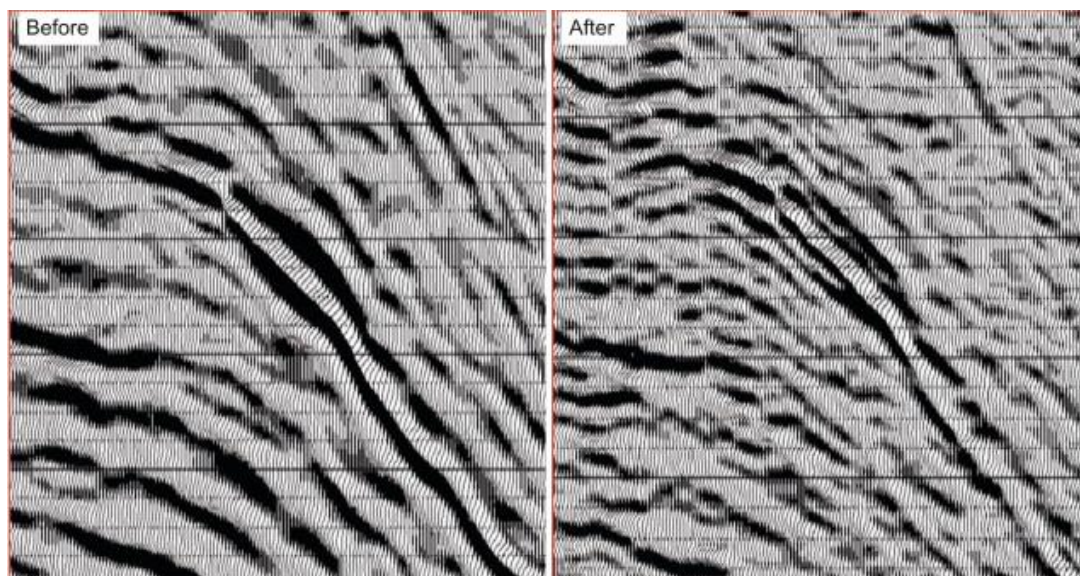
Στην αποσυνέλιξη αιχμής θεωρείται ότι ο συσχετισμός του σεισμικού ίχνους με τον εαυτό του πρόκειται για την ίδια διαδικασία με το συσχετισμό της κυματομορφής της πηγής με τον εαυτό της. Το ίδιο θεωρείται και για την ανακλαστική ικανότητα του κύματος, της οποίας η αυτοσυσχέτιση αποδίδεται ως μία αιχμή. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το επιθυμητό αποτέλεσμα απεικονίζεται ως μία αιχμή εξισορροπώντας το πλάτος της φασματικής περιοχής για κάθε καταγεγραμμένο σεισμικό ίχνος. Στο [Σχήμα 4.10](#) παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της αποσυνέλιξης αιχμής. Παρατηρείται ότι μετά την εφαρμογή αποσυνέλιξης αιχμής η ανάλυση και το συχνοτικό περιεχόμενο έχουν βελτιωθεί σε σημαντικό βαθμό ([Onajite 2014](#)).

Η αποσυνέλιξη πρόβλεψης είναι μια γενικότερη διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει και την αποσυνέλιξη αιχμής. Δεδομένης μιας κυματομορφής με μήκος  $(n+\alpha)$ , όπου  $n$  είναι το μήκος του φίλτρου πρόβλεψης (operator length) και  $\alpha$  ο προβλέψιμος χρόνος καθυστέρησης (lag time), για τιμή  $\alpha=1$ , η διαδικασία ονομάζεται αποσυνέλιξη αιχμής ([Yilmaz 1987](#)). Επομένως, η Σχέση κατά Robinson και Treitel για τιμή  $\alpha=1$  γίνεται:

$$\begin{pmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \cdots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \cdots & r_{n-2} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \cdots & r_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n-1} & r_{n-2} & r_{n-3} & \cdots & r_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.16)$$



Σχήμα 4.9 Απεικόνιση σεισμικών δεδομένων πριν (a) και μετά (b) την εφαρμογή αποσυνέλιξης πρόβλεψης. Με κόκκινο χρώμα διακρίνεται η κύρια ανάκλαση στην εκάστοτε τομή και με κίτρινο χρώμα οι πολλαπλές ανακλάσεις ([Onajite 2014](#)).



Σχήμα 4.10 Απεικόνιση σεισμικών δεδομένων πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή αποσυνέλιξης αιχμής ([Onajite 2014](#)).

#### 4.3.5 Δυναμικό φίλτρο εξασθένισης θορύβου (Dynamic S/N Filter)

Οποιαδήποτε μορφή καταγεγραμμένης ενέργειας, η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ των κύριων ανακλάσεων των ακουστικών κυμάτων θεωρείται θόρυβος. Τα σεισμικά δεδομένα περιέχουν, όχι μόνο το ανακλώμενο σήμα, αλλά και το στοιχείο του θορύβου. Προκειμένου να επιτευχθεί υψηλής ποιότητας απεικόνιση των καταγεγραμμένων σεισμικών ιχνών είναι απαραίτητη η αποδοτική εξασθένιση του θορύβου από τα σεισμικά δεδομένα. Η εξασθένιση αυτή επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας τα κατάλληλα φίλτρα που αποσκοπούν στη βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο (S/N ratio) ([Mirabella 2013](#)).

Η εφαρμογή ενός φίλτρου βελτίωσης του σήματος προς θόρυβο είναι κατάλληλη για την επεξεργασία δεδομένων ακουστικού συστήματος Chirp, καθώς εξαλείφει την ανάγκη εφαρμογής χρονικά μεταβαλλόμενου ζωνοπερατού φίλτρου συχνοτήτων (band-pass filter) σε μεταγενέστερο στάδιο επεξεργασίας των δεδομένων ([Quinn et al. 1997](#)).

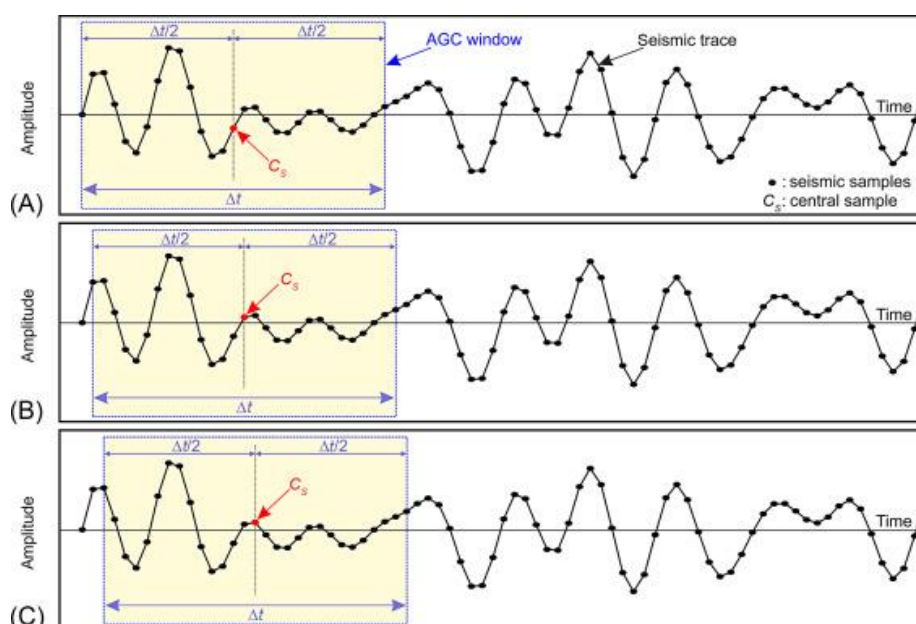
Με την εφαρμογή δυναμικού φίλτρου βελτίωσης του σήματος προς θόρυβο επιτυγχάνεται η ενίσχυση της πλευρικής συνέχειας των δεδομένων αντισταθμίζοντας τη συχνότητα των δεδομένων με μία συνάρτηση, η οποία πηγάζει από το τοπική τιμή του λόγου σήματος προς θόρυβο. Τα δυναμικά φίλτρα εξασθένισης θορύβου διαφέρουν από τις συμβατικές μεθόδους ενίσχυσης του σήματος, καθώς οι συμβατικές μέθοδοι συμπεριλαμβάνουν μια ομάδα γειτονικών, του εύρους εφαρμογής ιχνών, με αποτέλεσμα να προκαλείται επικάλυψη της απεικόνισης των σεισμικών ιχνών με περιττές πληροφορίες ([Quinn et al. 1997](#)).



#### 4.3.6 Φίλτρο αυτόματης ενίσχυσης σήματος (Automatic Gain Control - AGC)

Η εντολή αυτόματης ενίσχυσης σήματος (Automatic Gain Control-AGC) είναι μία από τις σημαντικότερες μεθόδους ανάκτησης σήματος που εφαρμόζεται κατά την επεξεργασία σεισμικών δεδομένων ([Dondurur 2018](#)).

Το φίλτρο αυτόματης ενίσχυσης είναι ένα στάδιο επεξεργασίας, στο οποίο στόχος είναι η βελτίωση απεικόνισης των δεδομένων, καθώς λόγω εξασθένισης του σήματος και της επίδρασης της γεωμετρικής διασποράς των ακουστικών κυμάτων κατά τη διάδοση αυτών, προκαλείται απώλεια του σήματος. Έτσι, εξισορροπώντας το πλάτος κάθε σεισμικού ίχνους επιτυγχάνεται καλύτερη απεικόνιση των δεδομένων ([Onajite 2014](#)). Το φίλτρο εφαρμόζεται σε κάθε καταγεγραμμένο σεισμικό ίχνος χρησιμοποιώντας ένα χρονικό “παράθυρο” εφαρμογής (time window) κινούμενο στον άξονα του χρόνου. Το μήκος του “παραθύρου” είναι  $\Delta t$  και καθορίζεται από το χρήστη. Η διαδικασία εφαρμογής του φίλτρου αυτόματης ενίσχυσης σήματος σε καταγεγραμμένα σεισμικά ίχνη παρουσιάζεται στο [Σχήμα 4.11](#). Για κάθε χρονική στιγμή στον άξονα του χρόνου, ο αλγόριθμος υπολογίζει το συντελεστή ενίσχυσης σήματος (scalar length) χρησιμοποιώντας τα πλάτη εντός του καθορισμένου εύρους χρόνου. Ο συντελεστής παίρνει τιμές ίσες με το αντίστροφο της τετραγωνικής ρίζας της μέσης τιμής (RMS), της μέσης τιμής (mean) ή της διαμέσου τιμής (median) του πλάτους εντός του καθορισμένου εύρους χρόνου ([Dondurur 2018](#)). Τέλος, το φίλτρο αυτόματης ενίσχυσης σήματος πρόκειται για ένα στατιστικά βασιζόμενο φίλτρο, με αποτέλεσμα σε ορισμένες περιπτώσεις να επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα κατά την επεξεργασία και κατά συνέπεια στην ερμηνεία δεδομένων ([Zhou 2014](#)).



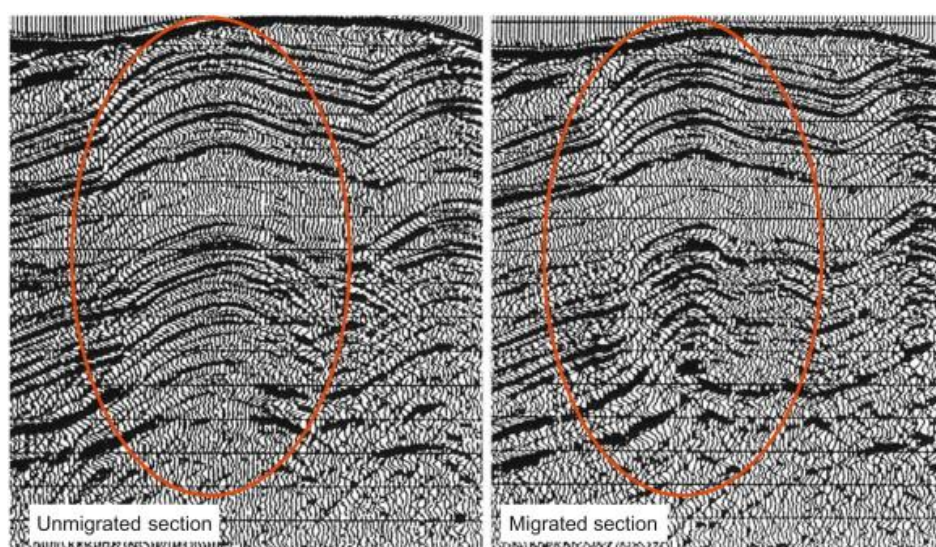
Σχήμα 4.11 Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής φίλτρου αυτόματης ενίσχυσης χρησιμοποιώντας χρονικά μετακινούμενο “παράθυρο” στον άξονα του χρόνου. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται το κεντρικό δείγμα κάθε φορά του κινούμενου χρονικού εύρους, τα μαύρα στίγματα είναι τα καταγεγραμμένα σεισμικά δείγματα και με κίτρινο πλαίσιο απεικονίζεται το εύρος του “παραθύρου” ([Dondurur 2018](#)).

#### 4.3.7 Σεισμική χωροθέτηση (Migration)

Το στάδιο της σεισμικής χωροθέτησης είναι το τελευταίο στάδιο από τα βασικότερα και αναπόσπαστα βήματα επεξεργασίας που πραγματοποιούνται κατά την επεξεργασία δεδομένων σεισμικής ανάκλασης.

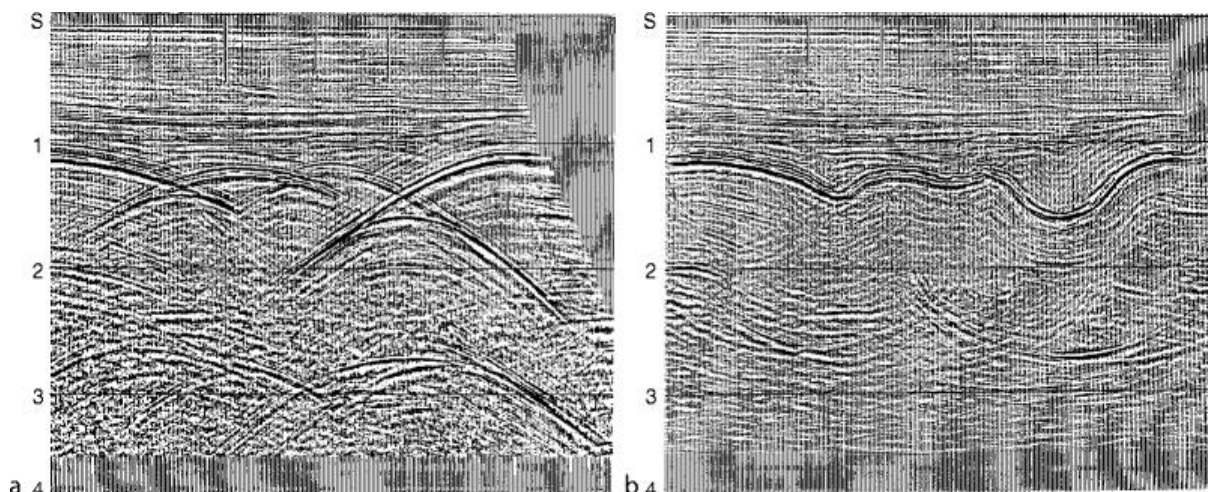
Η εφαρμογή της σεισμικής χωροθέτησης έχει ως σκοπό την ανακατασκευή των ανακλάσεων των ακουστικών κυμάτων. Τα καταγεγραμμένα σεισμικά ίχνη αποτελούν μία υπέρθεση ακουστικών κυμάτων προερχόμενα από όλες τις πιθανές κατευθύνσεις κατά τη διάδοση του εκπεμπόμενου ακουστικού κύματος της πηγής στο υπέδαφος. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι οι καταγεγραμμένοι πιθανοί στόχοι δεν αντιστοιχούν σε ανακλαστήρες ακριβώς κάτω από τη θέση του δέκτη, αλλά σε ανακλάσεις ακουστικών κυμάτων προερχόμενες από γεωλογικούς σχηματισμούς, οι οποίοι βρίσκονται πλευρικά από το σημείο καταγραφής.

Ο όρος χωροθέτηση αναφέρεται στην μετακίνηση των καταγεγραμμένων ανακλάσεων στις πραγματικές τους θέσεις. Η διαδικασία της σεισμικής χωροθέτησης είναι μια αντίστροφη διαδικασία, κατά την οποία τα καταγεγραμμένα από τους δέκτες κύματα αναπαράγονται στη σωστή θέση του εκάστοτε ανακλαστήρα. Στο στάδιο συλλογής δεδομένων σεισμικής ανάκλασης τα εκπεμπόμενα κύματα καταγράφονται στην επιφάνεια. Στο στάδιο της χωροθέτησης με τη χρήση μεθόδων αναπαραγωγής του κυματικού πεδίου τα κύματα αυτά χρησιμοποιούνται, είτε ως αρχικές συνθήκες, είτε ως οριακές συνθήκες για ένα πεδίο που περιγράφεται από την κυματομορφή της πηγής. Έτσι, κατά τη χωροθέτηση τα κύματα διαδίδονται «ανάστροφα» από την επιφάνεια όπου έχουν καταγραφεί στην πραγματική θέση των ανακλαστήρων ([Gazdag & Sguazzero 1984](#)). Στο [Σχήμα 4.12](#) γίνεται συγκριτική παρουσίαση σεισμικής τομής δεδομένων πριν και μετά την εφαρμογή σεισμικής χωροθέτησης. Στο κυκλωμένο με κόκκινο χρώμα τμήμα της τομής εστιάζεται το αποτέλεσμα της σεισμικής χωροθέτησης, όπου στη χωροθετημένη τομή παρατηρείται ανακατασκευή των περιθλάσεων που εντοπίζονται στην αρχική τομή, προσδίδοντας σε αυτές την πραγματική μορφή του ανακλαστήρα.

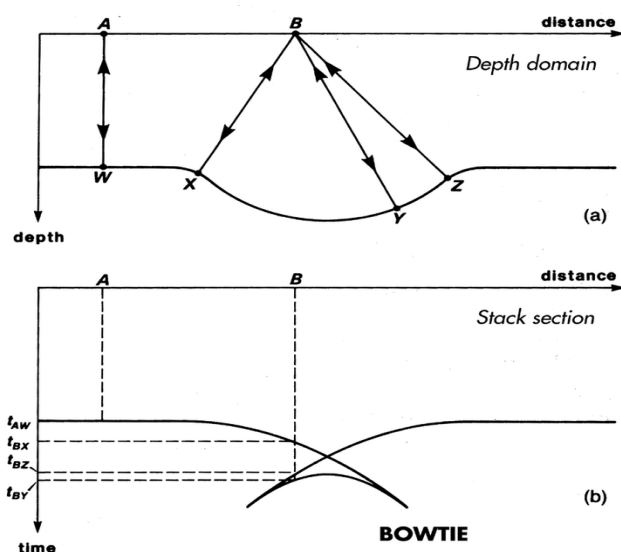


Σχήμα 4.12 Σύγκριση σεισμικής τομής πριν και μετά την εφαρμογή σεισμικής χωροθέτησης. Στο αριστερό τμήμα του σχήματος παρουσιάζεται η σεισμική τομή πριν τη χωροθέτηση, ενώ στο δεξί τμήμα μετά την εφαρμογή αυτής ([Onajite 2014](#)).

Σε περιπτώσεις πολύπλοκης λιθολογίας το αποτέλεσμα της απεικόνισης των καταγραμμένων σεισμικών δεδομένων δεν είναι αρκετό για το χαρακτηρισμό των υπό του πυθμένα σχηματισμών. Για παράδειγμα οι κεκλιμένοι ανακλαστήρες δεν απεικονίζονται με τη σωστή τους κλίση, τεκτονικά βυθίσματα (συγκλινικές δομές) απεικονίζονται ως δομές τύπου «παπιγιόν», δομές που στην διεθνή βιβλιογραφία ονομάζονται «bowties», ενώ φαινόμενα διασποράς των σκεδαζόμενων σε σημειακούς στόχους ακουστικών κυμάτων, απεικονίζονται με τη μορφή περιθλάσεων. Στο [Σχήμα 4.13](#) παρουσιάζεται η συγκριτική αναπαράσταση αποτελεσμάτων σεισμικής χωροθέτησης με στόχο την ορθή απεικόνιση κεκλιμένων ανακλαστήρων. Στο τμήμα a του σχήματος φαίνεται η απεικόνιση των αρχικών δεδομένων πριν τη χωροθέτηση, όπου οι συγκλινικές δομές παρουσιάζονται με τη μορφή bowties, ενώ στο τμήμα b φαίνεται το αποτέλεσμα της σεισμικής χωροθέτησης, όπου έχει επέλθει απομάκρυνση των περιθλάσεων σε μεγάλο βαθμό και απεικονίζεται σωστά ο ανακλαστήρας. Στο [Σχήμα 4.14](#) παρουσιάζεται σχηματικά ο μηχανισμός δημιουργίας «bowties» από ανακλώμενα κύματα στην προσπάθεια απεικόνισης κεκλιμένων ανακλαστήρων.



Σχήμα 4.13 Συγκριτική απεικόνιση της εφαρμογής σεισμικής χωροθέτησης για την απομάκρυνση των «bowties» και την ανακατασκευή απεικονιζόμενου ανακλαστήρα ([Gupta 2011](#), [Yilmaz 1987](#)).



Σχήμα 4.14 Σχηματική απεικόνιση δημιουργίας περιθλάσεων ως αποτέλεσμα απεικόνισης ανακλαστήρων με τη μορφή συγκλινών ([Kearey, Brooks & Hill 2002](#), [Veeken & Moerkerken 2013](#)).



#### 4.3.7.1 Σεισμική χωροθέτηση στο χώρο κυματαριθμού-συχνότητας (f-k migration)

Στα πλαίσια της σεισμικής χωροθέτησης στο χώρο κυματαριθμού-συχνότητας (f-k migration) συγκαταλέγονται δύο μέθοδοι χωροθέτησης:

- Χωροθέτηση κατά Stolt
- Χωροθέτηση με τη μέθοδο Phase Shift

Οι πρώτες αναφορές για τη μέθοδο χωροθέτησης στο χώρο κυματάριθμου-συχνότητας χρονολογούνται από το 1978, όπου ο Stolt περιέγραψε την αρχή της σεισμικής χωροθέτησης στηριζόμενος στις μαθηματικές εκφράσεις του μετασχηματισμού Fourier. Λίγο αργότερα την ίδια χρονιά, ο Gazdag εισάγοντας τη μέθοδο Phase Shift ενίσχυσε τις ήδη υπάρχουσες γνώσεις για τη σεισμική χωροθέτηση στο χώρο κυματάριθμου-συχνότητας ([Yilmaz 1987](#)).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η σεισμική χωροθέτηση με τη μέθοδο μετατόπισης της φάσης (Phase Shift) στο χώρο κυματαριθμού-συχνότητας. Κατά τη διεξαγωγή γεωφυσικών διασκοπήσεων γίνεται η θεώρηση πως η Γη είναι ένα στρωματοποιημένο μέσο μεταβαλλόμενης με το βάθος ταχύτητας διάδοσης των ακουστικών κυμάτων, καθώς και το ότι ανιχνεύονται μόνο οι κύριες ανακλάσεις των κυμάτων, λαμβάνοντας υπόψη το μοντέλο του εκρηγνυόμενου ανακλαστήρα (exploding reflector model). Η σεισμική χωροθέτηση με τη μέθοδο phase-shift βασίζεται στην εκτίμηση του πεδίου διάδοσης των κυμάτων και εφαρμόζεται σε μοντέλα όπου παρατηρείται διαφοροποίηση της ταχύτητας συναρτήσει μόνο του βάθους (στο χώρο των συχνοτήτων) ([Jonasson 2020](#)).

Η περιγραφή της μαθηματικής έκφρασης της σεισμικής χωροθέτησης με τη μέθοδο Phase-Shift ξεκινάει από την εξίσωση διάδοσης των ανακλώμενων προς την επιφάνεια κυμάτων:

$$P(k_x, z, \omega) = P(k_x, 0, \omega) \exp \left[ i \left( \frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2 \right)^{1/2} z \right] \quad (4.17)$$

Το αποτέλεσμα από την εφαρμογή αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier στη σχέση (4.17) περιγράφεται η σχέση:

$$P(x, z, t) = \iint P(k_x, 0, \omega) \exp(-ik_z z) \exp(-ik_x x + i\omega t) dk_x d\omega \quad (4.18)$$

Τέλος, η σχέση που περιγράφει τη σεισμική χωροθέτηση με τη μέθοδο Phase-Shift εκφράζεται αντικαθιστώντας στη σχέση (4.18) τη χρονική στιγμή  $t=0$  :

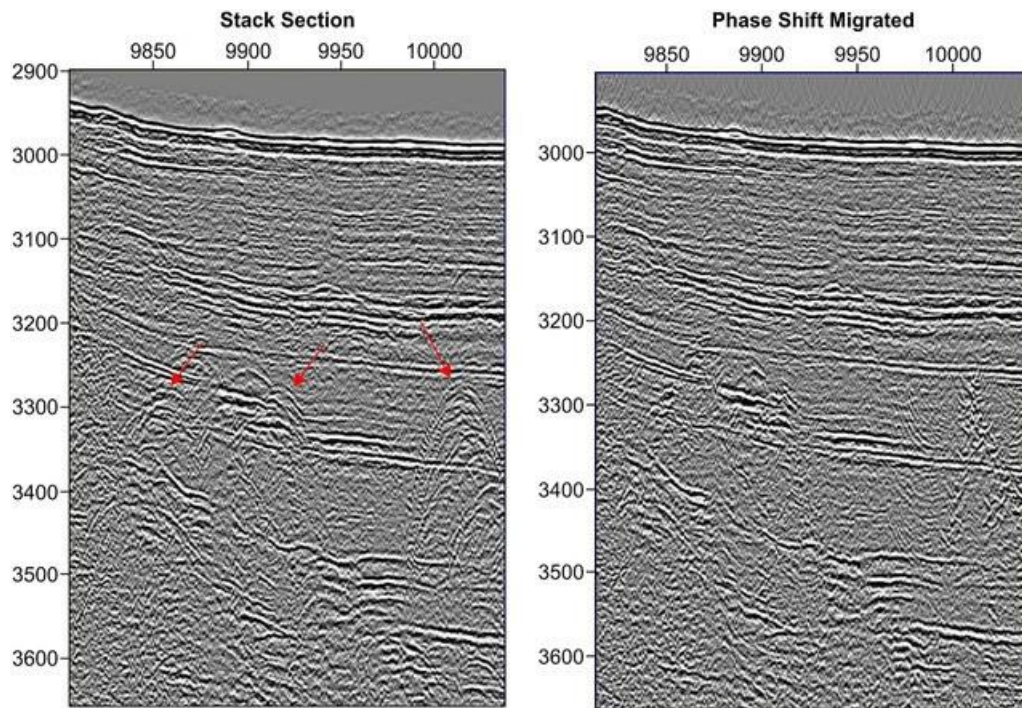
$$P(x, z, t = 0) = \iint P(k_x, 0, \omega) \exp(-ik_x x - i k_z z) dk_x d\omega \quad (4.19)$$

Στη εξίσωση (4.17) η μαθηματική έκφραση του κυματαριθμού κατακόρυφα διαδομένων σεισμικών κυμάτων  $k_z$  περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$k_z = \frac{\omega}{v} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{vk_x}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.20)$$

Στις προηγούμενες σχέσεις ως  $\omega$  ορίζεται η στιγμιαία γωνιακή συχνότητα του κύματος, ως  $v$  η ταχύτητα διάδοσης του κύματος και ως  $z$  το βάθος ([Jonasson 2020](#)).

Στο [Σχήμα 4.15](#) παρουσιάζεται συγκριτική απεικόνιση σεισμικής τομής πριν και μετά την εφαρμογή σεισμικής χωροθέτησης με τη μέθοδο Phase-Shift. Οι περιθλάσεις που εντοπίζονται με τη μορφή υπερβολών εξαλείφονται μετά τη χωροθέτηση, ενώ επίσης παρατηρείται βελτίωση της διακριτικής ικανότητας, με αποτέλεσμα την απεικόνιση των ανακλαστήρων με καλύτερη ανάλυση. Τα κόκκινα βέλη αποτελούν ενδείξεις των θέσεων των περιθλάσεων πάνω στην τομή.



Σχήμα 4.15 Συγκριτική απεικόνιση αποτελεσμάτων εφαρμογής σεισμικής χωροθέτησης με τη μέθοδο Phase-Shift ([Lozano et al. 2020](#)).

## 4.4 Περιγραφή δεδομένων

Τα δεδομένα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελούν μετρήσεις από την ερευνητική αποστολή του καθηγητή του τμήματος Θαλάσσιας Γεωλογίας και Γεωφυσικής του Πανεπιστημίου της Στοκχόλμης Martin Jakobsson και της ερευνητικής του ομάδας στη γεωφυσική διασκόπηση στο βορειοανατολικό τμήμα της θάλασσας Chukchi.

Αρχικά τα δεδομένα είναι καταγεγραμμένα σε αρχείο μορφής SEG-Y. Πρόκειται για μία μορφή αρχείων που δημιουργήθηκε από τον οργανισμό SEG (Society of Exploration Geophysicists) για την αποθήκευση γεωφυσικών δεδομένων. Κατά την ερευνητική αποστολή πραγματοποιήθηκαν από τους ερευνητές δύο σκέλη καταγραφών με συνολικά τέσσερις γραμμές μελέτης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται επεξεργασία στις καταγραφές των δύο εκ των τεσσάρων γραμμών μελέτης, που αντιστοιχούν συνολικά σε έντεκα αρχεία καταγραφών (sgy).

Κάθε αρχείο καταγραφών περιέχει διαφορετικό αριθμό δειγμάτων για κάθε καταγεγραμμένο ίχνος και επομένως διαφορετικό όγκο πληροφοριών. Το ακουστικό σύστημα CHIRP που τοποθετήθηκε στο παγοθραυστικό σκάφος Oden ήταν ποντισμένο σε βάθος 9,47 ft, δηλαδή περίπου 2,9 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Μεταξύ της πυροδότησης του ακουστικού συστήματος και του χρόνου καταγραφής των ανακλώμενων ακουστικών κυμάτων υπάρχει ένας χρόνος καθυστέρησης (Delay Recording Time), ο οποίος διαμορφώνεται ξεχωριστά σε κάθε αρχείο καταγραφής των δεδομένων των τμημάτων γραμμών μελέτης, λαμβάνοντας τιμές από 60 ms έως και 120 ms. Το διάστημα δειγματοληψίας των καταγραφών στο χρόνο ήταν ίσο με  $48 \cdot 10^{-6}$  s. Στα αρχεία των καταγραφών συμπεριλαμβάνεται και η θέση της κάθε καταγραφής (γεωγραφικό πλάτος και μήκος) σε arcsec. Οι θετικές τιμές των συντεταγμένων αντιστοιχούν σε τιμές βόρεια του Ισημερινού και ανατολικά του μεσημβρινού του Greenwich, ενώ οι αρνητικές τιμές αναφέρονται σε τιμές νότια και δυτικά αντίστοιχα. Τα αρχικά δεδομένα των αρχείων καταγραφών έχουν ήδη υποστεί επεξεργασία, δηλαδή το ίχνος που πρόκειται να επεξεργαστεί είναι απαλλαγμένο από την κυματομορφή της πηγής. ([Kasahara, Korneev & Zhdanov 2010](#)).

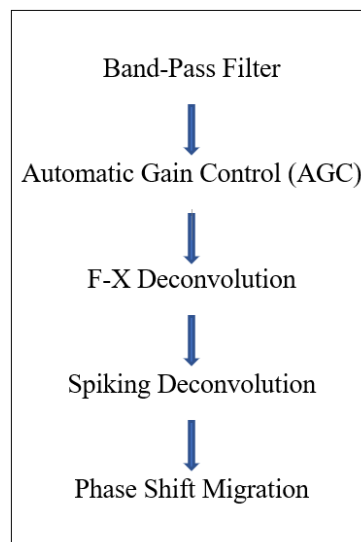
Το ακουστικό σύστημα μεταβαλλόμενου εύρους συχνοτήτων που χρησιμοποιήθηκε κατά τη γεωφυσική διασκόπηση για την καταγραφή των δεδομένων από την ερευνητική ομάδα έλαβε ως αρχική τιμή συχνοτήτων  $f_1 = 2500$  Hz και ως τελική τιμή συχνοτήτων  $f_2 = 7000$  Hz, ενώ η διάρκεια του παλμού (sweep length) είναι 30 ms. Τέλος, για τη συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιείται από το ακουστικό σύστημα CHIRP η μέθοδος μεταβαλλόμενης συχνότητας εκθετικού τύπου (exponential type sweep). Πρόκειται για μια συνάρτηση μεταβαλλόμενης συχνότητας συναρτήσεως του χρόνου, ξεκινώντας από μία τιμή γωνιακής ταχύτητας  $\omega_1$  έως μία τιμή  $\omega_2$  και εκφράζεται από τη σχέση :

$$x(t) = \left[ \omega_1 * \frac{T}{c} * \left( e^{\frac{t * c}{T}} - 1 \right) \right] \quad (4.21)$$

Όπου στην ανώτερη σχέση ο λόγος  $\frac{T}{c}$  ονομάζεται δείκτης ταλάντωσης με  $c = \ln \frac{\omega_2}{\omega_1}$ , ενώ T είναι η περίοδος ταλάντωσης ([Majdak, Balazs & Laback 2007](#)).

## 5ο Κεφάλαιο: Επεξεργασία δεδομένων σεισμικής ανάκλασης

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων του ηχητικού συστήματος CHIRP. Η περιγραφή της μεθοδολογίας επεξεργασίας των δεδομένων παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία παρέχονται από την εργαλειοθήκη Crewes ([Magrave & Lamoureux 2019](#)). Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται και περιγράφονται δύο διαγράμματα ροής επεξεργασίας, από τα οποία αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί το διάγραμμα ροής κατά Quinn. Ωστόσο, έγινε και η προσπάθεια εφαρμογής και βημάτων επεξεργασίας από το διάγραμμα επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων ακουστικού συστήματος CHIRP, που προτείνεται από τον ερευνητή Baradello, όπως η εφαρμογή διόρθωσης γεωμετρικής διασποράς (Spherical Divergence) η χρήση της οποίας δεν είχε τα επιθυμητά αποτελέσματα και γι' αυτό το λόγο δεν συμπεριλαμβάνεται στο τελικό διάγραμμα ροής επεξεργασίας που παρουσιάζεται.



Σχήμα 5.1 Τελικό διάγραμμα ροής επεξεργασίας δεδομένων διπλωματικής εργασίας.

Η επεξεργασία των δεδομένων στο κύριο τμήμα της χωρίζεται σε τέσσερα στάδια επεξεργασίας:

- Κατασκευή χάρτη γραμμών μελέτης
- Κατανόηση των αλγορίθμων
- Επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων των προς εφαρμογή αλγορίθμων για τα σεισμικά δεδομένα που επεξεργάζονται
- Παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή των αλγορίθμων στα σεισμικά δεδομένα

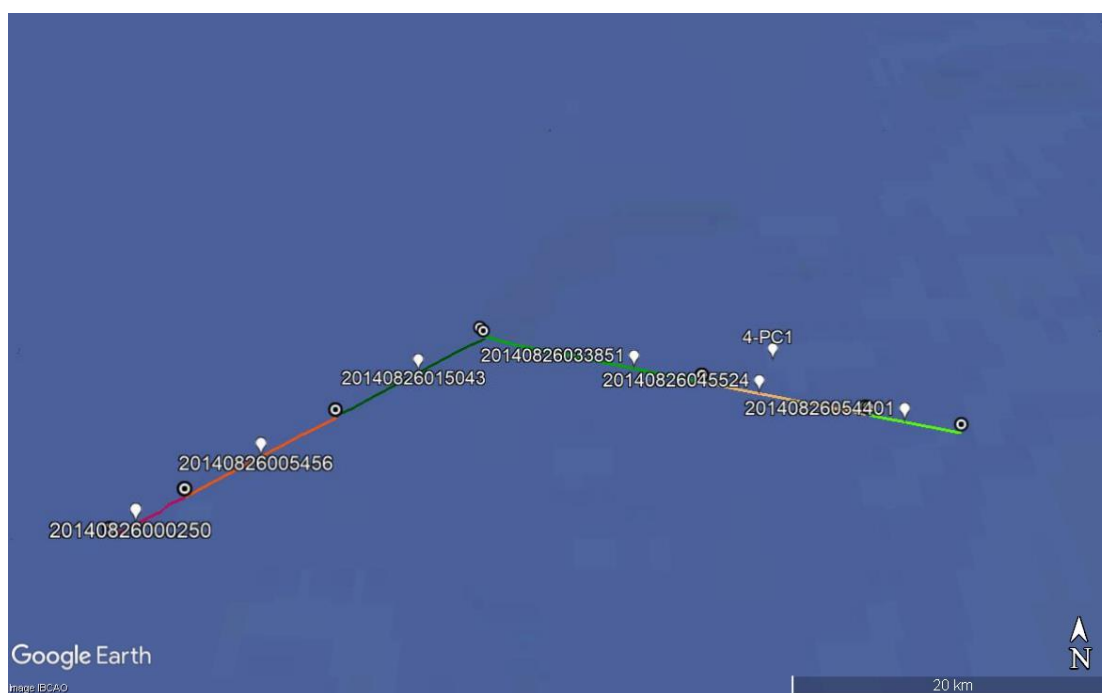
Η επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων ξεκίνησε με την ενοποίηση των γραμμών μελέτης προκειμένου να κατασκευαστεί μια σεισμική τομή αντιπροσωπευτική για το χαρακτηρισμό του πυθμένα και της ζώνης ρηγμάτωσης Herald. Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν τα βήματα επεξεργασίας που παρουσιάζονται στο διάγραμμα ροής που παρουσιάζεται στο [Σχήμα 5.1](#) και πραγματοποιήθηκε σύγκριση των βέλτιστων παραμέτρων κάθε σταδίου

επεξεργασίας σε σχέση με την αρχική σεισμική τομή. Οι σεισμικές τομές που παρουσιάζονται στα στάδια επεξεργασίας αποτελούν τμήματα της συνολικής γραμμής μελέτης για να είναι ορατό σε μεγαλύτερο βαθμό το αποτέλεσμα της επεξεργασίας. Με το πέρας της επιλογής των βέλτιστων παραμέτρων για κάθε στάδιο επεξεργασίας εφαρμόστηκε ολόκληρη η μεθοδολογία για όλο το μήκος της γραμμής μελέτης και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα. Στον κατακόρυφο άξονα των τομών βρίσκεται ο χρόνος δειγματοληψίας των σεισμικών ιχνών σε sec , ενώ στον οριζόντιο άξονα το μήκος των γραμμών μελέτης μετρημένο σε m.

## 5.1 Κατασκευή χάρτη απεικόνισης γραμμών μελέτης

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, κατά την ερευνητική αποστολή SWERUS-C3 πραγματοποιήθηκαν συνολικά 4 γραμμές μελέτης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται επεξεργασία δεδομένων σεισμικής ανάκλασης από 7 τμήματα των τεσσάρων αυτών γραμμών μελέτης της ερευνητικής αποστολής.

Σε πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκε ανάγνωση των αρχείων καταγραφών των δεδομένων. Από τα αρχεία ανακτήθηκαν οι συντεταγμένες για κάθε καταγεγραμμένο σεισμικό ίχνο. Οι αρχικές συντεταγμένες ήταν σε arcsec και με τη χρήση του υπολογιστικού περιβάλλοντος Matlab πραγματοποιήθηκε μετατροπή των συντεταγμένων σε μοίρες προκειμένου να είναι εφικτή η εισαγωγή των συντεταγμένων των σημείων στο πρόγραμμα Google Earth Pro για την απεικόνιση των υπό επεξεργασία γραμμών μελέτης. Στο [Σχήμα 5.2](#) παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της απεικόνισης των γραμμών μελέτης. Σε δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκε μετατροπή των συντεταγμένων σε μέτρα με τη χρήση του προγράμματος Surfer, εισάγοντας την αντίστοιχη ζώνη της περιοχής μελέτης (UTM Zone 01N) στην Παγκόσμια Εγκάρσια Μερκατορική προβολή, με σκοπό τον υπολογισμό του μήκους των γραμμών μελέτης.



Σχήμα 5.2 Απεικόνιση τμημάτων γραμμών μελέτης στο πρόγραμμα Google Earth Pro. Ο τίτλος του κάθε τμήματος γραμμής μελέτης προέκυψε από την ημερομηνία συλλογής των δεδομένων, δηλαδή 26 Αυγούστου (8<sup>ος</sup> μήνας) εν έτη 2014, ενώ το υπόλοιπο μέρος του τίτλου αποτελεί πιθανά αρίθμηση κατά τη συλλογή των μετρήσεων.



## 5.2 Ενοποίηση τμημάτων γραμμών μελέτης

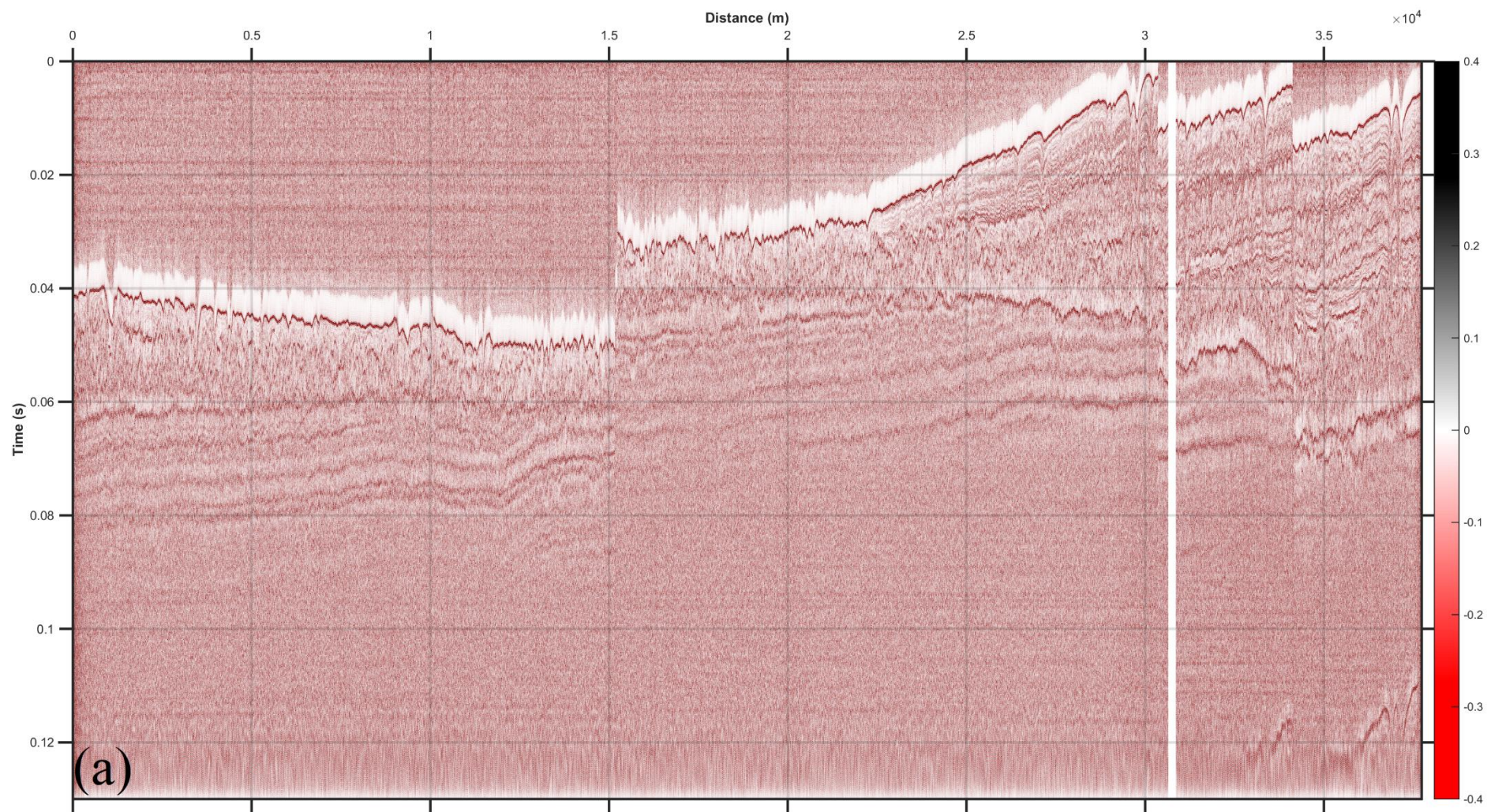
Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων απεικόνισης των δεδομένων σεισμικής ανάκλασης, πραγματοποιήθηκε ενοποίηση των τμημάτων των γραμμών μελέτης. Από τα τμήματα που φαίνονται στο [Σχήμα 5.2](#) δημιουργήθηκαν συνολικά δύο γραμμές μελέτης στις οποίες και πραγματοποιήθηκε επεξεργασία. Η πρώτη γραμμή μελέτης αποτελεί την ένωση των τμημάτων 20140826033851, 20140826045524 και 20140826054401, ενώ η δεύτερη γραμμή μελέτης αποτελεί την ένωση των τμημάτων 20140826000250, 20140826005456 και 20140826015043.

Από τα αρχεία των καταγραφών των τμημάτων της εκάστοτε γραμμής μελέτης παρατηρήθηκε ότι ο χρόνος καθυστέρησης καταγραφής (Delay Recording Time) μεταξύ των τμημάτων των γραμμών μελέτης είναι διαφορετικός με αποτέλεσμα να μην υπάρχει συνέχεια στην απεικόνιση της σεισμικής τομής. Το πρόβλημα αυτό διορθώθηκε ισοσταθμίζοντας το χρόνο καθυστέρησης καταγραφής όλου του πλήθους των δεδομένων της σεισμικής τομής στην ίδια τιμή. Γνωρίζοντας από τα αρχεία καταγραφών ότι το διάστημα δειγματοληψίας των δεδομένων είναι  $48.828125 \cdot 10^{-6}$  s και χρησιμοποιώντας τη διαφορά του χρόνου καθυστέρησης καταγραφής των δεδομένων μεταξύ των τμημάτων της γραμμής μελέτης, προσεγγίστηκε ο αριθμός των δειγμάτων που αντιστοιχεί στην τιμή αυτή του χρόνου. Από τα αρχεία καταγραφών παρατηρήθηκε ότι η διαφορά στις τιμές του χρόνου καθυστέρησης μεταξύ των τμημάτων των γραμμών μελέτης ήταν πολλαπλάσια των 10ms. Δεδομένης της τιμής αυτής και του διαστήματος δειγματοληψίας υπολογίστηκαν τα δείγματα, που αντιστοιχούν στα 10 αυτά ms, δηλαδή περίπου 205 δείγματα ( $10 \text{ ms} / 0.048828125 \text{ ms}$ ). Στη συνέχεια, επιλέχθηκε μια κοινή τιμή του χρόνου καθυστέρησης καταγραφής για όλα τα τμήματα της εκάστοτε γραμμής μελέτης και πραγματοποιήθηκε η διόρθωση των δεδομένων. Σε κάθε προς διόρθωση τμήμα της ενοποιημένης γραμμής μελέτης αφαιρέθηκε ο κατάλληλος αριθμός δειγμάτων από το τέλος των δεδομένων και προστέθηκε ο ίδιος αριθμός μηδενικών ιχνών στην αρχή των ίδιων δεδομένων, προκειμένου να μη μεταβληθεί το πλήθος τους. Στο [Σχήμα 5.3 \(a\)](#) φαίνεται η απεικόνιση της ένωσης των τμημάτων 20140826033851, 20140826045524 και 20140826054401 πριν τη διόρθωση των δεδομένων, ενώ στο [Σχήμα 5.3 \(b\)](#) η απεικόνιση της ενοποιημένης σεισμικής τομής μετά τη διόρθωση. Ο κύριος λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε να γίνει η ενοποίηση των συγκεκριμένων τμημάτων και όχι όλων ήταν για την καλύτερη απεικόνιση και ερμηνεία της σεισμικής τομής. Ωστόσο, επειδή οι ενοποιημένες γραμμές μελέτης κατά την προέκτασή τους τέμνονται δημιουργώντας ένα διασταυρωμένο προφίλ (cross profile), η καταλληλότερη ερμηνεία των τελικών σεισμικών τομών απορρέει από τη συσχέτιση των ανιχνευόμενων στρωματογραφικών χαρακτηριστικών και στις δύο ενοποιημένες γραμμές μελέτης, όπου αυτή είναι δυνατή. Για πρακτικούς λόγους οι προαναφερθείσες γραμμές μελέτης θα ονομάζονται :

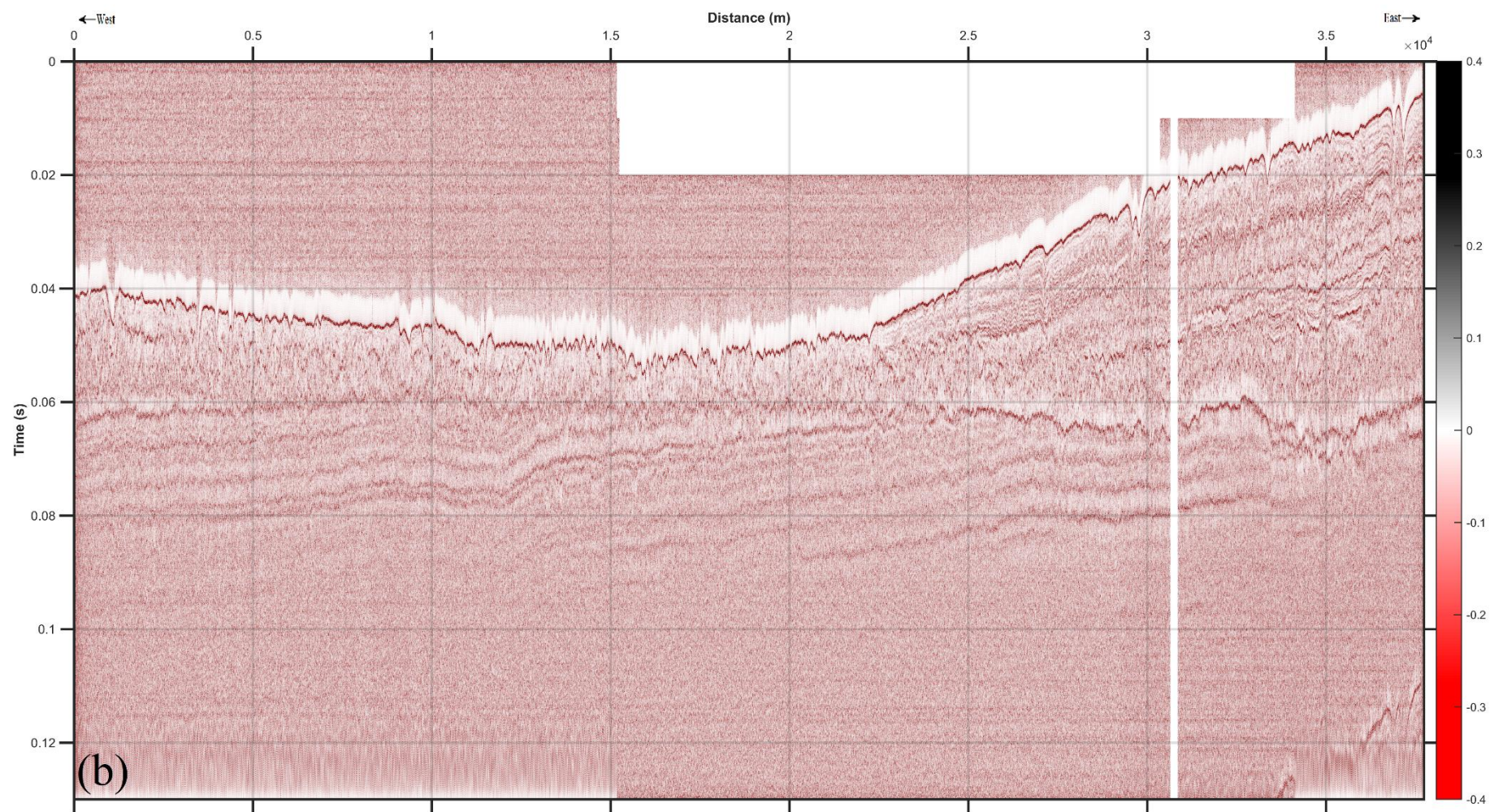
- 33851-45524-54401 ως συντομογραφία της ένωσης των τμημάτων 20140826033851, 20140826045524 και 20140826054401
- 00250-05456-15043 ως συντομογραφία της ένωσης των τμημάτων 20140826000250, 20140826005456 και 20140826015043



Σημαντική παράμετρος για τη δημιουργία μίας αξιόπιστης απεικόνισης της σεισμικής τομής είναι η δημιουργία πραγματικού άξονα αποστάσεων. Από την τοποθέτηση των τμημάτων των γραμμών μελέτης στο Google Maps, παρατηρήθηκε ότι σε μερικά σημεία τα τμήματα αυτά είτε δεν ενώνονται είτε αλληλοεπικαλύπτονται. Με στόχο τη δημιουργία σεισμικών τομών απαλλαγμένων από πολλαπλά απεικονιζόμενη πληροφορία αφαιρέθηκαν τα αντίστοιχα δεδομένα μετά τα σημεία τομής των εκάστοτε τμημάτων, καθώς και δεδομένα τα οποία δεν συνάδουν με το νοητό ευθύγραμμο τμήμα της γραμμής μελέτης. Για τη διόρθωση των τμημάτων των γραμμών μελέτης που δεν ενώνονται, χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες των τελικών και αρχικών σημείων, των προηγούμενων και των επόμενων τμημάτων αντίστοιχα υπολογίστηκε η μεταξύ τους απόσταση. Μέσω των συντεταγμένων όλων των σημείων των εκάστοτε τμημάτων της γραμμής μελέτης υπολογίστηκε η μέση απόσταση αυτών και από το λόγο της πραγματικής απόστασης των τμημάτων με τη μέση απόσταση υπολογίστηκε ο αριθμός των κελιών πληρωμένος με μηδενικά δεδομένα που πρέπει να προστεθεί στους πίνακες δεδομένων και αποστάσεων για να διατηρηθεί το πλήθος των δεδομένων σε κάθε ζεύγος πινάκων ίδιο. Το πλήθος των μηδενικών αυτών δεδομένων που προστέθηκε στα δεδομένα απεικονίζεται στο [Σχήμα 5.3 \(b\)](#) ως λευκή γραμμή και σηματοδοτεί το χάσμα που υπάρχει κατά μήκος των τμημάτων των γραμμών μελέτης.







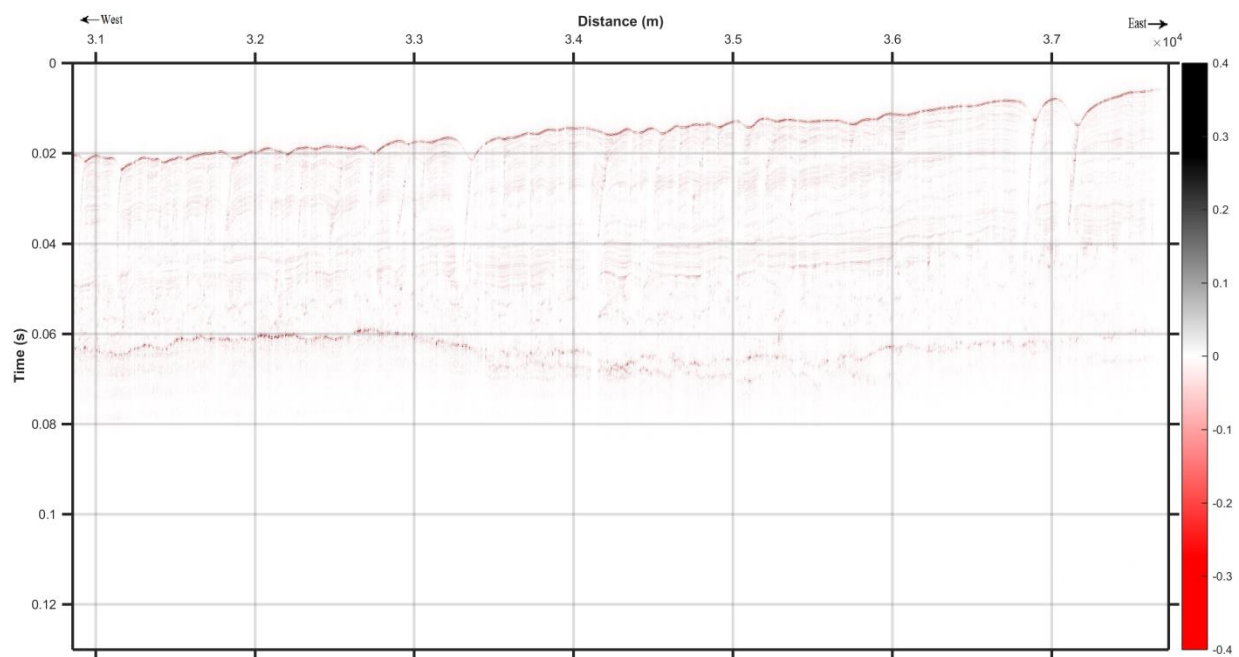
Σχήμα 5.3 (a) Ενοποιημένη απεικόνιση της γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 πριν και (b) μετά τη διόρθωση ως προς το χρόνο καθυστέρησης και την εφαρμογή φίλτρου αυτόματης ενίσχυσης με τιμή μήκους φίλτρου 10 ms.

### 5.3 Εφαρμογή φίλτρου αυτόματης ενίσχυσης σήματος (AGC)

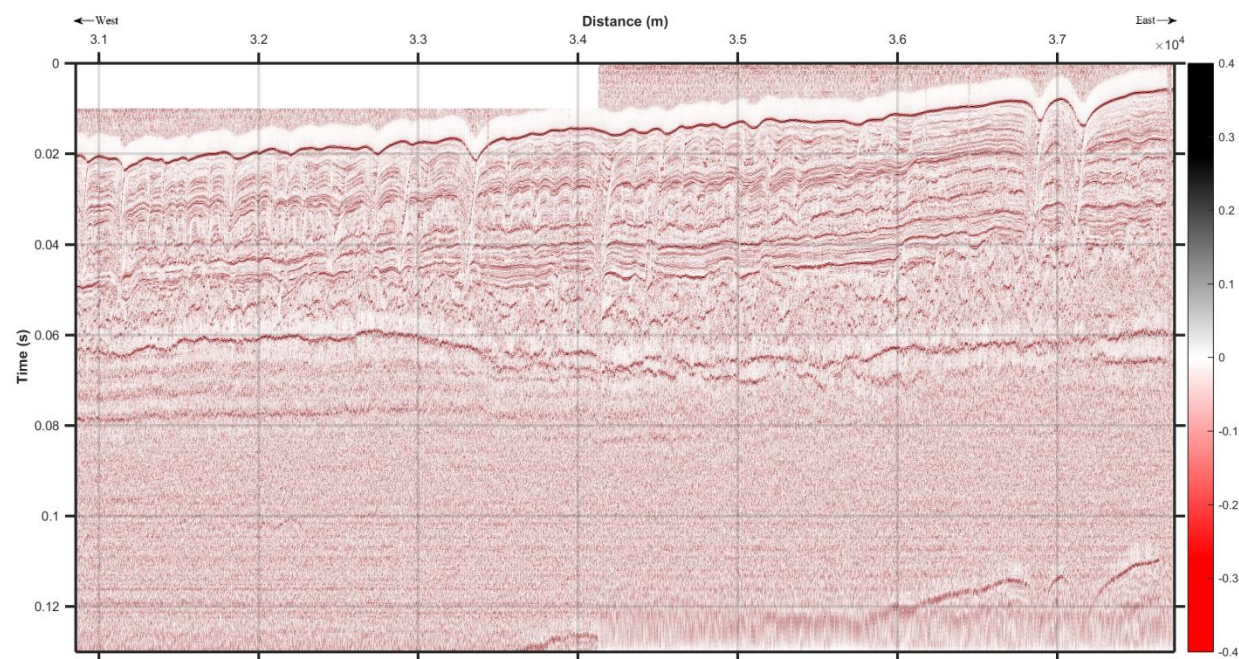
Το φίλτρο αυτόματης ενίσχυσης σήματος είναι ένα στάδιο επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων, το οποίο εφαρμόζεται στο τέλος της διαδικασίας επεξεργασίας με σκοπό την εξισορρόπηση του πλάτους των καταγεγραμμένων σεισμικών ιχνών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία το φίλτρο αυτόματης ενίσχυσης εφαρμόζεται σε κάθε σεισμική τομή και σε κάθε βήμα επεξεργασίας προκειμένου να είναι ορατά τόσο τα αποτελέσματα επεξεργασίας των δεδομένων, όσο και να είναι εφικτή η σύγκριση των σεισμικών τομών.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος gain για την ενίσχυση του σήματος, ο οποίος δημιουργήθηκε στο εργαστήριο Γεωφυσικής του Πανεπιστημίου της Αλμπέρτα στον Καναδά. Ως παράμετροι εισαγωγής του φίλτρου αυτόματης ενίσχυσης ορίζονται τα σεισμικά δεδομένα (traces), το μήκος του φίλτρου (operator length) σε ms και επίσης το διάστημα δειγματοληψίας (sample interval). Το μήκος του φίλτρου είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα εφαρμογής του φίλτρου ενίσχυσης σήματος, ένας λόγος για τον οποίο κρίθηκε απαραίτητη η εύρεση της κατάλληλης τιμής του για την καλύτερη απεικόνιση της σεισμικής τομής. Η εφαρμογή του φίλτρου αυτόματης ενίσχυσης είναι ένα πολύ σημαντικό στάδιο επεξεργασίας των σεισμικών δεδομένων, καθώς η διακριτική ικανότητα της απεικόνισης των δεδομένων βελτιώνεται σε σημαντικό βαθμό. Στο [Σχήμα 5.4](#) παρουσιάζεται η απεικόνιση τμήματος της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 δίχως την εφαρμογή του φίλτρου αυτόματης ενίσχυσης με σκοπό τη σύγκριση της τομής με τις τομές μετά τη χρήση φίλτρου αυτόματης ενίσχυσης που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Έπειτα από δοκιμές προέκυψε ότι η βέλτιστη τιμή του μήκους φίλτρου για την απεικόνιση των σεισμικών της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι τα 10 ms. Ειδικότερα, δοκιμάστηκαν φίλτρα με μήκη 10 ms, 20 ms, 30 ms, 40 ms και 50 ms. Το αποτέλεσμα εφαρμογής του φίλτρου αυτόματης ενίσχυσης για τιμή μήκους φίλτρου 10 ms παρουσιάζεται στο [Σχήμα 5.5](#), ενώ στο [Σχήμα 5.6](#) παρουσιάζεται το αποτέλεσμα για τιμή μήκους φίλτρου 50 ms για λόγους σύγκρισης με τη βέλτιστη τιμή των 10ms. Τέλος, η απεικόνιση της ενοποιημένης γραμμής μελέτης μετά την εφαρμογή του φίλτρου αυτόματης ενίσχυσης παρουσιάζεται στο [Σχήμα 5.3](#).

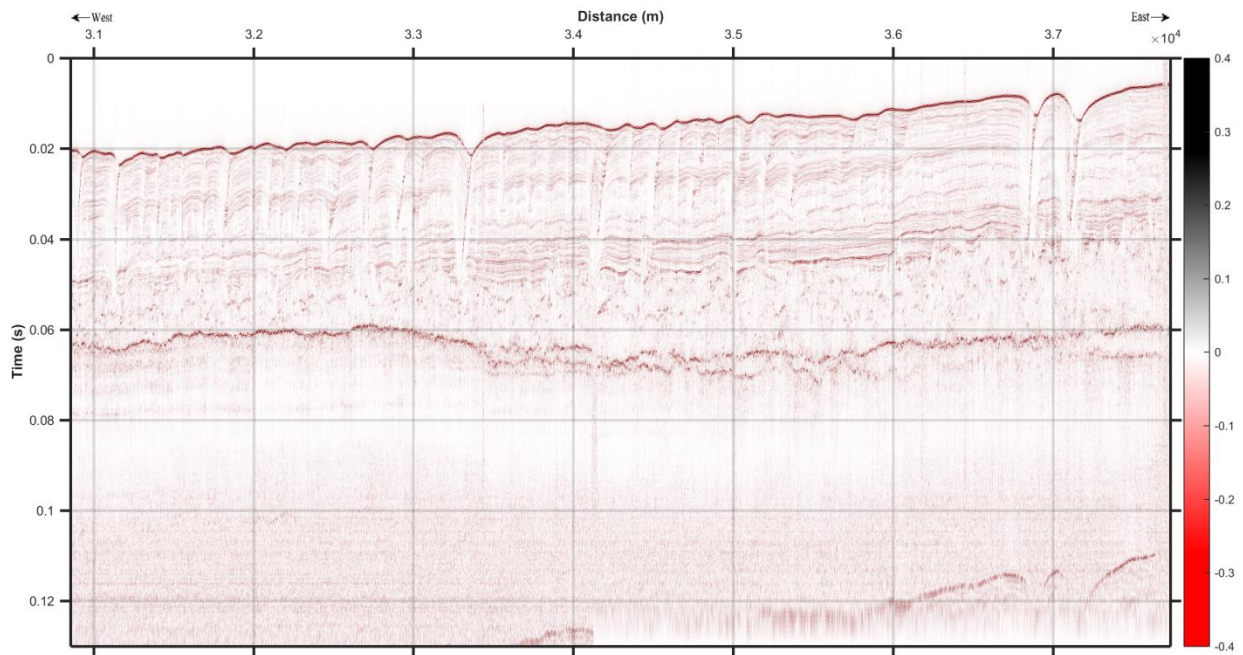




Σχήμα 5.4 Απεικόνιση τμήματος της γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 χωρίς AGC



Σχήμα 5.5 Απεικόνιση τμήματος της γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 με AGC και τιμή μήκους φίλτρου 10 ms.



Σχήμα 5.6 Απεικόνιση τμήματος της γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 με AGC και τιμή μήκους φίλτρου 50 ms.

Συγκρίνοντας την απεικόνιση της τομής πριν την εφαρμογή φίλτρου αυτόματης ενίσχυσης με τις τομές μετά την εφαρμογή του φίλτρου συμπεραίνεται ότι η χρήση του φίλτρου είναι κρίσιμης σημασίας για την κατανόηση του υποβάθρου της περιοχής μελέτης, καθώς απεικονίζονται με σχετική λεπτομέρεια οι υποκείμενοι του πυθμένα σχηματισμοί, καθώς και διάφορα γεωλογικά φαινόμενα που ενδεχομένως έχουν λάβει χώρα σε παρελθοντικό χρόνο. Τέλος, παρατηρείται ότι τιμή μήκους φίλτρου 50 ms, αλλά και μεγαλύτερο δεν ενισχύει σε σημαντικό βαθμό τον λόγο σήματος προς θόρυβο, ενώ για τιμές μικρότερες των 10 ms η παρουσία θορύβου είναι σημαντικά αισθητή και επέρχεται χρωματικός κορεσμός στην τομή δυσχεραίνοντας την ερμηνεία.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για να είναι ορατά τα αποτελέσματα εφαρμογής των επόμενων σταδίων επεξεργασίας κατά την παρουσίαση της σεισμικής τομής θα εφαρμόζεται και ενίσχυση σήματος. Με αυτό τον τρόπο θα είναι πιο εύκολη η ερμηνεία της σεισμικής τομής, ενώ θα φαίνονται και τα αποτελέσματα του εκάστοτε βήματος επεξεργασίας.

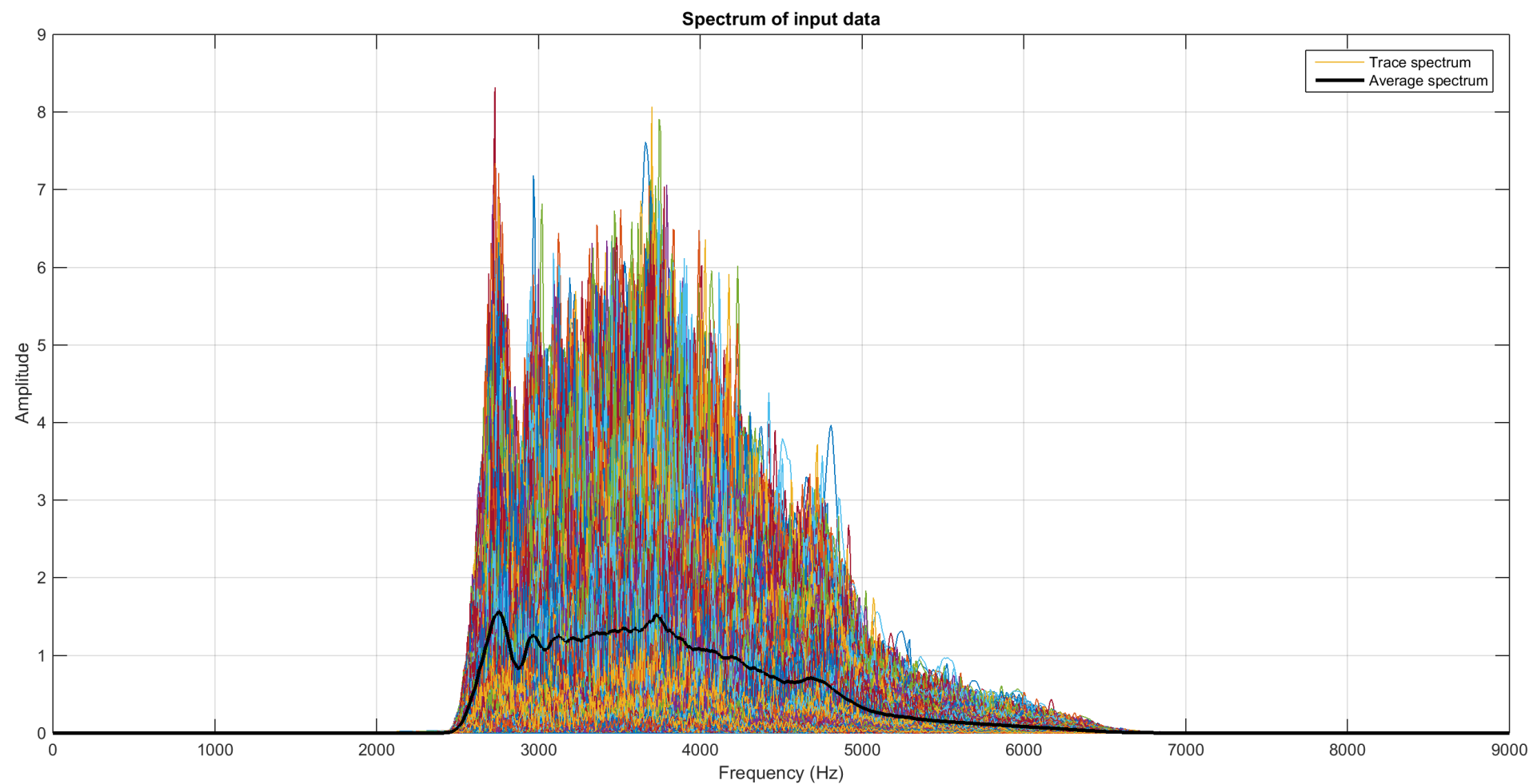
## 5.4 Εφαρμογή ζωνοπερατού φίλτρου συχνοτήτων (band-pass filter)

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4 σκοπός της εφαρμογής του ζωνοπερατού φίλτρου συχνοτήτων είναι η αφαίρεση θορύβου από τα σεισμικά δεδομένα, μια διόρθωση που επιτυγχάνεται μέσω της αποκοπής συχνοτήτων διαφορετικών από το εύρος συχνοτήτων που καθορίζεται από το χρήστη.

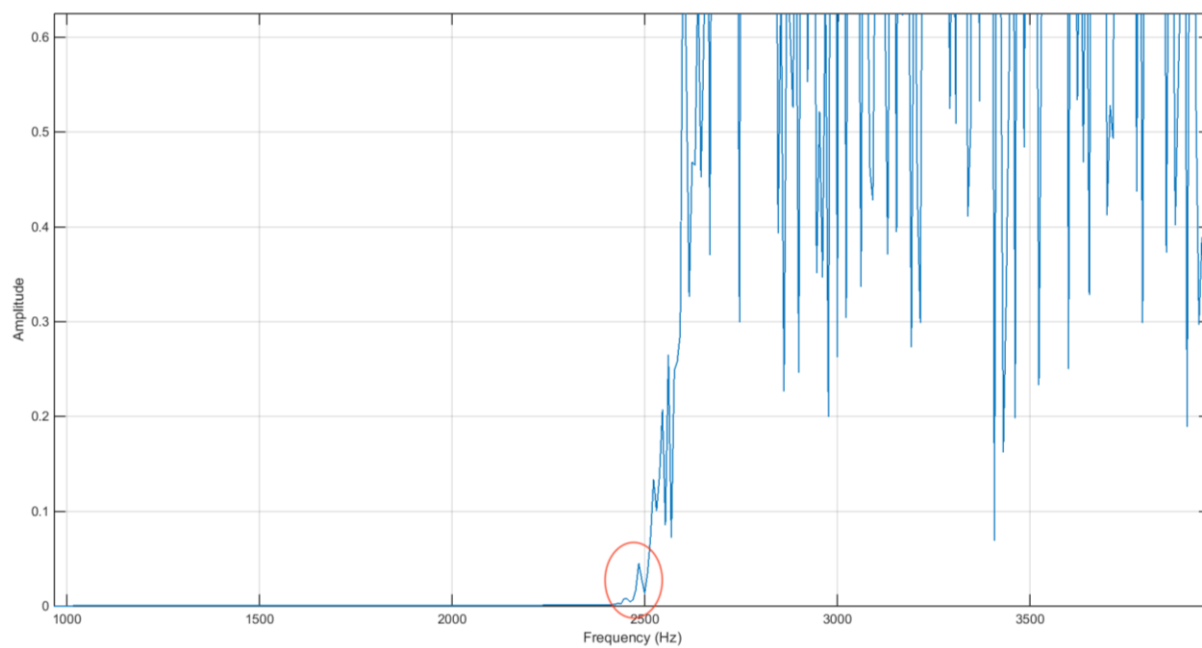
Πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μεθοδολογίες αποκοπής περιεχομένου συχνοτήτων από τα σεισμικά δεδομένα. Η πρώτη στηρίζεται στο φίλτρο Band-Pass, ενώ η δεύτερη στο φίλτρο αποκοπής συχνοτήτων κατά Butterworth. Για την εφαρμογή των φίλτρων συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκαν αλγόριθμοι που δημιουργήθηκαν στο εργαστήριο Γεωφυσικής του Πανεπιστημίου της Αλμπέρτα στον Καναδά. Τόσο το φίλτρο Band-Pass όσο και το φίλτρο Butterworth χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση συχνοτήτων πέρα από το καθορισμένο εύρος. Το φίλτρο Butterworth έχει χρησιμοποιηθεί ως Low-Pass filter και High-Pass filter για την απομάκρυνση υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων, αντίστοιχα. Το ακουστικό σύστημα CHIRP που περιγράφεται στην παρούσα διπλωματική εργασίας παράγει ακουστικό σήμα μεταβαλλόμενης συχνότητας από 2500 Hz έως 7000 Hz, επομένως θα γίνει εφαρμογή των ανωτέρω φίλτρων για το συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων.

Σε πρώτο στάδιο υπολογίστηκε το φάσμα των σεισμικών δεδομένων για είναι ορατό το συχνοτικό περιεχόμενο των δεδομένων. Στο [Σχήμα 5.7](#) παρουσιάζεται το φάσμα των τελικών ενοποιημένων δεδομένων της γραμμής μελέτης 33851-45524-54401. Με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνεται το φάσμα των καταγεγραμμένων σεισμικών ιχνών, ενώ η μαύρη γραμμή αντιστοιχεί στο μέσο φάσμα των δεδομένων. Από την απεικόνιση του φάσματος των δεδομένων παρατηρείται ότι το συχνοτικό περιεχόμενο των δεδομένων κυμαίνεται στο ίδιο εύρος με τον ακουστικό παλμό της πηγής. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο [Σχήμα 5.8](#) υπάρχουν και τιμές έξω από το εύρος συχνοτήτων των 2500 έως 7000 Hz, όπου απεικονίζεται το φάσμα ενός μόνο ίχνους. Οι τιμές αυτές έξω από το συχνοτικό περιεχόμενο της πηγής ονομάζονται Ripples και η παρουσία τους αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια επιλογής του καταλληλότερου προς εφαρμογή φίλτρου στην προσπάθεια απομάκρυνσης των τιμών αυτών. Η απομάκρυνση των περιττών και έξω από τα επιθυμητά όρια τιμών συχνοτήτων επιτεύχθηκε με τη χρήση του φίλτρου band-pass. Δοκιμάστηκαν αρκετές τιμές ορίων συχνοτήτων για τα σεισμικά δεδομένα που επεξεργάζονται για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των σταδίων επεξεργασίας ακουστικού συστήματος CHIRP, τόσο για το φίλτρο Band-Pass, όσο και για το φίλτρο Butterworth. Ωστόσο, τα αποτελέσματα από τη χρήση του φίλτρου Butterworth δεν είναι τόσο ικανοποιητικά σε σχέση με το φίλτρο Band-Pass. Από τις διάφορες ράμπες συχνοτήτων που δοκιμάστηκαν η καταλληλότερη ήταν : 2500-2550-6950-7000 Hz. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου Band-Pass φαίνεται στο [Σχήμα 5.9](#), όπου παρουσιάζεται το φάσμα συχνοτήτων ενός μόνο ίχνους προκειμένου να είναι εύκολα διακριτό το αποτέλεσμα του φίλτρου. Τέλος, στο [Σχήμα 5.10 \(a\)](#) παρουσιάζεται τμήμα της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 πριν την εφαρμογή του φίλτρου Band-Pass, στο [Σχήμα 5.10 \(b\)](#) παρουσιάζεται τμήμα της τομής από τα 31-32.5 km & 55-80 ms, ενώ στο [Σχήμα 5.10 \(c\)](#) παρουσιάζεται τμήμα της τομής από τα 31-32.5 km & 55-80 ms μετά από την εφαρμογή του φίλτρου Band-Pass.

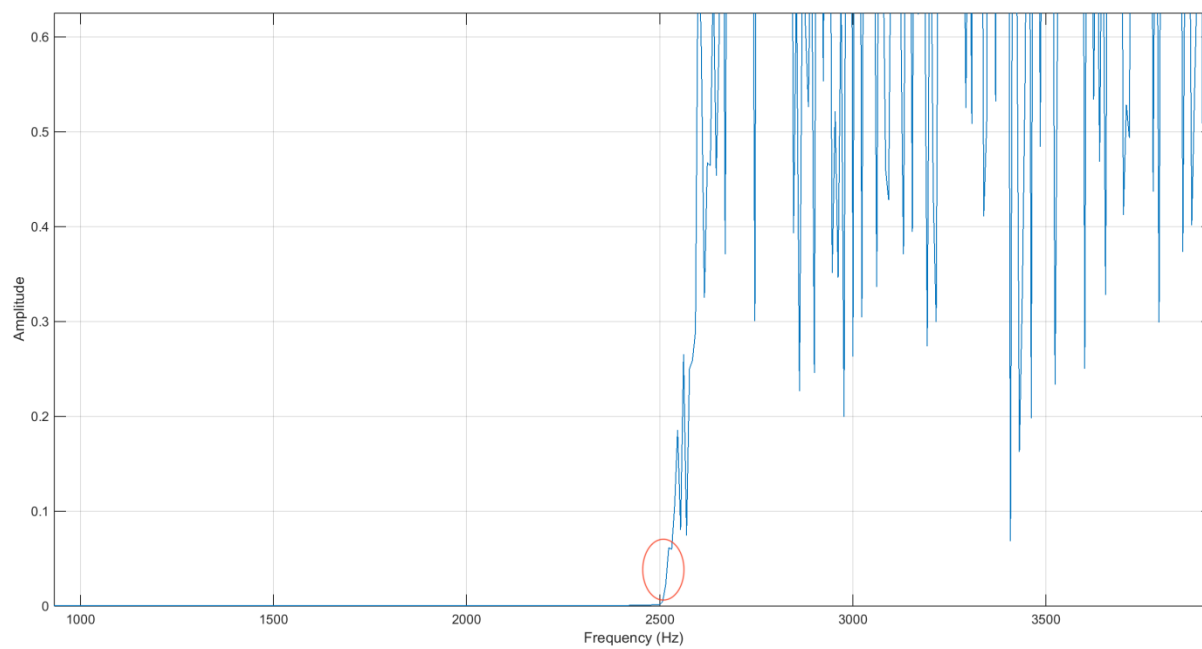




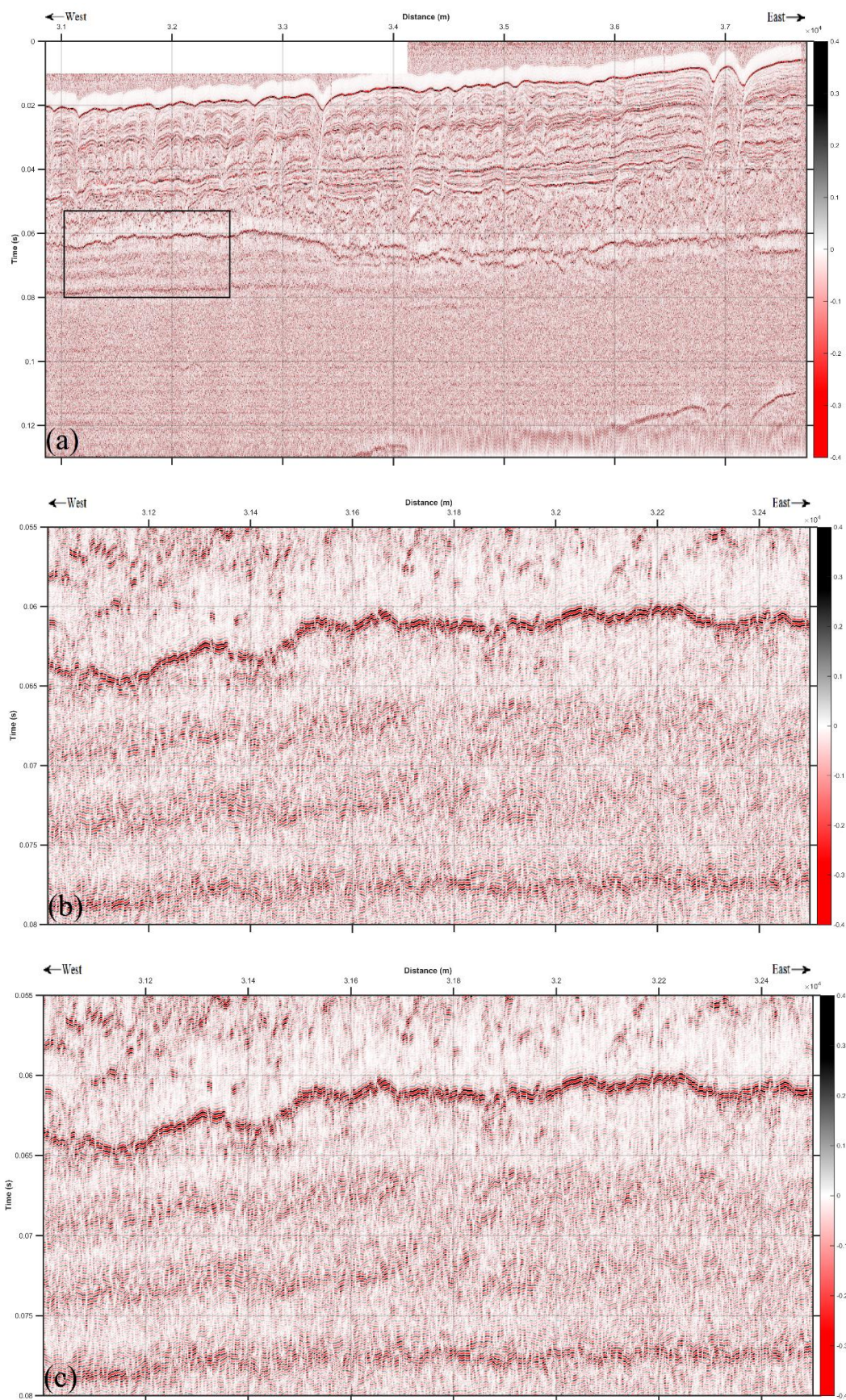
Σχήμα 5.7 Φάσμα σεισμικών δεδομένων της γραμμής μελέτης 33851-45524-54401. Με χρώμα φαίνεται το φάσμα κάθε καταγεγραμμένου σεισμικού ίχνους, ενώ η μαύρη γραμμή απεικονίζει το μέσο φάσμα των εν λόγω δεδομένων. Οι τιμές του κατακόρυφου άξονα αντιστοιχούν σε πλάτος, ενώ στον οριζόντιο άξονα η συχνότητα σε Hz.



Σχήμα 5.8 Ενδεικτική παρουσίαση φάσματος ενός ίχνους πριν την εφαρμογή του φίλτρου Band-Pass. Οι τιμές του κατακόρυφου άξονα αντιστοιχούν σε πλάτος, ενώ στον οριζόντιο άξονα η συχνότητα σε Hz.



Σχήμα 5.9 Ενδεικτική παρουσίαση φάσματος ενός ίχνους μετά την εφαρμογή του φίλτρου Band-Pass. Οι τιμές του κατακόρυφου άξονα αντιστοιχούν σε πλάτος, ενώ στον οριζόντιο άξονα η συχνότητα σε Hz.



Σχήμα 5.10 (a) Απεικόνιση τμήματος της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 πριν την εφαρμογή του φίλτρου Band-Pass. Τμήμα της τομής από τα 31-32.5 km & 55-80 ms (b) πριν και (c) μετά την εφαρμογή του φίλτρου Band-Pass.



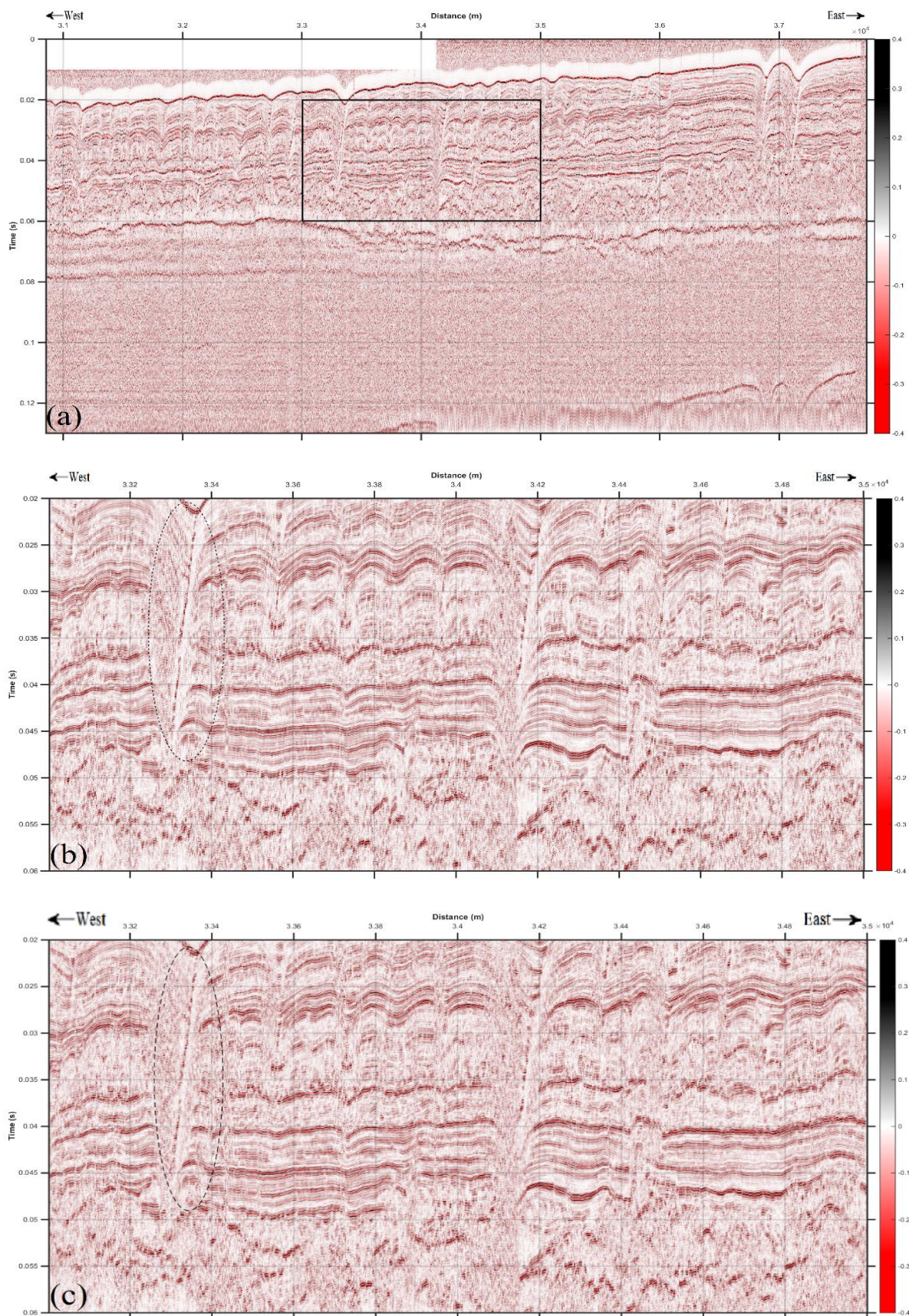
Συμπερασματικά, παρατηρήθηκε ότι η χρήση φίλτρου με απότομες αλλαγές τιμών συχνοτήτων εφαρμόζεται καλύτερα στα συγκεκριμένα σεισμικά δεδομένα, παρά το γεγονός ότι τέτοιου είδους φίλτρα συνήθως προκαλούν και σημαντικές διακυμάνσεις (Ripples) στο συχνοτικό περιεχόμενο των δεδομένων. Η εφαρμογή φίλτρων στο χώρο των συχνοτήτων έχει ως σκοπό τη βελτίωση της κατακόρυφης ανάλυσης των σεισμικών δεδομένων. Η χρήση υψηλών συχνοτήτων για την καταγραφή σεισμικών δεδομένων αποσκοπεί σε δεδομένα υψηλής κατακόρυφης ανάλυσης. Σύμφωνα με τον Yilmaz (1987) κατά την επεξεργασία σεισμικών δεδομένων, η χρήση τόσο υψηλών όσο και χαμηλών συχνοτήτων έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της κατακόρυφης ανάλυσης. Επομένως, ανάλογα με τα σεισμικά δεδομένα χρησιμοποιείται ευρύ φάσμα συχνοτήτων, το οποίο συμπεριλαμβάνει τόσο τις χαμηλές συχνοτήτες των σεισμικών δεδομένων, όσο και τις υψηλές (Dondurur 2018). Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές από την εφαρμογή του ζωνοπερατού φίλτρου στα δεδομένα. Αυτό πιθανά οφείλεται στο ότι η αποκοπή των χαμηλών συχνοτήτων ( $<2500$  Hz) εφαρμόζεται σε ένα μικρό παράθυρο συχνοτήτων, όπως φαίνεται και από το αποτέλεσμα του φίλτρου στο φάσμα ενός ίχνους στο [Σχήμα 5.8](#) και [Σχήμα 5.9](#). Αντίστοιχη αλλαγή παρατηρείται και στην απομάκρυνση υψηλών συχνοτήτων ( $>7000$  Hz) με τη χρήση του ζωνοπερατού φίλτρου.

## 5.5 Εφαρμογή αποσυνέλιξης στο χώρο συχνότητας-απόστασης (F-X Deconvolution)

Η εφαρμογή του αλγορίθμου F-X Deconvolution αποσκοπεί στην απομάκρυνση του θορύβου από τα σεισμικά δεδομένα, επιτυγχάνοντας βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο. Για την υλοποίηση αυτού του σταδίου επεξεργασίας ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε δημιουργήθηκε στο εργαστήριο Γεωφυσικής του Πανεπιστημίου της Αλμπέρτα στον Καναδά, ενώ ο κώδικας βασίζεται στη θεωρία περί αποσυνέλιξης στο χώρο συχνότητας-απόστασης. Ο αλγόριθμος δέχεται ως παραμέτρους εισαγωγής τα σεισμικά δεδομένα (traces), το διάστημα δειγματοληψίας (sampling interval) σε  $s$ , το μήκος φίλτρου (operator length) σε δείγματα χρόνου, στα οποία έγινε η αντιστοίχιση σε  $s$  βάση του χρόνου δειγματοληψίας, το ποσοστό τυχαίου θορύβου (pre-whitening percentage) και την ελάχιστη και μέγιστη συχνότητα των δεδομένων εισαγωγής ( $f_{low}$  και  $f_{max}$  αντίστοιχα). Για την απομάκρυνση θορύβου από τα δεδομένα πραγματοποιήθηκε και προσπάθεια εφαρμογής του φίλτρου Savitzky-Golay, το οποίο συντέλεσε αρνητικά στην απεικόνιση της τομής

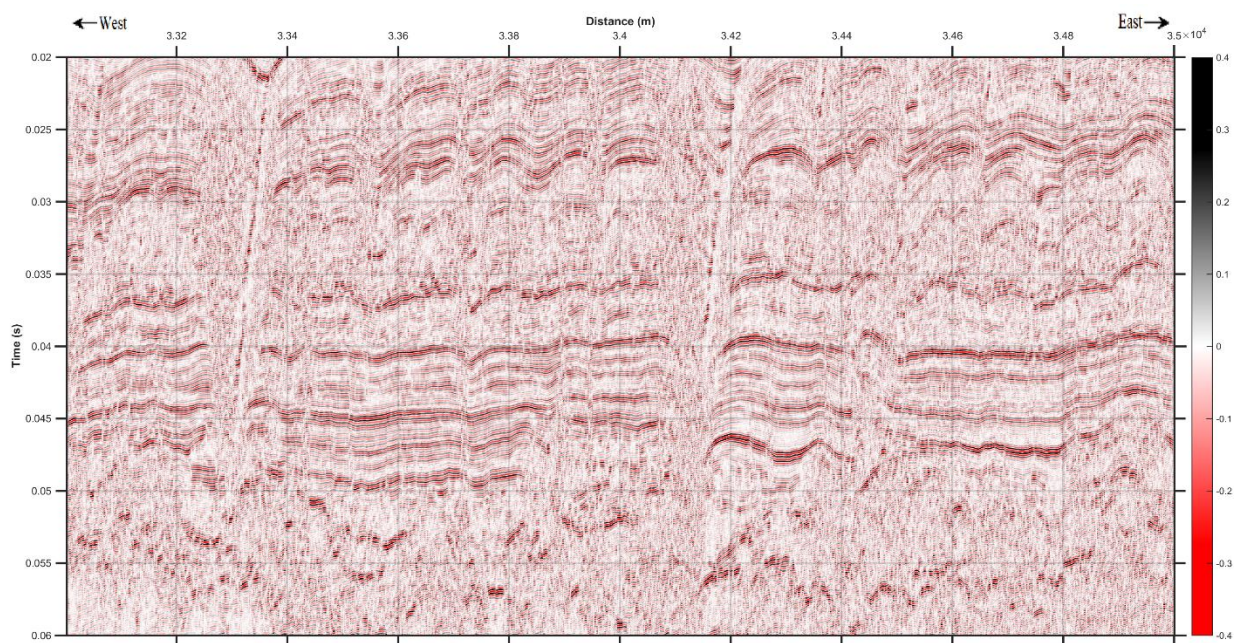
Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε ένα μεγάλο εύρος τιμών μήκους φίλτρου από 0,5 ms έως 120 ms, ενώ για κάθε τιμή μήκους φίλτρου χρησιμοποιήθηκε ποσοστό τυχαίου θορύβου ίσο με 0,1 %. Από τις τιμές που εξετάστηκαν παρατηρήθηκε ότι για μεγάλες τιμές παραθύρου παρουσιάζονται κενές περιοχές στην απεικόνιση του πυθμένα. Επίσης, η σεισμική τομή χάνει τη διακριτική της ικανότητα, καθώς γίνεται περισσότερο χαοτική και θορυβώδης η απεικόνιση των σχηματισμών. Αυτό σημαίνει ότι για υψηλές τιμές του μήκους φίλτρου δε βελτιώνεται άλλο ο λόγος σήματος προς θόρυβο, αλλά η εφαρμογή του φίλτρου επιφέρει το αντίθετο αποτέλεσμα από το επιθυμητό. Επίσης, με την εφαρμογή του φίλτρου για τιμές μήκους φίλτρου πολύ υψηλές (100 ms και 120 ms) δημιουργείται πλήρης μηδενισμός σε μια ζώνη των δεδομένων (βλ. [Σχήμα Π.3](#) στα 34.3 km) στην τομή, ενώ ταυτόχρονα η τομή είναι κορεσμένη από θόρυβο. Για μικρότερες τιμές μήκους φίλτρου από αυτό των 100 ms παρατηρείται μια μικρή βελτίωση στην απεικόνιση των περιοχών γύρω από τα ρήγματα που παρατηρούνται πάνω στη σεισμική τομή. Ωστόσο, η βελτίωση αυτή της διακριτικής ικανότητας της τομής περιορίζεται σε κοντινές των ρηγμάτων αποστάσεις, όπου η απεικόνιση των σχηματισμών γίνεται χαοτική λόγω παρουσίας θορύβου (βλ. κυκλωμένο τμήμα στο [Σχήμα 5.11 \(b\)](#) σε σύγκριση με το αντίστοιχο τμήμα στο [Σχήμα 5.11 \(c\)](#)). Για τον προσδιορισμό της καταλληλότερης τιμής μήκους φίλτρου δοκιμάστηκαν οι τιμές των 0.5, 1, 2, 3, 4, 10, 20, 50, 60, 100 και 120 ms. Από τις τιμές μήκους φίλτρου που δοκιμάστηκαν το καλύτερο αποτέλεσμα προέκυψε από την τιμή των 4 ms, όπου το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο [Σχήμα 5.11 \(c\)](#), ενώ στο [Σχήμα 5.12](#) παρουσιάζεται προς σύγκριση και το αποτέλεσμα για τιμή μήκους φίλτρου 100 ms από τα 33-35 km & 20-60 ms. Στο [Σχήμα 5.13](#) παρουσιάζεται ενδεικτικά το φάσμα ενός μόνο ίχνους μετά την εφαρμογή του φίλτρου F-X Deconvolution με τιμή μήκους φίλτρου ίση με 4 ms.





Σχήμα 5.11 (α) Απεικόνιση τμήματος της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 πριν την εφαρμογή φίλτρου F-X Deconvolution. Τμήμα της τομής από τα 33-35 km & 20-60 ms (β) πριν και (γ) μετά την εφαρμογή του φίλτρου F-X Deconvolution με τιμή μήκους φίλτρου 4 ms.



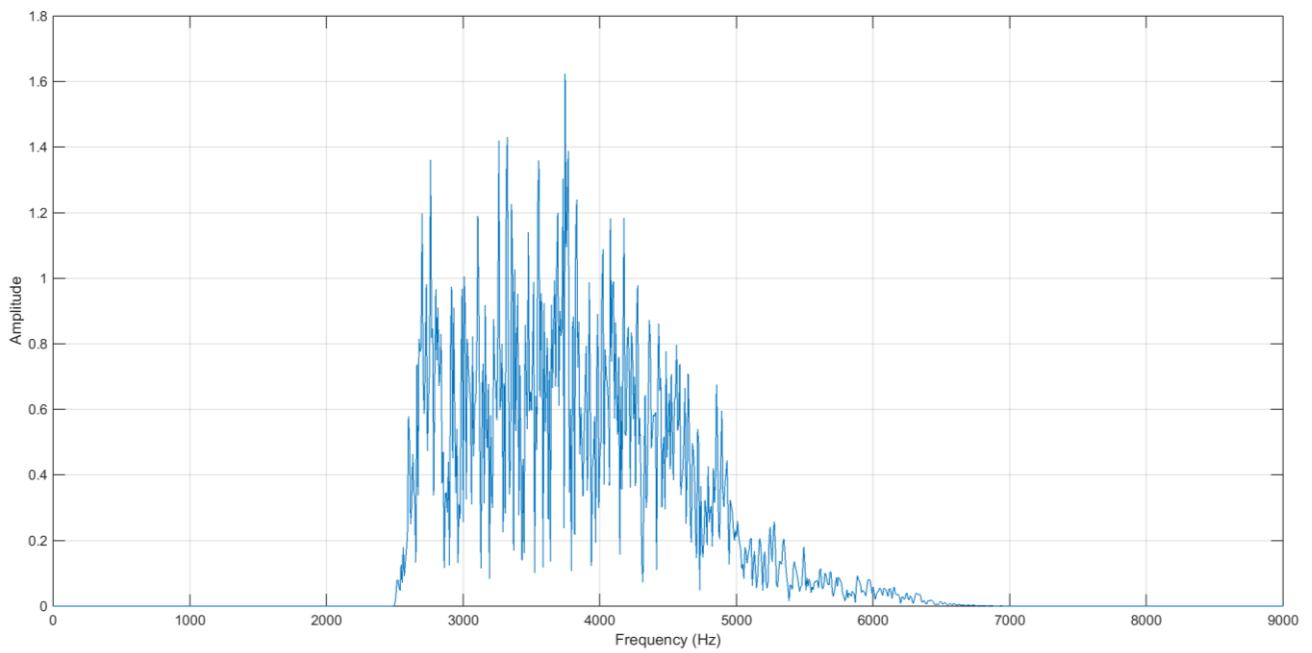


Σχήμα 5.12 Απεικόνιση τμήματος της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 από τα 33-35 km & 20-60 ms μετά την εφαρμογή φίλτρου F-X Deconvolution με τιμή μήκους φίλτρου 100 ms.

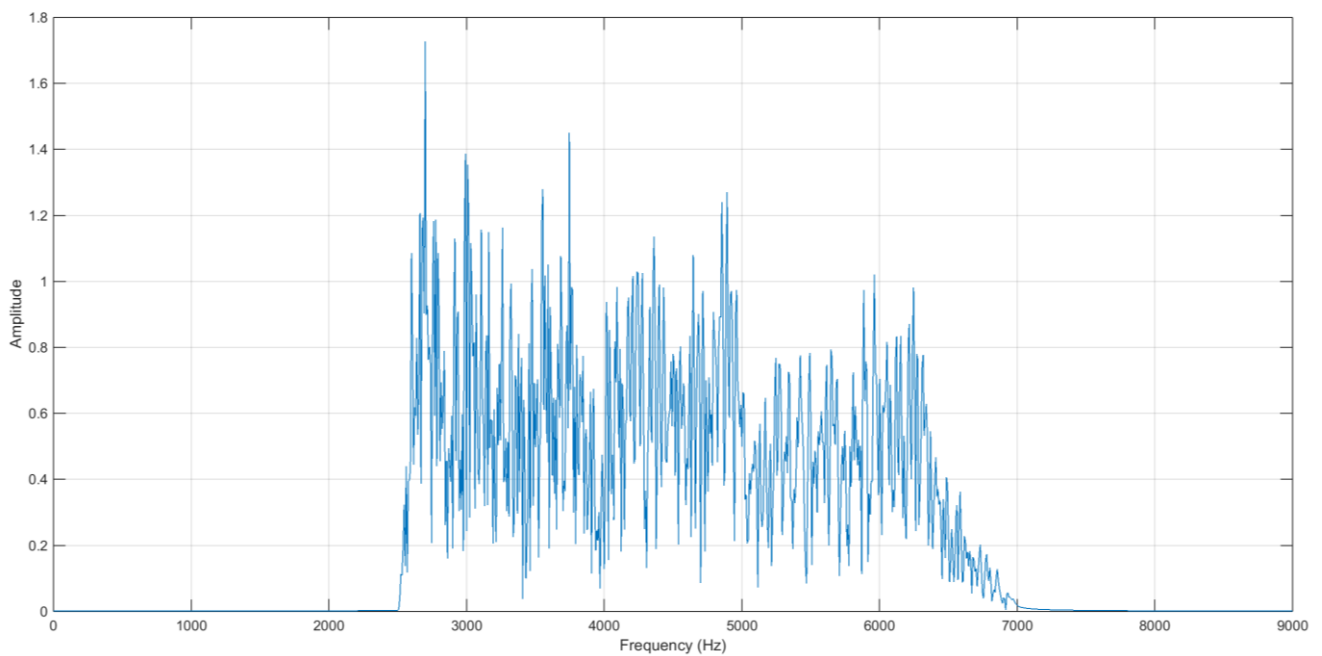
## 5.6 Εφαρμογή αποσυνέλιξης αιχμής (Spiking Deconvolution)

Με την εφαρμογή του αλγορίθμου αποσυνέλιξης αιχμής οι κυματομορφές των ανακλώμενων κυμάτων στα καταγεγραμμένα σεισμικά ίχνη μετατρέπονται ιδανικά σε αιχμές αντίστοιχου πλάτους. Αποτέλεσμα της μετατροπής αυτής των σεισμικών ιχνών είναι η εξισορρόπηση του φάσματος στα δεδομένα εφαρμογής της αποσυνέλιξης αιχμής. Για την υλοποίηση αυτού του σταδίου επεξεργασίας ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε δημιουργήθηκε στο εργαστήριο Γεωφυσικής του Πανεπιστημίου της Αλμπέρτα στον Καναδά. Ο αλγόριθμος δέχεται ως παραμέτρους εισαγωγής τα σεισμικά δεδομένα (traces), το μήκος φίλτρου (operator length) σε δείγματα χρόνου, στα οποία έγινε η αντιστοίχιση σε  $s$  βάση του χρόνου δειγματοληψίας και το ποσοστό τυχαίου θορύβου (pre-whitening, %).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε ένα εύρος τιμών μήκους φίλτρου ξεκινώντας από 0.5 ms έως και 120 ms. Το κριτήριο επιλογής των τιμών μήκους φίλτρου βασίστηκε στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τον Yilmaz, ο οποίος εξέτασε το αποτέλεσμα πολυάριθμων τιμών μήκους φίλτρου σε σεισμικά δεδομένα. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή μιας υψηλής τιμής μήκους φίλτρου όπως αυτή των 120 ms αποτελεί να είναι μικρότερη από το συνολικό χρόνο δειγματοληψίας των σεισμικών δεδομένων, όπου στην προκειμένη περίπτωση ήταν 130 ms. Επίσης, για κάθε τιμή μήκους φίλτρου χρησιμοποιήθηκε ποσοστό τυχαίου θορύβου ίσο με 0,1 %. Έπειτα από δοκιμές παρατηρήθηκε ότι η βέλτιστη τιμή μήκους φίλτρου για τα αποτελέσματα των σεισμικών δεδομένων, που παρουσιάζονται και εξετάζονται είναι 1 ms. Από την εφαρμογή της αποσυνέλιξης αιχμής για τιμή μήκους φίλτρου 1 ms παρατηρείται ότι το συχνοτικό περιεχόμενο των δεδομένων δεν έχει σημαντική διεύρυνση σε σχέση με την απεικόνιση του τμήματος της ενοποιημένης γραμμής μελέτης πριν από την εφαρμογή του φίλτρου F-X Deconvolution. Επίσης, παρατηρείται βελτίωση στη διακριτική ικανότητα της σεισμικής τομής και στην συνέχεια των εντοπιζόμενων ανακλαστήρων στη σεισμική τομή. Για τον προσδιορισμό της καταλληλότερης τιμής μήκους φίλτρου δοκιμάστηκαν οι τιμές των 0.5, 1, 2, 3, 4, 10, 20, 50, 60, 100 και ms. Από τις δοκιμές για τον προσδιορισμό της καταλληλότερης τιμής μήκους φίλτρου προέκυψε ότι για τιμή 0.5 ms, παρατηρείται αύξηση της διακριτικής ικανότητας της σεισμικής τομής με αποτέλεσμα να απεικονίζονται με μεγαλύτερη ευκρίνεια τα όρια των σχηματισμών. Ωστόσο, μια τόσο μικρή τιμή μήκους φίλτρου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας εικόνας κορεσμένης σε θόρυβο. Σημαντικές αλλαγές στις απεικονίσεις παρατηρούνται μέχρι τιμή μήκους φίλτρου ίση με 10 ms, ενώ για μεγαλύτερες τιμές δεν παρατηρείται διαφορά. Στο [Σχήμα 5.14](#) παρουσιάζεται ενδεικτικά το φάσμα ενός μόνο ίχνους μετά την εφαρμογή αποσυνέλιξης αιχμής με τιμή μήκους φίλτρου ίση με 1 ms. Στο [Σχήμα 5.15 \(c\)](#) παρουσιάζεται το αποτέλεσμα μετά την εφαρμογή αποσυνέλιξης αιχμής από τα 31-33 km & 40-80 ms με τιμή μήκους φίλτρου 1 ms σε αντιπαράθεση με το αντίστοιχο τμήμα πριν την εφαρμογή αποσυνέλιξης αιχμής, που οριοθετείται με μαύρο πλαίσιο στο [Σχήμα 5.15 \(a\)](#) και που παρουσιάζεται σε μεγέθυνση στο [Σχήμα 5.15 \(b\)](#).

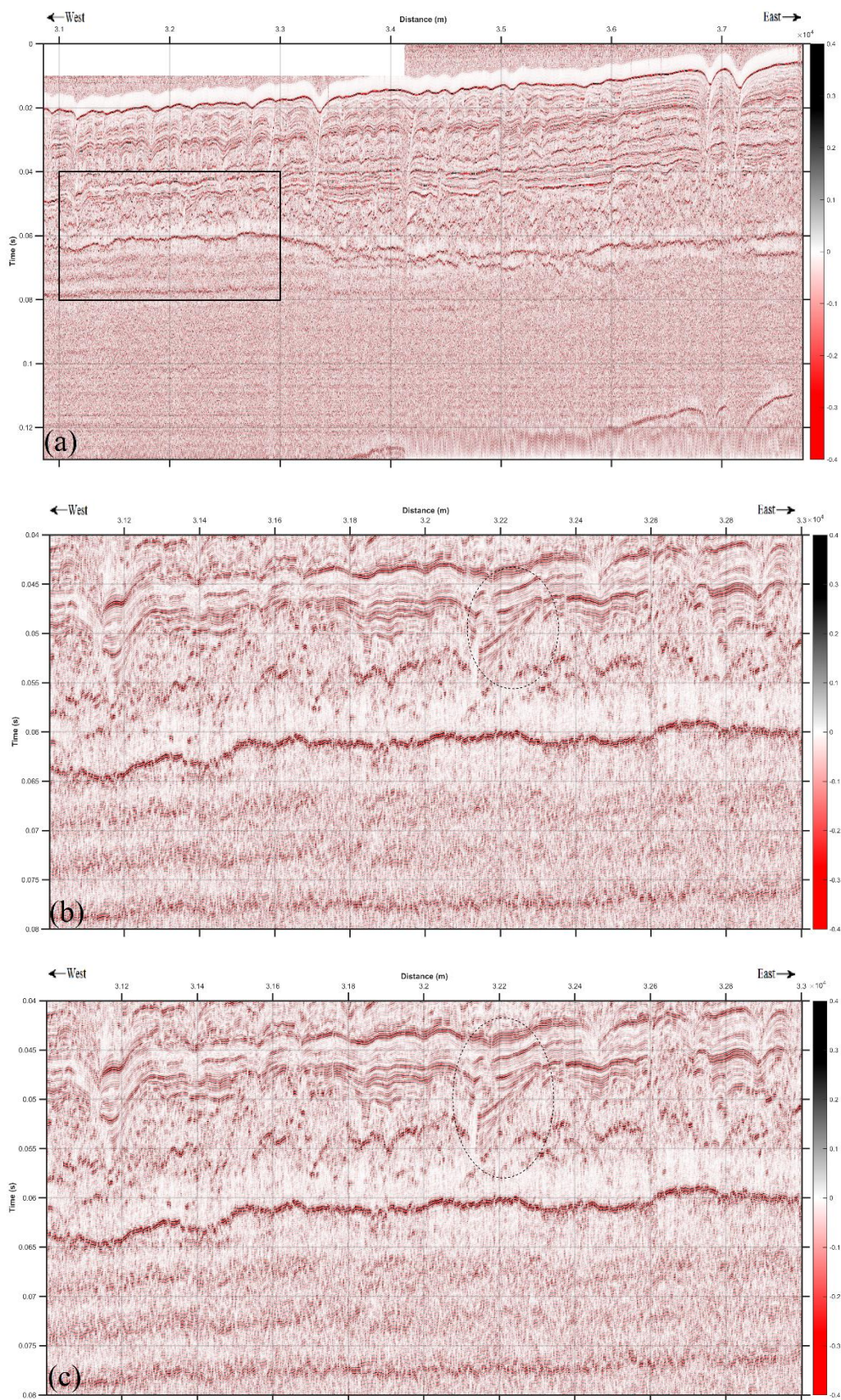


**Σχήμα 5.13** Ενδεικτική παρουσίαση φάσματος ενός ίχνους μετά την εφαρμογή του φίλτρου F-X Deconvolution για τιμή μήκους φίλτρου 4 ms. Οι τιμές του κατακόρυφου άξονα αντιστοιχούν σε πλάτος, ενώ στον οριζόντιο άξονα η συχνότητα σε Hz.



**Σχήμα 5.14** Ενδεικτική παρουσίαση φάσματος ενός ίχνους μετά την εφαρμογή Spiking Deconvolution στα σεισμικά δεδομένα για τιμή μήκους φίλτρου 1 ms. Οι τιμές του κατακόρυφου άξονα αντιστοιχούν σε πλάτος, ενώ στον οριζόντιο άξονα η συχνότητα σε Hz.





Σχήμα 5.15 (a) Απεικόνιση τμήματος της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 πριν την εφαρμογή Spiking Deconvolution. Τμήμα της τομής από τα 31-33 km & 40-80 ms (b) πριν και (c) μετά την εφαρμογή του Spiking Deconvolution με τιμή μήκους φίλτρου 1 ms.

## 5.7 Εφαρμογή σεισμικής χωροθέτησης (Migration)

Το τελευταίο βήμα επεξεργασίας των σεισμικών δεδομένων που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία ήταν η σεισμική χωροθέτηση με τη χρήση της μεθόδου μετατόπισης της φάσης (Phase Shift). Στην ερευνητική αποστολή SWERUS-C3 πραγματοποιήθηκαν δύο δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, εκ των οποίων η μία (4-PC1 – [Σχήμα 5.1](#)) βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης και από τις γραμμές μελέτης που επεξεργάζονται στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

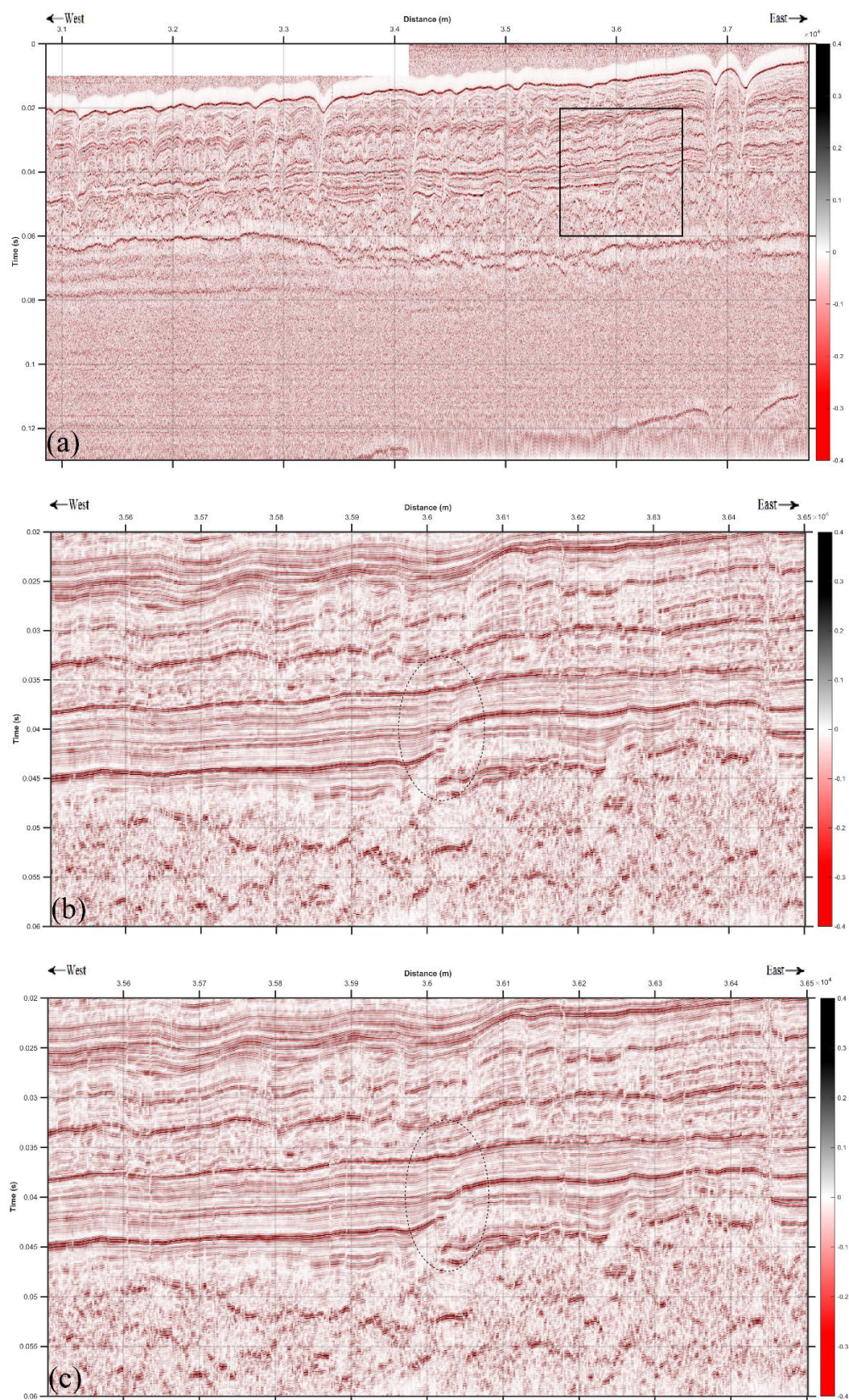
Για τη χωροθέτηση των σεισμικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε σταθερή ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών κυμάτων και ίση με (1500 m/s). Οι τιμές των ταχυτήτων της δειγματοληπτικής γεώτρησης 4-PC1 που προέκυψαν από διαγραφίες στην εν λόγω γεώτρηση δε χρησιμοποιήθηκαν για τρεις λόγους:

1. Η θέση της δειγματοληπτικής γεώτρησης απέχει σημαντική απόσταση (3400 m περίπου) από την πλησιέστερη σεισμική τομή (33851-45524-54401)
2. Το βάθος της γεώτρησης ήταν περιορισμένο (6.22 m από τον πυθμένα) σε σχέση με το αναμενόμενο βάθος της τομής (μεγαλύτερο των 50 m από την επιφάνεια του πυθμένα)
3. Οι τιμές της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων, όπως προέκυψαν από τις διαγραφίες ήταν παραπλήσιες των 1500 m/s (βλ. Παράρτημα)

Επίσης, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τιμής μέγιστης γωνίας χωροθέτησης (max dip angle). Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι η επιλογή της γωνίας δεν επηρεάζει την απεικόνιση των σεισμικών δεδομένων, καθώς οι κλίσεις των παρατηρούμενων ανακλαστήρων ήταν πολύ ήπιες. Επειδή όμως στις απεικονιζόμενες τομές η αναλογία οριζόντιας και κατακόρυφης κλίμακα είναι αποπροσανατολιστική σχετικά με τις παρατηρούμενες κλίσεις των κεκλιμένων ανακλαστήρων, στον κατακόρυφο άξονα των τομών έχει προστεθεί μία κλίμακα βάθους, η οποία προέκυψε από τη μονοδιάστατη μετατροπή του διπλού κατακόρυφου χρόνου σε βάθος με τη χρήση σταθερής ταχύτητας (1500 m/s).

Παρά την μικρή επιρροή επιλογής της μέγιστης γωνίας κλίσης ως παράμετρο εισαγωγής στον αλγόριθμο της σεισμικής χωροθέτησης παρατηρήθηκε ότι ο βαθύτερος ανακλαστήρας και ιδιαίτερα τα κυκλωμένα με μαύρο χρώμα τμήματα απεικονίζονται με μεγαλύτερη συνοχή, ενώ είναι αισθητή σε μικρό βαθμό ωστόσο, και η διαφοροποίηση της κλίσης των κεκλιμένων ανακλαστήρων (βλ. κυκλωμένο τμήμα στα 36 km, [Σχήμα Π.5](#)). Επομένως, παρατηρείται βελτίωση της συνέχειας των ανακλαστήρων στη χωροθετημένη σεισμική τομή ([Σχήμα 5.16 \(c\)](#)) σε σχέση με την αρχική απεικόνιση της τομής πριν τη σεισμική χωροθέτηση ([Σχήμα 5.16 b](#)). Στο [Σχήμα Π. 5](#) του παραρτήματος παρουσιάζεται ολόκληρο το τμήμα της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 μετά την εφαρμογή σεισμικής χωροθέτησης με τη μέθοδο Phase-Shift.





Σχήμα 5.16 (α) Απεικόνιση τμήματος ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 πριν την εφαρμογή σεισμικής χωροθέτησης με τη μέθοδο Phase-Shift. Τμήμα της τομής από τα 35.5-36.5 km & 20-60 ms (β) πριν και (γ) μετά την εφαρμογή σεισμικής χωροθέτησης.



## 6ο Κεφάλαιο: Ερμηνεία τελικών χωροθετημένων σεισμικών τομών

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται η στρωματογραφική ερμηνεία των τελικών χωροθετημένων σεισμικών τομών, μετά από την εφαρμογή όλων των βημάτων επεξεργασίας των σεισμικών δεδομένων. Για την κατανόηση των απεικονιζόμενων ανακλαστήρων και της στρωματογραφία στις σεισμικές τομές που παρουσιάζονται, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων της έρευνας που πραγματοποιήθηκε από την ερευνητική ομάδα του καθηγητή Martin Jakobsson κατά την ερευνητική αποστολή SWERUS-C3 με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις τελικές απεικονίσεις των σεισμικών δεδομένων.

Στο [Σχήμα 6.1](#) παρουσιάζεται το τμήμα των τελευταίων 6880 m από τη τελική σεισμική τομή της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401, όπου με χρωματιστές διακεκομμένες γραμμές σημειώνονται οι ανιχνευόμενοι ανακλαστήρες στην απεικόνιση των δεδομένων, ενώ οι μαύρες γραμμές αντιστοιχούν σε πιθανά ρήγματα. Έπειτα, στο [Σχήμα 6.2 \(a\)](#) παρουσιάζεται η τελική ολοκληρωμένη σεισμική τομή συμπεριλαμβανομένων των ανακλαστήρων που περιγράφονται στη συνέχεια και που παρουσιάζονται σε μικρότερο τμήμα της τομής στο [Σχήμα 6.1](#). Οι ονομασίες των απεικονιζόμενων ανακλαστήρων δόθηκαν με βάση τη χρονολογική σειρά δημιουργίας τους.

Ο βαθύτερος ανακλαστήρας που εντοπίζεται στη σεισμική τομή ονομάστηκε R1 και επισημαίνεται με πράσινο χρώμα αντιστοιχεί σε έναν ιδιαίτερα τραχύ σχηματισμό δεδομένης της διαφοράς στη συνέχεια που παρουσιάζει σε σχέση με τους πιο ρηχούς ανακλαστήρες που εντοπίζονται στη σεισμική τομή. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ερευνητικής αποστολής SWERUS-C3, ο ανακλαστήρας R1 αντιστοιχεί σε γεωλογική ασυνέχεια και όλοι οι σχηματισμοί που εντοπίζονται στη σεισμική τομή εναποτίθενται πάνω από την ασυνέχεια αυτή. Ο ακριβώς επόμενος ανακλαστήρας που εντοπίζεται είναι ο R2 και επισημαίνεται με κόκκινο χρώμα. Όπως φαίνεται και στο [Σχήμα 6.1](#) ο σχηματισμός που οριοθετείται ανάμεσα στους ανακλαστήρες R2 και R1 χαρακτηρίζεται ως χαοτικός, καθώς ακόμα και μετά την απομάκρυνση πιθανού θορύβου δεν παρατηρείται βελτίωση σε σχέση με την αρχική τομή. Η χαοτική απεικόνιση του εν λόγω σχηματισμού πιθανά να οφείλεται και στην αδυναμία διεύθυνσης του εκπεμπόμενου ακουστικού κύματος σε μεγάλα βάθη, η οποία αδυναμία αποτελεί ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά του ακουστικού συστήματος CHIRP. Παρατηρείται ότι, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους ανακλαστήρες, οι οποίοι ακολουθούν σε ένα βαθμό τη μορφολογία του πυθμένα, ο ανακλαστήρας R1 από τα 33.5 km έως τα 36 km περίπου εμφανίζεται μια λεκάνη, η μορφολογία της οποίας αποτυπώνεται, στο ίδιο τμήμα της γραμμής μελέτης, αλλά σε μικρότερο βαθμό, και στον ανακλαστήρα R2. Ο επόμενος ανακλαστήρας που εντοπίζεται στην τελική σεισμική τομή είναι ο R3, ο οποίος επισημαίνεται με μπλε χρώμα. Ο σχηματισμός που οριοθετείται ανάμεσα στους ανακλαστήρες R3 και R2 φαίνεται να είναι σκληρότερος και να απεικονίζεται με υψηλή ακρίβεια, καθώς παρουσιάζει υψηλότερη ακουστική εμπέδηση σε σχέση με τις αποθέσεις πάνω από τον ανακλαστήρα R3, όπως και από τα ανώτερα εναποτεθέντα στον πυθμένα ιζήματα. Ο εν λόγω σχηματισμός φαίνεται να παρουσιάζει μια αύξηση στο πάχος του στο κεντρικό τμήμα της τομής που παρουσιάζεται στο [Σχήμα 6.1](#), σε σχέση με το πάχος του στο δυτικό και το ανατολικό τμήμα της τομής. Πάνω από τον ανακλαστήρα R3 εναποτίθενται ένας σχετικά χαλαρός σχηματισμός, που οριοθετείται στο πάνω μέρος του, από τον ανακλαστήρα R4, ο οποίος

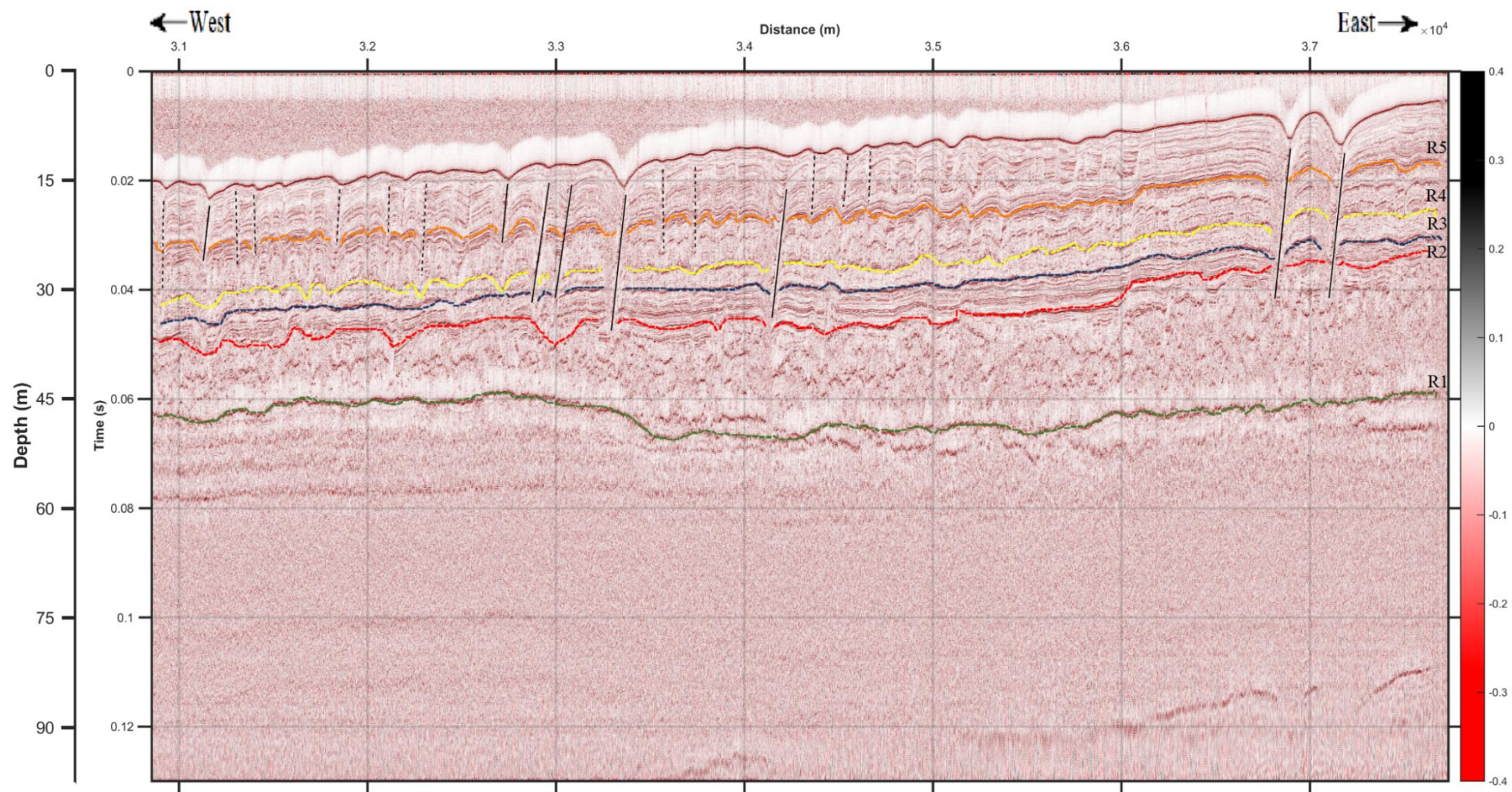
επισημαίνεται με κίτρινο χρώμα στην τομή. Ο νεότερος απεικονιζόμενος ανακλαστήρας που φαίνεται στη σεισμική τομή είναι ο R5 και επισημαίνεται με πορτοκαλί χρώμα. Πάνω από τον ανακλαστήρα R5 εντοπίζονται τα νεότερα εναποτεθέντα ιζήματα του πυθμένα, ενώ φαίνεται να αποτελεί το άνω όριο των χαλαρών σχηματισμών που εντοπίζονται στην τομή και εναποτίθενται πάνω από τον ανακλαστήρα R3. Όπως φαίνεται στο [Σχήμα 6.1](#), παρατηρούνται πολλές καταβυθίσεις όχι μόνο στην ανάκλαση του πυθμένα, αλλά και στους υποκείμενους σχηματισμούς. Στο 37<sup>ο</sup> χιλιόμετρο της σεισμικής τομής παρατηρείται διακοπή της συνέχειας των ανακλαστήρων και μετατόπιση τμήματος αυτών, καθώς και των σχηματισμών, ενώ είναι ευδιάκριτες και οι καταβυθίσεις. Η διακοπή αυτή της συνέχειας στην απεικόνιση των επιφανειακών σχηματισμών μπορεί να είναι αποτέλεσμα ρηγμάτων που έλαβαν χώρα σε σχετικά πρόσφατο χρόνο δεδομένου ότι ο παλαιότερος ανακλαστήρας (R1) δεν παρουσιάζει αντίστοιχα χαρακτηριστικά. Με μαύρες διακεκομμένες γραμμές επισημαίνονται οι θέσεις πιθανών ρηγμάτων στη σεισμική τομή, ενώ με μαύρες συμπαγείς γραμμές τα ορατά ρήγματα.

Ο ανακλαστήρας R1 που διακρίνεται στο [Σχήμα 6.1](#), εμφανίζεται σε όλο το μήκος της γραμμής μελέτης 33851-45524-54401, η οποία αποτυπώνεται Στο [Σχήμα 6.2 \(a\)](#) παρουσιάζεται η τελική σεισμική τομή της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401, ενώ στα τμήματα που ακολουθούν (τμήματα (b) έως (h)) απεικονίζεται η ίδια σεισμική τομή χωρισμένη σε αποστάσεις των 5000 m προκειμένου να είναι ορατά τα αποτελέσματα και να επέλθει ισορροπία μεταξύ του μήκους και βάθους της σεισμικής τομής. Τα τμήματα είναι κατασκευασμένα με αναλογία μήκους προς βάθος ίση με 10.246 : 1. Οι υπόλοιποι ανακλαστήρες που αναφέρθηκαν προηγουμένως εντοπίζονται κυρίως στο ανατολικό τμήμα της τομής με εξαίρεση ένα τμήμα του ανακλαστήρα R5, το οποίο εντοπίζεται από τα 25 km έως το τέλος της τομής. Σε μεγαλύτερα βάθη κάτω από τον βαθύτερο ανακλαστήρα R1 εντοπίζονται και ανακλαστήρες ελαφρά κεκλιμένοι προς τα δυτικά. Ωστόσο, η δυνατότητα διεύθυνσης ακουστικών κυμάτων του συστήματος CHIRP είναι περιορισμένη σε μεγάλα βάθη, με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτός ο χαρακτηρισμός των εν λόγω ανακλαστήρων, οι οποίοι σημειώνονται στο [Σχήμα 6.2 \(a\)](#) με μαύρο χρώμα. Από την αρχή της σεισμικής τομής μέχρι και τα 31 km, όπου εντοπίζεται το χάσμα των σεισμικών δεδομένων είναι κυρίαρχη η παρουσία ενός σχηματισμού με χαμηλή ακουστική εμπέδηση, παρόμοια με αυτή του σχηματισμού που οριοθετείται ανάμεσα στους ανακλαστήρες R2 και R1. Από τα 33.5 km έως το τέλος της σεισμικής τομής και στα 120 ms περίπου παρατηρείται η πολλαπλή ανάκλαση τμήματος του πυθμένα, η παρουσία της οποίας δεν επηρεάζει τη στρωματογραφική ερμηνεία της τελικής σεισμικής τομής, καθώς η διεισδυτική ικανότητα του ακουστικού σήματος CHIRP δεν είναι αρκετή για την απεικόνιση των σχηματισμών στο βάθος αυτό. Τέλος, στο κέντρο της σεισμικής τομής και συγκεκριμένα από τα 12.5 km έως τα 20 km παρατηρείται το βαθύτερο τμήμα της σεισμικής τομής, ενώ είναι σημαντική η διαφορά της τραχύτητας του πυθμένα στο ίδιο τμήμα σε σχέση με το υπόλοιπο κομμάτι της γραμμής μελέτης 33851-45524-54401.

Στο [Σχήμα 6.3 \(a\)](#) παρουσιάζεται η τελική σεισμική τομή της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 00250-05456-15043, ενώ στις απεικονίσεις που ακολουθούν (τμήματα (b) έως (g)) απεικονίζεται η ίδια σεισμική τομή χωρισμένη σε τμήματα μήκους 5000 m προκειμένου να είναι ορατά τα αποτελέσματα και να επέλθει ισορροπία μεταξύ μήκους και βάθους της σεισμικής τομής. Τα τμήματα αυτά είναι κατασκευασμένα με αναλογία μήκους προς βάθος ίση με 10.246 : 1. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι δύο γραμμές μελέτης που παρουσιάζονται είναι κάθετες μεταξύ τους, όπως φαίνεται και στο [Σχήμα 5.1](#), γεγονός που εξηγεί και τη διαφορά

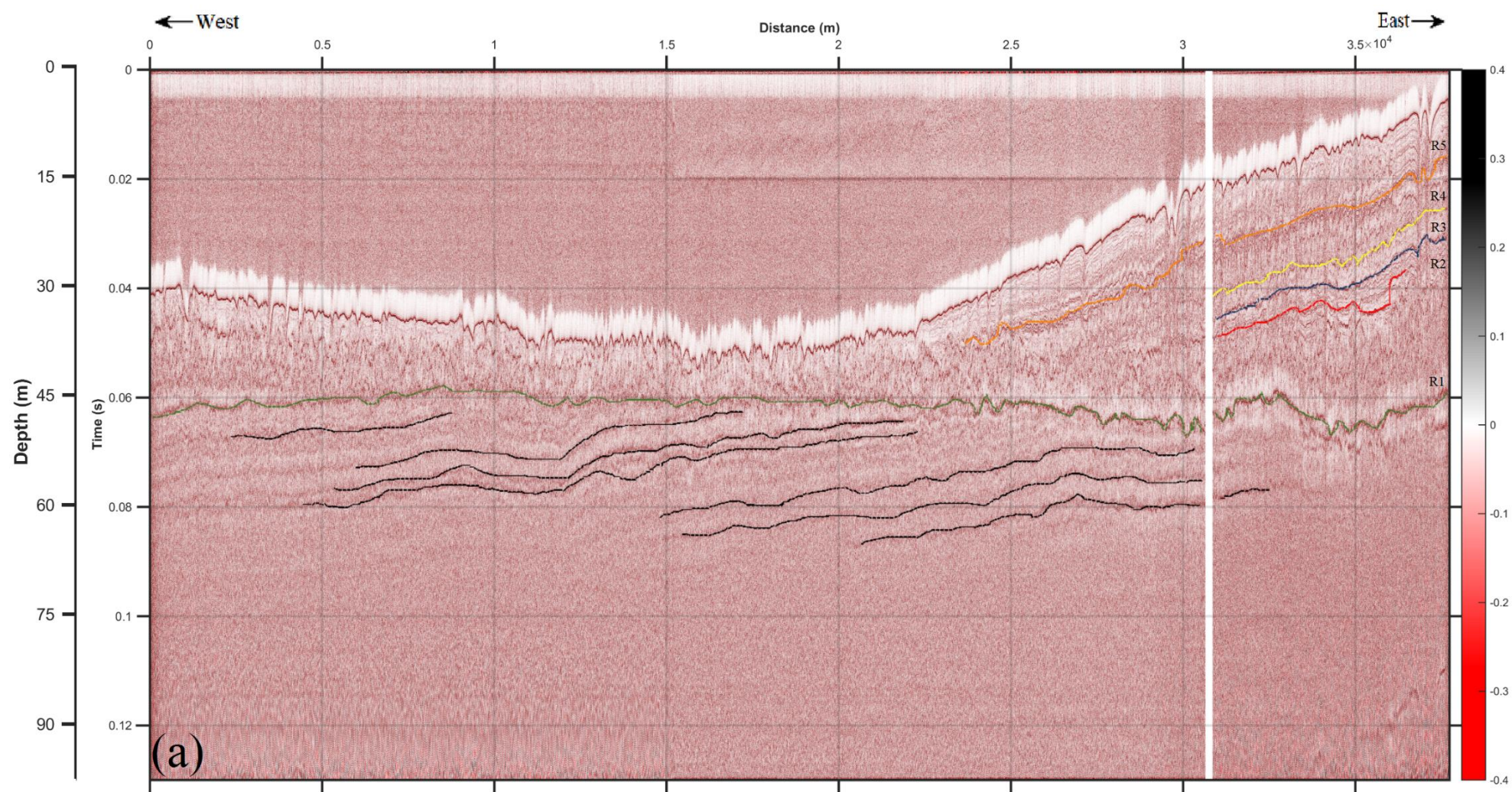
στις κατευθύνσεις των δύο γραμμών μελέτης. Όπως φαίνεται στην τομή, στο μεγαλύτερο τμήμα της ο πυθμένας παρουσιάζει έντονη τραχύτητα και παρατηρείται μείωση της κλίσης, του προς τα νοτιοδυτικά. Στο νοτιοδυτικό τμήμα της γραμμής μελέτης, το οποίο αποτελεί και το ρηχότερο τμήμα της τομής, ο πυθμένας είναι σχετικά λείος. Στο ίδιο τμήμα και σε μικρό βάθος κάτω από τον πυθμένα παρατηρείται απώλεια σήματος, με αποτέλεσμα να μην απεικονίζεται καλά ο υποκείμενος σχηματισμός. Η απώλεια σήματος πιθανά να οφείλεται στην εναπόθεση μαλακών και χαλαρών ιζημάτων, στα οποία αδυνατεί να διεισδύσει το εκπεμπόμενο κύμα του ακουστικού συστήματος CHIRP. Από την αρχή της εν λόγω γραμμής μελέτης μέχρι και το τέλος της είναι εμφανής ο ανακλαστήρας R1, ο οποίος παρουσιάζεται και στη τομή της γραμμής μελέτης 33851-45524-54401. Όπως φαίνεται στο [Σχήμα 6.3 \(α\)](#) ο ανακλαστήρας R1 ξεκινάει από μικρά βάθη υπό του πυθμένα στα νοτιοδυτικά, ενώ εμφανίζεται σε μεγαλύτερα βάθη προς το βορειοανατολικό τμήμα της τομής ακολουθώντας τη μορφολογία του πυθμένα. Επίσης, το πάχος των πρόσφατων ιζημάτων φαίνεται να μειώνεται σημαντικό στο νοτιοανατολικό άκρο της τομής του [Σχήματος 6.3 \(α\)](#). Στο βορειοανατολικό τμήμα της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 00250-05456-15043 κάτω από τον ανακλαστήρα R1 παρατηρούνται ασυνέχειες όμοιες με αυτές που παρουσιάζονται στην ενοποιημένη γραμμή μελέτης 33851-45524-54401, καθώς βρίσκονται και σε ίδιο βάθος. Από τα 580 m έως τα 860 m και στα 115 ms περίπου παρατηρείται η πολλαπλή ανάκλαση τμήματος του πυθμένα, η παρουσία της οποίας δεν επηρεάζει τη στρωματογραφική ερμηνεία της τελικής σεισμικής τομής, καθώς η διεισδυτική ικανότητα του ακουστικού σήματος CHIRP δεν είναι αρκετή για την απεικόνιση των σχηματισμών στο βάθος αυτό. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι ο πυθμένας στο βορειοανατολικό άκρο της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 00250-05456-15043 βρίσκεται σε διαφορετικό χρόνο από τον πυθμένα στο δυτικό τμήμα της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο ότι τα αρχεία καταγραφής έχουν διαφορετικό χρόνο καθυστέρησης (Delay Recording Time).



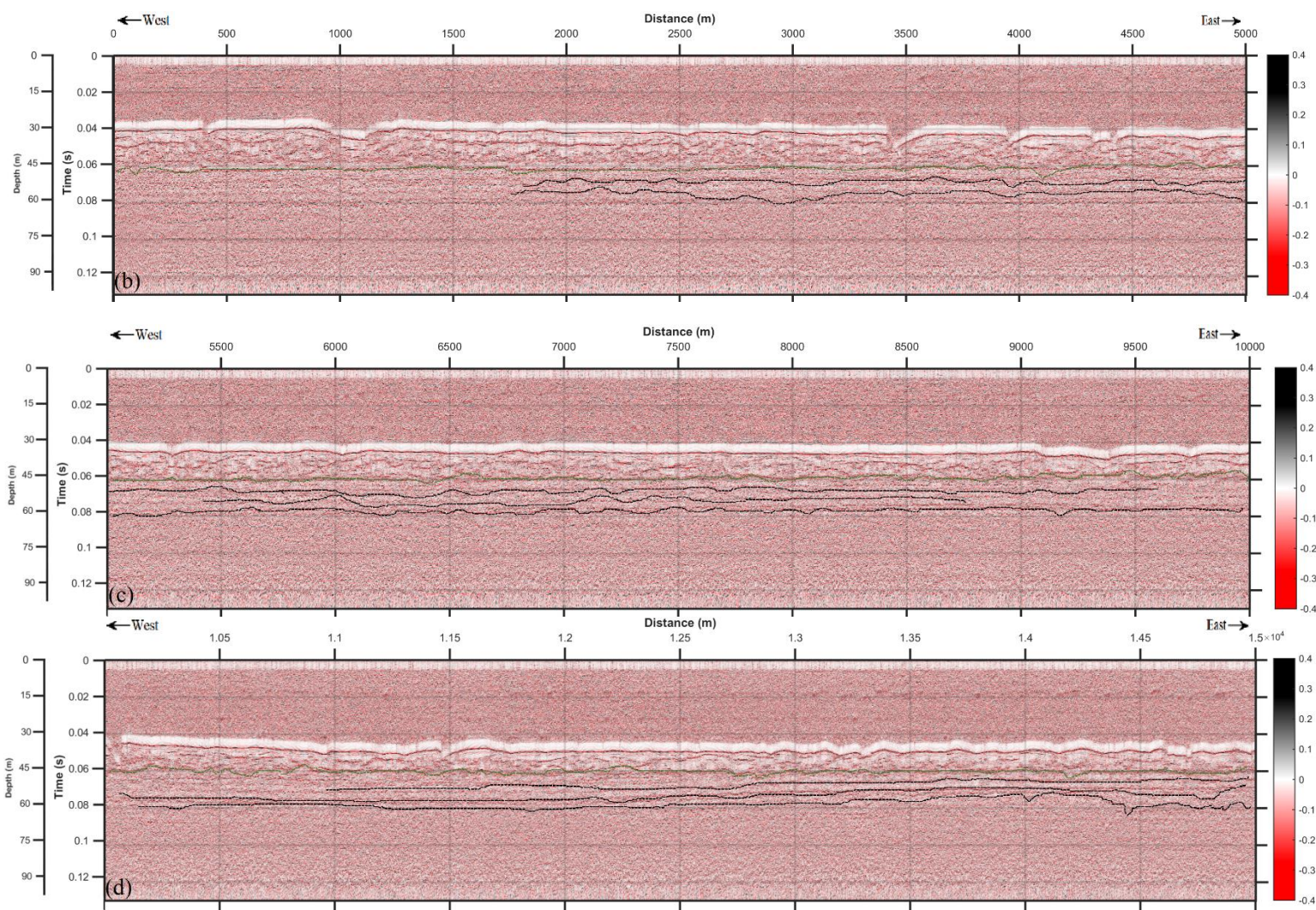


Σχήμα 6.1 Τμήμα τελικής σεισμικής τομής της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401, όπου έχουν επισημανθεί οι ανακλαστήρες R1 (με πράσινο χρώμα), R2 (με κόκκινο χρώμα), R3 (με μπλε χρώμα), R4 (με κίτρινο χρώμα) και R5 (με πορτοκαλί χρώμα).

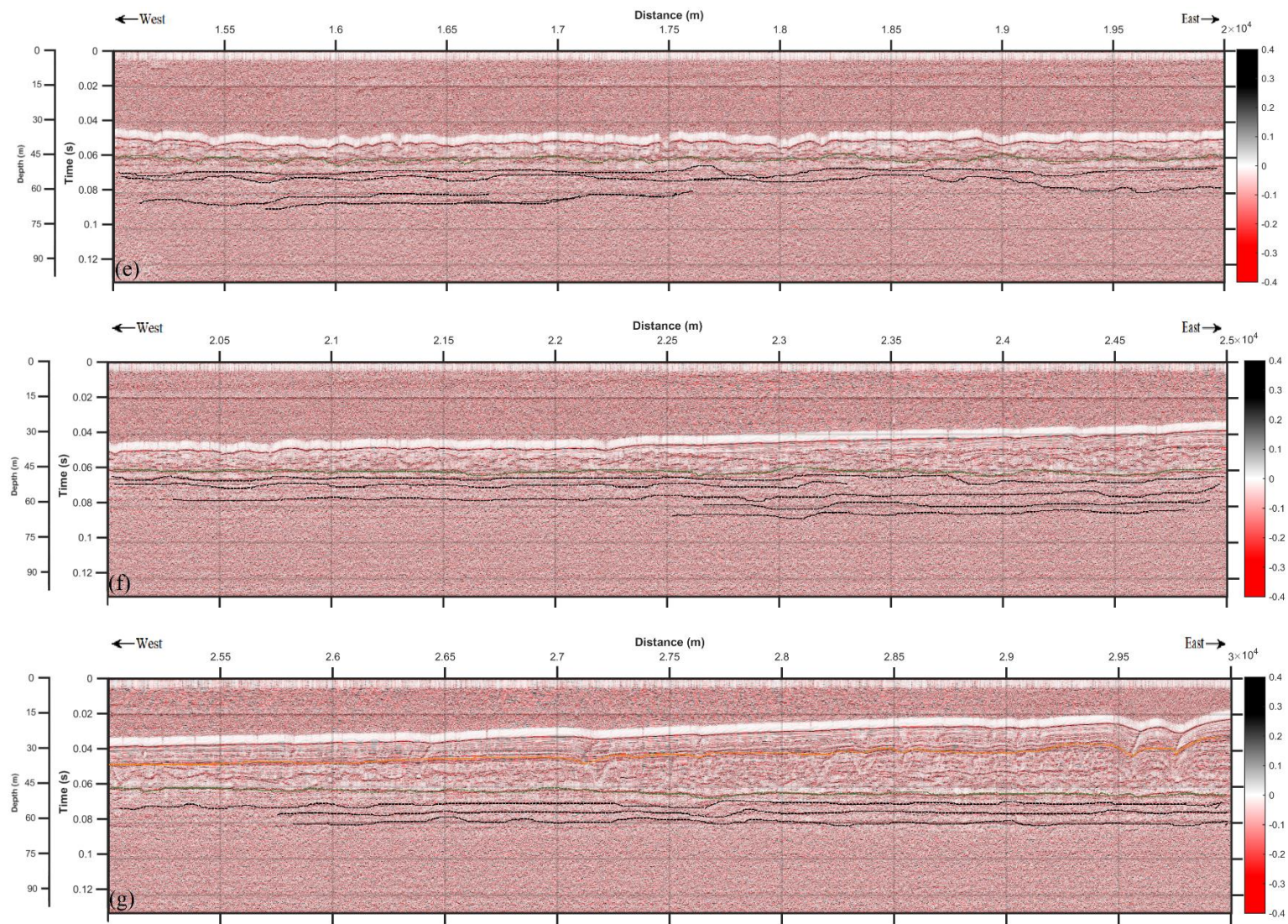


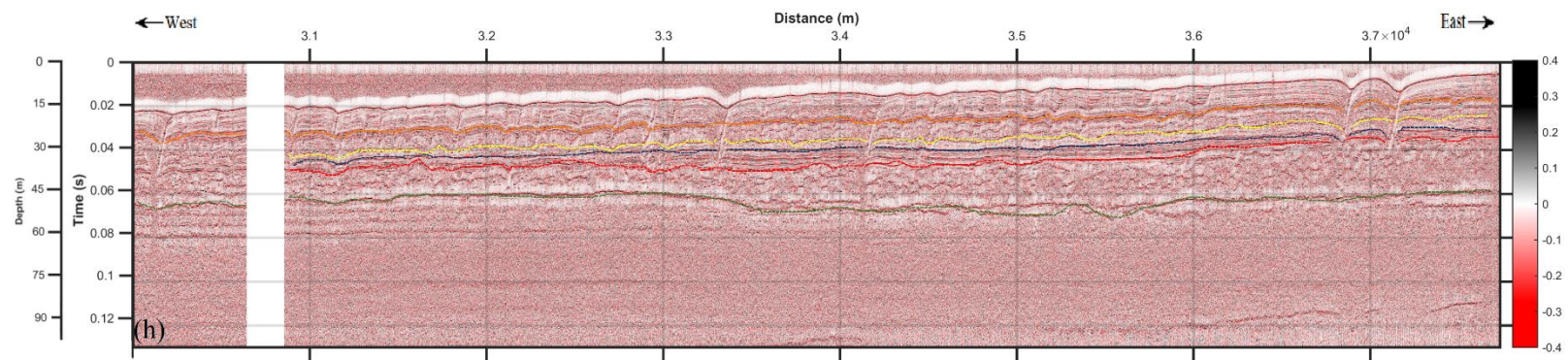






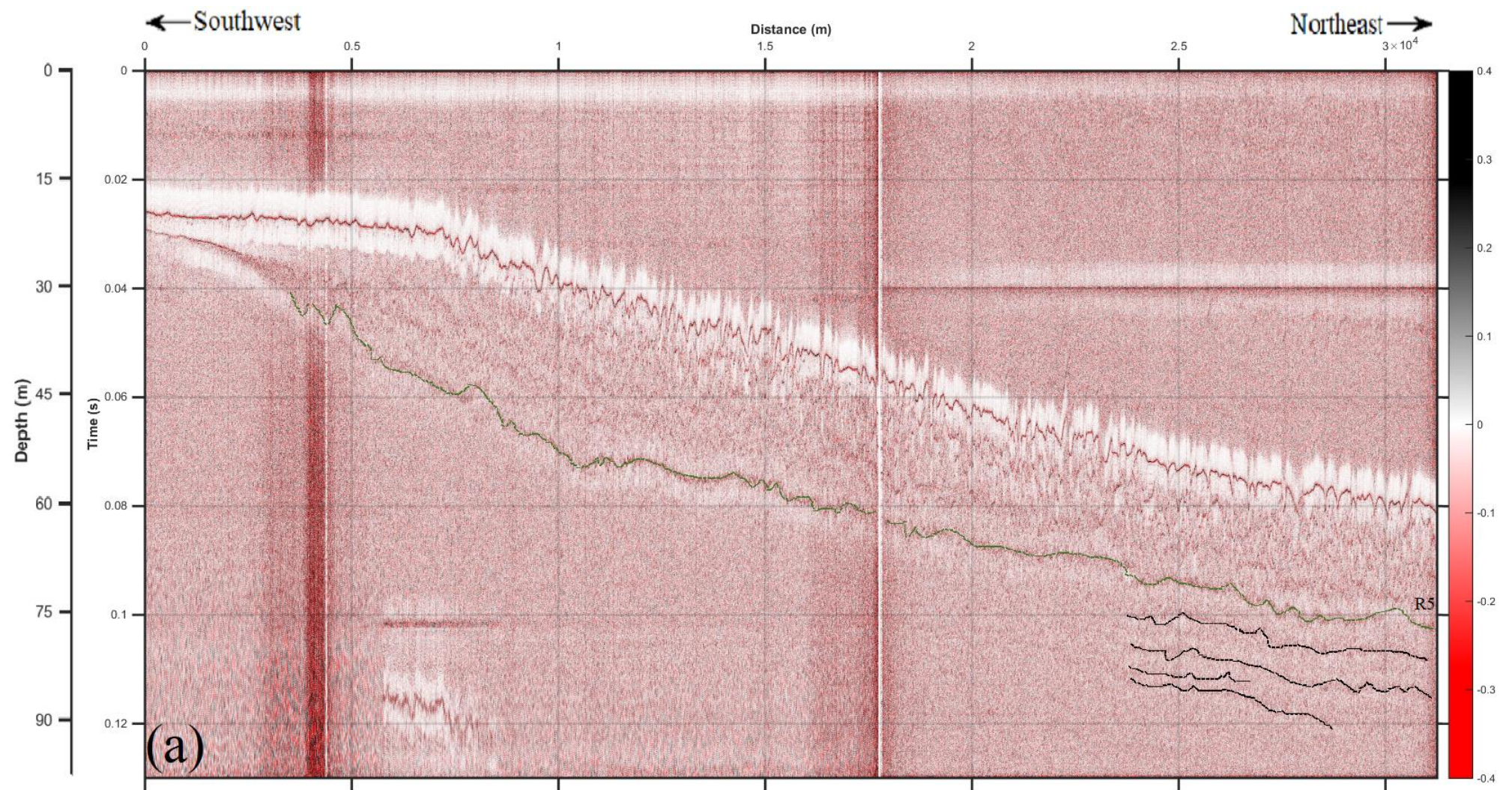




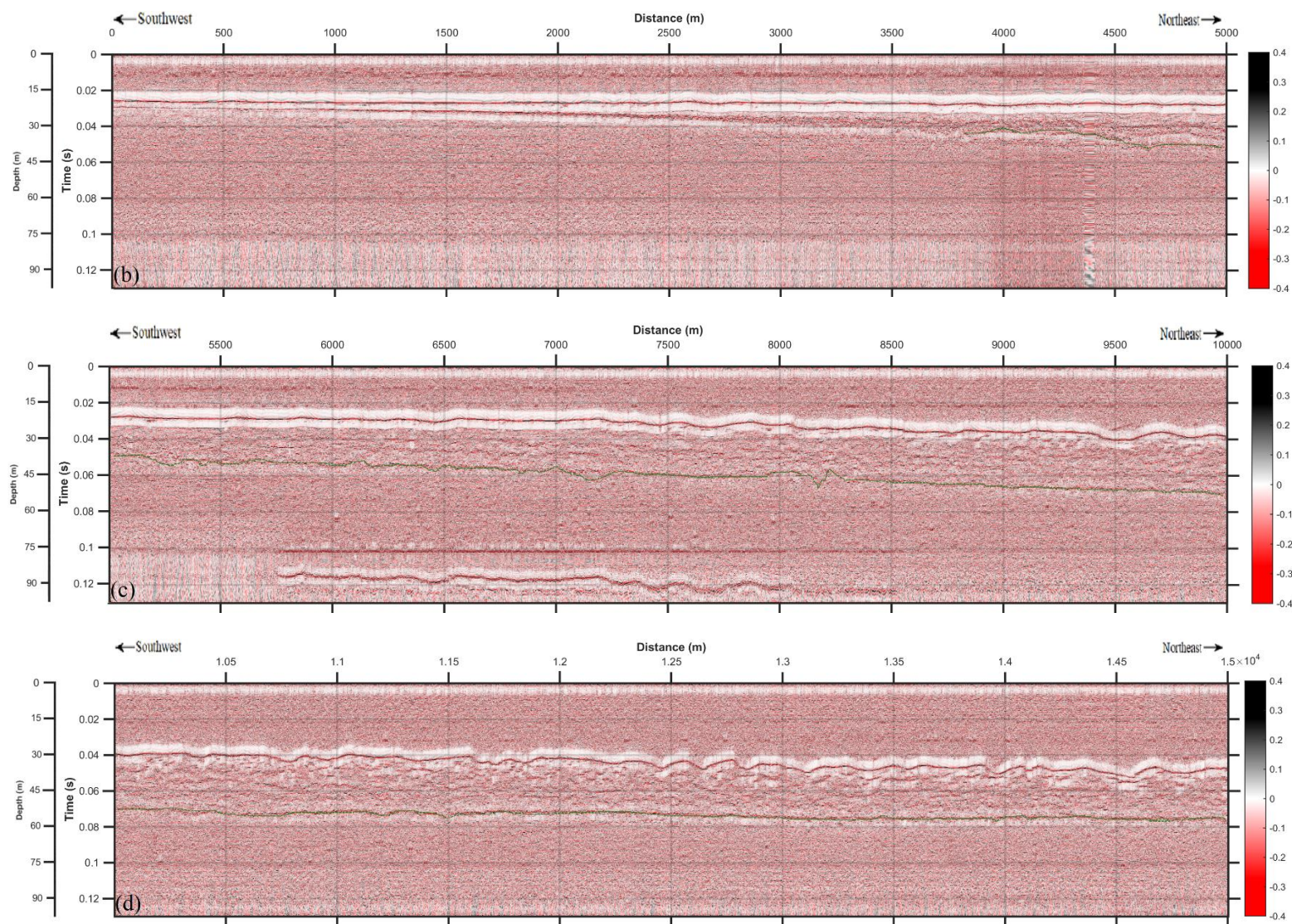


Σχήμα 6.2 (α) Συνολική σεισμική τομή της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 και (β), (γ), (δ), (ε), (ς), (ζ) και (η) τμήματα της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 με μήκος 5000 m το κάθε ένα, όπου έχουν επισημανθεί οι διεπιφάνειες των σχηματισμών.

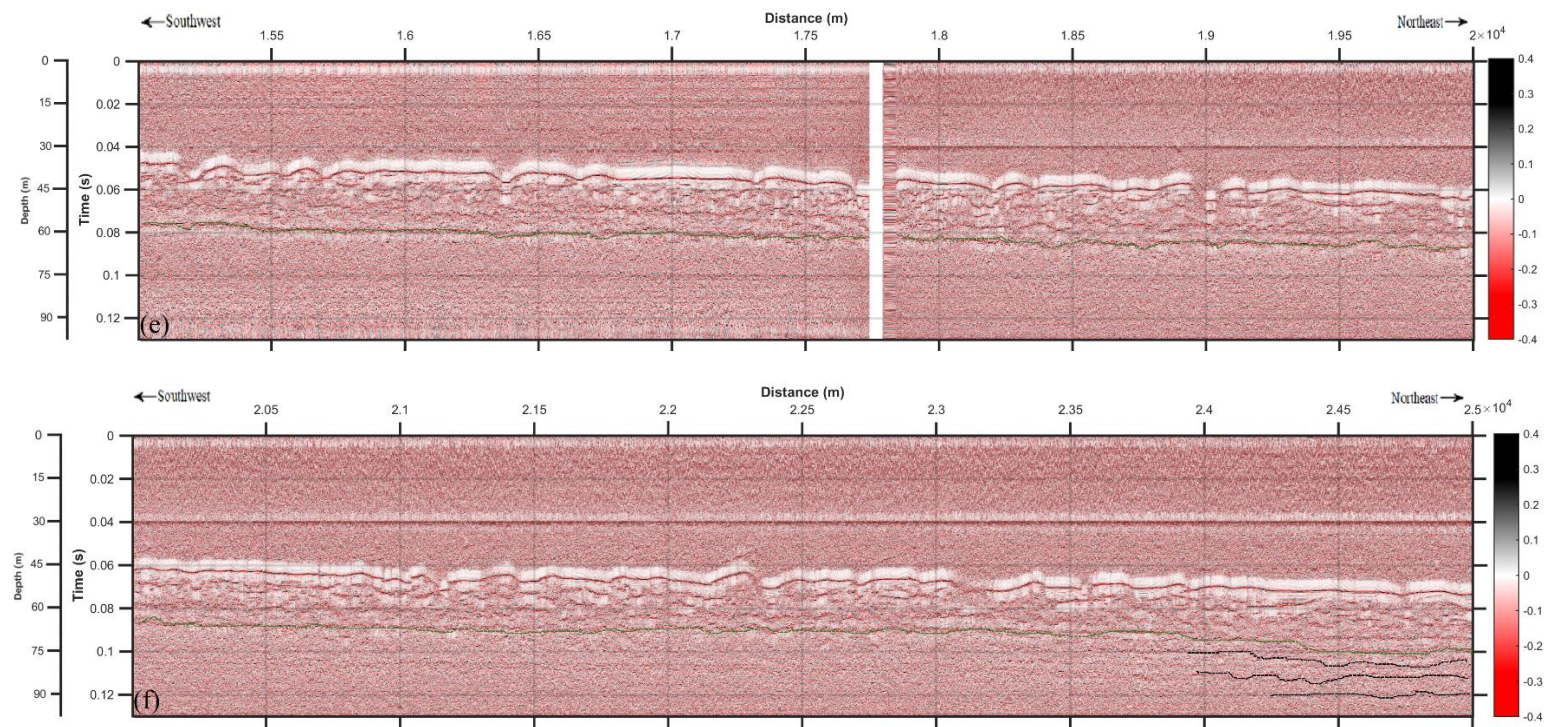


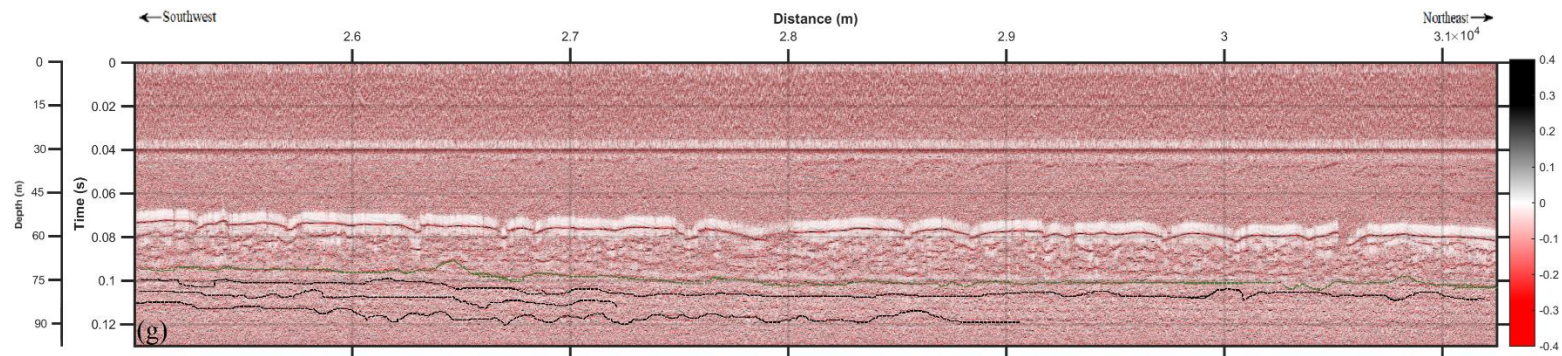












Σχήμα 6.3 (α) Συνολική σεισμική τομή της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 00250-05456-15043, ενώ (β), (γ), (δ), (ε), (ς) και (ζ) τμήματα της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 00250-05456-15043 με μήκος 5000 m το κάθε ένα , όπου έχουν επισημανθεί οι διεπιφάνειες των σχηματισμών.

## 7ο Κεφάλαιο: Συμπεράσματα - Προτάσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία και την ερμηνεία των σεισμικών δεδομένων, καθώς και οι δυσκολίες που παρουσιάστηκαν μέχρι την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας. Για τις δυσκολίες αυτές, προτείνονται μεθοδολογίες για την μελλοντική αντιμετώπισή τους.

Στην παρούσα διπλωματική παρουσιάζονται δύο διαγράμματα ροής της επεξεργασίας στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, τα οποία σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές αναφορές περιλαμβάνουν τα καλύτερα στάδια επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων ακουστικών συστημάτων CHIRP. Ωστόσο, εκ των δύο διαγραμμάτων ροής της επεξεργασίας επιλέχθηκε ως πρότυπο για την κατασκευή του διαγράμματος ροής που τελικά ακολουθήθηκε το διάγραμμα ροής της επεξεργασίας κατά Quinn, καθώς το διάγραμμα ροής της επεξεργασίας κατά Baradello αποτελεί ιδανική περίπτωση για την επεξεργασία δεδομένων σεισμικής ανάκλασης ακουστικού συστήματος CHIRP, στα οποία δεν έχει πραγματοποιηθεί συσχετισμός με την κυματομορφή της πηγής, μια διαδικασία που έχει πραγματοποιηθεί στα δεδομένα που επεξεργάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε η διόρθωση γεωμετρικής διασποράς (Spherical Divergence), χωρίς όμως να παρατηρείται βελτίωση της σεισμικής τομής και γι' αυτό το λόγο και δεν συγκαταλέγεται στα βήματα που συντέλεσαν στη δημιουργία της τελικής σεισμικής τομής, καθώς και τα αποτελέσματα εφαρμογής της διόρθωσης.

Στην προσπάθεια εφαρμογής του ζωνοπερατού φίλτρου συχνοτήτων Butterworth, τα αποτελέσματα του φίλτρου δεν ήταν τόσο αποδοτικά σε σχέση με το αντίστοιχο φίλτρο Band-Pass που παρέχεται από το πακέτο αλγορίθμων Crewes, καθώς ο ο αλγόριθμος δέχεται ως παραμέτρους εισαγωγής της το πάνω (upper cutoff frequency) και το κάτω (lower cutoff frequency) όριο της ζώνης του φίλτρου. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι επιλογή του κατάλληλου φίλτρου εξασθένισης θορύβου με σκοπό τη βελτίωση λόγου σήματος προς θόρυβο είναι πολύ σημαντική, διότι με την επιλογή οποιουδήποτε φίλτρου, καθώς και των παραμέτρων του, αυτό καθορίζει τόσο την απομάκρυνση θορύβου, όσο και την απομάκρυνση επιθυμητού μέρους των δεδομένων. Η απώλεια σημαντικής πληροφορίας παρατηρήθηκε κατά τον εντοπισμό του καλύτερου ζωνοπερατού φίλτρου για τα δεδομένα που επεξεργάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία, όπου εύρη συχνοτήτων που βελτίωναν τη διακριτική ικανότητα των δεδομένων σε κάποια σημεία, συντελούσαν κατασταλτικά στην ερμηνεία σε κάποια άλλα. Για την αντιμετώπιση αυτής της απώλειας προτείνεται η εφαρμογή χρονικά μεταβαλλόμενου φίλτρου συχνοτήτων στα δεδομένα (Time Variant Frequency Filter), καθώς ο λόγος σήματος προς θόρυβο μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου ως αποτέλεσμα αυξανόμενης απορρόφησης του εκπεμπόμενου ακουστικού παλμού συναρτήσει του βάθους. Η εφαρμογή σεισμικής χωροθέτησης με τη μέθοδο Phase Shift δεν αποδείχθηκε πολύ αποτελεσματική για τα σεισμικά δεδομένα που εξεργάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς η κλίση των ανακλαστήρων που εντοπίζονται στη σεισμική τομή είναι πολύ μικρή. Ωστόσο, συντέλεσε σημαντικά στη βελτίωση της συνοχής των ανακλαστήρων βοηθώντας έτσι την ευκολότερη οριοθέτησή τους. Να σημειωθεί ότι σε ορισμένα τμήματα στις τελικές σεισμικές τομές ήταν αισθητή η παρουσία πολλαπλών ανακλάσεων χωρίς όμως να δημιουργούν πρόβλημα στη στρωματογραφική ερμηνεία και οριοθέτηση των απεικονιζόμενων σχηματισμών. Για τη δημιουργία μίας περισσότερο

ευπαρουσίαστης σεισμικής τομής προτείνεται η εφαρμογή αποσυνέλιξης πρόβλεψης (Predictive Deconvolution) για συγκεκριμένα ίχνη της σεισμικής τομής με στόχο την απομάκρυνση πολλαπλών ανακλάσεων του πυθμένα.

Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι από την απεικόνιση των σεισμικών δεδομένων είναι εμφανή τα βασικά χαρακτηριστικά του ακουστικού συστήματος CHIRP, όπως η χαμηλή διεισδυτικότητα του ακουστικού σήματος σε πολύ χαλαρούς και όχι καλά στρωματοποιημένους σχηματισμούς. Τέτοιοι σχηματισμοί και κατά συνέπεια αδυναμία απεικόνισης των σχηματισμών παρατηρούνται στο νοτιοδυτικό τμήμα της τομής 15043-05456-00250. Επίσης, παρατηρείται ότι τα δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν από το ακουστικό σύστημα CHIRP χαρακτηρίζονται από υψηλή ευκρίνεια και ανάλυση στους νεότερους σχηματισμούς σε μικρά βάθη, ενώ σε μεγαλύτερα βάθη όπου είναι περιορισμένη η διείσδυση του εκπεμπόμενου ακουστικού κύματος παρατηρείται απώλεια σήματος και δεν είναι πλέον ανιχνεύσιμοι πιθανοί σχηματισμοί και ανακλαστήρες.



## Δημοσιευμένες πηγές:

### Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- 1) Bancroft J., 2002. Introduction to matched filters, *CREWES Research Report*, Volume 14.
- 2) Baradello L, 2014. An improved processing sequence for uncorrelated Chirp sonar data. *Marine Geophysical Research*. Springer.
- 3) Brincker R., Lagö T., Andersen P., Ventura C., 2005, Improving the Classical Geophone Sensor Element by Digital Correction, *IMAC-XXIII : A Conference & Exposition on Structural Dynamics - Society for Experimental Mechanics*
- 4) Committee on the Assessment of U.S. Coast Guard Polar Icebreaker Roles and Future Needs, Polar Research Board, Marine Board, Division on Earth and Life Studies, Transportation Research Board, National Research Council 2007, *Polar icebreakers in a changing world: An assessment of U.S. needs*
- 5) Cowie J., 1983. The Arctic Ocean, *The Ocean Basins and Margins*, vol. 5
- 6) Decker J., Robinson M., Clough J., Lyle W., 1989. Geology and Petroleum Potential of Hope and Selawik Basins, Offshore Northwestern Alaska, *Marine Geology*, Vol. 90, pp. 1-18.
- 7) Dondurur D., 2018. *Acquisition and Processing of Marine Seismic Data*. Elsevier
- 8) Energean Oil & Gas 2015, *Laboratory of Marine Geology and Physical Oceanography, University of Patras – Marine geophysical survey in the Kavala bay*, November 2015. Διαθέσιμο από: Energean Oil & Gas (accessed 1 May 2020).
- 9) Fugro Marine GeoServices Inc. (2017), Geophysical and Geotechnical Investigation Methodology Assessment for Siting Renewable Energy Facilities on the Atlantic OCS. US Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Office of Renewable Energy Programs, Herndon. OCS Study BOEM 2017-049
- 10) Gadallah M., Fisher R., 2005. *Applied Seismology: A Comprehensive Guide to Seismic Theory and Application*. PennWell.
- 11) Garai M., Guirdorzi P., 2015. Optimizing the exponential sine sweep (ESS) signal for in situ measurements on noise barriers. *EuroNoise 2015*. Vol.1, pp. 57-62.
- 12) Gazdag J., Sguazzero P., 1984. Migration of the Seismic Data. *Proceeding of the IEEE*. Vol 72, pp. 1302-1315
- 13) Grantz A., Eittreim S., 1979, *Geology and Physiography of the Continental Margin North of Alaska and Implications for the Origin of the Canada Basin*. USCS Publication Warehouse.
- 14) Gupta H., 2011. *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, Springer
- 15) Gutowski M., Bull J., Henstock T., Dix J., Hogarth P., Leighton T., White P. 2002, Chirp sub-bottom profiler source signature design and field testing, School of Ocean and Earth Sciences, *Marine Geophysical Research*, Vol. 23
- 16) Hempstead C., Worthington W., 2004. *Encyclopedia of 20<sup>th</sup>-Century Technology*. New York: Routledge.
- 17) Ikelle L., Erez I., Yang X., 2009. Scattering diagrams in seismic imaging: More insights into the correction of virtual events and internal multiples. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 67, No. 2, pp. 150-170.

- 18) Jakobsson M., Pearce C., Cronin T., Backman J., Anderson J., Barrientos N., Björk G., Coxall H., Agatha M., Mayer L., Mörrth C., Nilsson J., Rattray J., Stranne C., Semiletov I., O'Regan M. 2017, Post-glacial flooding of the Bering Land Bridge dated to 11 cal ka BP based on new geophysical and sediment records, *Climate of the Past*, Vol. 13, pp. 991-1005
- 19) Jol H., 2009, *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier
- 20) Jonasson C., 2020, Automatic Velocity Estimation in GPR Data and Migration, Master Thesis, Department of Physics, Umeå University.
- 21) Karastathis V., Ganas A., Makris J., Papoulia J., Dafnis P., Gerolymatou E., Drakatos G., 2007. The application of shallow seismic techniques in the study of active faults: The Atalanti normal fault, central Greece. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 62, pp. 215-233.
- 22) Kasahara J., Korneev V., Zhdanov M. (eds), 2010. *Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration Volume 40, Active Geophysical Monitoring*, Elsevier.
- 23) Kearey P., Brooks M., Hill I., 2002. *An Introduction to Geophysical Exploration*, Blackwell Science.
- 24) Klemperer S., Miller E., Grantz A., Scholl D., 2002. Tectonic Evolution of the Bering Shelf-Chukchi Sea-Arctic Margin and Adjacent Landmasses, *Geological Society of America*, vol. 360 Mosher D., Simpkin P., 1999. Environmental Marine Geoscience1. Status and Trends of Marine High-Resolution Seismic Reflection Profiling: Data Acquisition. *Geoscience Canada*, Volume 26, Number 4, pg. 174-188.
- 25) Liu G., Chen X., Du J., Wu K., 2012, Random noise attenuation using F-x regularized nonstationary autoregression. *Geophysics*, Vol. 77
- 26) Lozano J., Donda F., Bran D., Lodolo E., Baradello L., Romeo R., Vilas J., Grossi M., Tassone A., 2020, Depositional setting of the southern arms of Lago Argentino (southern Patagonia). *Journal of Maps*, Vol 16, No 2, pp. 324-334.
- 27) Mackey K., Fujita K., Sedov B., Gounbina L., Kurtkin S., 2009. A seismic swarm near Neshkan, Chukotka, northeastern Russia, and implications for the boundary of the Bering plate, *Stephan Muller Special Publication Series*.
- 28) Majdak P., Balazs P., Laback B., 2007, Multiple exponential sweep method for fast measurement of head-related transfer functions. *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 55, pp. 623-637.
- 29) Margrave G., Lamoureaux M., 2019, Numerical Method of Exploration Seismology with Algorithms in Matlab. Cambridge University Press.
- 30) Mawa P., Ser L., Ching D., 2017. Mathematical modeling of geophone magnetic ring for sensitivity studies, *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Science*, Penerbit UTM Press, pp. 351-353
- 31) Mirabella P., 2013, *Velocity Model Building and Seismic Imaging in a Complex Structural Setting in the Rocky Mountains*, Master thesis, University of Calgary.
- 32) Mosher D., Simpkin P., 1999, Status and Trends of Marine High-Resolution Seismic Reflection Profiling: Data acquisition. *Environmental Marine Geoscience*. Geoscience Canada, Vol. 26, No 4, pp. 174-188.
- 33) Ning L., 1967. *Examination of Marine Sediments With a Sub-Bottom Profiling System*, University of London.
- 34) Onajite E., 2014. *Seismic Data Analysis Techniques in Hydrocarbon Exploration*. Elsevier

- 35) Plets R., Dix J., Bates R., 2013. *Marine Geophysics Data Acquisition, Processing and Interpretation*. Historic England.
- 36) Quinn R., Bull M., Dix J., Adams J., 1997, The Mary Rose Site –geophysical evidence for paleo-scour marks. *The International Journal of Nautical Archaeology*, Vol 26, pp. 3-16.
- 37) Soni S., 2017. A Review Paper on Hydrophones, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 5, Issue 23.
- 38) Thurston D., Theiss L., 1987. Geologic Report for the Chukchi Sea Planning Area, Alaska, *United States Department of the Interior Minerals Management Service*. Διαθέσιμο από: Bureau of Ocean Energy Management . [accessed 1 May 2020]
- 39) Ulrych T., Porsani M., Fokkema J., Leaney S., Schlumberger E., 1988. ‘Predictive deconvolution in the frequency domain’, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, pp. 727-730
- 40) Vatandoost A., Fullagar P., Walters S., Kojovic T. 2009, Towards Petrophysical Characterization of Comminution Behavior, *41<sup>st</sup> Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, pp. 614-640.
- 41) Veeken P., Moerkerken B., 2013, *Seismic Stratigraphy and Depositional Facies Models*, EAGE & Elsevier.
- 42) Yilmaz O., 1987, *Seismic data processing*, Society of Exploration Geophysicists.
- 43) Zhou H., 2014. *Practical Seismic Data Analysis*. Cambridge University Press

## Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία

- 1) Βαφείδης Α., 2011, *Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Ι – Σεισμικές Μέθοδοι*, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- 2) Κουή Μ., Χειλάκου Ε., Θεοδορακάς Π., Δράτσα Β., Αβδελίδης Ν., 2015. *Μη Καταστρεπτικές και Φασματοσκοπικές Μέθοδοι Εξέτασης των Υλικών*, Αθήνα: ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ

**Πηγές από το διαδίκτυο:**

## Ξερόγλωσση βιβλιογραφία

- 1) BENTOS, (n.d.) *SUB BOTTOM PROFILERS (SBP)*. Διαθέσιμο στο διαδικτυακό τόπο: <https://www.bentos.cl/archivos/SBP-ing.pdf> (accessed 27 February 2020).
- 2) Chaubey A., 2007. *Seismic Reflection and Refraction Methods*. Διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο: [http://drs.nio.org/drs/bitstream/handle/2264/749/Refresher\\_Course\\_Mar\\_Geol\\_Geophys\\_2007\\_Lecture\\_Notes\\_214.pdf?sequence=2](http://drs.nio.org/drs/bitstream/handle/2264/749/Refresher_Course_Mar_Geol_Geophys_2007_Lecture_Notes_214.pdf?sequence=2) (accessed 13 December 2019).
- 3) ENERGY INFORMATION AUSTRALIA, *MARINE SEISMIC SURVEYS* n.d., Σχήμα. Διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο: <https://energyinformationaustralia.com.au/marine-seismic-surveys-what-you-need-to-know/> (accessed 15 December 2019).
- 4) GEODEVICE, *Electrodynamic source G-Boomer* n.d., Σχήμα. Διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο: <https://geodevice.co/main/seismic/sources/marine-seism/g-boomer/> (accessed 13 January 2020).
- 5) GEO Marine Survey Systems, *Sustainable Sparker Systems with Negative Discharge Technology* n.d., Σχήμα. Διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο: <https://www.geomarinesurveysystems.com/products/seismic/geo-source/> (accessed 14 January 2020).
- 6) Gron, O., & Missiaen, T. 2013 Sparker subbottom profilers, Submerged Prehistoric Archaeology and Landscapes of the Continental Shelf (SPLASHCOS). Διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο: [https://www.splashcos.org/sites/splashcos.org/files/downloads/7\\_Sparker\\_subbottom\\_profilers.pdf](https://www.splashcos.org/sites/splashcos.org/files/downloads/7_Sparker_subbottom_profilers.pdf) (accessed 19 February 2020).
- 7) INNOMAR Technologie GmbH n.d., *Applications/User Benefits*. Διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο: <https://www.innomar.com/applications.php> (accessed 17 February 2020).
- 8) Knudsen, *Pinger Sub Bottom Profiler* n.d., Σχήμα. Διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο: <https://knudseneng.com/products/chirpSeries/pinger.php> (accessed 15 February 2020).
- 9) L-3 Communications SeaBeam Instruments n.d., *Multibeam Sonar, Theory of Operation*. Διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο: <https://www3.mbari.org/data/mbsystem/sonarfunction/SeaBeamMultibeamTheoryOperation.pdf> (accessed 12 February 2020).
- 10) Penn State University n.d., *Project 3: Seafloor Mapping with Sonar*. Διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο: <https://psugeo.org/Project%203/Project%203.htm> (accessed 20 January 2020).
- 11) Stockholm University, (n.d.) *Oden Mapping Data – Oden Multibeam and Chirp Sonar System*, Διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο : <https://oden.geo.su.se/system.php> (accessed 19 May 2020).
- 12) Swedish Polar Research Secretariat, *Icebreaker Oden* n.d., Σχήμα. Διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο : <https://polar.se/en/about-polar-research/icebreaker-oden/> (accessed 19 May 2020).

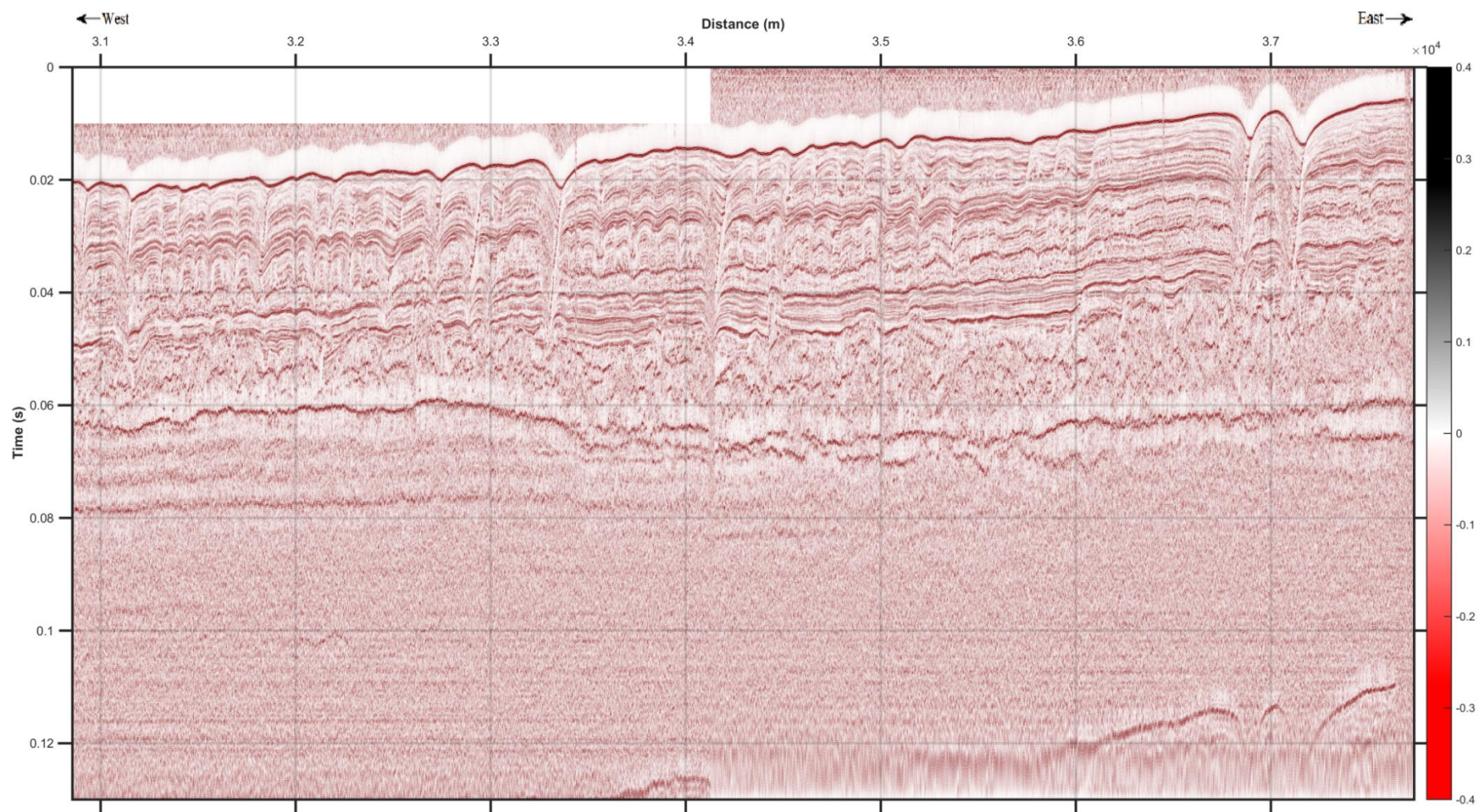


- 13) Woods Hole Oceanographic Institution (n.d.) *Chirp Sub-bottom Profiler*. Διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο: <https://web.whoi.edu/coastal-group/about/how-we-work/field-methods/chirp-sub-bottom-profiler/> (accessed 22 December 2019).

## Παράρτημα

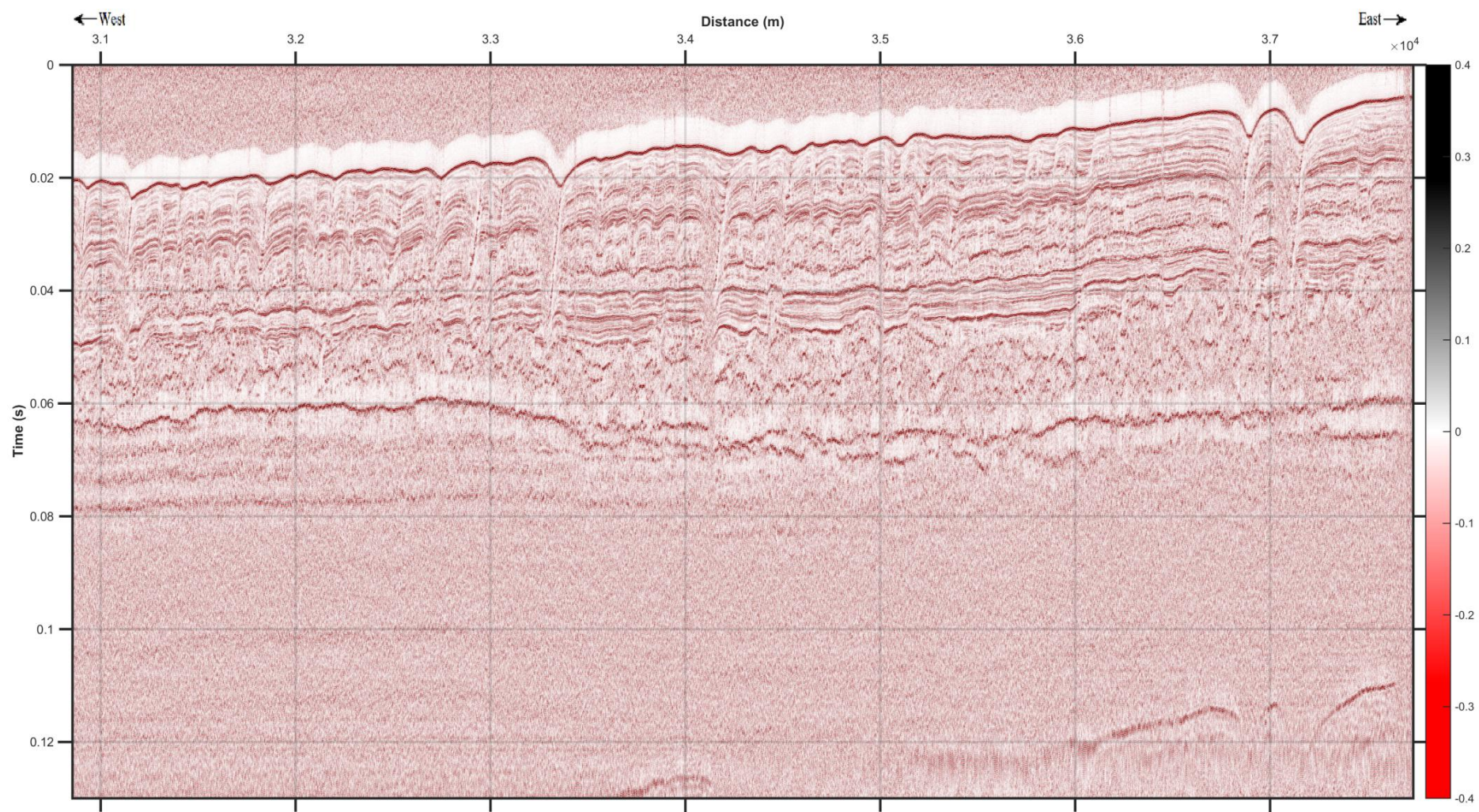
Πίνακας Π-1 Μετρούμενα μεγέθη δειγματοληπτικής γεώτρησης 4-PC1. Στην πρώτη στήλη αναφέρεται το όνομα της γεώτρησης, στη δεύτερη στήλη οι διαφορετικοί σχηματισμοί που εντοπίστηκαν, στην τρίτη στήλη το βάθος κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα σε m, στην τέταρτη στήλη η ταχύτητα διαμήκων κυμάτων σε m/s, στην πέμπτη στήλη η φαινομενική πυκνότητα σε g/cc και στην έκτη στήλη η μαγνητική επιδεκτικότητα.

Core	Section	Depth (mbsf)	Pwave Vel. (m/s)	Bulk Density (g/cc)	MS1 (SI x 10 <sup>-5</sup> )
SWERUS-L2-4-PC1	1	0,01	-999	-999	9,3
SWERUS-L2-4-PC1	1	0,31	1470,15	1,2824	20,4
SWERUS-L2-4-PC1	2	0,6	1465,197	1,2587	18,8
SWERUS-L2-4-PC1	2	0,9	1478,925	1,2862	21,4
SWERUS-L2-4-PC1	2	1,2	1466,656	1,2916	-999
SWERUS-L2-4-PC1	2	1,5	1477,644	1,3126	21,2
SWERUS-L2-4-PC1	2	1,8	1468,831	1,3119	20,4
SWERUS-L2-4-PC1	3	2,11	1468,816	1,319	18,9
SWERUS-L2-4-PC1	3	2,41	1475,315	1,3802	24,8
SWERUS-L2-4-PC1	3	2,71	1470,241	1,358	24,6
SWERUS-L2-4-PC1	3	3,01	1466,757	1,3655	15,6
SWERUS-L2-4-PC1	3	3,31	1476,414	1,3559	12,8
SWERUS-L2-4-PC1	4	3,61	1472,664	1,3729	20,2
SWERUS-L2-4-PC1	4	3,91	1468,021	1,476	29,6
SWERUS-L2-4-PC1	4	4,21	1475,619	1,6611	25,3
SWERUS-L2-4-PC1	4	4,51	1530,341	1,8951	-999
SWERUS-L2-4-PC1	5	4,81	1489,721	1,7516	28,3
SWERUS-L2-4-PC1	5	5,11	1541,826	1,909	42,5
SWERUS-L2-4-PC1	5	5,41	1542,734	1,9162	49,8
SWERUS-L2-4-PC1	5	5,71	1515,17	1,8746	43,3
SWERUS-L2-4-PC1	5	6,01	1564,764	1,9267	49,5
SWERUS-L2-4-PC1	5	6,22	-999	-999	2,6



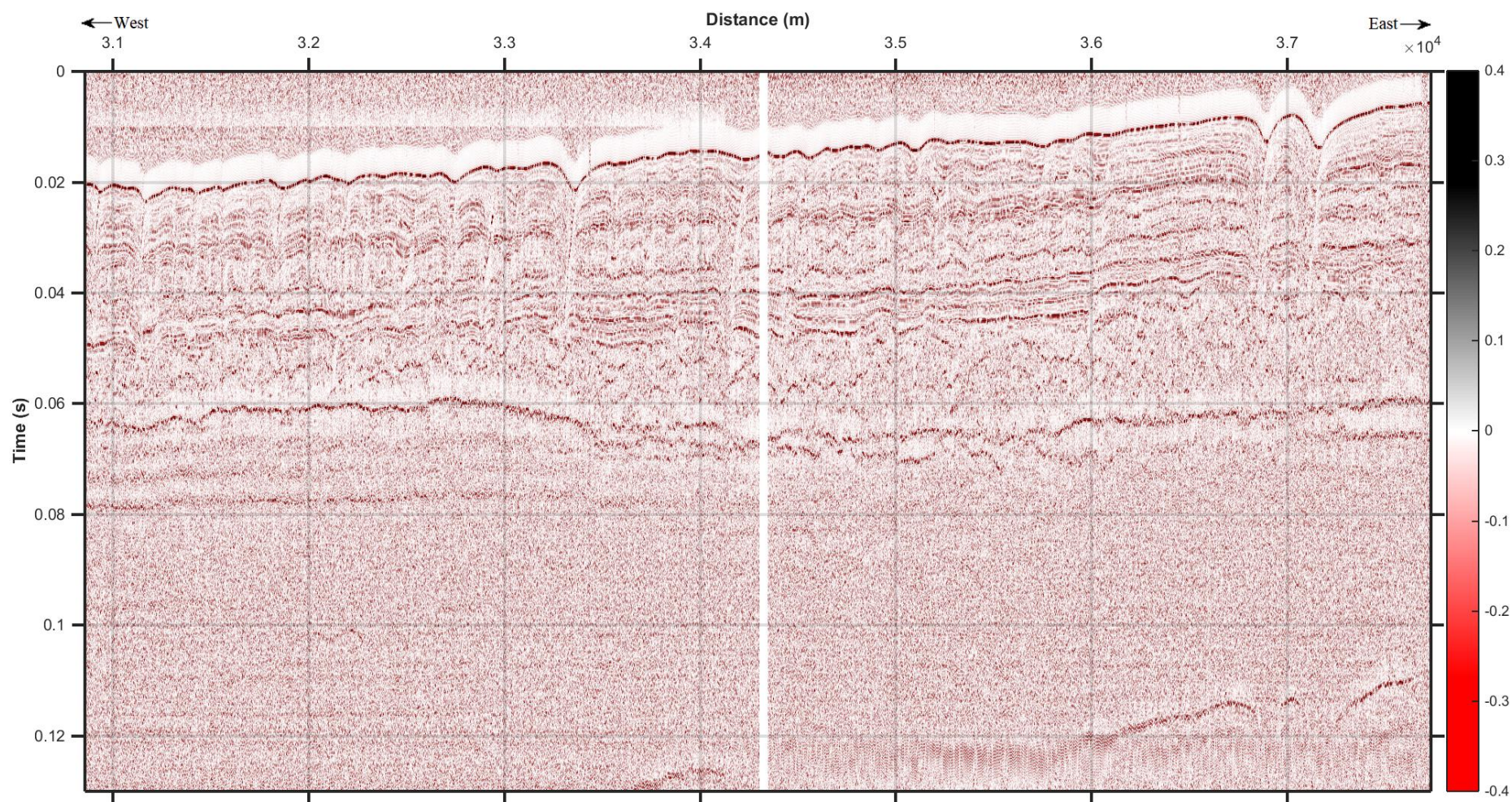
Σχήμα Π. 1 Απεικόνιση τμήματος της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 μετά την εφαρμογή του φίλτρου Band-Pass.





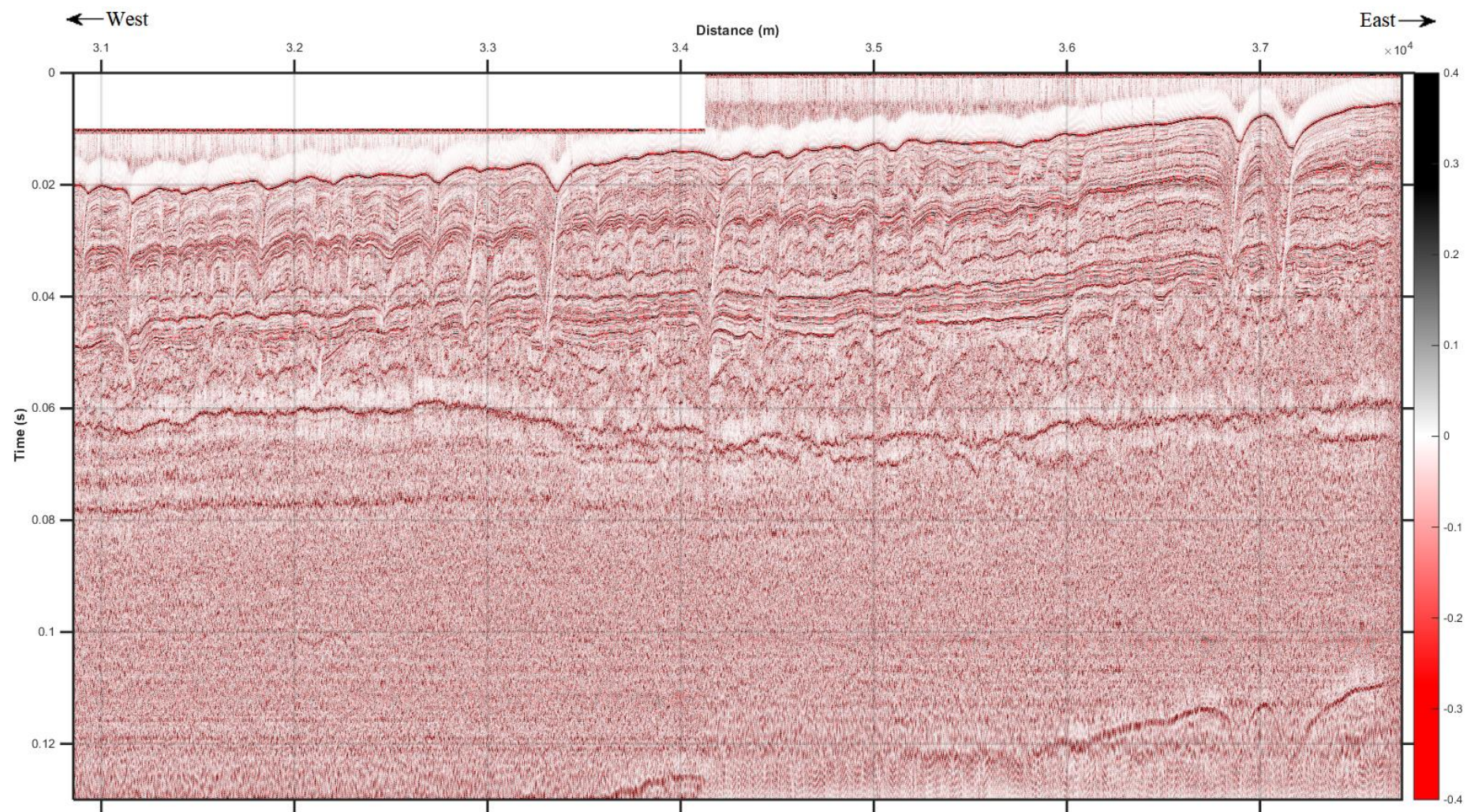
Σχήμα Π. 2 Απεικόνιση τμήματος της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 μετά την εφαρμογή του φίλτρου F-X Deconvolution με τιμή μήκους φίλτρου 4 ms.





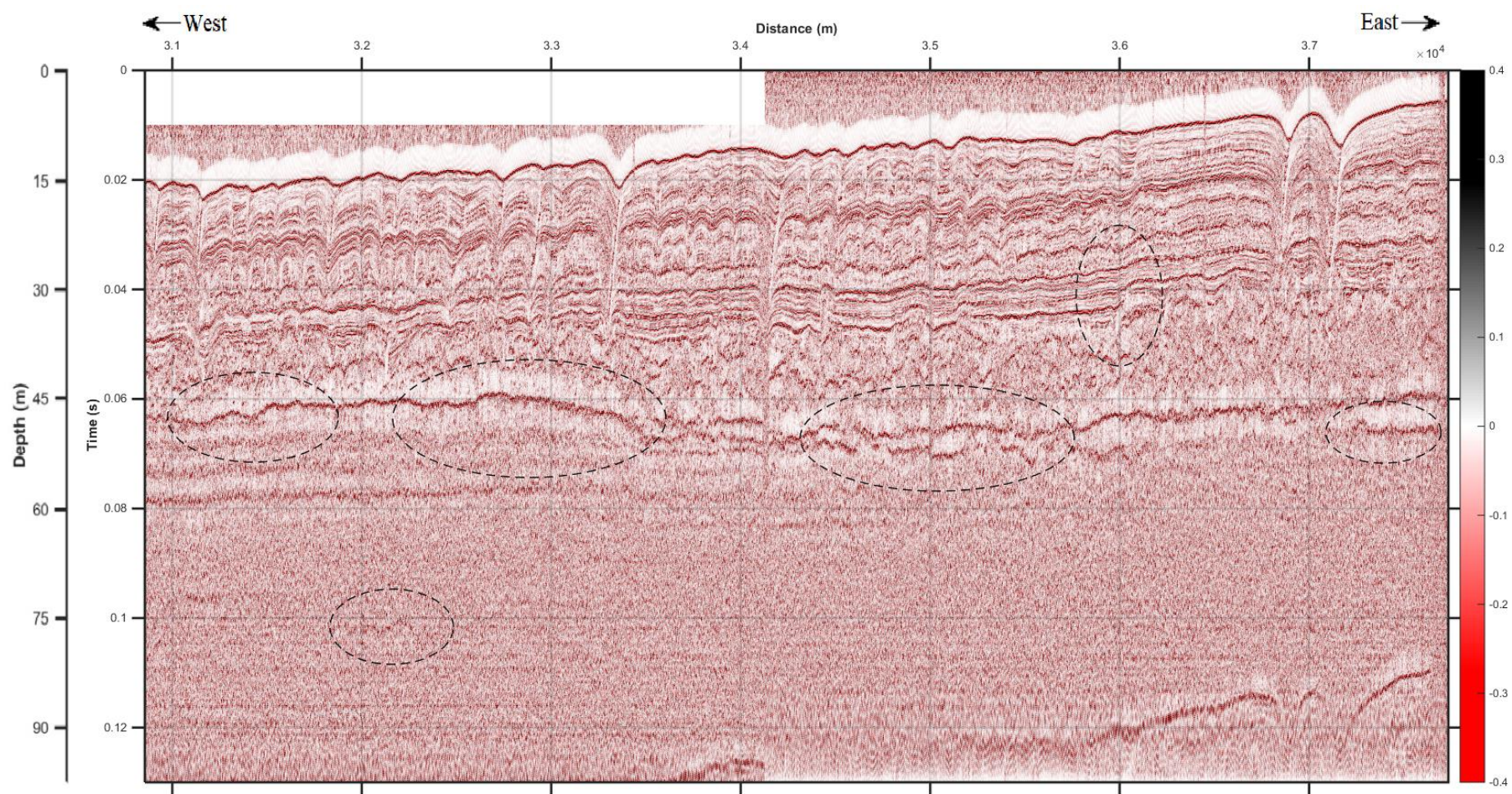
Σχήμα Π. 3 Απεικόνιση τμήματος της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 μετά την εφαρμογή του φίλτρου F-X Deconvolution με τιμή μήκους φίλτρου 100 ms.





Σχήμα Π. 4 Απεικόνιση τμήματος της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 μετά την εφαρμογή του Spiking Deconvolution με τιμή μήκους φίλτρου 1 ms.





Σχήμα Π. 5 Απεικόνιση τμήματος της ενοποιημένης γραμμής μελέτης 33851-45524-54401 μετά την εφαρμογή σεισμικής χωροθέτησης με τη μέθοδο Phase-Shift.