



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Σεισμική ανάκλαση για την αναζήτηση ανθρωπογενών δομών σε αβαθές
θαλάσσιο περιβάλλον»

Φωτεινή Ιωάννα Τσουμπού Ανδριοπούλου

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης (Επιβλέπων Καθηγητής)

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

Δρ. Παπαδόπουλος Νικόλαος, Ερευνητής (ΙΜΣ-ΙΤΕ)

Χανιά, Οκτώβριος 2025

Στη νονά μου, Γεωργία Καζάκου.
Δεν πρόλαβε να δει το τέλος, μα θα είναι πάντα κομμάτι της αρχής.

«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

Η εν λόγω διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των σπουδών μου στο Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και εστιάζει στη μελέτη της μεθόδου της σεισμικής ανάκλασης για την ανίχνευση ανθρωπογενών στόχων σε ρηχό θαλάσσιο περιβάλλον. Η εργασία αυτή συνδυάζει το επιστημονικό ενδιαφέρον για τη γεωφυσική διερεύνηση του υπεδάφους με την πρακτική εφαρμογή σύγχρονων τεχνικών στην προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς.

Η ενασχόληση με το συγκεκριμένο αντικείμενο αποτέλεσε για μένα μια σημαντική εμπειρία, καθώς μου δόθηκε η ευκαιρία να κατανοήσω τη χρήση σεισμικών πηγών όπως το Chirp Sub-Bottom Profiler και να εξοικειωθώ με εξειδικευμένα λογισμικά προσομοίωσης και επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων, όπως το ReflexW. Η μελέτη των ανακλαστικών χαρακτηριστικών στόχων σε πολύπλοκα θαλάσσια περιβάλλοντα ανέδειξε την αξία της μεθοδολογίας και ταυτόχρονα με βοήθησε να αναπτύξω δεξιότητες ανάλυσης και επιστημονικής σκέψης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Αντώνιο Βαφείδη για την πολύτιμη καθοδήγηση και τη διαρκή υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης τον κ. Γεώργιο Κρητικάκη, για την πρόθυμη βοήθεια, την τεχνική υποστήριξη και τις χρήσιμες παρατηρήσεις που συνέβαλαν ουσιαστικά στην εξέλιξη της εργασίας. Τέλος, εκφράζω τις ευχαριστίες μου στον κ. Παπαδόπουλο Νικόλαο, για τη συμμετοχή του στην αξιολόγηση της διπλωματικής εργασίας και για τον χρόνο που αφιέρωσε στην εξέτασή της.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους δικούς μου ανθρώπους, για τη στήριξη, την κατανόηση και την ενθάρρυνσή τους, τόσο στις απαιτητικές στιγμές όσο και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η παρουσία και η πίστη τους αποτέλεσαν για μένα σταθερό σημείο αναφοράς.

Περίληψη

Η διπλωματική εργασία εξετάζει την εφαρμογή της μεθόδου σεισμικής ανάκλασης για τον εντοπισμό ανθρωπογενών δομών σε αβαθή θαλάσσια περιβάλλοντα. Ειδικότερα, παρουσιάζεται εισαγωγικά η αρχή λειτουργίας της μεθόδου, δίνοντας έμφαση στη χρήση της σεισμικής πηγής τύπου Chirp Sub-Bottom Profiler. Στο πλαίσιο της εργασίας αναλύονται περιπτώσεις εφαρμογής της τεχνικής σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές, όπως η Δανία, η Ελλάδα, το Ισραήλ, η Αίγυπτος και η Νορβηγία, με στόχο τη χαρτογράφηση ανθρωπογενών δομών σε παράκτια περιβάλλοντα.

Για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας της μεθόδου, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με το λογισμικό ReflexW, προσομοιώνοντας τη διάδοση σεισμικών κυμάτων. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν την ικανότητα της μεθόδου να καταγράφει ανακλάσεις, τόσο από τα γεωλογικά στρώματα, όσο και από τους υπό μελέτη ανθρωπογενείς στόχους. Από το σύνολο των συνθετικών δεδομένων, επιλέχθηκε ένα αντιπροσωπευτικό σύνολο, περίπλοκης φύσεως για πιο εμπειριστατωμένη μελέτη των ανακλαστών, καθώς και των χαρακτηριστικών των στόχων.

Τέλος, το επιλεγμένο σύνολο δεδομένων υποβλήθηκε σε περαιτέρω επεξεργασία εντός του περιβάλλοντος του λογισμικού ReflexW, κάνοντας χρήση της λειτουργίας αυτόματης ενίσχυσης σήματος (Automatic Gain Control - AGC). Η εφαρμογή της συγκεκριμένης ενίσχυσης είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της απεικόνισης των σεισμικών ανακλάσεων, ενισχύοντας σε σημαντικό βαθμό την ευκρίνεια των ανακλώμενων σημάτων. Μέσω αυτής της διαδικασίας, κατέστη δυνατή όχι μόνο η αναγνώριση στόχων σε ελαφρώς μεγαλύτερα βάθη, αλλά και η διάκριση στόχων που βρίσκονται σε πιο πολύπλοκα γεωλογικά περιβάλλοντα, όπου οι ανακλάσεις τους ενδέχεται να αλληλεπικαλύπτονται ή να συγχέονται με ισχυρότερες ανακλάσεις από υπερκείμενες ή γειτονικές δομές. Χαρακτηριστικά, η μέθοδος επέτρεψε την ανάδειξη ασθενέστερων ανακλάσεων από μικρούς βαθιούς στόχους σε αβαθές θαλάσσιο περιβάλλον, ακόμη και όταν περιβάλλονται από μεγαλύτερους και ρηχότερους στόχους, που παρουσιάζουν εντονότερο σήμα.

Abstract

The present thesis examines the application of the seismic reflection method for detecting human-made structures in shallow marine environments. In particular, it introduces the principle of operation of the method, emphasizing the use of high-frequency seismic source type Chirp Sub-Bottom Profiler. The thesis refers to case studies where the technique has been applied in various geographical areas, such as Denmark, Greece, Israel, Egypt, and Norway, to locate man-made structures in coastal environments.

To evaluate the effectiveness of the method, simulations were performed using ReflexW software, by simulating the propagation of seismic waves. The results demonstrated the method's ability to record reflections, both from geological formation and the human-made targets under study. From the set of synthetic data, a representative set of complex nature was selected for a detailed study of the reflectors and geometrical characteristics of the targets.

Finally, the selected data set was further processed within the ReflexW software environment, using the AGC gain (Automatic Gain Control) feature. The application of this enhancement resulted in improved imaging of seismic waves, significantly enhancing the reflected signals. Through this process, it became possible not only to identify targets at slightly greater depths, but also the detection of targets located in more complex geological environments, where their reflections may be overlapped or confused with stronger reflections from overlying or neighboring structures. Typically, the method allowed the detection of weaker reflections from small and deep targets in shallow marine environments, even when they are surrounded by larger and shallower ones, which produce stronger reflected signals.

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος	i
Περίληψη	ii
Abstract	iii
Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή	1
1.1 Γεωφυσικές μέθοδοι	1
1.2 Εισαγωγή στις Σεισμικές Μεθόδους.....	2
1.3 Σεισμική ανάκλαση και θεμελιώδεις αρχές	4
1.3.1 Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης	4
1.3.2 Διάδοση ελαστικών κυμάτων	5
1.3.3 Ακουστική εμπέδηση και συντελεστής ανάκλασης.....	6
1.4 Εξοπλισμός και συλλογή δεδομένων	7
1.4.1 Εξοπλισμός σε χερσαίες και θαλάσσιες διασκοπήσεις	7
1.4.2 Δέκτες.....	7
1.4.3 Σεισμικές πηγές.....	8
1.4.4 Συλλογή Δεδομένων	11
1.5 Επεξεργασία Δεδομένων.....	11
1.5.1 Αποσυνέλιξη	12
1.5.2 Υπέρθεση	12
1.5.3 Χωροθέτηση.....	13
1.6 Θαλάσσιες Εφαρμογές.....	13
Κεφάλαιο 2 ^ο : Chirp Sub-Bottom Profiler	15
2.1 Chirp Sub-Bottom Profiler.....	15
2.2 Κυριότερες εφαρμογές του Chirp Sub-Bottom Profiler	18
2.3 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί του συστήματος Chirp.....	20

2.4 Κυματομορφή Klauder	21
2.5 Εμφανίσεις “haystack” στα σεισμικά προφίλ Chirp	22
Κεφάλαιο 3° : Θαλάσσιες σεισμικές διασκοπήσεις για τον εντοπισμό θαμμένων δομών σε ρηχό περιβάλλον	24
3.1 Εισαγωγή	24
3.2 Ανασκόπηση Επιλεγμένων Ερευνών	24
3.2.1 Χρήση του Chirp SBP για την Ανίχνευση Καταλοίπων λίθινης εποχής (Stone Age sites).	25
3.2.2 Χαρτογράφηση αρχαίων λιμενικών εγκαταστάσεων.....	33
3.2.3 Ανίχνευση ναυαγίων και βυθισμένων κατασκευών καθώς και ειδικές τεχνικές εφαρμογές.	44
3.3 Συμπεράσματα	53
Κεφάλαιο 4° : Δυσδιάστατη προσομοίωση για την ανίχνευση θαμμένων αντικειμένων .	54
4.1 Το πρόγραμμα ReflexW	54
4.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method)	55
4.3 Δημιουργία συνθετικών σεισμικών τομών	56
4.3.1 Πρώτο μέρος προσομοιώσεων.....	56
4.3.2 Δεύτερο μέρος προσομοιώσεων.....	65
4.3.3 Τρίτο μέρος προσομοιώσεων.....	72
4.3.4 Συμπεράσματα	78
4.4 Επεξεργασία και ενίσχυση των αποτελεσμάτων της δυσδιάστατης προσομοίωσης	79
4.4.1 Η διαδικασία της Αυτόματης Ενίσχυσης Σήματος (Automatic Gain Control - AGC).....	79
4.4.2 Παρουσίαση των ενισχυμένων συνθετικών καταγραφών	80
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	94
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	95
Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία.....	98

Πηγές από το διαδίκτυο	98
Παράρτημα.....	100
Π.1 Βήματα για τη δημιουργία δυσδιάστατων μοντέλων προσομοίωσης.....	100
Π.2 Βήματα για την εκτέλεση της αυτόματης ενίσχυσης σήματος (AGC)	105

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Απεικόνιση του τρόπου μετάδοσης της κυματικής ενέργειας στις σεισμικές μεθόδους (EarthScope Consortium, 2018).....	3
Εικόνα 1.2: (a) Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου σεισμικής ανάκλασης. Κίτρινη κουκκίδα: σεισμική πηγή, κίτρινα τόξα: η διάδοση της ενέργειας των σεισμικών κυμάτων μέσω της στήλης νερού, μαύρες γραμμές: επιλεγμένες διαδρομές σεισμικών ακτινών που ανακλώνται στον πυθμένα της θάλασσας και τα όρια των υποθαλάσσιων στρωμάτων, γαλάζιες κουκκίδες: δέκτες. (b) Παράδειγμα σεισμικής τομής ανάκλασης. Μωβ βέλος: ανάκλαση από τον πυθμένα της θάλασσας. Κίτρινο βέλος: ανακλαστήρας. Κόκκινο βέλος: ισχυρή ανάκλαση. Μαύρες γραμμές: ρήγματα. (c) Ο συντελεστής ανάκλασης (RC) (Crutchley & Kopp, 2018).	5
Εικόνα 1.3: Παράδειγμα κατακόρυφης συστοιχίας υδροφώνων (Wang, et al., 2021)	8
Εικόνα 1.4: (a) Υδροβόλο (water gun) με πιστόνι (Morrow, et al., 2015). (b) Ηλεκτρικός εκκενωτής (sparkler) (Geo Marine Survey Systems, 2024) (c) Pinger (Unique Group, 2025) (d) Boomer (Veeken & van Moerkerken, 2013).	10
Εικόνα 2.1: Σύστημα υψηλής ανάλυσης Chirp Sub-Bottom Profiler. Το ρυμουλκούμενο άκαμπτο πλαίσιο πλάτους 2,75 m και μήκους 2,3 m φέρει 60 ομάδες δεκτών στις διαμήκεις τομές και μια συστοιχία τεσσάρων μετατροπέων σε ένα κεντρικό πλωτήριο. Οι μετατροπείς λειτουργούν σε εύρος 1,5–13 kHz. Η θέση του καθορίζεται με RTK-GPS και ένα σύστημα στάσης με τέσσερις κεραίες GPS συνδεδεμένες στο πλαίσιο (Gutowski , et al., 2008).	16
Εικόνα 2.2: (a) Κυματομορφή στο χρονικό πεδίο, (b) Φάσμα ισχύος με κεντρική συχνότητα 4,5 kHz, (c) Φασματογράφημα που απεικονίζει τη μεταβολή της στιγμιαίας συχνότητας, με εντάσεις σε dB, (d) Κυματομορφή Klauder, του σήματος (Gutowski , et al., 2008).....	17
Εικόνα 2.3: Απεικόνιση παραδείγματος σεισμικής «ανωμαλίας» (Fitch & Hale, 2025).	22
Εικόνα 3.1: (a) Η περιοχή του λιμανιού Svanemøllen της Κοπεγχάγης. (b) Χάρτης τοποθεσίας του λιμανιού. (c) Βαθυμετρικός χάρτης της περιοχής μελέτης, με τη θέση των σεισμικών προφίλ Chirp III και της πυρηνοληψίας (vibrocores) (Boldreel, et al., 2025)	26
Εικόνα 3.2: Χάρτης θέσης της περιοχής μελέτης με τα προφίλ Innomar και Chirp III. Οι κόκκινες σημάνσεις δείχνουν τις θέσεις των “haystacks”. Τα λευκά και πράσινα αστέρια δείχνουν τις θέσεις όπου τα προφίλ Innomar και Chirp III καταγράφηκαν στην ίδια θέση (Boldreel, et al., 2025).	26
Εικόνα 3.3: Τμήματα τεσσάρων σεισμικών τομών με εμφανίσεις “haystacks” (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές), των οποίων οι θέσεις φαίνονται στην Εικόνα 3.1, όπως καταγράφηκαν με το σύστημα Teledyne Chirp III. Σε ορισμένα προφίλ (a, b), οι διαταραχές εντοπίζονται πάνω από μικρές λεκάνες, ενώ σε άλλα (c, d), εμφανίζονται ως κατακόρυφες διαταραχές με υψηλή ανακλαστικότητα (μεγάλες αντιθέσεις ακουστικής εμπέδησης), κάτω από τον πυθμένα, γεγονός που δείχνει ότι ένα υλικό (διαφορετικό από την άμμο) αποτίθεται σε αμμόδες περιβάλλον (Boldreel, et al., 2025).....	27
Εικόνα 3.4: Σεισμικό προφίλ με εμφανές “haystack”, όπως καταγράφηκε με Chirp III. Σημειώνονται οι θέσεις των γεωτρήσεων A και B, όπου εντοπίστηκαν τεμάχια επεξεργασμένου πυριτόλιθου (Boldreel, et al., 2025).	28
Εικόνα 3.5: (a) (c) Σύγκριση σεισμικών προφίλ της ίδιας γραμμής από τα συστήματα Teledyne Chirp III. (b) (c) Αντίστοιχη σύγκριση από τα συστήματα Innomar SES-2000 (b,d). Το χαρακτηριστικό “haystack” είναι καθαρά ορατό μόνο στο προφίλ του Chirp III (Boldreel, et al., 2025).	28
Εικόνα 3.6: (a), (b) Η τοποθεσία Atlit-Yam, 15 χιλιόμετρα ΝΑ της Χάιφα και (c) η ακτογραμμή και οι γραμμές πορείας, με τον κύκλο να επισημαίνει το περίγραμμα του οικισμού της εποχής του Λίθου (Grøn, et al., 2018).	29

Εικόνα 3.7: (α) Παραδείγματα “haystacks” όπως φαίνεται σε προφίλ στην Εικόνα 3.8. Γκρίζες μπάρες: η οριζόντια έκταση των “haystacks”, μαύρο βέλος στα δεξιά: ο πυθμένας της θάλασσας. (β) Χαρακτηριστικές τιμές συχνότητας που μετρήθηκαν για 16 κομμάτια πυριτόλιθου. Τα δύο ανώτερα δείγματα αποτελούνται από δύο τεμάχια πυριτόλιθου (Grøn, et al., 2018).....	31
Εικόνα 3.8: (Α) Οι γραμμές πορείας της περιοχής έρευνας. (Β) Το προφίλ που αναφέρθηκε στην εικόνα 3.7 επισημαίνεται ως κόκκινο βέλος. Μπλε κομμάτια γραμμών: οι τοποθεσίες όπου παρατηρήθηκαν haystacks, διακεκομμένη μαύρη γραμμή: το υπό έρευνα τμήμα της περιοχής του οικισμού (Grøn, et al., 2018).....	32
Εικόνα 3.9: (Α–C) Σεισμικά προφίλ πειραμάτων με σάκους/κάδους πυριτόλιθου. Λευκά βέλη (πάνω στα σεισμικά προφίλ): θέσεις πυριτόλιθων στον πυθμένα. Γκρίζα βέλη: πυθμένας. (Α1–Α3) Φυσικά σπασμένοι πυριτόλιθοι χωρίς απόκριση. (Β1–Β3, C1–C3) Ανθρωπογενής πυριτόλιθος με εμφανή ακουστική απόκριση. (D) Γραμμές πλεύσης και θέσεις σάκων (μπλε: ανθρωπογενής, κόκκινη: φυσικός). (Ε) Τοποθεσίες πειραμάτων: Amager Strandpark & Sundby Sailing Union (Grøn, et al., 2018).....	33
Εικόνα 3.10: (α) Ο χάρτης που απεικονίζει τον Σαρωνικό Κόλπο και τις βυθισμένες αρχαιολογικές δομές γύρω του, στα αριστερά και δεξιά οι δύο εικόνες παρουσιάζουν τις υπό έρευνα περιοχές της (β) Αίγινας και (c) της Σαλαμίνας (Georgiou, et al., 2021b).....	34
Εικόνα 3.11: (α) Η υπό έρευνα περιοχή (Αίγινα και Σαρωνικός Κόλπος). (β) Η περιοχή που ερευνήθηκε με τη χρήση θαλάσσιου γεωφυσικού εξοπλισμού (παράκτια ζώνη της πόλης της Αίγινας). (c) παράδειγμα από τις δορυφορικές εικόνες που δείχνει τα δύο κριτήρια που απαιτούνται για την προτεινόμενη μεθοδολογία: θαλάσσιος οικότοπος και βυθισμένα αρχαιολογικά ευρήματα (κωνικές δομές από κατάλοιπα). (d) παράδειγμα της έντασης της οπισθοσκέδασης SSS από την ίδια περιοχή. (e) βαθυμετρία MBES και θέση του σεισμικού προφίλ στο (f). (f) σεισμικό προφίλ όπως προκύπτει από το SBP (Georgiou, et al., 2021b).....	36
Εικόνα 3.12: (α) το sub-bottom profiler, τοποθετημένο στο πλάι του σκάφους (β) άνω όψη τρισδιάστατων σεισμικών δεδομένων από δύο θαμμένους στόχους αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. (c) Σεισμικά προφίλ των στόχων Α και Β. (d) Το τηλεχειριζόμενο όχημα (ROV), το οποίο, εξοπλισμένο με 3 κάμερες που χρησιμοποιήθηκαν για την αναγνώριση του εδάφους και τη φωτογραμμετρική έρευνα (Georgiou, et al., 2021b).	37
Εικόνα 3.13: Χάρτες επισκόπησης του ανατολικού λιμανιού της Αλεξάνδρειας που δείχνουν τις περιοχές έρευνας και από τις δύο μελέτες: (α, β) η δυτική ζώνη και (c) η κεντρική-ανατολική ζώνη (Hamouda et al, 2021a,b).....	38
Εικόνα 3.14: Οι γραμμές πορείας. (α) η νοτιοδυτική πλευρά (Hamouda, et al., 2021a) του λιμένα, (β) η κεντρική και ανατολική (Hamouda, et al., 2021b).	39
Εικόνα 3.15: (α) Βαθυμετρικός χάρτης της περιοχής μελέτης με το βυθισμένο αρχαίο λιμάνι. (β) Ο δεξιός κυματοθραύστης και (c) ο αριστερός κυματοθραύστης (Hamouda, et al., 2021a). Οι κόκκινες επισημάνσεις αφορούν το σόναρ πλευρικής σάρωσης της Εικόνας 3.17 και οι μπλε επισημάνσεις τις τομές SBP.....	40
Εικόνα 3.16: (α) (c) Ο δεξιός κυματοθραύστης του βυθισμένου αρχαίου λιμένα (νοτιοδυτικής πλευράς) και (β) (d) ο αριστερός. Αντίστοιχα και για τους 2 στα αριστερά απεικονίζονται οι καταγραφές από σόναρ πλευρικής σάρωσης (κόκκινη επισημάνση) και οι τομές SBP (μπλε επισημάνση) (Hamouda, et al., 2021a)	41
Εικόνα 3.17: Σεισμικά προφίλ της νοτιοδυτικής πλευράς του λιμένα, στους κυματοθραύστες του βυθισμένου αρχαίου λιμένα. (α) και (c) Μη ερμηνευμένα προφίλ. (β) και (d) Ερμηνευμένα προφίλ (Hamouda, et al., 2021a).	42
Εικόνα 3.18: Στρωματογραφικές σεισμικές τομές, που αφορούν την ανατολική ζώνη του αρχαίου λιμένα της Αλεξάνδρειας, κατά μήκος των γραμμών 3P και 3C (βλ. Εικόνα 3.14), που αναδεικνύουν τις φάσεις ίδρυσης, εγκατάλειψης και καταστροφής (365 μ.Χ.) της λιμενικής υποδομής (Hamouda, et al., 2021b).	43
Εικόνα 3.19: (α) Χάρτης ισοϋψών της θεμελιακής επιφάνειας του Βασιλικού λιμένα κατά την έναρξη της Πτολεμαϊκής περιόδου. (β) Πρόσφατος χάρτης ισοϋψών της θεμελιακής επιφάνειας του Βασιλικού λιμένα. (Hamouda, et al., 2021b).....	43

Εικόνα 3.20: (a) Χάρτης επισκόπησης της περιοχής μελέτης στη νοτιοδυτική Νορβηγία με τη θέση του πλοίου Avaldsnes στο λιμάνι κοντά στη μεσαιωνική εκκλησία του Αγίου Όλαφ. Βασικός χάρτης: Google Earth. (b) Σκίτσο του ναυαγίου του Μετα-Μεσαίωνα. (c) Τα υπολείμματα του ναυαγίου εν μέρει θαμμένα στον πυθμένα. (Ravnås, et al., 2023).....	45
Εικόνα 3.21: Απεικόνιση του εξοπλισμού και του δικτύου καλωδίωσης στο κατάστρωμα ASV. Προστατευτικό (roof box) για τα ευαίσθητα ηλεκτρονικά συστήματα. Η κεραία GPS και το Chirp είναι τοποθετημένα σε κοντάρι μπροστά από το όχημα με τους αισθητήρες στο πίσω μέρος (Ravnås, et al., 2023).....	46
Εικόνα 3.22: (a) Ο χειρσαίος σταθμός. (b) Οθόνη που δείχνει τη σεισμική καταγραφή, μαζί με το προκατασκευασμένο πλέγμα για την έρευνα στα δεξιά. (c) Το αυτόνομο όχημα επιφανείας που χρησιμοποιείται για την απόκτηση δεδομένων έρευνας σε ρηχά νερά. (d) Γραμμές πλεύσης της έρευνας (Ravnås, et al., 2023).	47
Εικόνα 3.23: (a) Ακριβής σε κλίμακα διατομή του πλοίου Avaldsnes απεικονισμένη σε δισδιάστατο σεισμικό προφίλ που τέμνει το μέσο του πλοίου. Λεπτομέρειες, όπως η πρύμνη και το κατάρτι αντιστοιχούν καλά με ισχυρούς ανακλαστές υποστηρίζοντας την παρατήρηση μιας ελαφριάς κλίσης προς τα νοτιοδυτικά. (b) Σύνθετη γραμμή 98 που τέμνει το πλοίο Avaldsnes και την καρίνα. (c) Φωτογραμμετρική λεπτομέρεια της πρύμνης από τον M. Ditta (Ravnås, et al., 2023).	48
Εικόνα 3.24: (a) Πλευρική σάρωση «σύννεφου» φυσαλίδων από προπέλα ταχύπλοου, που εμποδίζει το σήμα. (b) Πλαϊνή τοποθέτηση του sonar («ψάρι») και (c) DGPS για αποφυγή φυσαλίδων και κραδασμών (Grøn & Boldreel, 2014).	49
Εικόνα 3.25: (a) Προφίλ Chirp που απεικονίζει την παρουσία πασσάλων εντός αμμόδους θαλάσσιου πυθμένα, με διακριτή επιφάνεια θαλάσσιου βυθού και εμφάνιση «διπλού βάθους» λόγω πολλαπλής αντανάκλασης. Διακρίνονται επίσης περιοχές με χαλαρό ιζημα. (b) Προφίλ Chirp κάθετο προς τη διάταξη των πασσάλων, όπου απεικονίζεται η στρωματογραφία με διακριτές ζώνες: νερό, ανώτερο στρώμα άμμου με οργανικά υπολείμματα, χαλαρό ιζηματογενές υλικό και σκληρότερα στρώματα. Οι γραμμικές ανωμαλίες δείχνουν την ύπαρξη σειρών από ενσφηνωμένους πασσάλους, πιθανά σε διαδοχικές φάσεις κατασκευής ή επισκευής (Grøn & Boldreel, 2014).....	50
Εικόνα 3.26: (a) Chirp απεικόνιση κεκλιμένου στύλου (διάμ. 8 cm) ορατού εν μέρει στον πυθμένα (άνω: 2–7 kHz, κάτω: 8–23 kHz). (b) Chirp προφίλ από την ακτογραμμή του Haithabu δείχνει συγκεντρώσεις στύλων (κίτρινα βέλη) που αντιστοιχούν σε αποβάθρες αποβίβασης κάθετες στο προφίλ (Grøn & Boldreel, 2014)....	51
Εικόνα 3.27: (a) Πειραματική γραμμή πλεύσης για εντοπισμό του Ναυαγίου 1 (διπλός κύκλος) και δύο ακόμη πιθανών ναυαγίων, εκ των οποίων το δυτικότερο ίσως είναι το Ναυάγιο 2 (μισό μεσαιωνικό πλοίο). (b) Chirp διατομή του Ναυαγίου 1 με ορατά στοιχεία πάνω & κάτω από τον πυθμένα. Διακρίνεται το ανασκαμμένο και το τμήμα του μέσα σε ιζήματα. Η ερμηνεία έγινε με GeoGraphix (Grøn & Boldreel, 2014).	51
Εικόνα 3.28: Κατά τη σεισμική έρευνα στο Haddeby Noor (1996), εντοπίστηκε οβάλ σκάφος του 1175 μ.Χ. και παρατηρήθηκε ανωμαλία. Συμπληρωματικά προφίλ (βέλη) κατέγραψαν λεπτομερώς την περιοχή. Η πρώτη ανωμαλία (τομές στην εικόνα 3.28.b) ταυτοποιήθηκε με 95% πιθανότητα ως σκάφος, ενώ η διπλανή (λευκό οβάλ) πιθανόν αφορά φυσικό σχηματισμό, με 50% πιθανότητα να είναι επίσης σκάφος (Grøn & Boldreel, 2014).....	52
Εικόνα 3.29: Το φράγμα της εποχής των Βίκινγκς που ανακαλύφθηκε στο Kerteminde Fjord το 1996. Το φράγμα εμφανίστηκε ως ακουστική ανωμαλία μήκους 70-80 μέτρων (Grøn & Boldreel, 2014).	52
Εικόνα 4.1: Μοντέλο δύο στρωμάτων (M.2.0).	57
Εικόνα 4.2: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη, τύπου wiggle plot, για το μοντέλο M.2.0, με μηδενική απόσταση πηγής και δέκτη.	57
Εικόνα 4.3: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη, τύπου wiggle plot, για το μοντέλο M.2.0 με απόσταση πηγής και δέκτη 0.25 m.	58

Εικόνα 4.4: Μοντέλο τριών στρωμάτων (M.3.0).....	59
Εικόνα 4.5: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot για το μοντέλο M.3.0 με μηδενική απόσταση πηγής και δέκτη.	60
Εικόνα 4.6: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot για το μοντέλο προσομοίωσης M.3.0 με απόσταση πηγής και δέκτη 0.25 m.	61
Εικόνα 4.7: Μοντέλο δύο στρωμάτων, με την παρουσία στόχου στο πρώτο στρώμα (M.2.1.a).	62
Εικόνα 4.8: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot για το μοντέλο M.2.1.a, με μηδενική απόσταση πηγής-δέκτη.	62
Εικόνα 4.9: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot για το μοντέλο M.2.1.a, με απόσταση πηγής-δέκτη 0.25 m.	63
Εικόνα 4.10: Μοντέλο δύο στρωμάτων με δύο όμοια σώματα (M.2.2.a).	64
Εικόνα 4.11: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot για το μοντέλο M.2.2.a, με απόσταση πηγής-δέκτη 0m.	64
Εικόνα 4.12: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot για το μοντέλο M.2.2.a, με απόσταση πηγής-δέκτη 0.25 m.	65
Εικόνα 4.13: Μοντέλο δύο στρωμάτων, όπου ενδιάμεσα των δύο στρωμάτων τοποθετήθηκε ο στόχος (M.2.1.ab).	66
Εικόνα 4.14: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot για το μοντέλο M.2.1.ab.	67
Εικόνα 4.15: Μοντέλο τριών στρωμάτων, όπου στο δεύτερο τοποθετήθηκε ο στόχος, μήκους 1 m και ύψους 0.5 m, σε βάθος 1.25 m (M.3.1.b).	68
Εικόνα 4.16: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) για το μοντέλο M.3.1.b.	68
Εικόνα 4.17: Το μοντέλο τριών στρωμάτων, όπου μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου στρώματος τοποθετήθηκε ο στόχος (M.3.1.bc).	69
Εικόνα 4.18: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather), τύπου wiggle mode για το μοντέλο M.3.1.bc.	70
Εικόνα 4.19: Μοντέλο τριών στρωμάτων, όπου μεταξύ πρώτου και δεύτερου, καθώς και δεύτερου και τρίτου στρώματος τοποθετήθηκαν οι στόχοι (M.3.2.ab.bc).	71
Εικόνα 4.20: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot, για το μοντέλο 3 στρωμάτων με βυθισμένους 2 στόχους μεταξύ πρώτου και δεύτερου, καθώς και δεύτερου και τρίτου στρώματος.	71
Εικόνα 4.21: Μοντέλο τριών στρωμάτων, όπου τα διαπερνάει σώμα μεγάλου ύψους (M.3.1.abc).	73
Εικόνα 4.22: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot, για το M.3.1.abc.	73
Εικόνα 4.23: Μοντέλο τριών στρωμάτων, όπου στο τελευταίο στρώμα υπάρχει ένα σώμα μικρών διαστάσεων (M.3.1.c).	74
Εικόνα 4.24: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather), για το M.3.1.c.	75
Εικόνα 4.25: Μοντέλο (M.3.2.c.abc) που συνδυάζει τα M.3.1.abc και M.3.1.c.	76
Εικόνα 4.26: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot, για τον συνδυασμό των M.3.1.c και M.3.1.abc.	76
Εικόνα 4.27: Μοντέλο τριών στρωμάτων, όπου υπάρχει ένας συνδυασμός του M.3.2.c.abc (Εικόνα 4.29), με την προσθήκη ενός ενδιάμεσου σώματος (ύψους 2.2 μέτρα) μεγαλύτερου μήκους (1 m).	77
Εικόνα 4.28: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot, για τον συνδυασμό των τριών μοντέλων.	78

Εικόνα 4.29: Πέντε από τα μοντέλα της Ενότητας 4.2 που επιλέχθηκαν για την διαδικασία AGC: (a) M.3.1.c, (b) M.3.2.c.abc, (c) M.3.3.c.2abc, (d) M.3.1.bc, (e) M.3.2.ab.bc.	80
Εικόνα 4.30: Ενισχυμένη καταγραφή για το M.3.1.c με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.2 ms και ενίσχυση σήματος=0.01.	81
Εικόνα 4.31: Ενισχυμένη καταγραφή για το M.3.1.c με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.5 ms και ενίσχυση σήματος=0.01.	82
Εικόνα 4.32: Ενισχυμένη καταγραφή για το M.3.1.c με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=1 ms και ενίσχυση σήματος=0.01.	82
Εικόνα 4.33: Ενισχυμένη καταγραφή για το M.3.1.c με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=2 ms και ενίσχυση σήματος=0.01.	83
Εικόνα 4.34: Ενισχυμένη καταγραφή για το M.3.1.c με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=3 ms και ενίσχυση σήματος=0.01.	83
Εικόνα 4.35: Συγκριτική εικόνα των καταγραφών του M.3.1.c μαζί με την πρωτότυπη και τις ενισχυμένες. (i) Η πρωτότυπη καταγραφή, (ii) καταγραφή με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.2 ms, (iii) καταγραφή με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου =0.5 ms, (iv) καταγραφή με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=1 ms, (v) καταγραφή με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=2 ms, (vi) καταγραφή με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=3 ms.	84
Εικόνα 4.36: Ενισχυμένη καταγραφή του M.3.2.c.abc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.2 ms και ενίσχυση σήματος=0.02.	85
Εικόνα 4.37: Ενισχυμένη καταγραφή του M.3.2.c.abc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.5 ms και ενίσχυση σήματος=0.02.	85
Εικόνα 4.38: Συγκριτική εικόνα των καταγραφών του M.3.2.c.abc μαζί με την πρωτότυπη και τις ενισχυμένες. (i) η πρωτότυπη καταγραφή, (ii) η ενισχυμένη με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.2 ms και (iii) η ενισχυμένη με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.5 ms.	86
Εικόνα 4.39: Ενισχυμένη καταγραφή του M.3.c.2.abc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.2 ms και ενίσχυση σήματος=0.02.	87
Εικόνα 4.40: Ενισχυμένη καταγραφή, τύπου wiggle mode, με χρώμα rainbow, του M.3.c.2.abc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.2 ms και ενίσχυση σήματος=0.02.	87
Εικόνα 4.41: Ενισχυμένη καταγραφή του M.3.c.2.abc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.5 ms και ενίσχυση σήματος=0.02.	88
Εικόνα 4.42: Ενισχυμένη καταγραφή, τύπου wiggle mode, με χρώμα rainbow, του M.3.c.2.abc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.5 ms και ενίσχυση σήματος=0.02.	88
Εικόνα 4.43: Συγκριτική εικόνα των καταγραφών του M.3.c.2.abc μαζί με την πρωτότυπη και τις ενισχυμένες. (i) η πρωτότυπη καταγραφή, (ii) η ενισχυμένη καταγραφή με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.2 ms (iii) η ενισχυμένη καταγραφή με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.5 ms.	89
Εικόνα 4.44: Ενισχυμένη καταγραφή του M.3.1.bc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.2 ms και ενίσχυση σήματος=0.1.	90
Εικόνα 4.45: Ενισχυμένη καταγραφή του M.3.1.bc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.5 ms και ενίσχυση σήματος=0.1.	90
Εικόνα 4.46: Συγκριτική εικόνα των καταγραφών του M.3.1.bc μαζί με την πρωτότυπη και τις ενισχυμένες. (i) η πρωτότυπη καταγραφή, (ii) η ενισχυμένη με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.2 ms και (iii) η ενισχυμένη με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.5 ms.	91
Εικόνα 4.47: Ενισχυμένη καταγραφή του M.3.2.ab.bc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.2 ms και ενίσχυση σήματος=0.05.	92
Εικόνα 4.48: Ενισχυμένη καταγραφή του M.3.2.ab.bc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.5 ms και ενίσχυση σήματος=0.05.	92

Εικόνα 4.49: Συγκριτική εικόνα των καταγραφών του *M.3.2.ab.bc* μαζί με την πρωτότυπη και τις ενισχυμένες. (i) Η πρωτότυπη καταγραφή, (ii) η ενισχυμένη με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.2 ms και (iii) η ενισχυμένη με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.5 ms.....93

Εικόνα Π.1: Το περιβάλλον του προγράμματος *ReflexW*. 100

Εικόνα Π.2: Περιβάλλον δημιουργίας μοντέλου στο *ReflexW* και εργαλεία επεξεργασίας γεωμετρίας και ρύθμισης παραμέτρων προσομοίωσης. 101

Εικόνα Π.3: Ρύθμιση των παραμέτρων προσομοίωσης στο παράθυρο *FD Shots* και *create several single lines*, για μηδενική απόσταση πηγής δέκτη (a) και για απόσταση 0.25 m (b). 102

Εικόνα Π.4: Η διαδικασία της συνένωσης πολλών ξεχωριστών *shot gathers* σε ένα ενιαίο αρχείο τύπου *CMP* (*Common Midpoint*) στο περιβάλλον του *2D-Data Analysis*. 105

Εικόνα Π.5: Απεικόνιση του παραθύρου της επεξεργασίας “Gain” και οι επιλεγμένες παράμετροι. 107

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Πίνακας εφαρμογών, ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών των Γεωφυσικών μεθόδων (Βαφείδης, 2025)..... 2

Πίνακας 2.1: Παραδείγματα Chirp SBP, που έχουν εφαρμοστεί στις περιπτώσεις ερευνών στο Κεφάλαιο 3, από διαφορετικές εταιρίες.18

Πίνακας Π.1: Οι παράμετροι προσομοίωσης στο παράθυρο FD shots και η σημασία τους.....103

Πίνακας Π.2: Οι αριθμητικές παράμετροι προσομοίωσης στο παράθυρο FD shots.104

Κεφάλαιο 1^ο : Εισαγωγή

Στο παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί μια εκτεταμένη ανάλυση των γεωφυσικών μεθόδων, με έμφαση στις σεισμικές μεθόδους, για τις οποίες πραγματοποιείται μια σύντομη ιστορική αναφορά και μια σύντομη περιγραφή των βασικών τους αρχών, καθώς και των στοιχείων εξοπλισμού τους. Έπειτα, θα γίνει αναλυτικότερα, η περιγραφή της μεθόδου σεισμικής ανάκλασης, καθώς αποτελεί το «επίκεντρο» της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Τέλος, θα περιγραφούν οι βασικές αρχές της σεισμικής ανάκλασης, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται και στο τέλος θα αναλυθούν οι βασικές εφαρμογές της μεθόδου σε θαλάσσια περιβάλλοντα.

1.1 Γεωφυσικές μέθοδοι

Οι γεωφυσικές μέθοδοι ορίζονται ως μη επεμβατικές τεχνικές, που εφαρμόζουν αρχές της φυσικής για τη διερεύνηση της δομής του υπεδάφους της Γης. Αυτές οι μέθοδοι βασίζονται στην ανίχνευση αντιθέσεων σε φυσικές ιδιότητες, όπως η πυκνότητα, η μαγνητική επιδεκτικότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η φυσική ραδιενέργεια. Επιπροσθέτως, οι γεωφυσικές μέθοδοι επιτρέπουν τη χαρτογράφηση των γεωλογικών σχηματισμών, με αποτέλεσμα τη γρήγορη, οικονομική και αποτελεσματική κάλυψη μεγάλων περιοχών (Bechtel, et al., 2007).

Εκτός από τη μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους που αναφέρθηκε προηγουμένως, εφαρμόζονται επίσης στην αναζήτηση ενεργειακών και ορυκτών πόρων, όπως πετρέλαιο, φυσικό αέριο, μεταλλεύματα και γεωθερμικά πεδία, αλλά και σε γεωτεχνικά έργα. Οι ποσότητες, οι οποίες συνήθως μετρούνται, περιλαμβάνουν: τον χρόνο διαδρομής των σεισμικών κυμάτων, την επιτάχυνση της βαρύτητας, το μαγνητικό πεδίο και άλλες ιδιότητες του υπεδάφους. Οι κυριότερες μέθοδοι είναι οι *σεισμικές*, οι *βαρυτικές*, οι *μαγνητικές*, οι *ηλεκτρικές* και οι *ηλεκτρομαγνητικές* (H/M) (βλ. Πίνακα 1.1), καθώς και οι ραδιομετρικές και οι θερμικές, οι οποίες χρησιμοποιούνται ανάλογα με το στόχο και τη φύση του υπεδάφους.

Γενικότερα, η γεωφυσική προσφέρει οικονομικά αποδοτική λύση σε σχέση με τις γεωτρήσεις. Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει βελτιώσει αρκετά την ακρίβεια και την αξιοπιστία των γεωφυσικών τεχνικών, επιτρέποντας τη χρήση τους στην έρευνα και την παρακολούθηση της παραγωγής των κοιτασμάτων (Βαφείδης, 2023).

Πίνακας 1.1: Πίνακας εφαρμογών, ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών των Γεωφυσικών μεθόδων (Βαφειδής, 2025).

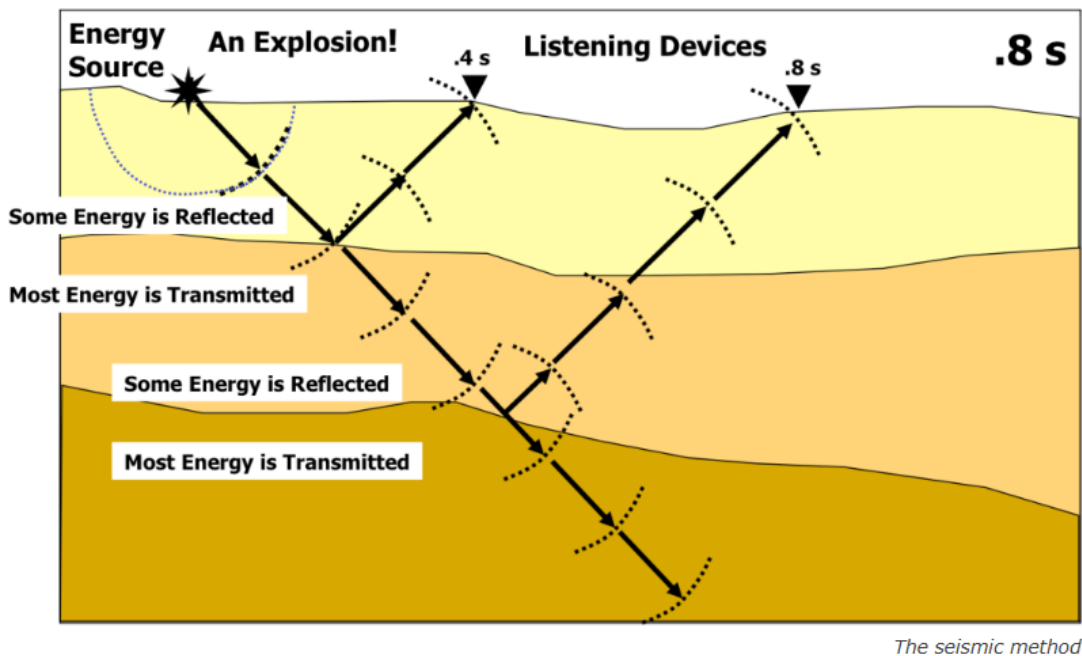
Μέθοδοι	Σεισμικές	Βαρυτικές	Μαγνητικές	Ηλεκτρικές	H/M
Μετρούμενο μέγεθος	Χρόνος διάδοσης σεισμικών κυμάτων	Μεταβολές στην ένταση του βαρυτικού πεδίου της Γης	Ένταση του γήινου μαγνητικού πεδίου της Γης	Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση	Πραγματική & φανταστική συνιστώσα του δευτερογενούς H/M πεδίου
Όργανα/τεχνική	Πηγές & Δέκτες, Γεώφωνα	Βαρυτόμετρα	Μαγνητόμετρα	Ηλεκτρόδια, ρεύματος	Μαγνητόμετρα, ηλεκτρόδια, γειωμένα καλώδια
Βάθος έρευνας	Μέτριο-Βαθύ	Ρηχό-Μέτριο	Ρηχό-Μέτριο	Ρηχό	Μέτριο-Βαθύ
Εφαρμογές	Παγίδες πετρελαίου, θαλάσσια αρχαιολογία	Κοιτάσματα	Αρχαιολογική έρευνα	Ρύπανση υπόγειων νερών-υφαλμύρωση, Γεωτεχνικά έργα	Εντοπισμός μεταλλικών αντικειμένων, κοιτάσματα μεταλλευμάτων, γεωτεχνικά έργα
Πλεονεκτήματα	Υψηλή ακρίβεια & χωρική ανάλυση	Γρήγορη εφαρμογή, χαμηλό κόστος	Γρήγορη μέθοδος	Ευνοϊκές συνθήκες στο νερό	Ποιοτική ερμηνεία, από αέρα μετρήσεις
Μειονεκτήματα	Απαιτεί εξειδίκευση, ακριβή μέθοδος	Ευαισθησία σε παρεμβολές & επιφανειακές διαταραχές	Χαμηλή χωρική ανάλυση	Περιορισμένο βάθος	Δυσκολία στην αντιστάθμιση του πρωτεύοντος μαγνητικού πεδίου

1.2 Εισαγωγή στις Σεισμικές Μεθόδους

Οι σεισμικές μέθοδοι έκαναν την «εμφάνισή» τους στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, όταν παρατηρήθηκαν για πρώτη φορά ανακλώμενα και διαθλώμενα κύματα σε καταγραφές σεισμών. Η εφαρμογή ελεγχόμενων πηγών για γεωλογική διερεύνηση προέκυψε κυρίως κατά την έρευνα υδρογονανθράκων. Το 1924, η πρώτη επιτυχημένη εφαρμογή της σεισμικής διάθλασης για τον εντοπισμό κοιτασμάτων πραγματοποιήθηκε από την εταιρία Seismos. Αντίστοιχα, η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης αναπτύχθηκε σαν ιδέα το 1914,

αλλά εφαρμόστηκε πρώτη φορά το 1928 σε έρευνα πετρελαίου στην Οκλαχόμα. Από το 1930 και έπειτα, η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης αποτέλεσε το βασικό εργαλείο στην έρευνα πετρελαίου και φυσικού αερίου. Σημαντικές μεθοδολογικές και τεχνολογικές εξελίξεις, όπως η διάταξη κοινού ενδιαμέσου σημείου (1950), η ψηφιακή επεξεργασία (1960) και η τρισδιάστατη σεισμική απεικόνιση (1970) ενίσχυσαν την απόδοση και ανάλυση των δεδομένων. Παρόλο που έχει υπάρξει σημαντική τεχνολογική εξέλιξη, οι δισδιάστατες μέθοδοι παραμένουν διαδεδομένες για ακαδημαϊκούς και γεωτεχνικούς σκοπούς (Crutchley & Kopp, 2018).

Αναλυτικότερα, οι σεισμικές μέθοδοι βασίζονται στην δημιουργία σεισμικών κυμάτων (πηγή) στο υπέδαφος και την καταγραφή των ανακλώμενων ή διαθλώμενων κυμάτων σε όρια γεωλογικών σχηματισμών με διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, όπως η πυκνότητα και η ταχύτητα διάδοσης.



Εικόνα 1.1: Απεικόνιση του τρόπου μετάδοσης της κυματικής ενέργειας στις σεισμικές μεθόδους (EarthScope Consortium, 2018)

Κατά τη μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης, τα κύματα ανακλώνται σε όρια γεωλογικών σχηματισμών με διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, επιτρέποντας έτσι την απεικόνιση των στρωμάτων σε υψηλή ανάλυση (βλ. Εικόνα 1.1). Αντίθετα, στην σεισμική διάθλαση, γίνεται η καταγραφή των μετωπικών κυμάτων που διαθλώνται σε διαδοχικά όρια και επιστρέφουν στους δέκτες μετά τη διάδοσή τους υπό κρίσιμη γωνία, γεγονός που επιτρέπει την ανίχνευση δομών με διαφορετική ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων.

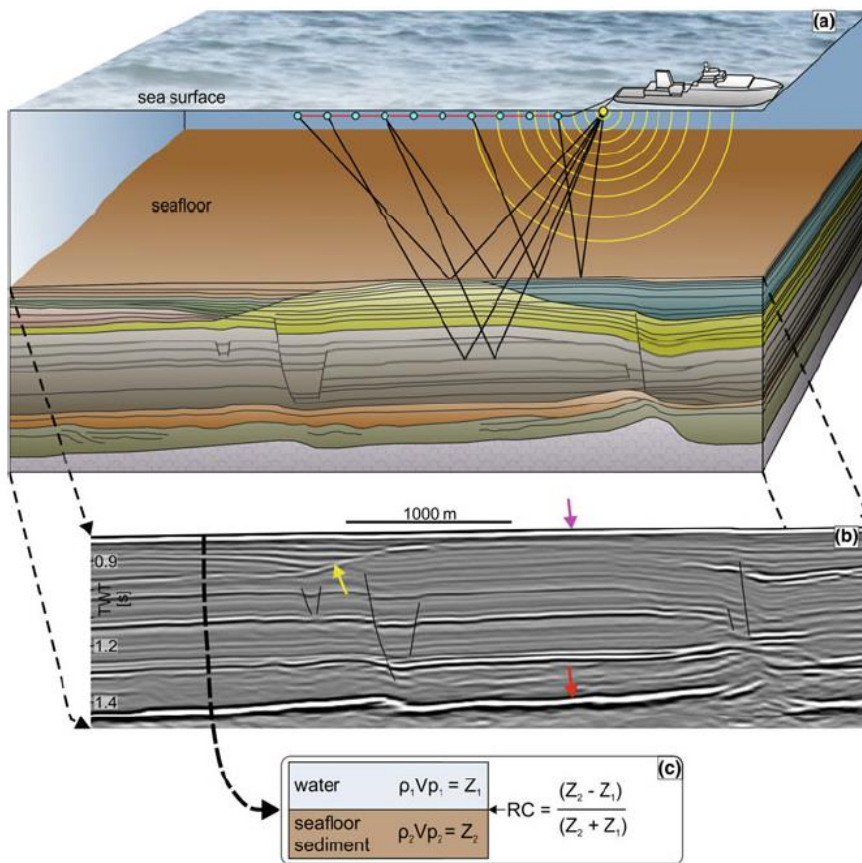
Και οι δύο αυτές τεχνικές έχουν πολλές εφαρμογές, οι οποίες εκτείνονται από την

υποθαλάσσια γεωμορφολογία μέχρι και τη μελέτη των διεργασιών του φλοιού της Γης. Η αποτελεσματικότητά τους αυξάνεται αρκετά από τεχνολογικές εξελίξεις όπως η τρισδιάστατη σεισμική απεικόνιση και η τεχνική υψηλής συχνότητας Sub-Bottom Profiling. Παρόλο που η κάθε μέθοδος έχει συγκεκριμένα όρια και περιορισμούς, ο συνδυασμός των σεισμικών μεθόδων με άλλες γεωφυσικές ή γεωλογικές τεχνικές συμβάλλει στην κατανόηση της δομής και των διεργασιών του υπεδάφους (Bechtel, et al., 2007).

1.3 Σεισμική ανάκλαση και θεμελιώδεις αρχές

1.3.1 Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης

Η σεισμική ανάκλαση είναι η βασικότερη γεωφυσική μέθοδος απεικόνισης της δομής του φλοιού της Γης, με πολλές εφαρμογές, όπως η αναζήτηση υδρογονανθράκων, οι γεωτεχνικές και οι περιβαλλοντικές έρευνες. Κατά την εφαρμογή της, χρησιμοποιούνται τεχνητά παραγόμενα σεισμικά κύματα, τα οποία διαδίδονται ως ελαστικά κύματα στο υπέδαφος, ανακλώνται στις επιφάνειες των στρωμάτων που έχουν διαφορετική ακουστική εμπέδηση (βλ. Εικόνα 1.2) και τέλος, καταγράφονται στους δέκτες πίσω στην επιφάνεια της γης. Η καταγραφή των ανακλώμενων κυμάτων συμβάλλει στην απεικόνιση γεωλογικών σχηματισμών, όπως ρήγματα ή δόμοι άλατος, σε βάθη από λίγα μέτρα έως αρκετά χιλιόμετρα. Η σεισμική ανάκλαση κατέχει σημαντικό ρόλο στην πετρελαϊκή βιομηχανία, διότι μειώνει τις πιθανότητες αποτυχημένων γεωτρήσεων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα στάδια εκμετάλλευσης κοιτασμάτων. Η ακρίβεια της ερμηνείας των δεδομένων εξαρτάται από την ποιότητά τους. Επιπροσθέτως, σε ρηχές εφαρμογές, χρησιμοποιείται και η υψηλής ανάλυσης σεισμική ανάκλαση. Τέλος, η σεισμική πηγή αποτελείται συνήθως από εκρηκτικά ή άλλες συσκευές, που αναλύονται περεταίρω στην [ενότητα 1.4](#), με στόχο τη δημιουργία κυμάτων που είναι ικανά να απεικονίσουν τις δομές του υπεδάφους (Βαφείδης, 2023).



Εικόνα 1.2: (α) Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου σεισμικής ανάκλασης. Κίτρινη κουκκίδα: σεισμική πηγή, κίτρινα τόξα: η διάδοση της ενέργειας των σεισμικών κυμάτων μέσω της στήλης νερού, μαύρες γραμμές: επιλεγμένες διαδρομές σεισμικών ακτίνων που ανακλώνται στον πυθμένα της θάλασσας και τα όρια των υποθαλάσσιων στρωμάτων, γαλάζιες κουκκίδες: δέκτες. (β) Παράδειγμα σεισμικής τομής ανάκλασης. Μωβ βέλος: ανάκλαση από τον πυθμένα της θάλασσας. Κίτρινο βέλος: ανακλαστήρας. Κόκκινο βέλος: ισχυρή ανάκλαση. Μαύρες γραμμές: ρήγματα. (γ) Ο συντελεστής ανάκλασης (RC) (Crutchley & Kopp, 2018).

1.3.2 Διάδοση ελαστικών κυμάτων

Τα δύο βασικά είδη κυμάτων είναι τα διαμήκη (P-Κύματα) και τα εγκάρσια κύματα (S-κύματα). Στην περίπτωση των P- κυμάτων, τα σωματίδια ταλαντώνονται στην ίδια κατεύθυνση με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και μεταφέρουν ενέργεια πιο γρήγορα σε σχέση με τα S-κύματα, στα οποία η ταλάντωση είναι κάθετη με διεύθυνση διάδοσης. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες του μέσου και περιγράφονται ως εξής από τους παρακάτω τύπους:

Για τα P-κύματα:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (1.1)$$

ενώ για τα S-κύματα:

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1.2)$$

όπου λ και μ οι σταθερές Lamé και ρ η πυκνότητα (Βαφείδης, 2023).

1.3.3 Ακουστική εμπέδηση και συντελεστής ανάκλασης

Η ακουστική εμπέδηση ενός μέσου εκφράζει την αντίσταση που προβάλλει το μέσο στη διάδοση των σεισμικών κυμάτων και ορίζεται από τη σχέση:

$$Z = \rho \times v \quad (1.3)$$

Όπου Z η ακουστική εμπέδηση, ρ είναι η πυκνότητα του μέσου (kg/m^3), v η ταχύτητα διάδοσης των P-κυμάτων (m/s).

Εξαρτάται από την πυκνότητα και την ελαστικότητα του υλικού και είναι ανεξάρτητη της συχνότητας.

Όταν σεισμικό κύμα προσπίπτει σε όριο δύο στρωμάτων με διαφορετικές ακουστικές εμπεδήσεις, ένα μέρος της ενέργειας ανακλάται και ένα άλλο μέρος διαθλάται. Η ένταση της ανακλώμενης ενέργειας σε σχέση με την προσπίπτουσα εξαρτάται από τη διαφορά στην ακουστική εμπέδηση των δύο μέσων και προσδιορίζεται μέσω του συντελεστή ανάκλασης (RC):

$$RC = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1.4)$$

Όπου Z_1 και Z_2 είναι οι ακουστικές εμπεδήσεις των δύο στρωμάτων.

Εάν ο συντελεστής ανάκλασης είναι θετικός, τότε το ανακλώμενο κύμα έχει την ίδια φάση με το προσπίπτον, ενώ αν είναι αρνητικός, τότε το ανακλώμενο κύμα έχει αντίθετη φάση. Αναλυτικότερα, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά στην ακουστική εμπέδηση, τόσο μεγαλύτερο είναι το κλάσμα RC (Βαφείδης, 2023). Οπότε:

- Για $Z_1 = Z_2$, τότε υπάρχει 100% μετάδοση και καμία ανάκλαση.
- Σε οποιαδήποτε διεπιφάνεια με αέριο (για τα οποία το Z είναι αμελητέο), παρατηρείται ολική ανάκλαση.

Όσον αφορά τις θαλάσσιες διασκοπήσεις, στις οποίες εφαρμόζεται η μέθοδος σεισμικής ανάκλασης υψηλής ανάλυσης, ο συντελεστής ανάκλασης μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από τη σκέδαση λόγω της τραχύτητας της επιφάνειας του ορίου (Mosher & Simpkin, 1999).

Τέλος, ένας ακόμη λόγος που η ακουστική εμπέδηση είναι τόσο σημαντική στις σεισμικές έρευνες είναι το γεγονός ότι τα συστήματα χαρτογράφησης εντοπίζουν τις μεταβολές αυτής και όχι τους ίδιους τους υποθαλάσσιους σχηματισμούς, διότι οι μεταβολές της μπορούν να μεταφραστούν και ως μεταβολές στις πυκνότητες των σχηματισμών (Κανελλόπουλος, 2021).

1.4 Εξοπλισμός και συλλογή δεδομένων

1.4.1 Εξοπλισμός σε χερσαίες και θαλάσσιες διασκοπήσεις

Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης βασίζεται στον παρακάτω εξοπλισμό:

1. Τη σεισμική πηγή, η οποία παράγει τεχνητά σεισμικά κύματα, τα οποία μπορεί να προέρχονται από εκρηκτικά, ταλαντωτές (vibroiseis), ειδικές υποθαλάσσιες πηγές, όπως air guns (θαλάσσιες διασκοπήσεις).
2. Τους δέκτες, οι οποίοι καταγράφουν την εδαφική ή την υποθαλάσσια ταλάντωση. Είναι τα γεώφωνα, που χρησιμοποιούνται σε χερσαίες εφαρμογές και τα υδρόφωνα σε θαλάσσιες.
3. Τα καταγραφικά, τα οποία ψηφιοποιούν, ενισχύουν και αποθηκεύουν σήματα που προέρχονται από τους δέκτες για την περαιτέρω επεξεργασία τους.

Γενικά, τα σήματα ενισχύονται, μετατρέπονται σε ψηφιακή μορφή και αποθηκεύονται μαζί με τις παραμέτρους της γεωμετρίας του πειράματος, δηλαδή τις θέσεις πηγών και δεκτών.

Παρόλο που έχει γίνει μια πιο γενική ανάλυση ορισμένων εννοιών, στη συνέχεια και πιο ξεκάθαρα, στην [Ενότητα 1.6](#) και στο [Κεφάλαιο 3](#), θα δοθεί περισσότερη έμφαση στις θαλάσσιες εφαρμογές.

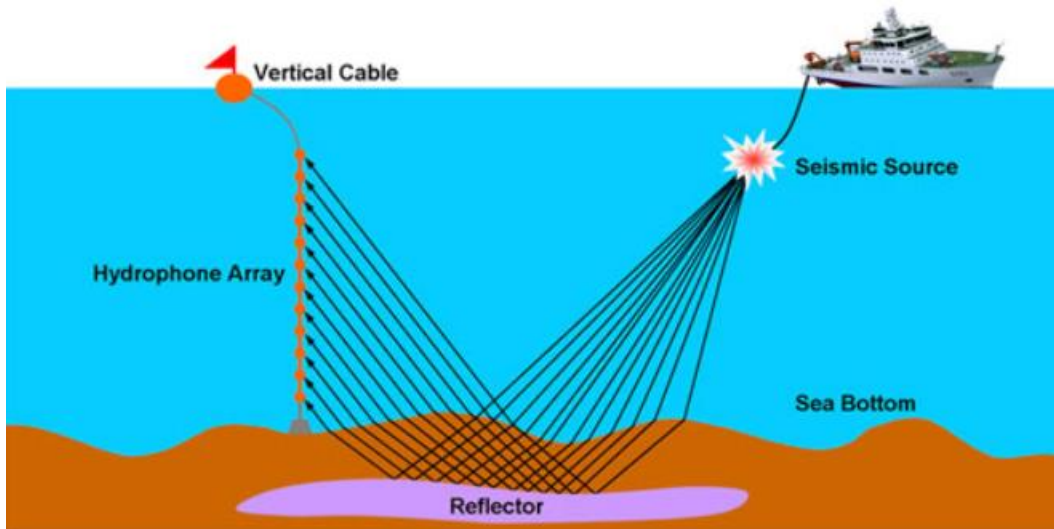
1.4.2 Δέκτες

Πιο αναλυτικά, το *γεώφωνο* είναι ένας σεισμικός αισθητήρας που χρησιμοποιείται συνήθως στη χερσαία σεισμική εξερεύνηση για τη μέτρηση της εδαφικής κίνησης και τη μετατροπή αυτής σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτοί οι αισθητήρες είναι απαραίτητοι για την ανίχνευση και την καταγραφή των σεισμικών ανακλάσεων κατά το διάστημα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στο υπέδαφος. Ο πιο συνηθισμένος σχεδιασμός χρησιμοποιεί ένα σύστημα κινούμενου πηνίου, αναρτημένο από ένα ελατήριο μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο (μαγνήτης). Η κίνηση του εδάφους προκαλεί την κίνηση του πηνίου, δημιουργώντας μια τάση ανάλογη με την ταχύτητα ταλάντωσης του εδάφους (Makama, et al., 2021).

Το *υδρόφωνο* είναι μια συσκευή που έχει σχεδιαστεί για τη μέτρηση των ακουστικών κυμάτων στο νερό και λειτουργεί ως υποβρύχιο μικρόφωνο.

Τα υδρόφωνα περιλαμβάνουν ανθεκτική μηχανική σχεδίαση, ανίχνευση ακουστικής πίεσης και προηγμένα ηλεκτρονικά συστήματα. Εφευρέθηκε το 1929 από τον Reginald Fessenden, αρχικά με την ονομασία ταλαντωτής Fessenden, και αργότερα επανασχεδιάστηκε από τη Γαλλία κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου για τον εντοπισμό Γερμανικών υποβρυχίων (German sappers).

Οι πρόσφατες εξελίξεις έχουν οδηγήσει σε νέους μηχανισμούς ανίχνευσης, με χώρες όπως η Κίνα να αναπτύσσουν διανυσματικά υδρόφωνα που χρησιμοποιούν τεχνολογίες κινούμενου πηνίου, ταχύτητας, πιεζοηλεκτρικής, πιεζοαντίστασης και οπτικών ινών. Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται σε εμπορικές, SONAR (Sound navigation and ranging) και στρατιωτικές εφαρμογές. Οι συστοιχίες ή τα δίκτυα υδρόφωνων βελτιώνουν την απόδοση τόσο σε ενεργό όσο και σε παθητικό τρόπο λειτουργίας, χρησιμοποιώντας ειδικές τεχνικές και αλγόριθμους (Saheban & Kordrostami, 2021).



Εικόνα 1.3: Παράδειγμα κατακόρυφης συστοιχίας υδροφώνων (Wang, et al., 2021) .

1.4.3 Σεισμικές πηγές

Οι σεισμικές πηγές είναι βασικά στοιχεία των σεισμικών ερευνών, καθώς δημιουργούν ελαστικά κύματα, τα οποία διερευνούν τη δομή του υπεδάφους. Τα ελαστικά κύματα παράγονται είτε από φυσικά φαινόμενα (όπως σεισμοί, κύματα, άνεμοι) είτε από τεχνητές πηγές (εκρήξεις, μηχανικά χτυπήματα) που χρησιμοποιούνται στην εφαρμοσμένη γεωφυσική. Ο στόχος των τεχνητών πηγών είναι η παραγωγή σύντομης χρονικής διάρκειας κυματιδίων, τα οποία βελτιώνουν την κατακόρυφη ανάλυση, ακόμη και αν το ίδιο το κύμα αποδυναμώνεται με το βάθος.

Όπως και οι δέκτες, έτσι και οι σεισμικές πηγές ταξινομούνται σε χερσαίες και θαλάσσιες, ανάλογα με το περιβάλλον εφαρμογής. Η τεχνολογία των υδραυλικών ταλαντωτών (Vibroseis) αποτέλεσε την πιο διαδεδομένη εναλλακτική σεισμική πηγή λόγω της δυνατότητας ελεγχόμενης δημιουργίας σεισμικών σημάτων και της χαμηλής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης (Βαφείδης, 2023).

Κατά τη θαλάσσια σεισμική χαρτογράφηση, που αφορά στην παρούσα διπλωματική εργασία, όλες οι ακουστικές πηγές που χρησιμοποιούνται πρέπει να επιτρέπουν τη

μετατροπή της ενέργειας σε κύμα πίεσης, το οποίο διαδίδεται από την ακουστική πηγή προς το υδάτινο μέσο και υπόκειται στους φυσικούς νόμους της ανάκλασης, της απορρόφησης, της περίθλασης, της διάθλασης και της σκέδασης στα μέσα υποδοχής.

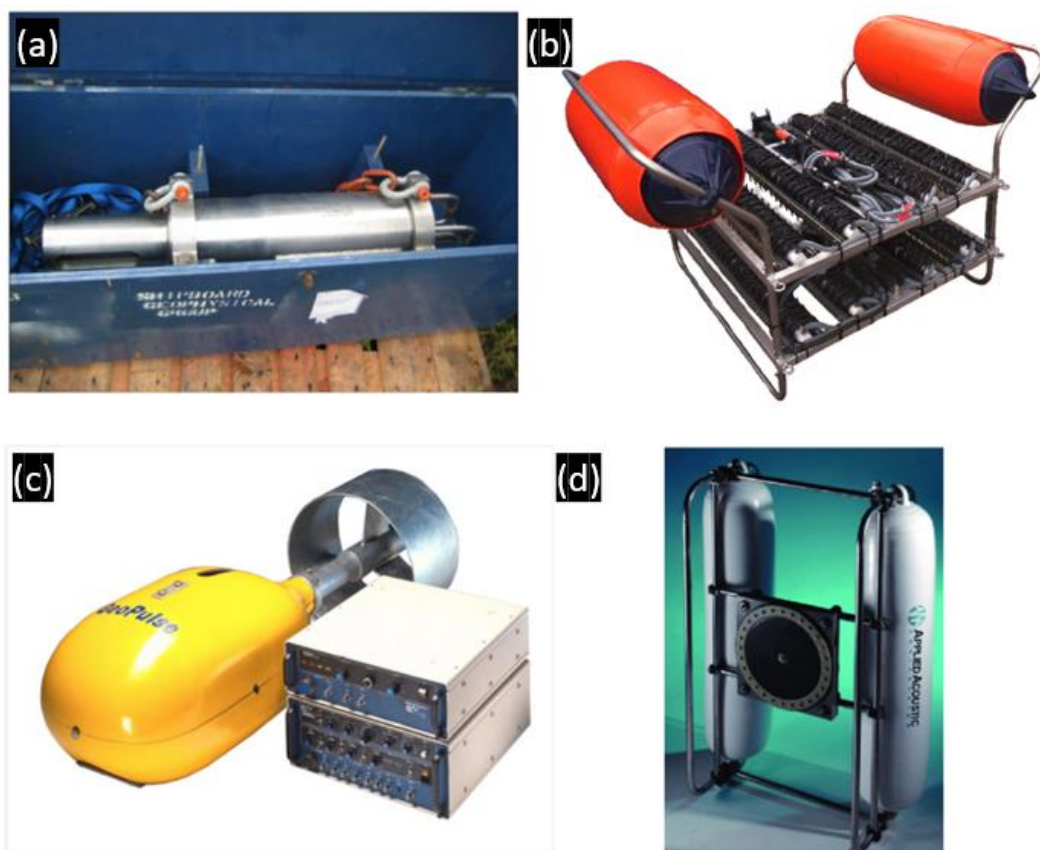
Υπάρχουν τέσσερις μεγάλες κατηγορίες θαλάσσιων μελετών υψηλής ανάλυσης που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα (Mosher & Simpkin, 1999).

- 1) Ελεγχόμενης κυματομορφής (controlled waveform)
- 2) Επιταχυνόμενη μάζα νερού (accelerating water mass)
- 3) Δημιουργίας έκρηξης (implosive and explosive)

Λεπτομερώς, στο θαλάσσιο περιβάλλον, η παραγωγή ελεγχόμενων σεισμικών κυμάτων επιτυγχάνεται κυρίως με χρήση αεροβόλων ακαριαίας εκκένωσης (air guns). Τα αεροβόλα αυτά είναι συσκευές που απελευθερώνουν απότομα πεπιεσμένο αέρα σε υψηλή πίεση μέσα στο νερό, δημιουργώντας μια στιγμιαία ακουστική διαταραχή. Η διαταραχή αυτή δημιουργεί σεισμικά κύματα που διαδίδονται στο θαλάσσιο πυθμένα και κατόπιν, καταγράφονται από υδρόφωνα, συνδεδεμένα σε σεισμικά καλώδια. Παρόλο που το κόστος τους είναι υψηλό, έχουν καλή επαναληψιμότητα και είναι φιλικά προς το περιβάλλον.

Επιπλέον, στις θαλάσσιες πηγές ανήκουν (βλ. Εικόνα 1.4) (Βαφείδης, 2023):

1. το water gun (υδροβόλο), που εκτοξεύει νερό με μεγάλη ταχύτητα με αποφυγή φυσαλίδων,
2. το Sparker (ηλεκτρικός εκκενωτής), που βασίζεται στην μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε ακουστικά κύματα λόγω εκφόρτισης πυκνωτή,
3. το pinger,
4. το boomer, που εκπέμπει ακουστικούς παλμούς χαμηλής συχνότητας (200–8000 Hz) μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης σε πηνία. Η ενέργεια μεταδίδεται σε μια μεμβράνη, η οποία με την κίνησή της δημιουργεί το ακουστικό κύμα που διαδίδεται στο νερό και κατευθύνεται προς τον πυθμένα για τη χαρτογράφηση των υποθαλάσσιων στρωμάτων (Κανελλόπουλος, 2021).
5. το Chirp, το οποίο θα αναλυθεί εκτεταμένα στο [Κεφάλαιο 2](#) και είναι επίσης το «επίκεντρο» της εργασίας αυτής.



Εικόνα 1.4: (a) Υδροβόλο (water gun) με πιστόνι (Morrow, et al., 2015). (b) Ηλεκτρικός εκκενωτής (sparker) (Geo Marine Survey Systems, 2024) (c) Pinger (Unique Group, 2025) (d) Boomer (Veeken & van Moerkerken, 2013).

Η ικανότητα διείσδυσης του σήματος κάτω από τον πυθμένα του νερού είναι υψηλή για το Sparker, περιορισμένη για τα Boomer και Pinger, ενώ χαμηλή για το Sonar.

Στην κατηγορία της ανάλυσης, υπερέχουν τα Sonar, Boomer και Chirp, ενώ το Sparker υστερεί. Η κατευθυντικότητα του σήματος παρουσιάζει γενικά περιορισμούς, με μόνη εξαίρεση το Sparker. Επιπλέον, σχεδόν όλα τα συστήματα επιτρέπουν υψηλή δυνατότητα καταβύθισης του οργάνου, με εξαίρεση το Boomer. Τέλος, παρατηρείται υψηλή επαναληψιμότητα και αποδοτικότητα σε όλα τα συστήματα, κάτι που υποδεικνύει την αξιοπιστία τους στη συλλογή δεδομένων σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Συνεπώς, η επιλογή του κατάλληλου εργαλείου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις απαιτήσεις της εκάστοτε μελέτης, ισορροπώντας μεταξύ βάθους διείσδυσης, ανάλυσης και λειτουργικής ευκολίας (Mosher & Simpkin, 1999; Κανελλόπουλος, 2021).

Ανακεφαλαιώνοντας, Η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται επίσης από την κατακόρυφη ανάλυση, την απουσία «θορύβου» και την επαναληψιμότητα. Ωστόσο, η χρήση τους

υπόκειται σε αυστηρούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς, λόγω της αρνητικής επίδρασης σε θαλάσσια θηλαστικά.

1.4.4 Συλλογή Δεδομένων

Η συλλογή σεισμικών δεδομένων περιλαμβάνει την καταγραφή της απόκρισης της Γης σε ελεγχόμενες σεισμικές πηγές. Για την αποτελεσματική ερμηνεία αυτών των δεδομένων, τα μεμονωμένα σεισμικά ίχνη οργανώνονται σε διατάξεις. Κάθε διάταξη ορίζεται από μια κοινή γεωμετρική ιδιότητα, όπως η θέση της πηγής, η θέση του δέκτη ή το ενδιάμεσο σημείο. Αυτές οι συλλογές διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο τόσο στη συλλογή πεδίου όσο και στην επεξεργασία, καθώς επιτρέπουν την ανάλυση ταχύτητας, τη μείωση του θορύβου, την υπέρθεση (stacking) και την απεικόνιση (Bianco, 2011). Αναλυτικότερα (Βαφείδης, 2025):

1. Διάταξη Κοινής Πηγής (Common Shot Gather): Στην περίπτωση αυτή, όλα τα ίχνη προέρχονται από μία μόνο πηγή, αλλά καταγράφονται σε διαφορετικές θέσεις δέκτη.
2. Διάταξη Κοινού Γεωφώνου (Common Receiver Gather): ομαδοποιεί όλα τα ίχνη που καταγράφηκαν σε μια θέση δέκτη, αλλά από πολλές διαφορετικές πηγές.
3. Διάταξη Σταθερής Απόστασης Πηγής-Γεωφώνου (Common Offset Gather): περιλαμβάνει ίχνη που έχουν όλα την ίδια απόσταση μεταξύ της πηγής και του δέκτη (offset). Η συγκεκριμένη διάταξη αποτέλεσε βάση για την επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων του [Κεφαλαίου 4](#).
4. Διάταξη Κοινού Ενδιάμεσου Σημείου (Common Midpoint Gather): καταγράφονται ίχνη, όπου το μέσο γεωμετρικά σημείο μεταξύ της πηγής και του δέκτη είναι το ίδιο.

1.5 Επεξεργασία Δεδομένων

Η επεξεργασία δεδομένων αποτελεί βασικό στάδιο στη γεωφυσική έρευνα, καθώς μετατρέπει τις ακατέργαστες σεισμικές καταγραφές σε τομές υψηλής ποιότητας, που απεικονίζουν ικανοποιητικά τη γεωλογική δομή του υπεδάφους. Η διαδικασία της επεξεργασίας δεδομένων σεισμικής ανάκλασης βασίζεται σε μια σειρά από τεχνικές, με στόχο τη βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο και στην απεικόνιση των ανακλαστήρων στη σωστή γεωμετρική τους θέση. Μεταξύ των σημαντικότερων μεθόδων περιλαμβάνονται η αποσυνέλιξη, η υπέρθεση και η χωροθέτηση και η αυτόματη ενίσχυση σήματος – AGC ([Ενότητα 4.4.1](#)), οι οποίες εφαρμόζονται για να αποδώσουν ένα «καθαρό» τελικό αποτέλεσμα (Βαφείδης, 2023).

1.5.1 Αποσυνέλιξη

Αποτελεί βασικό στάδιο στην επεξεργασία σεισμικών δεδομένων για την απομάκρυνση της επίδρασης του κυματιδίου της πηγής από τα καταγεγραμμένα δεδομένα. Στο συνελκτικό μοντέλο, το σεισμικό ίχνος θεωρείται ως αποτέλεσμα της συνέλιξης του κυματιδίου με τη σεισμική απόκριση του υπεδάφους. Η αποσυνέλιξη επιχειρεί να αντιστρέψει αυτή τη διαδικασία, μετατρέποντας το κυματίδιο σε έναν παλμό μικρής διάρκειας και αυξάνοντας έτσι τη χρονική διακριτική ικανότητα. Για την εφαρμογή της χρησιμοποιούνται διάφορα φίλτρα, όπως το αντίστροφο φίλτρο και το φίλτρο Wiener, ενώ τεχνικές όπως η αποσυνέλιξη αιχμής και η αποσυνέλιξη πρόβλεψης συμβάλλουν περαιτέρω στη βελτίωση του σήματος. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων, που συχνά δημιουργούν σύγχυση στις σεισμικές τομές και μειώνουν την ποιότητα της ερμηνείας, ειδικότερα στις θαλάσσιες διασκοπήσεις, όπου τα σεισμικά κύματα παγιδεύονται στο νερό (Βαφείδης, 2023).

1.5.2 Υπέρθεση

Η σεισμική υπέρθεση είναι μια από τις βασικότερες διαδικασίες στην επεξεργασία δεδομένων σεισμικής ανάκλασης, καθώς επιτρέπει την ενίσχυση του λόγου σήματος προς θόρυβο. Η βασική της αρχή είναι ότι πολλά σεισμικά ίχνη, τα οποία έχουν καταγραφεί από διαφορετικούς συνδυασμούς πηγών και δεκτών, μπορούν να αντιστοιχούν στο ίδιο σημείο ανάκλασης στο υπέδαφος. Αυτά τα ίχνη ομαδοποιούνται και αντιμετωπίζονται ως καταγραφές κοινού ενδιαμέσου σημείου (Common Mid-Point Gather - CMP). Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται πολλαπλή δειγματοληψία του ίδιου τμήματος του ανακλαστήρα, γεγονός που αυξάνει σημαντικά την αξιοπιστία του αποτελέσματος.

Η διαδικασία αυτή υλοποιείται σε δύο βασικά στάδια. Στο πρώτο στάδιο εφαρμόζεται η διόρθωση κανονικής χρονικής απόκλισης (NMO), η οποία λαμβάνει υπόψη ότι τα σεισμικά κύματα χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να φτάσουν σε δέκτες που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από την πηγή, με αποτέλεσμα οι καμπύλες χρόνου να έχουν μορφή υπερβολής. Η διόρθωση κανονικής χρονικής απόκλισης μετατρέπει τις καμπύλες αυτές σε πιο επίπεδη μορφή, ευθυγραμμίζοντας τα γεγονότα που προέρχονται από τον ίδιο ανακλαστήρα σε όλα τα ίχνη μιας ομάδας κοινού ενδιαμέσου σημείου.

Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται η άθροιση (stacking) των διορθωμένων ιχνών. Καθώς το σήμα από τον ίδιο ανακλαστήρα προστίθεται, ενώ ο τυχαίος θόρυβος τείνει να ακυρώνεται, το αποτέλεσμα είναι μια ενίσχυση του σήματος και σημαντική βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο. Το στάδιο αυτό καθιστά την τομή υπέρθεσης πιο καθαρή και πιο εύκολη στην ερμηνεία (Βαφείδης, 2023).

1.5.3 Χωροθέτηση

Η χωροθέτηση (migration) αποτελεί επίσης βασικό στάδιο της επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων, διότι εξασφαλίζει ότι οι ανακλαστήρες θα αποδοθούν στη σωστή γεωμετρική τους θέση μέσα στο υπέδαφος. Στις συμβατικές τομές υπέρθεσης, οι κεκλιμένοι ή καμπύλοι ανακλαστήρες εμφανίζονται μετατοπισμένοι, ενώ συχνά παρουσιάζουν λανθασμένη κλίση ή μήκος. Αυτό συμβαίνει διότι οι καταγραφές βασίζονται στον χρόνο διαδρομής των κυμάτων και όχι στην πραγματική χωρική τους πορεία.

Η αρχή της χωροθέτησης στηρίζεται στην ιδέα ότι κάθε σημείο της τομής υπέρθεσης μπορεί να θεωρηθεί ως πηγή δευτερογενών κυμάτων, σύμφωνα με την αρχή του Huygens. Μέσω της χωροθέτησης, η ενέργεια που εμφανίζεται στο «λάθος» σημείο της τομής μεταφέρεται πίσω στη σωστή του θέση. Με αυτόν τον τρόπο τα γεωλογικά όρια αποκαθίστανται και η σεισμική εικόνα γίνεται συγκρίσιμη με την γεωλογική τομή.

Εκτός από την αποκατάσταση της γεωμετρίας των ανακλαστήρων, η χωροθέτηση συμβάλλει και στη βελτίωση της χωρικής ανάλυσης, διότι διορθώνει φαινόμενα περιθλασης τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν ψευδείς εικόνες στη σεισμική τομή. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι χωροθέτησης, με πιο χαρακτηριστική τη μέθοδο Kirchhoff, αλλά και τεχνικές που εφαρμόζονται σε τομές σταθερού offset. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του γεωλογικού μοντέλου και την επιθυμητή ακρίβεια (Βαφείδης, 2023).

1.6 Θαλάσσιες Εφαρμογές

Τα δεδομένα σεισμικής ανάκλασης είναι ζωτικής σημασίας για τη χαρτογράφηση του υπεδάφους και τον εντοπισμό γεωλογικών χαρακτηριστικών που σχετίζονται με τα υδροφόρα στρώματα σε παράκτια και θαλάσσια περιβάλλοντα. Βοηθούν στον καθορισμό των ιδιοτήτων των ταμιευτήρων, της διαπερατότητας των υδροφόρων οριζόντων και τον καθορισμό της ακτογραμμής σε αρχαιότερη εποχή. Επίσης, μπορούν να προσδιορίσουν εμπόδια διαπερατότητας, παλαιοηπειρωτικά περιβάλλοντα, μεταβολές της στάθμης της θάλασσας και προνομιακές διόδους ροής του υπόγειου νερού.

Τα σεισμικά δεδομένα απεικονίζουν γεωμορφολογικά και δομικά χαρακτηριστικά, όπως υποθαλάσσια κανάλια και φαράγγια, σπηλαιώσεις και ρήγματα. Για παράδειγμα, τα θαμμένα παλαιο-κανάλια και φαράγγια μπορούν να συμβάλουν στην υποθαλάσσια εκφόρτιση των υπόγειων υδάτων χρησιμεύοντας. Σε καρστικά πεδία, τα σεισμικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναγνωριστεί αν οι σπηλαιώσεις είναι ενεργές ή απολιθωμένες και αν έχουν υποστεί πολλαπλές φάσεις κατάρρευσης.

Ως εκ τούτου, οι σεισμικές έρευνες ανάκλασης χρησιμοποιούνται για την ανάλυση του υπεδάφους και την αναζήτηση υπόγειων υδάτων (Bertoni, et al., 2020).

Σύμφωνα με την εταιρία Innomar οι μέθοδοι σεισμικής ανάκλασης υψηλής ανάλυσης εφαρμόζονται συχνά σε θαλάσσιες έρευνες με στόχο τη χαρτογράφηση των υποθαλάσσιων σχηματισμών και τη δημιουργία γεωλογικού μοντέλου. Οι εφαρμογές του είναι οι εξής:

1. Γεωλογικές μελέτες υποθαλάσσιων σχηματισμών
2. Αναζήτηση ορυκτών πόρων
3. Χαρτογράφηση πυθμένα
4. Εντοπισμός αντικειμένων ανθρώπινης προέλευσης (αγωγοί, ναυάγια)
5. Εντοπισμός αρχαιολογικών ευρημάτων

Επίσης αξίζουν να αναφερθούν και οι παρακάτω εφαρμογές:

6. Μελέτη και απεικόνιση Τεκτονικών Δομών και Ρηγματογενών Ζωνών (Kim, et al., 2016)
7. Εντοπισμός γεωθερμικών ταμιευτήρων (Kilinc, et al., 2025).
8. Μελέτη μαγματικών συστημάτων (Hall, et al., 2024).

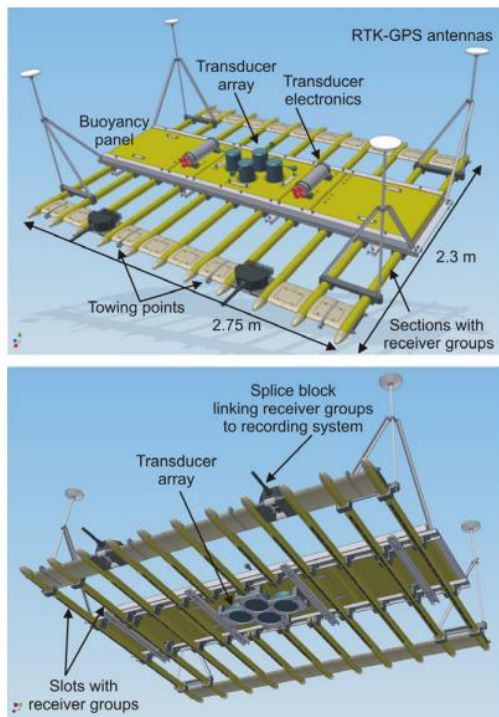
Συνολικά και πιο πρακτικά, οι θαλάσσιες γεωφυσικές έρευνες διεξάγονται με τη χρήση πλωτού σκάφους, το οποίο διαθέτει μεγάλου μήκους καλώδια με ενσωματωμένα υδρόφωνα στο πίσω μέρος του σκάφους. Τα υδρόφωνα διεγείρονται από τα ανακλώμενα κύματα, ο καταγραφέας καταγράφει τους χρόνους άφιξης και τέλος, γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων για την δημιουργία σεισμικής τομής της περιοχής έρευνας. Σε μικρότερο βάθος θάλασσας, χρησιμοποιούνται πλωτήρες με μικρότερες συστοιχίες υδροφώνων, μαζί με καταγραφικά όργανα. Τέτοιες συσκευές περιλαμβάνουν πλευρικά ισομετρικά ηχοβολιστικά και μαγνητόμετρα. Ακουστικές τεχνολογίες όπως το CHIRP χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία προφίλ του βυθού με εξαιρετικά υψηλή ανάλυση (Κανελλόπουλος, 2021).

Κεφάλαιο 2^ο : Chirp Sub-Bottom Profiler

2.1 Chirp Sub-Bottom Profiler

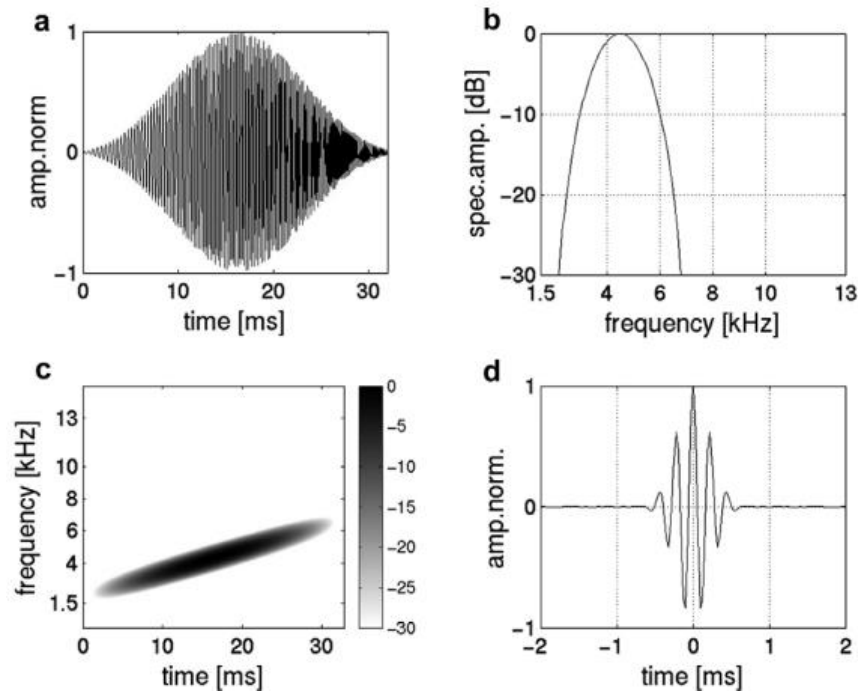
Τα συστήματα Sub-Bottom Profilers (SBP) αποτελούν χρήσιμα εργαλεία θαλάσσιας γεωφυσικής έρευνας. Ανάμεσα στους τύπους SBP, το σύστημα Chirp ξεχωρίζει χάρη στη χρήση παλμών με διαβαθμισμένη συχνότητα (Εικόνα 2.1), που προσφέρουν αυξημένη ανάλυση και ικανότητα διείσδυσης στα ιζήματα. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την απεικόνιση των υποεπιφανειακών στρωμάτων και την ανίχνευση αλλαγών στην ακουστική εμπέδηση, αποκαλύπτοντας στρωματογραφικές πληροφορίες για την ιζηματογένεση μιας περιοχής. Αν και η απόδοση του εξαρτάται από τον τύπο του συστήματος, υπό κατάλληλες συνθήκες μπορεί να επιτευχθεί διείσδυση έως και 50 μέτρα, με αποτέλεσμα το σύστημα αυτό να είναι ιδανικό για εφαρμογές όπως η εγκατάσταση υπεράκτιων υποδομών (INNOMAR Technologie GmbH, 1997).

Αναλυτικότερα, τα Chirp Sub-Bottom Profilers είναι θαλάσσια συστήματα που χρησιμοποιούν μια επαναλαμβανόμενη κυματομορφή πηγής. Αποκτούν συσχετισμένα δεδομένα με κατακόρυφη ανάλυση δεκατόμετρου στα πρώτα 20-30 μέτρα των ιζημάτων. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά συστήματα για την παραγωγή επαναλαμβανόμενων κυματιδίων πηγής και μεταδίδουν σήματα διαμορφωμένα κατά συχνότητα (FM-Frequency Modulated), διορθωμένα για τις αποκρίσεις πηγής και δέκτη.



Εικόνα 2.1: Σύστημα υψηλής ανάλυσης Chirp Sub-Bottom Profiler. Το ρυμουλκούμενο άκαμπτο πλαίσιο πλάτους 2,75 m και μήκους 2,3 m φέρει 60 ομάδες δεκτών στις διαμήκεις τομές και μια συστοιχία τεσσάρων μετατροπέων σε ένα κεντρικό πλωτήριο. Οι μετατροπείς λειτουργούν σε εύρος 1,5–13 kHz. Η θέση του καθορίζεται με RTK-GPS και ένα σύστημα στάσης με τέσσερις κεραίες GPS συνδεδεμένες στο πλαίσιο (Gutowski, et al., 2008).

Τα συστήματα Chirp που λειτουργούν σε εύρος 400 Hz - 24 kHz επιτυγχάνουν βέλτιστη διεύθυνση και ανάλυση λόγω του μεγάλου εύρους συχνοτήτων του σήματος. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο ενισχύεται μέσω επεξεργασίας προσαρμοσμένου φίλτρου με συσχέτιση των δεδομένων ανάκλασης με τον μεταδιδόμενο παλμό. Τα συστήματα Chirp έχουν εφαρμογές σε γεωλογικά, γεωφυσικά, γεωτεχνικά και αρχαιολογικά έργα. Ο έλεγχος των κυματομορφών της πηγής Chirp είναι απλός και συχνά γίνεται σε δεξαμενές δοκιμών με νερό (Gutowski, et al., 2002).



Εικόνα 2.2: (a) Κυματομορφή στο χρονικό πεδίο, (b) Φάσμα ισχύος με κεντρική συχνότητα 4,5 kHz, (c) Φασματογράφημα που απεικονίζει τη μεταβολή της στιγμιαίας συχνότητας, με εντάσεις σε dB, (d) Κυματομορφή Klauder, του σήματος (Gutowski , et al., 2008).

Με απλά λόγια, σύμφωνα με την Meridata (Oy Meridata Finland Ltd, 2024), τα Chirp SBPs είναι εξοπλισμός που συνήθως λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 2 kHz, έως και μερικές δεκάδες kHz. Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος συχνοτήτων, τόσο καλύτερη είναι η ανάλυση, ενώ όσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα, τόσο καλύτερη είναι η διείδυση.

Πίνακας 2.1: Παραδείγματα Chirp SBP, που έχουν εφαρμοστεί στις περιπτώσεις ερευνών στο Κεφάλαιο 3, από διαφορετικές εταιρίες.

Σύστημα	Συχνότητες	Χαρακτηριστικά	Εφαρμογές
Teledyne Benthos Chirp III (Teledyne Benthos, 2006)	15 Hz - 200 kHz (ρυθμιζόμενο)	Διπλού καναλιού, διπλής συχνότητας, υποστήριξη ρυμουλκούμενων και σταθερών συστοιχιών, DSP-665 πομποδέκτης, 16-bit A/D converter, SEG-Υ αποθήκευση δεδομένων.	Υπεράκτιες έρευνες, ανίχνευση αγωγών, περιβαλλοντικές έρευνες, αιολικά πάρκα.
SyQwest Bathy-2010 CHIRP Profiler (SyQwest, Inc, 2025)	3,5 - 33 kHz	Συμβατό με Windows XP, γραμμικός πομπός ισχύος (LPT) 5KW-30KW, Ethernet συνδεσιμότητα, δυνατότητα σύνδεσης με πολλούς μορφοτροπείς.	Βαθυμετρικές και υποβρύχιες έρευνες σε ποτάμια, κανάλια, ωκεανούς.
Geoacoustics GeoPulse Sub-Bottom Profiler (GeoAcoustics Ltd, 2015)	2 - 12 kHz	Δυνατότητα ανάπτυξης επί γάστρας ή με ρυμούλκηση, ανάλυση έως 100 dB, προγραμματιζόμενη διάρκεια παλμού για μείωση των φαινομένων ringing, AGC και TVG ενισχυτές.	Υποβρύχια χαρτογράφηση, γεωλογικές έρευνες, μηχανική και σεισμικές μελέτες.
Edgetech 3200 CHIRP Sub-Bottom Profiler (EdgeTech, 2015-2018)	500 Hz - 24 kHz	Πλήρες φάσμα CHIRP, διαμόρφωση συχνότητας FM, 3200 Rack Mount Processor, 4,7 kW ενισχυτής, ρυμουλκούμενα SB-424, SB-216S, SB-512i.	Υποβρύχιες γεωλογικές και αρχαιολογικές έρευνες, λεπτομερής χαρτογράφηση πυθμένα.
Innomar SES-2000 Compact SBP (INNOMAR Technologie GmbH, 1997)	4 - 15 kHz	Ανάλυση έως 5 cm, απόκτηση δεδομένων πλήρους κυματομορφής SLF, λειτουργία Multi-ring, πλευρική σάρωση, αντιστάθμιση κίνησης.	Παράκτιες και ποτάμιες έρευνες, ιζηματολογικές μελέτες.

2.2 Κυριότερες εφαρμογές του Chirp Sub-Bottom Profiler

Οι κυριότερες και επιβεβαιωμένες εφαρμογές του Chirp SBP (Κεφάλαιο 3) περιλαμβάνουν (Κανελλόπουλος, 2021):

- 1) Την ανάλυση ιζημάτων και στρωματογραφίας, συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του πάχους των ιζημάτων με μη καταστροφικό τρόπο,

- 2) Τον εντοπισμό ναυαγίων και αρχαίων λιμενικών εγκαταστάσεων, διότι είναι χρήσιμα όταν είναι γνωστή η θέση ενός ναυαγίου ή για τη λεπτομερή μελέτη μιας ανωμαλίας που έχει εντοπιστεί. Μπορούν να εντοπίσουν θαμμένα ναυάγια ή να παράσχουν πληροφορίες σχετικά με το βάθος ταφής μερικώς θαμμένων ναυαγίων. Όσον αφορά τις λιμενικές εγκαταστάσεις, έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 3 η δυνατότητά τους να αναγνωρίζουν στοιχεία λιμενικών εγκαταστάσεων,
- 3) Την τοποθέτηση υποθαλάσσιων αγωγών και σωλήνων,
- 4) Την παρακολούθηση περιβαλλοντικού αντίκτυπου,
- 5) Την αρχαιολογία,
- 6) Την ανάλυση γεωκινδύνων,
- 7) Τον εντοπισμό ρηχών ρηγμάτων (Kim, et al., 2016) και
- 8) Τις πολυμεθοδολογικές έρευνες (Multibeam, Side-Scan Sonar κ.α.)

Τα συστήματα Chirp Sub-Bottom Profiler (SBP) συχνά συνδυάζονται με γεωφυσικά εργαλεία και μεθόδους για να βελτιώσουν την ερμηνεία των χαρακτηριστικών του υπεδάφους. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν σεισμικές πηγές Boomer και Sparker για μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης, γεωραντάρ για απεικόνιση υψηλής ανάλυσης σε ρηχά λιμναία ή ποτάμια, καθώς και σόναρ πλευρικής σάρωσης (SSS) για λεπτομερή χαρτογράφηση της υφής του πυθμένα και ηχοβολιστικά πολλαπλών ακτινών (MBES) για βαθυμετρικά δεδομένα υψηλής ανάλυσης.

Επιπλέον, η συνδυασμένη χρήση διαφορετικών συστημάτων Chirp, όπως το Edgetech 216, το Teledyne Benthos Chirp III ή το Innomar SES-2000, μπορεί να παρέχει ένα ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων και να βελτιστοποιήσει τόσο την κατακόρυφη ανάλυση όσο και την ικανότητα διείσδυσης. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται τεχνικές άμεσης δειγματοληψίας, όπως πυρηνοληψία, για την επαλήθευση και βαθμονόμηση των ακουστικών ερμηνειών με λιθολογικά και ιζηματολογικά δεδομένα. Αυτές οι προσεγγίσεις είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε πολύπλοκα περιβάλλοντα απόθεσης, όπως εκβολές ποταμών, υφαλοκρηπίδες και παγετώδεις-θαλάσσιες περιοχές, όπου μπορεί να απαιτείται περισσότερη λεπτομέρεια. Ιδιαίτερα παραδείγματα:

1. Εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων GPR (Ground Penetrating Radar) και CHIRP (σεισμική/ακουστική υψηλής συχνότητας) σε έρευνες σωλήνων που βρίσκονται θαμμένοι στον πυθμένα ποταμών και κόλπων που βρίσκονται στις νότιες και νοτιοανατολικές περιοχές της Βραζιλίας (Barsottelli-Botelho & Mesquita, 2015).
2. Συνδυασμός δεδομένων SBP με τεχνικές βαθιάς μάθησης (Deep Learning) για την ανίχνευση θαμμένων αγωγών στη θάλασσα, με στόχο τη δυνατότητα αντικατάστασης των χειροκίνητων μεθόδων ανίχνευσης, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα στις υποβρύχιες έρευνες αγωγών (Zheng, et al., 2021).

3. Συνδυασμός σύγχρονων μεθόδων όπως ηχοβολιστή πολλαπλών ακτινών (MBES), Sub-Bottom Profiler (SBP), μαγνητόμετρο καισίου (caesium) και σαρώσεις LiDAR. Η κύρια πλατφόρμα που χρησιμοποιήθηκε για τον συνδυασμό των δεδομένων της υποβρύχιας και της εναέριας έρευνας ήταν ένα περιβάλλον Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (GIS). Ως αποτέλεσμα, ανακαλύφθηκαν νέα αρχαιολογικά δεδομένα, συμπεριλαμβανομένων δύο αγνώστων γεφυρών και εκτεταμένων οχυρώσεων στην ακτογραμμή (Pydyn, et al., 2024).

2.3 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί του συστήματος Chirp

Τα Chirp SBPs «ισορροπούν» μεταξύ ανάλυσης και διεύθυνσης, χρησιμοποιώντας σαρώσεις διαμορφωμένες ως προς τη συχνότητα. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από μεγάλο εύρος συχνοτήτων, που εξασφαλίζει υψηλή ανάλυση, και μεγάλη διάρκεια παλμού, που επιτρέπει σχετικά μεγάλη ποσότητα ενέργειας εξόδου παρά τη χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Πλεονεκτήματα:

1. Τα συστήματα Chirp παρέχουν υψηλή οριζόντια και κατακόρυφη ανάλυση, επιτυγχάνοντας κατακόρυφη ανάλυση μερικών εκατοστών, ανάλογα με τη συχνότητα.
2. Είναι κατάλληλα για χρήση σε θαλάσσια περιβάλλοντα μικρού έως μέσου βάθους, όπως παράκτιες περιοχές και ρηχά ύδατα.
3. Έχουν τη δυνατότητα ανίχνευσης θαμμένων αντικειμένων μικρών διαστάσεων.
4. Ευέλικτη εφαρμογή στο πεδίο, λόγω δυνατότητας τοποθέτησής τους σε σκάφη ακόμη και μικρού μεγέθους, καθώς και γρήγορη ανάπτυξη και σε γενικές γραμμές χαμηλό κόστος (Ravnås, et al., 2023).
5. Διαθέτουν μεταβλητότητα στη συχνότητα του παραγόμενου ακουστικού σήματος ανάλογα με τον χρόνο, βελτιστοποιώντας την ευκρίνεια και το βάθος διεύθυνσης.
6. Παρουσιάζουν υψηλή ενεργειακή απόδοση, μετατρέποντας αποτελεσματικά την ηλεκτρική ενέργεια σε ακουστική για αποδοτικότερη λειτουργία.
7. Συνδυάζονται με άλλες τεχνικές ή εργαλεία προσφέροντας αρκετά ενισχυμένα αποτελέσματα της υποθαλάσσιας πολιτισμικής κληρονομιάς.

Μειονεκτήματα:

1. Περιορισμένη ανάλυση για μικρά αντικείμενα. Συγκεκριμένα, τα συστήματα Chirp SBP μπορούν να εντοπίσουν αντικείμενα μεγέθους έως 50 cm και σε βάθη έως 1.5 μέτρου, ενώ εκείνα μικρότερου μεγέθους (π.χ. κεραμικά θραύσματα, καρφιά, σκοιινιά, απανθρακωμένο ξύλο κ.α.) δεν εντοπίζονται, παρά μόνο με επιθεώρηση δυτών (Ravnås, et al., 2023).
2. Ενώ το Chirp SBP παρέχει καλή διείσδυση, η απόδοσή του μειώνεται όταν το ακουστικό σήμα συναντά συμπαγή υλικά. Έτσι, ο ήχος δεν τα διαπερνά, δημιουργώντας χαοτικό ακουστικό μοτίβο και εμποδίζοντας την αξιόπιστη απεικόνιση του υποκείμενου ιζήματος ή του βράχου. Έτσι, είναι λιγότερο αποτελεσματικό στον εντοπισμό ή τον χαρακτηρισμό στοιχείων κάτω από ή γύρω από αρχαιολογικές εγκαταστάσεις υψηλής πυκνότητας (Georgiou, et al., 2021a).
3. Καιρικές συνθήκες, όπως άνεμοι, υποβαθμίζουν τον λόγο σήματος προς θόρυβο, παράγοντας δεδομένα με θόρυβο που δεν μπορούν να καθαριστούν πλήρως αργότερα (Grøn & Boldreel, 2014).

Παρά τα μειονεκτήματα, τα πλεονεκτήματα (Κανελλόπουλος, 2021) του συστήματος Chirp, ιδιαίτερα η υψηλή ανάλυση και η καλή διείσδυση του, το καθιστούν πολύτιμο εργαλείο για λεπτομερείς υποθαλάσσιες έρευνες .

2.4 Κυματομορφή Klauder

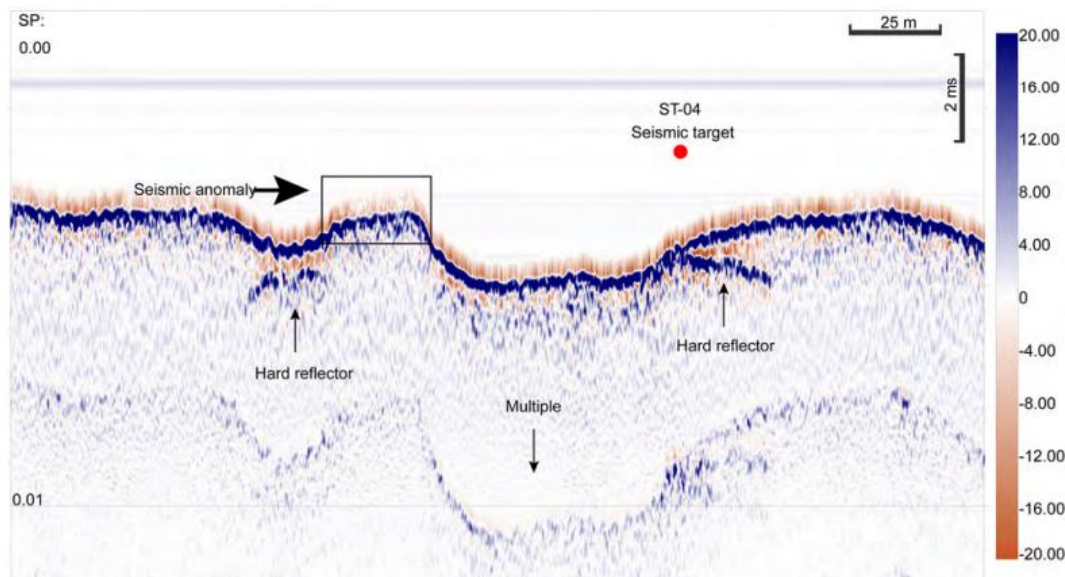
Το κυματίδιο (wavelet) Klauder είναι το αποτέλεσμα της σύγκρισης μιας σάρωσης (sweep), δηλαδή ενός σήματος που αποτελείται από ένα μεταβαλλόμενο εύρος συχνοτήτων με τον εαυτό του. Η σύγκριση αυτή γίνεται με μια διαδικασία που ονομάζεται αυτοσυσχέτιση. Στη γεωφυσική η έννοια αυτή εφαρμόζεται στη μέθοδο vibroseis, κατά την οποία, μια ελεγχόμενη σάρωση κυματομορφών μεταβαλλόμενης συχνότητας αποστέλλεται στο έδαφος. Οι ανακλάσεις που επιστρέφουν από τα στρώματα του υπεδάφους επεξεργάζονται στη συνέχεια με την συσχέτισή τους με την αρχική σάρωση. Αυτό το βήμα επεξεργασίας διαμορφώνει το τελικό καταγεγραμμένο σήμα έτσι ώστε να μοιάζει με το κυματίδιο Klauder, το οποίο ουσιαστικά γίνεται η κυματομορφή πηγής που χρησιμοποιείται στην τελική σεισμική καταγραφή. Αν και χρησιμοποιείται συχνά με γραμμικές σαρώσεις (όπου η συχνότητα αυξάνεται ή μειώνεται με σταθερό ρυθμό), το κυματίδιο Klauder μπορεί επίσης να προκύψει από μη γραμμικές σαρώσεις, δεδομένου ότι αυτές μπορούν να θεωρηθούν ότι αποτελούνται από πολλές επικαλυπτόμενες γραμμικές σαρώσεις. Τέλος, το κυματίδιο πήρε το όνομά του από τον John Rider Klauder (1932), έναν Αμερικανό μαθηματικό που συνέβαλε στην ανάπτυξή του (SEG Wiki (a), 2014) (Kim & Park, 2022).

2.5 Εμφανίσεις “haystack” στα σεισμικά προφίλ Chirp

Τα “haystacks”, τα οποία παρατηρήθηκαν στις επιλεγμένες έρευνες του Κεφαλαίου 3, είναι ακουστικές ανωμαλίες που παρατηρούνται στην υδάτινη φάση πάνω από τους βυθισμένους αρχαιολογικούς στόχους της εποχής του Λίθου, (βλ. Εικόνα 2.3). Ονομάστηκαν έτσι, διότι η εμφάνισή τους στα σεισμικά προφίλ μοιάζει με σωρό από άχυρο (Fitch & Hale, 2025).

Τα χαρακτηριστικά αυτά παρατηρήθηκαν για πρώτη φορά στην τοποθεσία Atlit Yam στο Ισραήλ (Grøn, et al., 2018) και στη συνέχεια έκαναν την εμφάνισή τους και σε άλλες βυθισμένες τοποθεσίες. Πιθανόν, πρόκειται για συγκεντρώσεις στενών «στηλών» θορύβου στην υδάτινη φάση, με παρόμοιες ακουστικές αποκρίσεις με εκείνες που λαμβάνονται σε πειράματα, ενδεχομένως από τη συγκέντρωση υπολειμμάτων επεξεργασμένου πυριτόλιθου (απολεπίσματα).

Η προέλευση των “haystacks” συνδέεται με τον ακουστικό συντονισμό των απολεπισμάτων, που αποτελούν βασικά γνωρίσματα των ευρημάτων της Εποχής του Λίθου. Σε αντίθεση με τα φυσικά σπασμένα κομμάτια, εκείνα που έχουν υποστεί επεξεργασία από τον άνθρωπο ανταποκρίνονται στην ακουστική διέγερση, με αποτέλεσμα να παράγουν ακουστικές αποκρίσεις. Τα χαρακτηριστικά της ακουστικής απόκρισης από τα υποπροϊόντα επεξεργασίας πυριτόλιθου ξεχωρίζουν από τις φυσαλίδες αερίου στη φάση του νερού, καθώς δεν εκτείνονται σε όλη τη διαδρομή από τον πυθμένα μέχρι την επιφάνεια του νερού (Grøn, et al., 2021).



Εικόνα 2.3: Απεικόνιση παραδείγματος σεισμικής «ανωμαλίας» (Fitch & Hale, 2025).

Ωστόσο, ανεξάρτητες έρευνες δεν κατέληξαν σε συγκρίσιμα αποτελέσματα και υπάρχουν αμφιβολίες ότι τα “haystacks” μπορεί να μην συνδέονται αποκλειστικά με τα υποπροϊόντα

επεξεργασίας του πυριτόλιθου, δηλαδή έχει επισημανθεί η πιθανότητα δημιουργίας παρόμοιων αποκρίσεων από τους εξής παράγοντες:

1. μη ανθρωπογενή λίθινα υλικά
2. ρυθμίσεις οργάνων
3. εργασίες πεδίου και παράμετροι επεξεργασίας

Μια μελέτη στον κόλπο Apalachee της Φλόριντα απέτυχε να συσχετίσει επακριβώς πιθανά “haystacks” με γνωστές τοποθεσίες που περιείχαν επεξεργασμένα υπολείμματα πυριτόλιθου. Παρόλο που παρατηρήθηκαν κάποιες διαταραχές, δεν ήταν διακριτές και δεν εμφανίστηκαν σε όλες τις γνωστές τοποθεσίες. Συμπερασματικά, τα χαρακτηριστικά “haystack” δεν πρέπει να θεωρούνται αποδεικτικά στοιχεία των επεξεργασμένων λίθινων υλικών, αλλά μάλλον ως γεωφυσικές ανωμαλίες που απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση (Fitch & Hale, 2025).

Κεφάλαιο 3^ο : Θαλάσσιες σεισμικές διασκοπήσεις για τον εντοπισμό θαμμένων δομών σε ρηχό περιβάλλον

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται επιλεγμένες περιπτώσεις ερευνών άμεσα συνδεδεμένες με την μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης και ιδιαίτερα με το σύστημα Chirp Sub-Bottom Profiler (SBP) και τους παράγοντες οι οποίοι συμβάλλουν στην χαρτογράφηση, στην απεικόνιση και τον εντοπισμό αρχαιολογικών θέσεων σε ρηχά θαλάσσια περιβάλλοντα. Οι έρευνες αυτές διαφοροποιούνται τόσο στις γεωγραφικές περιοχές (Ευρώπη, Μέση Ανατολή, Ασία) και τις χρονολογικές περιόδους κατασκευής των αρχαιολογικών δομών, όσο και στη συνδυαστική χρήση σεισμικής ανάκλασης με π.χ. γεωτρήσεις (Boldreel, et al., 2025), συστήματα αυτόνομης πλοήγησης (ASV) (Ravnås, et al., 2023), τηλεχειριζόμενα υποβρύχια οχήματα (ROV) (Hamouda, et al., 2021a) ή και άλλες τεχνικές.

Η χρήση του συστήματος Chirp Sub-Bottom Profiler συμβάλλει σημαντικά στην υποβρύχια αρχαιολογία, διότι δίνει την δυνατότητα διάκρισης στρωματογραφικών αλλαγών και εντοπισμό θαμμένων ανθρωπογενών στοιχείων σε συνθήκες και περιβάλλοντα, τα οποία δεν ευνοούν τον εντοπισμό τους με άλλες μεθόδους ή δεν παρέχουν την αναγκαία ορατότητα για τον εντοπισμό ενός στόχου.

Τέλος, ακολουθεί μια μικρή συγκριτική ανάλυση των ερευνών, δίνοντας έμφαση στα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της κάθε περίπτωσης. Η ανάλυση των περιπτώσεων ερευνών έχει οργανωθεί σε θεματικές ενότητες ανάλογα τον τύπο της έρευνας και τα ερωτήματα που θέτονται.

3.2 Ανασκόπηση Επιλεγμένων Ερευνών

Οι έρευνες που επιλέχθηκαν, για την ανάδειξη της χρήσης και της αποτελεσματικότητας ή και των περιορισμών του συστήματος Chirp SBP, διαφοροποιούνται ως εξής:

- Χρήση για την Ανίχνευση Καταλοίπων λίθινης εποχής (Stone Age sites).
- Χαρτογράφηση αρχαίων λιμενικών εγκαταστάσεων.
- Ανίχνευση ναυαγίων και βυθισμένων κατασκευών.

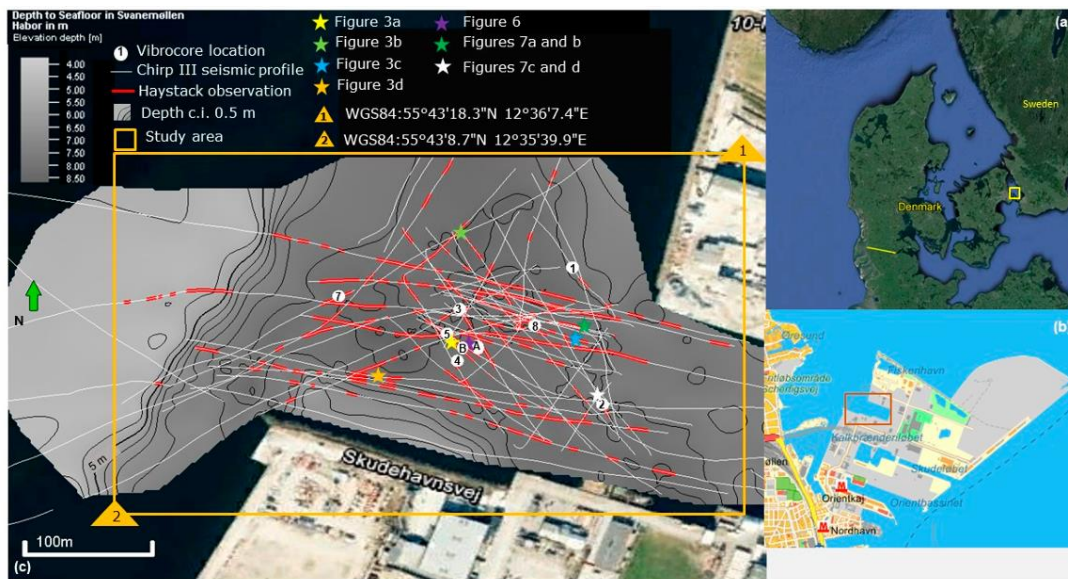
3.2.1 Χρήση του Chirp SBP για την Ανίχνευση Καταλοίπων λίθινης εποχής (Stone Age sites).

Ανίχνευση και χαρτογράφηση της Μεσολιθικής τοποθεσίας στη Δανία

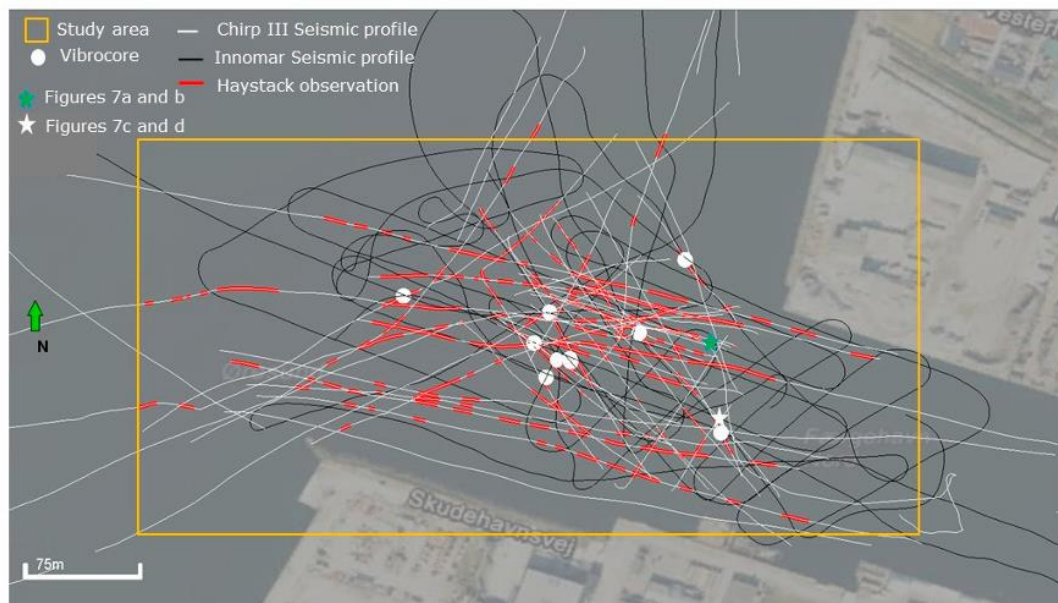
Η συγκεκριμένη περίπτωση αποτέλεσε πρωτοπόρα μελέτη όσον αφορά στον εντοπισμό βυθισμένων και έπειτα θαμμένων Μεσολιθικών οικισμών, με τη χρήση γεωφυσικών μεθόδων. Η έρευνα έλαβε χώρα στο λιμάνι Svanemøllen (βλ. Εικόνα 3.1.a) στην Κοπεγχάγη της Δανίας, ανέδειξε την μέθοδο HALD (Human-Altered Lithic Detection) και χρησιμοποίησε σεισμικά δεδομένα υψηλής ανάλυσης.

Κατά τη διάρκεια της έρευνας, διασκοπήθηκαν σεισμικές γραμμές με τη χρήση του συστήματος υψηλής ανάλυσης Teledyne Chirp III στην περιοχή του υπό μελέτη λιμανιού. Το σύστημα αυτό, που λειτουργεί σε εύρος συχνοτήτων 2 έως 20 kHz, βοήθησε στην απεικόνιση του πυθμένα και διευκόλυνε τον εντοπισμό των ακουστικών διαταραχών “haystacks”, οι οποίες φαίνονται κυρίως πάνω από διατηρημένες ρηχές λεκάνες και ποτάμια σε παλαιοπαράκτιο πλαίσιο (βλ. Εικόνες 3.2, 3.3, 3.4). Θεωρήθηκε ότι οι διαταραχές αυτές προέρχονται από την ύπαρξη ανθρωπογενώς τροποποιημένων κομματιών πυριτόλιθου, τα οποία βρίσκονταν θαμμένα περίπου 80 έως 90 εκατοστά κάτω από τον πυθμένα, γεγονός που στη συνέχεια επιβεβαιώθηκε μέσω πυρηνοληψίας (vibrocores) και μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων (FE - Finite Element Modelling). Για την εξακρίβωση των ευρημάτων, έγινε η χρήση 11 πυρήνων (vibrocores) σε περιοχές, όπου παρουσιάστηκαν οι ακουστικές διαταραχές, δύο από τους οποίους (πυρήνες A και B) περιείχαν θρύμματα πυριτόλιθου.

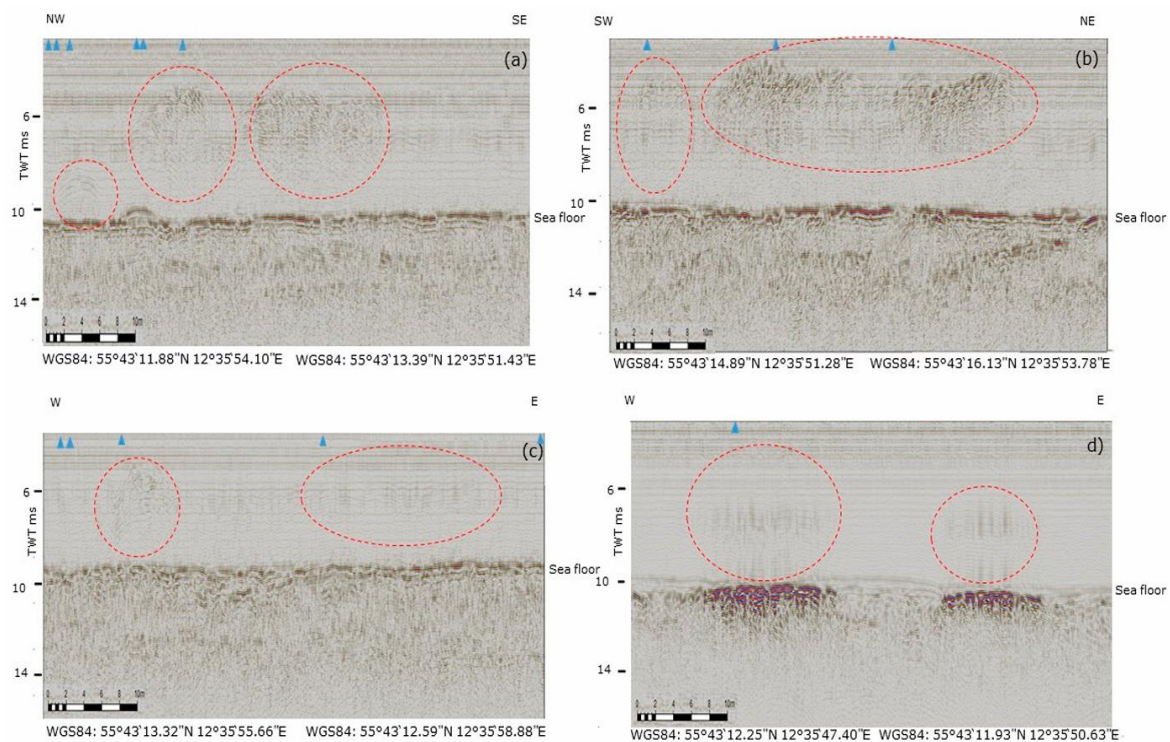
Για λόγους σύγκρισης, έγινε η λήψη επίσης σεισμικών δεδομένων με το σύστημα Innomar SES-2000, ένα παραμετρικό SBP, που έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά στη θαλάσσια αρχαιολογία. Όμως, το σύστημα αυτό απέτυχε να ανιχνεύσει χαρακτηριστικά των haystacks που εντοπίστηκαν από το Chirp III (βλ. Εικόνα 3.5). Η αντίθεση αυτή αναδεικνύει μια διαφορά στην ευαισθησία και την ακουστική απόκριση των συστημάτων. Τα δεδομένα του Innomar, παρείχαν χρήσιμες γεωλογικές πληροφορίες κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας, αλλά δεν παρείχαν τις λεπτομερείς πληροφορίες που εμφανίζονται στις καταγραφές Chirp III (Boldreel, et al., 2025).



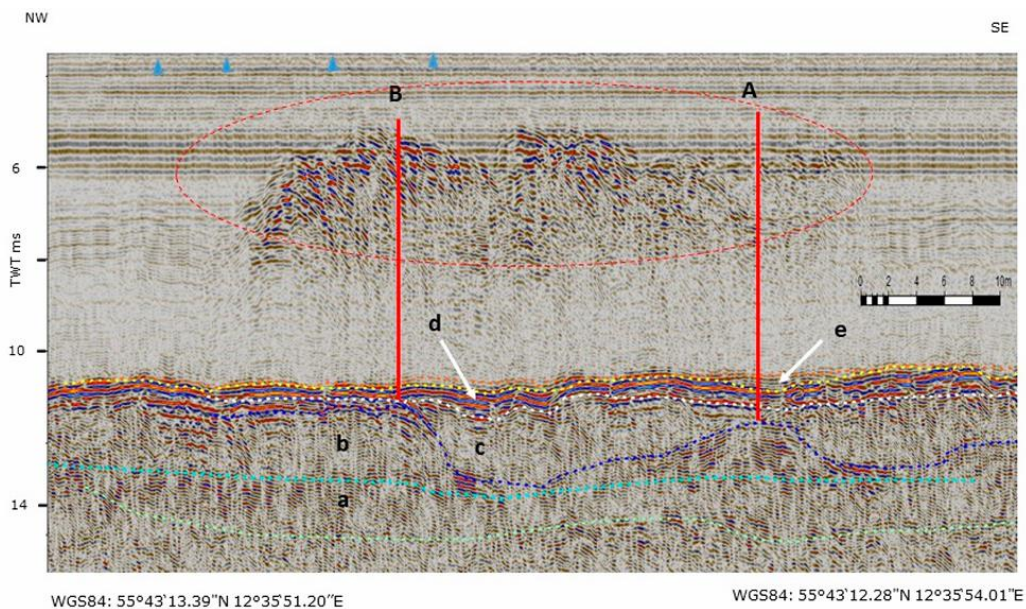
Εικόνα 3.1: (a) Η περιοχή του λιμανιού Svanemøllen της Κοπεγχάγης. (b) Χάρτης τοποθεσίας του λιμανιού. (c) Βαθυμετρικός χάρτης της περιοχής μελέτης, με τη θέση των σεισμικών προφίλ Chirp III και της πυρηνοληψίας (vibrocores) (Boldreel, et al., 2025)



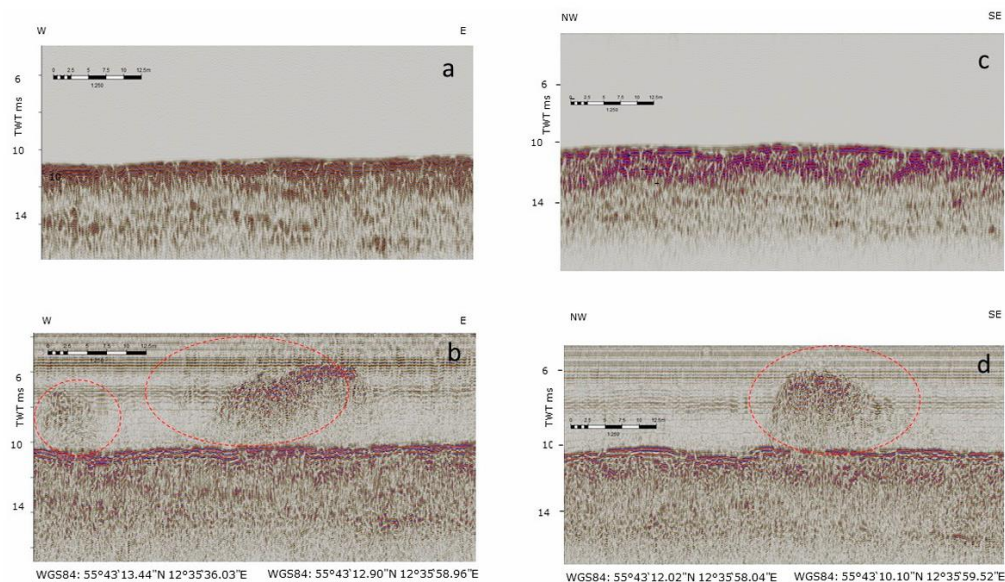
Εικόνα 3.2: Χάρτης θέσης της περιοχής μελέτης με τα προφίλ Innomar και Chirp III. Οι κόκκινες σημάνσεις δείχνουν τις θέσεις των “haystacks”. Τα λευκά και πράσινα αστέρια δείχνουν τις θέσεις όπου τα προφίλ Innomar και Chirp III καταγράφηκαν στην ίδια θέση (Boldreel, et al., 2025).



Εικόνα 3.3: Τμήματα τεσσάρων σεισμικών τομών με εμφανίσεις "haystacks" (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές), των οποίων οι θέσεις φαίνονται στην Εικόνα 3.1, όπως καταγράφηκαν με το σύστημα Teledyne Chirp III. Σε ορισμένα προφίλ (a, b), οι διαταραχές εντοπίζονται πάνω από μικρές λεκάνες, ενώ σε άλλα (c, d), εμφανίζονται ως κατακόρυφες διαταραχές με υψηλή ανακλαστικότητα (μεγάλες αντιθέσεις ακουστικής εμπίδησης), κάτω από τον πυθμένα, γεγονός που δείχνει ότι ένα υλικό (διαφορετικό από την άμμο) αποτίθεται σε αμμόδες περιβάλλον (**Boldreel, et al., 2025**).



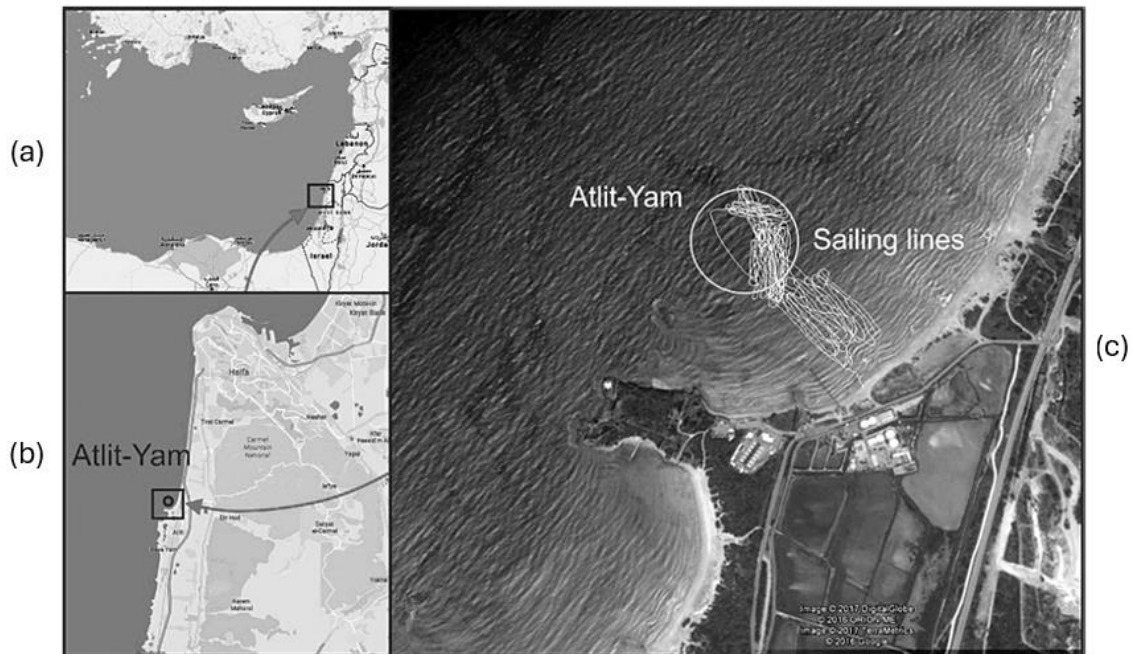
Εικόνα 3.4: Σεισμικό προφίλ με εμφανές "haystack", όπως καταγράφηκε με Chirp III. Σημειώνονται οι θέσεις των γεωτρήσεων A και B, όπου εντοπίστηκαν τεμάχια επεξεργασμένου πυριτόλιθου (Boldreel, et al., 2025).



Εικόνα 3.5: (a) (c) Σύγκριση σεισμικών προφίλ της ίδιας γραμμής από τα συστήματα Teledyne Chirp III. (b) (d) Αντίστοιχη σύγκριση από τα συστήματα Innomar SES-2000. Το χαρακτηριστικό "haystack" είναι καθαρά ορατό μόνο στο προφίλ του Chirp III (Boldreel, et al., 2025).

Δυνατότητες εντοπισμού ανθρώπινης επέμβασης μέσω υψηλής ανάλυσης σεισμικών δεδομένων (human-knapped flint).

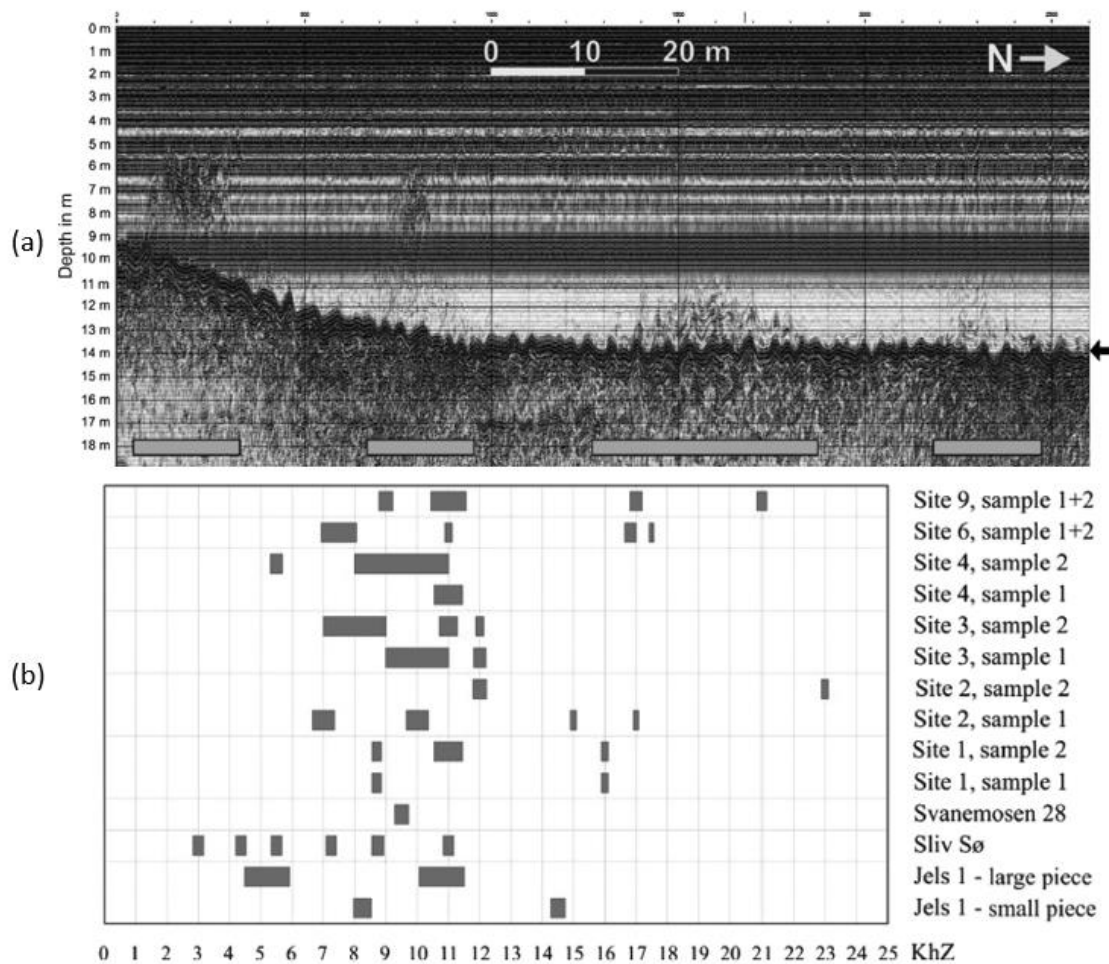
Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει μια πρωτοποριακή προσπάθεια για τον εντοπισμό βυθισμένης προϊστορικής ανθρώπινης δραστηριότητας της Εποχής του Λίθου, μέσω της ανίχνευσης κομματιών πυριτόλιθου με τη μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης υψηλής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, διερευνάται το πόσο τα απορρίμματα αρχαίας εργαλειοτεχνίας μπορούν να εντοπιστούν με τη χρήση SBP Chirp III σε αβαθή θαλάσσια περιβάλλοντα. Την περιοχή έρευνας αποτέλεσε ο βυθισμένος οικισμός της Εποχής του Λίθου, Atlit-Yam στα ανοιχτά της ακτής Carmel του Ισραήλ (βλ. Εικόνα 3.6), σε βάθη νερού μεταξύ 10-12 μέτρων, ο οποίος αναφέρθηκε πως βρίσκεται θαμμένος κάτω από 1-1.5 μέτρο άμμου. Τα σεισμικά προφίλ υψηλής συχνότητας έφεραν στο φως χαρακτηριστικές ακουστικές ανωμαλίες, που αναφέρονται ως “haystacks” (βλ. Εικόνα 3.7 και 3.8), στη στήλη του νερού πάνω από περιοχές που ήταν γνωστό ότι διατηρούσαν τεμάχια εργαλείων πυριτόλιθου. Οι διαταραχές haystack ερμηνεύθηκαν ως ακουστικές αποκρίσεις από πυριτόλιθο, που είχε τροποποιηθεί από τον άνθρωπο, ακόμη και όταν αυτός ο πυριτόλιθος είναι θαμμένος κάτω από στρώμα άμμου έως και 1.5 μέτρου. Υποστηρίχθηκε ότι αυτή η ηχητική απόκριση δεν θα μπορούσε να είχε προκληθεί από τα φυσικά θραύσματα πυριτόλιθου ή από περιβαλλοντικούς παράγοντες (αέριο, βλάστηση κλπ).



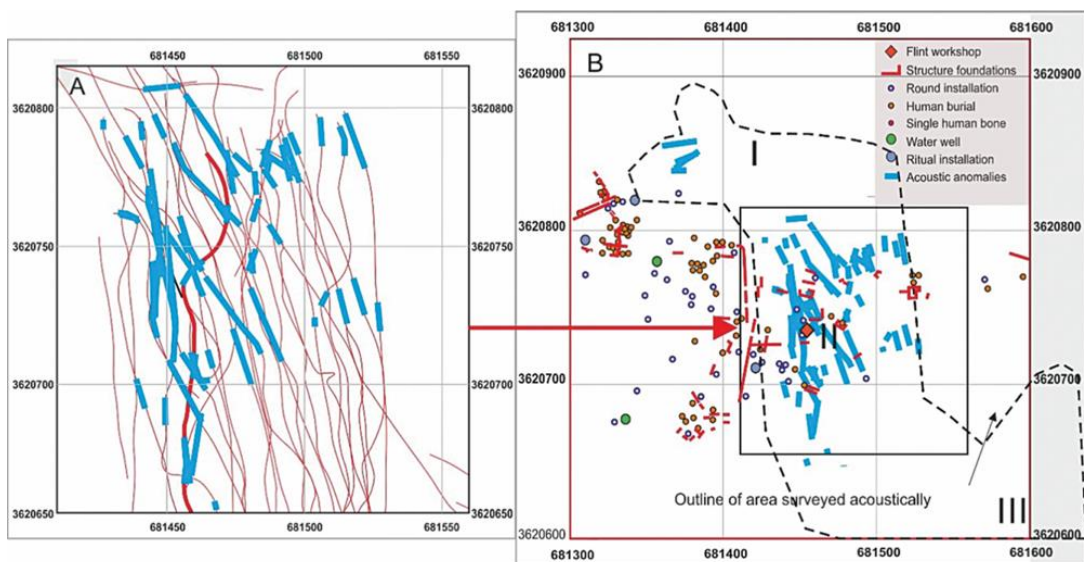
Εικόνα 3.6: (a), (b) Η τοποθεσία Atlit-Yam, 15 χιλιόμετρα ΝΑ της Χάιφα και (c) η ακτογραμμή και οι γραμμές πορείας, με τον κύκλο να επισημαίνει το περίγραμμα του οικισμού της εποχής του Λίθου (Grøn, et al., 2018).

Για την διεξαγωγή της έρευνας, χρησιμοποιήθηκε ένα μονοακτινωτό Teledyne Chirp III τόσο ως ακουστική πηγή και ως δέκτη, το οποίο σύστημα λειτουργεί σε συχνότητες μεταξύ 2 και 20 kHz. Ο καταγραφέας (profiler) είναι εξοπλισμένος με διαφορικό GPS (DGPS) που προσφέρει ακρίβεια ± 10 εκατοστών και ήταν τοποθετημένος στο πλαϊνό σημείο ενός μικρού σκάφους κατά την διεξαγωγή των ερευνών, ώστε να αποφευχθούν παρεμβολές από φυσαλίδες, που προκαλούνται από την προπέλα και να εξασφαλιστεί η καλή καταγραφή των δεδομένων. Στη συνέχεια, τα σεισμικά δεδομένα αποθηκεύτηκαν σε μορφή SEG-Y και αργότερα αναλύθηκαν με τη χρήση του λογισμικού Petrel. Όσον αφορά τις έρευνες πεδίου στο Altit-Yam, έγινε η συλλογή 59 σεισμικών προφίλ υψηλής ανάλυσης, τα οποία οργανώθηκαν σε 3 ζώνες: βόρεια, κεντρική και νότια, οι οποίες απεικονίζονται στην Εικόνα 3.8. Από τις 3 αυτές ζώνες μόνο η κεντρική είχε τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης των χαρακτηριστικών haystack στα σεισμικά δεδομένα λόγω μεγαλύτερης συγκέντρωσης επεξεργασμένου πυριτόλιθου.

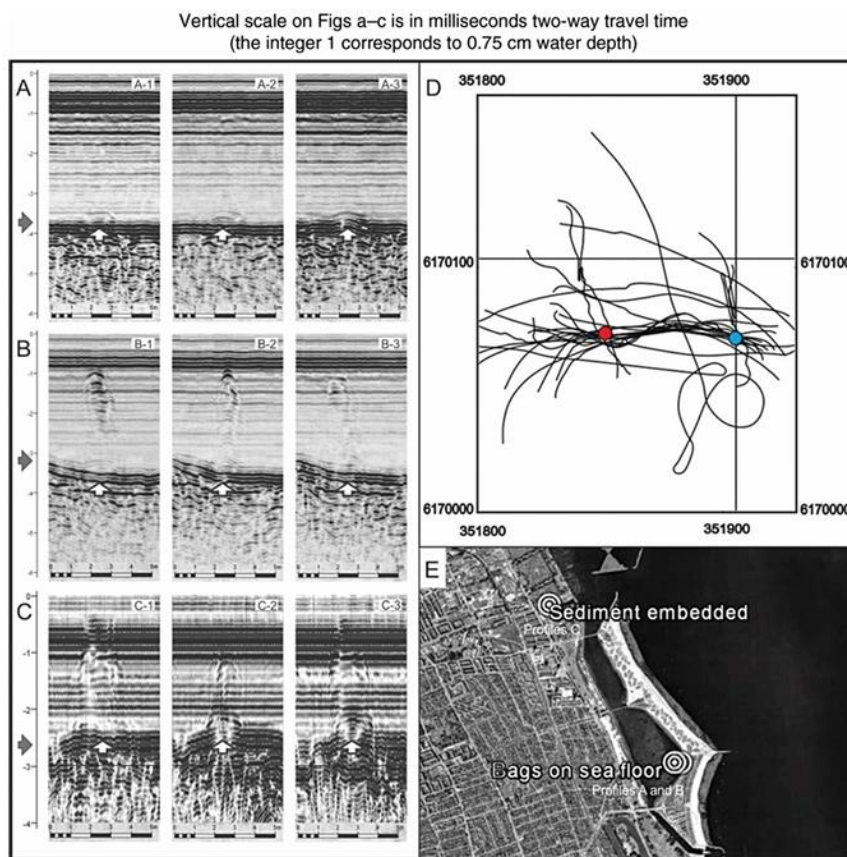
Για περαιτέρω επαλήθευση της θεωρίας ότι τα χαρακτηριστικά αυτά ήταν αποκλειστικά από τα τροποποιημένα από τον άνθρωπο θραύσματα πυριτόλιθου, η ερευνητική ομάδα διεξήγαγε πειράματα στη Δανία. Στο πρώτο πείραμα, τοποθετήθηκαν προσεκτικά, για την αποφυγή διαταραχών στα σεισμικά προφίλ, στον πυθμένα της θάλασσας σάκοι 14 κιλών, που περιείχαν φυσικά θραυσμένο πυριτόλιθο, αλλά και τροποποιημένο από τον άνθρωπο (βλ. Εικόνα 3.9). Κατά το δεύτερο πείραμα, τοποθετήθηκε πυριτόλιθος τροποποιημένος από τον άνθρωπο σε πλαστικό δοχείο και θάφτηκε κάτω από κορεσμένη άμμο. Και στα 2 πειράματα, χρησιμοποιήθηκε η ίδια διάταξη Chirp III και αποδείχτηκε ότι μόνο ο θρυμματισμένος από τον άνθρωπο πυριτόλιθος εμφάνισε χαρακτηριστικά haystack στα ακουστικά προφίλ. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως παλαιότερα σεισμικά δεδομένα από την υποθαλάσσια τοποθεσία του Møllegabet της Δανίας, που είχαν αποκτηθεί με σύστημα Chirp II, αναλύθηκαν ξανά και ανακαλύφθηκε πως περιείχαν παρόμοιες ακουστικές διαταραχές, που σχετίζονται πάλι με γνωστές συγκεντρώσεις θρυμματισμένου πυριτόλιθου (Grøn, et al., 2018).



Εικόνα 3.7: (a) Παραδείγματα “haystacks” όπως φαίνεται σε προφίλ στην Εικόνα 3.8. Γκριζες μπάρες: η οριζόντια έκταση των “haystacks”, μαύρο βέλος στα δεξιά: ο πυθμένας της θάλασσας. (b) Χαρακτηριστικές τιμές συχνότητας που μετρήθηκαν για 16 κομμάτια πυριτόλιθου. Τα δύο ανώτερα δείγματα αποτελούνται από δύο τεμάχια πυριτόλιθου (Grøn, et al., 2018).



Εικόνα 3.8: (A) Οι γραμμές πορείας της περιοχής έρευνας. (B) Το προφίλ που αναφέρθηκε στην εικόνα 3.7 επισημαίνεται ως κόκκινο βέλος. Μπλε κομμάτια γραμμών: οι τοποθεσίες όπου παρατηρήθηκαν haystacks, διακεκομμένη μαύρη γραμμή: το υπό έρευνα τμήμα της περιοχής του οικισμού (Grøn, et al., 2018).



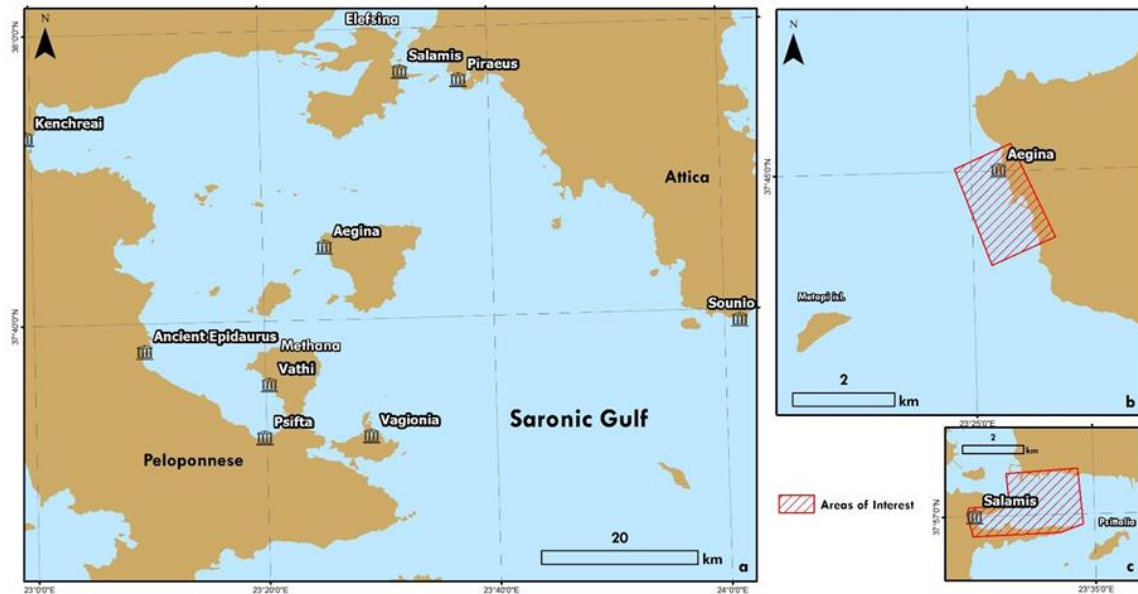
Εικόνα 3.9: (Α–C) Σεισμικά προφίλ πειραμάτων με σάκους/κάδους πυριτόλιθου. Λευκά βέλη (πάνω στα σεισμικά προφίλ): θέσεις πυριτόλιθων στον πυθμένα. Γκριζα βέλη: πυθμένας. (A1–A3) Φυσικά σπασμένοι πυριτόλιθοι χωρίς απόκριση. (B1–B3, C1–C3) Ανθρωπογενής πυριτόλιθος με εμφανή ακουστική απόκριση. (D) Γραμμές πλεύσης και θέσεις σάκων (μπλε: ανθρωπογενής, κόκκινη: φυσικός). (E) Τοποθεσίες πειραμάτων: Amager Strandpark & Sundby Sailing Union (Grøn, et al., 2018).

3.2.2 Χαρτογράφηση αρχαίων λιμενικών εγκαταστάσεων.

Γεωφυσική και φωτογραμμετρική χαρτογράφηση βυθισμένων δομών στον Σαρωνικό κόλπο, με αναφορά στο αρχαίο λιμάνι της Αίγινας

Η παράκτια ζώνη του Σαρωνικού κόλπου φιλοξενεί κάποια από τα σημαντικότερα υποθαλάσσια αρχαιολογικά κατάλοιπα του αρχαίου κόσμου (βλ. Εικόνα 3.10.a). Ανάμεσά τους, βρίσκεται και το αρχαίο λιμενικό συγκρότημα της Αίγινας, που ξεχωρίζει για τα διατηρημένα κωνικά ίχνη κτιρίων (κυματοθραύστες, βυθισμένες εγκαταστάσεις) και για τη σημασία του ως πολιτιστικό μνημείο (βλ. Εικόνα 3.10.b και 3.11.a). Η παρακάτω ανάλυση βασίζεται σε δύο αλληλοσυνδεόμενες μελέτες: η πρώτη σχετίζεται με το λιμενικό συγκρότημα της Αίγινας, ενώ η δεύτερη, με ευρύτερο περιφερειακό πλαίσιο του Σαρωνικού Κόλπου. Η μια έρευνα επικεντρώνεται περισσότερο στην χαρτογράφηση

αρχαίων λιμενικών εγκαταστάσεων (Georgiou, et al., 2021a), ενώ η άλλη ακολουθεί μια πιο ολιστική προσέγγιση για τον συνδυασμό χαρτογράφησης αρχαιολογικών ευρημάτων και βιοτόπων (Georgiou, et al., 2021b).



Εικόνα 3.10: (a) Ο χάρτης που απεικονίζει τον Σαρωνικό Κόλπο και τις βυθισμένες αρχαιολογικές δομές γύρω του, στα αριστερά και δεξιά οι δύο εικόνες παρουσιάζουν τις υπό έρευνα περιοχές της (b) Αίγινας και (c) της Σαλαμίνας (Georgiou, et al., 2021b).

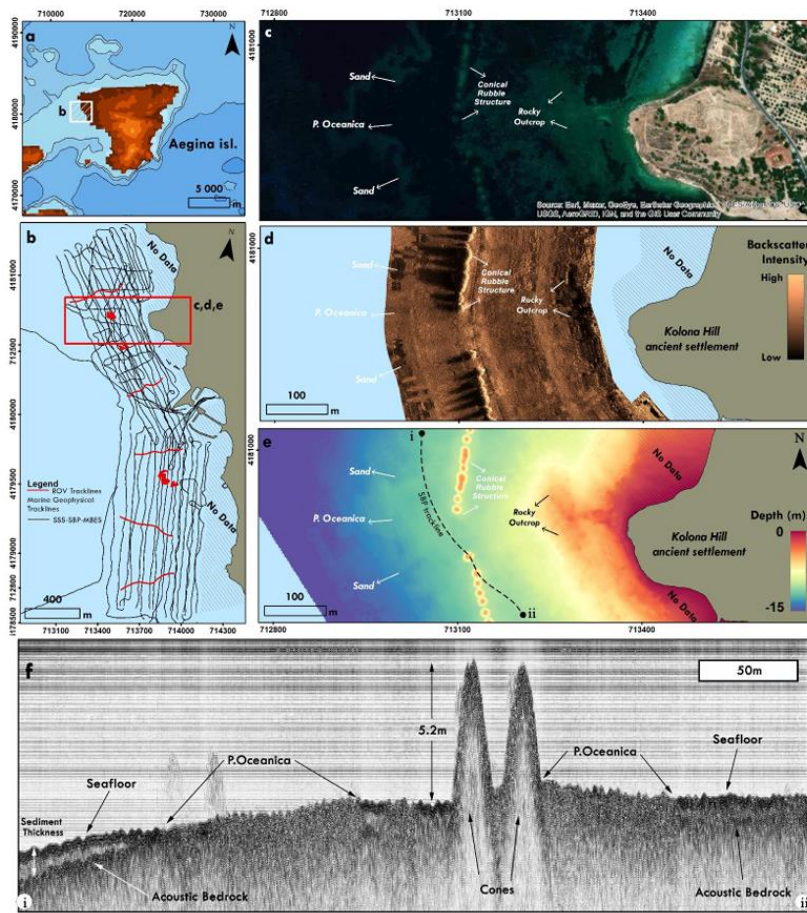
Και οι δύο μελέτες χρησιμοποίησαν μια μη παρεμβατική γεωφυσική προσέγγιση, συνδυάζοντας τεχνικές τηλεπισκόπησης και φωτογραμμετρική τεκμηρίωση για την καταγραφή των βυθισμένων δομών. Τα βασικά όργανα ήταν τα εξής:

- a) Sub-Bottom Profiler (SBP): Kongsberg Geoacoustics Geopulse Plus, με εύρος συχνοτήτων 1.5-11.5 kHz (Λιμάνι της Αίγινας) και 1–12 kHz (Σαρωνικός Κόλπος), κατακόρυφη ανάλυση σε ένα εύρος 6 (Σαρωνικός Κόλπος) έως 10 cm (Λιμάνι της Αίγινας). Στην ευρύτερη περιοχή του Σαρωνικού κόλπου, χρησιμοποιήθηκε για τη χαρτογράφηση του πάχους των ιζημάτων και του ακουστικού υποβάθρου, ενώ στην περιοχή της Αίγινας, επέτρεψε στους ερευνητές να οριοθετήσουν τις αρχαίες παράκτιες εγκαταστάσεις, να μελετήσουν τη γεωμορφολογία της περιοχής και να αξιολογήσουν τη διατήρηση των βυθισμένων δομών με τη μέτρηση του πάχους των ιζημάτων γύρω από τους κώνους.
- b) Σόναρ πλευρικής σάρωσης (SSS): EG&G 272TD διπλής συχνότητας (100/400 kHz), πλάτος σάρωσης 100 m (Λιμάνι της Αίγινας) και 5–200 m (Σαρωνικός Κόλπος).
- c) Ηχοβολιστής πολλαπλών ακτίνων (MBES): ITER Bathyswath, βαθυμετρική ανάλυση 2 cm.

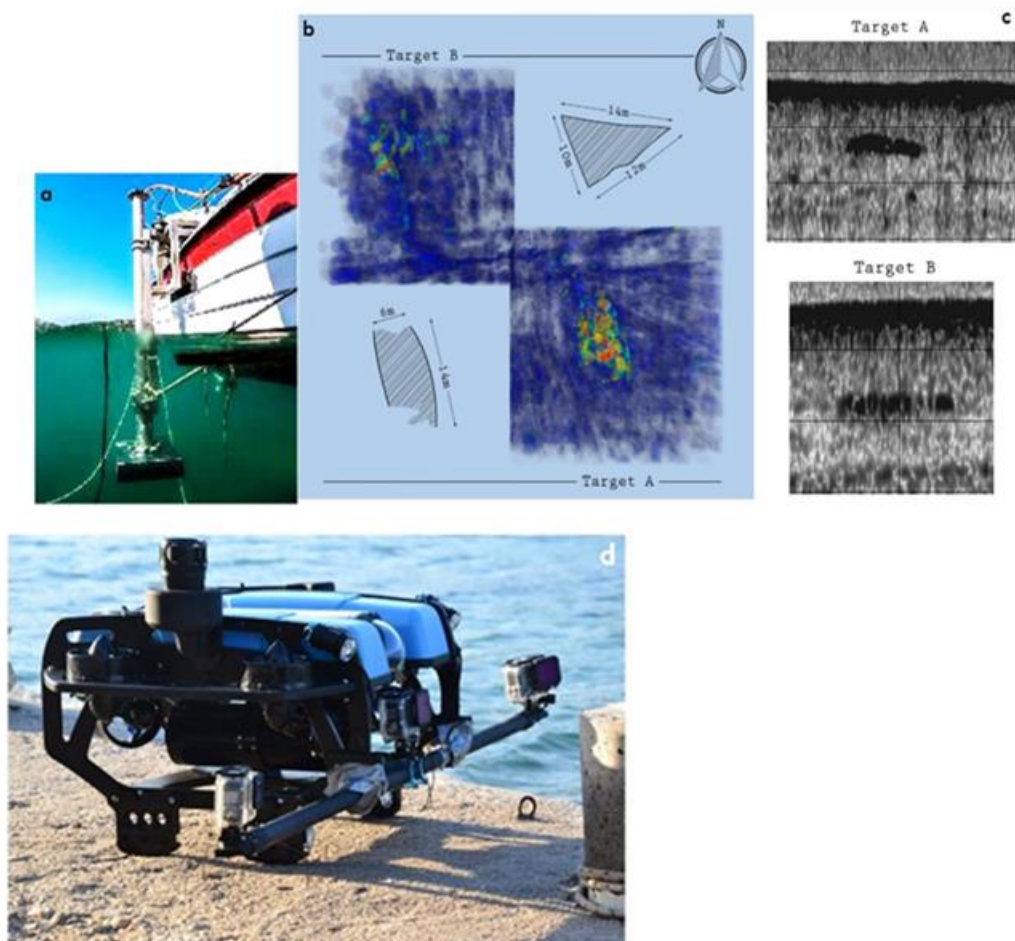
- d) Εντοπισμός θέσης: Leica GS08 RTK GNSS (ακρίβεια 10 mm) (Λιμάνι της Αίγινας) και DGPS / RTK GPS (Σαρωνικός Κόλπος).
- e) Φωτογραμμετρία: Εφαρμόστηκε μέσω τηλεχειριζόμενου οχήματος (ROV) σε συνδυασμό με κάμερες (π.χ. GoPro 7 (Λιμάνι της Αίγινας) και μετέπειτα δημιουργία 3D μοντέλων με τη χρήση του λογισμικού Agisoft Metashape.

Η έρευνα στην ευρύτερη περιοχή της Αίγινας αποκάλυψε ένα οργανωμένο αρχαίο λιμενικό σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει κυματοθραύστες και αρκετές κωνικές κατασκευές από κατάλοιπα (βλ. Εικόνα 3.11). Με τη βοήθεια του SBP (Εικόνα 3.12.a) εντοπίστηκαν καλά διατηρημένες υποθαλάσσιες δομές, θαμμένες κάτω από νεότερα ιζήματα, ενώ η χρήση του σόναρ πλευρικής σάρωσης συνέβαλλε στην ακριβή αποτύπωση της μορφολογίας του. Παράλληλα, εργαλεία αυτόματης κατάτμησης, όπως το TargAn, βοήθησαν στον εντοπισμό αρχαιολογικών δομών με βελτιωμένη ακρίβεια. Ιδιαίτερη σημασία είχαν επίσης και τα τρισδιάστατα φωτογραμμετρικά μοντέλα (Εικόνα 3.12.c), τα οποία παρείχαν οπτικές ανακατασκευές της γεωμετρίας και την κατάσταση διατήρησης των δομών.

Αναφορικά με την ευρύτερη περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου, οι αναλύσεις ανέδειξαν τη σύνδεση βυθισμένων αρχαιολογικών δομών με τα τοπικά θαλάσσια οικοσυστήματα, κυρίως με τις εκτάσεις της *Posidonia oceanica* (Εικόνα 3.11). Η παρουσία της θαλάσσιας αυτής βλάστησης είχε σημαντικό ρόλο στη διατήρηση των βυθισμένων αρχαιοτήτων. Επιπλέον, τα δεδομένα του SBP ήταν κρίσιμα για την αναγνώριση των θαμμένων στοιχείων και της στρωματογραφίας της περιοχής, συμβάλλοντας τόσο στην προστασία των αρχαιολογικών χώρων όσο και στο σχεδιασμό στρατηγικών θαλάσσιας χωροταξίας (Georgiou, et al., 2021b).



Εικόνα 3.11: (a) Η υπό έρευνα περιοχή (Αίγινα και Σαρωνικός Κόλπος). (b) Η περιοχή που ερευνήθηκε με τη χρήση θαλάσσιου γεωφυσικού εξοπλισμού (παράκτια ζώνη της πόλης της Αίγινας). (c) παράδειγμα από τις δορυφορικές εικόνες που δείχνει τα δύο κριτήρια που απαιτούνται για την προτεινόμενη μεθοδολογία: θαλάσσιος οικότοπος και βυθισμένα αρχαιολογικά ευρήματα (κωνικές δομές από κατάλοιπα). (d) παράδειγμα της έντασης της οπισθοσκέδασης SSS από την ίδια περιοχή. (e) βαθυμετρία MBES και θέση του σεισμικού προφίλ στο (f). (f) σεισμικό προφίλ όπως προκύπτει από το SBP (Georgiou, et al., 2021b).

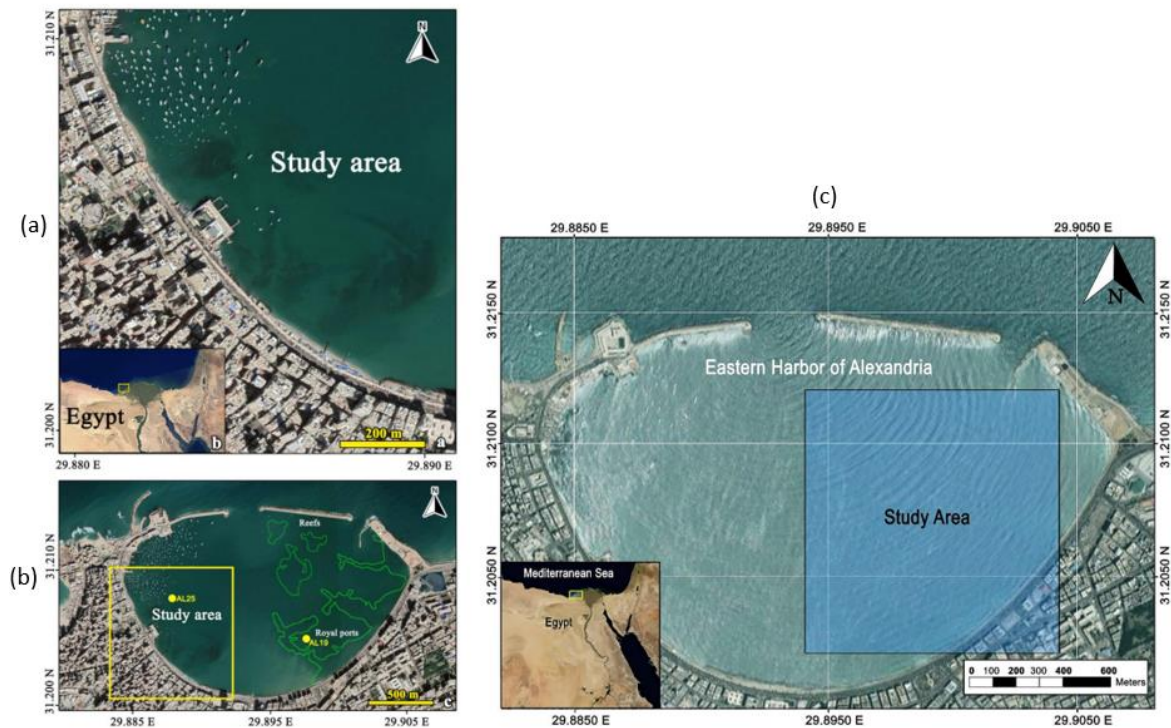


Εικόνα 3.12: (α) το sub-bottom profiler, τοποθετημένο στο πλάι του σκάφους (β) άνω όψη τρισδιάστατων σεισμικών δεδομένων από δύο θαμμένους στόχους αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. (γ) Σεισμικά προφίλ των στόχων Α και Β. (δ) Το τηλεχειριζόμενο όχημα (ROV), το οποίο, εξοπλισμένο με 3 κάμερες που χρησιμοποιήθηκαν για την αναγνώριση του εδάφους και τη φωτογραμμετρική έρευνα (Georgiou, et al., 2021b).

Υψηλής ανάλυσης χαρτογράφηση των βυθισμένων εγκαταστάσεων στο λιμάνι της Αλεξάνδρειας.

Παρουσιάζονται ακόμη δύο άμεσα συνδεδεμένες έρευνες, οι οποίες επικεντρώνονται σε διαφορετικές τοποθεσίες του ίδιου λιμανιού και συγκεκριμένα του ανατολικού λιμανιού της Αλεξάνδρειας. Στην πρώτη περίπτωση εξετάζεται η νοτιοδυτική πλευρά κοντά στην Αιγυπτιακή λέσχη Ναυτοπροσκόπων (βλ. Εικόνα 3.13.α,β) (Hamouda, et al., 2021a), ενώ η δεύτερη αφορά τις βυθισμένες δομές στην κεντρική και ανατολική ζώνη του αρχαίου λιμανιού (βλ.Εικόνα 3.13.γ) (Hamouda, et al., 2021b). Και οι δύο αυτές έρευνες στοχεύουν στην ανάπλαση της αρχαίας γεωμορφολογικής εξέλιξης της βυθισμένης κληρονομιάς της

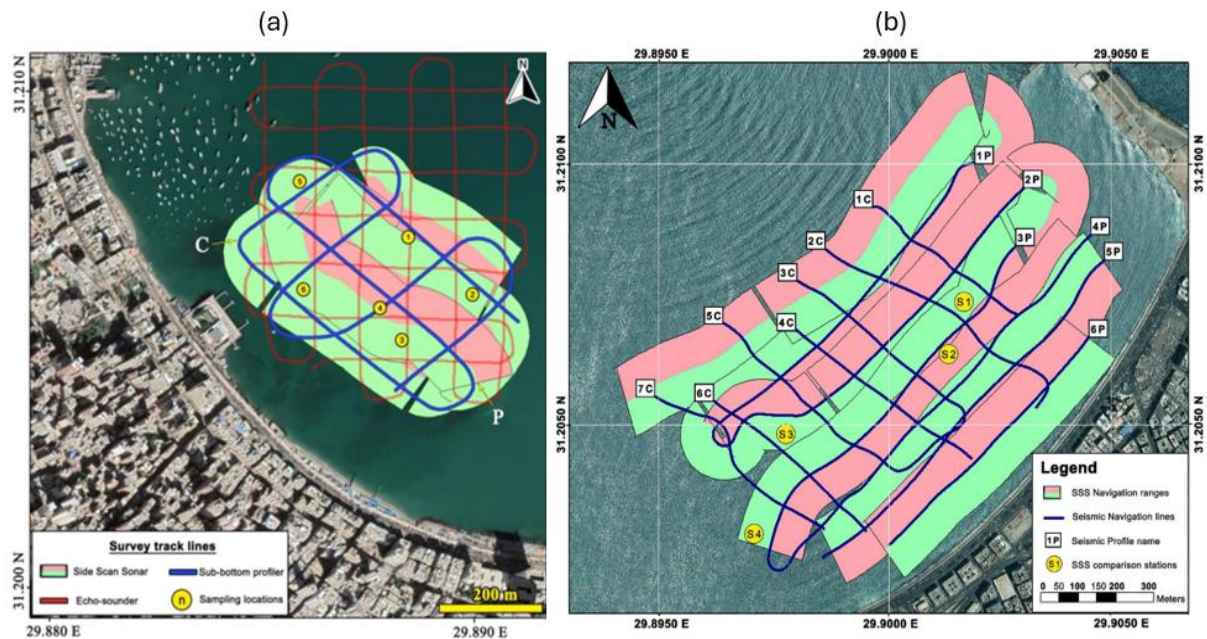
Αλεξάνδρειας με τη χρήση θαλάσσιων γεωφυσικών μεθόδων υψηλής ανάλυσης. Συνδυάζοντας την ακουστική απεικόνιση με δεδομένα πυρήνων ιζημάτων και ιστορικά γεγονότα, οι μελέτες αυτές προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για τις επιπτώσεις της ανόδου της στάθμης της θάλασσας, της σεισμικής δραστηριότητας και της δυναμικής των ιζημάτων τις τελευταίες δύο χιλιετίες.



Εικόνα 3.13: Χάρτες επισκόπησης του ανατολικού λιμανιού της Αλεξάνδρειας που δείχνουν τις περιοχές έρευνας και από τις δύο μελέτες: **(a, b)** η δυτική ζώνη και **(c)** η κεντρική-ανατολική ζώνη (Hamouda et al, 2021a,b).

Και οι δύο έρευνες χρησιμοποίησαν ένα συνδυασμό ακουστικών μεθόδων υψηλής ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, σόναρ πλευρικής σάρωσης (Edge-Tech 4200) και Chirp Sub-Bottom Profiler (σειρά Edge-Tech 3200), με τηλεχειριζόμενα υποβρύχια οχήματα (ROV) και δυνατότητα καταγραφής βίντεο και δειγματοληψία ιζήματος για την επαλήθευση ακριβείας (πιο συγκεκριμένα στην έρευνα στη Δυτική ζώνη του λιμανιού). Τα συστήματα σόναρ λειτουργούσαν στα 300/600 kHz και ενώ τα Chirp SBP σε 2-12 kHz και η πλοήγηση στην έρευνα ακολουθούσε τις γραμμές διεύθυνσης BA-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ. Οι γραμμές πορείας και για τις δύο έρευνες απεικονίζονται στην Εικόνα 3.14. Τα δεδομένα SBP επεξεργάστηκαν με τη χρήση του HYPACK και συσχετίστηκαν με χρονολογημένα δείγματα πυρήνων (AL19 και AL25) για τον καθορισμό της χρονολογίας του ιζήματος. Τα βαθυμετρικά δεδομένα λήφθηκαν κατά τη χρήση του ηχοβολιστή διπλής συχνότητας, ενώ

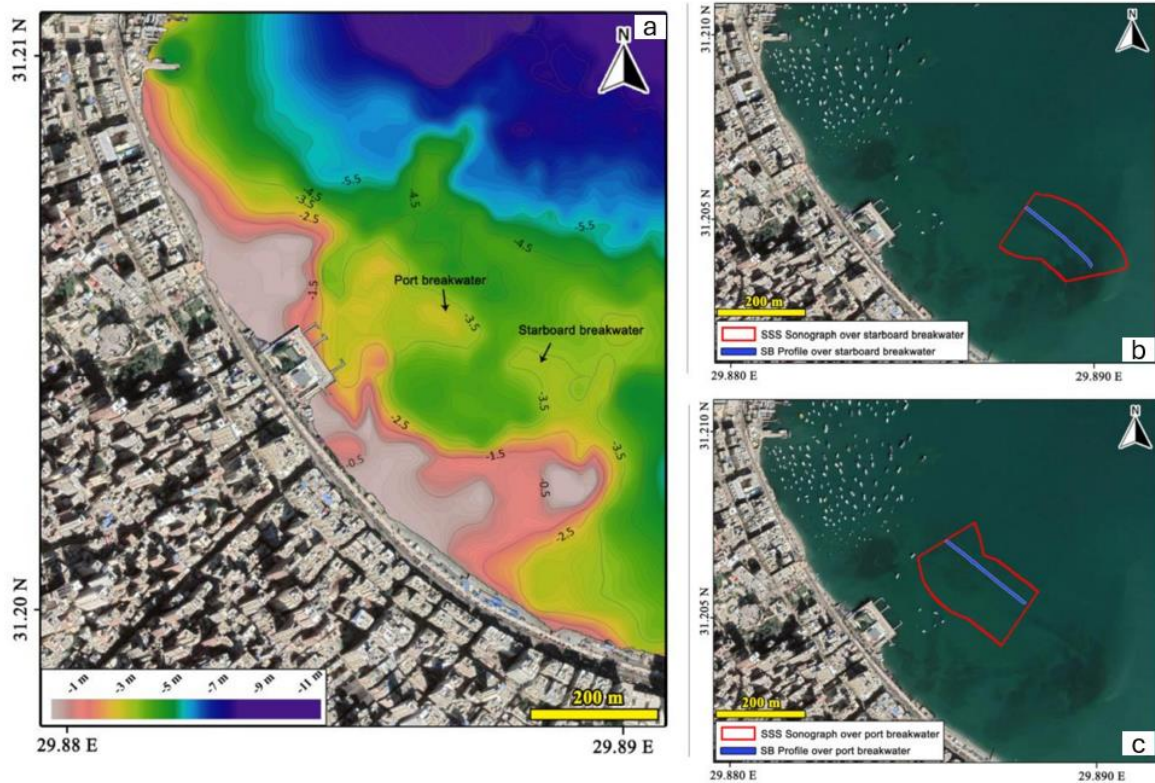
τα σεισμικά προφίλ ερμηνεύτηκαν τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο του βάθους με χρήση σεισμικής ταχύτητας περίπου 1525-1530 m/s (αφορά την έρευνα στη Δυτική ζώνη του λιμένα) (Hamouda, et al., 2021a). Οι καταδύσεις με ROV επιβεβαίωσαν τα χαρακτηριστικά του βυθού και οι εντάσεις οπισθοσκέδασης συγκρίθηκαν με την ανάλυση του μεγέθους των κόκκων του ιζήματος (αφορά την έρευνα στην Ανατολική ζώνη του λιμένα) (Hamouda, et al., 2021b).



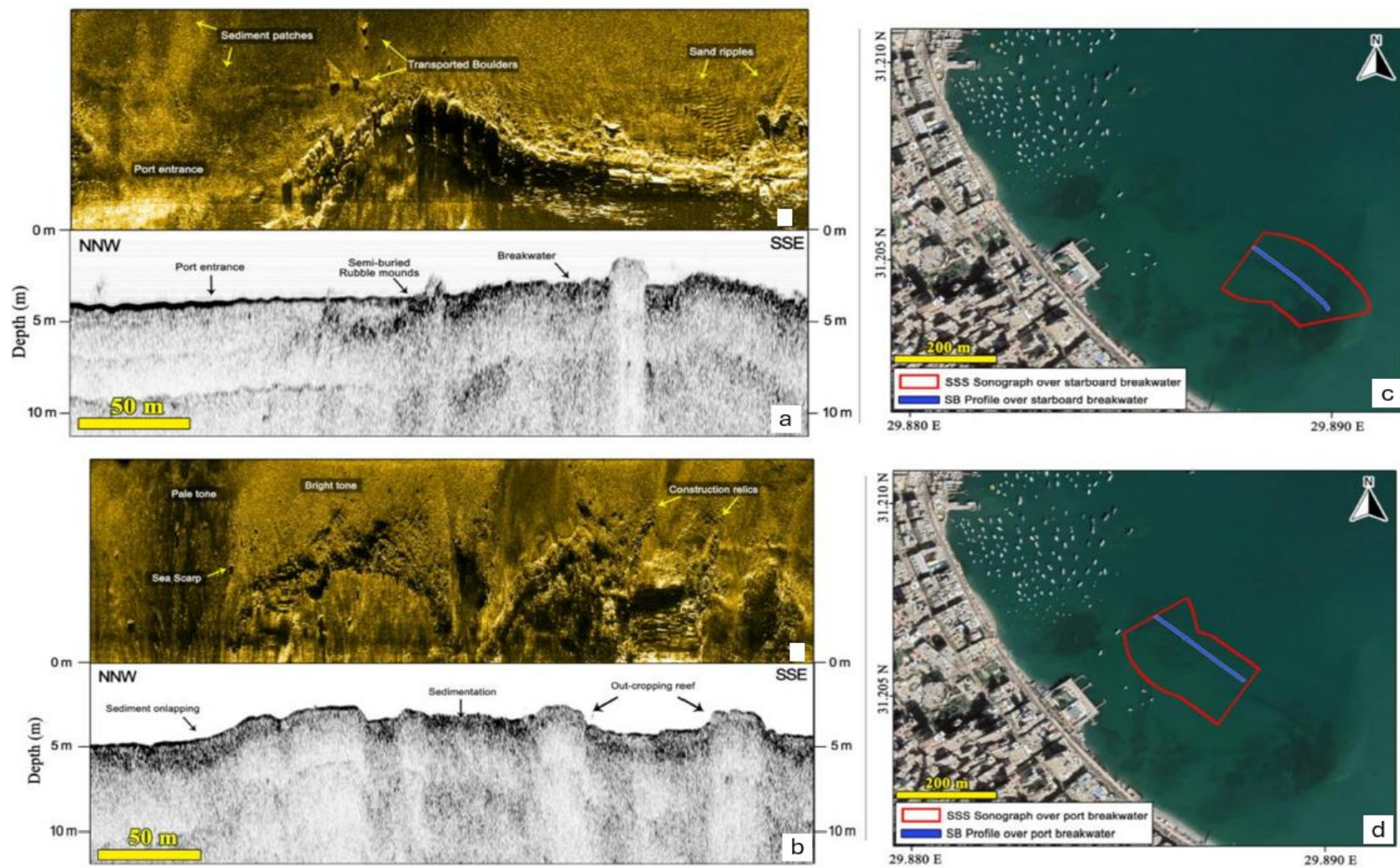
Εικόνα 3.14: Οι γραμμές πορείας. (α) η νοτιοδυτική πλευρά (Hamouda, et al., 2021a) του λιμένα, (β) η κεντρική και ανατολική (Hamouda, et al., 2021b).

Η ανάλυση αποκάλυψε την παρουσία δύο βυθισμένων κυματοθραυστών, καθώς και μιας προκυμιάς, τα οποία αποτελούσαν τμήματα του βασιλικού λιμένα της Αλεξάνδρειας (αφορά και τις δύο έρευνες). Η δομή του βυθισμένου λιμένα παρουσιάζεται καθαρά στην Εικόνα 3.15.α. Τα SBP δεδομένα έδειξαν πολλαπλές στρωματογραφικές ακολουθίες που σχετίζονται με διαφορετικές ιστορικές περιόδους: Πτολεμαϊκή, Ρωμαϊκή και Αραβική (βλ. Εικόνες 3.17 και 3.18), ενώ αναδεικνύουν τις διαβρωτικές επιφάνειες που προκλήθηκαν από ακραία φυσικά φαινόμενα όπως το τσουνάμι του 365 μ.Χ. (αφορά την έρευνα στη Δυτική ζώνη του λιμένα). Οι εικόνες πλευρικής σάρωσης επιβεβαίωσαν τη θέση μερικώς θαμμένων αρχαιολογικών στοιχείων και διάσπαρτων θραυσμάτων ογκόλιθων, κυρίως περιμετρικά των κυματοθραυστών (βλ. Εικόνα 3.16) και στην είσοδο του αρχαίου λιμένα. Στον δυτικό τομέα, ο κυματοθραύστης στη δεξιά πλευρά ερμηνεύεται ως ανθρωπογενείς λόφοι από κατάλοιπα (αφορά έρευνα στην Ανατολική ζώνη του λιμένα), ενώ στον ανατολικό τομέα, ο κυματοθραύστης φαίνεται να έχει κατασκευαστεί πάνω σε υφαλοδομή.

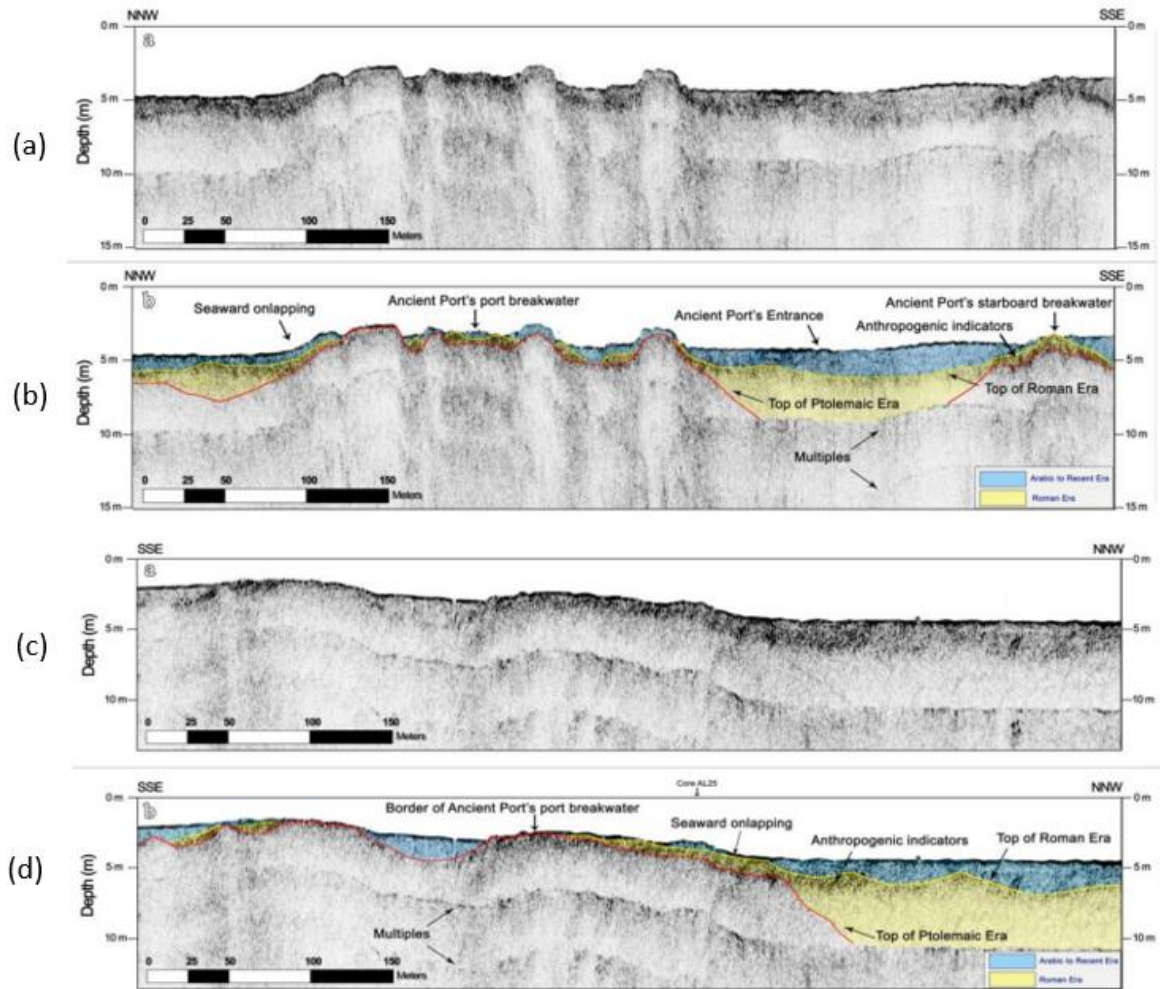
Και οι δύο περιοχές παρουσίασαν σημάδια τεκτονικής καθίζησης και συσσώρευσης ιζημάτων που συνάδουν με ταχεία μεταπαγετώδη άνοδο της στάθμης της θάλασσας.



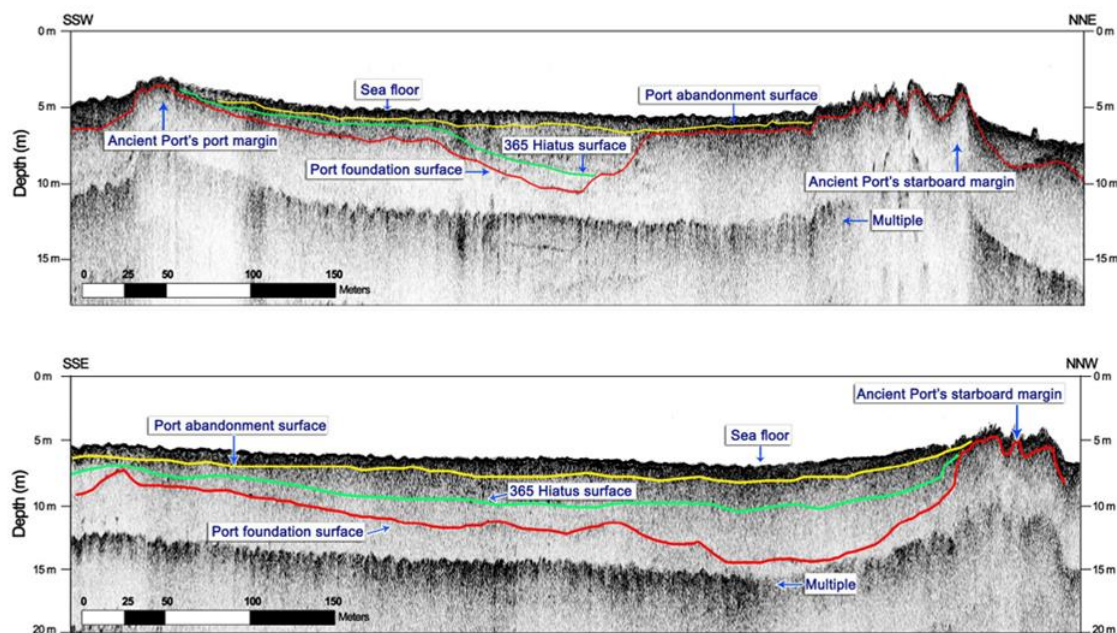
Εικόνα 3.15: (a) Βαθυμετρικός χάρτης της περιοχής μελέτης με το βυθισμένο αρχαίο λιμάνι. (b) Ο δεξιός κυματοθραύστης και (c) ο αριστερός κυματοθραύστης (Hamouda, et al., 2021a). Οι κόκκινες επισημάνσεις αφορούν το σόναρ πλευρικής σάρωσης της Εικόνας 3.17 και οι μπλε επισημάνσεις τις τομές SBP.



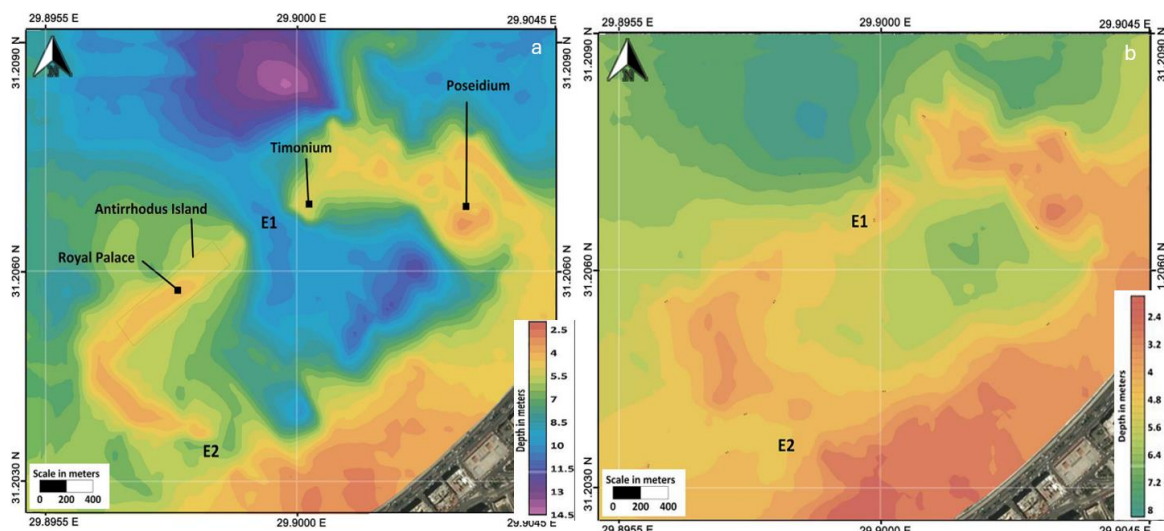
Εικόνα 3.16: (α) (c) Ο δεξιός κυματοθραύστης του βυθισμένου αρχαίου λιμένα (νοτιοδυτικής πλευράς) και (β) (d) ο αριστερός. Αντίστοιχα και για τους 2 στα αριστερά απεικονίζονται οι καταγραφές από σόναρ πλευρικής σάρωσης (κόκκινη επισήμανση) και οι τομές SBP (μπλε επισήμανση) (Hamouda, et al., 2021a)



Εικόνα 3.17: Σεισμικά προφίλ της νοτιοδυτικής πλευράς του λιμένα, στους κυματοθραύστες του βυθισμένου αρχαίου λιμένα. **(a)** και **(c)** Μη ερμηνευμένα προφίλ. **(b)** και **(d)** Ερμηνευμένα προφίλ (Hamouda, et al., 2021a).



Εικόνα 3.18: Στρωματογραφικές σεισμικές τομές, που αφορούν την ανατολική ζώνη του αρχαίου λιμένα της Αλεξάνδρειας, κατά μήκος των γραμμών 3P και 3C (βλ. Εικόνα 3.14), που αναδεικνύουν τις φάσεις ίδρυσης, εγκατάλειψης και καταστροφής (365 μ.Χ.) της λιμενικής υποδομής (Hamouda, et al., 2021b).



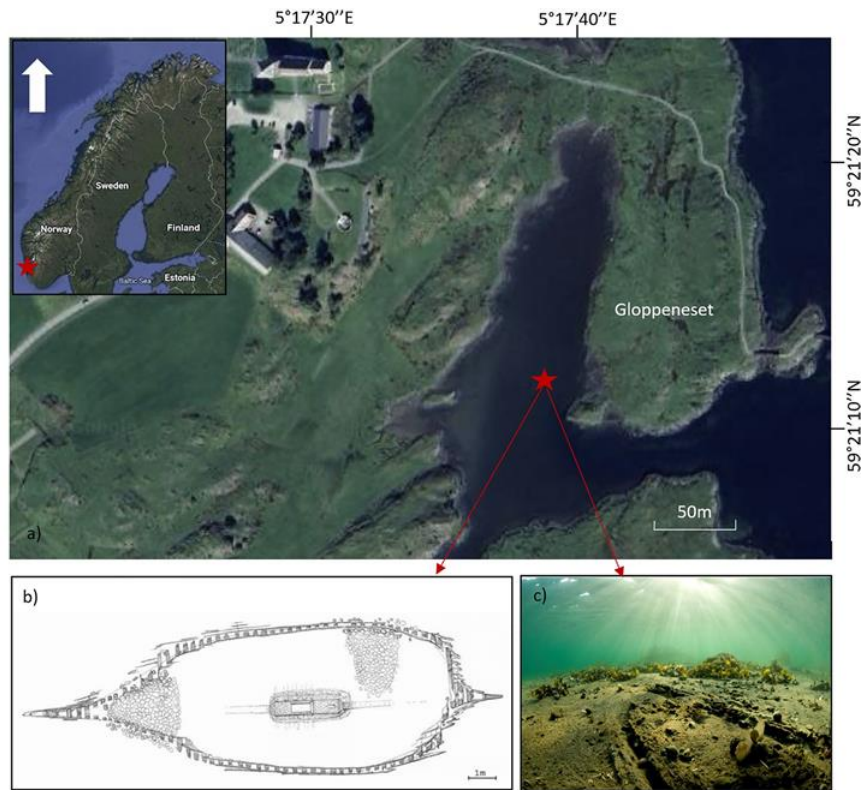
Εικόνα 3.19: (a) Χάρτης ισοϋψών της θεμελιακής επιφάνειας του Βασιλικού λιμένα κατά την έναρξη της Πτολεμαϊκής περιόδου. (b) Πρόσφατος χάρτης ισοϋψών της θεμελιακής επιφάνειας του Βασιλικού λιμένα. (Hamouda, et al., 2021b).

Ανακεφαλαιώνοντας, η ενσωμάτωση ακουστικών μεθόδων με άλλα δεδομένα και επιθεώρηση με ROV, βοήθησε στην καλύτερη κατανόηση της ιστορίας βύθισης του λιμένα της Αλεξάνδρειας. Αυτή η προσέγγιση επέτρεψε όχι μόνο τον ακριβή εντοπισμό των υποθαλάσσιων αρχαιολογικών στοιχείων, αλλά και τις αλλαγές στο ανάγλυφο του πυθμένα με την πάροδο του χρόνου, οι οποίες απεικονίζονται στην Εικόνα 3.19 (Hamouda, et.al., 2021a,b).

3.2.3 Ανίχνευση ναυαγίων και βυθισμένων κατασκευών καθώς και ειδικές τεχνικές εφαρμογές.

Εφαρμογή αυτόνομων θαλάσσιων οχημάτων για την αναγνώριση ενός μεσαιωνικού ναυαγίου στη Νορβηγία.

Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει μια νέα γεωφυσική και αρχαιολογική προσέγγιση για τη χαρτογράφηση ενός μερικώς θαμμένου μεσαιωνικού ναυαγίου στη μεσοπαλιρροιακή ζώνη της Avaldsnes, στη Νορβηγία (βλ. Εικόνα 3.20). Χρησιμοποιήθηκε ένα ελαφρύ αυτόνομο όχημα επιφανείας (ASV), εξοπλισμένο με ένα Sub-Bottom Profiler (SBP) υψηλής συχνότητας μίας δέσμης και οι ερευνητές έλαβαν πυκνά σεισμικά δεδομένα σε βάθη νερού τόσο ρηχά όσο 1 μέτρο. Η μέθοδος αυτή επέτρεψε την τρισδιάστατη χαρτογράφηση υψηλής ανάλυσης του ναυαγίου και των γύρω ιζημάτων, προσφέροντας μια μη επεμβατική, αποτελεσματική και προσιτή εναλλακτική λύση σε σχέση με τις παραδοσιακές έρευνες που βασίζονται σε καταδύσεις. Στόχος ήταν η ανακατασκευή του σχήματος, των διαστάσεων και του βάθους ταφής του ναυαγίου, ενώ παράλληλα συγκρίθηκαν τα ακουστικά δεδομένα με προηγούμενες αρχαιολογικές καταγραφές, συμπεριλαμβανομένης της φωτογραμμετρίας και της υποβρύχιας χάραξης (underwater trenching).

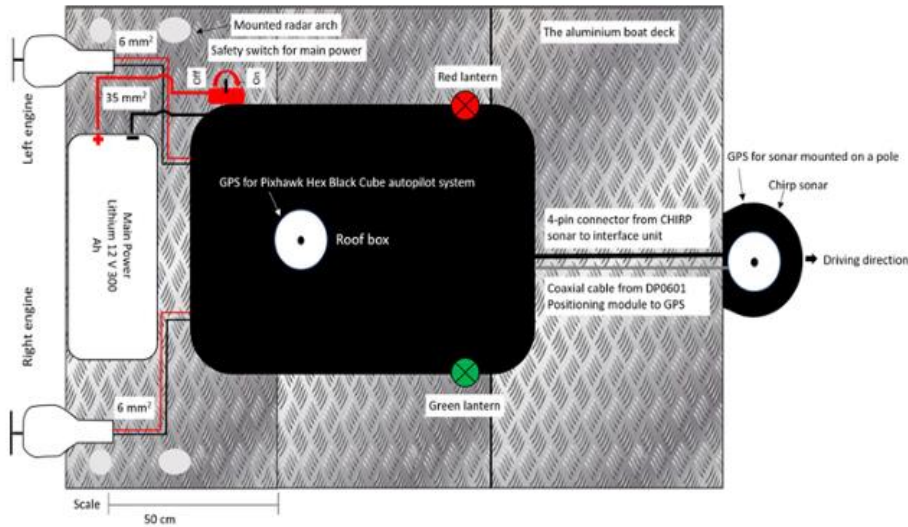


Εικόνα 3.20: (α) Χάρτης επισκόπησης της περιοχής μελέτης στη νοτιοδυτική Νορβηγία με τη θέση του πλοίου Avaldsnes στο λιμάνι κοντά στη μεσαιωνική εκκλησία του Αγίου Όλαφ. Βασικός χάρτης: Google Earth. (β) Σκίτσο του ναυαγίου του Μετα-Μεσαίωνα. (γ) Τα υπολείμματα του ναυαγίου εν μέρει θαμμένα στον πυθμένα. (Ravnås, et al., 2023).

Για την έρευνα χρησιμοποιήθηκε ένα φουσκωτό σκάφος τύπου καταμαράν μήκους 4,2 μέτρων, εξοπλισμένο με δύο ηλεκτρικούς κινητήρες και ένα σύστημα υψηλής συχνότητας Chirp SBP Meridata (10-20 kHz), ικανό να προσφέρει κατακόρυφη ανάλυση έως και 10 cm (βλ. Εικόνα 3.21). Η πλοήγησή του έγινε με τη βοήθεια RTK-GPS, προσφέροντας ακρίβεια της τάξεως του εκατοστού. Το σκάφος ακολούθησε ένα πυκνό πλέγμα, με τις γραμμές να απέχουν μεταξύ τους 25 cm και ταχύτητα 1 m/s, κατάλληλη για εργασίες σε ρηχά νερά (βλ. Εικόνα 3.22.d). Τα σεισμικά κύματα καταγράφονταν κάθε 250 ms και τα δεδομένα επεξεργάστηκαν αρχικά με MATLAB και στη συνέχεια ακολούθησε περαιτέρω επεξεργασία στα λογισμικά Petrel και EIVA NaviSuite για καλύτερη απεικόνιση. Επιπλέον, έγινε η λήψη πυρήνων ιζημάτων για να επιβεβαιωθούν οι λιθολογικές ερμηνείες που προέκυψαν από τα δεδομένα του Chirp.

Τέλος τα επεξεργασμένα δεδομένα παρεμβλήθηκαν σε τρισδιάστατο σεισμικό κύβο, με πλευρική ανάλυση 0.5 μέτρων και κατακόρυφη 0.2 μέτρων, επιτρέποντας τη δημιουργία χαρτών οριζόντιας απεικόνισης, καθώς και κατακόρυφων τομών της θαμμένης αρχαιολογικής υποδομής. Η δημιουργία του τρισδιάστατου σεισμικού κύβου βασίστηκε

σε χωρική παρεμβολή των προφίλ, επιτρέποντας την αποτύπωση της γεωμετρίας του ναυαγίου και της στρωματογραφίας λεπτομερώς. Η δυνατότητα εφαρμογής αυτής της μεθόδου σε ρηγά νερά, σε συνδυασμό με την ακρίβεια RTK-GPS, ανέδειξε την αποτελεσματικότητα του ASV ως εναλλακτικό εργαλείο για αρχαιολογική έρευνα σε περιβάλλοντα με περιορισμένη πρόσβαση από καταδυτικές ομάδες.

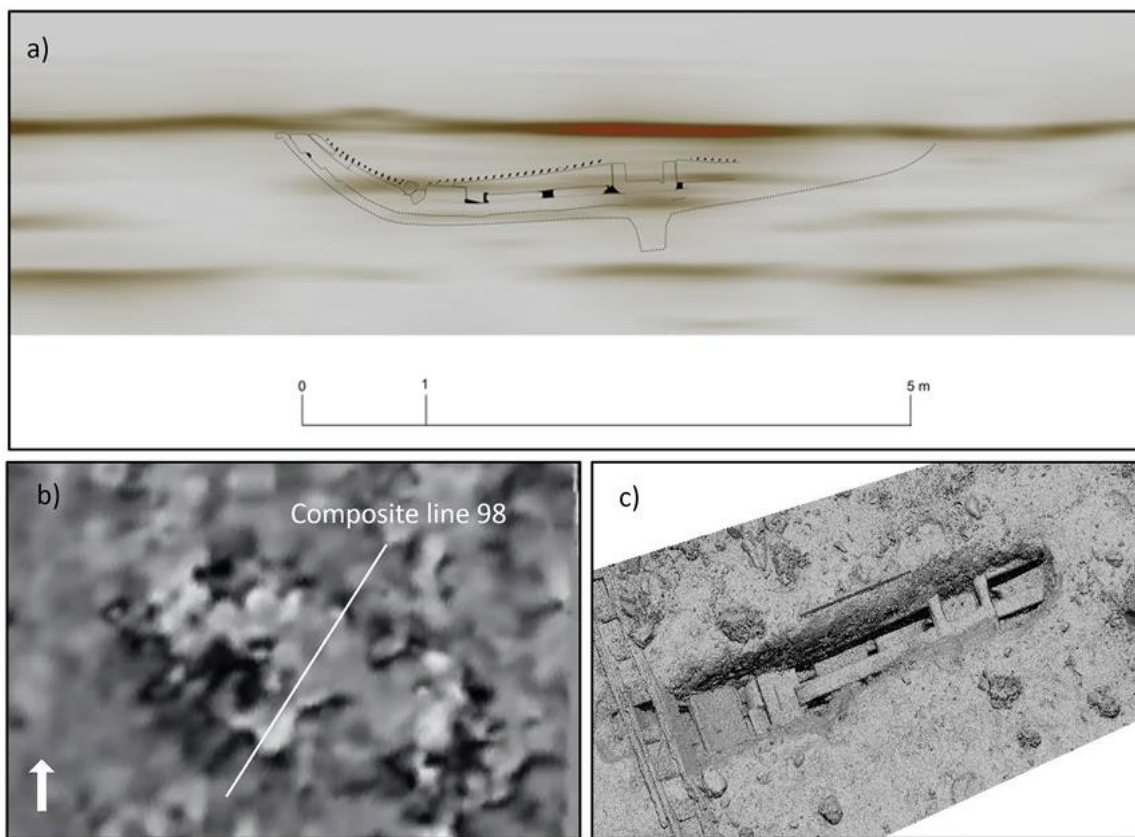


Εικόνα 3.21: Απεικόνιση του εξοπλισμού και του δικτύου καλωδίωσης στο κατάστρωμα ASV. Προστατευτικό (roof box) για τα ευαίσθητα ηλεκτρονικά συστήματα. Η κεραία GPS και το Chirp είναι τοποθετημένα σε κοντάρι μπροστά από το όχημα με τους αισθητήρες στο πίσω μέρος (Ravnås, et al., 2023).



Εικόνα 3.22: (a) Ο χερσαίος σταθμός. (b) Οθόνη που δείχνει τη σεισμική καταγραφή, μαζί με το προκατασκευασμένο πλέγμα για την έρευνα στα δεξιά. (c) Το αυτόνομο όχημα επιφανείας που χρησιμοποιείται για την απόκτηση δεδομένων έρευνας σε ρηχά νερά. (d) Γραμμές πλεύσης της έρευνας (Ravnås, et al., 2023).

Το θαμμένο ναυάγιο του Avaldsnes αναγνωρίστηκε ως μια μεγάλου πλάτους ανωμαλία που φτάνει σε βάθος έως και 0.8 μέτρα κάτω από τον πυθμένα. Το πλοίο είχε μήκος περίπου 18 μέτρα και πλάτος 5.6 μέτρα. Ορισμένα δομικά στοιχεία, όπως η πλώρη, οι κυματοθραύστες και η βάση του καταρτιού, ήταν ορατά στα σεισμικά προφίλ (Εικόνα 3.23.a), επιβεβαιώνοντας την παρουσία τους και συμφωνώντας με παλιότερες καταδυτικές παρατηρήσεις. Παρά τις παρεμβολές από τους σάκους άμμου και τους πέτρινους πασσάλους που είχαν τοποθετηθεί από προηγούμενες αποστολές για επιτόπια συντήρηση του ναυαγίου, τα ακουστικά δεδομένα κατέγραψαν με επιτυχία τη συνολική γεωμετρία του ναυαγίου και έδειξαν μια μικρή κλίση του πλοίου προς τα νοτιοδυτικά (Ravnås, et al., 2023).



Εικόνα 3.23: (a) Ακριβής σε κλίμακα διατομή του πλοίου Avaldsnes απεικονισμένη σε δισδιάστατο σεισμικό προφίλ που τέμνει το μέσο του πλοίου. Λεπτομέρειες, όπως η πρύμνη και το κατάρτι αντιστοιχούν καλά με ισχυρούς ανακλαστήρες υποστηρίζοντας την παρατήρηση μιας ελαφριάς κλίσης προς τα νοτιοδυτικά. (b) Σύνθετη γραμμή 98 που τέμνει το πλοίο Avaldsnes και την καρίνα. (c) Φωτογραμμετρική λεπτομέρεια της πρύμνης από τον M. Ditt (Ravnås, et al., 2023).

Ανάπτυξη στρατηγικών μεγάλης κλίμακας αρχαιολογικών ερευνών με χρήση Chirp στη Δανία.

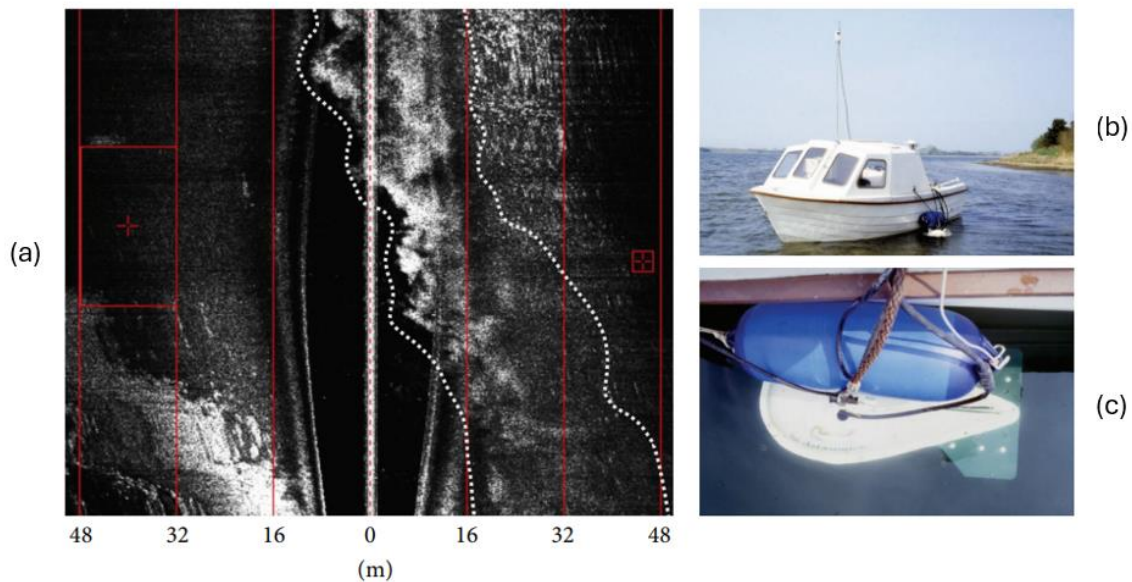
Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει μια πρακτική βασισμένη στην εμπειρία για τη διεξαγωγή μεγάλης κλίμακας θαλάσσιων αρχαιολογικών ερευνών, χρησιμοποιώντας συστήματα Chirp (SBP). Η στρατηγική αυτή ξεκίνησε να αναπτύσσεται από το 1993 και στη συνέχεια εφαρμόστηκε και εξελίχθηκε μέσα από πολλές αρχαιολογικές έρευνες, ιδιαίτερα μετά το 2006, με τη χρήση του συστήματος Teledyne Chirp III.

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε στη Δανία και έχει σχεδιαστεί ειδικά για να εντοπίζει λεπτά, θαμμένα αρχαιολογικά ευρήματα σε ρηγά θαλάσσια περιβάλλοντα, όπως γραμμές στύλων (pole lines), χώροι κατοικιών (dwelling pits), αλιευτικές παγίδες και ναυάγια. Ένα από τα βασικά της πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα ερμηνείας των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, καθώς και η ευκολία προσαρμογής της πορείας των γραμμών σάρωσης, ώστε να

βελτιστοποιείται ο εντοπισμός δομών που έχουν τροποποιηθεί από ανθρώπινη δραστηριότητα.

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το αναλογικό Datasonics Chirp II, ενώ αργότερα αντικαταστάθηκε από το Teledyne Chirp III, που λειτουργούσε σε εύρος σάρωσης 2-22 kHz. Τοποθετήθηκε, επίσης ο μετατροπέας (Εικόνα 3.24) στο πλάι του σκάφους, ώστε να μειωθεί ο θόρυβος εξαιτίας της προπέλας. Η συλλογή των δεδομένων γινόταν με χαμηλή ταχύτητα (περίπου 0.5 m/s), γεγονός που επέτρεψε την ερμηνεία πιθανών αρχαιολογικών ευρημάτων σε πραγματικό χρόνο. Στην αρχή, οι γραμμές έρευνας (βλ. Εικόνα 3.27.a) ήταν αραιές (με αποστάσεις έως 100–200 m), αλλά σε περιοχές με πολλές ακουστικές διαταραχές, η απόσταση μειωνόταν στα 5–10 m, ώστε να βελτιωθεί η ανάλυση και η ακρίβεια εντοπισμού μικρής κλίμακας χαρακτηριστικών.

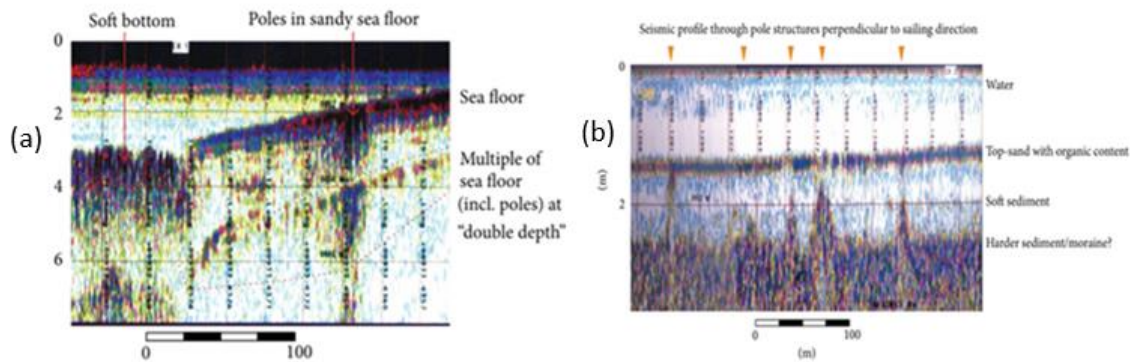
Για να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα από τα ακουστικά δεδομένα, η διαδικασία συμπεριέλαβε δύτες, οι οποίοι εντόπισαν επιτόπου συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως γραμμές στύλων ή λάγκους κατοικιών, ενισχύοντας έτσι την αξιοπιστία της ερμηνείας.



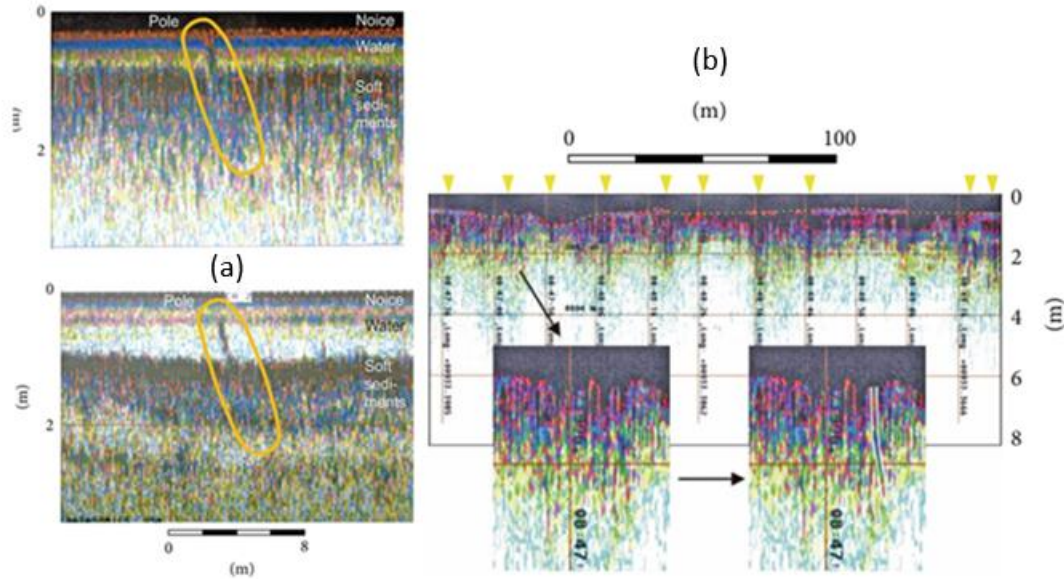
Εικόνα 3.24: (a) Πλευρική σάρωση «σύννεφου» φυσαλίδων από προπέλα ταχύπλοου, που εμποδίζει το σήμα. (b) Πλαϊνή τοποθέτηση του sonar («ψάρι») και (c) DGPS για αποφυγή φυσαλίδων και κραδασμών (Grøn & Boldreel, 2014).

Η συγκεκριμένη στρατηγική είχε θετικά αποτελέσματα, καθώς οδήγησε στον εντοπισμό πολλών αρχαιολογικών θέσεων σε ρηχά νερά της Δανίας. Ανάμεσα στα ευρήματα περιλαμβάνονται φράγματα από την εποχή των Βίκινγκς (βλ. Εικόνα 3.29), ναυάγια, καθώς και βυθισμένες κατασκευές που σχετίζονται με παλαιούς οικισμούς. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το ναυάγιο Lundeborg 1, το οποίο χαρτογραφήθηκε με μεγάλη ακρίβεια χάρη στη χρήση αυτής της μεθόδου.

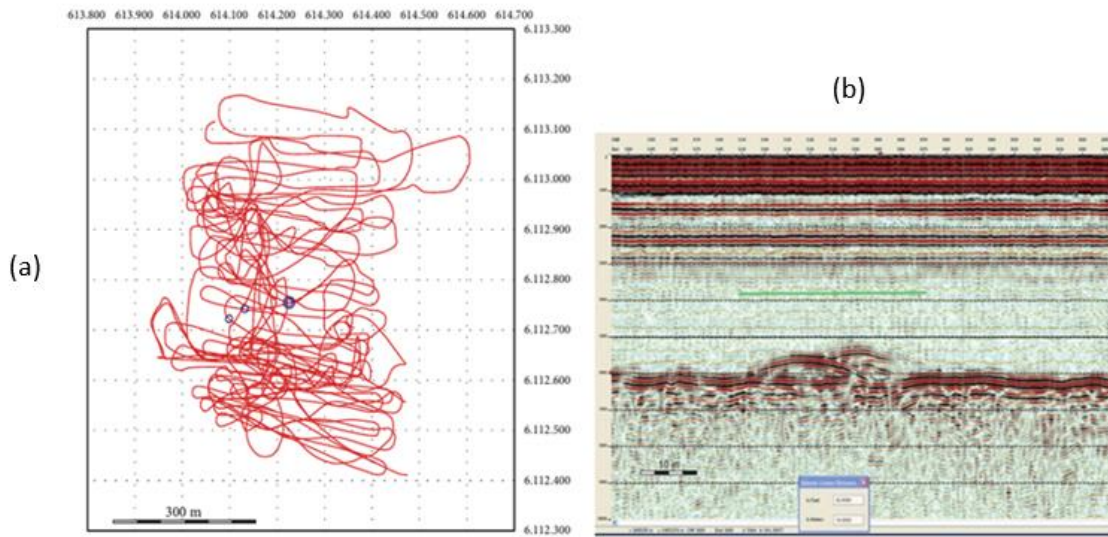
Τα σεισμικά προφίλ Chirp εμφάνισαν καθαρές ανακλαστικές δομές κατακόρυφης γεωμετρίας, που επέτρεψαν τον εντοπισμό ευθυγραμμισμένων πασσαλοδομών (βλ. Εικόνα 3.25.a, 3.26), καθώς και στρωματογραφικές ασυνέχειες, οι οποίες συνδέονται με ανθρώπινη δραστηριότητα (βλ. Εικόνα 3.25.b). Η δυνατότητα ερμηνείας των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς επέτρεψε την άμεση προσαρμογή του σχεδίου έρευνας ανάλογα με τα ευρήματα στο πεδίο (Grøn & Boldreel, 2014).



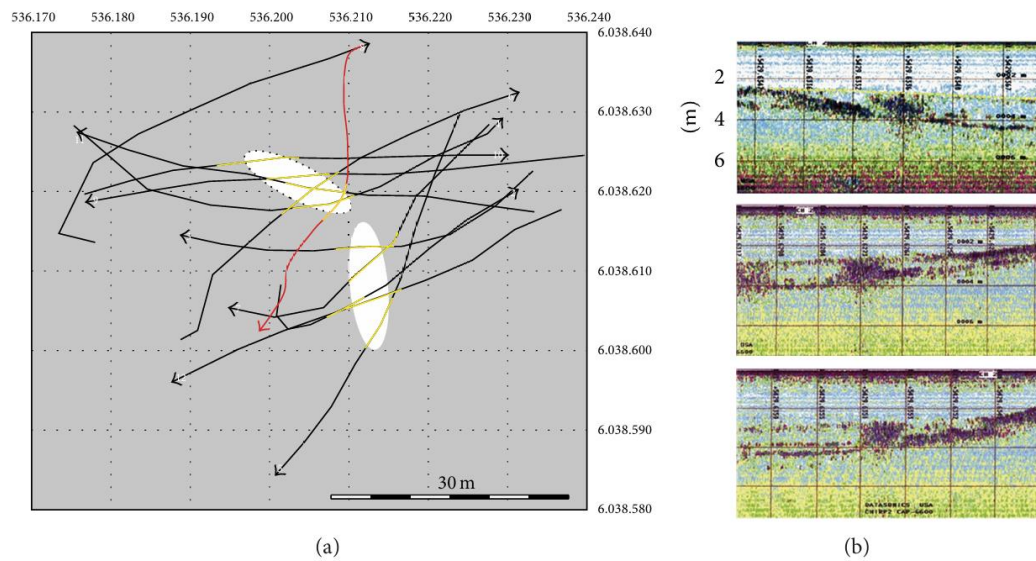
Εικόνα 3.25: (a) Προφίλ Chirp που απεικονίζει την παρουσία πασσάλων εντός αμμώδους θαλάσσιου πυθμένα, με διακριτή επιφάνεια θαλάσσιου βυθού και εμφάνιση «διπλού βάθους» λόγω πολλαπλής αντανάκλασης. Διακρίνονται επίσης περιοχές με χαλαρό ίζημα. (b) Προφίλ Chirp κάθετο προς τη διάταξη των πασσάλων, όπου απεικονίζεται η στρωματογραφία με διακριτές ζώνες: νερό, ανώτερο στρώμα άμμου με οργανικά υπολείμματα, χαλαρό ιζηματογενές υλικό και σκληρότερα στρώματα. Οι γραμμικές ανωμαλίες δείχνουν την ύπαρξη σειρών από ενσφηνωμένους πασσάλους, πιθανά σε διαδοχικές φάσεις κατασκευής ή επισκευής (Grøn & Boldreel, 2014).



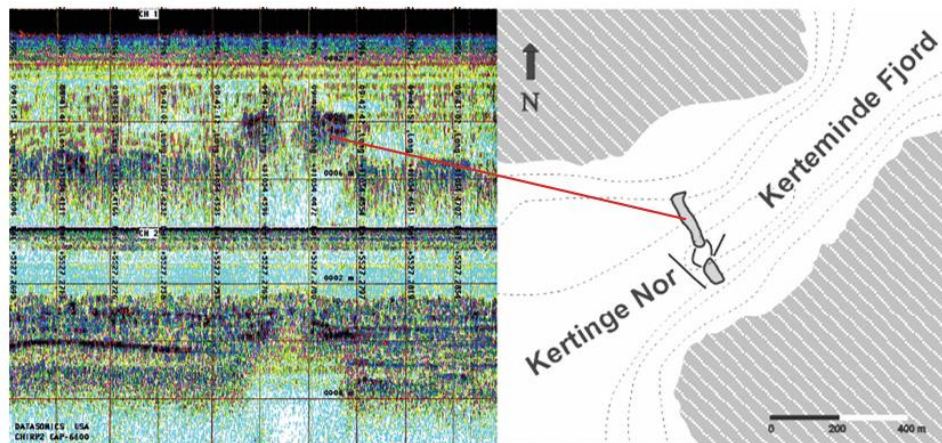
Εικόνα 3.26: (a) Chirp απεικόνιση κεκλιμένου στύλου (διάμ. 8 cm) ορατού εν μέρει στον πυθμένα (άνω: 2–7 kHz, κάτω: 8–23 kHz). (b) Chirp προφίλ από την ακτογραμμή του Haithabu δείχνει συγκεντρώσεις στύλων (κίτρινα βέλη) που αντιστοιχούν σε αποβάθρες αποβίβασης κάθετες στο προφίλ (Grøn & Boldreel, 2014).



Εικόνα 3.27: (a) Πειραματική γραμμή πλεύσης για εντοπισμό του Ναυαγίου 1 (διπλός κύκλος) και δύο ακόμη πιθανών ναυαγίων, εκ των οποίων το δυτικότερο ίσως είναι το Ναυάγιο 2 (μισό μεσαιωνικό πλοίο). (b) Chirp διατομή του Ναυαγίου 1 με ορατά στοιχεία πάνω & κάτω από τον πυθμένα. Διακρίνεται το ανασκαμμένο και το τμήμα του μέσα σε ιζήματα. Η ερμηνεία έγινε με GeoGraphix (Grøn & Boldreel, 2014).



Εικόνα 3.28: Κατά τη σεισμική έρευνα στο Haddeby Noor (1996), εντοπίστηκε οβάλ σκάφος του 1175 μ.Χ. και παρατηρήθηκε ανωμαλία . Συμπληρωματικά προφίλ (βέλη) κατέγραψαν λεπτομερώς την περιοχή. Η πρώτη ανωμαλία (τομές στην εικόνα 3.28.b) ταυτοποιήθηκε με 95% πιθανότητα ως σκάφος, ενώ η διπλανή (λευκό οβάλ) πιθανόν αφορά φυσικό σχηματισμό, με 50% πιθανότητα να είναι επίσης σκάφος (Grøn & Boldreel, 2014).



Εικόνα 3.29: Το φράγμα της εποχής των Βίκινγκς που ανακαλύφθηκε στο Kerteminde Fjord το 1996. Το φράγμα εμφανίστηκε ως ακουστική ανωμαλία μήκους 70-80 μέτρων (Grøn & Boldreel, 2014).

3.3 Συμπεράσματα

Από τις παραπάνω έρευνες προκύπτει ότι το σύστημα Chirp SBP αποτελεί ένα αρκετά ισχυρό εργαλείο, το οποίο δεν αρκεί από μόνο του για την πλήρη ερμηνεία των υποθαλάσσιων πληροφοριών. Όμως, η απόδοσή του ενισχύεται όταν συνδυάζεται με άλλες μεθόδους ή και εργαλεία (π.χ. καταδύσεις, πυρηνοληψίες, τηλεχειριζόμενα οχήματα, σόναρ πλευρικής σάρωσης κλπ.), ενώ η αποτελεσματικότητά του αυξάνεται όταν υπάρχει ήδη κάποιο αρχαιολογικό υπόβαθρο ή γνώση.

Σε πιο γενικά περιβάλλοντα ή πλαίσια, το Chirp SBP μπορεί να προσφέρει χρήσιμα δεδομένα. Συνολικά, είναι φανερό ότι ο συνδυασμός διαφορετικών μεθόδων δεν είναι απλώς τεχνική επιλογή, αλλά αποτελεί επίσης στρατηγική απόφαση. Η επιλογή των κατάλληλων τεχνικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες της περιοχής υπό μελέτη και από τους στόχους της κάθε έρευνας.

Κεφάλαιο 4^ο : Δυσδιάστατη προσομοίωση για την ανίχνευση θαμμένων αντικειμένων

4.1 Το πρόγραμμα ReflexW

Το ReflexW είναι ένα πακέτο γεωφυσικού λογισμικού που αναπτύχθηκε για την επεξεργασία και ερμηνεία δεδομένων. Σύμφωνα με τον επίσημο ιστότοπο του Sandmeier Geo (Dr. Karl-Josef Sandmeier, 2024), το ReflexW υποστηρίζει μια σειρά γεωφυσικών δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των σεισμικών, του γεωραντάρ (GPR) κλπ. Διαθέτει πολλαπλές γεωμετρικές διαμορφώσεις, όπως επιφανειακή ανάκλαση/διάθλαση, σε ζεύγη γεωτρήσεων (crosshole) και τομογραφικές διατάξεις.

Επιπροσθέτως, προσφέρει μια σειρά από δυνατότητες που το καθιστούν ως ευέλικτο εργαλείο για την ανάλυση γεωφυσικών δεδομένων. Επιτρέπει στους χρήστες να προσαρμόζουν τη ρύθμιση του λογισμικού στις συγκεκριμένες ανάγκες τους, είτε πρόκειται για επεξεργασία δεδομένων 2D ή 3D, είτε για οπτικοποίηση ή μοντελοποίηση, συγκεκριμένα βασίζεται σε άμεση μοντελοποίηση για την προσομοίωση της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method - FD) ([Ενότητα 4.2](#)).

Το ReflexW είναι συμβατό με πολλά είδη αρχείων δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των πιο διαδεδομένων μορφών, όπως τα SEG-Y και SEG2.

Μεταξύ των εργαλείων επεξεργασίας του, το ReflexW περιλαμβάνει τόσο τη χειροκίνητη όσο και την αυτόματη επιλογή των αφίξεων σεισμικών ή ραντάρ κυμάτων, και παρέχει λειτουργίες για αποσυνέλιξη, στατική διόρθωση, χωροθέτηση κλπ. Υποστηρίζει τη διαδραστική ανάλυση ταχύτητας και την επεξεργασία του κοινού ενδιαμέσου σημείου (CMP). Το λογισμικό περιλαμβάνει επίσης εξελιγμένες λειτουργίες τρισδιάστατης απεικόνισης, όπως η δημιουργία τρισδιάστατων όγκων από γραμμές λήψης 2D, η προβολή δεδομένων ως τομές ή κύβους και η υπέρθεση αποτελεσμάτων σε χάρτες Google.

Τέλος, υποστηρίζει επίσης την τομογραφική ανάλυση και τη δημιουργία συνθετικών σειсмоγραμμάτων. Αυτά τα ολοκληρωμένα χαρακτηριστικά καθιστούν το ReflexW κατάλληλο για ποικίλες γεωφυσικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των αρχαιολογικών ερευνών, των περιβαλλοντικών και γεωτεχνικών μελετών και της αναζήτησης ορυκτών πόρων.

Στις παρακάτω υποενότητες θα απεικονιστούν και αναλυθούν οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας, οι οποίες είχαν σκοπό

να προσομοιάσουν όσο το δυνατόν περισσότερο, συνθήκες θαμμένων ή/και μερικώς θαμμένων αντικειμένων σε ρηχά θαλάσσια περιβάλλοντα.

Τέλος, στην [Ενότητα Π.1](#), του [Παραρτήματος](#), αναλύονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά τη χρήση του προγράμματος ReflexW για την επιτυχημένη δημιουργία των μοντέλων προσομοίωσης.

Δημιουργήθηκαν 3 μέρη μοντέλων, με το πρώτο μέρος να περιέχει μοντέλα απλής γεωμετρίας και συνθηκών, το δεύτερο περιέχει περίπλοκα μοντέλα (σώμα/σώματα που διαπερνούν περισσότερα από ένα στρώμα) και τέλος το τρίτο περιέχει πιο περίπλοκα μοντέλα (σώμα/σώματα πολύ μεγαλύτερων ή/και μικρότερων διαστάσεων και σε μεγαλύτερα βάθη).

4.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method)

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών αποτελεί βάση της προσομοίωσης της διάδοσης των κυμάτων στο λογισμικό ReflexW. Το πρόγραμμα αξιοποιεί τη συγκεκριμένη αριθμητική προσέγγιση για τη μοντελοποίηση της διάδοσης και της ανάκλασης των σεισμικών κυμάτων σε πολυστρωματικά γεωλογικά περιβάλλοντα.

Αναλυτικότερα, η προσομοίωση της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στηρίζεται στην επίλυση της ακουστικής κυματικής εξίσωσης, η οποία περιγράφει τη μεταβολή της πίεσης στο χώρο και στο χρόνο. Στην περίπτωση των ακουστικών κυμάτων, η εξίσωση αυτή εκφράζει τη διάδοση διαμήκων (P) κυμάτων σε ρευστό ή στερεό μέσο, όπου η διεύθυνση διάδοσης είναι παράλληλη προς τη διεύθυνση της ταλάντωσης των σωματιδίων. Τα ακουστικά κύματα προκαλούν διαδοχικά πυκνώματα και αραιώματα στο μέσο, δημιουργώντας τις μεταβολές πίεσης που συνιστούν τη μορφή του κύματος.

Η επίλυση της κυματικής εξίσωσης πραγματοποιείται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, η οποία αντικαθιστά τις παραγώγους της εξίσωσης με προσεγγιστικές εκφράσεις που βασίζονται σε διακριτές τιμές των μεταβλητών σε ένα πλέγμα (grid). Ο χώρος και ο χρόνος δηλαδή διαχωρίζονται σε μικρά χωρία και η εξίσωση επιλύεται αριθμητικά σε κάθε σημείο του πλέγματος. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την προσέγγιση της διάδοσης των κυμάτων ακόμη και σε πολύπλοκα μοντέλα, όπου η αναλυτική λύση είναι αδύνατη.

Στη συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιείται το αριθμητικό σχήμα, το οποίο είναι δεύτερης τάξης ακρίβειας ως προς τον χρόνο και τέταρτης ως προς το χώρο. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, πρέπει να τηρούνται ορισμένες προϋποθέσεις που σχετίζονται με το μέγεθος των χωρίων. Η σχέση μεταξύ αυτών των παραμέτρων καθορίζει την ευστάθεια και την ακρίβεια της προσομοίωσης. Εάν το χρονικό βήμα είναι υπερβολικά μεγάλο ή το πλέγμα

έχει αραιή διακριτοποίηση, το αποτέλεσμα μπορεί να οδηγήσει σε αριθμητική αστάθεια και παραμόρφωση της κυματομορφής (Μπριντάκης, 2018).

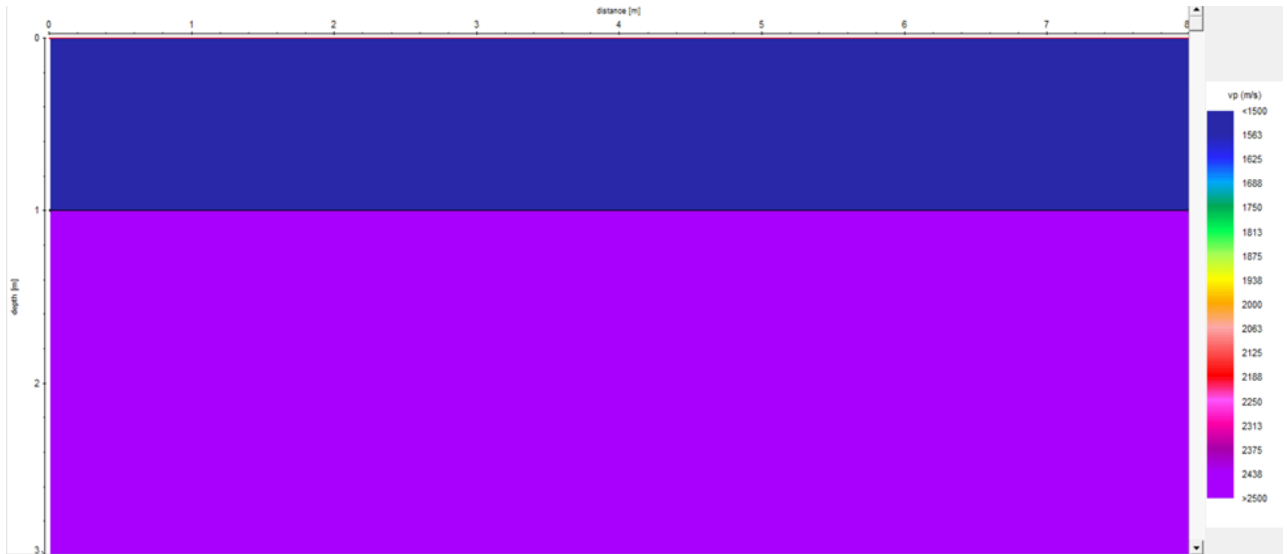
4.3 Δημιουργία συνθετικών σεισμικών τομών

4.3.1 Πρώτο μέρος προσομοιώσεων

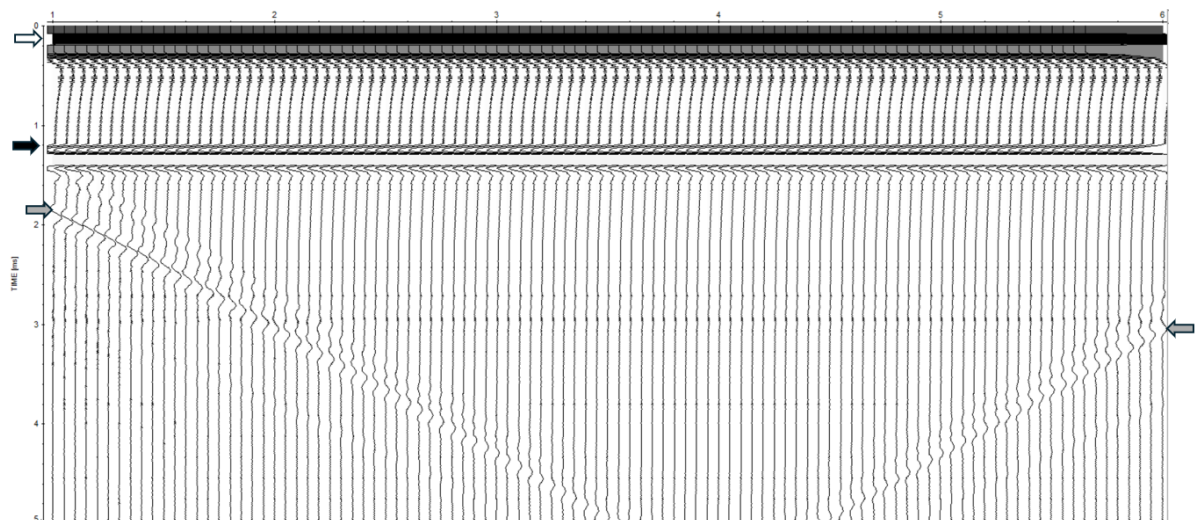
Η υποενότητα αυτή παρουσιάζει απλές περιπτώσεις μοντέλων, όπου το κάθε μοντέλο έχει ονομασία ανάλογα με τον αριθμό των στρωμάτων και σωμάτων, καθώς και την ταχύτητα διάδοσης. Στο πρώτο μέρος το (a) αντιστοιχεί σε ταχύτητα διάδοσης 1500 m/s, το (b) σε 2500 m/s και το (c) σε 4000 m/s. Παράδειγμα: μοντέλο 2 στρωμάτων (1500 και 2500 m/s) με ένα στόχο στο δεύτερο στρώμα ονομάζεται Μ.2.1.b. Πιο λεπτομερώς, οι παράμετροι προσομοίωσης, όπως τα χαρακτηριστικά του κυματιδίου πηγής, η οριζόντια απόσταση πηγής-υδροφώνου, η ισαπόσταση σταθμών κτλ, παρουσιάζονται στην [Ενότητα Π.1](#), του [Παραρτήματος](#), στον Πίνακα Π.2, καθώς και στην Εικόνα Π.3 και ισχύουν για όλα τα μέρη προσομοιώσεων.

Μοντέλο Μ.2.0

Η πρώτη προσομοίωση αντιστοιχεί σε ένα μοντέλο δύο στρωμάτων (βλ. Εικόνα 4.1), του οποίου το πρώτο στρώμα έχει ταχύτητα διάδοσης 1500 m/s και πυκνότητα 1 g/cm³, αντιπροσωπεύοντας θαλάσσιο περιβάλλον. Το δεύτερο στρώμα ξεκινά στο βάθος του 1 m, με ταχύτητα 2500 m/s και πυκνότητα 1,7 g/cm³, προσομοιώνοντας εδαφικό σχηματισμό. Ο ανακλαστήρας εντοπίζεται στο όριο μεταξύ των δύο στρωμάτων, εκτείνεται οριζόντια από 0 έως 8 μέτρα και βρίσκεται σε βάθος 1 μέτρου. Τα περισσότερα μοντέλα προσομοίωσης που θα ακολουθήσουν, έχουν σχεδιαστεί με ίδιες ή παρόμοιες παραμέτρους, καθώς και οι συνθετικές καταγραφές, οι οποίες αποδίδουν τις σεισμικές αφίξεις σε σχέση με την απόσταση (οριζόντιος άξονας) και τον χρόνο (κατακόρυφος άξονας).



Εικόνα 4.1: Μοντέλο δύο στρωμάτων (M.2.0).



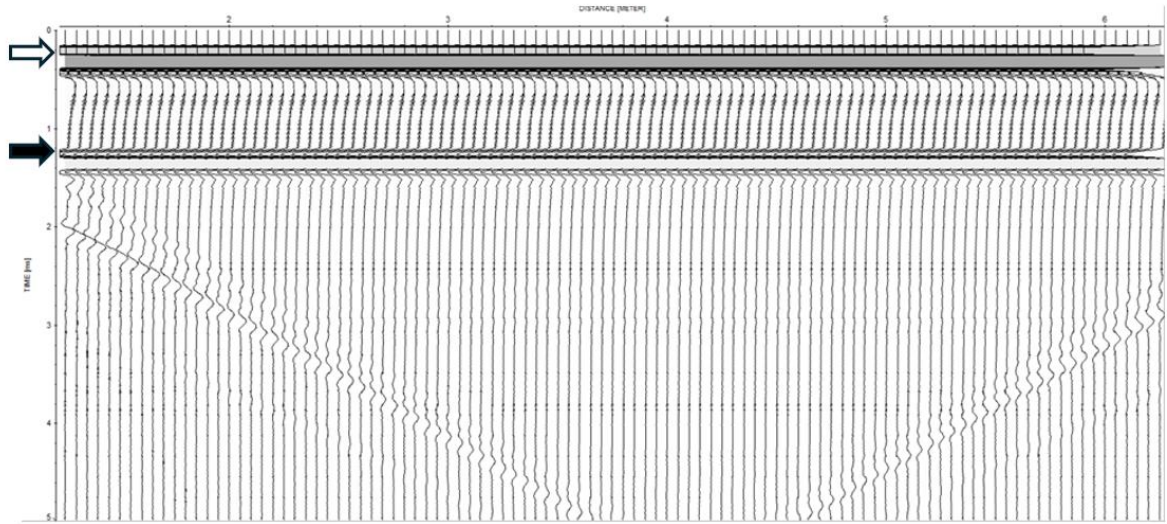
Εικόνα 4.2: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη, τύπου wiggle plot, για το μοντέλο M.2.0, με μηδενική απόσταση πηγής και δέκτη.

Ο ανακλαστήρας εντοπίζεται σε διπλό κατακόρυφο χρόνο 1.2 ms (μαύρο βέλος), που αντιστοιχεί στο βάθος 1 m και υπολογίστηκε όπως φαίνεται παρακάτω:

$$t_{M.2.0}(1) = \frac{2 \times 0.9m}{1500 \frac{m}{s} \times 1000 \frac{s}{ms}} = 1.2 \text{ ms} \quad (4.1)$$

Το λευκό βέλος επισημαίνει τα απευθείας κύματα, ενώ τα γκρι βέλη τις ανεπιθύμητες τεχνητές ανακλάσεις, οι οποίες οφείλονται στην αδυναμία εξασθένησης των απορροφητικών ορίων από τα πλαϊνά όρια του μοντέλου, γεγονός το οποίο μπορεί να οφείλεται στην επιλεγμένη λειτουργία Boundary Conditions (Πίνακα Π.1). Οι τεχνητές

αυτές ανακλάσεις παρουσιάζονται στις περισσότερες καταγραφές σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη που έχουν προκύψει στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, όμως η εμφάνισή τους είναι λιγότερο έντονη σε εκείνα που περιέχουν τουλάχιστον ένα σώμα. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως στους υπολογισμούς των χρόνων όλων των περιπτώσεων, λαμβάνεται υπόψιν ότι οι πηγές και οι δέκτες έχουν τοποθετηθεί σε βάθος νερού 0.1 m (source/rec z start/end), οπότε στο πρώτο στρώμα του κάθε μοντέλου αφαιρείται πάντα το ποσό αυτό από την απόσταση.



Εικόνα 4.3: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη, τύπου wiggle plot, για το μοντέλο M.2.0 με απόσταση πηγής και δέκτη 0.25 m.

Στην συνέχεια για το ίδιο μοντέλο, η απόσταση μεταξύ πηγής και δέκτη αυξήθηκε κατά 0.25 m, ενώ όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παρέμειναν αμετάβλητες. Λόγω της αλλαγής θέσης της πηγής και του δέκτη, στην παρακάτω περίπτωση, καθώς και στις επόμενες, θα εφαρμοστεί Πυθαγόρειο θεώρημα (Εξίσωση 4.3 και 4.4) για τον υπολογισμό της απόστασης που διήνησε το ανακλώμενο κύμα και στη συνέχεια, θα υπολογιστεί ο διπλός χρόνος διαδρομής, όμοια με τον υπολογισμό του διπλού κατακόρυφου χρόνου. Από τους υπολογισμούς που ακολουθούν και σύμφωνα με την Εικόνα 4.3 επιβεβαιώνεται η ελαφριά μετατόπιση των διπλών χρόνων διαδρομής σε σύγκριση με την καταγραφή της Εικόνας 4.2. Αναλυτικότερα:

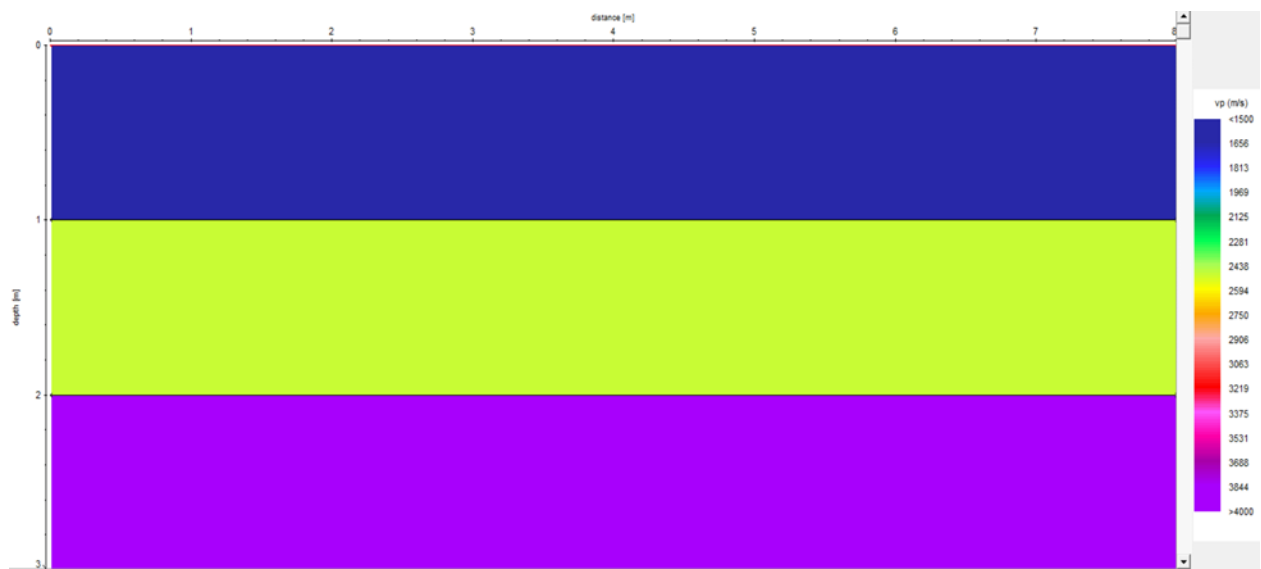
$$d_{M.2.0}(1) = \sqrt{(1 - 0.1)^2 m + \left(\frac{0.25}{2}\right)^2 m} = 0.91 m \quad (4.2)$$

$$t_{M.2.0(0.25)}(0) = \frac{0.25m}{1500 \frac{m}{s} \times 1000 \frac{s}{ms}} = 0.17 ms \quad (4.3)$$

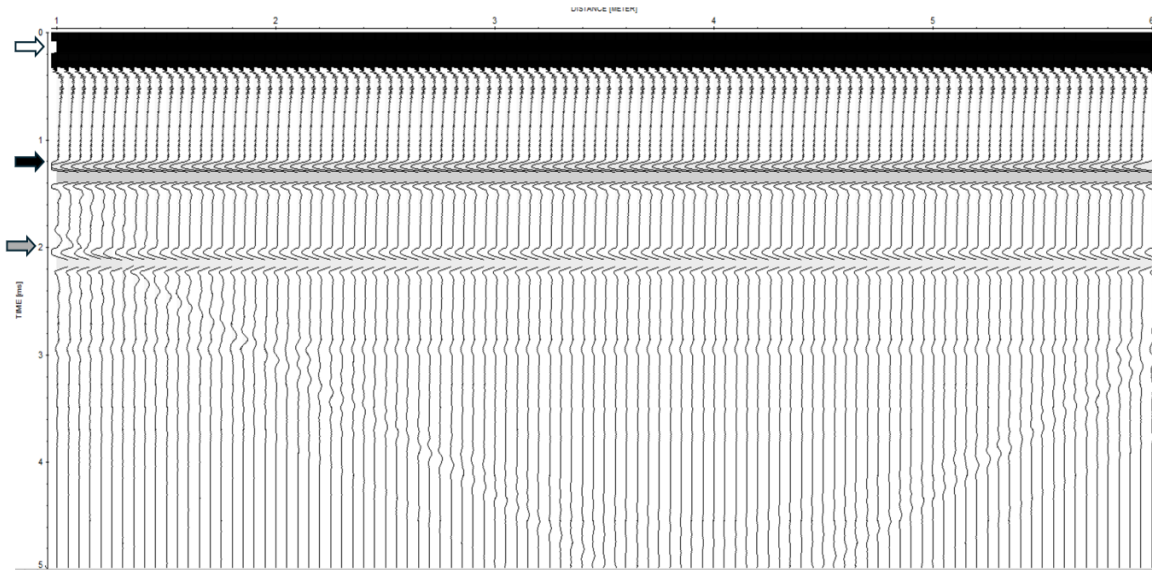
$$t_{M.2.0(0.25)}(1) = \frac{2 \times 0.91m}{1500 \frac{m}{s} \times 1000 \frac{s}{ms}} = 1.21 ms \quad (4.4)$$

Μοντέλο M.3.0

Το επόμενο μοντέλο της Εικόνας 4.4, παρουσιάζει ένα επιπλέον στρώμα, σε σύγκριση με το M.2.0 (Εικόνας 4.1), το οποίο στρώμα ξεκινά από το βάθος των 2 m και φτάνει έως τα 3 m, με ταχύτητα 4000 m/s και πυκνότητα 2.4 g/cm³, αντιστοιχώντας πιθανώς σε πιο συμπαγές ιζηματογενές πέτρωμα. Οι ανακλαστήρες εντοπίζονται στα όρια 1 m και 2 m, και εκτείνονται οριζόντια από 0 έως 8 μέτρα. Τα πρώτα δύο στρώματα έχουν ίδιες ταχύτητες διάδοσης και πυκνότητες με το προηγούμενο μοντέλο.



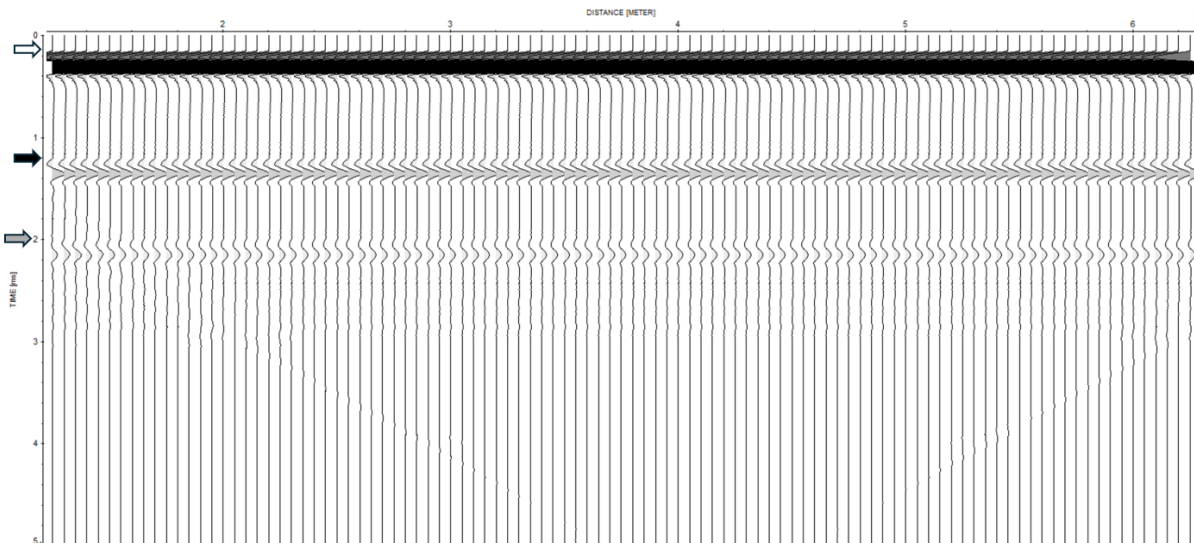
Εικόνα 4.4: Μοντέλο τριών στρωμάτων (M.3.0).



Εικόνα 4.5: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot για το μοντέλο M.3.0 με μηδενική απόσταση πηγής και δέκτη.

Στην καταγραφή της Εικόνας 4.5 παρατηρούνται τα απευθείας κύματα με λευκό βέλος. Στη συνέχεια, η πρώτη κύρια ανάκλαση (μαύρο βέλος) παρατηρείται σε διπλό κατακόρυφο χρόνο 1.2 ms (υπολογισμός όμοιος με το M.2.0) και αντιστοιχεί στην ανακλαστική επιφάνεια στο βάθος 1 m, ενώ η δεύτερη ανάκλαση (γκρι βέλος) εμφανίζεται σε χρόνο 2 ms και αντιστοιχεί στη διεπιφάνεια μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου στρώματος (2 m). Υπολογίστηκε με την πρόσθεση του διπλού κατακόρυφου χρόνου που αντιστοιχεί στον πρώτο ανακλαστήρα και υπολογίστηκε ως εξής:

$$t_{M.3.0(2)} = 1.2 \text{ ms} + \frac{2 \times 1 \text{ m}}{\frac{2500 \text{ m}}{\text{s}} \times \frac{1000 \text{ s}}{\text{ms}}} = 2 \text{ ms} \quad (4.5)$$



Εικόνα 4.6: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot για το μοντέλο προσομοίωσης M.3.0 με απόσταση πηγής και δέκτη 0.25 m.

Όσον αφορά την καταγραφή της Εικόνας 4.6 και ομοίως με εκείνη του M.2.0, παρατηρείται μια μετατόπιση στους διπλούς χρόνους διαδρομής. Ο χρόνος διαδρομής των απευθείας, καθώς και εκείνος του πρώτου ανακλαστήρα υπολογίζονται όμοια με την περίπτωση της καταγραφής της Εικόνας 4.3, δηλαδή 0.17 ms (λευκό βέλος) και 1.21 (μαύρο βέλος) ms αντίστοιχα. Στη συνέχεια ο διπλός χρόνος διαδρομής για τον δεύτερο ανακλαστήρα (γκρι βέλος) υπολογίστηκε από τις παρακάτω εξισώσεις (Βαφείδης, 2023):

$$V_n = \left[\frac{\sum_{j=1}^n a_j d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.6)$$

$$t_n^2(x) \approx t_n^2(0) + \frac{x^2}{v_n^2} \quad (4.7)$$

Αναλυτικότερα:

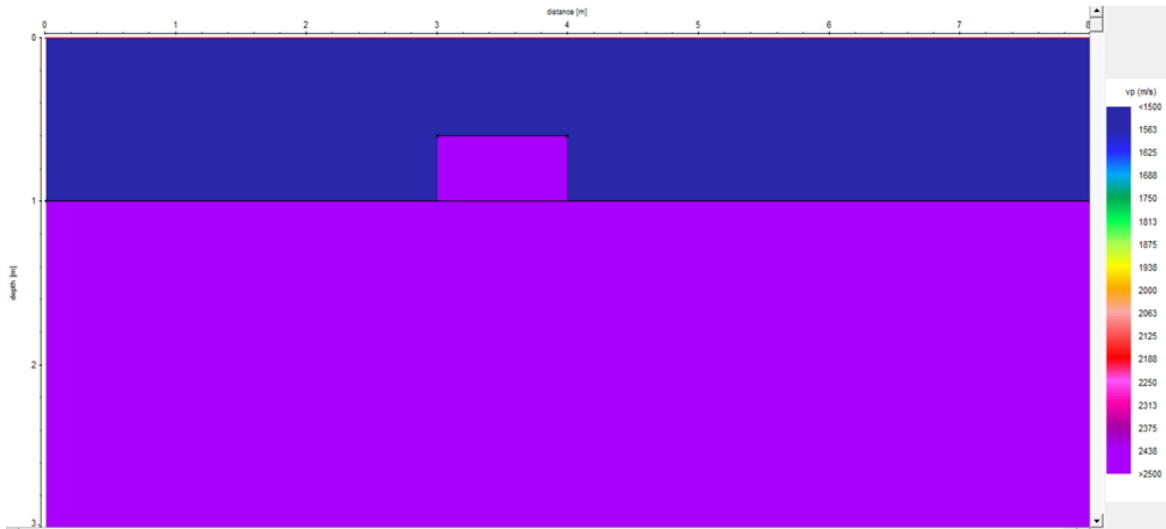
$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{a_1 \cdot d_1 + a_2 \cdot d_2}{\frac{d_1 + d_2}{a_1 + a_2}}} = \sqrt{\frac{1500 \frac{m}{s} \cdot 0.9 m + 2500 \frac{m}{s} \cdot 1 m}{\frac{0.9 m + 1 m}{1500 \frac{m}{s} + 2500 \frac{m}{s}}}} = 1962 m/s \quad (4.8)$$

$$t_n = \sqrt{t_{M.3.0(2)}^2 + \frac{x^2}{V_{RMS}^2}} = \sqrt{2^2 ms + \frac{0.25^2}{1962^2}} = 2 ms \quad (4.9)$$

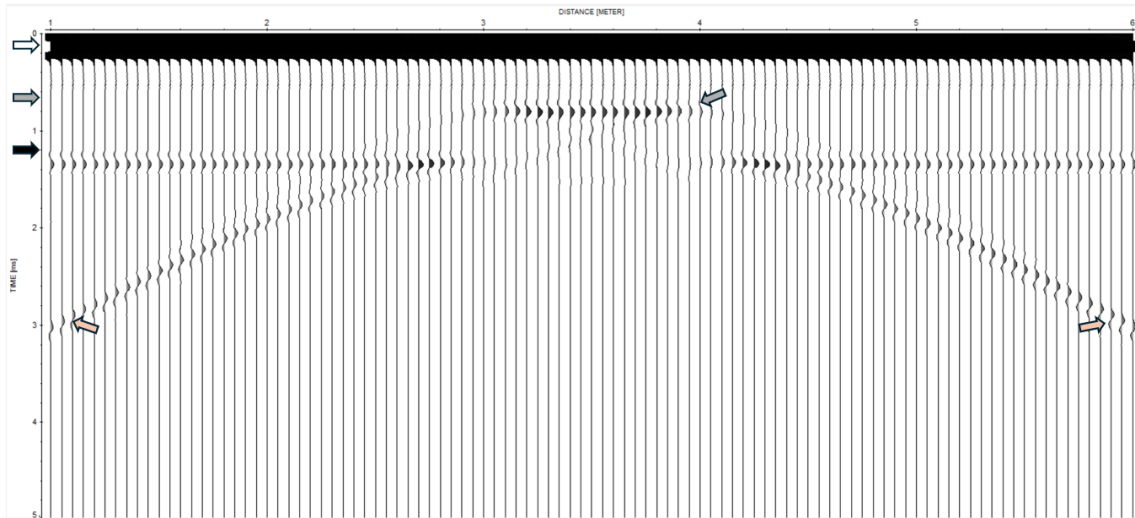
Ο διπλός χρόνος διαδρομής που αντιστοιχεί στην δεύτερη ανακλαστική επιφάνεια (t_n) είναι ίδιος με τον διπλό κατακόρυφο χρόνο που αφορά την καταγραφή κοινής πηγής (Εικόνα 4.5) με μηδενική απόσταση πηγής-δέκτη.

Μοντέλο M.2.1.a

Η συγκεκριμένη προσομοίωση, αφορά μοντέλο δύο στρωμάτων με ίδιες παραμέτρους με εκείνες του M.2.0 (Εικόνα 4.1), αλλά με την παρουσία ενός σώματος ύψους 0.4 και μήκους 1 m μέσα στο πρώτο στρώμα. Η ταχύτητα διάδοσής του, καθώς και η πυκνότητά του είναι όμοιες με εκείνες του δεύτερου στρώματος (2500 m/s και 1.7 g/cm³ αντίστοιχα). Ο στόχος αυτός, όσον αφορά τον οριζόντιο άξονα, βρίσκεται μεταξύ 3 και 4 m.



Εικόνα 4.7: Μοντέλο δύο στρωμάτων, με την παρουσία στόχου στο πρώτο στρώμα (M.2.1.a).

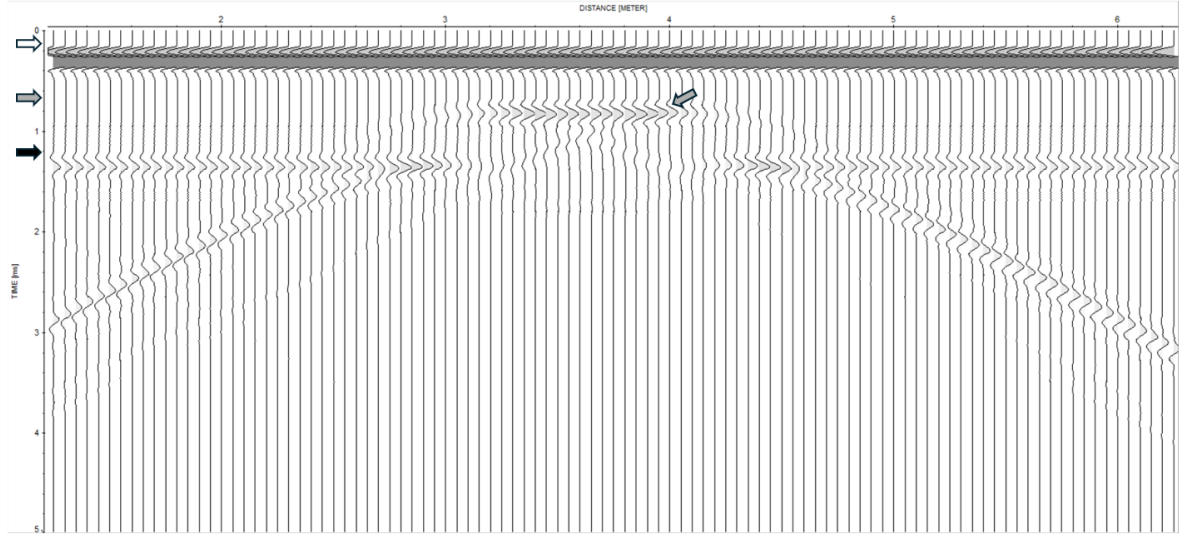


Εικόνα 4.8: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot για το μοντέλο M.2.1.a, με μηδενική απόσταση πηγής-δέκτη.

Τα απευθείας κύματα απεικονίζονται με λευκό βέλος και η κύρια ανάκλαση (μαύρο βέλος) από τη διεπιφάνεια στο 1 m (μεταξύ πρώτου στρώματος και σώματος) παρουσιάζει διαταραχή στα ίχνη που αντιστοιχούν σε πηγές που βρίσκονται πάνω ή δίπλα στο σώμα. Ενώ σε άλλες θέσεις εμφανίζεται συνεχής και επίπεδη, στην περιοχή 3–4 m διακόπτεται, γεγονός που αποδίδεται στη μεταβολή της ακουστικής αντίθεσης από την παρουσία του σώματος και παρατηρείται σε διπλό κατακόρυφο χρόνο 1.2 ms, όμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Οι ανάκλασεις που αντιστοιχούν στο πάνω όριο του σώματος (γκρι βέλη) υπολογίστηκαν σε διπλό κατακόρυφο χρόνο 0.67 ms, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την

Εικόνα 4.8. Τέλος, τα πορτοκαλί βέλη επισημαίνουν τα περιθλώμενα κύματα που προκύπτουν από τα κάτω αριστερά και δεξιά όρια του σώματος.

$$t_s = \frac{2 \times (0.6 - 0.1) m}{1500 \frac{m}{s} \times 1000 \frac{s}{ms}} = 0.67 \text{ ms} \quad (4.10)$$



Εικόνα 4.9: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot για το μοντέλο M.2.1.a, με απόσταση πηγής-δέκτη 0.25 m.

Στην περίπτωση της Εικόνας 4.9, οι διπλός χρόνος διαδρομής του ανακλαστήρα (μαύρο βέλος), καθώς και ο χρόνος διαδρομής των απευθείας αφίξεων (λευκό βέλος) είναι όμοιοι με εκείνους της περίπτωσης του M.2.0, δηλαδή 1.21 ms και 0.17 ms αντίστοιχα. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο διπλός χρόνος διαδρομής των ανακλάσεων που αντιστοιχούν στο σώμα (γκρι βέλη), ως εξής:

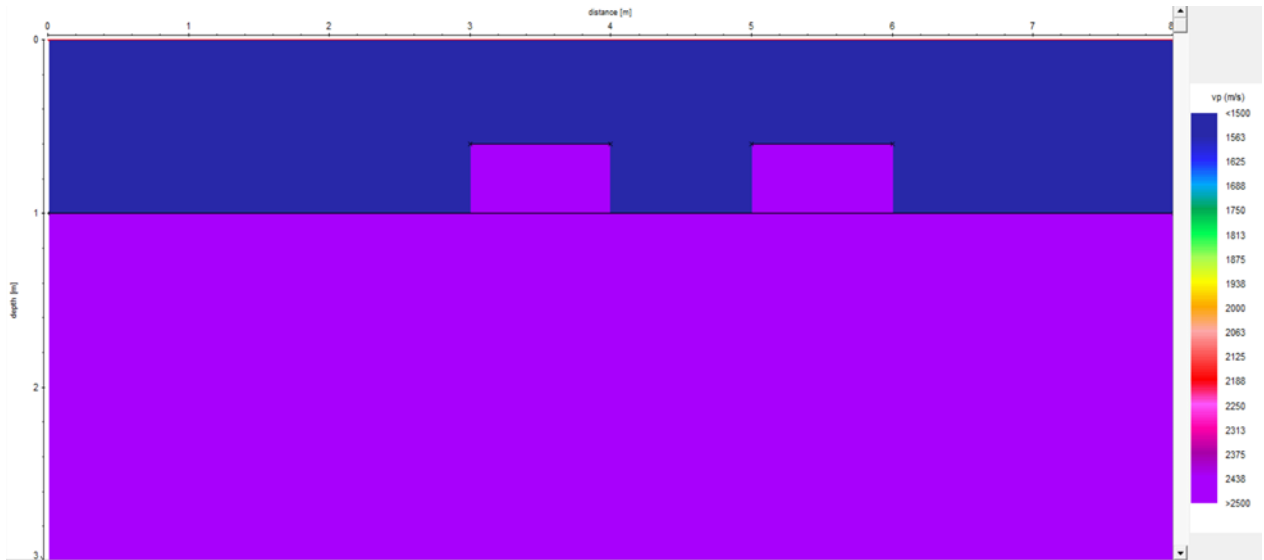
$$d_s = \sqrt{h^2 + \left(\frac{x}{2}\right)^2} = \sqrt{(0.6 - 0.1)^2 m + \left(\frac{0.25}{2}\right)^2 m} = 0.51 m \quad (4.11)$$

$$t_{s(0.25)} = \frac{2 \times 0.51 m}{1500 \frac{m}{s} \times 1000 \frac{s}{ms}} = 0.68 \text{ ms} \quad (4.12)$$

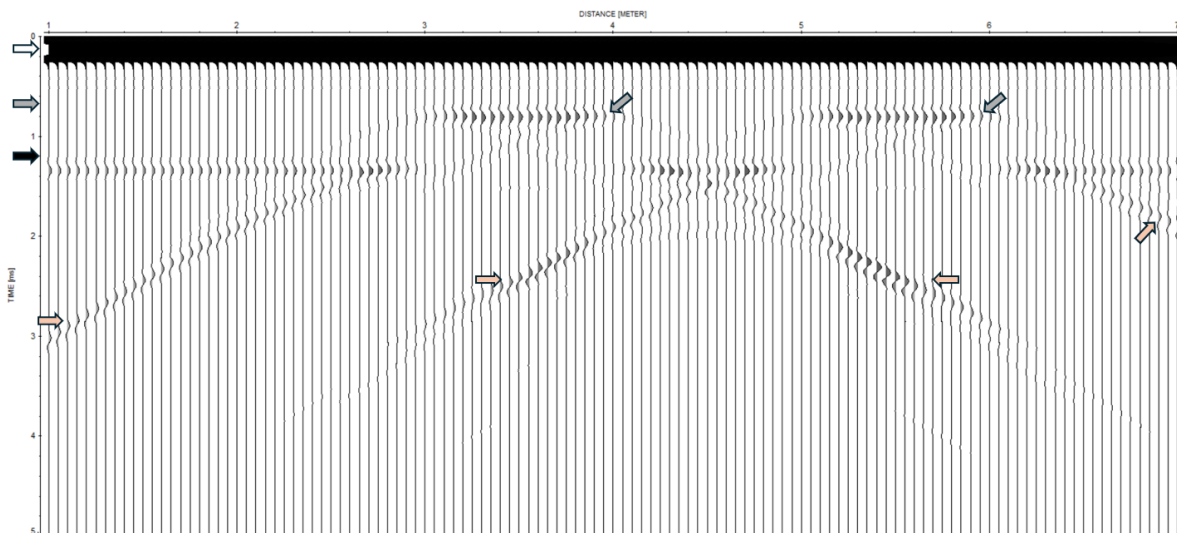
Σε σύγκριση με την περίπτωση της μηδενικής απόστασης πηγή-δέκτη οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές.

Μοντέλο M.2.2.a

Το μοντέλο M.2.2.a (Εικόνα 4.10) διαθέτει παρόμοια χαρακτηριστικά με το M.2.1.a, με τη βασική διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση προστίθεται άλλο ένα σώμα, ίδιων διαστάσεων και μεταξύ 5 και 6 μέτρων στον οριζόντιο άξονα.



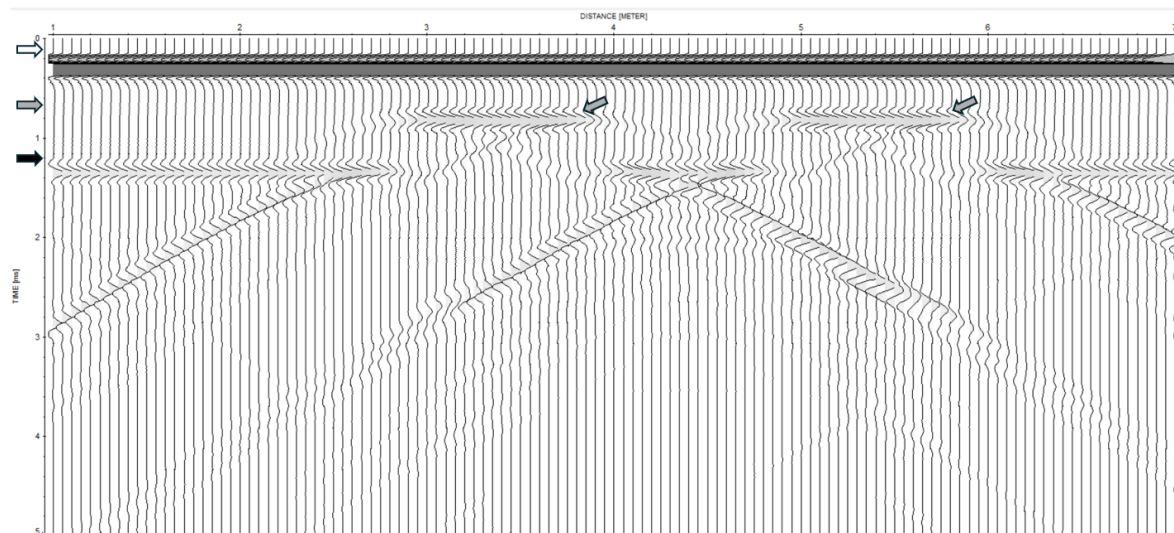
Εικόνα 4.10: Μοντέλο δύο στρωμάτων με δύο όμοια σώματα (M.2.2.a).



Εικόνα 4.11: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot για το μοντέλο M.2.2.a, με απόσταση πηγής-δέκτη 0m.

Σύμφωνα με την Εικόνα 4.11, οι ανακλάσεις που αντιστοιχούν στον ανακλαστήρα (μαύρο βέλος) είναι όμοιες με τις προηγούμενες περιπτώσεις και επισημαίνονται επίσης με λευκό βέλος οι απευθείας αφίξεις. Παρόλα αυτά, οι ανακλάσεις από το στρώμα στο 1 m, παρουσιάζουν μεταβολές στη γεωμετρία, κυρίως κάτω από τα σημεία όπου βρίσκονται τα σώματα, λόγω της μεταβολής στην αντίθεση ταχυτήτων. Οι διπλοί κατακόρυφοι χρόνοι των ανακλώμενων κυμάτων από το πάνω όριο των σωμάτων (γκρι βέλη) είναι ίδιοι με της προηγούμενης περίπτωσης. Ομοίως με την περίπτωση καταγραφής M.2.1.a (Εικόνα 4.8),

τα πορτοκαλί βέλη επισημαίνουν τα περιθλώμενα κύματα τα οποία εμφανίζονται και στις επόμενες συνθετικές καταγραφές σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη.



Εικόνα 4.12: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot για το μοντέλο M.2.2.a, με απόσταση πηγής-δέκτη 0.25 m.

Η Εικόνα 4.12 απεικονίζει τη συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη, με απόσταση πηγής-δέκτη 0.25 m. Στην περίπτωση αυτή, οι απευθείας αφίξεις (λευκό βέλος), οι ανακλάσεις που προκύπτουν από τον ανακλαστήρα (μαύρο βέλος) και οι ανακλάσεις των σωμάτων (γκρι βέλη) εντοπίζονται σε όμοιους χρόνους με την περίπτωση καταγραφής του M.2.1.a (Εικόνα 4.9), δηλαδή: 0.17, 1.21 και 0.68 ms αντίστοιχα.

Η συγκριτική ανάλυση των περιπτώσεων του πρώτου μέρους μοντέλων, μεταξύ εκείνων με μηδενική απόσταση πηγής-δέκτη, καθώς και με απόσταση 0.25 m, δεν έφερε στο φως σημαντικές διαφοροποιήσεις στα βασικά χαρακτηριστικά των συνθετικών καταγραφών, παρά μόνο πολύ μικρές μετατοπίσεις του διπλού χρόνου διαδρομής, καθώς και την καθυστέρηση εμφάνισης των απευθείας αφίξεων. Πιθανώς, τα συμπεράσματα να ήταν πιο σαφή εάν υπήρχε η προσθήκη περισσότερων περιπτώσεων απόστασης πηγής-δέκτη (π.χ. 0.5, 1, 2, και 3 m).

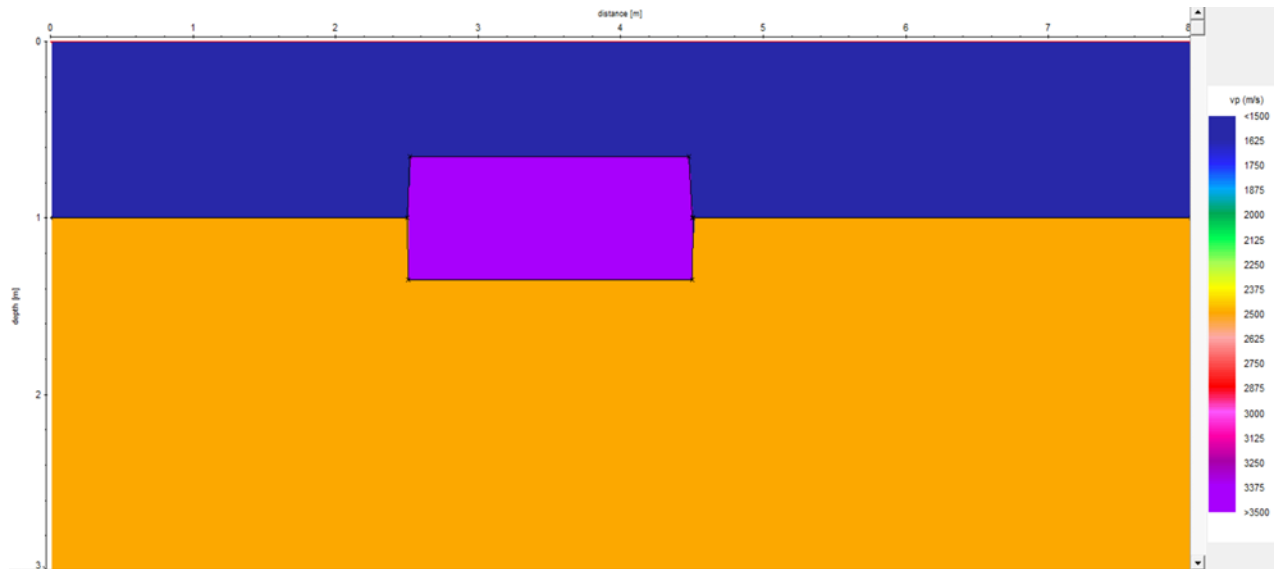
4.3.2 Δεύτερο μέρος προσομοιώσεων

Σε αυτή την υποενότητα, θα αναλυθούν πιο περίπλοκες περιπτώσεις προσομοιώσεων σε σύγκριση με το πρώτο μέρος, οι οποίες αφορούν μοντέλα με στόχους (περίπου όμοιων διαστάσεων με εκείνα του πρώτου μέρους) που διαπερνούν τα στρώματα ή βρίσκονται ανάμεσά τους. Οι ονομασίες είναι όμοιες με εκείνες του πρώτου μέρους, όπου το (a) αντιστοιχεί σε ταχύτητα διάδοσης 1500 m/s, το (b) σε 2500 m/s και το (c) σε 3500 m/s.

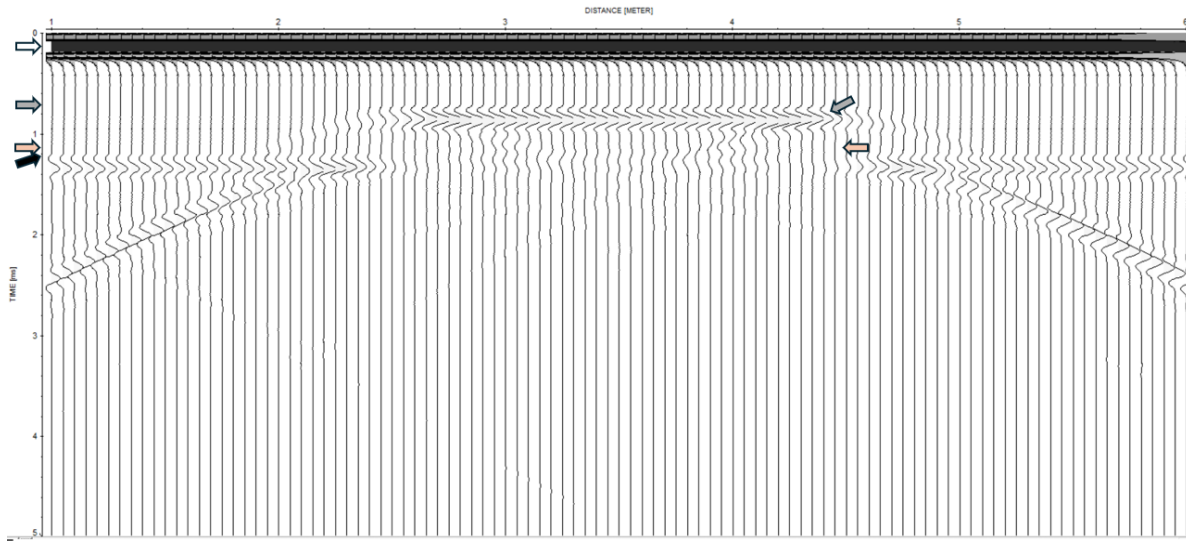
Τέλος, θα αναλυθούν μόνο συνθετικές καταγραφές σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη με μηδενική απόσταση πηγής δέκτη.

Μοντέλο M.2.1.ab

Στην παρακάτω περίπτωση (Εικόνα 4.13), το μοντέλο αποτελείται από δύο στρώματα, με το ανώτερο να προσομοιάζει θαλάσσιο περιβάλλον (ταχύτητα 1500 m/s και πυκνότητα 1 g/cm³) και το δεύτερο εδαφικό υλικό (2500 m/s και 1.7 g/cm³). Ενδιάμεσα του πρώτου ανακλαστήρα τοποθετήθηκε σώμα με ταχύτητα διάδοσης 3500 m/s και πυκνότητα 2.4 g/cm³, ύψους 0.7 m και μήκους 2 m.



Εικόνα 4.13: Μοντέλο δύο στρωμάτων, όπου ενδιάμεσα των δύο στρωμάτων τοποθετήθηκε ο στόχος (M.2.1.ab).



Εικόνα 4.14: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot για το μοντέλο M.2.1.ab.

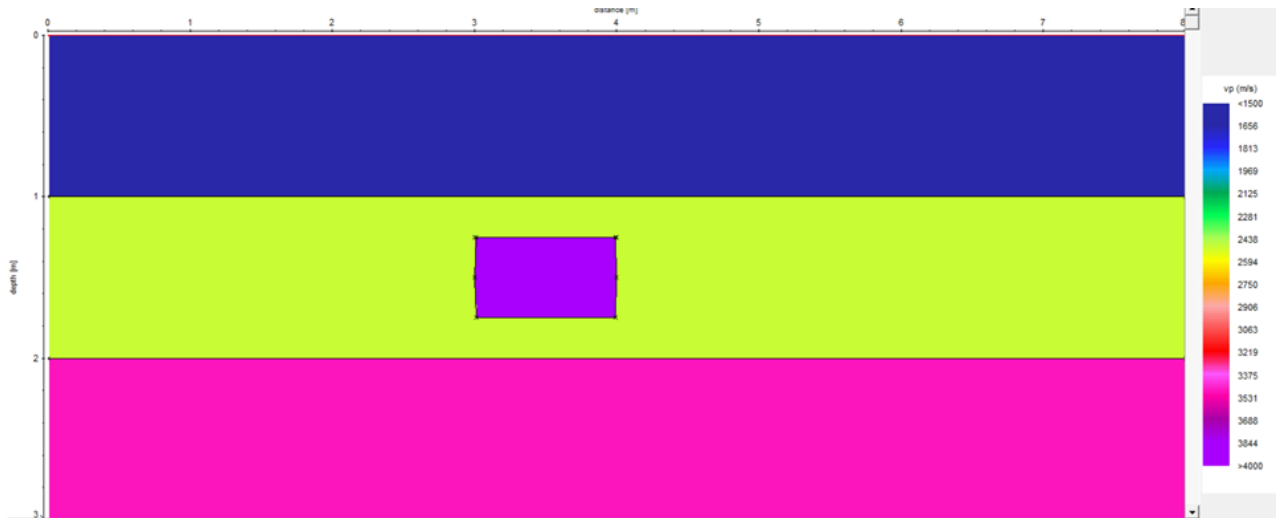
Οι χρόνοι των απευθείας κυμάτων (λευκό βέλος) στην καταγραφή της Εικόνας 4.14 και εκείνοι των ανακλάσεων που προέρχονται από τον ανακλαστήρα (μαύρο βέλος) δεν διαφέρουν από τις περιπτώσεις του πρώτου μέρος μοντέλων και υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο. Ο διπλός κατακόρυφος χρόνος των ανακλάσεων του άνω ορίου του σώματος (γκρι βέλη), αντιστοιχεί σε 0.73 ms (Εξίσωση 4.13), ενώ του κάτω ορίου (πορτοκαλί βέλη) σε 1.13 ms (Εξίσωση 4.14).

$$t_{M.2.1.ab(\acute{\alpha}\nu\omega)} = \frac{2 \cdot (0.65 - 0.1)m}{1500 \frac{m}{s} \cdot 1000 \frac{s}{ms}} = 0.73 \text{ ms} \quad (4.13)$$

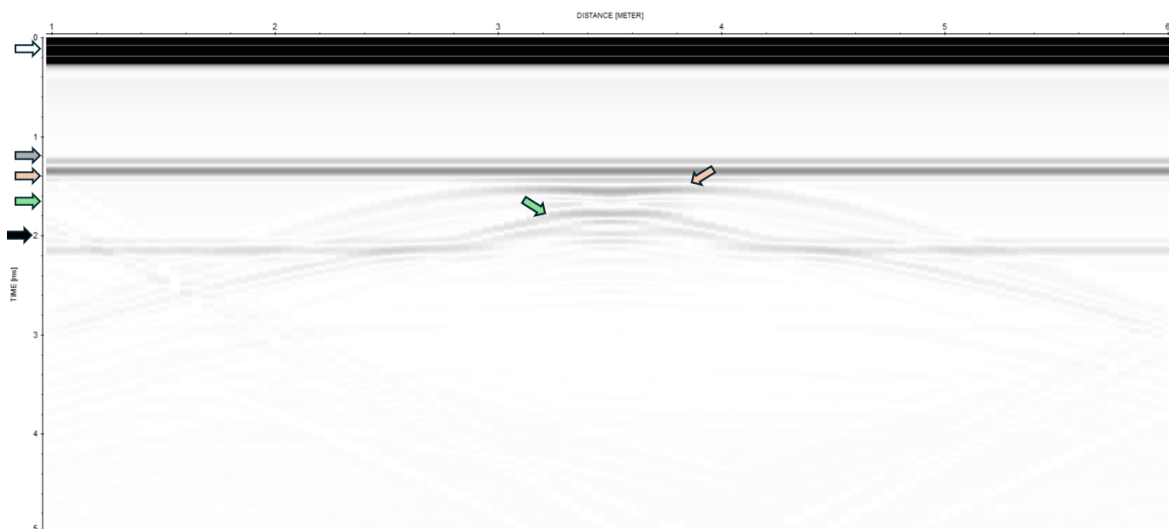
$$t_{M.2.1.ab(\kappa\acute{\alpha}\tau\omega)} = t_{M.2.1.ab(\acute{\alpha}\nu\omega)} + \frac{2 \times 0.7m}{2500 \frac{m}{s} \cdot 1000 \frac{s}{ms}} = 1.13 \text{ ms} \quad (4.14)$$

Μοντέλο M.3.1.b

Η προσομοίωση αυτή, αφορά μοντέλο που αποτελείται από τρία στρώματα, όπου στο δεύτερο στρώμα είναι βυθισμένος στόχος μήκους 1 m και ύψους 0.5 m και με ταχύτητα διάδοσης 4000 m/s και πυκνότητα 2.4 g/cm³ (βλ. Εικόνα 4.15). Οι ταχύτητες διάδοσης αντιστοιχούν σε εκείνες του M.2.1.ab (Εικόνα 4.13), ενώ το τρίτο στρώμα έχει ταχύτητα διάδοσης 3500 m/s και πυκνότητα 2 g/cm³.



Εικόνα 4.15: Μοντέλο τριών στρωμάτων, όπου στο δεύτερο τοποθετήθηκε ο στόχος, μήκους 1 m και ύψους 0.5 m, σε βάθος 1.25 m (M.3.1.b).



Εικόνα 4.16: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) για το μοντέλο M.3.1.b.

Για τη συγκεκριμένη καταγραφή της Εικόνας 4.16 φαίνονται λίγο πιο καθαρά, ανακλάσεις από το πάνω (πορτοκαλί βέλος) και το κάτω μέρος (πράσινο βέλος) του σώματος και αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί από το γεγονός ότι βρίσκονται μεταξύ των 3 και 4 μέτρων, όπως και το υπό μελέτη σώμα. Επιπλέον, ο διπλός κατακόρυφος χρόνος της ανάκλασης, που αντιστοιχεί στο πρώτο στρώμα (γκρι βέλος) είναι 1.2 ms, ενώ εκείνη που αντιστοιχεί στον δεύτερο ανακλαστήρα (μαύρος βέλος) είναι 2 ms (όμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις του πρώτου μέρους μοντέλων). Τέλος, επισημαίνονται, με λευκό βέλος, οι απευθείας αφίξεις.

Οι ανακλάσεις από τα όρια του σώματος υπολογίστηκαν ως εξής:

Για το άνω όριο του στόχου (πορτοκαλί βέλος):

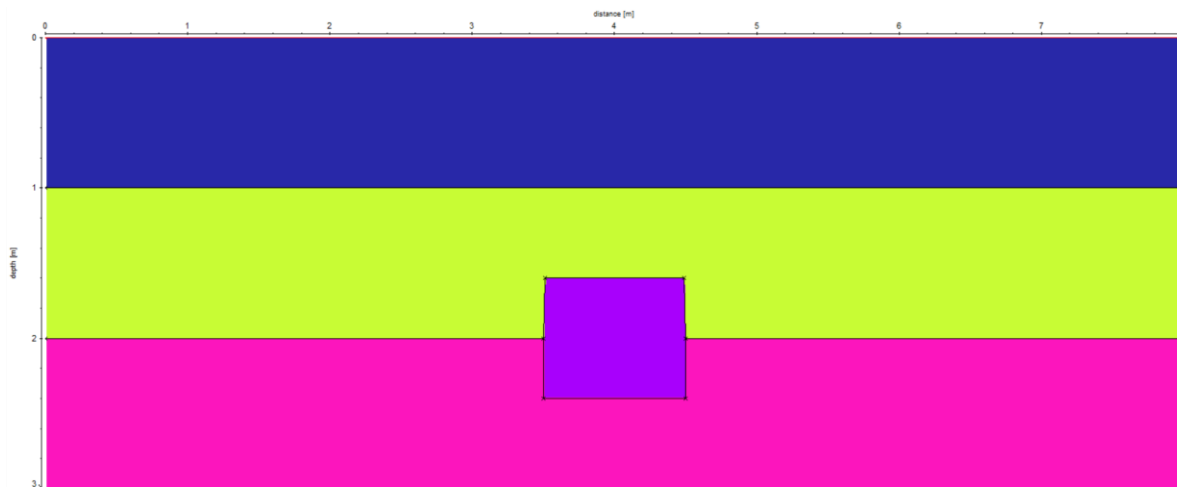
$$t_{M.3.1.b(\acute{\alpha}\nu\omega)} = 1.2 \text{ ms} + \frac{2 \times 0.25 \text{ m}}{2500 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 1000 \frac{\text{s}}{\text{ms}}} = 1.4 \text{ ms} \quad (4.15)$$

Για το κάτω όριο του στόχου (πράσινο βέλος):

$$t_{M.3.1.b(\acute{\kappa}\acute{\alpha}\tau\omega)} = t_{M.3.1.b(\acute{\alpha}\nu\omega)} + \frac{2 \times 0.5 \text{ m}}{4000 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 1000 \frac{\text{s}}{\text{ms}}} = 1.65 \text{ ms} \quad (4.16)$$

Μοντέλο M.3.1.bc

Στη συνέχεια και συγκεκριμένα στην Εικόνα 4.17, απεικονίζεται μοντέλο προσομοίωσης, στο οποίο ο στόχος βρίσκεται βαθύτερα, μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου στρώματος. Οι ταχύτητες διάδοσης καθώς και οι πυκνότητές είναι όμοιες με την προηγούμενη περίπτωση. Επίσης το ύψος του σώματος είναι 0.8 και το μήκος του 1 m.



Εικόνα 4.17: Το μοντέλο τριών στρωμάτων, όπου μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου στρώματος τοποθετήθηκε ο στόχος (M.3.1.bc).



Εικόνα 4.18: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather), τύπου wiggle mode για το μοντέλο M.3.1.bc.

Στην καταγραφή της Εικόνας 4.18, φαίνονται οι ανακλάσεις που αντιστοιχούν στο πρώτο στρώμα (γκρι βέλος) σε χρόνο 1.2 ms και οι ανακλάσεις του δεύτερου στρώματος (μαύρο βέλος) σε χρόνο 2 ms, όμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Η ανάκλαση από το πάνω όριο του σώματος φαίνεται σχετικά καθαρά και επιβεβαιώνεται από την τοποθεσία της μεταξύ 4 και 5 μέτρων. Αξίζει να αναφερθεί πως απαιτείται ενίσχυση για να απεικονίζονται καθαρότερα οι ανακλάσεις του βυθισμένου σώματος. Επιπροσθέτως, υπολογίστηκε ο χρόνος που αντιστοιχεί η ανάκλαση, στο πάνω (πορτοκαλί βέλη) και στο κάτω όριό του στόχου (πράσινα βέλη), όπως φαίνεται παρακάτω:

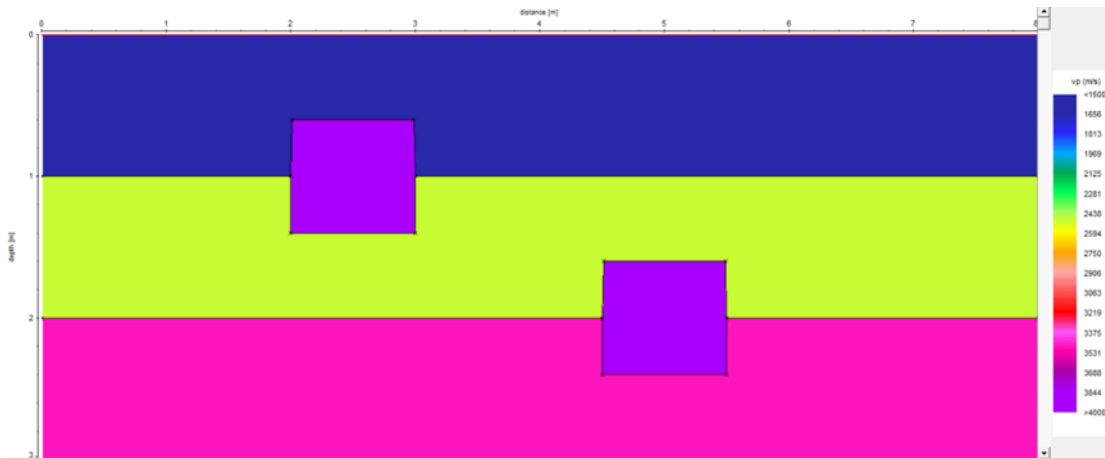
$$t_{M.3.1.bc(\acute{\alpha}\nu\omega)} = 1.2 \text{ ms} + \frac{2 \times 0.6}{2500 \frac{m}{s} \times 1000 \frac{s}{ms}} = 1.68 \text{ ms} \quad (4.17)$$

$$t_{M.3.1.bc(\kappa\acute{\alpha}\tau\omega)} = t_{M.3.1.bc(\acute{\alpha}\nu\omega)} + \frac{2 \times 0.8}{4000 \frac{m}{s} \times 1000 \frac{s}{ms}} = 2.08 \text{ ms} \quad (4.18)$$

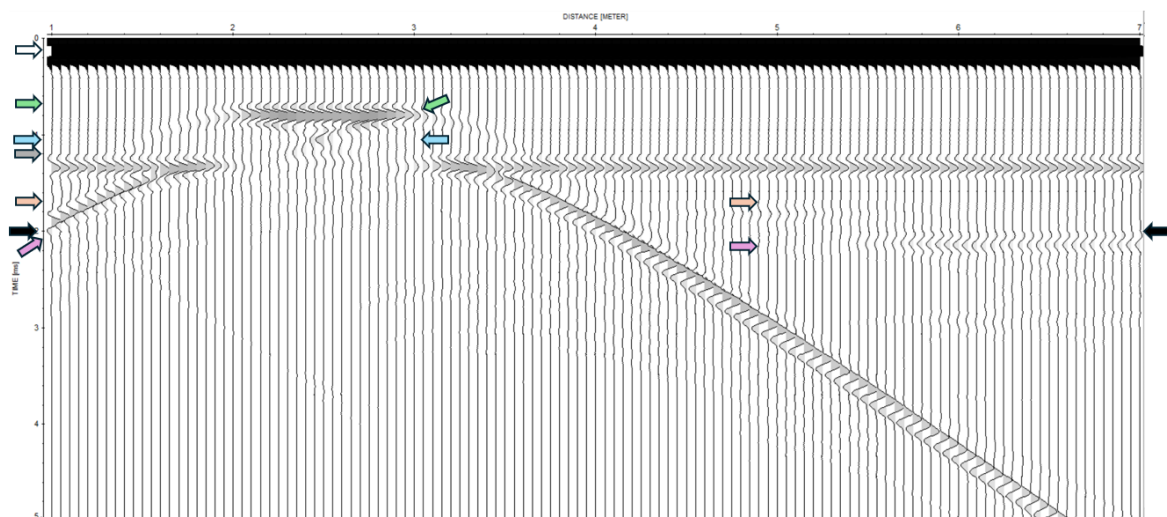
Τέλος, τα απευθείας κύματα επισημαίνονται από το λευκό βέλος.

Μοντέλο M.3.2.ab.bc

Στην Εικόνα 4.19, ακολουθεί μοντέλο 3 στρωμάτων, όπου ενδιάμεσα των δύο τελευταίων είναι βυθισμένοι 2 στόχοι, μήκους 1 m και ύψους 0.8 m. Οι ταχύτητες διάδοσης είναι ίδιες με την προηγούμενη περίπτωση.



Εικόνα 4.19: Μοντέλο τριών στρωμάτων, όπου μεταξύ πρώτου και δεύτερου, καθώς και δεύτερου και τρίτου στρώματος τοποθετήθηκαν οι στόχοι (M.3.2.ab.bc).



Εικόνα 4.20: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot, για το μοντέλο 3 στρωμάτων με βυθισμένους 2 στόχους μεταξύ πρώτου και δεύτερου, καθώς και δεύτερου και τρίτου στρώματος.

Από την Εικόνα 4.20 προκύπτει ότι, οι διπλός κατακόρυφος χρόνος, του πρώτου ανακλαστήρα (γκρι βέλος) και του δεύτερου ανακλαστήρα παραμένουν ίδιοι. Όμως σε αυτή την περίπτωση είναι ορατή μόνο η ανάκλαση από το πρώτο σώμα (πράσινο βέλος) που βρίσκεται ρηχότερα (μεταξύ 2 και 3 μέτρων στον άξονα της απόστασης) και είναι λογικό λόγω εξασθένησης των κυμάτων σε πιο μεγάλα βάθη όπως και στην περίπτωση του βυθισμένου σώματος στα βαθύτερα στρώματα. Παρόλα αυτά, λίγο μετά τα 5 μέτρα, φαίνονται εξασθενημένες καταγραφές ακουστικών κυμάτων, που οφείλονται στον δεύτερο ανακλαστήρα (μαύρα βέλη) και στα όρια του δεύτερου σώματος, γεγονός που ίσως απαιτεί

περισσότερη ενίσχυση. Οι υπολογισμοί των ανακλάσεων που αντιστοιχούν στους στόχους (άνω και κάτω όριο) υπολογίζονται παρακάτω και τέλος, το λευκό βέλος επισημαίνει τις απευθείας αφίξεις

Για τον στόχο μεταξύ πρώτου και δεύτερου στρώματος:

$$t_{1(\acute{\alpha}\nu\omega)} = \frac{2 \times (0.6 - 0.1)m}{\frac{1500m}{s} \times \frac{1000s}{ms}} = 0.67 ms \quad (4.19)$$

$$t_{1(\kappa\acute{\alpha}\tau\omega)} = t_{1(\acute{\alpha}\nu\omega)} + \frac{2 \times 0.8m}{\frac{4000m}{s} \times \frac{1000s}{ms}} = 1.07 ms \quad (4.20)$$

Για τον στόχο μεταξύ δεύτερου και τρίτου στρώματος:

$$t_{2(\acute{\alpha}\nu\omega)} = 1.2 ms + \frac{2 \times 0.6}{\frac{2500m}{s} \times \frac{1000s}{ms}} = 1.68 ms \quad (4.21)$$

$$t_{2(\kappa\acute{\alpha}\tau\omega)} = t_{2(\acute{\alpha}\nu\omega)} + \frac{2 \times 0.8}{\frac{4000m}{s} \times \frac{1000s}{ms}} = 2.08 ms \quad (4.22)$$

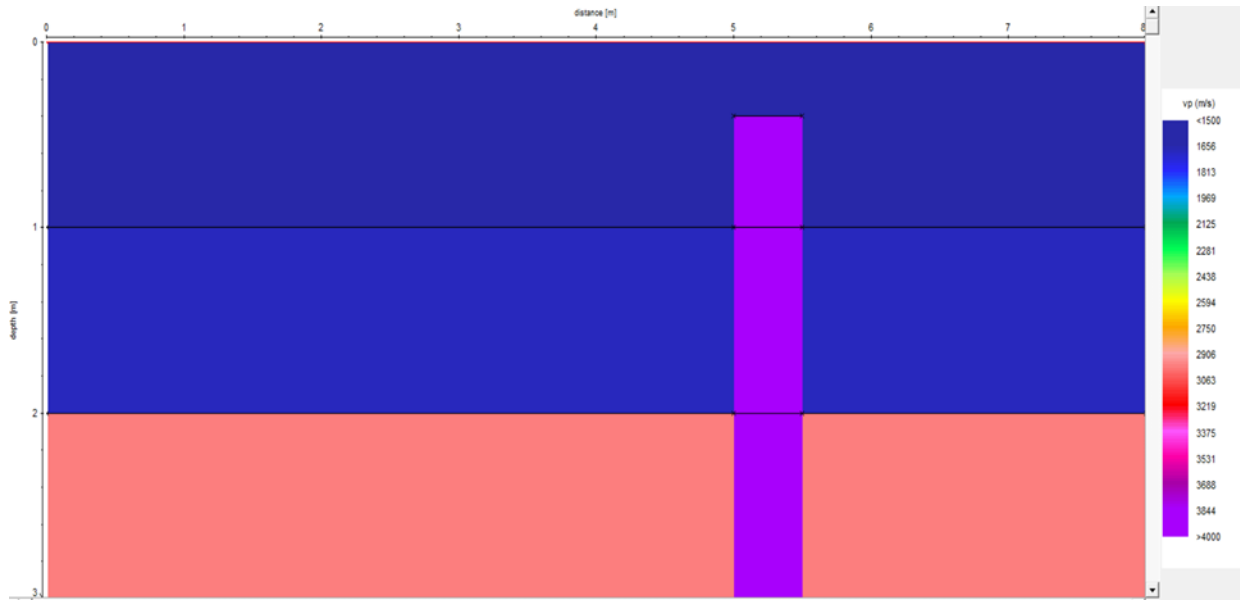
Τέλος, τα μπλε και μωβ βέλη αντιστοιχούν στους χρόνους των κάτω ορίων του ρηχότερου και του βαθύτερου σώματος αντίστοιχα.

4.3.3 Τρίτο μέρος προσομοιώσεων

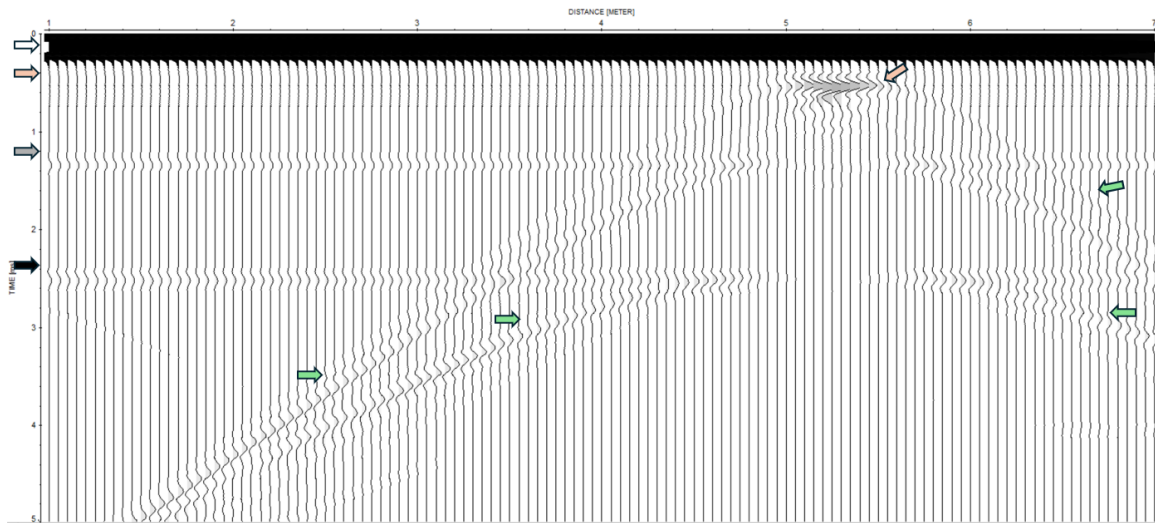
Στην υποενότητα αυτή, παρουσιάζονται περιπτώσεις προσομοιώσεων με πιο περίπλοκα μοντέλα σε σύγκριση με τα προηγούμενα μέρη. Αφορούν, λοιπόν, μοντέλα που είτε έχουν πολύ μεγάλους στόχους που διαπερνούν παραπάνω από δύο στρώματα ή πολύ μικρούς στόχους τοποθετημένους σε μεγαλύτερα βάθη. Οι ονομασίες είναι όμοιες με εκείνες του πρώτου και δεύτερου μέρους, όπου το (a) αντιστοιχεί σε ταχύτητα διάδοσης 1500 m/s, το (b) σε 1700 m/s και το (c) σε 3000 m/s. Ομοίως με το δεύτερο μέρος μοντέλων, θα αναλυθούν συνθετικές καταγραφές κοινής πηγής με μηδενικό offset.

Μοντέλο M.3.1.abc

Στην επόμενη περίπτωση μοντέλου (βλ. Εικόνα 4.21), επιλέχθηκε ένας λεπτός στόχος με μεγάλο ύψος, ο οποίος διαπερνάει και τα 3 στρώματα. Το πρώτο στρώμα έχει ταχύτητα διάδοσης 1500 m/s και πυκνότητα 1 g/cm³, το δεύτερο στρώμα 1700 m/s και 1.5 g/cm³ αντίστοιχα, το τρίτο στρώμα 3000 m/s και 2 g/cm³ και τέλος ο στόχος 4000 m/s και 2 g/cm³. Τέλος, ο στόχος έχει μήκος 0.5 μέτρα και ύψος 2.6 μέτρα.



Εικόνα 4.21: Μοντέλο τριών στρωμάτων, όπου τα διαπερνάει σώμα μεγάλου ύψους (M.3.1.abc).



Εικόνα 4.22: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot, για το M.3.1.abc.

Στην καταγραφή της Εικόνας 4.22 φαίνονται καθαρά: τα απευθείας κύματα (λευκό βέλος) και οι ανακλάσεις από τον πρώτο (γκρι βέλος και 1.2 ms) και τον δεύτερο (μαύρο βέλος) ανακλαστήρα στα ένα και δύο μέτρα αντίστοιχα, καθώς και του σώματος (πορτοκαλί βέλη), των οποίων οι διπλοί κατακόρυφοι χρόνοι υπολογίζονται ως εξής:

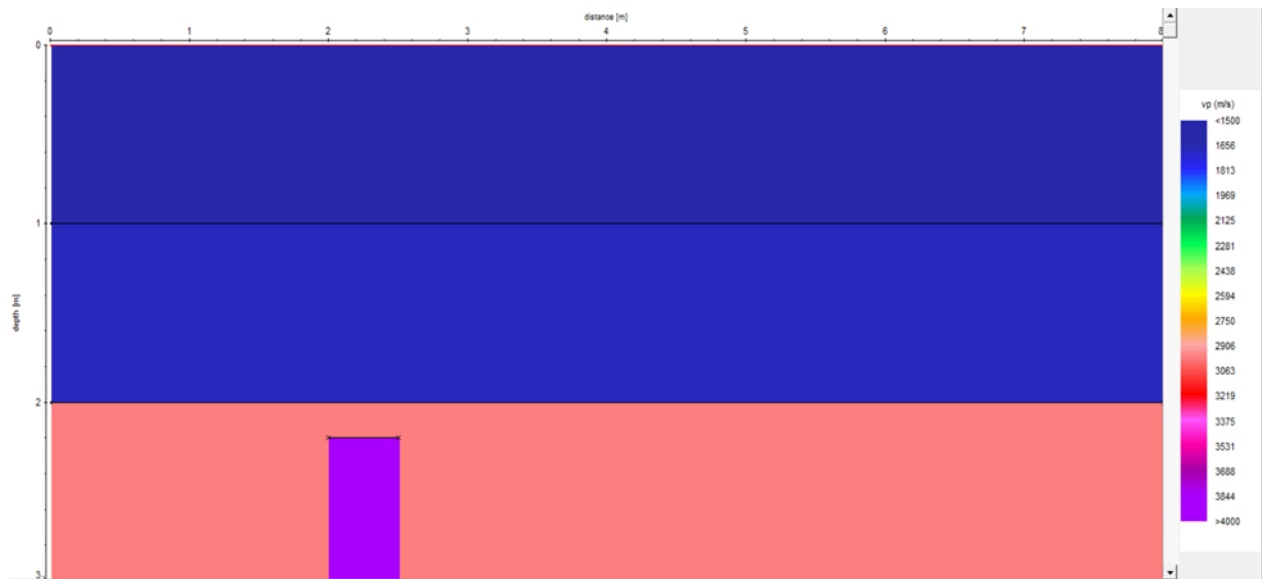
$$t_{M.3.1.abc(2)} = 1.2 + \frac{2 \times 1 \text{ m}}{1700 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 1000 \frac{\text{s}}{\text{ms}}} = 2.38 \text{ ms} \quad (4.23)$$

$$t_{M.3.1.abc(\text{σώμα})} = \frac{2 \times (0.4 - 0.1) \text{ m}}{1500 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 1000 \frac{\text{s}}{\text{ms}}} = 0.4 \text{ ms} \quad (4.24)$$

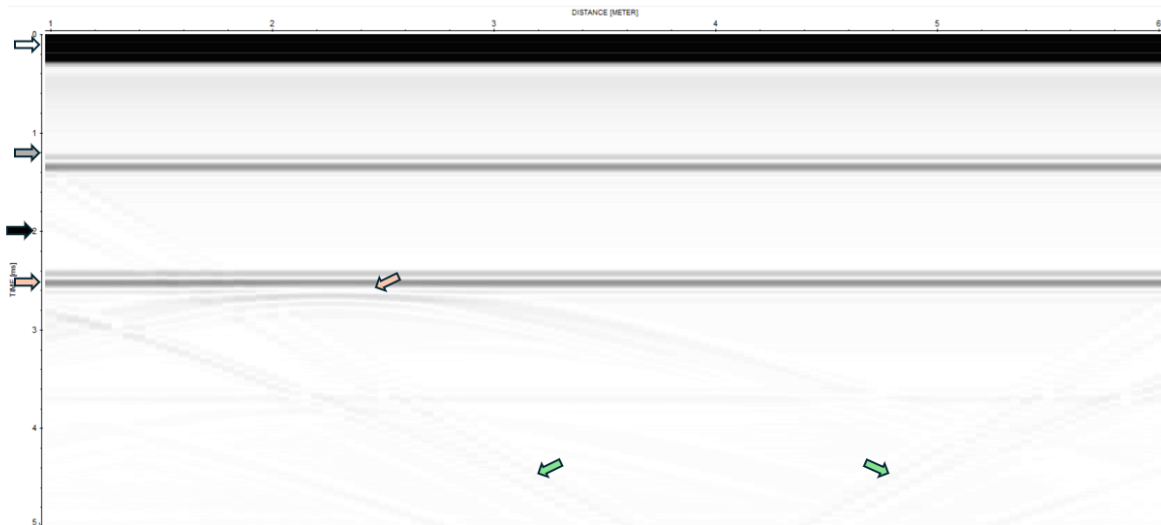
Τα πράσινα βέλη επισημαίνουν τα περιθλώμενα κύματα που προκύπτουν από τα κάτω αριστερά και δεξιά όρια του σώματος, τα οποία εμφανίζονται στις περισσότερες συνθετικές καταγραφές κοινής πηγής.

Μοντέλο M.3.1.c

Στην Εικόνα 4.23 απεικονίζεται ένας στόχος, πολύ μικρότερων διαστάσεων σε 2.2 m βάθος, ύψους 0.8 m και πλάτους 0.5 m, με ταχύτητες διάδοσης και, όμοιες με εκείνες της περίπτωσης του M.3.1.abc.



Εικόνα 4.23: Μοντέλο τριών στρωμάτων, όπου στο τελευταίο στρώμα υπάρχει ένα σώμα μικρών διαστάσεων (M.3.1.c).



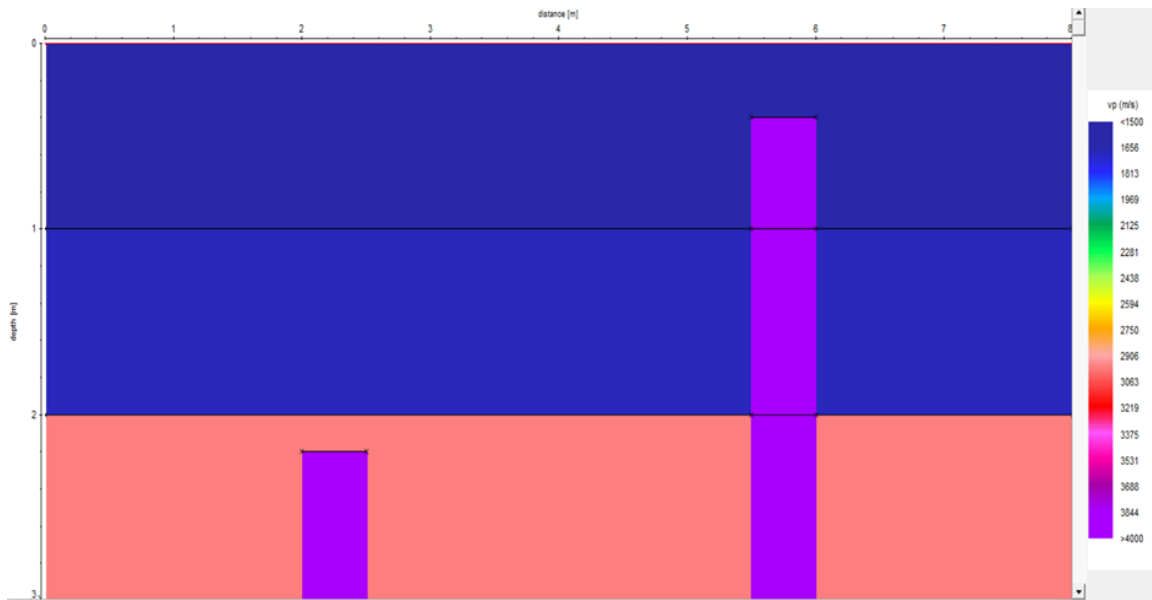
Εικόνα 4.24: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather), για το M.3.1.c.

Σύμφωνα με τη συνθετική καταγραφή κοινής πηγής (βλ. Εικόνα 4.24), φαίνονται οι απευθείας αφίξεις με λευκό βέλος, καθώς και οι ανακλάσεις από τα στρώματα στα 1 και 2 μέτρα, σε χρόνο 1.2 (γκρι βέλος) και 2.38 (μαύρο βέλος) ms αντίστοιχα. Ο διπλός κατακόρυφος χρόνος που αντιστοιχεί στο σώμα (πορτοκαλί βέλη) υπολογίζεται όπως φαίνεται στην εξίσωση 4.22. Λόγω της τοποθέτησης του στόχου σε μεγαλύτερο βάθος, καθώς και λόγω των μικρών του διαστάσεων, οι καταγραφές των ακουστικών κυμάτων είναι εξασθενημένες και πιθανόν να απαιτούν ενίσχυση Τέλος, τα πράσινα βέλη δείχνουν τα περιθλώμενα από τα όρια του μοντέλου.

$$t_{\text{σώμα}} = 1.2 + \frac{2 \times 1 \text{ m}}{1700 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 1000 \frac{\text{s}}{\text{ms}}} + \frac{2 \times 0.2}{3000 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 1000 \frac{\text{s}}{\text{ms}}} = 2.51 \text{ ms} \quad (4.25)$$

Μοντέλο M.3.2.c.abc

Η παρακάτω περίπτωση προσομοίωσης (βλ. Εικόνα 4.25) συνδυάζει τις δυο προηγούμενες, διατηρώντας επίσης τις ίδιες παραμέτρους (ταχύτητα διάδοσης, πυκνότητα και διαστάσεις σωμάτων), με τη διαφορά ότι το σώμα μεγαλύτερων διαστάσεων είναι μετατοπισμένο από τα 5 έως 5.5 μέτρα (προηγούμενη περίπτωση) στα 5.5 έως 6 m.



Εικόνα 4.25: Μοντέλο (M.3.2.c.abc) που συνδυάζει τα M.3.1.abc και M.3.1.c.



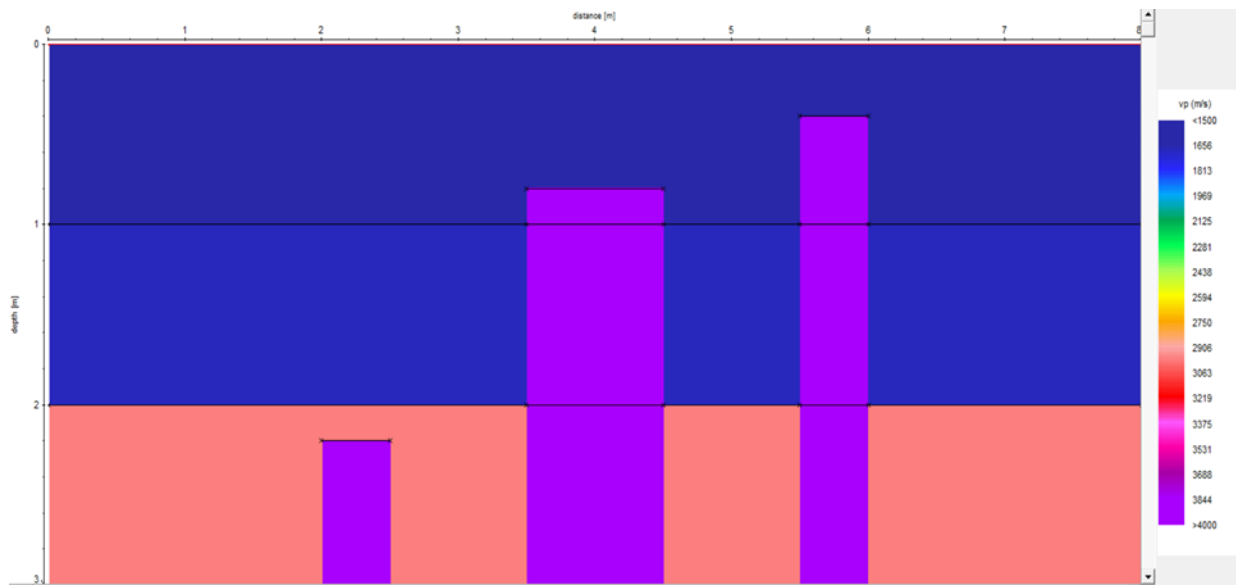
Εικόνα 4.26: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot, για τον συνδυασμό των M.3.1.c και M.3.1.abc.

Η περίπτωση της Εικόνας 4.26 δεν διαφέρει από εκείνη της Εικόνας 4.22 (M.3.1.abc), αλλά οι ανακλάσεις που αντιστοιχούν στον βαθύτερο στόχο δεν εμφανίζονται στη σεισμική καταγραφή. Παρόλα αυτά, μπορούν να διακριθούν εξασθενημένες καταγραφές ακουστικών κυμάτων (πράσινα βέλη) σε χρόνο 2.5 ms (όμοια με τον χρόνο της καταγραφής του M.3.1.abc) που μπορεί να εξισωθεί με τον βαθύτερο στόχο. Με την ενίσχυση της συνθετικής καταγραφής μπορεί η ανάκλαση από το μικρότερο σώμα να είναι εμφανής. Οι χρόνοι των πρώτων αφίξεων (λευκό βέλος), της ανάκλασης του πρώτου (γκρι βέλος) και του δεύτερου ανακλαστήρα (μαύρο βέλος) είναι όμοιοι με την καταγραφή του

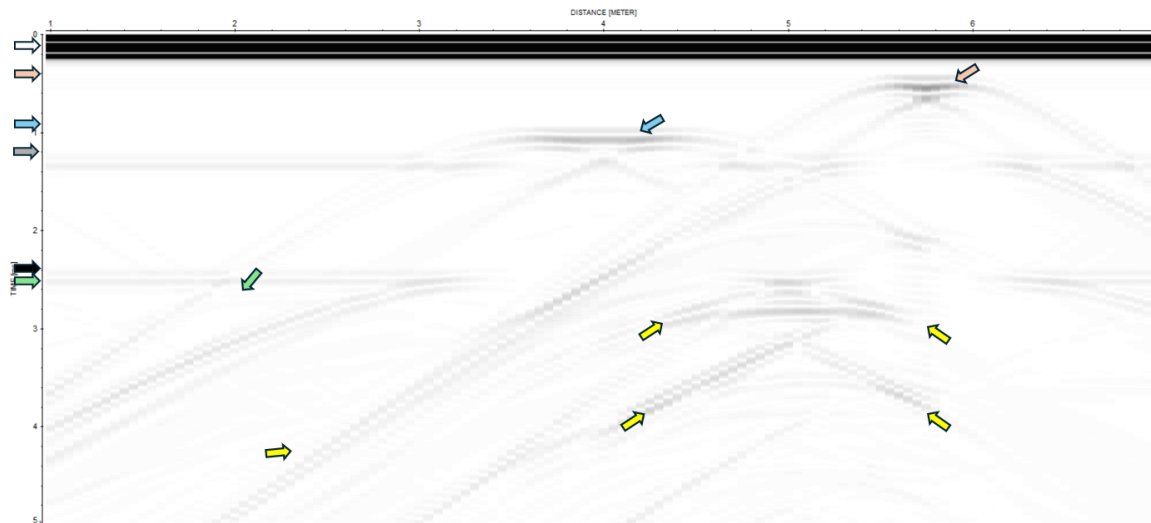
M.3.1.abc (Εικόνα 4.22). Τέλος επισημαίνεται η ανάκλαση από το πάνω όριο του ρηχότερου σώματος (πορτοκαλί βέλη) σε χρόνο 0.4 ms.

Μοντέλο M.3.3.c.2.abc

Στη συνέχεια, η προσομοίωση που ακολουθεί (βλ. Εικόνα 4.31), αφορά μοντέλο που είναι όμοιο με το προηγούμενο (M.3.2.c.abc), με τη διαφορά ότι προστέθηκε στο κέντρο του μοντέλου (3.5-4.5 m) ένα σώμα παρόμοιο του M.3.1.bc (Εικόνα 4.17), με πλάτος 1 μέτρο και διαφοροποιείται από το M.3.1.bc διότι εκτείνεται μέχρι το τέλος του μοντέλου (από τα 0.8 έως τα 3 μέτρα). Οι παράμετροι του πειράματος είναι επίσης όμοιες με τα μοντέλα του τρίτου μέρους.



Εικόνα 4.27: Μοντέλο τριών στρωμάτων, όπου υπάρχει ένας συνδυασμός του M.3.2.c.abc (Εικόνα 4.29), με την προσθήκη ενός ενδιάμεσου σώματος (ύψους 2.2 μέτρα) μεγαλύτερου μήκους (1 m).



Εικόνα 4.28: Συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (shot gather) τύπου wiggle plot, για τον συνδυασμό των τριών μοντέλων.

Οι απευθείας αφίξεις, που αφορούν την Εικόνα 4.28, επισημαίνονται με λευκό βέλος. Επιπλέον, οι χρόνοι που αντιστοιχούν στον πρώτο (γκρι βέλος) και δεύτερο ανακλαστήρα (μαύρο βέλος) δεν διαφέρουν από το μοντέλο της προηγούμενης περίπτωσης, καθώς και εκείνοι των ανακλάσεων του ρηχότερου (πορτοκαλί βέλη και 0.4 ms) και του βαθύτερου στόχου (πράσινα βέλη και 2.51 ms). Η ανάκλαση που αντιστοιχεί στο ενδιάμεσο σώμα (μπλε βέλος) αντιστοιχεί σε χρόνο:

$$t_{M.3.c.2abc(ενδιάμεσο)} = \frac{2 \times (0.8 - 0.1)m}{(1500 \frac{m}{s} + 1000 \frac{s}{ms})} = 0.93 \text{ ms} \quad (4.26)$$

Όμως, η παρουσία του ενδιάμεσου σώματος δημιουργεί μια περίπλοκη εικόνα και για αυτό το λόγο, η ανάκλαση του μικρότερου σώματος (πράσινα βέλη) είναι σχεδόν ανύπαρκτη. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στην κοντινή απόσταση μεταξύ των στόχων, την αλληλεπικάλυψη των ανακλώμενων κυμάτων που προέρχονται από τους ρηχότερους στόχους ή/και πιθανόν στα περιθλώμενα (κίτρινα βέλη) από τα κάτω αριστερά και δεξιά όρια των ρηχότερων στόχων και τα σημεία επαφής τους με τα στρώματα και τέλος, συμβάλλουν και οι ρηχότερες (και ισχυρότερες) ανακλάσεις οι οποίες αλληλεπικαλύπτουν τις βαθύτερες (και ασθενέστερες).

4.3.4 Συμπεράσματα

Από την ανάλυση των σεισμικών δεδομένων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, διαπιστώθηκε ότι η απόκριση των κυμάτων επηρεάζεται από τη θέση και το βάθος των θαμμένων σωμάτων. Η εξασθένηση του σεισμικού σήματος οφείλεται κυρίως στη γεωμετρική διασπορά (Βαφείδης, 2023). Στις προσομοιώσεις, όπου τα σώματα βρίσκονταν σε μεγαλύτερο βάθος ή είχαν μικρότερες διαστάσεις, τα πλάτη των ανακλάσεών τους

επισκιάζονται από εκείνα που προέρχονταν από μεγαλύτερα ή πιο επιφανειακά εμπόδια, με αποτέλεσμα να εμφανίζουν μειωμένη ή και καθόλου ανιχνεύσιμη σεισμική απόκριση. Για τον λόγο αυτό, οι επόμενες ενότητες επικεντρώνονται στην ενίσχυση των καταγραφών από επιλεγμένες προσομοιώσεις, με στόχο τη βελτίωση της απεικόνισης των βαθύτερων και μικρότερων σωμάτων, μέσω κατάλληλων τεχνικών επεξεργασίας και ενίσχυσης του σήματος.

4.4 Επεξεργασία και ενίσχυση των αποτελεσμάτων της δυσδιάστατης προσομοίωσης

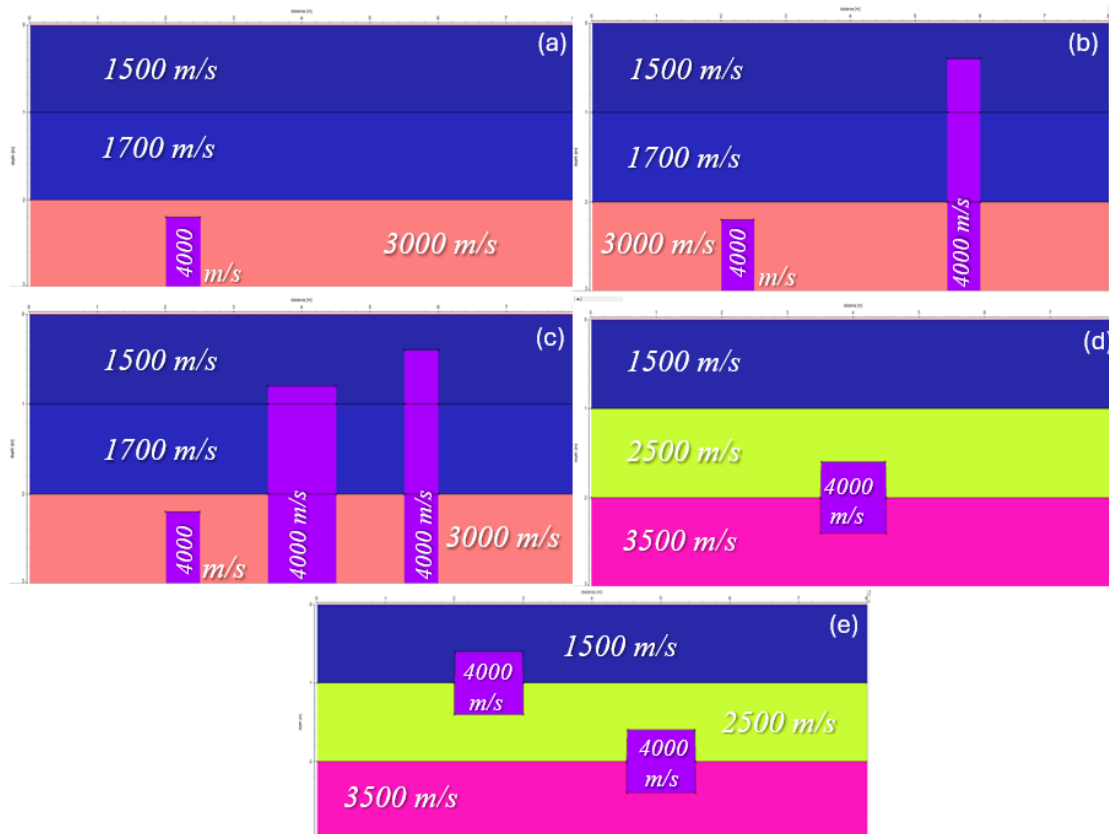
Στην ενότητα αυτή, ακολουθεί η επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων μερικών επιλεγμένων μοντέλων, των οποίων οι συνθετικές καταγραφές κοινής πηγής είτε ήταν περίπλοκες λόγω πολλαπλών σωμάτων (π.χ. M.3.3.2abc της Εικόνας 4.32) ή παρουσίασαν εξασθενημένα ακουστικά κύματα (π.χ. M.3.1.c της Εικόνας 4.28). Η επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων, όπως και η δημιουργία τους, πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος ReflexW και αναλύονται στην [Ενότητα Π.2](#) του [Παραρτήματος](#). Ο στόχος της διαδικασίας αυτής ήταν η ενίσχυση των ανακλάσεων από βαθύτερα σώματα, διότι κατά τη σεισμική ανάκλαση, το σήμα που δημιουργείται από την πηγή, αποδυναμώνεται καθώς διαδίδεται σε βαθύτερα στρώματα. Λόγω του φαινομένου αυτού, χρησιμοποιήθηκε η αυτόματη ενίσχυση σήματος (Automatic Gain Control - AGC Gain), η οποία ενισχύει τα πλάτη της καταγραφής σε μεγαλύτερους χρόνους, που προέρχονται κατά κανόνα και από βαθύτερους στόχους.

4.4.1 Η διαδικασία της Αυτόματης Ενίσχυσης Σήματος (Automatic Gain Control - AGC)

Η αυτόματη ενίσχυση σήματος (AGC) αποτελεί αλγόριθμο που εφαρμόζεται με σκοπό την ενίσχυση των ασθενών ανακλάσεων και τη βελτίωση της σεισμικής απεικόνισης. Ουσιαστικά επιτυγχάνει την ισοστάθμιση του σήματος καταγραφής, ώστε να αναδεικνύεται η συνέχεια των ανακλαστήρων και να γίνονται πιο ορατές οι χαμηλού πλάτους ανακλάσεις. Η ενίσχυση που εφαρμόζεται είναι αντιστρόφως ανάλογη του πλάτους του σήματος, δηλαδή τα μεγάλα πλάτη ενισχύονται λίγο ή καθόλου, ενώ τα μικρά ενισχύονται περισσότερο. Ο αλγόριθμος λειτουργεί ανά ίχνος, υπολογίζοντας τη μέση τιμή μέσα σε ένα χρονικό παράθυρο και εφαρμόζοντας ενίσχυση σε κάθε δείγμα σύμφωνα με αυτήν. Μετά την εφαρμογή του AGC, δεν είναι δυνατή η αξιόπιστη σύγκριση των πλατών μεταξύ διαφορετικών ανακλαστήρων, καθώς αυτή η πληροφορία έχει αλλοιωθεί. Ωστόσο, μέθοδος είναι χρήσιμη για την ανάδειξη λεπτομερειών στη δομή του υπεδάφους και την καλύτερη απεικόνιση των ανακλαστήρων (Σοφιάκη, 2004).

4.4.2 Παρουσίαση των ενισχυμένων συνθετικών καταγραφών

Για την επεξεργασία των καταγραφών με την αυτόματη ενίσχυση σήματος (AGC) επιλέχθηκαν τα μοντέλα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.29. Κάθε εικόνα (εκτός της 4.29) απεικονίζει ενισχυμένη καταγραφή με διαφορετικές παραμέτρους, όπως: η διάρκεια χρονικού παραθύρου (0.2, 0.5, 1, 2 και 3 ms) (window length) και η ενίσχυση του σήματος (scaling value). Τέλος, θα παρουσιαστούν και συγκριτικές εικόνες με τις πρωτότυπες και τις ενισχυμένες συνθετικές καταγραφές για καλύτερη απεικόνιση.

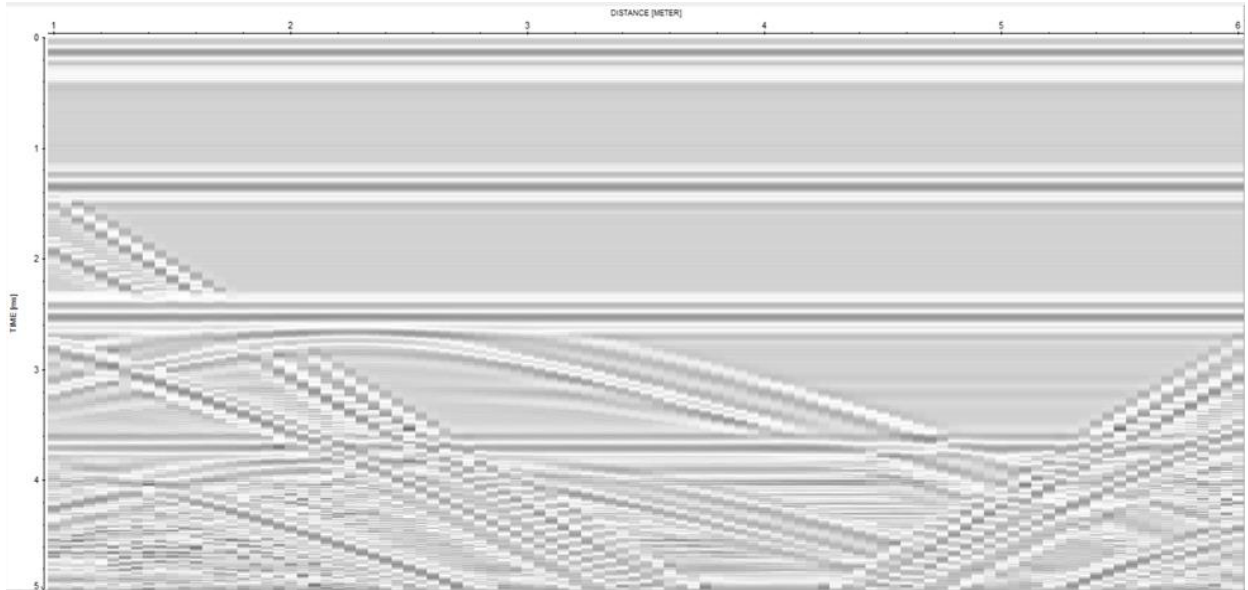


Εικόνα 4.29: Πέντε από τα μοντέλα της Ενότητας 4.2 που επιλέχθηκαν για την διαδικασία AGC: (a) M.3.1.c, (b) M.3.2.c.abc, (c) M.3.3.c.2abc, (d) M.3.1.bc, (e) M.3.2.ab.bc.

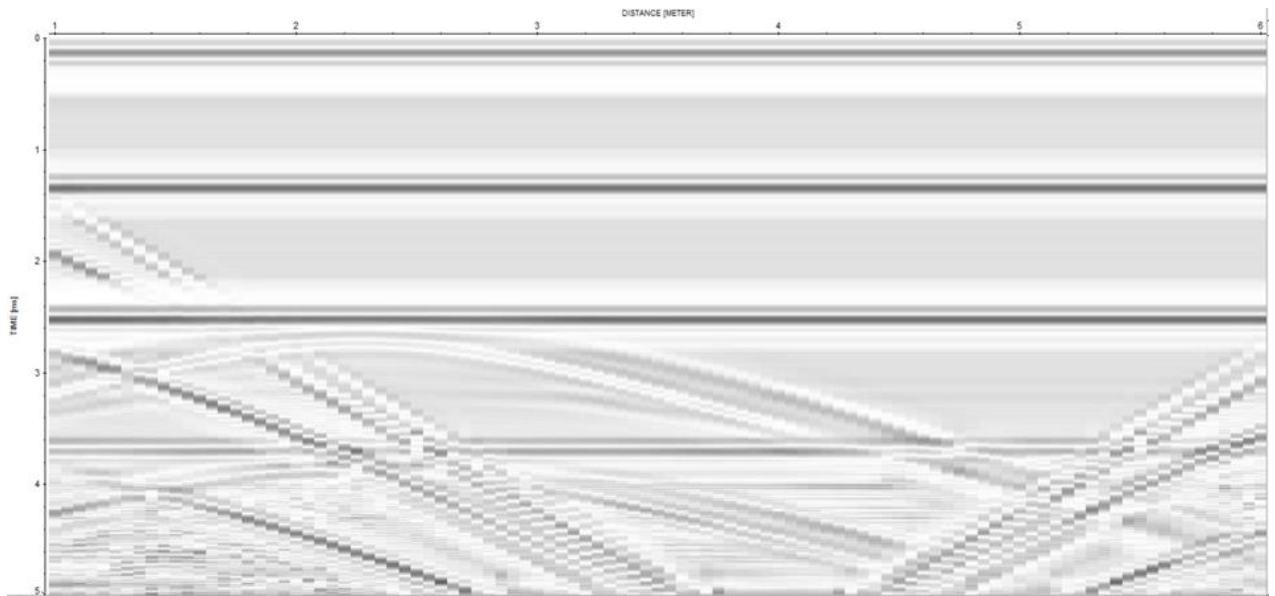
Μοντέλο M.3.1.c

Από τις εικόνες που ακολουθούν, παρατηρήθηκε ότι όσο αυξανόταν η τιμή της διάρκειας χρονικού παραθύρου (βλ. Εικόνες 4.32, 4.33 και 4.34), με την κλίμακα μονίμως σταθερή και όσο περισσότερο κοντά στην πρωτότυπη, οι ανακλάσεις από τους βαθύτερους στόχους γίνονταν σταδιακά λιγότερο ευκρινείς. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να συμβαίνει επειδή, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της διάρκειας χρονικού παραθύρου τόσο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό της ενίσχυσης του σήματος. Έτσι, τα

πλάτη των καταγραφών από μεγαλύτερους χρόνους συμπεριλαμβάνονται στην ενίσχυση με πλάτη μικρότερων χρόνων άφιξης (τα οποία είναι και μεγαλύτερα) με αποτέλεσμα, τα τελευταία να κυριαρχούν στο αποτέλεσμα της επεξεργασίας. Για παράδειγμα, για τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου = 3 ms (Εικόνα 4.34), η ανάκλαση από τον πυθμένα του νερού (στα 1.2 ms) έχει εξασθενήσει αρκετά σε σημείο να καθίσταται δυσδιάκριτη. Συμπερασματικά, οι Εικόνες 4.30 και 4.31 απεικονίζουν μια αρκετά βελτιωμένη εικόνα της περίπτωσης του M.3.1.c.



Εικόνα 4.30: Ενισχυμένη καταγραφή για το M.3.1.c με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.2 ms και ενίσχυση σήματος=0.01.



Εικόνα 4.31: Ενισχυμένη καταγραφή για το M.3.1.c με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.5 ms και ενίσχυση σήματος=0.01.



Εικόνα 4.32: Ενισχυμένη καταγραφή για το M.3.1.c με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=1 ms και ενίσχυση σήματος=0.01.



Εικόνα 4.33: Ενισχυμένη καταγραφή για το M.3.1.c με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=2 ms και ενίσχυση σήματος=0.01.



Εικόνα 4.34: Ενισχυμένη καταγραφή για το M.3.1.c με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=3 ms και ενίσχυση σήματος=0.01.

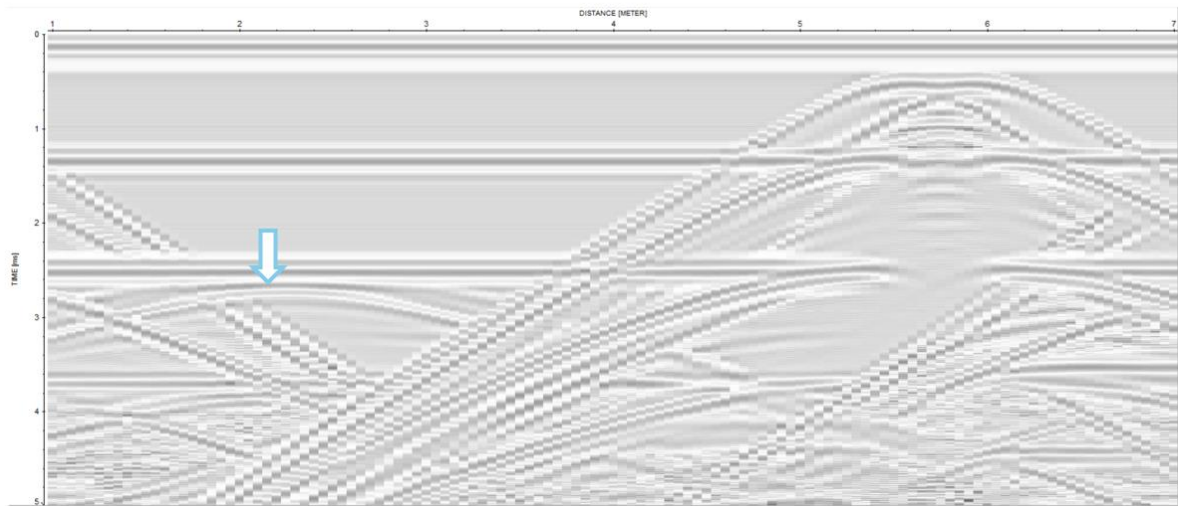


Εικόνα 4.35: Συγκριτική εικόνα των καταγραφών του M.3.1.c μαζί με την πρωτότυπη και τις ενισχυμένες. **(i)** Η πρωτότυπη καταγραφή, **(ii)** καταγραφή με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.2 ms, **(iii)** καταγραφή με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.5 ms, **(iv)** καταγραφή με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=1 ms, **(v)** καταγραφή με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=2 ms, **(vi)** καταγραφή με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=3 ms.

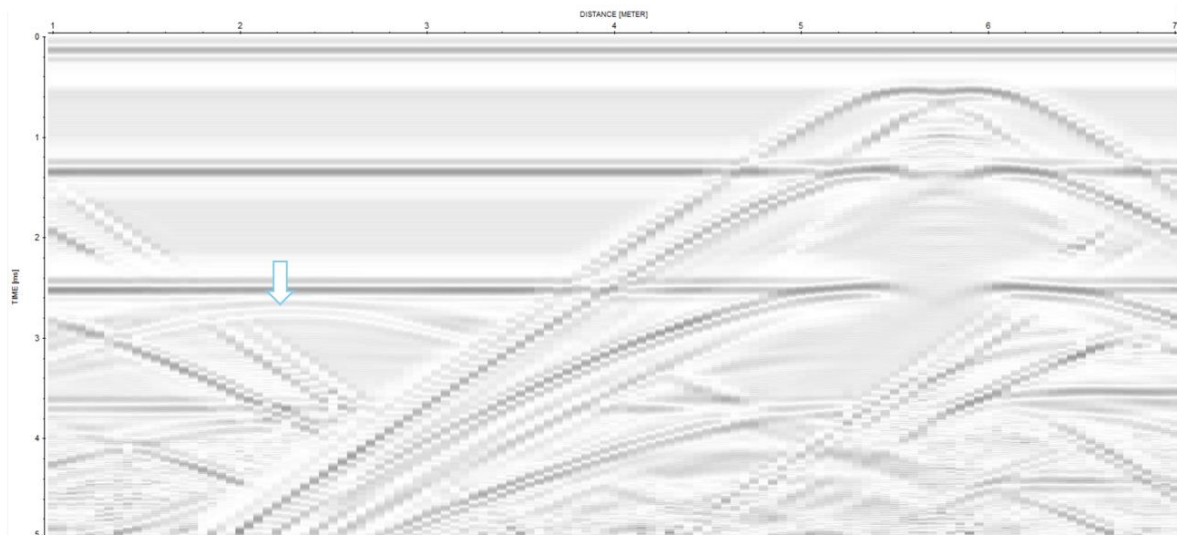
Η Εικόνα 4.35 αντικατοπτρίζει με σαφήνεια την αδυναμία του φίλτρου να ενισχύσει τις βαθιές ανακλάσεις διατηρώντας, παράλληλα, τα ίδια σχετικά πλάτη στις ρηχότερες. Λόγω, λοιπόν, της αδυναμίας αυτής, για τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου 1, 2 και 3 ms, στα υπόλοιπα συνθετικά δεδομένα θα συγκριθούν οι εικόνες μόνο για τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου 0.2 και 0.5 ms.

Μοντέλο M.3.2.c.abc

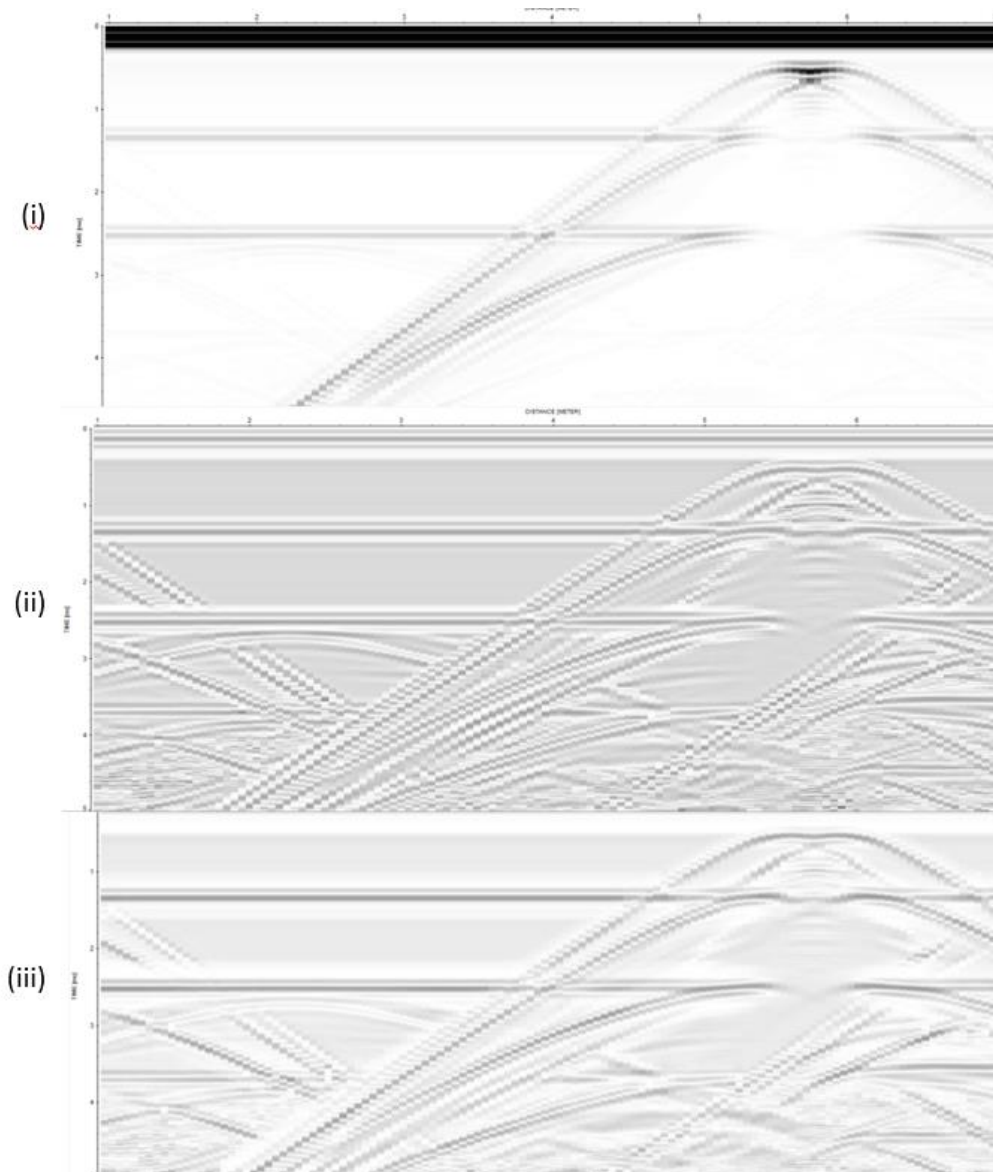
Από τις Εικόνες 4.36 και 4.37, φαίνεται ότι η ενίσχυση βελτίωσε σημαντικά την ευκρίνεια της καταγραφής, με αποτέλεσμα οι ανακλάσεις από το σώμα του M.3.1.c να είναι ευδιάκριτες (λευκά βέλη). Η συγκριτική Εικόνα 4.38 απεικονίζει άψογα τη βελτίωση αυτή. Συμπερασματικά, η ενίσχυση της πρωτότυπης καταγραφής του μοντέλου M.3.2.c.abc ήταν απαραίτητη, καθώς πλέον, το μικρότερο σε διαστάσεις και βυθισμένο κάτω από τα 2 μέτρα, σώμα είναι πιο ευκρινές.



Εικόνα 4.36: Ενισχυμένη καταγραφή του M.3.2.c.abc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.2 ms και ενίσχυση σήματος=0.02.



Εικόνα 4.37: Ενισχυμένη καταγραφή του M.3.2.c.abc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.5 ms και ενίσχυση σήματος=0.02.

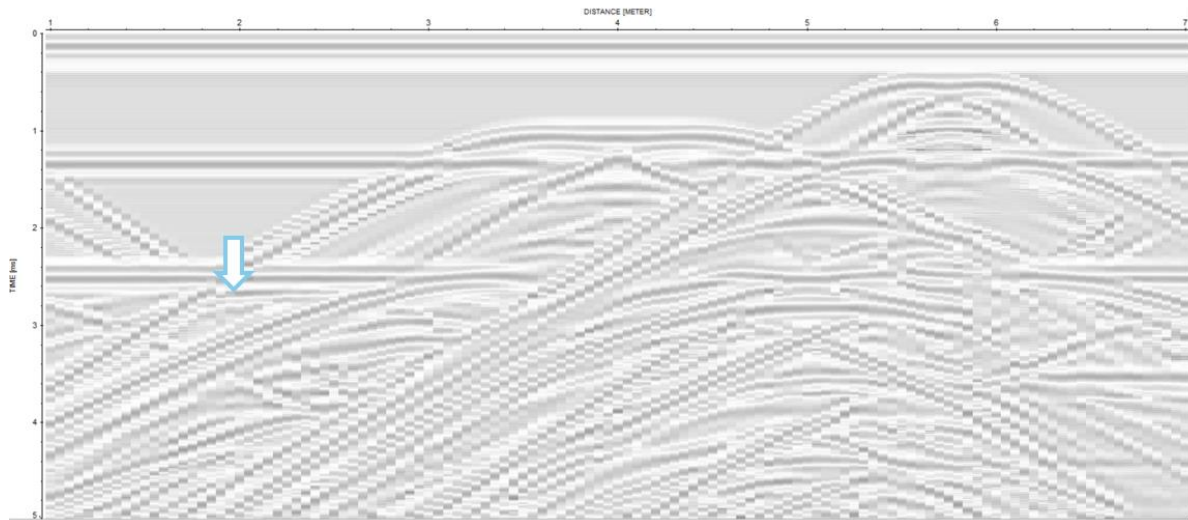


Εικόνα 4.38: Συγκριτική εικόνα των καταγραφών του M.3.2.c.abc μαζί με την πρωτότυπη και τις ενισχυμένες. **(i)** η πρωτότυπη καταγραφή, **(ii)** η ενισχυμένη με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.2 ms και **(iii)** η ενισχυμένη με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.5 ms.

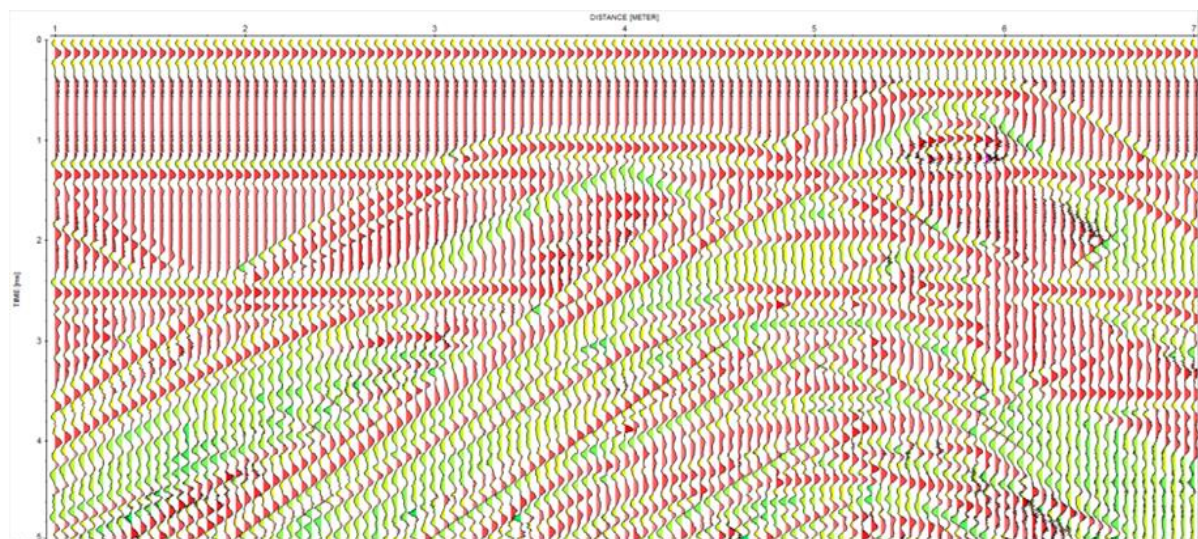
Μοντέλο M.3.c.2.abc

Στην περίπτωση του M.3.c.2.abc, παρόλο που η ενίσχυση έχει πραγματοποιηθεί ικανοποιητικά, η πολυπλοκότητα της εικόνας έχει αυξηθεί, κυρίως λόγω της παρουσίας πολλών σωμάτων σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό προκαλεί επικάλυψη μεταξύ ανακλάσεων και περιθλάσεων, με αποτέλεσμα η τελική εικόνα να περιλαμβάνει περιοχές με έντονη παρεμβολή κυμάτων και δυσκολία στην ερμηνεία. Για το λόγο αυτό, προστέθηκαν οι εικόνες 4.40 και 4.42 σε μορφή wiggle mode με χρώμα, σε

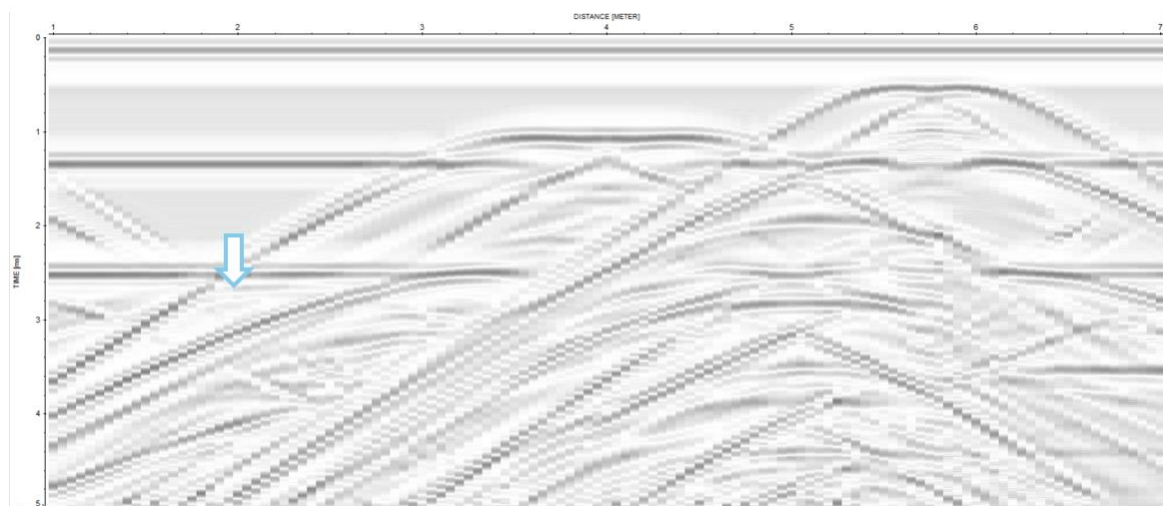
περίπτωση που τα χρώματα βοηθήσουν στη διαφοροποίηση των ανακλάσεων που αντιστοιχούν στα σώματα. Τα πράσινα χρώματα στις εικόνες, πιθανόν να παραπέμπουν στα περιθλώμενα κύματα που προκύπτουν από τα κάτω αριστερά και δεξιά όρια των στόχων. Επιπλέον, στις Εικόνες 4.39 και 4.41 επισημαίνεται με λευκά βέλη η πιθανή εμφάνιση ανακλάσεων από το σώμα μικρότερων διαστάσεων. Τέλος, η συγκριτική Εικόνα 4.43, έχει προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα ενίσχυσης, αλλά όχι για το βαθύτερο σώμα.



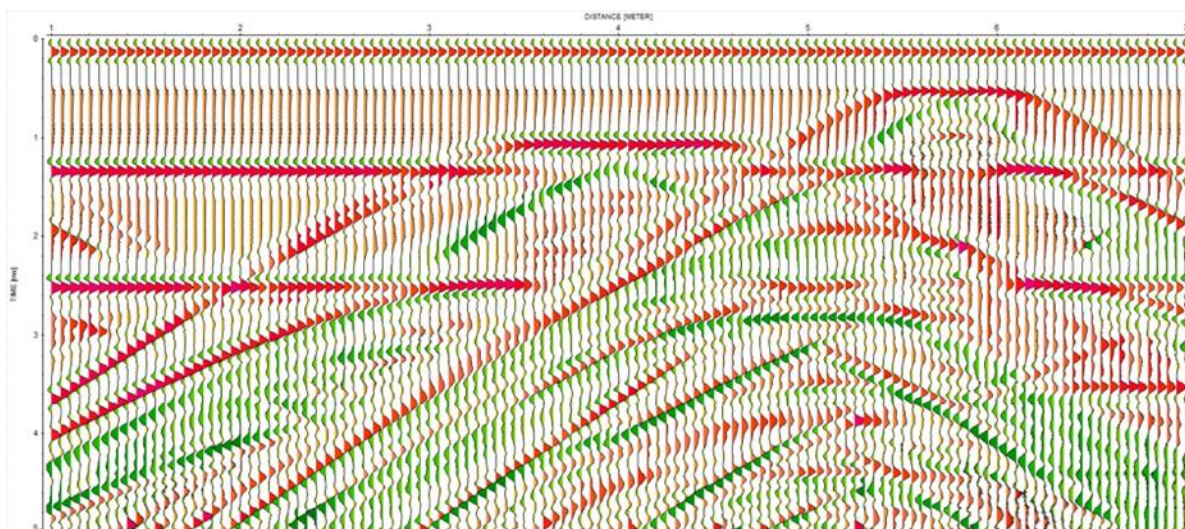
Εικόνα 4.39: Ενισχυμένη καταγραφή του M.3.c.2.abc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.2 ms και ενίσχυση σήματος=0.02.



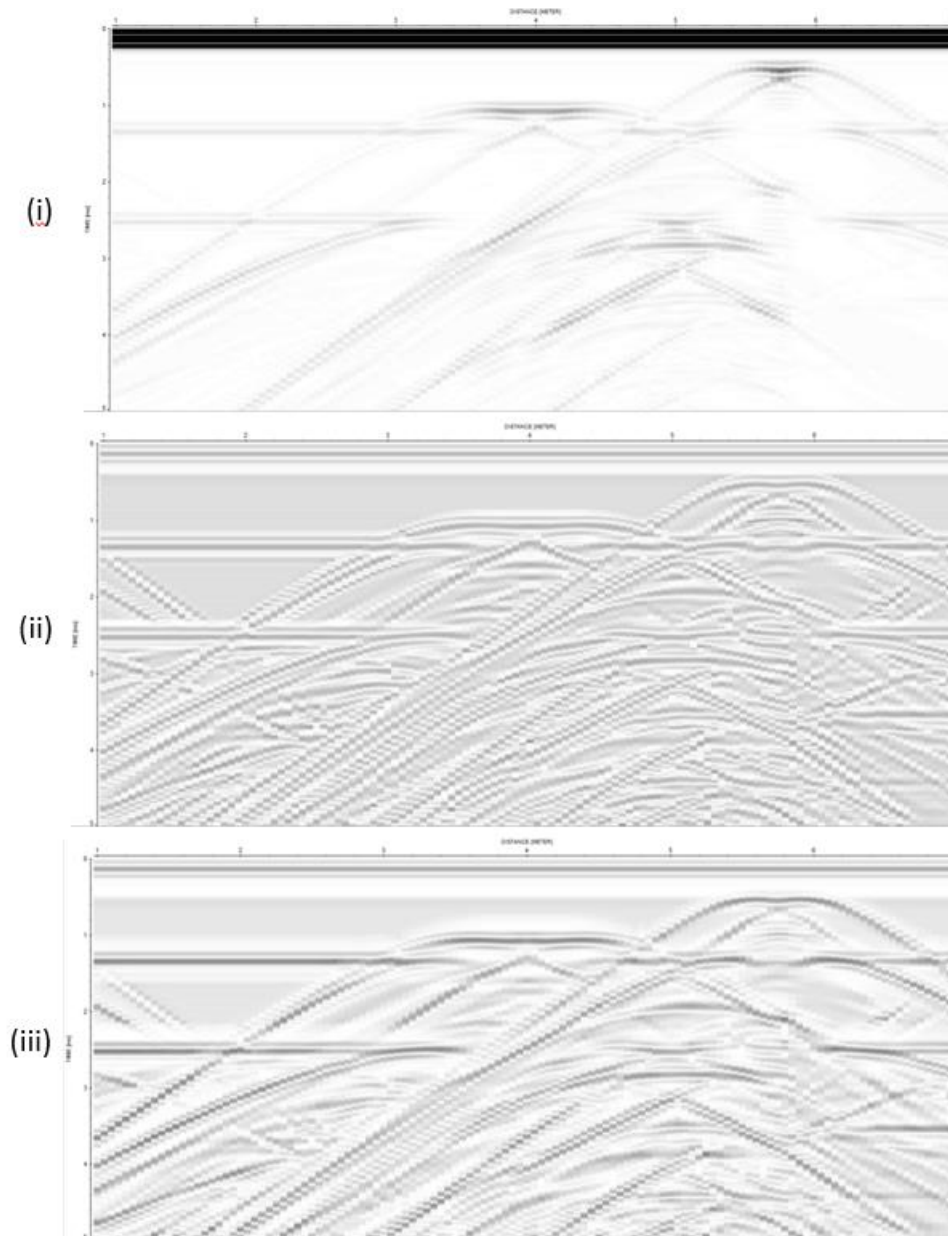
Εικόνα 4.40: Ενισχυμένη καταγραφή, τύπου wiggles mode, με χρώμα rainbow, του M.3.c.2.abc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.2 ms και ενίσχυση σήματος=0.02.



Εικόνα 4.41: Ενισχυμένη καταγραφή του M.3.c.2.abc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.5 ms και ενίσχυση σήματος=0.02.



Εικόνα 4.42: Ενισχυμένη καταγραφή, τύπου wiggle mode, με χρώμα rainbow, του M.3.c.2.abc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.5 ms και ενίσχυση σήματος=0.02.

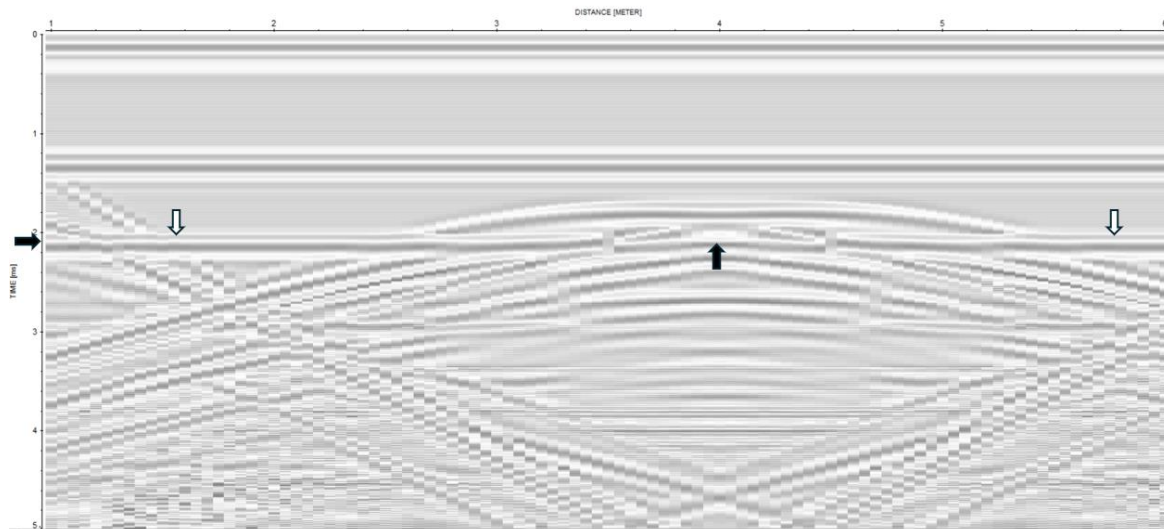


Εικόνα 4.43: Συγκριτική εικόνα των καταγραφών του M.3.c.2.abc μαζί με την πρωτότυπη και τις ενισχυμένες. **(i)** η πρωτότυπη καταγραφή, **(ii)** η ενισχυμένη καταγραφή με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.2 ms **(iii)** η ενισχυμένη καταγραφή με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.5 ms.

Μοντέλο M.3.1.bc

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση φαίνεται ότι η ενίσχυση ήταν απαραίτητη λόγω της θέσης του σώματος (βυθισμένο μεταξύ του δεύτερου ανακλαστήρα), διότι η ανάκλαση από το ίδιο το σώμα και ιδιαίτερα από το κάτω όριό του, καθώς και εκείνη του δεύτερου ανακλαστήρα δεν ήταν ικανοποιητικά ευκρινείς. Παρόλα αυτά, στις Εικόνες 4.44 και 4.45

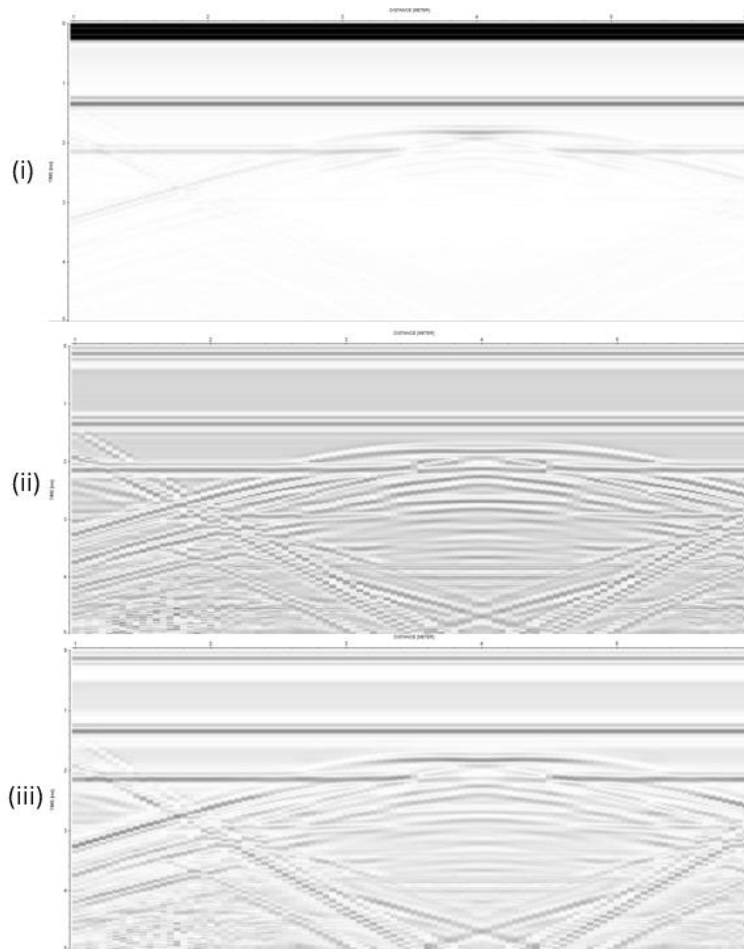
φαίνεται ότι η ενίσχυση βελτίωσε σε μεγάλο βαθμό την ευκρίνεια των ανακλάσεων που προήλθαν από το κάτω όριο του στόχου (μαύρα βέλη) σε χρόνο 2.08 ms και από τον δεύτερο ανακλαστήρα (λευκά βέλη). Σε σύγκριση με την πρωτότυπη καταγραφή (βλ. Εικόνα 4.46), η ενίσχυση όχι μόνο βοήθησε στην βελτίωση της ευκρίνειας των ανακλάσεων, αλλά και άλλων κυματικών γεγονότων, όπως τα περιθλώμενα κύματα, αλλά δυστυχώς και τις ανεπιθύμητες τεχνητές ανακλάσεις από τις πλαϊνές πλευρές του μοντέλου.



Εικόνα 4.44: Ενισχυμένη καταγραφή του M.3.1.bc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.2 ms και ενίσχυση σήματος=0.1.



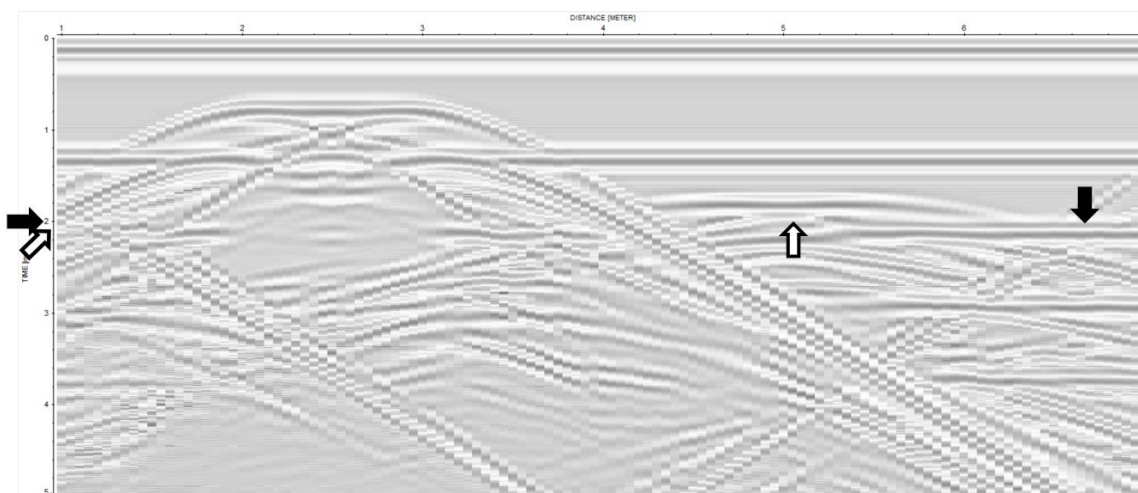
Εικόνα 4.45: Ενισχυμένη καταγραφή του M.3.1.bc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.5 ms και ενίσχυση σήματος=0.1.



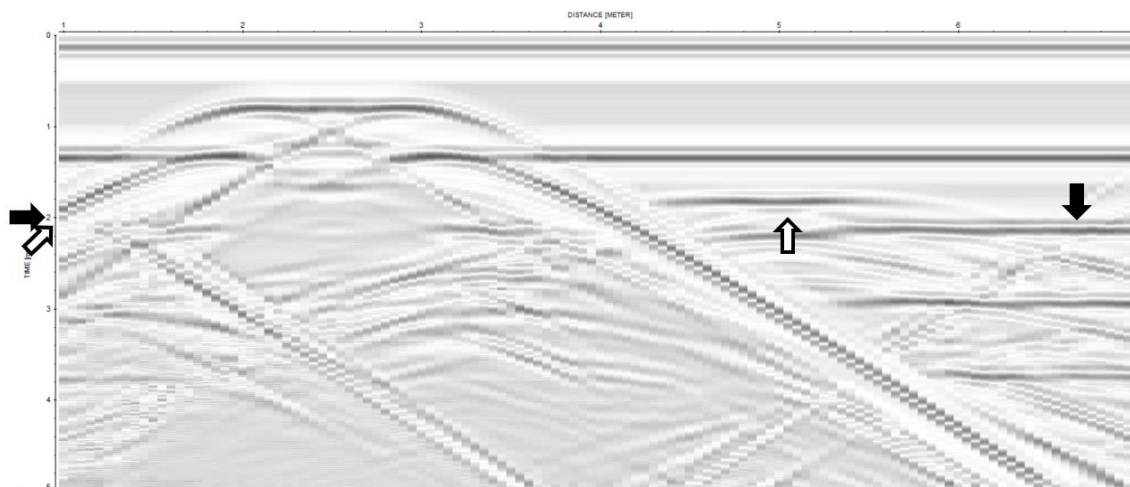
Εικόνα 4.46: Συγκριτική εικόνα των καταγραφών του M.3.1.bc μαζί με την πρωτότυπη και τις ενισχυμένες. **(i)** η πρωτότυπη καταγραφή, **(ii)** η ενισχυμένη με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.2 ms και **(iii)** η ενισχυμένη με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.5 ms.

Μοντέλο M.3.2.ab.bc

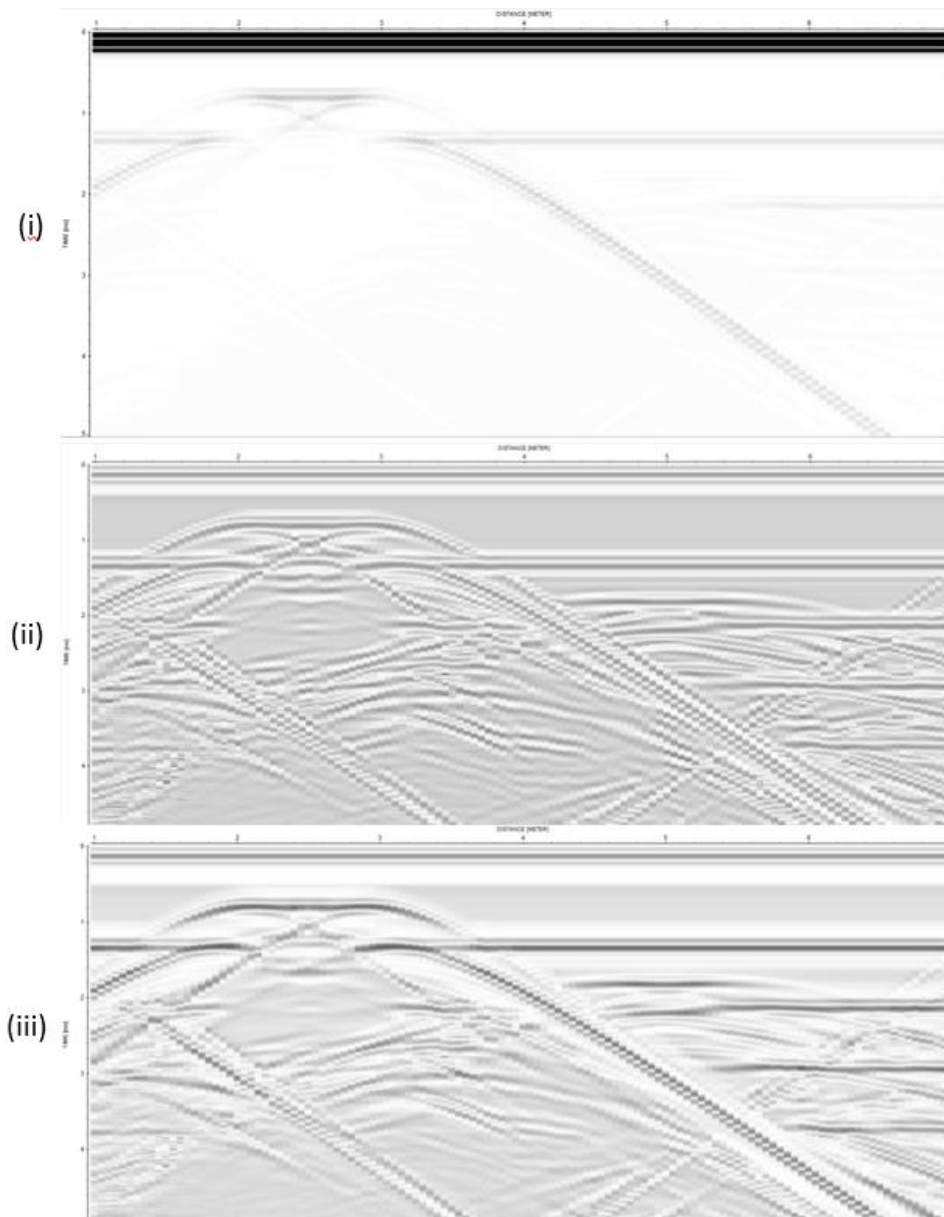
Η τελευταία περίπτωση που αφορά το M.3.2.ab.bc, ανέδειξε την ανάγκη ενίσχυσης, λόγω της αδύναμης εμφάνισης του δεύτερου ανακλαστήρα και του κάτω ορίου του δεύτερου στόχου που ήταν βυθισμένος σε μεγαλύτερο βάθος. Οι Εικόνες 4.47 και 4.48 αναδεικνύουν την χρησιμότητα του AGC καθώς, ενίσχυσε σημαντικά τις ανακλάσεις του κάτω ορίου του βαθύτερου σώματος (λευκά βέλη) σε χρόνο 2.08 ms και του δεύτερου ανακλαστήρα (μαύρα βέλη). Το αποτέλεσμα φαίνεται πιο καθαρά στην Εικόνα 4.49 λόγω σύγκρισης με την καταγραφή χωρίς ενίσχυση.



Εικόνα 4.47: Ενισχυμένη καταγραφή του M.3.2.ab.bc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.2 ms και ενίσχυση σήματος=0.05.



Εικόνα 4.48: Ενισχυμένη καταγραφή του M.3.2.ab.bc με τις εξής τιμές: διάρκεια χρονικού παραθύρου=0.5 ms και ενίσχυση σήματος=0.05.



Εικόνα 4.49: Συγκριτική εικόνα των καταγραφών του M.3.2.ab.bc μαζί με την πρωτότυπη και τις ενισχυμένες. **(i)** Η πρωτότυπη καταγραφή, **(ii)** η ενισχυμένη με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.2 ms και **(iii)** η ενισχυμένη με τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου=0.5 ms.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα-Προτάσεις

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Σεισμική ανάκλαση για την αναζήτηση ανθρωπογενών δομών σε αβαθές θαλάσσιο περιβάλλον», διαπιστώνεται ότι η μεθοδολογία της σεισμικής ανάκλασης, όταν εφαρμόζεται με κατάλληλο σχεδιασμό και σε συνδυασμό με σύγχρονα εργαλεία, μπορεί να αποδώσει χρήσιμα αποτελέσματα για τον εντοπισμό ανθρωπογενών δομών θαμμένων κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη συμβολή του Chirp Sub-Bottom Profiler, το οποίο αποδείχθηκε ένα ιδιαίτερα αποτελεσματικό εργαλείο απεικόνισης ρηχών στρωματογραφικών χαρακτηριστικών, ειδικά όταν αξιοποιείται συμπληρωματικά με άλλες μεθόδους γεωφυσικής απεικόνισης και επιπλέον αντίστοιχα εργαλεία. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η πολυμεθοδολογική προσέγγιση μπορεί να ενισχύσει τη διακριτική ικανότητα και την ερμηνευτική ακρίβεια σε τέτοιου είδους μελέτες.

Στα τελευταία κεφάλαια, δημιουργήθηκαν συνθετικά δεδομένα, διάταξης σταθερής απόστασης απόστασης πηγής-δέκτη, μέσω του λογισμικού ReflexW, με στόχο την μελέτη διαφορετικών σεναρίων σε αβαθές θαλάσσιο περιβάλλον. Στη συνέχεια, στα πλαίσια του περιβάλλοντος του εν λόγω λογισμικού, πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή της αυτόματης ενίσχυσης σήματος (Automatic Gain Control-AGC), η οποία επέτρεψε την ενίσχυση συγκεκριμένων σεισμικών ανακλάσεων, συμβάλλοντας στην καλύτερη αναγνώριση δομών που εντοπίζονται σε βαθύτερα στρώματα, με ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Παρόλο που η εργασία βασίστηκε σε συνθετικά δεδομένα και όχι σε πραγματικά, τα συμπεράσματα που προέκυψαν θέτουν μια καλή βάση για μελλοντική εφαρμογή της μεθοδολογίας σε πραγματικές συνθήκες, αλλά και για περαιτέρω διερεύνηση του ρόλου του Chirp Sub-Bottom Profiler και άλλων συμπληρωματικών μεθόδων στην παράκτια γεωφυσική έρευνα.

Επιπροσθέτως, προτείνεται η διερεύνηση της εφαρμογής της σεισμικής ανάκλασης με τη δημιουργία συνθετικών δεδομένων και συγκεκριμένα, μοντέλων περίπλοκων συνθηκών (στρώματα υπό κλίση, περισσότεροι στόχοι), διαφορετικών διατάξεων για τη συλλογή δεδομένων (π.χ. διάταξη κοινής πηγής/γεωφώνου) ή ακόμη της παρούσας διάταξης με περισσότερες περιπτώσεις αποστάσεων πηγής και δέκτη.

Συνοψίζοντας, η εργασία αυτή επιβεβαιώνει τη σημασία της προσομοίωσης και του ορθού σχεδιασμού σεισμικών ερευνών, ιδιαίτερα όταν ο στόχος είναι η αποτύπωση ανθρωπογενών ή άλλων δομών σε περιοχές με περιορισμένο βάθος θάλασσας, όπως τα παράκτια θαλάσσια περιβάλλοντα.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

1. Barsottelli-Botelho, M. A. & Mesquita, L., 2015. Using GPR and High Frequency Seismic to Locate Under Water Buried Pipes. Volume 2015, pp. 1-5.
2. Bechtel, T. D., Bosch, F. P. & Gurk, M., 2007. Geophysical Methods. In: *Methods in Karst Hydrogeology: IAH: International Contributions to Hydrogeology*. 1st ed. London: CRC Press, p. 280.
3. Bertoni, C., Lof, J., Micallef, A. & Moe, H., 2020. Seismic Reflection Methods in Offshore Groundwater Research. *Geosciences*, 10(8).
4. Boldreel, L. O. et al., 2025. A Submerged and Buried Mesolithic Site off Svanemøllen Harbor, Copenhagen, Denmark: Acoustic Detection (Human-Altered Lithic Detection) and Verification by Means of Coring. *Remote Sensing*, 17(3).
5. Crutchley, G. J. & Kopp, H., 2018. Reflection and Refraction Seismic Methods. In: *Submarine Geomorphology*. Cham: Springer Geology, p. 46.
6. Drew, N. G. & D., 2007. *Methods in Karst Hydrogeology*. London UK: Taylor & Francis Group.
7. EdgeTech, 2015-2018. *3200-XS SUB-BOTTOM SYSTEM USER HARDWARE MANUAL*, West Wareham, MA: EdgeTech.
8. Fitch, S. & Hale, J. C., 2025. A Needle in a Haystack: Landscape Survey and Archaeological Detection Experiments in Apalachee Bay. *Archaeological Prospection*, 32(2), pp. 263-280.
9. Georgiou, N. et al., 2021a. A Multidisciplinary Approach for the Mapping, Automatic Coastal Installations: The Case Study of the Ancient Aegina Harbour Complex. *Remote Sensing*, 13(21).
10. Georgiou, N., Dimas, X. & Papatheodorou, G., 2021b. Integrated Methodological Approach for the Documentation of Marine Priority Habitats and Submerged Antiquities: Examples from the Saronic Gulf, Greece. *Sustainability*, 13(21).
11. Grøn, O. & Boldreel, L. O., 2014. Chirping for Large-Scale Maritime Archaeological Survey: A Strategy Developed from a Practical Experience-Based Approach. *Journal of Archaeology*, Issue 1, p. 11.

12. Grøn, O. & Boldreel, L. O., 2014. Chirping for Large-Scale Maritime Archaeological Survey: A Strategy Developed from a Practical Experience-Based Approach. *Journal of Archaeology*, p. 11.
13. Grøn, O. et al., 2018. Detecting human-knapped flint with marine high-resolution reflection seismics: A preliminary study of new possibilities for subsea mapping of submerged Stone Age sites. *Underwater Technology*, 35(2), pp. 35-49.
14. Grøn, O. et al., 2021. Acoustic Mapping of Submerged Stone Age Sites—A HALD Approach. *Remote Sensing*, 13(3).
15. Gutowski, M. et al., 2008. 3D high-resolution acoustic imaging of the sub-seabed. *Applied Acoustics*, 69(3).
16. Gutowski, M. et al., 2002. Chirp sub-bottom profiler source signature design and field testing. *Marine Geophysical Researches*, Volume 23, p. 481–492.
17. Hall, A. S. et al., 2024. The Derim Derim Dolerite, greater McArthur Basin, Australia: Using subsurface data to characterise a mesoproterozoic magma plumbing system. *Marine and Petroleum Geology*, 2024 08, Volume 169.
18. Hamouda, A. et al., 2021a. Submergence of the Western Greco-Roman Archaeological Site at the Eastern Harbor of Alexandria: Emerged from High Resolution Geophysical Mapping. *Quaternary*, 4(3).
19. Hamouda, A. Z. et al., 2021b. Subsidence model of the ancient Alexandria Royal port linked to sea-level rise and natural hazards using integrated geophysical methods. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 30 July, 47(3), pp. 283-292.
20. Kılınç, G. et al., 2025. Assessing Seferihisar-İzmir (Türkiye) geothermal energy prospects through marine seismic and field geology data modelling. *Geothermics*, June, Volume 129.
21. Kim, S.-B. & Park, H.-L., 2022. Optimizing Source Wavelets Extracted from the Chirp Sub-Bottom Profiler Using an Adaptive Filter with Machine Learning. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(4).
22. Kim, Y.-J. et al., 2016. A case study on pseudo 3-D Chirp sub-bottom profiler (SBP) survey for the detection of a fault trace in shallow sedimentary layers at gas hydrate site in the Ulleung Basin, East Sea. *Journal of Applied Geophysics*, Volume 133, pp. 98-115.

23. Makama, A., Kuladinithi, K. & Timm-Giel, A., 2021. Wireless Geophone Networks for Land Seismic Data Acquisition: A Survey, Tutorial and Performance Evaluation. *Sensors (Basel)*, 30 July, 21(15).
24. Morrow, W. S., Carpenter, P. J. & Adams, R. F., 2015. *Seismic Data Collection from Water Gun and Industrial Background Sources in the Chicago Sanitary and Ship Canal Area, Illinois, 2011*, Chicago: U.S. Geological Survey.
25. Mosher, D. C. & Simpkin, P. G., 1999. Environmental Marine Geoscience 1. Status and Trends of Marine High-Resolution Seismic Reflection Profiling: Data Acquisition. *Geoscience Canada*, 12 December, 26(4).
26. Onajite, E., 2014. Chapter 5 - Understanding the Detail Seismic Processing Techniques Used to Convert the Acquired Seismic Data into the Geologic Section of the Earth. Στο: E. Onajite, επιμ. *Seismic Data Analysis Techniques in Hydrocarbon Exploration*. s.l.:Elsevier, pp. 71-85.
27. Pydyn, A. et al., 2024. Between water and land: Connecting and comparing underwater, terrestrial and airborne remote-sensing techniques. *Journal of Archaeological Science: Reports*, Volume 53.
28. Ravnås, H. H. et al., 2023. Marine Geophysical Survey of a Medieval Shipwreck in Shallow Waters Using an Autonomous Surface Vehicle: A Case Study from Avaldsnes, Norway. *Journal of Maritime Archaeology*, Volume 18, p. 707–731.
29. Saheban, H. & Kordrostami, Z., 2021. Hydrophones, fundamental features, design considerations, and various structures: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, October, Volume 329.
30. Teledyne Benthos, 2006. *Chirp III Acoustic Profiling System - System Manual*, North Falmouth, U.S.A: Teledyne Benthos, Inc.
31. Veeken, P. C. & van Moerkerken, B., 2013. 2 - The seismic reflection method and its constraints. In: *Seismic Stratigraphy and Depositional Facies Models*. Houten, the Netherlands: Academic Press.
32. Wang, L. et al., 2021. Reverse Time Migration of Vertical Cable Seismic Data to Image Hydrate-Bearing Sediments With High Resolution. *Frontiers in Earth Science*, Volume 9-2021.
33. Zheng, G., Zhao, J., Li, S. & Feng, J., 2021. Zero-Shot Pipeline Detection for Sub-Bottom Profiler Data Based on Imaging Principles. *Remote Sensing*, 13(21).

Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

1. Βαφείδης, Α., 2023. *Σεισμικές Μέθοδοι [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]*. Χανιά: Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.
2. Κανελλόπουλος, Ι., 2021. *Επεξεργασία δεδομένων σεισμικής ανάκλασης ακουστικού συστήματος CHIRP στη θάλασσα Chukchi βορειοδυτικά της Αλάσκας*, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
3. Σοφιάκη, Ε., 2004. *Ερμηνεία δεδομένων γεωραντάρ με μεθόδους ταξινόμησης (μετακινινομένων μέσων τιμών και μέγιστης πιθανοφάνειας)*, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
4. Μπριντάκης, Ι., 2018. *Ανάπτυξη μεθοδολογίας τρισδιάστατης προσομοίωσης της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Εφαρμογή στην παρακολούθηση της γεωλογικής αποθήκευσης του CO₂ με τη σεισμική ανάκλαση*, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.

Πηγές από το διαδίκτυο

1. Bianco, E., 2011. *G is for Gather*. [Online]
Available at: <https://agilescientific.com/blog/2011/9/14/g-is-for-gather.html>
2. Dr. Karl-Josef Sandmeier, 2024. *Sandmeier geophysical research*. [Online]
Available at: <https://www.sandmeier-geo.de/>
3. EarthScope Consortium, 2018. *Seismological Facility for the Advancement of Geoscience (SAGE)*. [Online]
Available at: https://www.iris.edu/hq/inclass/lesson/the_seismic_method
4. Geo Marine Survey Systems, 2024. *Geo Marine Survey Systems*. [Online]
Available at: <https://ww2.geosys.nl/en>
5. GeoAcoustics Ltd, 2015. *GeoAcoustics*. [Online]
Available at: <https://www.geoacoustics.com/copy-of-geopulse-compact-ots>
6. INNOMAR Technologie GmbH, 1997. *INNOMAR*. [Online]
Available at: <https://www.innomar.com/products/shallow-water>
7. Oy Meridata Finland Ltd, 2024. *Meridata md*. [Online]
Available at: <https://meridata.fi/chirp.shtml>

8. SEG Wiki (a), 2014. *Dictionary: Klauder wavelet*. [Online]
Available at: https://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Klauder_wavelet/en
[Accessed 2025].
9. SyQwest, Inc, 2025 *Bathy 2010™ CHIRP Sub Bottom Profiler and Bathymetric Echo Sounder*. [Online]
Available at: <https://uksurveyingequipment.com/hydrographic-equipment/syqwest-bathy-2010-chirp-profiler>
[Accessed 2025].
10. Unique Group, 2025. *Unique Group*. [Online]
Available at: <https://www.uniquegroup.com/product/kongsberg-5430a-132-geopulse-pinger-system/>
11. Βαφείδης, Α., 2025. *Διαλέξεις Σεισμικών Μεθόδων*. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/index.php?course=MHXOP102&openDir=/DIALLE3EIS_MA8HMATOS

Παράρτημα

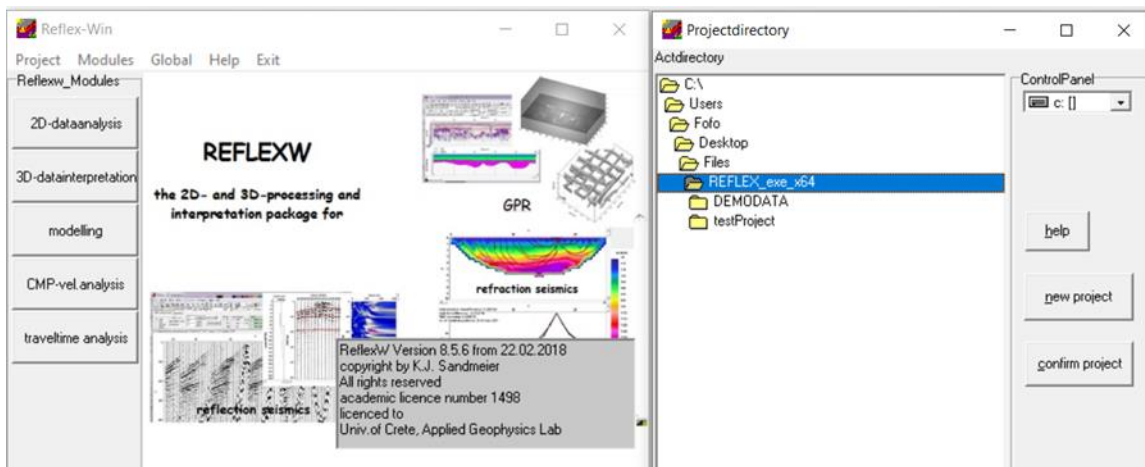
Π.1 Βήματα για τη δημιουργία δυσδιάστατων μοντέλων προσομοίωσης

Σχετικά με το πρώτο μέρος προσομοιώσεων, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για λόγους σύγκρισης και ολοκληρωμένης προσομοίωσης, το βήμα 5 που αναλύεται παρακάτω επαναλήφθηκε για κάθε προσομοίωση, στο πλαίσιο σύγκρισης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από διαφορετικές διατάξεις σταθερής απόστασης μεταξύ πηγής και δέκτη. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις, όπου η πρώτη αφορά μηδενική απόσταση μεταξύ πηγής και δέκτη και η δεύτερη απόσταση 0.25 m μεταξύ τους, τα οποία θα επεξηγηθούν αναλυτικότερα παρακάτω (βλ. Πίνακα Π.1).

Η υπόλοιπη παραμετροποίηση διατηρήθηκε σταθερή, ώστε να αξιολογηθεί αποκλειστικά η επίδραση της γεωμετρικής διάταξης στη μορφή και ποιότητα των καταγραφών.

Βήμα 1^ο: Αρχικά γίνεται η δημιουργία ενός έργου στην επιλογή “new project” όπως φαίνεται και στην παρακάτω Εικόνα (Εικόνα Π.1), όπου σε κάθε έργο μπορούν να αποθηκευτούν πολλά διαφορετικά αρχεία για περεταίρω επεξεργασία ή διόρθωση με την μετέπειτα επιλογή του “confirm project”.

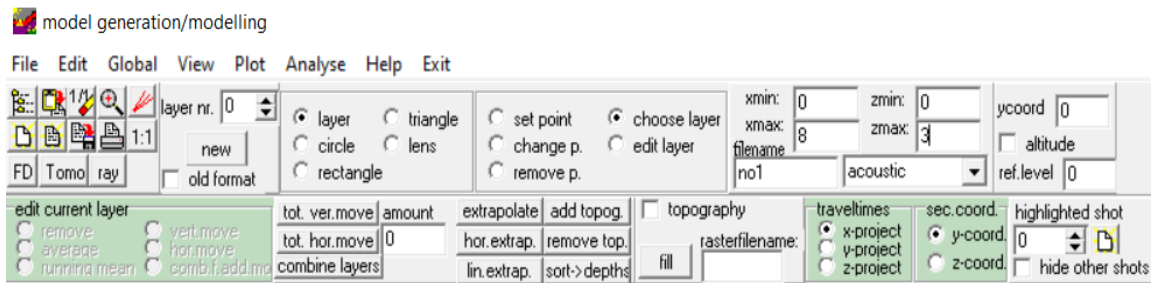
Βήμα 2^ο: Μετά την δημιουργία ή την επιλογή του έργου, εμφανίζεται ένα παράθυρο που παρουσιάζει τις βασικές λειτουργίες και εφαρμογές του (GPR, σεισμική ανάκλαση και διάθλαση). Στα αριστερά, φαίνεται ο πίνακας πλοήγησης, που παρέχει πρόσβαση στις κύριες λειτουργίες: ανάλυση δεδομένων 2D, τρισδιάστατη ερμηνεία, μοντελοποίηση, ανάλυση ταχύτητας CMP και ανάλυση χρόνου διαδρομής.



Εικόνα Π.1: Το περιβάλλον του προγράμματος ReflexW.

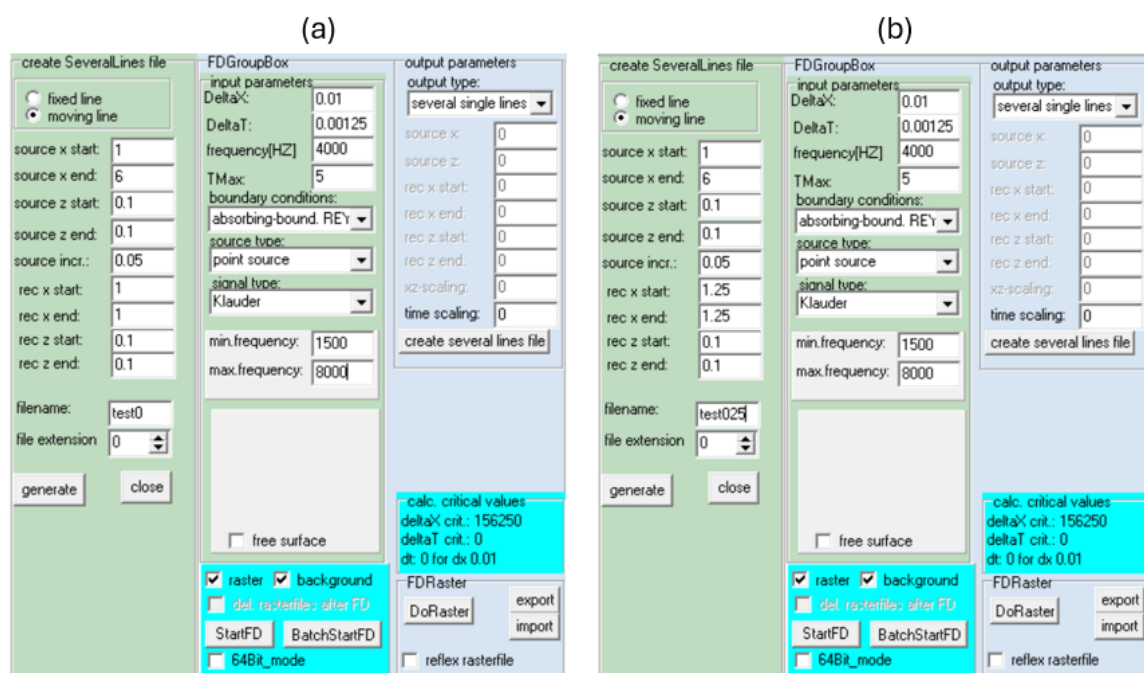
Βήμα 3°: Αρχικά, για τη δημιουργία προσομοίωσης επιλέχθηκε η λειτουργία “modelling”, όπου εμφανίζεται το αντίστοιχο παράθυρο διαμόρφωσης του μοντέλου (βλ. Εικόνα Π.1). Το παράθυρο αυτό περιλαμβάνει εργαλεία για την κατασκευή και επεξεργασία γεωλογικών στρωμάτων, καθώς και για τον ορισμό γεωμετρικών και φυσικών παραμέτρων (όπως ταχύτητα, βάθος κλπ.). Στο άνω μέρος της οθόνης βρίσκονται οι βασικές λειτουργίες (όπως αποθήκευση, εισαγωγή σημείων, προσθήκη στρωμάτων), ενώ το κύριο μέρος της οθόνης χρησιμοποιείται για την απεικόνιση και επεξεργασία του μοντέλου.

Βήμα 4°: Έγινε η εισαγωγή των διαστάσεων του μοντέλου προσομοίωσης, δηλαδή (βλ. Εικόνα Π.2) ορίστηκε το οριζόντιο και το κατακόρυφο όριο του μοντελοποιημένου χώρου του ως $x_{max} = 8 \text{ m}$ (ο οριζόντιος άξονας), $z_{max} = 3 \text{ m}$ (ο κατακόρυφος άξονας/ βάθος) και τέλος επιλέχθηκε ο τύπος κυματικής εξίσωσης που θα χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση (wavetype) ως “acoustic”, που αντιστοιχεί σε ακουστική κυματική διάδοση.



Εικόνα Π.2: Περιβάλλον δημιουργίας μοντέλου στο ReflexW και εργαλεία επεξεργασίας γεωμετρίας και ρύθμισης παραμέτρων προσομοίωσης.

Βήμα 5°: Μετά τη δημιουργία της προσομοίωσης, πραγματοποιήθηκε η ρύθμιση των παραμέτρων προσομοίωσης στο παράθυρο δημιουργίας γραμμών (create Several single Lines file), όπως φαίνεται στην Εικόνα Π.3. Εκεί ορίστηκαν οι θέσεις των πηγών και των γεωφώνων, οι διαστάσεις πλέγματος (DeltaX), τη διακριτοποίηση στο χρόνο (DeltaT), η διάρκεια προσομοίωσης (Tmax), καθώς και τα χαρακτηριστικά του σήματος και των συνοριακών συνθηκών.



Εικόνα II.3: Ρύθμιση των παραμέτρων προσομοίωσης στο παράθυρο FD Shots και create several single lines, για μηδενική απόσταση πηγής δέκτη (a) και για απόσταση 0.25 m (b).

Πίνακας Π.1: Οι παράμετροι προσομοίωσης στο παράθυρο FD shots και η σημασία τους.

Moving Line	Ορίζει τη γεωμετρία για μια γραμμή γεωφώνων που κινείται με τις πηγές.	Boundary conditions	Καθορίζουν τη συμπεριφορά των κυμάτων στα άκρα του μοντέλου
Source x start/end	Αρχική/Τελική θέση της πηγής στον οριζόντιο άξονα (X)	Boundary conditions: absorbing-boundary	Απορροφητικά όρια, κατάλληλα για ακουστικά κύματα
Source z start/end	Αρχική/Τελική θέση της πηγής στον κατακόρυφο άξονα (Z)	Source type: point source	Είδος της πηγής: σημειακή πηγή
Source increment	Το βήμα μετακίνησης της πηγής κατά τη διάρκεια της σάρωσης	Signal type	Είδος Κυματομορφής
Rec x start/end	Αρχική/Τελική θέση του δέκτη. Σε αυτή τη περίπτωση η θέση του δέκτη είναι μία.	Output parameters, output type	Μορφή με την οποία θα παραχθεί και θα αποθηκευτεί το συνθετικό σήμα από την προσομοίωση.
DeltaX/T	Δειγματοληψία στον χώρο & στον χρόνο, επηρεάζοντας τη χωρική και χρονική ανάλυση της προσομοίωσης. Μικρότερες τιμές=υψηλότερη ακρίβεια αλλά αυξημένο υπολογιστικό κόστος.	Several single lines	Δημιουργεί αρχεία καταγραφής (shot gathers) για κάθε πηγή ξεχωριστά.
Frequency (Hz), Tmax	Συχνότητα και διπλός κατακόρυφος χρόνος αντίστοιχα.	Min/Max frequency	Ελάχιστες & μέγιστες συχνότητες που θα περιλαμβάνονται στο σήμα

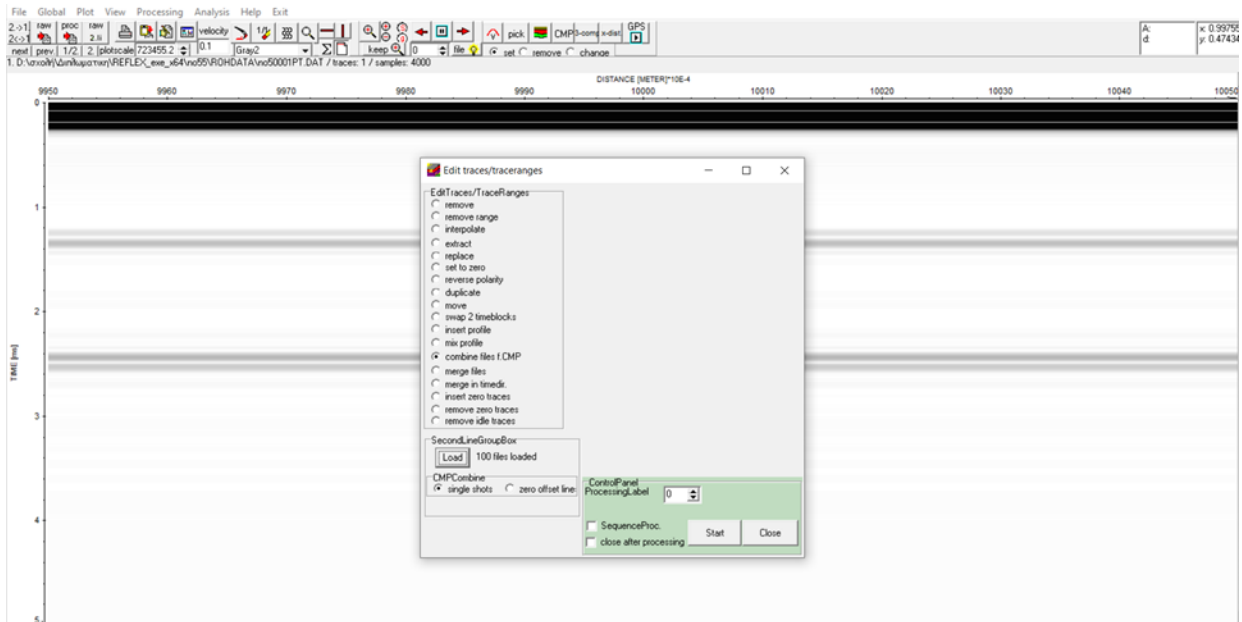
Πίνακας Π.2: Οι αριθμητικές παράμετροι προσομοίωσης στο παράθυρο FD shots.

Source x start (m)	1 ή 2	Boundary conditions	Absorbing-Boundary
Source x end (m)	6 ή 7	Source type	point source
Source z start (m)	0.1	Signal type	Klauder
Source z end (m)	0.1	Output parameters, output type	Several Single Lines
Source increment (m)	0.05	DeltaX (m)	0.01
Rec x start (m)	1 (offset=0m) ή 1.25 (offset=0.25m) (Α' Μέρος Προσομοιώσεων)	DeltaT (ms)	0.00125
Rec x end (m)	1 (offset=0m) ή 1.25 (offset=0.25m) (Α' Μέρος Προσομοιώσεων)	Frequency (Hz)	4000
		TMax	5
Rec z start (m)	0.1	Minimum frequency (Hz)	1500
Rec z end (m)	0.1	Maximum frequency (Hz)	8000

Μετά τη συμπλήρωση των απαραίτητων πεδίων για κάθε περίπτωση, επιλέχθηκε η λειτουργία generate και στη συνέχεια StartFD, ώστε να παραχθούν τα FD shots.

Η μέθοδος FD (Finite Difference) στο ReflexW είναι μια αριθμητική τεχνική για την προσομοίωση της διάδοσης κυμάτων (σεισμικών ή ηλεκτρομαγνητικών) σε δισδιάστατα μοντέλα. Υπολογίζει το κυματικό πεδίο σε κάθε χρονική στιγμή και σημείο του χώρου, επιλύοντας διακριτά την κυματική εξίσωση. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή συνθετικών σημάτων (FD shots) που προσομοιώνουν ρεαλιστικά την καταγραφή ενός πεδίου.

Βήμα 6^ο: Μετά την ολοκλήρωση των FD shots, πραγματοποιήθηκε η έξοδος από το περιβάλλον του “modelling” και επιλέγεται εκείνο του “2D-Data Analysis”. Έπειτα, έγινε η εισαγωγή του πρώτου από τα αρχεία (FD shots) και στη συνέχεια, μέσω της επιλογής Processing → Edit traces/traceranges → combine files f.CMP (βλ. Εικόνα Π.4) επιλέχθηκαν συνολικά όλα τα υπόλοιπα αρχεία καταγραφών (περίπου 100 με 120 αρχεία). Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η δημιουργία μιας ενιαίας συνθετικής καταγραφής σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (synthetic shot gather), ή αλλιώς μιας συνθετικής σεισμικής τομής, η οποία παρουσιάζει τα πλάτη των κυμάτων σε σχέση με το χρόνο (κατακόρυφος άξονας) και την απόσταση (οριζόντιος άξονας). Η τομή αυτή αποτελεί το τελικό προϊόν της FD προσομοίωσης.



Εικόνα Π.4: Η διαδικασία της συνένωσης πολλών ξεχωριστών shot gathers σε ένα ενιαίο αρχείο τύπου CMP (Common Midpoint) στο περιβάλλον του 2D-Data Analysis.

Π.2 Βήματα για την εκτέλεση της αυτόματης ενίσχυσης σήματος (AGC)

Βήμα 1^ο: Αρχικά επιλέχθηκε η λειτουργία “2D-data analysis” για την εκκίνηση της επεξεργασίας.

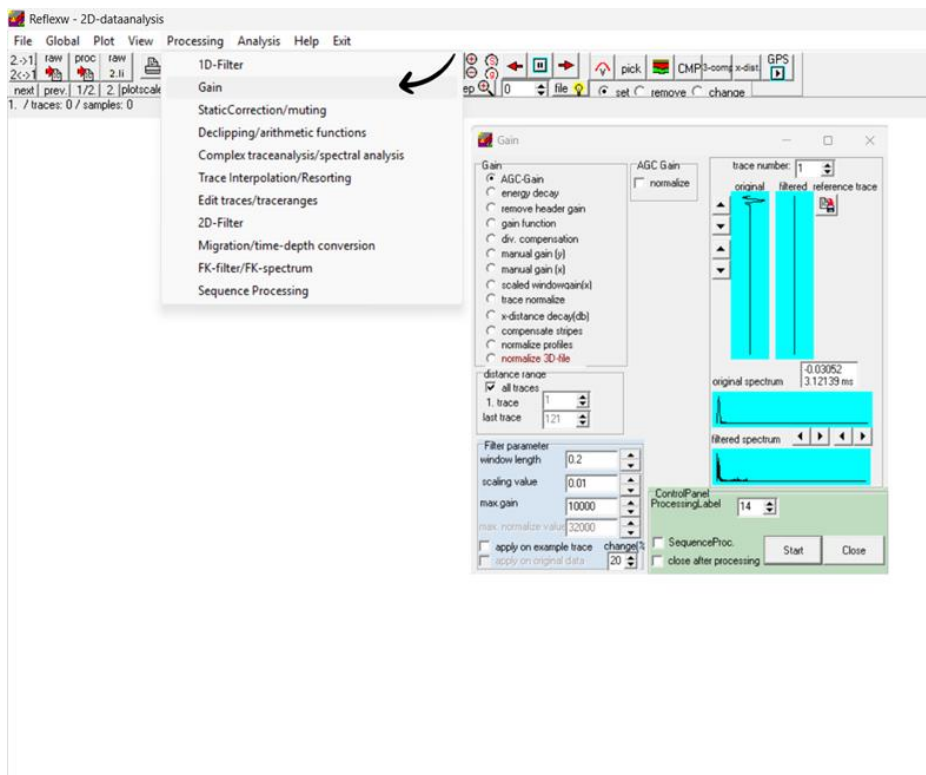
Βήμα 2^ο: Πριν την επεξεργασία της σεισμικής τομής θα πρέπει να ανοιχτεί η συνθετική καταγραφή σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη του κάθε μοντέλου που επιλέχθηκε, όπως περιεγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4 και συγκεκριμένα το αποτέλεσμα του βήματος 6.

Βήμα 3^ο: Στη συνέχεια επιλέγεται το πλαίσιο “Processing” και στη συνέχεια επιλέγεται το “Gain” όπως φαίνεται στην Εικόνα Π.5.

Βήμα 4^ο: Στη συνέχεια ανοίγει το παράθυρο της διαδικασίας “Gain” (βλ. Εικόνα Π.5) και επιλέχθηκε το κουμπί “AGC Gain” με τα υπόλοιπα να μένουν ως έχουν. Στο πλαίσιο "Filter parameter" πραγματοποιήθηκε ρύθμιση των παραμέτρων της χρονικής διάρκειας του παραθύρου (window length) και της παραμέτρου ενίσχυσης του σήματος (scaling value), οι οποίες καθορίζουν το επίπεδο της ενίσχυσης (gain). Για την τιμή διάρκειας χρονικού παραθύρου δοκιμάστηκαν διαφορετικές τιμές (0.2 ms, 0.5 ms, 1 ms, 2 ms και 3 ms) στην ίδια συνθετική καταγραφή, με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασής τους στην ευκρίνεια της απεικόνισης. Από τη σύγκριση διαπιστώθηκε ότι οι τιμές 1, 2 και 3 δεν παρήγαγαν ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την ενίσχυση του σήματος από βαθύτερους στόχους, σε αντίθεση με τις χαμηλότερες τιμές (0.2 και 0.5 ms) οι οποίες απέδωσαν καλύτερη απεικόνιση. Για αυτό το λόγο οι τιμές 1, 2 και 3 εφαρμόστηκαν μόνο στην προσομοίωση M.3.1.c (Εικόνα 4.35). Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, επιλέχθηκαν οι τιμές 0.2 και 0.5 και εφαρμόστηκαν στις υπόλοιπες συνθετικές καταγραφές.

Όσον αφορά την παράμετρο ενίσχυσης σήματος (scaling value), οι τιμές επιλέχθηκαν εμπειρικά έτσι ώστε τα τελικά αποτελέσματα των καταγραφών να έχουν παρόμοιο επίπεδο πλατών για τα διάφορα παράθυρα φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν και ήταν κυρίως μικρότερες της μονάδας. Η ρύθμισή τους προσαρμοζόταν ανάλογα με την εκάστοτε συνθετική καταγραφή, λαμβάνοντας υπόψη την αρχική κλίμακα απεικόνισης (plot scale) πριν την εφαρμογή της επεξεργασίας Gain. Στόχος ήταν η βελτιστοποίηση της ενίσχυσης των βαθύτερων στόχων χωρίς υπερβολική ενίσχυση των αντίστοιχων ρηχότερων ανακλάσεων.

Βήμα 5^ο: Στο πλαίσιο του “control panel”, ιδανικά επιλέγεται ο αύξοντας αριθμός της κάθε δοκιμής ενίσχυσης προκειμένου τα επεξεργασμένα δεδομένα να αποθηκευτούν αυτόματα με διαφορετικό όνομα, χρησιμοποιώντας, ως κατάληξη αρχείου τον αριθμό αυτό. Στην περίπτωση της εικόνας Π.5 ο αριθμός 14 αντιστοιχεί σε παράδειγμα και συγκεκριμένα στη 14^η προσπάθεια δημιουργίας ενισχυμένης εικόνας. Τέλος η επεξεργασία ολοκληρώνεται με το κουμπί “start”.



Εικόνα Π.5: Απεικόνιση του παραθύρου της επεξεργασίας “Gain” και οι επιλεγμένες παράμετροι.