



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ  
ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΠΑΤΡΑΪΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ”

---

Ρέππας Δημήτριος

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Βαφείδης Αντώνιος, Καθ. Πολυτεχνείου Κρήτης (επιβλέπων)

Σουπιός Παντελής, Καθ. ΤΕΙ Κρήτης

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

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2016

“Έχεις τα πινέλα, έχεις τα χρώματα,  
ζωγράφισε τον παράδεισο και μπες μέσα.”

Νίκος Καζαντζάκης

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Είναι γνωστό πως η Ευρωπαϊκή Ένωση δεν διαθέτει αξιόλογα αποθέματα συμβατικών καυσίμων. Η κάλυψη των μελλοντικών ενεργειακών αναγκών της ΕΕ και προπάντων της Ελλάδας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα εισαγόμενα καύσιμα. Επιπρόσθετα η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί ιδιαίτερα τα επόμενα χρόνια. Αυτό πρέπει να οδηγήσει αυτές τις χώρες στον εντοπισμό, καθώς και στην εκμετάλλευση νέων ενεργειακών πόρων προκειμένου να λυθεί το παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα.

Παράλληλα στην προσπάθεια εξόδου της χώρας μας από την οικονομική κρίση, αλλά και των υπολοίπων χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η αναζήτηση και αξιοποίηση νέων πηγών ενέργειας αποτελεί μονόδρομο, προκειμένου να τονωθεί η οικονομία και να ξεκινήσει η ανάπτυξη. Η χώρα μας αναγκάστηκε λόγω των παραπάνω παραγόντων, να ερευνήσει εκτενέστερα το υπόβαθρό της και να αναζητήσει για παγίδες πετρελαίου.

Η παρούσα διπλωματική εργασία καλείται να εξετάσει, απεικονίσει και να ερμηνεύσει τη δομή-στρωματογραφία του υπεδάφους μιας γραμμής μελέτης σε περιοχή κοντά στον Πατραϊκό κόλπο, όπου πιθανόν να φιλοξενούνται υδρογονάνθρακες. Όλες οι επεξεργασίες των αποτελεσμάτων, που χρειάστηκαν προκειμένου να προβώ σε χρήσιμα συμπεράσματα, υλοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων Καθηγητή μου Αντώνιο Βαφείδη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, δίνοντας μου την ευκαιρία να δουλέψω την διπλωματική μου εργασία, υπό την επίβλεψη και καθοδήγηση του, αλλά και για τις εύστοχες παρατηρήσεις του. Ειδικότερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον βοηθό του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, δρ. Κρητικάκη Γεώργιο για την συνεχή παρακολούθηση της εξέλιξης της εργασίας, για την άψογη συνεργασία που είχαμε, για την πολύτιμη βοήθειά του πάνω στην επεξεργασία καθώς και για τις διορθώσεις της διπλωματικής μου εργασίας. Παράλληλα, δεν θα ήθελα να ξεχάσω να ευχαριστήσω το τρίτο μέλος της εξεταστικής επιτροπής Σουπιό Παντελή, ο οποίος δέχτηκε να παραστεί στην επιτροπή, αλλά και να αξιολογήσει την εργασία μου.

Τέλος θα ήθελα πάνω απ' όλα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Αθανάσιο Ρέππα και Σιμπίλε Στράιτ-Ρέππα, αλλά και την υπόλοιπη οικογένειά μου, για την αγάπη, την εμπιστοσύνη καθώς και την οικονομική στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια. Δεν θα μπορούσα βεβαίως να παραλείψω τους ανθρώπους που πέρασα τα πιο τρέλα, όμορφα και ξέγνοιαστα χρόνια της ζωής μου, τους φίλους μου και την κοπέλα μου.

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι πολλαπλές ανακλάσεις είναι ένα μη επιθυμητό φαινόμενο, που λαμβάνει χώρα τόσο σε θαλάσσιες, όσο και σε χερσαίες καταγραφές. Η επίδραση των πολλαπλών ανακλάσεων στα σεισμικά δεδομένα είναι καταστροφική, επομένως ο εντοπισμός και η απόσβεση αυτών είναι πολύ σημαντικές διεργασίες. Υπάρχουν περισσότερα από ένα είδη πολλαπλών ανακλάσεων, και κάθε είδος προϋποθέτει διαφορετική αντιμετώπιση.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η χρησιμοποίηση μεθόδων επεξεργασίας θαλασσιών σεισμικών δεδομένων, με σκοπό την απομάκρυνση των πολλαπλών ανακλάσεων που προέρχονται από την επιφάνεια και τον πυθμένα της θάλασσας. Ο κυριότερος στόχος της εργασίας, είναι η απόσβεση των πολλαπλών ανακλάσεων από τον πυθμένα της θάλασσας, επομένως το μεγαλύτερο μέρος αυτής αφιερώνεται στην μελέτη, στον εντοπισμό και στην εξάλειψη ή έστω εξασθένηση της συγκεκριμένης κατηγορίας πολλαπλών ανάκλασης.

Μια ετεροχρονισμένη ανάκλαση στον πυθμένα της θάλασσας προκαλεί μόλυνση των σεισμικών καταγραφών, καλύπτοντας το σήμα των κύριων ανακλάσεων ή δημιουργώντας ψευδείς εντυπώσεις για επιπρόσθετους κύριους ανακλαστές. Βασικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου είδους πολλαπλών ανακλάσεων είναι η περιοδικότητα εμφάνισης τους στις σεισμικές καταγραφές. Θεωρώντας την περιοδικότητα αυτή σταθερή, χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος στο λογισμικό Matlab, για την εφαρμογή της μεθόδου αποσυνέλιξης πρόβλεψης στα θαλάσσια σεισμικά δεδομένα. Η μέθοδος της αποσυνέλιξης πρόβλεψης στοχεύει αρχικά στον εντοπισμό των πολλαπλών ανακλάσεων στις καταγραφές και μετέπειτα στην απόσβεση αυτών.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματοποιείται τόσο την δημιουργία δισδιάστατων συνθετικών δεδομένων με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών, όσο και την επεξεργασία αυτών. Καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της, ήταν αναγκαίο το λογισμικό Matlab, για την χρησιμοποίηση και ανάπτυξη ειδικών αλγορίθμων κατά τα στάδια δημιουργίας και επεξεργασίας των συνθετικών δεδομένων, αλλά και για την παρουσίαση ενδιάμεσων και τελικών σταδίων. Για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων ορισμένων σταδίων επεξεργασίας, χρησιμοποιήθηκε και το πρόγραμμα Transform. Συνοπτικά τα στάδια που ακολουθήθηκαν για την επίτευξη των στόχων της εργασίας είναι τα εξής:

Αρχικά πραγματοποιήθηκε δημιουργία συνθετικών σεισμικών δεδομένων, τα οποία βρίσκονται σε διάταξη κοινής πηγής, για ένα κομμάτι σεισμικής γραμμής μελέτης που βρίσκεται κοντά στην περιοχή του Πατραϊκού κόλπου και έχει μήκος 8 km. Στην συνέχεια ακολουθεί η επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων. Πρώτο στάδιο αυτής είναι η εισαγωγή τυχαίου θορύβου στα συνθετικά δεδομένα για την δημιουργία όσο το δυνατόν πιο αληθοφανών δεδομένων. Επόμενα στάδια είναι η απόσβεση των πολλαπλών ανακλάσεων από την επιφάνεια και τον πυθμένα της θάλασσας. Στην συνέχεια έγινε παρουσίαση των αποτελεσμάτων, προκειμένου να αξιολογηθεί ο βαθμός εξασθένησης των πολλαπλών ανακλάσεων. Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την αναδιάταξη των δεδομένων κοινής πηγής, σε διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου και κοινής απόστασης πηγής-δέκτη. Τα συνθετικά δεδομένα που βρίσκονται σε διατάξεις κοινού ενδιάμεσου σημείου χρησιμοποιήθηκαν για περαιτέρω επεξεργασία. Κατά σειρά πραγματοποιήθηκε εύρεση της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας των σχηματισμών, διόρθωση κανονικής χρονικής απόκλισης, σεισμική υπέρθεση και χωροθέτηση. Η περαιτέρω επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων που βρίσκονται

σε διατάξεις κοινού ενδιάμεσου σημείου, πραγματοποιήθηκε για να αυξηθεί η διακριτική ικανότητα των διαχωριστικών επιφανειών και για να γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων, μέσω της σεισμική τομής υπέρθεσης και χωροθέτησης.

Συμπερασματικά, μέσω της απεικόνισης των συνθετικών δεδομένων ορισμένων πηγών, και της παρουσίασης των σεισμικών τομών υπέρθεσης και χώροθετησης, μετά την εφαρμογή της αποσυνέλιξης πρόβλεψης, διαπιστώνεται ότι το φίλτρο αποσυνέλιξης έδρασε αποτελεσματικά στα συνθετικά δεδομένα αφού το μεγαλύτερο μέρος των πολλαπλών έχει εξαλειφθεί. Ωστόσο, αναμένεται βελτίωση των αποτελεσμάτων αν πραγματοποιηθεί εφαρμογή χρονικά μεταβαλλόμενης αποσυνέλιξης στα συνθετικά δεδομένα, όπου λαμβάνεται υπόψη η περίπτωση της μεταβολής της περιοδικότητας των πολλαπλών ανακλάσεων.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iv
1 <sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ.....	1
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΠΕΡΙΓΡΑΦΜΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ.....	1
1.2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	2
1.2.1 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΙΟΝ-7.....	4
1.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ.....	5
1.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.3.2 ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ ΚΑΙ Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΥΤΩΝ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ.....	7
1.3.3 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ, ΓΕΩΦΩΝΑ, ΥΔΡΟΦΩΝΑ, ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ.....	9
1.3.4 ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ.....	10
1.3.5 ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ.....	11
1.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ.....	14
1.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.4.2 ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΤΗΝ ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ (P-SV).....	16
2 <sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ:	
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	18
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	18
2.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	18
2.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	20
2.4 ΟΡΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ (ABSORBING BOUNDARIES).....	27
3 <sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ:	

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	29
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	29
3.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΥΧΑΙΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ.....	30
3.3 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ GHOST ΚΑΙ Η ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΤΟΥ.....	31
3.3.1 ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΚΑΛΩΔΙΑ ΔΙΠΛΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ.....	33
3.3.2 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ GHOST.....	34
3.3.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ GHOST.....	36
3.4 ΑΠΟΣΥΝΕΛΙΞΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ.....	39
3.4.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΠΟΣΥΝΕΛΙΞΗΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ.....	42
3.4.1.1 Αποτελέσματα Μεθόδου και Συγκρίσεις.....	43
3.5 ΑΝΑΔΙΑΤΑΞΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΟΙΝΗΣ ΠΗΓΗΣ.....	46
3.5.1 ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΠΗΓΗΣ-ΔΕΚΤΗ.....	47
3.5.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΟΙΝΟΥ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ.....	49
3.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ.....	51
3.7 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΥΠΕΡΘΕΣΗ.....	56
3.7.1 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ (NMO).....	56
3.7.2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΥΠΕΡΘΕΣΗ.....	58
3.7.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΥΠΕΡΘΕΣΗΣ.....	59
3.8 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ.....	61
4 <sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ:	
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ	
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	65
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	65
4.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	65
4.3 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	68

# 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

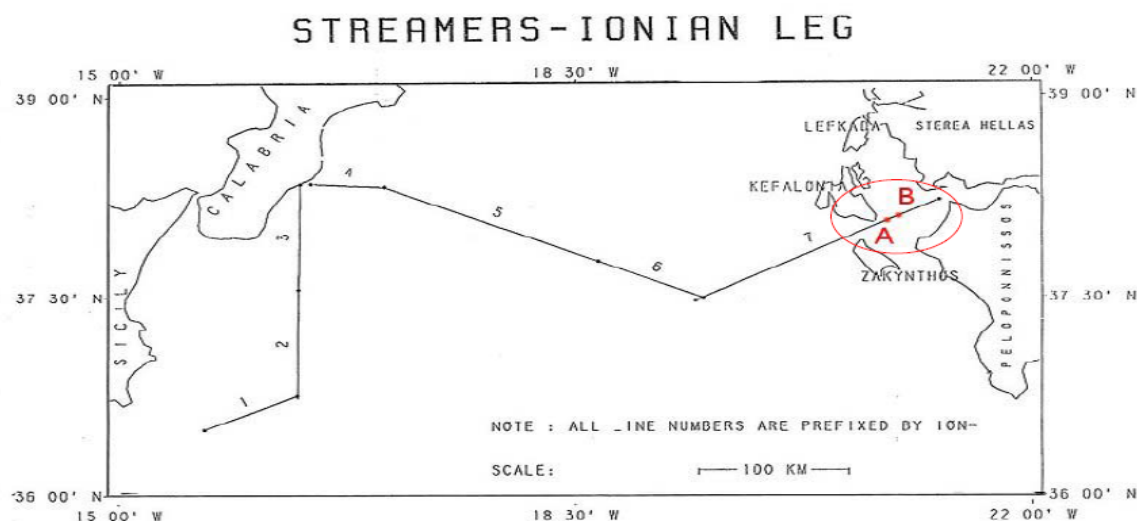
## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΠΕΡΙΓΡΑΦΜΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Σε αυτό το Κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά σε όλες τις ενότητες και τα κεφάλαια που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία. Αναλυτικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται σύντομη περιγραφή της περιοχής μελέτης. Αναλύεται συνοπτικά η γεωλογία, η στρωματογραφία και η τεκτονική της περιοχής μελέτης. Έπειτα ακολουθεί μία γενική αναφορά στη μέθοδο σεισμικής ανάκλασης, όπου περιγράφεται η συμπεριφορά των ελαστικών κυμάτων στο υπέδαφος, αναφέρονται τα όργανα που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο αυτή, καθώς και οι διατάξεις των οργάνων. Μέρος αυτής της ενότητας αποτελεί επίσης ο τρόπος διεξαγωγής μίας θαλάσσιας σεισμικής έρευνας. Ακολούθως, επεξηγείται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών, της οποίας η παρουσία θεωρείται κομβική για την λύση της διαφορικής εξίσωσης διάδοσης των σεισμικών κυμάτων αριθμητικά. Σε αυτή την ενότητα γίνεται κατανοητή η συμβολή της μεθόδου στους αλγόριθμους δημιουργίας συνθετικών δεδομένων. Το δεύτερο κεφάλαιο αφιερώνεται στον τρόπο δημιουργίας συνθετικών δεδομένων. Παρόλο που η περιγραφή αυτού του σταδίου δεν είναι βασικός στόχος αυτής της εργασίας, περιγράφεται πως από την λήψη δεδομένων από μια ερμηνευμένη τομή, δημιουργούνται τα συνθετικά δεδομένα. Σε αυτό το σημείο της εργασίας, εξηγείται και η έννοια των ορίων απορρόφησης, καθώς και ο λόγος που δημιουργήθηκαν δεδομένα και με όρια απορρόφησης στην επιφάνεια του μοντέλου. Επόμενο κεφάλαιο αποτελεί η επεξεργασία των Συνθετικών Δεδομένων. Αυτό το μέρος της εργασίας είναι πολύ σημαντικό, καθώς με την δημιουργία και χρησιμοποίηση αλγορίθμων μέσω του λογισμικού Matlab, επιδιώκεται η διαδοχική επεξεργασία των δεδομένων με σκοπό την αύξηση του λόγου σήματος/θορύβου, ώστε να διευκολυνθεί η διαδικασία ερμηνείας των σεισμικών αποτελεσμάτων. Το μεγαλύτερο βάρος της εργασίας δόθηκε στην μέθοδο της αποσυνέλιξης πρόβλεψης, που στόχο είχε την απομάκρυνση των πολλαπλών ανακλάσεων από τις καταγραφές. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές προτάσεις που απορρέουν από την παρούσα εργασία.



## 1.2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η σεισμική γραμμή μελέτης η οποία εξετάστηκε, βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ Ζακύνθου και Κεφαλονιάς και γύρω από τον κόλπο της Πάτρας (Σχήμα 1.1). Λόγω της πολυπλοκότητας της γεωλογικής δομής, παράλληλα με την έντονη τεκτονική που παρουσιάζει η συγκεκριμένη περιοχή, θεωρείται απαραίτητο να αναφερθούν μερικά στοιχεία για την στρωματογραφία και την τεκτονική της ευρύτερης περιοχής των Ιόνιων νήσων. Τα Ιόνια νησιά βρίσκονται πάνω στην εναλλαγή δύο εξωτερικών γεωτεκτονικών ζωνών του Ελλαδικού χώρου. Πρόκειται για την Ιόνιο ή Αδριατικοϊόνιο ζώνη και τη ζώνη των Παξών ή Προαπούλια ζώνη (Παγιαλάκης, 2014). Κύριο χαρακτηριστικό των ζωνών αυτών, είναι ότι έχουν υποστεί ένα μόνο ορογενετικό τεκτονισμό κατά το Τριτογενές. Η σεισμική γραμμή που μελετάμε (ION-7) διασχίζει αυτές τις δύο ζώνες.

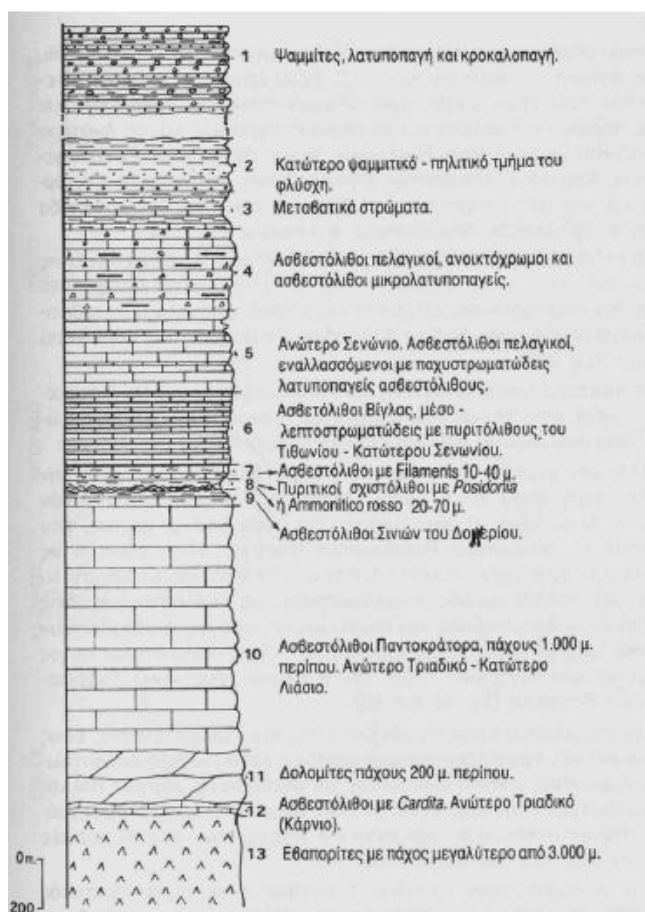


**Σχήμα 1.1:** Χάρτης των θαλάσσιων σεισμικών γραμμών του προγράμματος STREAMER (Κόκκινου, 2002). Τα δεδομένα της παρούσας εργασίας προέρχονται από τη γραμμή 7 και βρίσκονται μεταξύ των σημείων A και B.

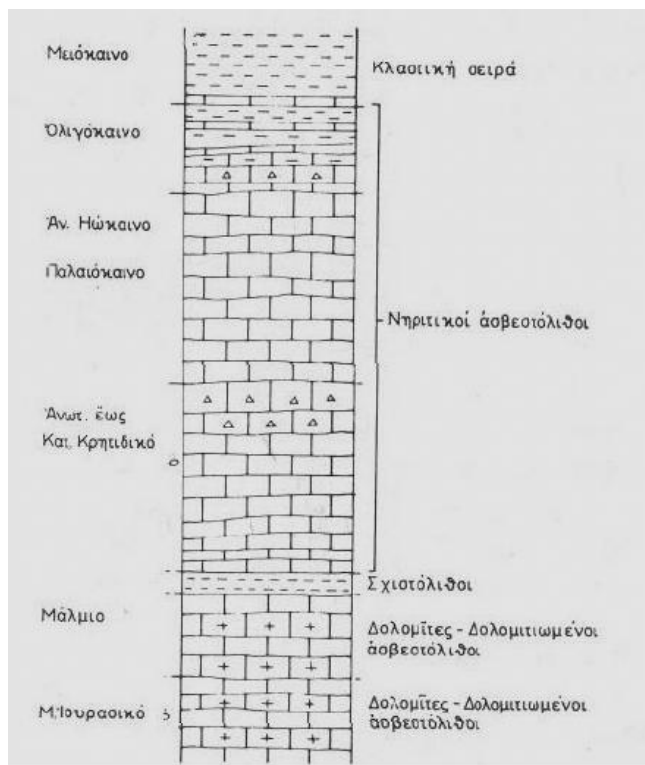
**Η Ιόνιος (ή Αδριατικοϊόνιος) ζώνη** εκτείνεται κατά μήκος της δυτικής παραλίας της Ηπειρωτικής Ελλάδας με διεύθυνση Β – Ν και περιλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της Ηπείρου, την Ακαρνανία, τμήματα από τα Ιόνια νησιά και την Βορειοδυτική Πελοπόννησο. Χαρακτηρίζεται από την παρουσία εβαποριτών (οι οποίοι παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον στην έρευνα πετρελαίων), κυρίως γύψου και ορυκτού άλατος, στη βάση της αλλά και σε ανώτερα στρώματα, όπου ανήλθαν λόγω διαφυρισμού. Ακολουθεί μια σχεδόν συνεχής ιζηματογένεση όπου επικρατούν οι ασβεστόλιθοι, πελαγικοί και νηριτικοί (ασβεστόλιθοι Νοτίου - Λιασίου που είναι γνωστοί στη βιβλιογραφία σαν «ασβεστόλιθοι του Παντοκράτορα» με πάχος γύρω στα 1000 m), δολομίτες, αργιλικόι σχιστόλιθοι και κερατόλιθοι. Με αυτή τη ζώνη σχετίζεται και μια σειρά πλακωδών μαρμάρων με διαστρώσεις

πυριτολίθων, γνωστή ως σειρά των Plattenkalk (Πλακώδεις ασβεστόλιθοι) που απαντούν σε μεγάλη έκταση στην Πελοπόννησο και Κρήτη. Η Ιόνιος ή Αδριατικοϊόνιος ζώνη είναι επωθημένη προς τα δυτικά πάνω στη ζώνη Παξών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα στρωματογραφικής στήλης της Ιόνιας ζώνης παρατίθεται στο Σχήμα 1.2.

Η ζώνη των Παξών ή Προαπούλια ζώνη εμφανίζεται στο δυτικότερο τμήμα της Ελλάδος και πιο συγκεκριμένα καταλαμβάνει το δυτικό μέρος σε ορισμένα από τα νησιά του Ιονίου πελάγους, όπως Ζάκυνθος, Κεφαλονιά, Λευκάδα, Ιθάκη, Παξοί, από όπου και πήρε το όνομά της. Χαρακτηρίζεται από μια συνεχή νηριτική ιζηματογένεση και την απουσία φλύσχη. Τα παλαιότερα πετρώματα είναι γύψοι και ακολουθούν δολομίτες, ασβεστόλιθοι, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, μάργες και κερατόλιθοι. Θεωρείται ως αυτόχθονη ζώνη, το μεγαλύτερο τμήμα της οποίας είναι βυθισμένο στη θάλασσα, μεταξύ των Ιόνιων νησιών και της Απουλίας (στην Νότιο Ιταλία). Μία απλοποιημένη στρωματογραφική στήλη της ζώνης αυτής φαίνεται στο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.2: Στρωματογραφική στήλη της Ιονίου ζώνης (Κατσικάτσος, 1992)



**Σχήμα 1.3:** Απλοποιημένη στρωματογραφική στήλη της ζώνης Παξών (Μανούτσογλου, 2008)

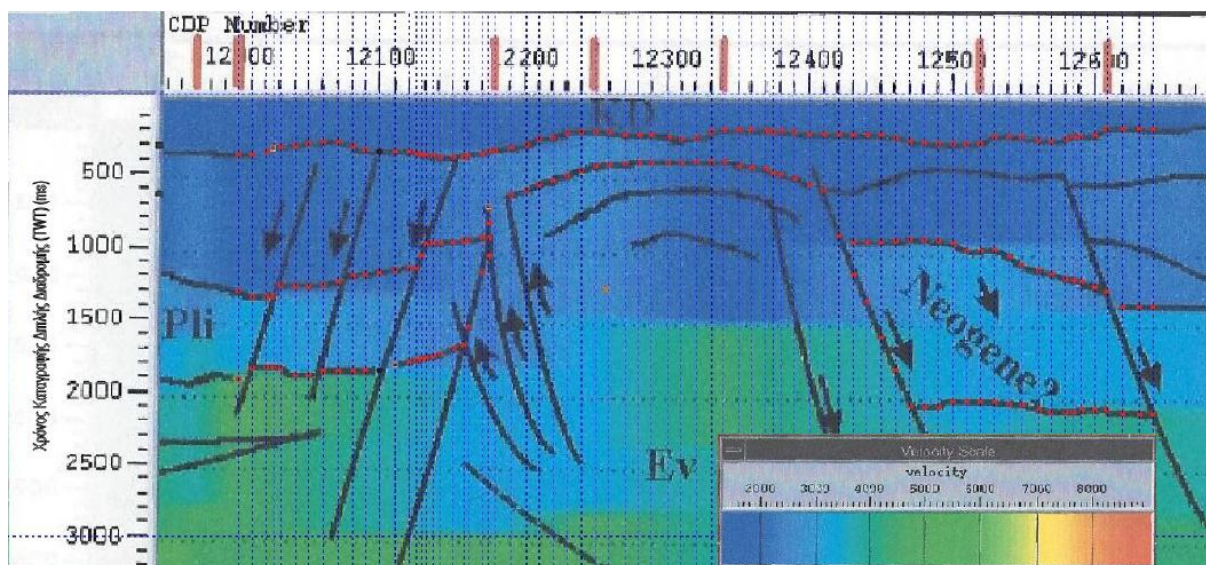
### 1.2.1 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΙΟΝ-7

Η σεισμική γραμμή ΙΟΝ – 7 (μήκος 180 Km) (Σχήμα 1.1) σύμφωνα με προηγούμενη ερμηνεία (Κόκκινου, 2002), συναντά από δυτικά προς ανατολικά τα παρακάτω τμήματα:

- Την Άβυσσο του Ιονίου (για CDPs 815 – 3815 και μήκος από 0 έως τα 35.172 Km της γραμμής) η οποία οριοθετείται στο ρήγμα της Κεφαλληνίας.
- Ένα μικρό τμήμα της Μεσογειακής ράχης (για CDPs 3815 – 4565 και μήκος από 35.172 έως 44.547 Km της γραμμής).
- Την Ελληνική τάφρο (για CDPs 4565 – 5465 και μήκος από 44.547 έως 55.797 Km της γραμμής)
- Το Ελληνικό τόξο (για CDPs 5465 - 15298 και μήκος από 55.797 έως 178.71 Km της γραμμής).

Τα δεδομένα της παρούσας εργασίας προέρχονται από το ανατολικό τμήμα του Ελληνικού τόξου και ειδικότερα βρίσκονται στην περιοχή από CDP 12000 – 12800 (μήκος 8 km). Η σεισμική γραμμή ΙΟΝ-7 καθώς και το τμήμα που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική (μεταξύ των σημείων Α και Β) απεικονίζονται στο Σχήμα 1.1. Η περιοχή από CDP 12000 – 12800 που μελετάται είναι εξαιρετικού ενδιαφέροντος, λόγω της εμφάνισης διαπυρισμού εβαπορίτων που μπορεί να αποτελέσει ένδειξη πιθανής παγίδας πετρελαίου. Η συγκεκριμένη περιοχή διακρίνεται από μία πολύπλοκη γεωλογική δομή, καθώς και από μια έντονη τεκτονική δράση. Χαρακτηριστικό της δομής είναι και η εμφάνιση κανονικών και επωθητικών ρηγμάτων (thrusts). Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται η ερμηνευμένη τομή σεισμικών ταχυτήτων σε ψηφιοποιημένη μορφή από την

Κόκκινου (2002) στην περιοχή ενδιαφέροντος, από την οποία είναι εμφανείς οι προσανατολισμοί των ρηγμάτων, των διαχωριστικών επιφανειών καθώς και η στρωματογραφία. Μεταβαίνοντας από την επιφάνεια της θάλασσας σε μεγαλύτερα βάθη, η πρώτη διαχωριστική επιφάνεια είναι ο πυθμένας της θάλασσας. Κάτω από τον πυθμένα βρίσκονται ιζήματα Αν. Πλειοκαίνου – Τεταρτογενούς (P - Q), και αμέσως μετά από αυτά εμφανίζονται ιζήματα Αν. Μειοκαίνου – Κ. Πλειοκαίνου (Mis-Pli). Δυτικότερα της περιοχής που περιγράφηκε έως τώρα, παρατηρείται μία αναθόλωση στο CDP 12350 η οποία αναφέρεται με το όνομα διαπυρισμός της Κεφαλληνίας (Kefallinia Diapir, KD, Κόκκινου, 2002). Η συνέχεια των ιζηματογενών ακολουθιών (P-Q) και (Mis-Pli) στην περιοχή του διαπυρισμού της Κεφαλληνίας διακόπτεται από κανονικά ρήγματα. Η εμφάνιση αυτή θεωρείται ως το αποτέλεσμα της εφελκυστικής τεκτονικής που ακολούθησε μετά την επώθηση των Εξωτερικών Ελληνίδων και η οποία πραγματοποιήθηκε σε τρεις τεκτονικές φάσεις: Κατ. - Μέσο Μειόκαινο, Μέσο Πλειόκαινο και Μέσο Πλειστόκαινο (Sorel et al., 1992). Συνέπεια των τεκτονικών αυτών φάσεων ήταν ο σχηματισμός τεσσάρων χρονοστρωματογραφικών ενοτήτων. Πρόκειται για το Πλειόκαινο – Τεταρτογενές, το Αν. Μειόκαινο – Κατ. Πλειόκαινο, το Κατ. Μειόκαινο (Kamberis et al., 2000) την ανθρακική σειρά Τριαδικού – Ηωκαίνου με τους Εβαπορίτες του Τριαδικού. Όσον αφορά το στρώμα των Νεογενών λόγω του διαπυρισμού και των ρηγμάτων που έχουν εμφανιστεί, από το CDP 12487 μέχρι και το τέλος της γραμμής μελέτης υπάρχει πτώση της ιζηματογενούς ακολουθίας του Νεογενούς. Ο διαπυρισμός της Κεφαλληνίας κατά τους Kamberis et al. (1996) και Hirn et al. (1996) οφείλεται σε διείδυση Τριαδικών εβαποριτών στην περιοχή. Η παρουσία διάπυρων σε αντίκλινα που σχηματίζονται από προϋπάρχοντα επωθητικά ρήγματα (thrusts) έχει αναφερθεί από διάφορους ερευνητές όπως είναι οι Monopolis και Bruneton (1982), Nicolaou (1986) και Underhill (1988). Στην τομή σεισμικής υπέρθεσης της παρούσας εργασίας, εμφανίζεται διαπυρισμός στο δυτικό τμήμα της τομής (CDPs 12180 -12445) και προέρχεται από Εβαπορίτες του Τριαδικού (Εν) (Σχήμα 1.4). Ο διαπυρισμός της Κεφαλληνίας (KD) παραμορφώνει και τα πρόσφατα ιζήματα του πυθμένα (μεταξύ CDP 12065 και 12560), ενισχύοντας την άποψη ότι και σήμερα είναι ενεργός.



**Σχήμα 1.4:** Ψηφιοποίηση της ερμηνευμένης τομής σεισμικής ταχύτητας των Ρ-κυμάτων από την γραμμή μελέτης ION-7 (Κόκκινου, 2002).

Κύριος στόχος αυτής της εργασίας δεν είναι αναλυτική παρουσίαση της γεωλογίας, της στρωματογραφίας και της τεκτονικής της ευρύτερης περιοχής του Ιονίου καθώς και της σεισμικής γραμμής ΙΟΝ-7. Περισσότερες πληροφορίες για την Ιόνιο ζώνη καθώς και αυτή των Παξών μπορούν να βρεθούν στο σύγγραμμα του κύριου Μανούτσογλου Εμμανουήλ ‘ Γεωλογία Ελλάδος’ (2008) καθώς και στην Διδακτορική διατριβή της κυρίας Κόκκινου Ελένης (2002). Όσον αφορά την σεισμική γραμμή ΙΟΝ-7, όλες οι χρήσιμες πληροφορίες βρίσκονται στο σύγγραμμα της κυρίας Κόκκινου (2002).

## 1.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ

### 1.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για να καθοριστεί η γεωλογική δομή μιας περιοχής μελέτης, χρησιμοποιείται η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης. Πρόκειται για μια μη καταστροφική γεωφυσική μέθοδο, που απεικονίζει τη δομή του υπεδάφους με την χρήση ανακλώμενων κυμάτων. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στους νόμους διάδοσης των ελαστικών κυμάτων. Τα ελαστικά κύματα παράγονται τεχνητά (με εκρήξεις, πτώση βαρών κ.λ.π.) στην επιφάνεια της γης ή σε μικρό βάθος, διαδίδονται μέσα στα στρώματα του φλοιού όπου υφίστανται συνεχείς ανακλάσεις και διαθλάσεις σε διαχωριστικές επιφάνειες και καταγράφονται από γεώφωνα που τοποθετούνται σε μικρές αποστάσεις από το σημείο παραγωγής των κυμάτων. Με την μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης καταγράφονται τα πλάτη των κυμάτων και ο χρόνος που απαιτείται για να διαδοθούν από την πηγή στα γεώφωνα.

Η μέθοδος αυτή είναι σήμερα η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη στην γεωφυσική διασκόπηση για την ανίχνευση δομών πετρελαίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι παρέχεται σχεδόν η ίδια ακρίβεια στη χαρτογράφηση των επιφανειών ασυνέχειας, με τον καθορισμό της δομής από δεδομένα γεωτρήσεων. Δυνατή είναι επίσης η χαρτογράφηση δομών που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη, χωρίς να απαιτείται μεγάλη απόσταση μεταξύ των γεωφώνων και χωρίς να επηρεάζονται οι μετρήσεις από τα στρώματα χαμηλής σεισμικής ταχύτητας. Σεισμική ανάκλαση πραγματοποιείται σε χερσαία αλλά και σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Γενικά, μια πλήρης μελέτη με σεισμικές μεθόδους, συνοδεύεται απαραίτητα με πληροφορίες από άλλες γεωφυσικές μεθόδους, γεωλογικά δεδομένα και αποτελέσματα γεωτρήσεων.

Λόγω της σημαντικότητας της μεθόδου αυτής, η χρήση της είναι ευρεία. Στο παρελθόν, χρησιμοποιήθηκε κυρίως στην έρευνα κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, για τον εντοπισμό δομών στις οποίες είναι πιθανή η παγίδευση αυτών. Σήμερα η εφαρμογή της έχει επεκταθεί στους τομείς ανίχνευσης υπογείων υδάτων και γεωθερμικών πεδίων, στη μελέτη του φλοιού της γης, σε χαρτογραφήσεις αρχαιολογικών χώρων καθώς και σε μελέτες θεμελίωσης (Βαφειδής, 2011).

### 1.3.2 ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ ΚΑΙ Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΥΤΩΝ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ

Τα ελαστικά κύματα χώρου διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Τα επιμήκη και τα εγκάρσια κύματα και μία μικρή αναφορά σ' αυτά γίνεται παρακάτω:

#### Επιμήκη κύματα

Έτσι ονομάζονται τα κύματα κατά την διάδοση των οποίων, τα υλικά σημεία του μέσου διάδοσης ταλαντώνονται κατά διεύθυνση παράλληλη στην διεύθυνση της πορείας του κύματος. Τα επιμήκη κύματα παριστάνονται με το σύμβολο P (Primus), λόγω του ότι καταγράφονται πρώτα από τον κατά περίπτωση σταθμό. Ακολουθεί η καταγραφή των εγκάρσιων και επιφανειακών κυμάτων, τα οποία παράγονται συγχρόνως με τα επιμήκη από τη σεισμική πηγή.

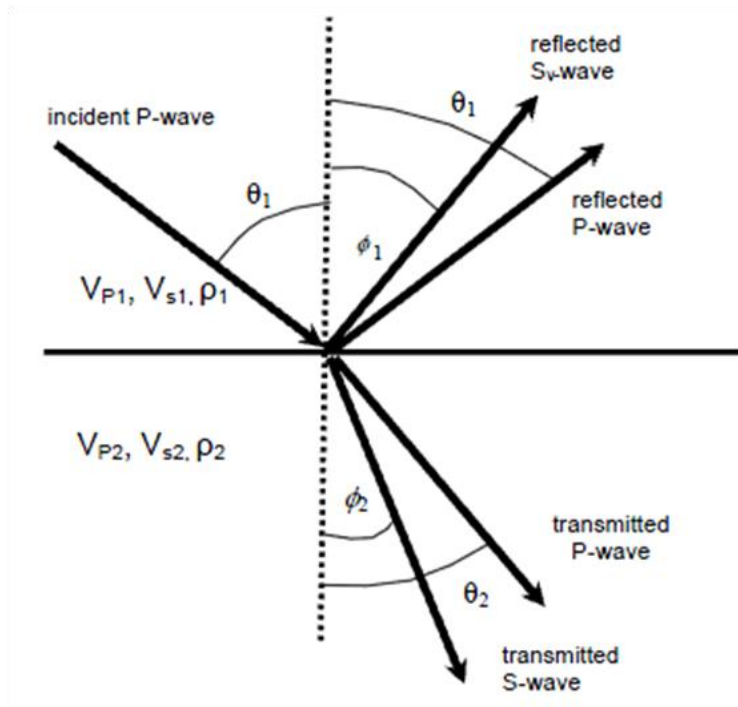
#### Εγκάρσια κύματα

Τα εγκάρσια κύματα συμβολίζονται με S (Secundus) και κατά τη διάδοση τους τα υλικά σημεία του μέσου διάδοσης ταλαντώνονται κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, με τρόπο τέτοιο ώστε το μέσο να υφίσταται διατμητική παραμόρφωση. Ως εκ τούτου, τα S-κύματα δεν διαδίδονται σε σώματα που έχουν μηδενική διατμητική αντοχή (π.χ. ρευστά, θάλασσα κ.λ.π.).

Κατά την διάδοση των ελαστικών κυμάτων η μορφολογία του ανάγλυφου (ξηρά ή θάλασσα) παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά του κυματιδίου. Η διάδοση των ελαστικών κυμάτων μέσα στα στερεά σώματα πραγματοποιείται με ταχύτητες οι οποίες εξαρτώνται από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Γενικά προκύπτει **εξασθένιση των ελαστικών κυμάτων με την απόσταση**. Τα πλάτη των ελαστικών κυμάτων μεταβάλλονται όταν συναντήσουν διαχωριστικές επιφάνειες και ελαττώνονται με την απόσταση από την πηγή. Κατά τη διάδοσή τους δηλαδή υφίστανται εξασθένιση. Εκτός της μεταβολής των πλατών, πραγματοποιείται και μετατροπή των ελαστικών κυμάτων. Όταν συναντώνται διαχωριστικές επιφάνειες από τα κύματα χώρου, γίνεται **μετατροπή P-κυμάτων σε S-κύματα** και αντίστροφα. Αναλυτικότερα μέσω των εξισώσεων του Zoeppritz [<sup>1</sup>] δείχθηκε ότι ένα P-κύμα καθώς προσπίπτει μέσω ενός υλικού πυκνότητας  $\rho_1$  σε μία διαχωριστική επιφάνεια, ανακλάται P-κύμα και S-κύμα σε διαφορετικές γωνίες  $\theta$ . Από το αρχικό P-κύμα ένα μέρος του θα ανακλαστεί και το υπόλοιπο θα διαθλασθεί σε υλικό με πυκνότητα  $\rho_2$  σε P-κύμα και S-κύμα αντίστοιχα, σε διαφορετικές γωνίες  $\theta$ . Η μετατροπή των κυμάτων συνεχίζεται και στις υπόλοιπες διαχωριστικές επιφάνειες. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται στο Σχήμα 1.5. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο πυθμένας της θάλασσας από όπου ανακλάται μόνο P-κύμα και το S-κύμα είναι σχεδόν μηδενικό ( $V_{\text{εγκαρσιων}}=0$ ). Από την διάθλαση προκύπτουν και P και S κύματα. Επιπλέον ένα φαινόμενο που απασχολεί τους ερευνητές εδώ και αρκετές δεκαετίες, είναι αυτό των **πολλαπλών ανακλάσεων**. Οι πολλαπλές ανακλάσεις είναι περιοδικές και αποτελούν ένα παράδειγμα συναφούς θορύβου. Εμφανίζονται όταν το κύμα αναγκαστεί να διαδίδεται μεταξύ δύο διαχωριστικών επιφανειών και για να συμβεί αυτό πρέπει ο συντελεστής ανάκλασης R (reflection coefficient) να παίρνει μεγάλες τιμές στις διαχωριστικές επιφάνειες (Sheriff and Geldart, 1995). Δύο είδη πολλαπλών ανακλάσεων που θα μελετηθούν εκτενέστερα σε αυτή την εργασία, είναι αυτές που δημιουργούνται από την επιφάνεια της θάλασσας και αυτές που δημιουργούνται από τον

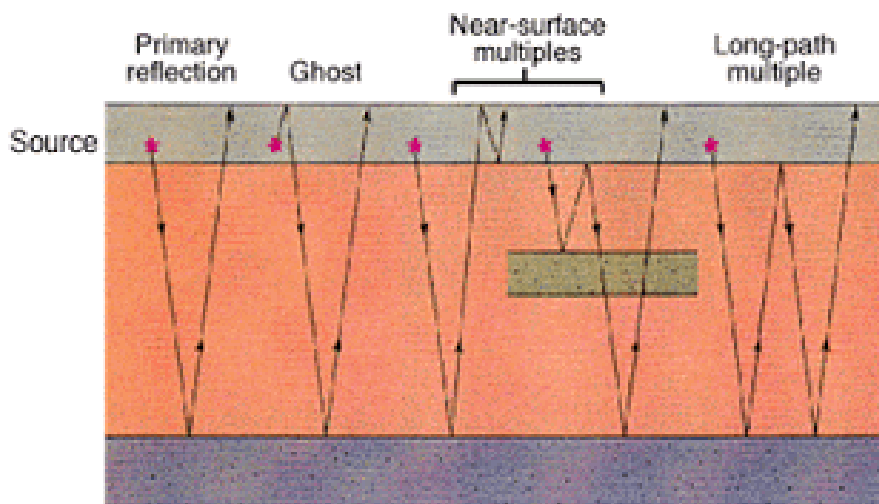
<sup>1</sup> πηγή από το διαδίκτυο [https://en.wikipedia.org/wiki/Zoeppritz\\_equations](https://en.wikipedia.org/wiki/Zoeppritz_equations)

πυθμένα της θάλασσας. Η επίδραση των πολλαπλών ανακλάσεων στα σεισμικά δεδομένα είναι καταστροφική, επομένως ο εντοπισμός και η απόσβεση αυτών είναι πολύ σημαντικές διεργασίες. Το αποτέλεσμα μιας ετεροχρονισμένης, μη επιθυμητής ανάκλασης στην επιφάνεια της θάλασσας, δημιουργεί ένα είδος μόλυνσης στα σεισμικά δεδομένα, γνωστό και ως 'ghost φαινόμενο'. Η αφαίρεση του 'ghost φαινομένου' από τα αποτελέσματα των καταγραφών, με διάφορες διεργασίες (deghosting) οδηγούν σε σεισμικά δεδομένα απαλλαγμένα από το θόρυβο του ghost (deghosted δεδομένα). Για λόγους συντομίας από εδώ και στο εξής, μέχρι και το τέλος της εργασίας, οι όροι ghost φαινόμενο, deghosting, deghosted δεδομένα θα χρησιμοποιούνται αυτούσιοι. Αντίστοιχα οι πολλαπλές ανακλάσεις που δημιουργούνται από ετεροχρονισμένη ανάκλαση του σεισμικού κύματος στον πυθμένα της θάλασσας δημιουργούν άλλα προβλήματα στις καταγραφές. Η αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων γίνεται με πολλές διαφορετικές διεργασίες. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της αποσυνέλιξης πρόβλεψης. Στο Σχήμα 1.6 φαίνονται ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα πολλαπλών ανακλάσεων.



**Σχήμα 1.5:** Διαδικασία μετατροπής P-κυμάτων σε S [1] .





Σχήμα 1.6: Χαρακτηριστικά παραδείγματα πολλαπλών ανακλάσεων [2].

### 1.3.3 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ, ΓΕΩΦΩΝΑ, ΥΔΡΟΦΩΝΑ, ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ

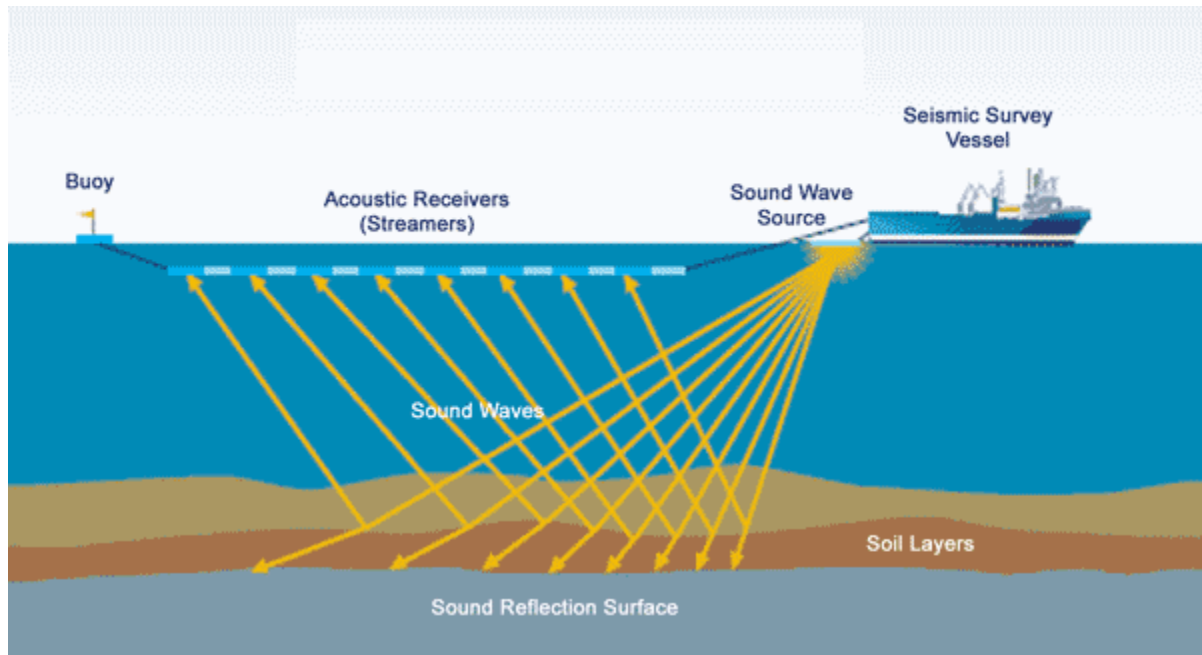
Η παραγωγή των ελαστικών κυμάτων στις σεισμικές διασκοπήσεις γίνεται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τη μορφολογία του αναγλύφου (ξηρά ή θάλασσα) και τον επιδιωκόμενο σκοπό (βαθιά ή επιφανειακή σεισμική διασκόπηση). Στην ξηρά, σεισμικά κύματα παράγονται με διαδοχικά περιοδικά κτυπήματα του εδάφους. Ο υδραυλικός ταλαντωτής (Vibroiseis) είναι η πιο διαδεδομένη σεισμική πηγή. Το κόστος της διασκόπησης είναι αυξημένο γιατί απαιτούνται τρεις ή τέσσερις ταλαντωτές. Οι δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενες σήμερα σεισμικές πηγές στις θαλάσσιες διασκοπήσεις είναι το Vibroseis και το Air-gun.

Στις χερσαίες διασκοπήσεις η εδαφική κίνηση γίνεται αισθητή από τα γεώφωνα, ενώ στη θάλασσα η μεταβολή της πίεσης του νερού που οφείλεται στα σεισμικά κύματα καταγράφεται από τα υδρόφωνα. Ένας νέος και αποτελεσματικός τρόπος αναγνώρισης εδαφικής κίνησης είναι η Πολυκάναλη καταγραφή. Πολυκάναλη ονομάζεται η καταγραφή κατά την οποία τα σεισμικά κύματα καταγράφονται από μεγάλο αριθμό δεκτών, τα οποία είναι ευαίσθητα στην ταχύτητα (γεώφωνα για την περίπτωση της ξηράς), ή ευαίσθητα στην πίεση (υδρόφωνα για τη θάλασσα) και κατανέμονται κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Η καταγραφή αυτή χρησιμοποιείται για να παρθούν πληροφορίες από τα σημεία της επιφάνειας ανάκλασης, καθώς διευκολύνει τη διάκριση των σημάτων από τον εδαφικό θόρυβο.

<sup>2</sup> πηγή από το διαδίκτυο [http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/m/multiple\\_reflection.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/m/multiple_reflection.aspx)



#### 1.3.4 ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ



Σχήμα 1.7: Θαλάσσια σεισμική διασκόπηση (Μούχου, 2014)

Για μια θαλάσσια σεισμική έρευνα (Σχήμα 1.7) απαραίτητο είναι ένα πλοίο που να μπορεί να ρυμουλκήσει καλώδιο μήκους μερικών km το οποίο περιέχει τους ανιχνευτές των σεισμικών κυμάτων (υδροφώννα). Η χρησιμοποιούμενη πηγή είναι το airgun (αεροβόλο) και η παραγόμενη κυματομορφή πρέπει να είναι μικρής χρονικής διάρκειας για να προκύψουν καλύτερα αποτελέσματα. Ο μεγαλύτερος χώρος του πλοίου καλύπτεται από αεροσυμπιεστές που παρέχουν αέρα υψηλής πίεσης. Το πλεονέκτημα της παραπάνω διάταξη, είναι ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων οι αποστάσεις πηγής-υδροφώννων παραμένουν σταθερές. Το πλοίο είναι εξοπλισμένο με όλα τα απαραίτητα όργανα εντοπισμού θέσης όπως η κεραία λήψης διαφόρων τύπων σημάτων και παρακολούθησης δορυφόρων, όργανα GPS, βυθομετρικά όργανα, γυροσκοπικές πυξίδες, ραντάρ και συσκευές ραδιοεπικοινωνίας. Η χρήση των παραπάνω οργάνων γίνεται κατά τη διάρκεια των θαλάσσιων διασκοπήσεων για τη συλλογή δεδομένων που έχουν να κάνουν κυρίως με τη θέση του σκάφους και της πηγής καθώς και τις καταγραφές προσανατολισμού του καλωδίου. Από τα δεδομένα που συλλέγονται υπολογίζονται οι συντεταγμένες του καλωδίου και καθορίζεται το σχήμα αυτού με βάση καμπύλη προσαρμογής. Η ίδια διαδικασία επιτρέπει ακόμα την απόρριψη οποιονδήποτε μη κανονικών μετρήσεων ενώ ακολουθεί έλεγχος ποιότητας, απ' όπου προκύπτουν οι τελικές θέσεις πηγών και υδροφώννων. (Παγιαλάκης, 2014)

### 1.3.5 ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Η καταγραφή των σεισμικών κυμάτων και η απόκτηση των δεδομένων ανάκλασης γίνεται από μεγάλο αριθμό δεκτών, οι οποίοι είναι ευαίσθητοι στην ταχύτητα (γεωφώνω για την περίπτωση της ξηράς), ή ευαίσθητοι στην πίεση (υδρόφωνα για θαλάσσιες καταγραφές) και κατανέμονται κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Η καταγραφή αυτή χρησιμοποιείται για να αποκτηθούν πληροφορίες από τα σημεία της επιφάνειας ανάκλασης, καθώς διευκολύνει τη διάκριση των σημάτων από τον εδαφικό θόρυβο.

Η διάταξη κοινής πηγής απαρτίζεται από σεισμικά ίχνη που προέρχονται από την εκτόνωση μιας πηγής και την καταγραφή των δονήσεων από πολλούς δέκτες. Τόσο η πηγή όσο και οι δέκτες συνήθως τοποθετούνται κατά μήκος ευθείας (Σχήμα 1.8).

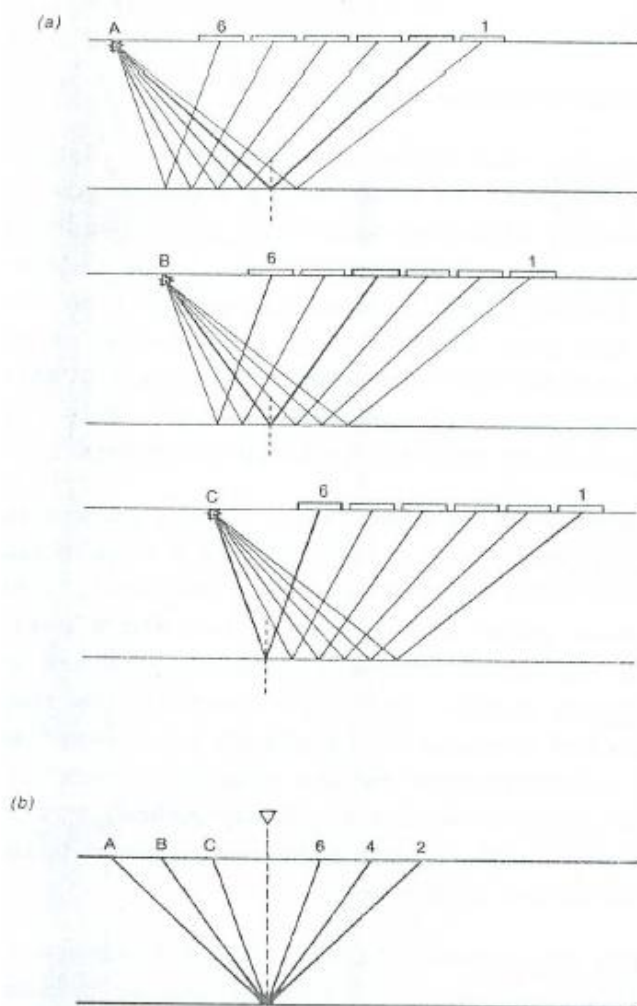


Σχήμα 1.8: Σχηματική παράσταση διαφόρων διατάξεων πηγής – δέκτη [<sup>3</sup>].

Μετά την ολοκλήρωση της αρχικής καταγραφής, η διάταξη του αναπτύγματος πηγής και γεωφώνων μετατοπίζεται κατά μήκος της γραμμής μελέτης και το επόμενο σήμα της πηγής καταγράφεται στις καινούριες θέσεις των γεωφώνων.

<sup>3</sup> πηγή από το διαδίκτυο, από τις διαλέξεις του μαθήματος Σεισμικές Μέθοδοι -[https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/MHXOP102/02\\_Diata3eis\\_NMO2012](https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/MHXOP102/02_Diata3eis_NMO2012).

Ο τρόπος συλλογής των δεδομένων φαίνεται στο Σχήμα 1.9(a). Η ακτίνα 2 από την πηγή A, η ακτίνα 4 από την πηγή B και η ακτίνα 6 από την πηγή C δειγματίζουν το ίδιο σημείο του υπεδάφους. Όταν ο ανακλαστήρας είναι παράλληλος στην επιφάνεια, το σημείο αυτό του υπεδάφους βρίσκεται ακριβώς κάτω από ένα σημείο της επιφάνειας αντιδιαμετρικά από το οποίο τα τρία ζευγάρια πηγής-γεωφώνων είναι συμμετρικά κατανομημένα (Σχήμα 1.9(b)). Το σημείο αυτό στην επιφάνεια ονομάζεται “κοινό ενδιάμεσο σημείο” και η αντίστοιχη προβολή του στην επιφάνεια ανάκλασης ονομάζεται “κοινό σημείο βάθους” γνωστό και ως CDP (Common Depth Point).



**Σχήμα 1.9:** Διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου (CMP). (a) Σχηματική αναπαράσταση της απόκτησης των σεισμικών δεδομένων ανάκλασης με την διάταξη κοινής πηγής (b) Ζεύγη πηγών - γεωφώνων στα οποία καταγράφεται ανάκλαση από το ίδιο κοινό σημείο βάθους (CDP) (Sodbinow, 1989).

Στη διάταξη “κοινού σημείου βάθους” παρέχεται για κάθε ανακλώμενο σημείο ένα σημαντικός αριθμός καταγραφών. Αποτέλεσμα αυτού είναι να εξασφαλίζεται πολλαπλή κάλυψη της επιφάνειας ανάκλασης και να διευκολύνεται η διάκριση των ανακλώμενων κυμάτων στα σειсмоγράμματα. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται και μια λεπτομερής εικόνα για τη δομή του υπεδάφους. Συχνά αναφέρεται ο όρος υπεδαφική κάλυψη (fold) και είναι ο αριθμός των σεισμικών

ιχνών που ανήκουν στην ίδια διάταξη “κοινού ενδιαμέσου σημείου”. Η συγκεκριμένη παράμετρος είναι από τις σημαντικότερες στην σεισμική ανάκλαση και δίνεται από την σχέση:

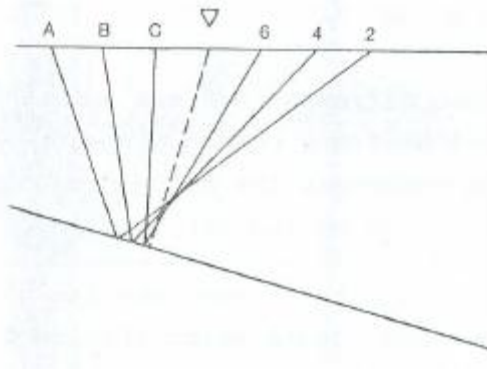
$$\text{Fold} = \min\{\text{Αριθμός Πηγών}, (NC/2) \times (\Delta x / \Delta s)\} \quad (1.1)$$

Όπου : -NC: ο αριθμός των καναλιών του καταγραφικού (σειсмоγράφος)

-Δx: η ισαπόσταση των γεωφώνων

-Δs: η ισαπόσταση των πηγών (Δs)

Η διάταξη “κοινού ενδιαμέσου σημείου” και η αντίστοιχη διαδικασία επεξεργασίας των καταγραφών, είναι περισσότερο αποτελεσματική όταν η επιφάνεια ανάκλασης είναι οριζόντια και πολύ λιγότερο όταν η ίδια επιφάνεια είναι κεκλιμένη. Στη δεύτερη περίπτωση, οι διάφορες αφίξεις δεν αντιστοιχούν σε ανακλάσεις από ένα σημείο αλλά από μια περιοχή και τα ίχνη μοιράζονται ένα κοινό ενδιαμέσο σημείο αλλά όχι ένα κοινό σημείο βάθους (Σχήμα 1.10).



**Σχήμα 1.10:** Στην περίπτωση κεκλιμένου οριζοντα ανάκλασης το κοινό ενδιαμέσο σημείο δεν συμπίπτει με το κοινό σημείο βάθους (Sodbinow, 1989).

## 1.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

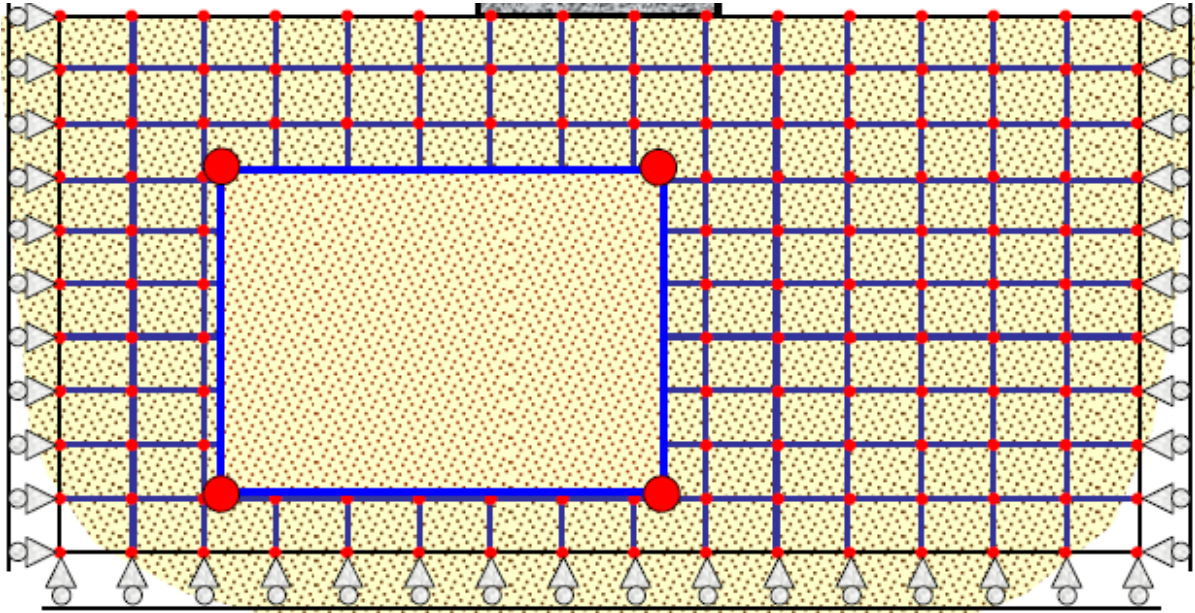
### 1.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μέσω τις επιστήμης της Γεωφυσικής αναπτύσσονται απλοποιημένα προσομοιώματα για το εσωτερικό της γης. Λόγω των ασυνεχειών που λαμβάνουν χώρα στο υπέδαφος, της πολύπλοκης γεωμετρίας τους και της ανομοιογένειας τους, ακόμα και μέσα στους ίδιους τους γεωλογικούς σχηματισμούς οι γεωφυσικές ιδιότητες διαφέρουν. Το γεγονός αυτό δημιουργεί προβλήματα στις γεωφυσικές μελέτες, αφού είναι συνήθως δύσκολο να βρεθούν αναλυτικές λύσεις για τα τρισδιάστατα ή ακόμα και τα δισδιάστατα προσομοιώματα της Γης.

Ένα από τα αντικείμενα της Γεωφυσικής αποτελεί το πρόβλημα της επίλυσης της σεισμικής κίνησης. Η επίλυσή της με αναλυτικές μεθόδους είναι δυνατή μόνο για σχετικά απλά προσομοιώματα της δομής του εσωτερικού της Γης στη μία και στις δύο διαστάσεις. Το πρόβλημα αυτό ήρθαν να λύσουν οι αριθμητικές μέθοδοι. Οι αριθμητικές μέθοδοι μετασχηματίζουν μια κλασική διαφορική ή ολοκληρωτική εξίσωση σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων. Στις αριθμητικές μεθόδους μια συνεχής συνάρτηση σε μία τέτοια εξίσωση πρέπει να εκφραστεί από ένα πεπερασμένο σύνολο αριθμών. Κάθε αριθμητική μέθοδος είναι μοναδική κατά μια έννοια, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο εκφράζει τη λύση της διαφορικής εξίσωσης από ένα πεπερασμένο σύνολο αριθμών και με τον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζει τις (μερικές) παραγώγους και τα ολοκληρώματα. Στην προσομοίωση των σεισμικών κυμάτων και της σεισμικής κίνησης γενικότερα, μία αριθμητική μέθοδος πρέπει να μπορεί να περιγράψει την ανισοτροπία του μέσου, να ενσωματώνει με ρεαλιστικό τρόπο την ανελαστική απόσβεση και τη γεωμετρική διασπορά των σεισμικών κυμάτων, να μπορεί να περιγράψει την επίδραση της τοπογραφίας της ελεύθερης επιφάνειας στη σεισμική κίνηση και να δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα για ένα ικανοποιητικό φάσμα συχνοτήτων (Σκαρλατούδης, 2009). Συγχρόνως, η μέθοδος θα πρέπει να είναι υπολογιστικά αποδοτική (οικονομική στη χρήση υπολογιστικής μνήμης και χρόνου). Προς το παρόν αριθμητική μέθοδος που να ενσωματώνει όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά δεν υπάρχει και για το λόγο αυτό, η απάντηση στην ερώτηση για το ποια μέθοδος είναι η καλύτερη, είναι γενικά εξαρτώμενη από το πρόβλημα προς επίλυση. Στο πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία η αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών, για να λύσει την διαφορική εξίσωση διάδοσης των σεισμικών κυμάτων αριθμητικά.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (Π.Δ.) ανήκει στις μεθόδους πλέγματος, άρα για την εφαρμογή της θα πρέπει ο χώρος που θα γίνουν οι υπολογισμοί να καλυφθεί από έναν κανάβο (grid) στο χώρο και στο χρόνο, και κάθε συνεχής συνάρτηση να αναπαριστάται από τις τιμές της στα διάφορα σημεία του κανάβου. Η κανονικότητα του κανάβου στο χώρο και στο χρόνο είναι γενικά αυθαίρετη, αλλά επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια της προσέγγισης. Συνήθως δεν γίνεται καμία υπόθεση για τις τιμές της συνάρτησης μεταξύ των σημείων του κανάβου. Η παράγωγος μιας συνάρτησης προσεγγίζεται από τον τύπο των Π.Δ. που χρησιμοποιεί τιμές της συνάρτησης σε

συγκεκριμένα σημεία του κανάβου. Στο Σχήμα 1.11 απεικονίζεται ένας κανάβος ο οποίος δημιουργήθηκε για την επίλυση κάποιου προβλήματος.



**Σχήμα 1.11:** Κανάβος της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών (μέθοδος πλέγματος) [4].

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι εύκολα εφαρμόσιμη σε πολύπλοκα προβλήματα με σχετικά μεγάλη ακρίβεια και είναι αρκετά αποδοτική υπολογιστικά. Επίσης είναι εύκολο να μετατραπεί σε υπολογιστικό κώδικα ενώ λόγω του ότι οι τελεστές της μεθόδου είναι τοπικοί μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε υπολογιστικό κώδικα για πολυεπεξεργαστικά συστήματα (Σκαρλατούδης, 2009). Για αυτούς τους λόγους, η μέθοδος αυτή αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές αριθμητικές μεθόδους στην προσομοίωση της σεισμικής κίνησης. Παρόλα αυτά η απλότητα της μεθόδου κρύβει ορισμένες παγίδες, λόγω της μη σωστής εφαρμογής, από χρήστες που δεν γνωρίζουν τα μειονεκτήματά της. Για παράδειγμα ο χρήστης πρέπει να λαμβάνει υπόψη του το κριτήριο ευστάθειας για να αποφύγει τυχόν αστάθειες στη λύση, όπως και το ελάχιστο βήμα χωρικής διακριτοποίησης που πρέπει να χρησιμοποιήσει σε συνάρτηση με το ελάχιστο μήκος κύματος που θα διαδοθεί στο υπολογιστικό προσομοίωμα για την αποφυγή του φαινομένου της αριθμητικής διασποράς.

<sup>4</sup> πηγή από το διαδίκτυο -<http://users.ntua.gr/gerolymo/COMPUTATIONAL-GEOTECHNICS-BOOK.pdf>



#### 1.4.2 ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΤΗΝ ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ (P-SV)

Μια ρεαλιστική προσομοίωση της διάδοσης κυμάτων σε δύο διαστάσεις μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της ελαστικής κυματικής εξίσωσης.

Σε αυτή την ενότητα, δεύτερης και τέταρτης τάξης πεπερασμένες διαφορές εφαρμόζονται σε σύστημα διαφορικών εξισώσεων (Virieux, 1986, Bayliss et al, 1986). Η λύση της δισδιάστατης ελαστικής εξίσωσης κύματος σε ομογενές μέσο με μια σεισμική πηγή παραγωγής κυλινδρικών κυμάτων (line source) διαμορφώνεται και εφαρμόζεται σε σχέση με τις ταχύτητες των σωματιδίων (Βαφείδης, 1988).

Έστω ότι η διάδοση των κυμάτων γίνεται σε δυο διαστάσεις (x και z), όπου x η οριζόντια συνιστώσα ταλάντωσης των σωματιδίων και z η κατακόρυφη. Η τρίτη συνιστώσα θεωρείται μηδέν (κυλινδρικά κύματα). Οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν το δισδιάστατο P –SV πρόβλημα σε ανομοιογενή μέσα είναι (Παγιαλάκης, 2014):

$$\rho(x, z) \frac{\partial^2 u(x, z, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} ((\lambda(x, z) + 2\mu(x, z)) \frac{\partial u(x, z, t)}{\partial x} + \lambda(x, z) \frac{\partial w(x, z, t)}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu(x, z) \frac{\partial w(x, z, t)}{\partial x} + \mu(x, z) \frac{\partial u(x, z, t)}{\partial z}) \quad (1.2)$$

$$\rho(x, z) \frac{\partial^2 w(x, z, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial z} ((\lambda(x, z) + 2\mu(x, z)) \frac{\partial w(x, z, t)}{\partial z} + \lambda(x, z) \frac{\partial u(x, z, t)}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (\mu(x, z) \frac{\partial u(x, z, t)}{\partial z} + \mu(x, z) \frac{\partial w(x, z, t)}{\partial x}) \quad (1.3)$$

Όπου:

- u (x,z,t), w (x,z,t) είναι οι μετατοπίσεις στις x και z διευθύνσεις αντίστοιχα
- μ (x,z) και λ (x,z) είναι οι παράμετροι Lamé (Sheriff and Geldart, 1995)
- ρ (x,z) είναι η πυκνότητα
- $\frac{\partial}{\partial}$  υποδηλώνει μερική παράγωγο ως προς μία διεύθυνση ή τον χρόνο

Αντί να λυθεί το παραπάνω σύστημα δεύτερης τάξης, μπορεί να επιλυθεί αριθμητικά το ισοδύναμο πρώτης τάξης. Το σύστημα αυτό αποτελείται από:

- τις βασικές εξισώσεις κίνησης στις κατευθύνσεις x και z

$$\begin{aligned}
\rho(x, z) \partial_t \dot{u}(x, z, t) &= \partial_x \sigma_{xx}(x, z, t) + \partial_z \sigma_{xz}(x, z, t) \\
\rho(x, z) \partial_t \dot{w}(x, z, t) &= \partial_x \sigma_{xz}(x, z, t) + \partial_z \sigma_{zz}(x, z, t)
\end{aligned}
\tag{1.4}$$

-και τις εξισώσεις τάσεων-παραμορφώσεων, που περιγράφουν τον Νόμο του Hooke

$$\begin{aligned}
\partial_t \sigma_{xx}(x, z, t) &= (\lambda(x, z) + 2\mu(x, z)) \partial_x \dot{u}(x, z, t) + \lambda(x, z) \partial_z \dot{w}(x, z, t) \\
\partial_t \sigma_{xz}(x, z, t) &= \mu(x, z) \partial_x \dot{w}(x, z, t) + \mu(x, z) \partial_z \dot{u}(x, z, t) \\
\partial_t \sigma_{zz}(x, z, t) &= \lambda(x, z) \partial_x \dot{u}(x, z, t) + (\lambda(x, z) + 2\mu(x, z)) \partial_z \dot{w}(x, z, t)
\end{aligned}
\tag{1.5}$$

όπου  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{xz}$ ,  $\sigma_{zz}$ , είναι τα στοιχεία του τανυστή της τάσης και οι τελείες σημαίνουν παράγωγο ως προς το χρόνο. Σε αυτή την τυποποίηση δεν υπάρχουν παράγωγα χώρου των σταθερών του Lamé.

Οι εξισώσεις (1.4) και (1.5) μπορούν να γραφούν με τη μορφή πίνακα ως εξής:

$$\partial_t \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \rho^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \rho^{-1} \\ \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \partial_x \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \rho^{-1} \\ 0 & 0 & 0 & \rho^{-1} & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \partial_z \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix}
\tag{1.6}$$

Αλλιώς

$$\partial U = A \partial_x U + B \partial_z U
\tag{1.7}$$

ή

$$E_0 \partial_t U = A_0 \partial_x U + B_0 \partial_z U
\tag{1.8}$$



## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

# ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

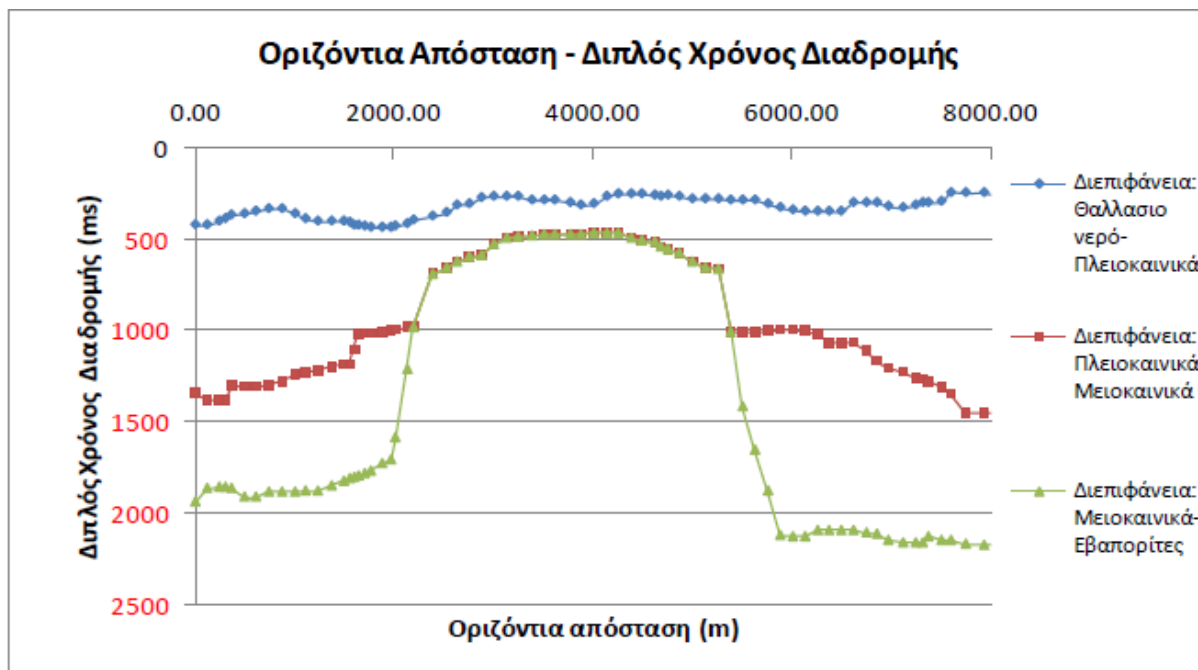
## 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία δημιουργίας του σεισμικού μοντέλου, καθώς και αυτή των συνθετικών δεδομένων. Αρχικά αναφέρονται οι απαραίτητες πληροφορίες που λήφθηκαν από μια ήδη ερμηνευμένη σεισμική τομή. Στην συνέχεια παρατίθενται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το στάδιο της εργασίας, καθώς και όλα τα βήματα αναλυτικά μέχρι και την δημιουργία των συνθετικών δεδομένων. Τέλος, γίνεται επεξήγηση της έννοιας των ορίων απορρόφησης (Absorbing boundaries), με σκοπό να γίνει κατανοητή η σημασία αυτών, στην αξιολόγηση της μεθοδολογίας απομάκρυνσης των πολλαπλών ανακλάσεων

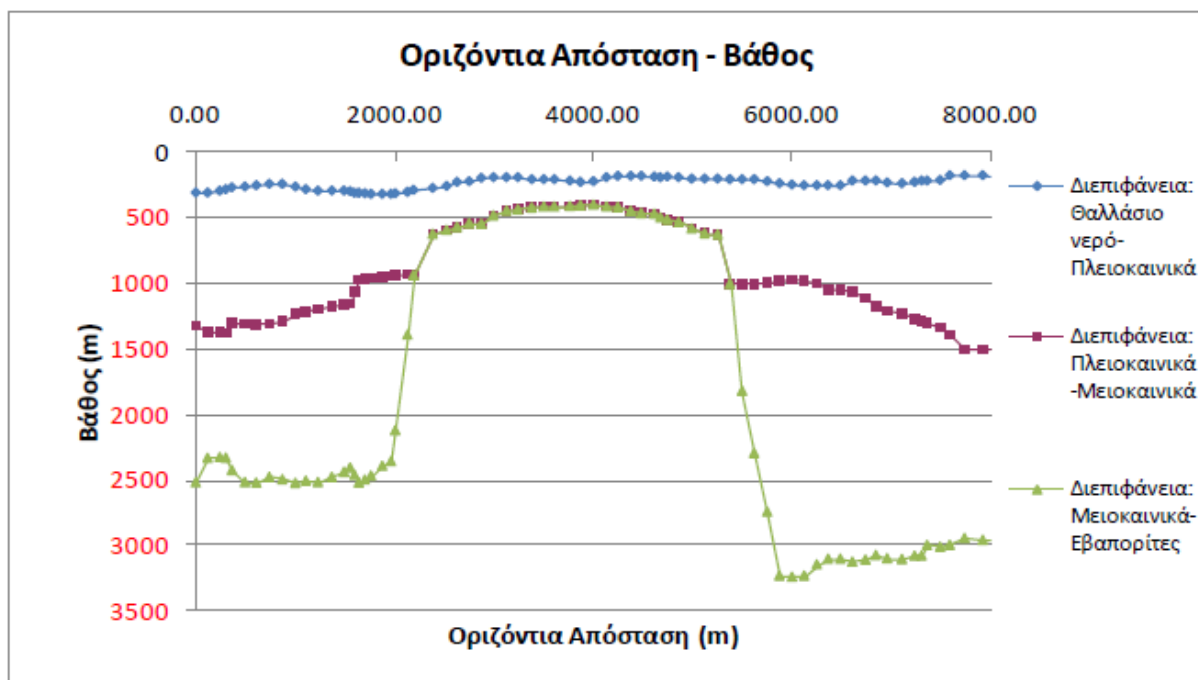
## 2.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 1.2, η γραμμή μελέτης βρίσκεται μεταξύ Ζακύνθου και Κεφαλονιάς και γύρω από την περιοχή του Πατραϊκού κόλπου. Ειδικότερα, η σεισμική γραμμή μελέτης είναι μέρος της ION-7 (Σχήμα 1.1) με μήκος 8 km. Με το συγκεκριμένο τμήμα της γραμμής μελέτης έχει ασχοληθεί και ο συμφοιτητής μου Παγιαλάκης Μιχαήλ (2014) στην διπλωματική εργασία με τίτλο "Προσομοίωση δεδομένων σεισμικής ανάκλασης για το σχεδιασμό διασκόπησης στο θαλάσσιο χώρο του Πατραϊκού κόλπου", ο οποίος και δημιούργησε το σεισμικό μοντέλο της περιοχής. Το ίδιο σεισμικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε, κατόπιν συνεννόησης, για να εκπληρωθούν οι στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Για να γίνει κατανοητή η διαδικασία δημιουργίας του σεισμικού μοντέλου, παρακάτω παρατίθενται συνοπτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν. Το σεισμικό μοντέλο προήλθε από υπάρχουσα τομή σεισμικών ταχυτήτων, που προέκυψε από την επεξεργασία των πραγματικών σεισμικών δεδομένων της ION-7 (Κόκκινου, 2002)(Σχήμα 1.4, βλ§1.2.1). Από την ερμηνεία της σεισμικής τομής (Κόκκινου, 2002), αποδείχθηκε πως η δομή μελέτης αποτελείται από 4 στρώματα (3 διεπιφάνειες). Το πρώτο στρώμα αντιστοιχεί σε θαλάσσιο νερό, το δεύτερο σε Πλειοκαινικά ιζήματα, το τρίτο στα Μειοκαινικά-Νεογενή ιζήματα και το τέταρτο αποτελείται από Εβαπορίτες. Στην ερμηνευμένη αυτή τομή πραγματοποιήθηκε ψηφιοποίηση του μοντέλου για τον καθορισμό των ακριβών συντεταγμένων των σεισμικών στρωμάτων σε οριζόντια έκταση (σε m) και σε διπλό κατακόρυφο χρόνο (σε ms)(Σχήμα 2.1). Ακολουθώντας, γνωρίζοντας τους διπλούς κατακόρυφους χρόνους αλλά και τις ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων σε κάθε στρώμα, ο διπλός κατακόρυφος χρόνος μετατράπηκε σε βάθος (Σχήμα 2.2). Οι τμηματικές ταχύτητες κάθε στρώματος, αλλά και η πυκνότητά τους παρατίθενται στον Πίνακα 2.1.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα Οριζόντιας απόστασης - Διπλού Χρόνου διαδρομής των τριών διεπιφανειών (Παγιαλάκης, 2014).



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα Οριζόντιας απόστασης -Βάθους των τριών διεπιφανειών (Παγιαλάκης, 2014).

ΣΤΡΩΜΑ	Vp(m/s)	Vs(m/s)	ρ(g/cm <sup>3</sup> )
Θαλασσινό νερό	1500	0.1	1
Πλειοκαινικά	2200	1060	2.6
Μειοκαινικά-Νεογενή	4000	1920	2.7
Εβαπορίτες	4750	2280	2.55

**Πίνακας 2.1:** Διαμήκης (Vp) και εγκάρσια (Vs) ταχύτητα και πυκνότητα (ρ) κάθε στρώματος (Παγιαλάκης, 2014).

## 2.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για την δημιουργία και την επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Matlab, καθώς και αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης για την προσομοίωση διάδοσης σεισμικών κυμάτων (P-SV) σε δύο διαστάσεις, με την χρήση των πεπερασμένων διαφορών.

Πριν ξεκινήσει η δημιουργία του μοντέλου (Παγιαλάκης, 2014) λήφθηκαν υπόψη οι παρακάτω περιορισμοί, για την αποφυγή προβλημάτων ευστάθειας και αριθμητικής διασποράς κατά την επίλυση της διαφορικής κυματικής εξίσωσης με την χρήση των πεπερασμένων διαφορών.

-Για την αριθμητική διασπορά (μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης με την συχνότητα) θα πρέπει να επαληθευτεί το εξής κριτήριο:

$$Grid \leq \frac{\lambda_{min}}{6} = \frac{V_{smin}}{6 \times f_{max}} \cong \frac{V_{smin}}{15 \times f_{central}} \quad (2.1)$$

Όπου :

Grid: ελάχιστο βήμα χωρικής διακριτοποίησης

V<sub>smin</sub>: η ελάχιστη ταχύτητα των S - κυμάτων

λ<sub>min</sub>: το ελάχιστο μήκος κύματος

f<sub>max</sub>: η μέγιστη συχνότητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων

$f_{\text{central}}$ : η κεντρική συχνότητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων

Στο συγκεκριμένο σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι το υπολογιζόμενο Grid βάση των παραμέτρων του μοντέλου και της σχέσης (2.1) είναι  $Grid \leq 3.5333m$ . Ο αλγόριθμος δημιουργίας των συνθετικών δεδομένων ορίζει αυτόματα την τιμή  $Grid=3.3333 m$ . Αυτό διότι η τιμή αρχικά βάση της σχέσης (2.1) θα πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση του υπολογιζόμενου κλάσματος και επίσης θα πρέπει η τιμή της ισαπόστασης των υδροφώνων να διαιρείται ακέραια από την τιμή του ελάχιστου βήματος χωρικής διακριτοποίησης (Grid).

-Για την ευστάθεια θα πρέπει να επαληθευτεί το εξής κριτήριο:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \times V_{pmax} \leq \frac{2}{3} \quad (2.2)$$

Όπου:

$V_{pmax}$ : η μέγιστη ταχύτητα των P - κυμάτων

$\Delta t$ : ελάχιστο βήμα χρονικής διακριτοποίησης

$\Delta x$ : ελάχιστο βήμα χωρικής διακριτοποίησης (Grid)

Θεωρώντας την τιμή του  $Grid=3.3333 m$ , και βάση της σχέσης (2.2) η υπολογιζόμενη τιμή  $\Delta t$  είναι  $\Delta t \leq 0.4678 ms$ . Έτσι ο Αλγόριθμος θα επιλέξει αυτόματα την ακέραια τιμή  $\Delta t=0.4 ms$ .

Αφού λοιπόν έγιναν οι κατάλληλοι περιορισμοί βάση των παραπάνω κριτηρίων, ξεκίνησε να δημιουργείται το μοντέλο με την εντολή:

`[Vx,Vz,SnS,Model_Parameters,Receivers,Source]=PSV_SYNTHETICS_NEW9;`

Αρχικά ορίστηκαν η οριζόντια και κατακόρυφη έκταση του μοντέλου, η ελάχιστη εγκάρσια ταχύτητα, η συχνότητα της πηγής και η ισαπόσταση των υδροφώνων. Σε αυτό το βήμα ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει την εφαρμογή ή μη των Ορίων απορρόφησης στην επιφάνεια του σεισμικού μοντέλου (επιλέχθηκε η μη εφαρμογή). Οι τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.3.

Επόμενο βήμα ήταν η οριοθέτηση των στρωμάτων (με σχεδίαση ή εισαγωγή πινάκων Matlab). Σε αυτό το στάδιο, ορίστηκε σε κάθε στρώμα που έχει σχεδιαστεί, η πυκνότητα του, καθώς και οι ταχύτητες των διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων. Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζονται οι παράμετροι που ορίστηκαν για το στρώμα των Μειοκαινικών-Νεογενών.

**INITIAL MODEL PARAMETERS**

Enter the HORIZONTAL extend of model in meters  
8000

Enter the VERTICAL extend of model in meters  
3500

Enter the minimum S-wave velocity ( $V_s$ ) of model in m/s  
0.01

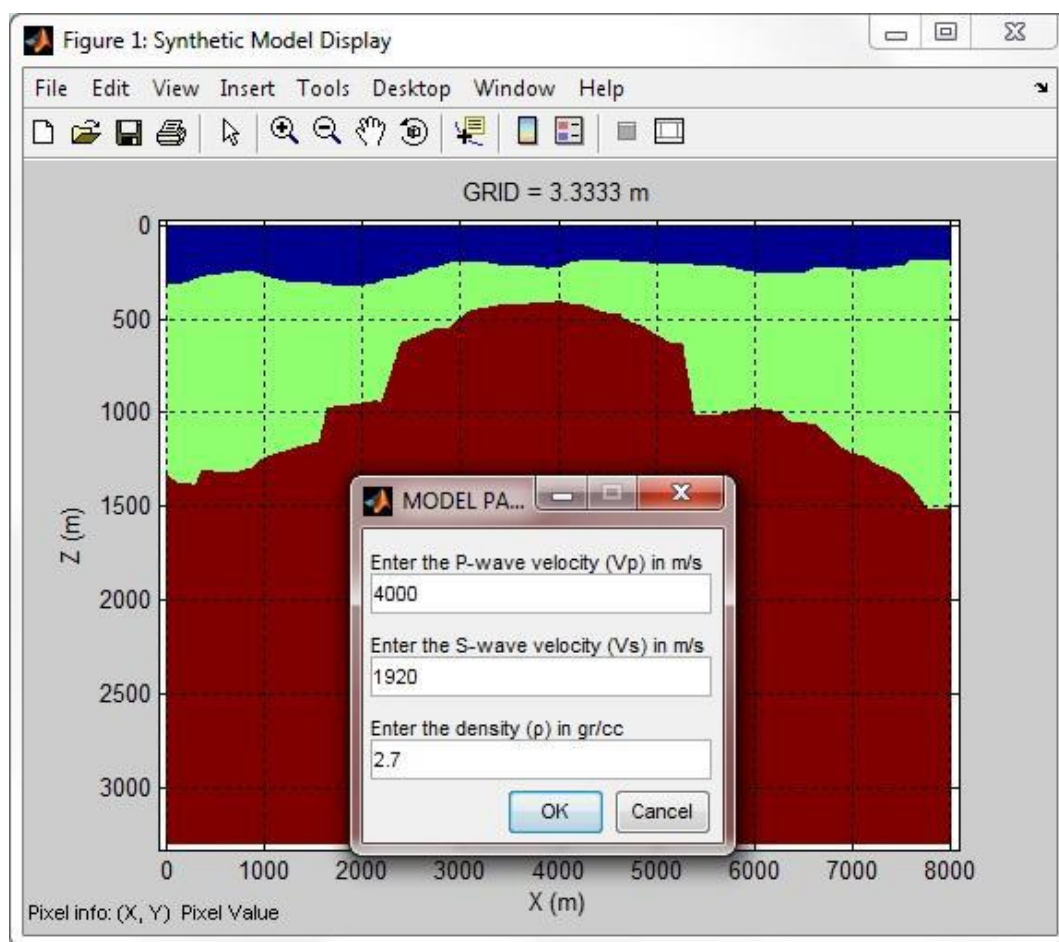
Enter the dominant frequency of the source in Hz  
20

Enter receiver increment in meters  
10

The upper surface ( $Z=0$ ) of model is FREE or ABSORBING boundary ?  
FREE

OK Cancel

Σχήμα 2.3: Απεικόνιση αρχικών παραμέτρων μοντέλου (Παγιαλάκης, 2014).



Σχήμα 2.4: Παράμετροι στρώματος Μειοκαινικών – Νεογενών (Παγιαλάκης, 2014).

Το επόμενο βήμα για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης είναι ο ορισμός των παραμέτρων των υδροφώνων, αλλά και αυτών της πηγής. Σε αυτό το στάδιο δόθηκε μεγάλη έμφαση, διότι στόχος ήταν η δημιουργία μιας διάταξης πηγής-υδροφώνων που να προσομοιάζει όσο το δυνατόν καλύτερα τις διατάξεις αλλά και τον τρόπο καταγραφής των σεισμικών κυμάτων από τα υδρόφωνα, που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες θαλάσσιες διασκοπήσεις (βλ. §1.3.3). Αρχικά με την εντολή >> PSV\_SYNTHETICS\_VER11; μέσω του λογισμικού Matlab γίνεται η εισαγωγή του μοντέλου του Παγιαλάκη (2014) με την προκαθορισμένη γεωμετρία και τις ταχύτητες των στρωμάτων. Στην συνέχεια ορίζονται οι παραμέτροι των υδροφώνων και της πηγής. Στα Σχήματα 2.5 και 2.6 απεικονίζονται αναλυτικά οι τιμές που δόθηκαν, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση της απόκτησης των σεισμικών δεδομένων ανάκλασης. Μία πηγή συνοδεύεται από 200 υδρόφωνα. Κατά την οριζόντια διεύθυνση η πρώτη πηγή τοποθετήθηκε στα 10m και το πρώτο υδρόφωνο επίσης στα 10m. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών δεκτών είναι 10m, επομένως ο τελευταίος δέκτης της πρώτης πηγής θα βρίσκεται στα 2010 m. Η ισαπόσταση πηγών είναι 100m, άρα η δεύτερη πηγή βρίσκεται στα 110m (όλη η διάταξη πηγής-υδροφώνων μεταφέρθηκε 100m δεξιά). Για να καλυφθεί όλο το μοντέλο τοποθετήθηκαν συνολικά 61 πηγές. Η τελευταία πηγή τοποθετήθηκε στα 6010m. Για την εύρεση του βέλτιστου βάθους τοποθέτησης πηγής και υδροφώνων πραγματοποιήθηκαν διάφορες δοκιμές. Αναλυτικότερα δοκιμάστηκε τοποθέτηση υδροφώνων σε βάθη 0m, 20m και 40m. Κατά την μέθοδο επεξεργασίας deghosting, καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν με τους δέκτες στα 20m. Έτσι τα τελικά βάθη πηγής και υδροφώνων, που επιλέχθηκαν ήταν 10m και 20m αντίστοιχα. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται (σε μεγέθυνση) η συστοιχία πηγής-υδροφώνων όταν η πηγή βρίσκεται στα 1000m. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει περιορισμός ως προς τη θέση όπου τοποθετούνται οι πηγές. Ειδικότερα, η ελάχιστη θέση πηγών ορίζεται η τριπλάσια τιμή της ισαπόστασης GRID των διαδοχικών κόμβων του πλέγματος ( $3 \cdot \Delta x = 10m$ ) από οποιαδήποτε διαχωριστική επιφάνεια ή όριο του μοντέλου.

Τέλος, η διαδικασία κάθε πηγής (στα 0m οριζόντια απόσταση από την πηγή) υπάρχουν μόνο κατακόρυφες μετατοπίσεις. Οι οριζόντιες ταχύτητες ταλάντωσης σωματιδίων  $V_x$  είναι σχεδόν μηδενικές, διότι έχουμε κατακόρυφη διάδοση και ανάκλαση του σεισμικού κύματος. Γενικότερα μέσω της απεικόνισης των  $V_x$  δεδομένων φαίνονται πιο καθαρά τα απευθείας κύματα παρά τα ανακλώμενα, ενώ μέσω των  $V_z$  η εικόνα των ανακλώμενων είναι πολύ καθαρότερη δημιουργίας των συνθετικών δεδομένων ολοκληρώνεται αφού οριστεί και ο συνολικός χρόνος καταγραφής (3000ms). Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι τα συνθετικά δεδομένα που έχουν δημιουργηθεί βρίσκονται σε διάταξη κοινή πηγής. Μετά την ολοκλήρωση της δημιουργίας των συνθετικών δεδομένων για κάθε μια από τις 61 πηγές, προέκυψαν 3 πίνακες δεδομένων:

- $V_z$  (κατακόρυφη ταχύτητα ταλάντωσης σωματιδίων)

- $V_x$  (οριζόντια ταχύτητα ταλάντωσης σωματιδίων)

-Pr (πίεση)

Καθένας από τους τρεις πίνακες αποτελείται από 200 στήλες (όσοι και οι δέκτες που αναλογούν σε κάθε πηγή). Έτσι αν αναφέρεται για παράδειγμα η εργασία στο ίχνος του τρίτου αισθητήρα της πρώτης πηγής, τότε εννοούνται τα δεδομένα της τρίτης στήλης των τριών πινάκων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα  $V_z$  και όχι  $V_x$ , αφού οι εικόνες που λήφθηκαν ήταν πιο

καθαρές. Επίσης στον πρώτο δέκτη από ότι αυτή των απευθείας. Τα απευθείας κύματα δεν μας ενδιαφέρουν στην μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης. Για αυτούς τους λόγους προτιμήθηκαν τα δεδομένα Vz αντί των Vx και για τα επόμενα βήματα επεξεργασίας. Στο Σχήμα 2.8 φαίνονται τα 200 σεισμικά ίχνη (Vz) που δημιουργήθηκαν από την 39<sup>η</sup> πηγή του μοντέλου που είναι τοποθετημένη στα 3810m. Τα δεδομένα είναι πλέον έτοιμα για επεξεργασία. Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται αναλυτικά όλα τα βήματα που ακολουθήθηκαν.

Με την ολοκλήρωση της δημιουργίας των συνθετικών δεδομένων δημιουργούνται και τρία struct αρχεία στην Matlab, με κατάληξη \*.SMP, \*.SRC, \*.RCV, τα οποία περιέχουν χρήσιμες πληροφορίες για το πείραμα.

Το αρχείο .SMP περιλαμβάνει τις παραμέτρους του σεισμικού μοντέλου, οι οποίες είναι: το ελάχιστο βήμα χωρικής και χρονικής διακριτοποίησης του μοντέλου, η συχνότητα της πηγής, οι ταχύτητες των εγκαρσίων και διαμηκών σεισμικών κυμάτων στα 4 στρώματα, η πυκνότητα, πληροφορία για το αν έχουν εφαρμοστεί όρια απορρόφησης στην άνω επιφάνεια του σεισμικού μοντέλου, πίνακας ταχύτητας διαμηκών σεισμικών κυμάτων για το σεισμικό μοντέλο, πίνακας μέσης τετραγωνικής ταχύτητας και πίνακας ορίων απορρόφησης για τις τέσσερις πλευρές του μοντέλου.

Το αρχείο .SRC περιλαμβάνει χρήσιμες πληροφορίες για την πηγή, όπως είναι: ο αριθμός των πηγών που χρησιμοποιήθηκε, η ισαπόσταση των πηγών, οι ακριβείς θέσεις των πηγών πάνω στο σεισμικό μοντέλο, η κυματομορφή της πηγής καθώς και η διάρκεια ταλάντωσής της.

Το αρχείο .RCV περιέχει πληροφορίες για τους δέκτες, όπως είναι : η ισαπόσταση των δεκτών και πηγών, οι ακριβείς θέσεις των δεκτών πάνω στο σεισμικό μοντέλο, το ελάχιστο βήμα χρονικής διακριτοποίησης, τον συνολικό χρόνο καταγραφής.

Τα αρχεία .SMP, .SRC, .RCV θα χρησιμοποιηθούν κατά το στάδιο της επεξεργασίας των συνθετικών δεδομένων, στην αναδιάταξη των δεδομένων κοινής πηγής.

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας, δημιουργήθηκε ένα επιπλέον μοντέλο με Όρια Απορρόφησης σε όλες τις πλευρές του μοντέλου (και στην επιφάνεια του μοντέλου), για μία μόνο πηγή στα 10m (Σχήμα 2.9). Αυτό είχε σκοπό να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις κατά το στάδιο της επεξεργασίας, μεταξύ συνθετικών δεδομένων που προκύπτουν μετά την εφαρμογή Ορίων απορρόφησης σε όλες τις επιφάνειες του μοντέλου και deghosted συνθετικών δεδομένων χωρίς τα όρια στην επιφάνεια του μοντέλου. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να δημιουργηθούν τα συνθετικά δεδομένα με Όρια Απορρόφησης και στην επιφάνεια του μοντέλου ήταν ακριβώς η ίδια. Το μόνο που αλλάζει είναι ότι στις αρχικές παραμέτρους (Σχήμα 2.3) αντί για FREE πληκτρολογήθηκε ABSORBING.

RECEIVER PARAMETERS

Receiver interval and coordinates must be multiple of 3.3333 m

Enter the Number of Receivers

200

Enter the interval between Receivers

10

Enter the Z coordinate of receivers (m)

20

Enter the X coordinate of 1st receiver

10

Enter the Receiver array increment in meters

100

OK Cancel

Σχήμα 2.5: Παράμετροι Υδροφώνων.

SOURCE PARAMETERS

Source dominant frequency is 20 Hz

Source increment and coordinates must be multiple of 3.3333 m

Enter the No of shots

61

Enter the shot increment

100

Enter the Z coordinate of source (m)

10

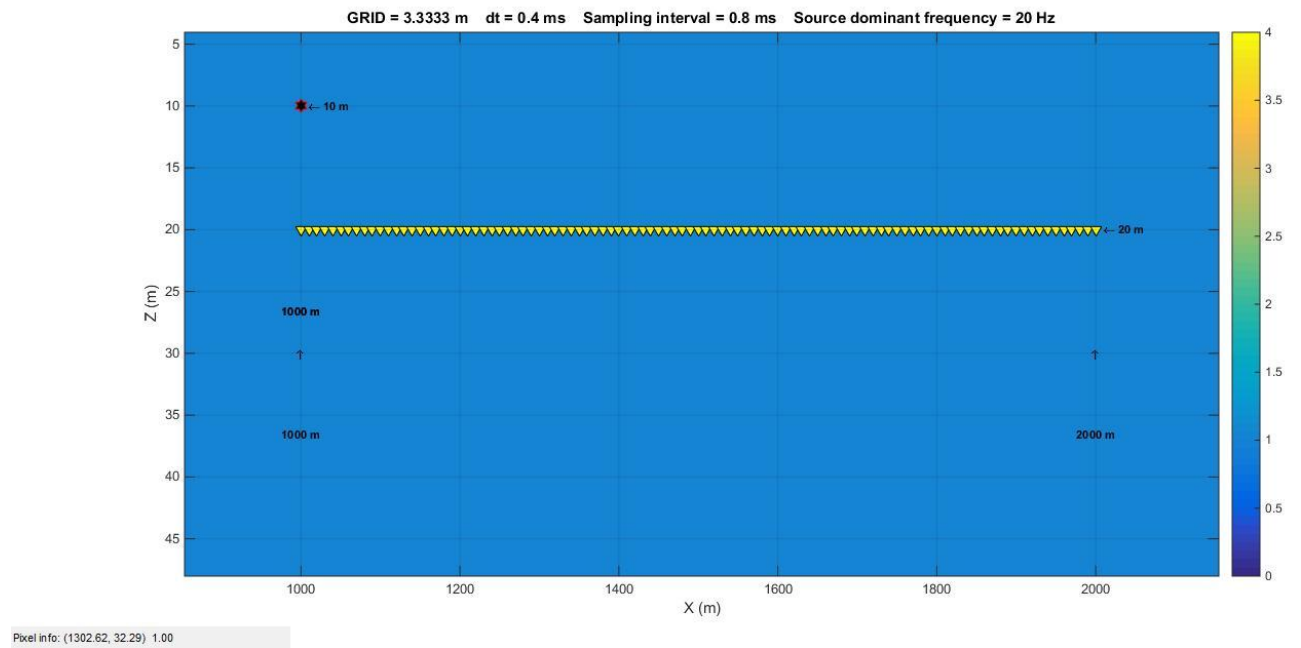
Enter the X coordinate of 1st source

10

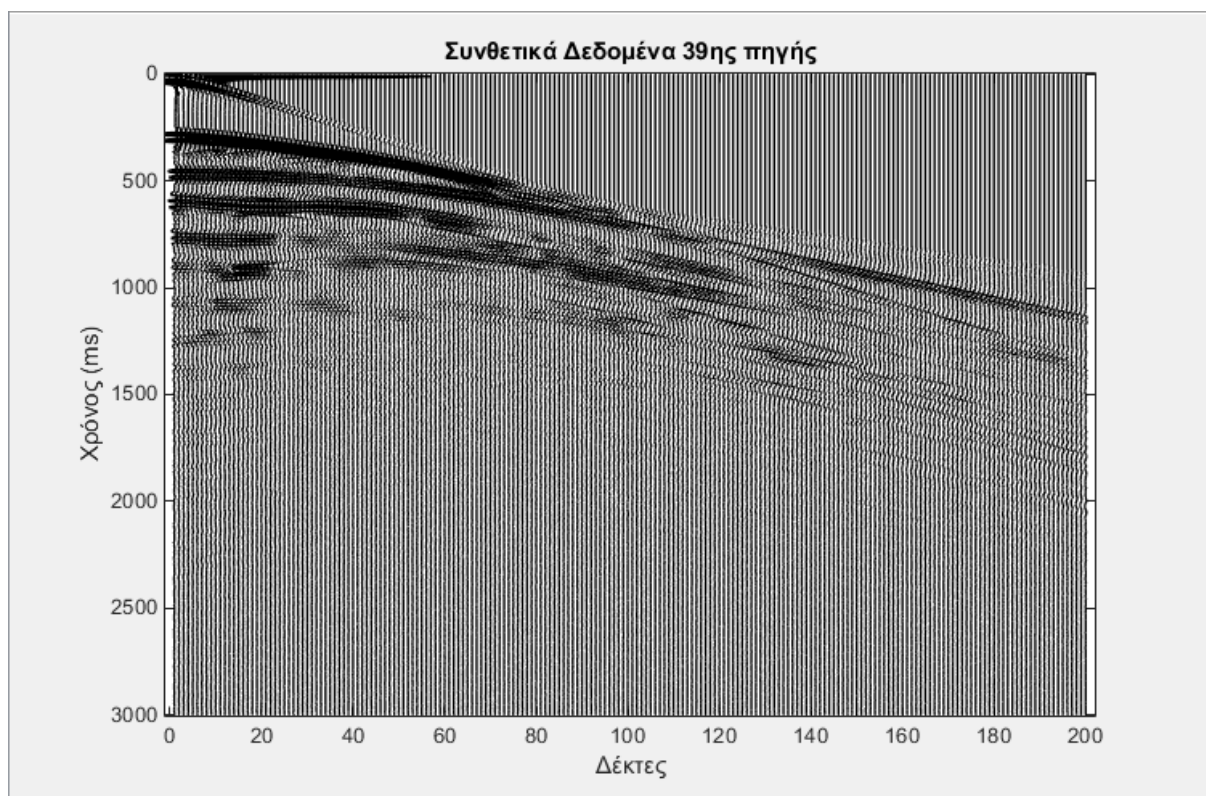
OK Cancel

Σχήμα 2.6: Παράμετροι Πηγής.





**Σχήμα 2.7:** Διάταξη πηγής-δεκτών με θέση πηγής στα 1000 m.

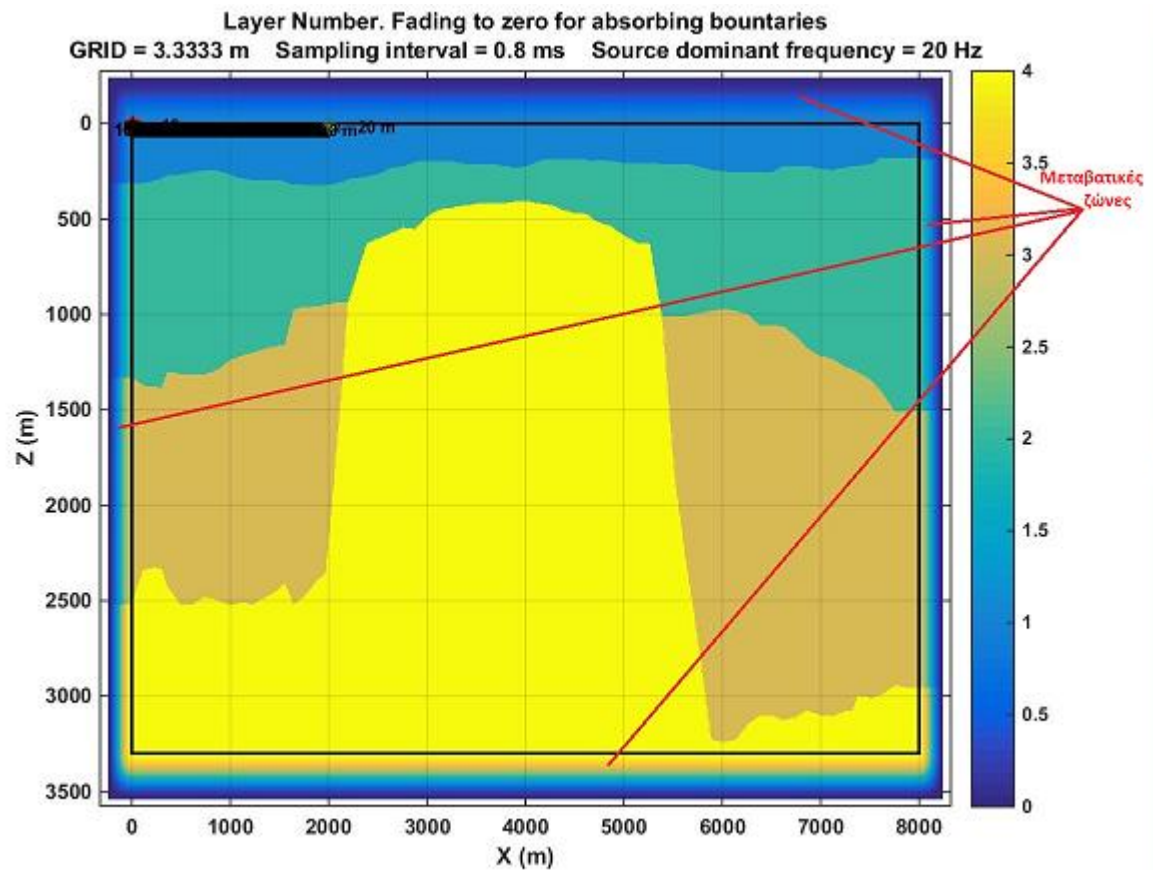


**Σχήμα 2.8:** Σεισμικά ίχνη της 39<sup>ης</sup> πηγής του μοντέλου. Κατακόρυφη συνιστώσα ταλάντωσης των σωματιδίων (Vz).

## 2.4 ΟΡΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ (ABSORBING BOUNDARIES)

Γενικά η διάδοση κυμάτων μέσω ενός μη περιορισμένου μέσου σε οποιαδήποτε διεύθυνση, είναι αδύνατο να περιγραφεί, λόγω περιορισμών που αφορούν τον αποθηκευτικό χώρο του υπολογιστή. Οριακές συνθήκες πρέπει να εισαχθούν στα άκρα του μέσου, ώστε να ξεπεραστεί το πρόβλημα. Τα όρια που εφαρμόζονται στον υπολογιστικό χώρο αποτελούν ένα ιδιαίτερο κομμάτι των Πεπερασμένων Διαφορών. Έστω ότι ο υπολογιστικός χώρος έχει το σχήμα ενός ορθογωνίου στις δυο διαστάσεις, τότε οι πλευρές του αποτελούν τα όρια του. Η ανώτερη πλευρά του ( $z=0$ ) αποτελεί την ελεύθερη επιφάνεια και οι άλλες τρεις τα σύνορα του μοντέλου. Και οι τέσσερις πλευρές του μοντέλου προκαλούν προβλήματα στις αριθμητικές μεθόδους. Τα προβλήματα αυτά που δημιουργούνται στους αριθμητικούς υπολογισμούς, οφείλονται στις τεχνητές ανακλάσεις που προέρχονται από τα κύματα που προσπίπτουν στα σύνορα του υπολογιστικού χώρου (στις τέσσερις πλευρές). Για την αντιμετώπιση αυτών των ψευδών ανακλάσεων, έχουν προταθεί μέθοδοι σύνθετων ορίων απορρόφησης.

Οι μέθοδοι σύνθετων ορίων απορρόφησης έχουν αναπτυχθεί για την αριθμητική προσομοίωση των σεισμικών κυμάτων. Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούν διάφορα φίλτρα, μεμονωμένα ή και σε συνδυασμό με σκοπό να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα των ψευδών ανακλάσεων. Ειδικά φίλτρα εφαρμόζονται σε στενές ζώνες μετάβασης, οι οποίες εισάγονται δίπλα στα σύνορα του υπολογιστικού χώρου. Καθώς διαδίδονται τα σεισμικά κύματα στο μοντέλο προσπίπτουν στα σύνορα του, πολλές φορές υπό γωνία (η κατεύθυνση του κύματος δεν είναι κάθετη στα σύνορα) και συνεχίζουν να διαδίδονται και στις ζώνες μετάβασης. Η λειτουργία αυτών των φίλτρων (ανισότροπα φίλτρα) είναι να μεταβάλλουν σταδιακά την κατεύθυνση διάδοσης των κυμάτων στις ζώνες μετάβασης στις  $90^\circ$  με το κάθε σύνορο του μοντέλου. Οι μέθοδοι σύνθετων ορίων απορρόφησης χρησιμοποιούν επίσης ένα απορροφητικό όριο «μονοδιάστατο απορροφητικό όριο», το οποίο τοποθετείται στο άκρο της ζώνης μετάβασης. Το μονοδιάστατο απορροφητικό όριο (one-dimensional absorbing boundary) επιτρέπει στις σεισμικές ακτίνες (οι οποίες πλέον διαδίδονται κάθετα στο άκρο των μεταβατικών ζωνών λόγω του ανισότροπου φίλτρου) να εξέλθουν από το μοντέλο, χωρίς να υφίστανται ανάκλαση και επομένως, χωρίς να επιστρέφουν πίσω στο μοντέλο. Επίσης, για την αντιμετώπιση των ψευδών ανακλάσεων χρησιμοποιείται ένα φίλτρο 'σφουγγάρι', το οποίο τοποθετείται στην ζώνη μετάβασης και μέσω ενός μηχανισμού διάχυσης, απορροφάει επιλεκτικά τα εισερχόμενα κύματα. Έτσι με τον συνδυασμό του μονοδιάστατου απορροφητικού ορίου (one-dimensional absorbing boundary) με το ανισότροπο φίλτρο (anisotropic filtering) ή το φίλτρο σφουγγάρι (one-way sponge filter), επιτυγχάνεται απορρόφηση των κυμάτων χώρου και επιφανειακών κυμάτων. Η αποτελεσματικότητα των μεθόδων σύνθετων ορίων απορρόφησης, στην εξάλειψη των τεχνητών ανακλάσεων, γίνεται αντιληπτή κατά την εφαρμογή τους σε διάφορα αριθμητικά παραδείγματα (Dai et al., 1998). Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζονται οι μεταβατικές ζώνες του μοντέλου προσομοίωσης, όπου εφαρμόστηκαν τα Όρια απορρόφησης.



Σχήμα 2.9: Συνθετικό Μοντέλο με Όρια Απορρόφησης σε όλες τις πλευρές του και μία πηγή τοποθετημένη στα 10 m.

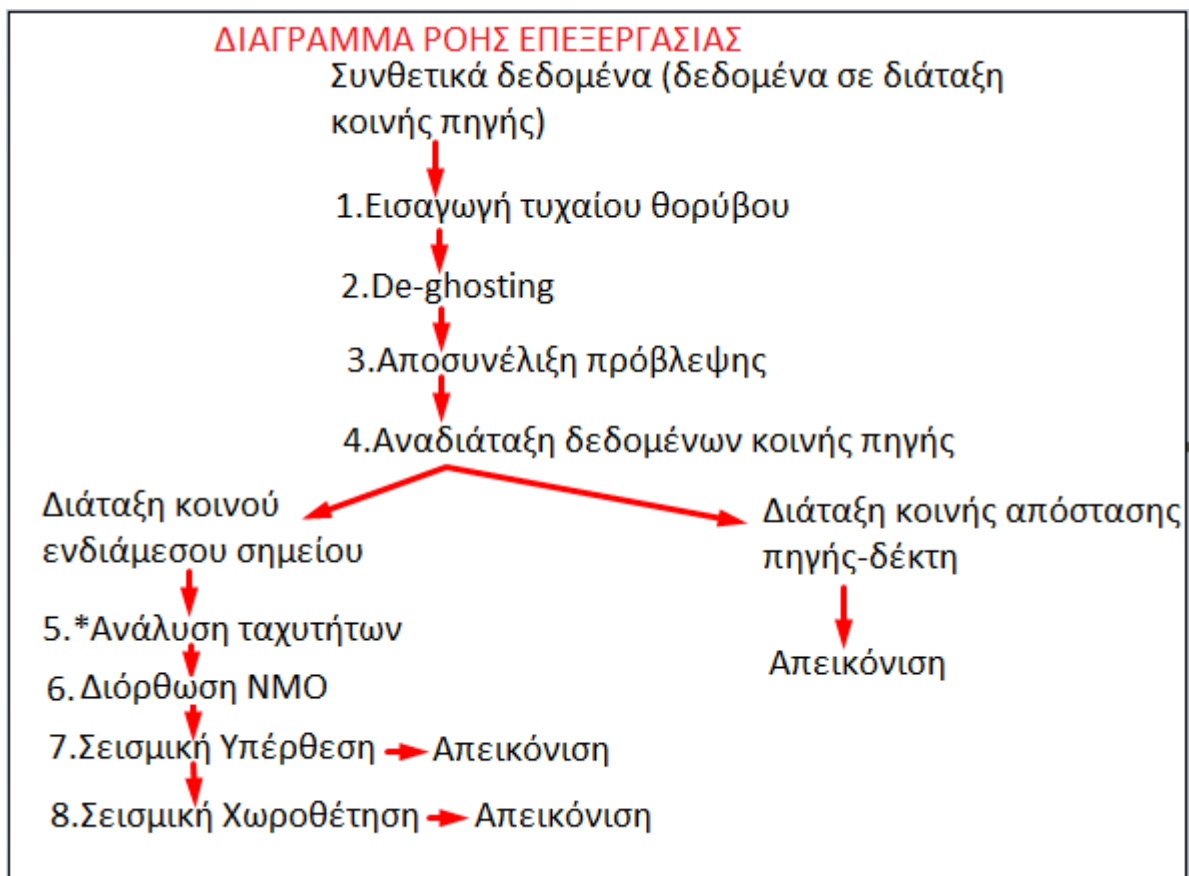
# 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι μέθοδοι επεξεργασίας των συνθετικών δεδομένων που ακολουθήθηκαν με σκοπό, ο λόγος σήματος προς θόρυβο στα τελικά αποτελέσματα επεξεργασίας να είναι ο βέλτιστος, έτσι ώστε η τελική σεισμική τομή που θα προκύψει να είναι όσο το δυνατόν συγκρίσιμη με την γεωλογική τομή της περιοχής. Σε όλα τα στάδια της επεξεργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Matlab για την δημιουργία και χρήση των απαραίτητων αλγορίθμων. Για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων των ενδιάμεσων και τελικών σταδίων αναγκαία ήταν η χρησιμοποίηση του προγράμματος Transform αλλά και του λογισμικού Matlab.

Αναλυτικότερα, μετά την δημιουργία των συνθετικών δεδομένων, τα οποία βρίσκονται σε διάταξη κοινής πηγής τα στάδια επεξεργασίας που ακολουθήθηκαν, περιγράφονται παρακάτω και απεικονίζονται στο διάγραμμα ροής επεξεργασίας (Σχήμα 3.1). Πρώτο στάδιο είναι η εισαγωγή τυχαίου θορύβου στα συνθετικά δεδομένα για την δημιουργία όσο το δυνατόν πιο αληθοφανών δεδομένων. Το επόμενο στάδιο αφιερώνεται στις διεργασίες απαλλαγής του σήματος από το 'ghost' φαινόμενο (βλ. §1.3.2). Στο τρίτο στάδιο δόθηκε και το μεγαλύτερο βάρος στη παρούσα διπλωματική εργασία. Εφαρμόστηκε η μέθοδος αποσυνέλιξης πρόβλεψης με την βοήθεια ειδικού αλγορίθμου στα δεδομένα, με σκοπό την απόσβεση ή έστω εξασθένηση ενός συγκεκριμένου είδους πολλαπλών ανακλάσεων που βασικό χαρακτηριστικό τους είναι η περιοδικότητα. Για να αναδειχθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου έγιναν διάφορες απεικονίσεις καθώς και συγκρίσεις στα διάφορα στάδια της επεξεργασίας. Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την αναδιάταξη των δεδομένων κοινής πηγής, σε διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου και κοινής απόστασης πηγής-δέκτη, για διαφορετικούς σκοπούς η κάθε μία. Δεδομένα διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου χρησιμοποιούνται στην συνέχεια για την ανάλυση ταχυτήτων με σκοπό την εύρεση των μέσων τετραγωνικών ταχυτήτων. Στην πραγματικότητα, το στάδιο αυτό, περιγράφεται στην εργασία αλλά δεν εφαρμόστηκε, εφόσον η μέση τετραγωνική ταχύτητα του μοντέλου προσδιορίστηκε με την χρήση αναλυτικών σχέσεων από τη τμηματική ταχύτητα των σεισμικών στρωμάτων. Επόμενο βήμα είναι η διόρθωση της κανονικής χρονικής απόκλισης (Normal MoveOut-NMO) στα δεδομένα και η σεισμική υπέρθεση αυτών με σκοπό να δημιουργηθεί η σεισμική τομή υπέρθεσης. Η επεξεργασία ολοκληρώνεται με την διόρθωση των θέσεων και κλίσεων των ανακλαστήρων με την βοήθεια της διαδικασίας της σεισμικής χωροθέτησης.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας.

## 3.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΥΧΑΙΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

Σε μια καταγραφή πραγματικών δεδομένων σεισμικής ανάκλασης, πρέπει να ληφθεί υπόψη ο θόρυβος που εισάγεται στις μετρήσεις από το περιβάλλον της έρευνας. Ο θόρυβος αυτός μπορεί να είναι συναφής ή τυχαίος. Με τον συναφή θόρυβο εννοούμε τα επιφανειακά κύματα. Πρόκειται για κύματα που ταξιδεύουν οριζόντια, χαμηλής συχνότητας (8-20Hz), χαμηλής ταχύτητας (περίπου 500m/sec) και μεγάλου μήκους κύματος, τα οποία πολλές φορές καλύπτουν τα ανακλώμενα σεισμικά κύματα. Λόγω της χαμηλής τους ταχύτητας διακρίνονται εύκολα από τη διαδικασία της ανάλυσης ταχύτητας. Ως τυχαίος θόρυβος θεωρείται ο άνεμος, ο ανθρώπινος θόρυβος, η ηλεκτρική επίδραση (επίδραση ηλεκτρικών συρμάτων με επαγωγή), ο θόρυβος του οργάνου, οι σκεδάσεις, οι μικροδονήσεις της Γης κ.λ.π. (Αποστολόπουλος Γ., 2013)

Το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας είχε στόχο τα δεδομένα καταγραφής από το πειραματικό κομμάτι (συνθετικά δεδομένα) να είναι όσο το δυνατόν πιο αληθοφανή, δηλαδή όσο πιο κοντά σε δεδομένα που θα προέκυπταν στην ύπαιθρο στην συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, πραγματοποιήθηκε εισαγωγή θορύβου στα αρχικά συνθετικά δεδομένα.

Πρέπει να τονιστεί ότι δοκιμάστηκε η εισαγωγή θορύβου 10% και 20%. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας η τιμή 10% της τυπικής απόκλισης  $\sigma$ , των πλατών του πίνακα  $V_z$  θεωρήθηκε επαρκής. Για την προσθήκη θορύβου στα συνθετικά δεδομένα, αναπτύχθηκε αλγόριθμος στο λογισμικό matlab, που υλοποιούσε τα παρακάτω βήματα:

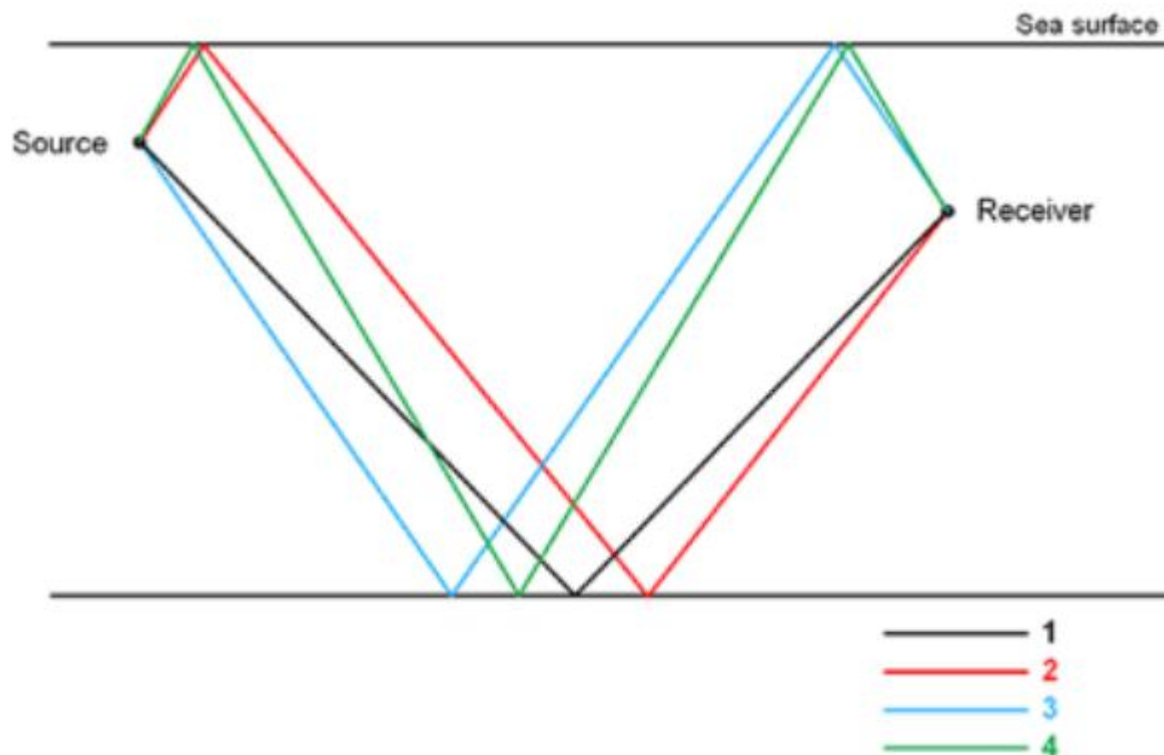
- 1) Κανονικοποίηση των δεδομένων  $V_z$  (κατακόρυφη ταχύτητα ταλάντωσης σωματιδίων) για κάθε πηγή, έτσι ώστε να έχουν μέγιστο πλάτος =1
- 2) Εύρεση μέσης δειγματικής τιμής  $\mu$  και τυπικής απόκλισης  $\sigma$ , των πλατών του πίνακα  $V_z$
- 3) Δημιουργία πίνακα θορύβου με την εντολή `normrnd(m,s,M,N)`: ένας πίνακας με τυχαίους αριθμούς που ακολουθούν την κανονική κατανομή. Όπου  $m$ =μέση τιμή πίνακα,  $s$ =τυπική απόκλιση,  $M$ = αριθμός γραμμών πίνακα,  $N$ = αριθμός στηλών πίνακα  
Στο συγκεκριμένο βήμα εισήχθησαν οι διαστάσεις των πινάκων  $V_z$ , η μέση τιμή του πίνακα  $V_z$ , καθώς και το  $0.1 \times$  τυπική απόκλιση του  $V_z$
- 4) Ο πίνακας θορύβου προστίθεται στα κανονικοποιημένα  $V_z$  δεδομένα
- 5) Αποκανονικοποίηση του πίνακα που προέκυψε στο βήμα 4, μέσω πολλαπλασιασμού του με την μέγιστη τιμή του  $V_z$  , προτού κανονικοποιηθεί.

### 3.3 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ GHOST ΚΑΙ Η ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΤΟΥ

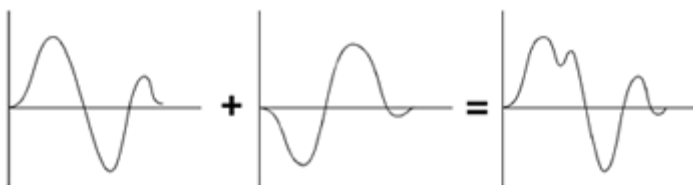
Η εξασθένηση ή η απόσβεση των πολλαπλών ανακλάσεων έχει απασχολήσει τους επιστήμονες εδώ και αρκετές δεκαετίες, επειδή δημιουργούν σημαντικά προβλήματα στις καταγραφές, καλύπτοντας το σήμα των κύριων ανακλάσεων, και κατ' επέκταση στην ερμηνεία. Στο συγκεκριμένο στάδιο της επεξεργασίας επιδιώκεται η εξασθένηση ή και απόσβεση ενός συγκεκριμένου είδους πολλαπλών ανακλάσεων, που ονομάζεται φαινόμενο 'ghost'.

Το φαινόμενο 'ghost' λαμβάνει χώρα σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Δημιουργείται καθώς η επιφάνεια της θάλασσας επιδρά σαν ένας τέλειος ακουστικός καθρέφτης, προκαλώντας φαινόμενα πολλαπλών ανακλάσεων. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι δημιουργίας του ghost φαινομένου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2. Κατά την πρώτη περίπτωση (γραμμή 2, Σχήμα 3.2) δημιουργείται ghost φαινόμενο από την πηγή, καθώς προτού το σεισμικό κύμα διαδοθεί προς τον πυθμένα της θάλασσας, θα ανακλαστεί μη επιθυμητά στην διαχωριστική επιφάνεια νερού-αέρα, με αποτέλεσμα μόλις το κύμα καταγραφεί από τον δέκτη, οι πληροφορίες του δέκτη να επηρεαστούν αρνητικά. Αρνητικά στο σεισμικό ίχνος του δέκτη δρα και το ghost φαινόμενο του δέκτη (γραμμή 3, Σχήμα 3.2), το οποίο οφείλεται σε μια μη επιθυμητή ανάκλαση στην επιφάνεια της θάλασσας, που πραγματοποιείται κοντά στην περιοχή του δέκτη (δεύτερη περίπτωση). Η τρίτη περίπτωση περιλαμβάνει εμφάνιση φαινομένου ghost τόσο από την πηγή, όσο και από τον δέκτη (γραμμή 4, Σχήμα 3.2). Γενικά το φαινόμενο ghost, μπορεί να οριστεί ως ένας θόρυβος, μια μόλυνση των σεισμικών δεδομένων, που εκδηλώνεται με την αύξηση της διάρκειας ταλάντωσης της κυματομορφής της πηγής και κατ' επέκταση των ανακλώμενων κυματομορφών. Η εισαγωγή του ghost στην κύρια ανάκλαση, οφείλεται σε μια ετεροχρονισμένη ανάκλαση, που προκαλείται στην επιφάνεια της θάλασσας. Τα ghosts έχουν τεράστια σημασία για τις θαλάσσιες διασκοπήσεις, αφού η επιφάνεια της θάλασσας είναι σχεδόν τέλειος ανακλαστήρας, πράγμα που σημαίνει ότι η παρεμβολή του ghost στην κύρια ανάκλαση θα είναι ιδιαίτερα ισχυρή. Τα αποτελέσματα των καταγραφών ενός σεισμικού καλωδίου με δέκτες (streamer) που βρίσκεται σε ένα ορισμένο βάθος,

θα μολυνθούν από την παρουσία των μη επιθυμητών ανακλάσεων που προκύπτουν από την διαχωριστική επιφάνεια αέρα-θάλασσας, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της χρονικής διακριτικής ικανότητας της σεισμικής ανάκλασης. Το φαινόμενο ghost επηρεάζει αρνητικά τις πληροφορίες που προέρχονται τόσο από τα χαμηλής, όσο και τα υψηλής συχνότητας σεισμικά κύματα. Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζονται από αριστερά προς τα δεξιά, η κυματομορφή της πηγής, η αντίθετης πολικότητας κυματομορφή ghost και τέλος η παρεμβολή του ghost στο κύριο κυματίδιο. [5]



**Σχήμα 3.2:** Απεικόνιση της κύριας ανάκλασης (1) , του ghost της πηγής (2), του ghost του δέκτη (3), της εμφάνισης του ghost τόσο της πηγής όσο και του δέκτη (4)[5].

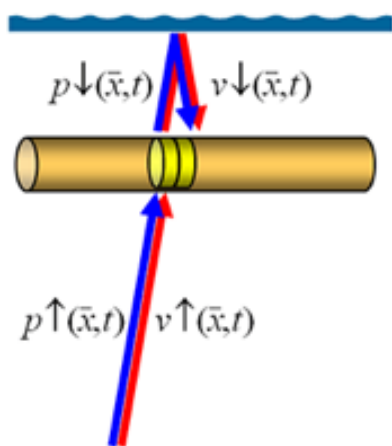


**Σχήμα 3.3:** Παρουσίαση κυματομορφής της πηγής, κυματομορφής ghost, παρεμβολής ghost στο κύριο κυματίδιο [5].

<sup>5</sup> πηγή από το διαδίκτυο, στο επιστημονικό άρθρο της PGS με τίτλο GeoStreamer (2016) - <https://www.pgs.com/marine-acquisition/tools-and-techniques/geostreamer/>

### 3.3.1 ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΚΑΛΩΔΙΑ ΔΙΠΛΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

Τα συμβατικά καλώδια (streamers) χρησιμοποιούν αισθητήρες πίεσης που ονομάζονται υδρόφωνα. Οι συγκεκριμένες συσκευές δεν μπορούν να κάνουν την διάκριση μεταξύ του σεισμικού κυματικού πεδίου που κινείται προς τα πάνω, λόγω της ανάκλασής του στον πυθμένα ή στα γεωλογικά στρώματα και αυτού της αντίθετης πολικότητας το οποίο είναι χρονικά καθυστερημένο και διαδίδεται από πάνω προς τα κάτω από την ανάκλαση του σεισμικού κύματος στην διαχωριστική επιφάνεια νερού-αέρα (ghost). Όμως κάθε σεισμικό κυματίδιο μπορεί επίσης να περιγραφεί σε σχέση με μία άλλη φυσική του ιδιότητα, την ταχύτητα των σωματιδίων του. Τα γεώφωνα είναι οι δέκτες που τοποθετούνται στα καλώδια, προκειμένου να μετρήσουν απευθείας τις ταχύτητες των σωματιδίων σε όλες τις συχνότητες. Επιπλέον, τα γεώφωνα ανιχνεύουν το χρονικά καθυστερημένο φανταστικό (ghost) κυματικό πεδίο του δέκτη, με διαφορετική πολικότητα από αυτή του υδρόφωνου [5]. Η ανάγκη του εντοπισμού και εν συνεχεία διαχωρισμού του ghost από το κύριο κυματικό πεδίο, οδήγησε τους επιστήμονες στην δημιουργία ενός καλωδίου διπλών αισθητήρων (geo streamer). Η επεξεργασία με σεισμικό καλώδιο geo streamer (Σχήμα 3.4) εκμεταλλεύεται τα συμπληρωματικά δεδομένα που καταγράφονται από τα υδρόφωνα και τα γεώφωνα κατά την επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων, προκειμένου να αφαιρεθούν όλες οι καταγραφές που οφείλονται στο φαινόμενο ghost του δέκτη. Αναλυτικότερα, τα ανερχόμενα σεισμικά κύματα τόσο της πίεσης (P) όσο και της ταχύτητας των σωματιδίων (V) ανακλώνται στην επιφάνεια της θάλασσας με αντίθετη πολικότητα (κατερχόμενα σεισμικά κύματα). Υδρόφωνα και γεώφωνα χρησιμοποιούμενα μαζί, επιτρέπουν τον διαχωρισμό μεταξύ των ανερχόμενων και κατερχόμενων κυμάτων, επιτρέποντας έτσι την επεξεργασία των δεδομένων για την απομάκρυνση των ανακλάσεων των ανεπιθύμητων κατερχόμενων (ghost) καταγραφών. Τέλος με την χρησιμοποίηση του καλωδίου διπλών αισθητήρων (geo streamer), επιτρέπεται η ολική αφαίρεση του ghost τόσο στον δέκτη, όσο και στην πηγή, κάνοντας χρήση τεχνικών διαχωρισμού κυματικών πεδίων [5].



Σχήμα 3.4: Καλώδιο διπλών αισθητήρων (geo streamer) [5].



Οι παράμετροι των πηγών και των δεκτών επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το πόσο έντονη θα είναι η παρεμβολή του ghost στην κύρια ανάκλαση. Για τον λόγο αυτό πρέπει να δοθεί μεγάλη έμφαση στην χρησιμοποίηση των βέλτιστων παραμέτρων σε κάθε πειραματική διαδικασία. Η φύση των παρεμβολών μεταξύ του κύριου κυματικού πεδίου και του ghost πεδίου ποικίλλει ανάλογα το βάθος της πηγής ( για το ghost της πηγής) ή το βάθος του καλωδίου ( για το ghost του δέκτη). Εάν το βάθος της πηγής είναι μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος, το σήμα της μη επιθυμητής ανάκλασης είναι πολύ αδύναμο. Επειδή το εύρος συχνοτήτων του σεισμικού κύματος κυμαίνεται από 25 έως 40 Hz, το ιδανικό βάθος της πηγής είναι από 10 έως 15 m (Sheriff and Geldart, 1995). Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, η πηγή τοποθετήθηκε σε βάθος 10 m. Όσον αφορά στο βάθος των δεκτών, έχει παρατηρηθεί μεγαλύτερη επίδραση του φαινομένου ghost όσο το βάθος τείνει σε χαμηλότερες τιμές και το αντίστροφο. Επίσης όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος του γεωκαλωδίου geo streamer τόσο παρατηρείται μείωση του περιβαλλοντικού ήχου, επομένως και αύξηση του λόγου σήματος/θορύβου σε ένα πολύ ευρύ φάσμα μήκους κύματος. Για τους σκοπούς της εργασίας, κατόπιν δοκιμών στα 0m, 20m, και 40m, βέλτιστο βάθος αισθητήρων για καλύτερα deghosted δεδομένα θεωρήθηκε αυτό των 20m [5].

### 3.3.2 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ GHOST

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, η παρουσία ghost δρα καταστροφικά στα σεισμικά δεδομένα. Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια πολλοί ερευνητές προσπάθησαν με διάφορους μηχανισμούς (φίλτρα, πολλαπλασιαστές κ.α. ) να απομακρύνουν το ghost από το κύριο κυματικό πεδίο ή έστω να επιτευχθεί εξασθένηση αυτού. Σε επιστημονικό άρθρο που βρέθηκε στην βιβλιοθήκη της SEG, οι Barr και Sanders (1989) στην προσπάθειά τους να δημιουργήσουν εξασθένηση του μη επιθυμητού φαινομένου, κατέληξαν σε μία σχέση (3.1) που συνδέει την μετατόπιση λόγω ταχύτητας σωματιδίων με την ταλάντωση λόγω πίεσης :

$$D = Pr + \alpha Vz \quad (3.1)$$

$$\alpha = \frac{Pr_{max}}{Vz_{max}} \quad (3.2)$$

Όπου: D: τα δεδομένα απαλλαγμένα από ghost (deghosted data)

Pr: ταλάντωση σωματιδίων λόγω πίεσης

Vz: μετατόπιση σωματιδίων λόγω ταχύτητας

$\alpha$ : πολλαπλασιαστής

Prmax: μέγιστη τιμή ταλάντωσης σωματιδίων λόγω πίεσης στην περιοχή των απευθείας σεισμικών κυμάτων

Vzmax: μέγιστη τιμή ταχύτητας μετατόπισης σωματιδίων στην περιοχή των απευθείας σεισμικών κυμάτων

Ο πολλαπλασιαστής  $\alpha$  ισούται με τον λόγο των απόλυτων τιμών της μέγιστης τιμής της πίεσης που καταγράφει ο αισθητήρας και της μέγιστης ταχύτητας που καταγράφει ο δέκτης, για ένα σεισμικό κύμα που διαδίδεται προς τα κάτω (downward propagating wavefield).

Σε αυτό το στάδιο, χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος, κατόπιν προσωπικής επικοινωνίας με τον συμφοιτητή μου Κακάρογλου Βαγγέλη (2016), ο οποίος είναι και ο δημιουργός του. Ο συγκεκριμένος κώδικας βασίζεται στην παραπάνω θεωρία των Barr και Sanders (1989) καθώς και στους δύο εμπειρικούς τύπους που κατέληξαν οι δύο ερευνητές (σχέσεις 3.1, 3.2). Έτσι μέσω του λογισμικού Matlab και του αλγορίθμου, προέκυψαν τα deghosted δεδομένα. Δεδομένα εισόδου του αλγορίθμου είναι ο πίνακας Vz με 10% θόρυβο και ο πίνακας Pr (ταλαντώσεις σωματιδίων λόγω πίεσης) και τα δεδομένα εξόδου είναι ο πολλαπλασιαστής  $\alpha$ , καθώς και τα deghosted δεδομένα. Λόγω του αριθμού των πηγών αυτός ο κώδικας έτρεξε 61 φορές με μία εντολή επανάληψης. Αναλυτικά τα βήματα που ακολούθησαν για την δημιουργία των δεδομένων είναι:

-Πρώτο βήμα του αλγορίθμου είναι ο υπολογισμός του πολλαπλασιαστή  $\alpha$ . Για να επιτευχθεί με βάση τον ορισμό του, πρέπει να βρεθεί η μέγιστη τιμή για ένα σεισμικό ίχνος (στήλη) από τον πίνακα Vz, που επιθυμεί ο χρήστης (Vzmax) στην περιοχή των απευθείας κυμάτων (πριν δηλαδή ξεκινήσει ταλάντωση λόγω ανάκλασης του κυματιδίου). Με την ίδια λογική υπολογίζεται και η μέγιστη τιμή Pr (Prmax) για το ίδιο ίχνος που χρησιμοποιήθηκε για να βρεθεί το Vzmax στην περιοχή των απευθείας κυμάτων. Αφού έχουν υπολογιστεί οι δύο μέγιστες τιμές για ένα συγκεκριμένο σεισμικό ίχνος, ο λόγος  $\frac{Pr_{max}}{Vz_{max}}$  θα δώσει την τιμή του  $\alpha$ . Κατόπιν δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, διαπιστώθηκε πως καλύτερα Deghosted δεδομένα προκύπτουν για πολλαπλασιαστή  $\alpha$ , ο οποίος έχει προκύψει από τιμές Prmax, Vzmax από το πρώτο σεισμικό ίχνος κάθε πηγής. Έτσι και για τις 61 επαναλήψεις του κώδικα (61 πηγές μοντέλου) το  $\alpha$  θα υπολογίζεται κάθε φορά από το πρώτο σεισμικό ίχνος (στήλη) των εισαγόμενων πινάκων Vz και Pr.

-Επόμενο βήμα του αλγορίθμου είναι να πολλαπλασιάσει το  $\alpha$  με κάθε στοιχείο του πίνακα Vz με θόρυβο ξεχωριστά.

-Ο πίνακας που θα προκύψει θα προστεθεί στο τελευταίο βήμα του αλγορίθμου με τον πίνακα Pr. Αποτέλεσμα αυτής της πρόσθεσης αποτελούν τα Deghosted Δεδομένα με θόρυβο 10%.

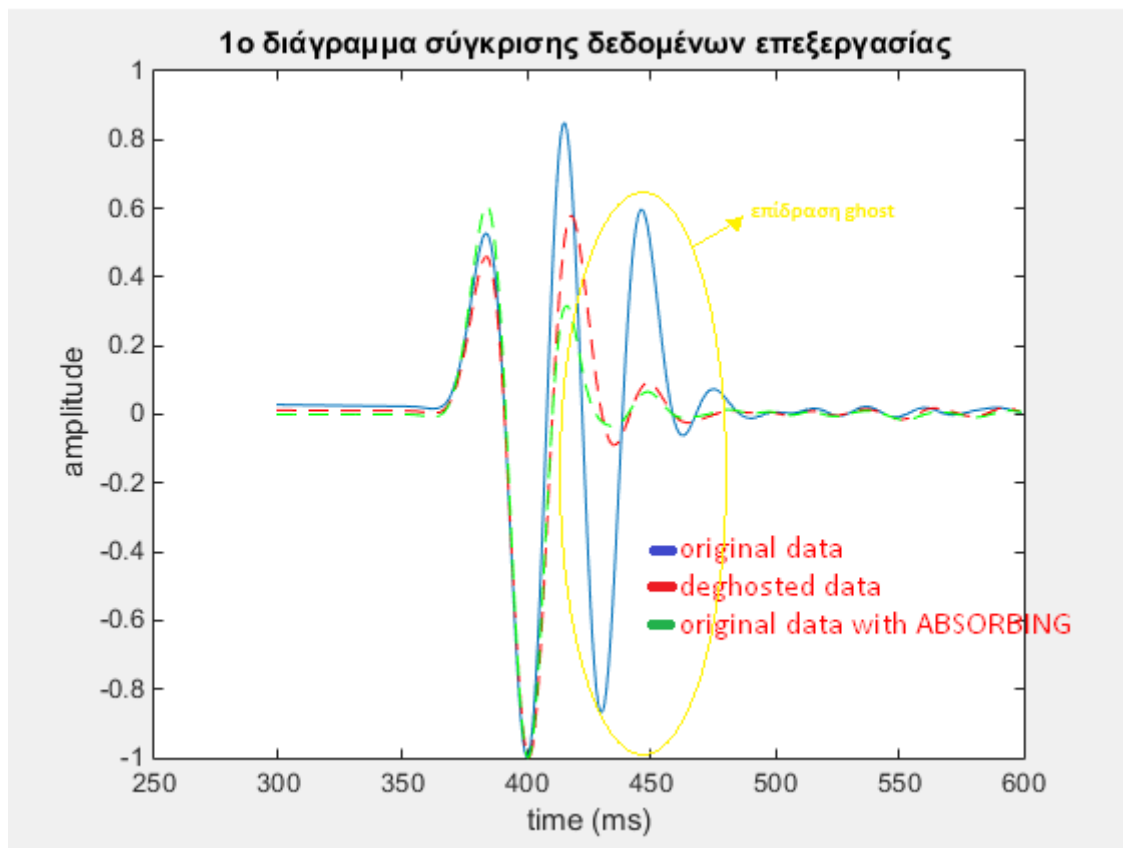
Για τις απαραίτητες συγκρίσεις και παρατηρήσεις δημιουργήθηκαν deghosted δεδομένα με θόρυβο 20% και χωρίς θόρυβο με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Το μόνο πράγμα που άλλαξε, ήταν τα

δεδομένα εισαγωγής που ήταν  $V_z$  με θόρυβο 20% και  $V_z$  χωρίς θόρυβο αντίστοιχα. Οι κρίσιμες παρατηρήσεις αλλά και οι συγκρίσεις βρίσκονται στην αμέσως επόμενη παράγραφο (3.3.3)

### 3.3.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ GHOST

Σε αυτή την παράγραφο απεικονίζονται επιλεγμένα αρχικά δεδομένα, καθώς και τα αντίστοιχα δεδομένα που προέκυψαν μετά τα στάδια της επεξεργασίας που έχουν εφαρμοστεί έως τώρα στην εργασία (με θόρυβο 10% και 20%, deghosted αρχικά δεδομένα, deghosted με θόρυβο 10% και 20%). Επίσης στα διαγράμματα απεικονίζονται και τα αρχικά δεδομένα στα οποία εφαρμόστηκαν όρια Απορρόφησης (Absorbing boundaries) στην ανώτερη επιφάνεια του μοντέλου. Μέσω αυτών των ορίων η ιδιότητα της επιφάνειας της θάλασσας να επιδρά σαν ένας τέλειος ακουστικός καθρέφτης, προκαλώντας φαινόμενα ghost εκμηδενίζεται, με αποτέλεσμα αυτά τα δεδομένα να είναι απαλλαγμένα από ghost κυματικά πεδία. Επομένως, μια σύγκριση των συνθετικών δεδομένων που έχουν προκύψει με την χρήση ορίων απορρόφησης στην ανώτερη επιφάνεια του μοντέλου (επιφάνεια θάλασσας), με τα deghosted δεδομένα τα οποία προέρχονται από αρχικά συνθετικά δεδομένα που έχουν προκύψει χωρίς όρια απορρόφησης στην ανώτερη επιφάνεια, θα οδηγήσει σε συμπεράσματα για το αν το ghost φαινόμενο εξαφανίστηκε ή έστω εξασθένησε. Σκοπός των συγκεκριμένων διαγραμμάτων είναι η κατανόηση της λειτουργίας, αλλά και των αποτελεσμάτων κάθε σταδίου επεξεργασίας. Στο συγκεκριμένο σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι για να γίνουν οι συγκρίσεις, χρησιμοποιήθηκε το ίχνος του πρώτου δέκτη της πρώτης πηγής του συνθετικού μοντέλου. Για την ακρίβεια απεικονίζεται ένα μέρος του συνολικού ίχνους του πρώτου δέκτη, στο οποίο φαίνεται η ταλάντωση λόγω του πρώτου ανακλαστήρα.

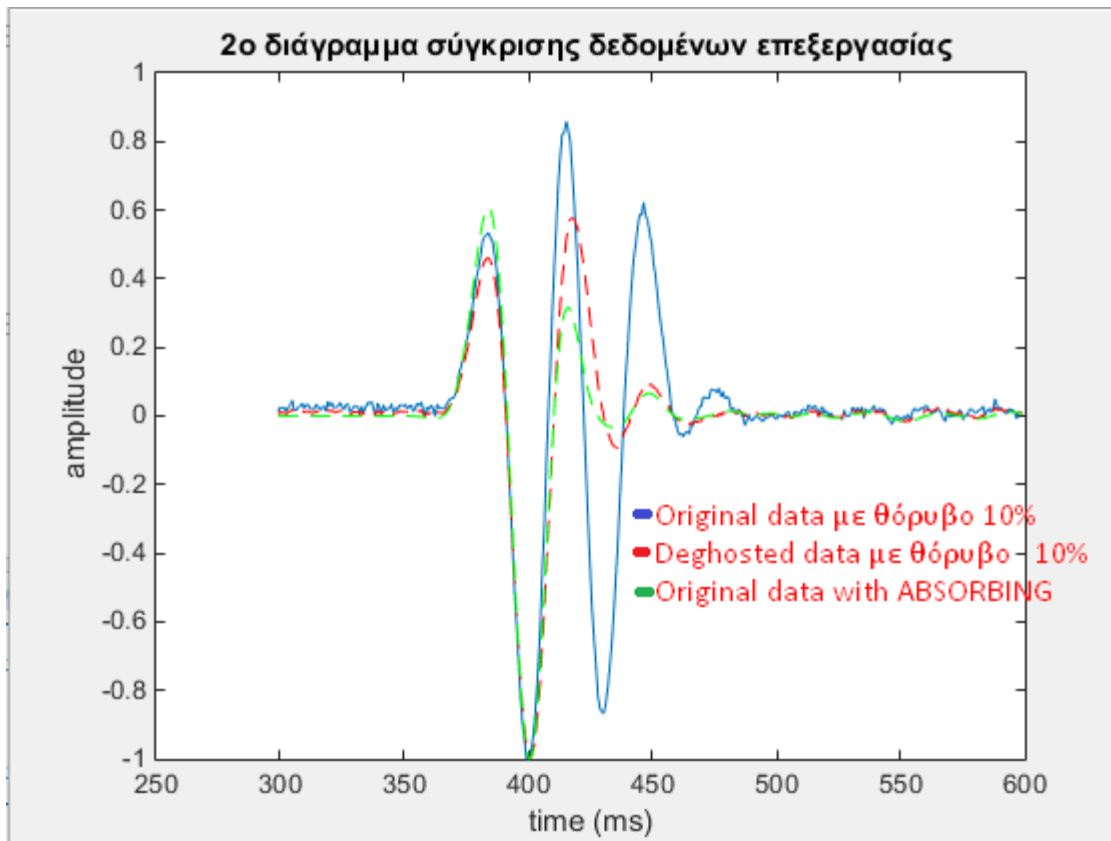
Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζονται το πρώτο ίχνος της πρώτης πηγής από τα συνθετικά δεδομένα, το ίχνος απαλλαγμένο από το φαινόμενο ghost και το ίχνος που έχει προκύψει από δημιουργία δεδομένων με απορροφητικά όρια στην επιφάνεια του μοντέλου. Στα αρχικά δεδομένα φαίνεται ότι ακολουθείται μια παρατεταμένη ταλάντωση, μεγάλου πλάτους για σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα. Η μεγάλη διάρκεια της ταλάντωσης οφείλεται στην επίδραση του ghost. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει το deghosted ίχνος. Είναι φανερό ότι σε σχέση με την μπλε γραμμή (original data) η χρονική διάρκεια της ταλάντωσης έχει μειωθεί. Ιδανικά το ίχνος που έχει προκύψει από deghosted δεδομένα θα έπρεπε να συμπίπτει με το ίχνος από δεδομένα με όρια απορρόφησης (και στην ανώτερη επιφάνεια του μοντέλου). Συγκρίνοντας το deghosted ίχνος με αυτό που έχει προκύψει από Absorbing boundaries και στην επιφάνεια του μοντέλου, διαπιστώνεται ότι ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την εξασθένηση του φαινομένου ghost λειτουργεί ικανοποιητικά, εφόσον οι δύο ταλαντώσεις σχεδόν συμπίπτουν.



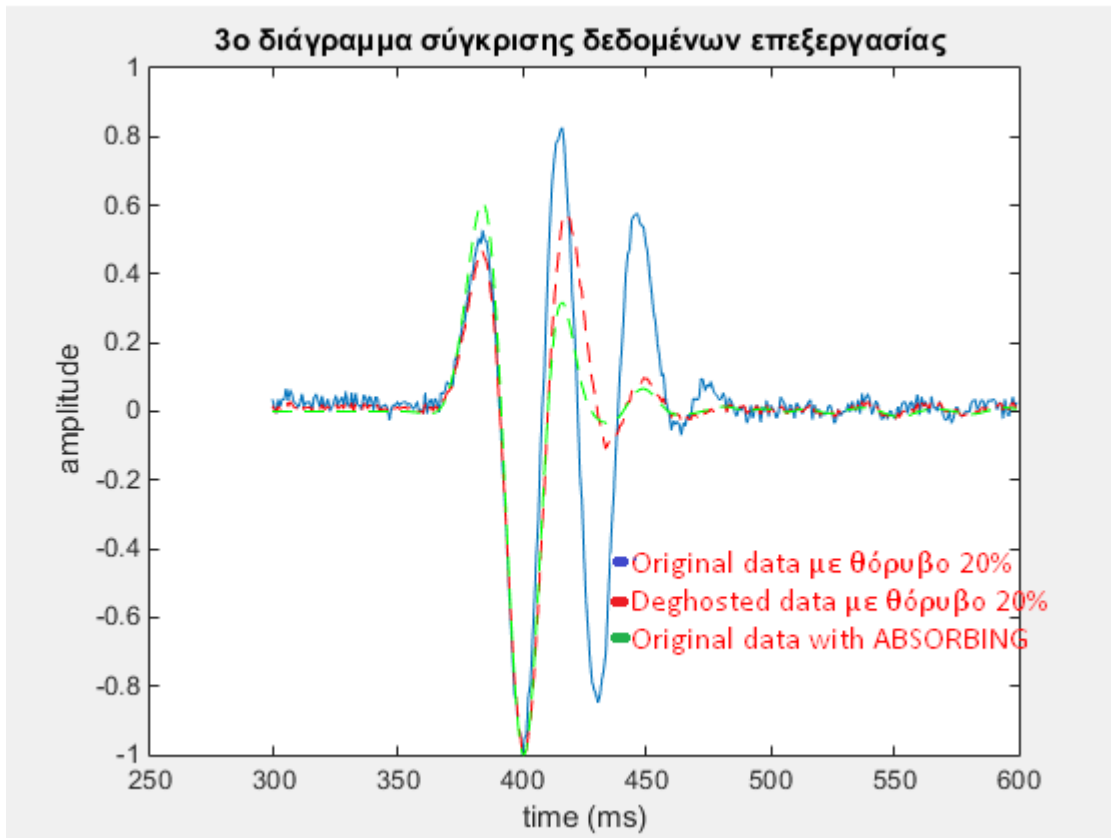
**Σχήμα 3.5:** Αξιολόγηση της απομάκρυνσης του φαινομένου. Δεδομένα χωρίς θόρυβο.

Η επεξήγηση των δύο επόμενων διαγραμμάτων (Σχήμα 3.6 , 3.7) καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι ακριβώς ίδια. Η μόνη διαφορά είναι ότι στα αρχικά δεδομένα έχει προστεθεί θόρυβος 10% και 20%, και κατόπιν εφαρμόστηκε η απομάκρυνση του φαινομένου ghost. Είναι φανερό πως και στις δύο περιπτώσεις ο αλγόριθμος απόσβεσης του ghost λειτουργεί εξίσου καλά και σε δεδομένα που περιέχουν τυχαίο θόρυβο.

Για το επόμενο στάδιο της επεξεργασίας θα χρησιμοποιηθούν τα deghosted δεδομένα με θόρυβο 10%.



**Σχήμα 3.6:** Αξιολόγηση της απομάκρυνσης του φαινομένου. Δεδομένα με θόρυβο 10 %.

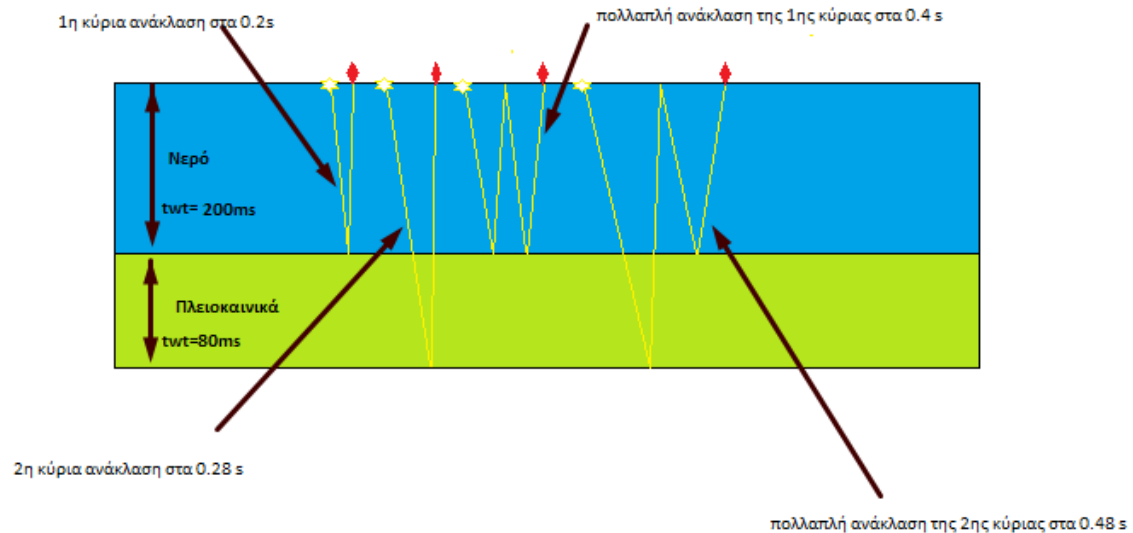


**Σχήμα 3.7:** Αξιολόγηση της απομάκρυνσης του φαινομένου. Δεδομένα με θόρυβο 10 %.

### 3.4 ΑΠΟΣΥΝΕΛΙΞΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ

Τα τελευταία χρόνια έχουν ενταθεί οι έρευνες στον τομέα της απόσβεσης πολλαπλών ανακλάσεων και έχουν προκύψει αξιόλογα αποτελέσματα. Παρ' όλα αυτά δεν έχει βρεθεί μέχρι τώρα ένας αλγόριθμος, που να προβλέπει απόσβεση όλων των ειδών των πολλαπλών και με οποιοσδήποτε συνθήκες θαλάσσιας ή χερσαίας καταγραφής (Κόκκινου, 2002). Το γεγονός ότι εμφανίζονται περισσότερα από ένα είδη πολλαπλών ανακλάσεων, δεν επιτρέπει την χρήση ενός μόνο φίλτρου για την απόσβεσή τους. Έτσι ανάλογα την φύση, την προέλευση, τον τρόπο διάδοσης αλλά και μόλυνσης των σεισμικών δεδομένων, επινοήθηκαν διάφοροι μέθοδοι και μετέπειτα φίλτρα για την απόσβεση ή έστω εξασθένηση μίας συγκεκριμένης κατηγορίας πολλαπλών. Η Αποσυνέλιξη (Deconvolution) είναι μία μέθοδος η οποία βελτιώνει την χρονική διακριτική ικανότητα των σεισμικών δεδομένων. Γενικότερα, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. §1.3.1) οι πολλαπλές ανακλάσεις εμφανίζονται όταν το κύμα αναγκαστεί να κάνει ταλάντωση μεταξύ δύο διαχωριστικών επιφανειών. Ένα χαρακτηριστικό των ανακλάσεων αυτών είναι η περιοδικότητα. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό πραγματεύεται το παρόν κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, και καλείται αρχικά να προβλέψει τους χρόνους καταγραφής των πολλαπλών και έπειτα να αποσβέσει τον θόρυβο αυτό, με την μέθοδο της Αποσυνέλιξης Πρόβλεψης (Predictive Deconvolution). Με την μέθοδο της Αποσυνέλιξης Πρόβλεψης πραγματοποιείται απόσβεση των πολλαπλών που προέρχονται από ετεροχρονισμένη και μη επιθυμητή ανάκλαση από τον πυθμένα της θάλασσας, λόγω παγίδευσης του κύματος στο στρώμα του νερού. Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, καθώς και του αντίστοιχου φίλτρου, πρέπει να καθοριστούν ορισμένοι παράμετροι, όπως το μήκος του φίλτρου, ο χρόνος καθυστέρησης (lag) και το επίπεδο του τεχνητού θορύβου (prewhitening).

Οι πολλαπλές ανακλάσεις εμφανίζονται σε χρόνους σχεδόν πολλαπλασίους των χρόνων που εμφανίζονται οι κύριες ανακλάσεις. Για τις θαλάσσιες καταγραφές, οι χρόνοι άφιξης των πολλαπλών επηρεάζονται κυρίως από το στρώμα του νερού και τον πρώτο ανακλαστήρα. Για να γίνει κατανοητή η παραπάνω πρόταση, δημιουργήθηκε μια εικόνα (Σχήμα 3.8) με δύο στρώματα, αυτά της θάλασσας και των Πλειοκαινικών ιζημάτων. Αρχικά έγινε η υπόθεση ότι ο κατακόρυφος διπλός χρόνος της πρώτης κύριας ανάκλασης ισούται με 0.2 s, και ότι ο κατακόρυφος διπλός χρόνος από τον πυθμένα της θάλασσας έως το κάτω όριο των Πλειοκαινικών ισούται με 80ms. Ο χρόνος της δεύτερης κύριας ανάκλασης υπολογίζεται επομένως στα 0.28 s. Λόγω του ότι ο χρόνος εμφάνισης των πολλαπλών επηρεάζονται κυρίως από το στρώμα του νερού στις θαλάσσιες σεισμικές έρευνες, η πολλαπλή της πρώτης ανάκλασης αναμένεται στα 0.4 s και της δεύτερης στα 0.48 s. Τα πλάτη των πολλαπλών ανακλάσεων είναι συνήθως μικρότερα από αυτά των κύριων. Στην αντίθετη περίπτωση τα προβλήματα που δημιουργούνται στις καταγραφές είναι πολύ σοβαρά.



**Σχήμα 3.8:** Παράδειγμα υπολογισμού χρόνων άφιξης των πολλαπλών ανάκλασης από τον πυθμένα της θάλασσας.

Το φίλτρο που χρησιμοποιείται στη μέθοδο της αποσυνέλιξης πρόβλεψης, λόγω της περιοδικότητας που παρουσιάζουν οι πολλαπλές ανακλάσεις, μπορεί να εντοπίσει αυτές τις ανακλάσεις και να τις αφαιρέσει. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι η περίοδος των πολλαπλών ανακλάσεων θεωρείται σταθερή. Αν τυχόν μεταβάλλεται δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της αποσυνέλιξης πρόβλεψης και πρέπει να ευρεθεί άλλη μέθοδος. Έχει αποδειχτεί από τους Robinson και Treitel (1980), ότι το φίλτρο αποσυνέλιξης πρόβλεψης για συγκεκριμένο σεισμικό ίχνος είναι η λύση της εξίσωσης (3.3). Το μήκος του φίλτρου πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο, έτσι ώστε να περιλαμβάνει και την κυματομορφή (basic wavelet).

$$\begin{pmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \cdots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \cdots & r_{n-2} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \cdots & r_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n-1} & r_{n-2} & r_{n-3} & \cdots & r_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_\alpha \\ r_{\alpha+1} \\ r_{\alpha+2} \\ \vdots \\ r_{\alpha+n-1} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

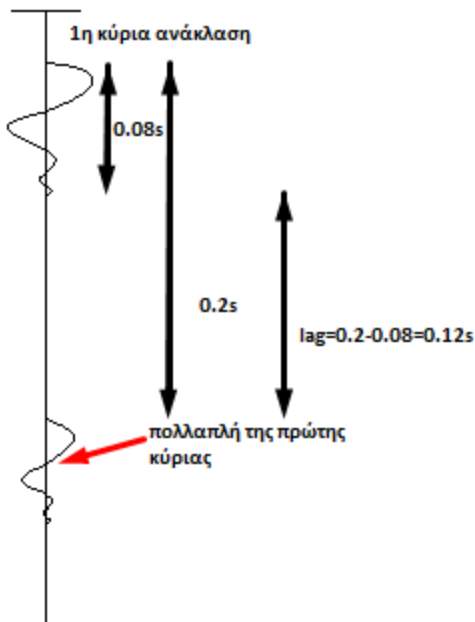
Όπου  $a(t) : (a_0, a_1, a_2, a_3, \dots)$  το φίλτρο  $n$ -μεγέθους,  $r(t) : (r_0, r_1, r_2, r_3, r_{n-1})$  ο πίνακας αυτοσυσχέτισης (autocorrelation) σειсмоγράμματος και  $r(a) : (r_\alpha, r_{\alpha+1}, r_{\alpha+2}, \dots, r_{\alpha+n-1})$  τα δεδομένα που προκύπτουν μετά την εφαρμογή του φίλτρου μετά από κάποιο lag= $\alpha$  (χρόνο καθυστέρησης).

Αν το lag=1, η παραπάνω γενικευμένη εξίσωση της αποσυνέλιξης πρόβλεψης (Predictive Deconvolution) μετατρέπεται στην εξίσωση (3.4), όπου περιγράφει την περίπτωση της αποσυνέλιξης αιχμής (Spiking Deconvolution).

$$\begin{pmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \cdots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \cdots & r_{n-2} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \cdots & r_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n-1} & r_{n-2} & r_{n-3} & \cdots & r_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Επομένως, η αποσυνέλιξη αιχμής είναι μία ειδική περίπτωση της αποσυνέλιξης πρόβλεψης με  $\text{lag}=1$ . Ιδανικά μπορεί να μετατρέψει το κυματίδιο του σειсмоγράφματος στην χρονοσειρά των συντελεστών ανάκλασης (δημιουργία των spikes). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται βελτίωση της χρονικής διακριτικής ικανότητας, δηλαδή διάκριση δύο ανακλάσεων που προέρχονται από λεπτά στρώματα οι οποίες πριν από την αποσυνέλιξη εμφανίζονταν ως μία ανάκλαση.

Για την όσο δυνατόν καλύτερη απόσβεση των πολλαπλών ανακλάσεων η επιλογή του βέλτιστου χρόνου καθυστέρησης ( $\text{lag}$ ) είναι πολύ σημαντική. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι πολλαπλές ανακλάσεις σχετίζονται με μια περιοδικότητα. Για την επιλογή του σωστού  $\text{lag}$ , σημαντικό ρόλο παίζει η περιοδικότητα αλλά και η διάρκεια ταλάντωσης της κυματομορφής της κύριας ανάκλασης. Ο όρος  $\text{lag}$  αναφέρεται ως η καθυστέρηση σε  $s$  από την κυρία ανάκλαση έως την αρχή εμφάνισης της πολλαπλής της. Για να γίνει κατανοητή η παράμετρος  $\text{lag}$ , δημιουργήθηκε εικόνα (Σχήμα 3.9) όπου παρουσιάζονται μία κύρια ανάκλαση και η πολλαπλή της, καθώς και οι υποθετικές τιμές που δόθηκαν στην διάρκεια ταλάντωσης της πρώτης αλλά και στο χρονικό διάστημα που πέρασε από την αρχή της πρώτης έως την αρχή της δεύτερης.



**Σχήμα 3.9:** Χρόνος καθυστέρησης  $\text{lag}$  μεταξύ μίας κύριας ανάκλασης και της πολλαπλής της.

Η τρίτη παράμετρος η οποία πρέπει να δοθεί στον αλγόριθμο της Αποσυνέλιξης Πρόβλεψης προκειμένου να μειωθεί η ενέργεια των πολλαπλών είναι το επίπεδο του τεχνητού θορύβου



(Prewhitening). Η παράμετρος αυτή παίρνει τιμές κοντά στο 0 και χρησιμοποιείται καθαρά για υπολογιστικούς λόγους. Η αποσυνέλιξη στο χώρο των συχνοτήτων πραγματοποιείται με την διαίρεση του φάσματος του σειсмоγράφματος προς το φάσμα της κυματομορφής της πηγής (Brigham, 1974). Αν βρεθούν κάποιες τιμές ίσες με το μηδέν στον παρονομαστή της διαίρεσης, τότε αυτές απειρίζουν το αποτέλεσμα. Για το σκοπό αυτό εισάγεται η μεταβλητή Prewhitening (τυχαίος θόρυβος) έτσι ώστε να μην μηδενίζεται ποτέ ο παρονομαστής.

### 3.4.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΠΟΣΥΝΕΛΙΞΗΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ

Η αποσυνέλιξη πρόβλεψης αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος στο λογισμικό Matlab, προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος στα δεδομένα. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δημιουργήθηκε στο εργαστήριο Γεωφυσικής του Πανεπιστημίου της Αλμπέρτα του Καναδά [<sup>6</sup>]. Τα δεδομένα στα οποία εφαρμόστηκε ο παραπάνω αλγόριθμος είναι αυτά στα οποία έχει προστεθεί θόρυβος 10 % και έχουν υποστεί απομάκρυνση του φαινομένου ghost.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε έχει όνομα  $[f, o] = \text{predictive}(w, NF, L, \mu)$  ;

Με δεδομένα εισόδου τα ίχνη των 200 δεκτών κάθε πηγής  $w$ , το μήκος του φίλτρου  $NF$  (ms), η καθυστέρηση αλλιώς  $lag$  ή  $L$  (ms) και το Prewhitening (τεχνητός θόρυβος) αλλιώς  $\mu$ . Τα δεδομένα εξόδου είναι το φίλτρο της αποσυνέλιξης πρόβλεψης ( $f$ ) και τα δεδομένα ( $o$ ) μετά την εφαρμογή του φίλτρου (απαλλαγμένα από το είδος των πολλαπλών που μελετήσαμε στο κεφάλαιο αυτό). Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για αρκετές πηγές μέχρι να βρεθούν οι βέλτιστες παράμετροι (μήκος φίλτρου,  $lag$ , Prewhitening). Οι βέλτιστες τιμές που προέκυψαν κατόπιν δοκιμών, είναι: - μήκος φίλτρου = 320 ms

- $lag = 272$  ms

-επίπεδο τεχνητού θορύβου = 0.01%

Η πρώτη προσέγγιση του μήκους φίλτρου έγινε μετρώντας το χρόνο ταλάντωσης της πρώτης κύριας ανάκλασης για έναν δέκτη. Κατόπιν έγιναν διορθώσεις. Η αρχική προσέγγιση για το  $lag$  είναι συνδεδεμένη με την θεωρία που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 3.4. Η τιμή του τεχνητού θορύβου ορίστηκε κατόπιν δοκιμών. Μετά την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων ο αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε με αυτές τις τρεις τιμές και για τις 61 πηγές του μοντέλου. Έτσι προέκυψαν δεδομένα που έχουν θόρυβο 10%, είναι απαλλαγμένα από ghost και έχει εφαρμοστεί σε αυτά και η μέθοδος της αποσυνέλιξης πρόβλεψης. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου στα δεδομένα της εργασίας θα παρουσιαστεί συγκρίνοντας τα deghosted δεδομένα με θόρυβο με αυτά που προέκυψαν μετά τη μέθοδο αποσυνέλιξης (Predictive Deconvolution) στην αμέσως επόμενη παράγραφο με τίτλο 'Αποτελέσματα Μεθόδου και Συγκρίσεις'.

Τέλος, είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι έγινε προσπάθεια εφαρμογής και της μεθόδου αποσυνέλιξης αιχμής (spiking deconvolution) στα συνθετικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα της μεθόδου δεν ήταν τα επιθυμητά, επομένως δεν ήταν άξια παρουσίασης.

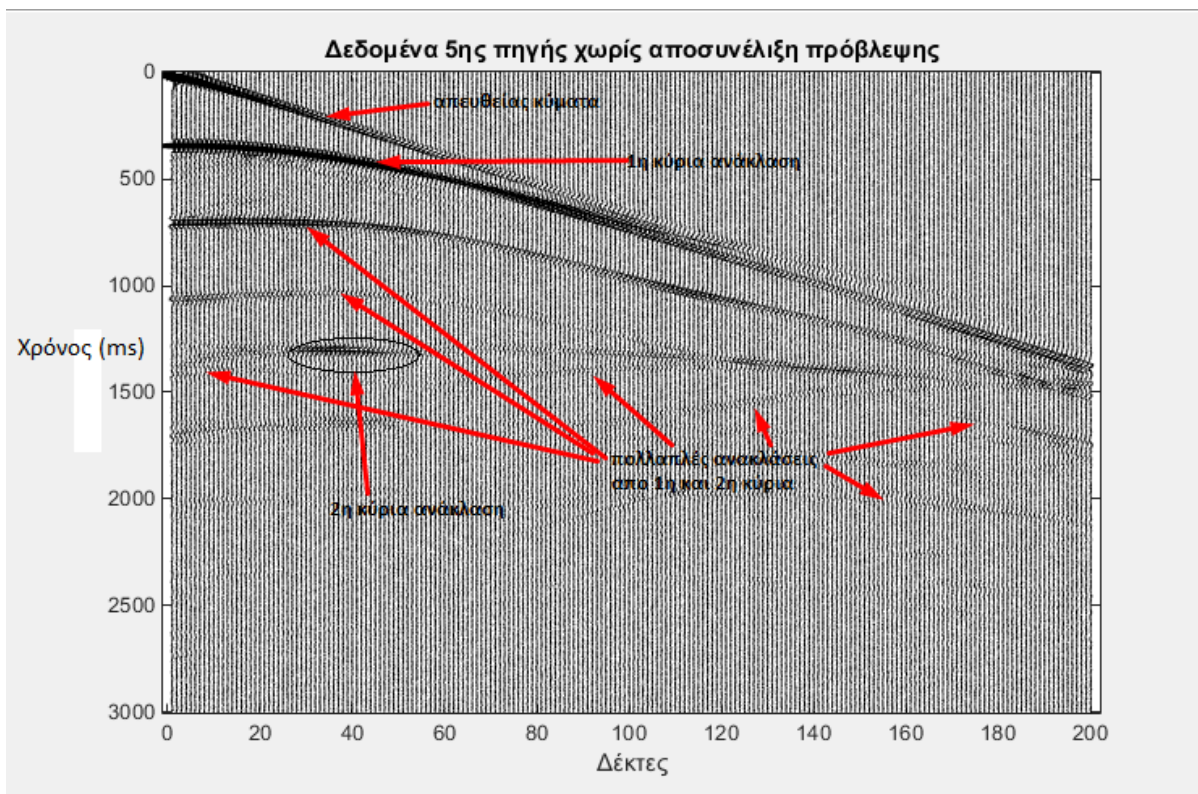
<sup>6</sup> πηγή από το διαδίκτυο <https://www.seismic-lab.physics.ualberta.ca>

### 3.4.1.1 Αποτελέσματα Μεθόδου και Συγκρίσεις

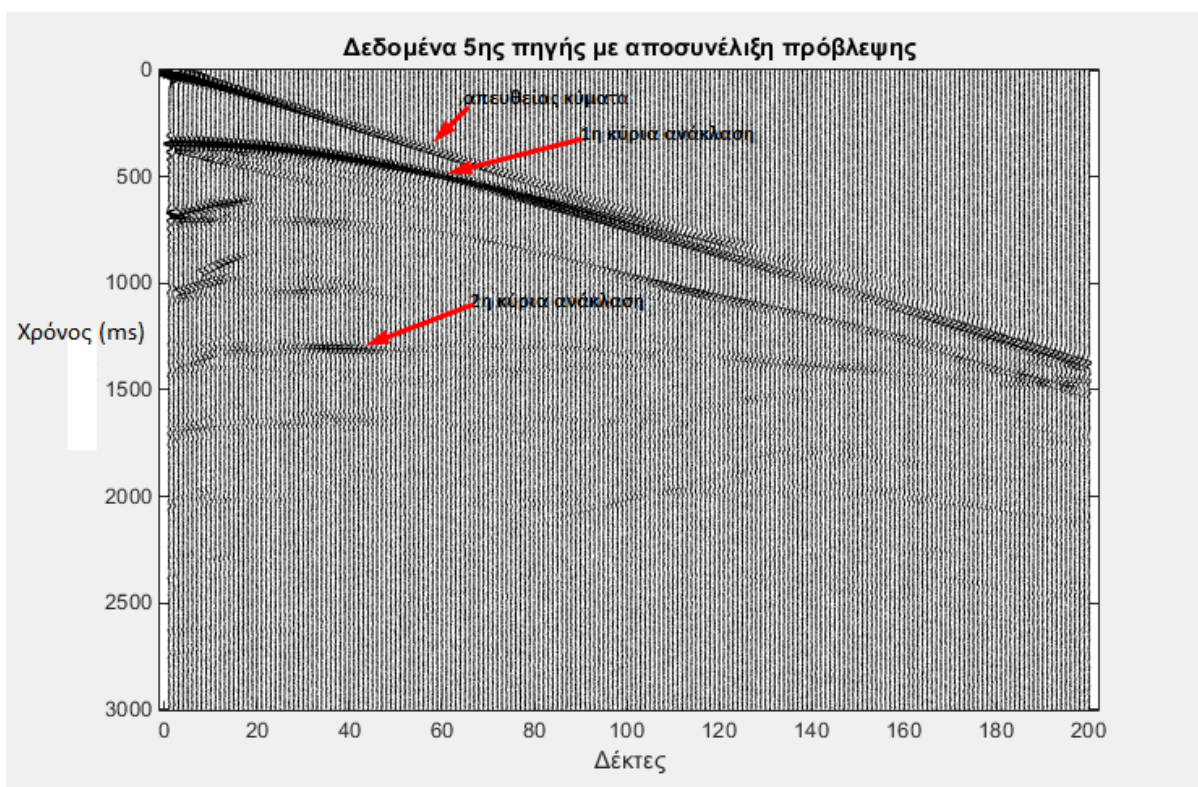
Σε αυτή την παράγραφο, πραγματοποιούνται συγκρίσεις δεδομένων για τα δύο τελευταία στάδια επεξεργασίας έως και τώρα, με σκοπό να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα και παρατηρήσεις, αλλά και να εξεταστεί αν ο αλγόριθμος εν τέλει λειτούργησε ικανοποιητικά στα δεδομένα της εργασίας.

Για να γίνει αντιληπτή η λειτουργία του φίλτρου αποσυνέλιξης επιλέχθηκαν ενδεικτικά τα δεδομένα δύο πηγών του μοντέλου. Η 5<sup>η</sup> πηγή που βρίσκεται στα πρώτα 410m του μοντέλου και η 39<sup>η</sup> πηγή που βρίσκεται στα 3810m (Σχήμα 2.2). Και για τις δύο πηγές δημιουργήθηκαν δύο γραφήματα. Στο πρώτο απεικονίζονται τα 200 ίχνη των δεκτών (που αντιστοιχούν για την κάθε πηγή) που είναι απαλλαγμένα από ghost φαινόμενα και έχουν τυχαίο θόρυβο 10% και στο δεύτερο απεικονίζονται τα δεδομένα αυτά μετά την εφαρμογή της μεθόδου αποσυνέλιξης πρόβλεψης.

Αρχικά, στην περιοχή όπου έχει τοποθετηθεί η 5<sup>η</sup> πηγή, οι αναμενόμενοι ανακλαστήρες όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2 είναι τρεις. Παρ' όλα αυτά στα δεδομένα καταγραφής (Σχήμα 3.10 και 3.11) είναι εμφανείς μονάχα οι δύο πρώτοι. Αυτό αιτιολογείται έχοντας στο νου ότι τα σεισμικά κύματα εξασθενούν καθώς διαδίδονται στο υπέδαφος, με αποτέλεσμα να μην φτάνουν στους δέκτες ή να φτάνουν αλλά η ενέργεια τους να είναι πολύ χαμηλή. Επίσης η παρουσία των Μεσοζωικών εβαποριτών (στρώμα 4<sup>ο</sup>) μειώνει την διακριτική ικανότητα των βαθύτερων τμημάτων λόγω της μεγάλης απορρόφησης ενέργειας (Κόκκινου, 2002). Υπολογίζοντας τους διπλούς κατακόρυφους χρόνους για τους τρεις ανακλαστήρες προέκυψε ότι ο διπλός κατακόρυφος χρόνος του 3<sup>ου</sup> ανακλαστήρα είναι περίπου 1857 ms. Επομένως πιθανολογείται ότι μετά την εφαρμογή του φίλτρου (Σχήμα 3.13) στην περιοχή από 1500 ms έως 2000 ms, μια από τις ανακλάσεις που έχουν απομείνει να είναι η 3<sup>η</sup> κύρια. Γενικά συγκρίνοντας τα Σχήματα 3.10 και 3.11, με προσεκτική παρατήρηση διαπιστώνεται ότι σε αυτή τη περιοχή έχει επιτευχθεί η απομάκρυνση των πολλαπλών σε ικανοποιητικό βαθμό. Παρόλο που η διαδικασία εντοπισμού του 2<sup>ου</sup> ανακλαστήρα φάνταζε πολύ δύσκολη, διότι κύρια και πολλαπλές φθάνουν ταυτόχρονα στους δέκτες, μετά την αποσυνέλιξη πρόβλεψης, η ενέργεια των πολλαπλών εξασθενεί και παραμένει αυτή της κύριας.

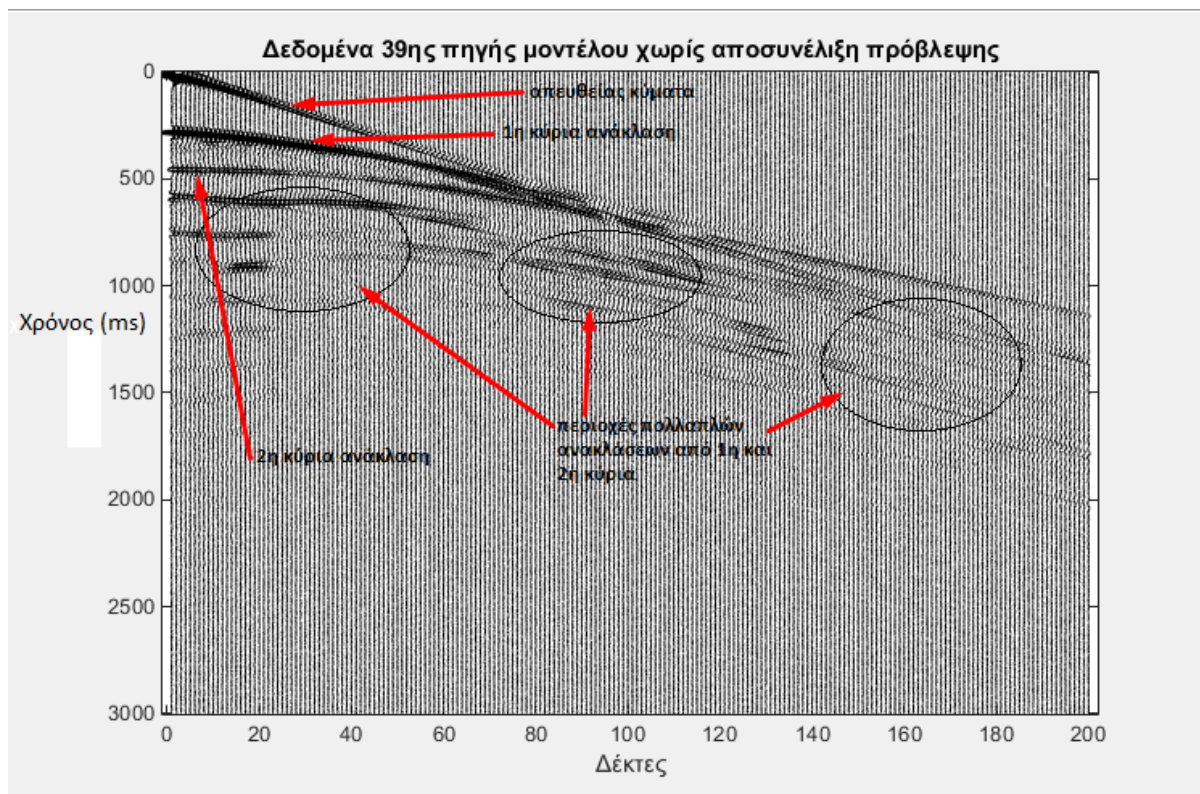


**Σχήμα 3.10:** Deghosted δεδομένα της 5<sup>ης</sup> πηγής πριν την εφαρμογή της αποσυνέλιξης πρόβλεψης



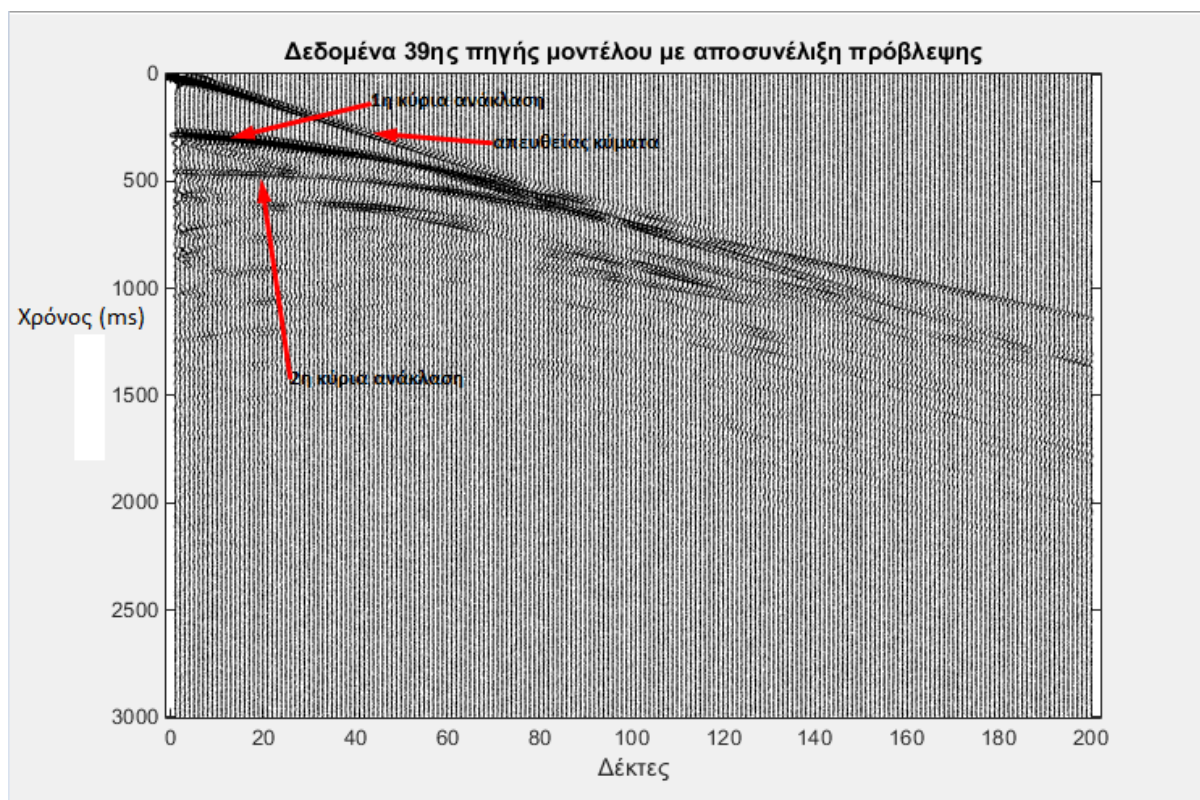
**Σχήμα 3.11:** Deghosted δεδομένα της 5<sup>ης</sup> πηγής μετά την εφαρμογή της αποσυνέλιξης πρόβλεψης

Στην περιοχή ενδιαφέροντος, όπου εμφανίζεται διαπυρισμός αλατούχου δόμου (περιοχή κοντά στην 39<sup>η</sup> πηγή μοντέλου) οι προβλεπόμενες κύριες ανακλάσεις είναι δύο. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.12 οι πολλαπλές ανακλάσεις μολύνουν την καταγραφή, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ψευδείς εντυπώσεις για επιπρόσθετους κύριους ανακλαστήρες. Μετά την εφαρμογή του φίλτρου αποσυνέλιξης (Σχήμα 3.13) διαπιστώνεται ότι ο αλγόριθμος έδρασε ικανοποιητικά αφού το μεγαλύτερο μέρος των πολλαπλών έχει εξαλειφθεί.



**Σχήμα 3.12:** Deghosted δεδομένα της 39<sup>ης</sup> πηγής πριν την εφαρμογή της αποσυνέλιξης πρόβλεψης.





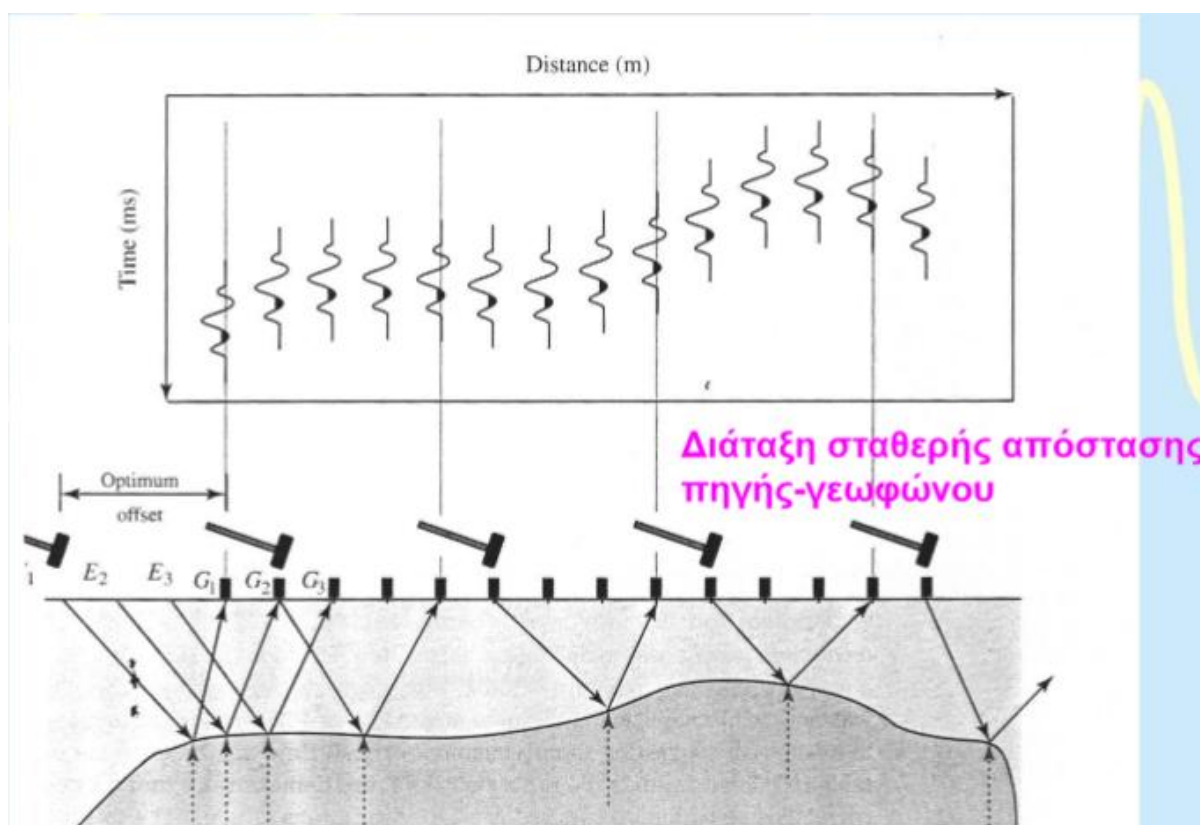
**Σχήμα 3.13:** Deghosted δεδομένα της 39<sup>ης</sup> πηγής μετά την εφαρμογή της αποσυνέλιξης πρόβλεψης

### 3.5 ΑΝΑΔΙΑΤΑΞΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΟΙΝΗΣ ΠΗΓΗΣ

Έχοντας δημιουργήσει το μοντέλο προσομοίωσης, τα συνθετικά δεδομένα που προέκυψαν ήταν σε διάταξη κοινής πηγής (για κάθε μία πηγή λαμβάνονται σεισμικά ίχνη από 200 δέκτες). Στο συγκεκριμένο σημείο της εργασίας πραγματοποιείται αναδιάταξη των δεδομένων κοινής πηγής, σε δεδομένα διάταξης σταθερής απόστασης πηγής-γεωφώνου (Common Offset) καθώς και σε διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου (Common midpoint gather, CMP gather). Οι δύο αναδιατάξεις γίνονται για διαφορετικούς σκοπούς η κάθε μία. Αναλυτικότερα, μετά την δημιουργία του μοντέλου, στοιχεία για την γεωμετρία του πειράματος έχουν αποθηκευτεί στην βάση δεδομένων, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση (sorting) των σεισμικών ιχνών (seismic traces) ή αλλιώς σειсмоγραμμάτων σε ομάδες καταγραφών κοινής πηγής (shot gathers) ή σε καταγραφές σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (Common Offset) ή σε καταγραφές κοινού ενδιάμεσου σημείου (CMP).

### 3.5.1 ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΠΗΓΗΣ-ΔΕΚΤΗ

Οι καταγραφές κοινής απόστασης πηγής – δέκτη (Common Offset) αποτελούν μια γρήγορη απεικόνιση του υπεδάφους αλλά δεν είναι τόσο αποτελεσματικές καθώς υπάρχουν έντονες πολλαπλές ανακλάσεις. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.14 στη διάταξη σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη χρησιμοποιούνται μια πηγή και ένας δέκτης κάθε φορά. Επομένως λαμβάνεται μονάχα ένα σεισμικό ίχνος με κάθε εκτόνωση της πηγής. Η απόσταση παραμένει σταθερή σε κάθε μετατόπιση του συστήματος πηγής-δέκτη, και παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για τα αποτελέσματα της καταγραφής. Έτσι η ανάγκη εύρεσης της βέλτιστης απόστασης (Optimum Offset) είναι μεγάλη.



Σχήμα 3.14: Διάταξη σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη [7].

Η αναδιάταξη των δεδομένων κοινής πηγής σε αυτό το στάδιο έγινε με την βοήθεια του αλγορίθμου:

```
[MPpos, Time, CoffVx, CoffVz]=CommonOffset_Synthetics_Ver10(Coffset, resamp);
```

Με δεδομένα εισόδου: - Coffset :σταθερή απόσταση πηγής-δέκτη (m)

-resamp :αναδειγματοληψία ανά κάποιο χρονικό διάστημα (ms)

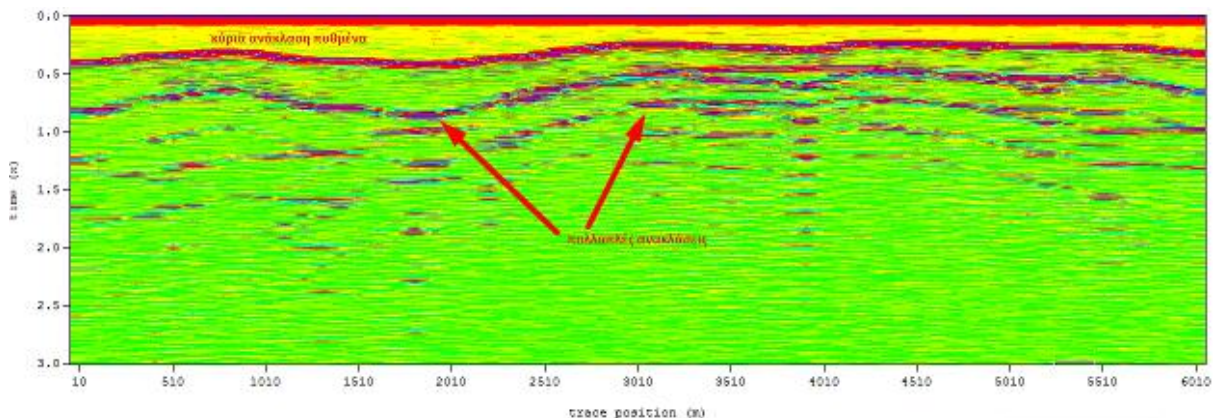
Με δεδομένα εξόδου: - MPpos:διάνυσμα θέσεων των σεισμικών ίχνων (δεκτών) σε μέτρα

<sup>7</sup> πηγή από το διαδίκτυο, στις διαλέξεις του μαθήματος Σεισμικές Μέθοδοι (Βαφείδης) - [https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/MHXOP102/02\\_Diata3eis\\_NMO2012.pdf](https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/MHXOP102/02_Diata3eis_NMO2012.pdf)

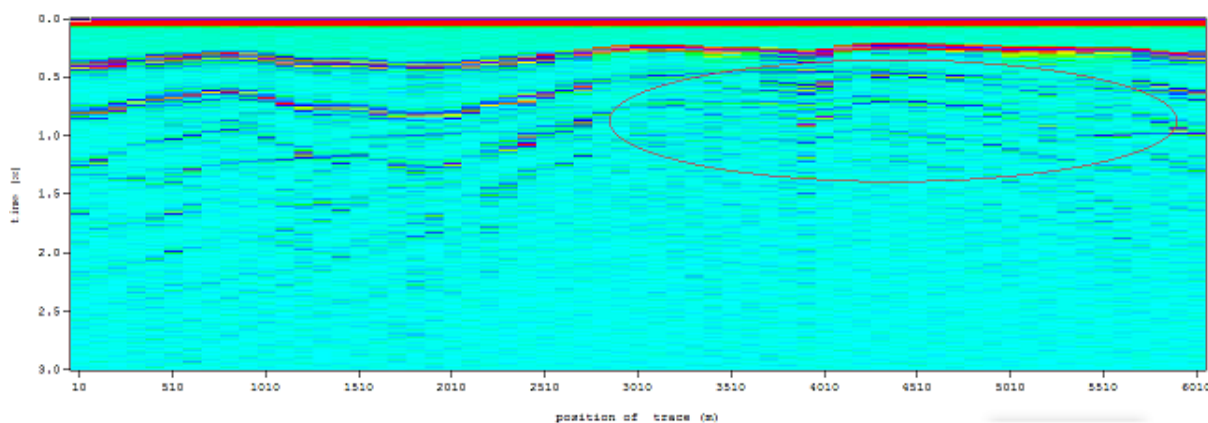
- Time:διάνυσμα του χρόνου (s)
- CoffVx:δεδομένα Vx σε διάταξη σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη
- CoffVz: δεδομένα Vz σε διάταξη σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη

Καθώς τρέχει ο αλγόριθμος ζητείται από τον χρήστη να εισαχθούν δεδομένα που περιέχουν στοιχεία για την γεωμετρία του πειράματος (.SRC,.RCV) καθώς και τα δεδομένα Vz (βλ.§2.3). Η μεταβλητή Coffset ορίστηκε ίση με 0, πράγμα που σημαίνει ότι η θέση του ίχνους του δέκτη σε κάθε βήμα θα είναι αυτή της πηγής. Η τιμή 0 δόθηκε και στην μεταβλητή resamp, δηλαδή δεν υπήρξε αναδειγματοληψία σε κάποιο χρονικό διάστημα στο πείραμα. Αφού ορίστηκαν οι δυο μεταβλητές, ο αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε δύο φορές: μια πριν και μετά τη αποσυνέλιξη. Τα δεδομένα με διάταξη σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη απεικονίστηκαν με το πρόγραμμα Transform.

Όπως είναι φανερό μετά τις απεικονίσεις των δεδομένων με διάταξη σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη, με την εφαρμογή φίλτρου αποσυνέλιξης πρόβλεψης (Σχήμα 3.16) και χωρίς (Σχήμα 3.15), παρέχεται μία γρήγορη ένδειξη του υπεδάφους της περιοχής μελέτης. Σε αυτές τις δύο εικόνες είναι εμφανείς οι ανακλάσεις από τον πυθμένα της θάλασσας και οι πολλαπλές τους. Συγκρίνοντας τα δύο σχήματα, συμπεραίνουμε πως και σε αυτή τη διάταξη η επίδραση του φίλτρου αποσυνέλιξης στα δεδομένα είναι σημαντική, καθώς η 2<sup>η</sup> εικόνα καθαρίζει σε αρκετά μεγάλο βαθμό από τις πολλαπλές, κυρίως στις θέσεις των δεκτών από 2800 έως 6000 μέτρα.



**Σχήμα 3.15:** Δεδομένα σε διάταξη κοινής απόστασης πηγής-δέκτη πριν την μέθοδο αποσυνέλιξης πρόβλεψης.

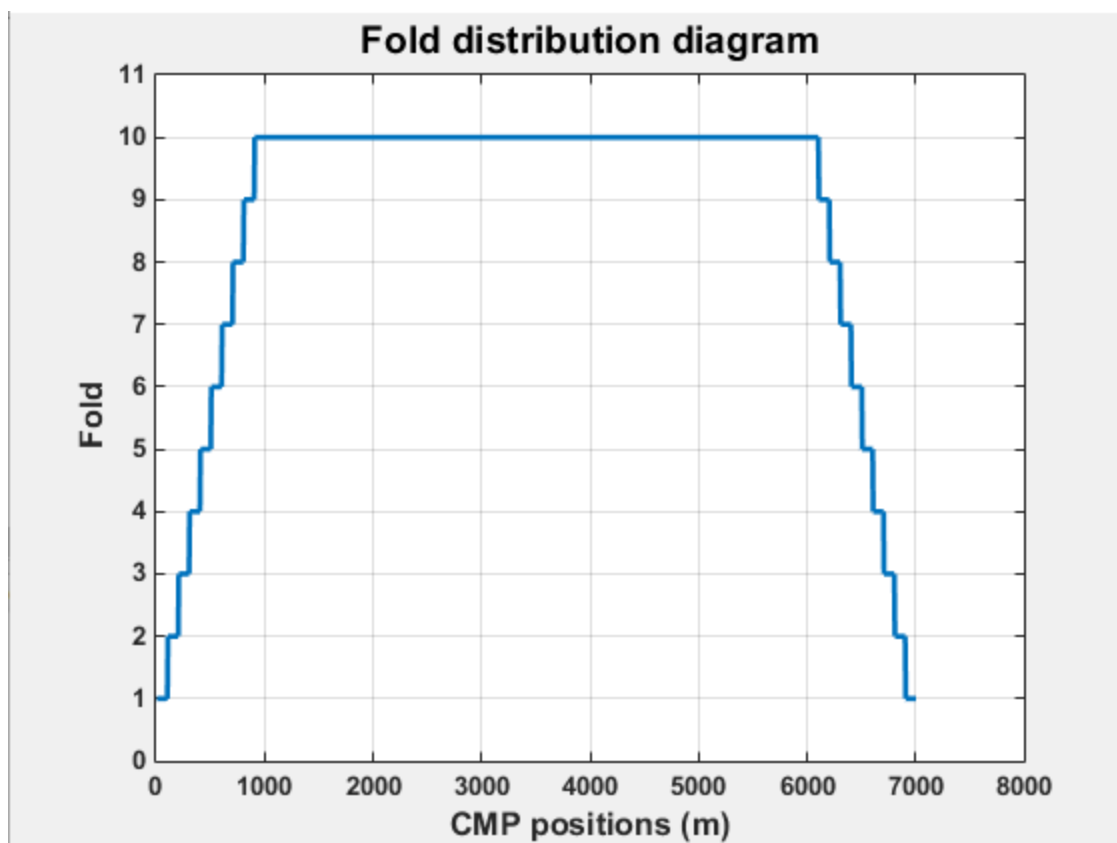


**Σχήμα 3.16:** Δεδομένα σε διάταξη κοινής απόστασης πηγής-δέκτη μετά την μέθοδο αποσυνέλιξης πρόβλεψης.

### 3.5.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΟΙΝΟΥ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ

Στο συγκεκριμένο στάδιο της επεξεργασίας τα δεδομένα μετασχηματίζονται από καταγραφές κοινής πηγής σε κοινού σημείου βάθους (Common depth point gather, CDP gather) ή ορθότερα σε κοινού ενδιάμεσου σημείου (Common midpoint gather, CMP gather) αφού οι ανακλαστήρες μας δεν είναι οριζόντιοι (βλ. §1.3.4). Για την αναδιάταξη των δεδομένων καταγραφής τα σεισμικά ίχνη από διαφορετικές καταγραφές κοινής πηγής με κοινό ενδιάμεσο σημείο ομαδοποιούνται σχηματίζοντας καταγραφή κοινού ενδιάμεσου σημείου (CMP gather). Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 1.3.4, ο αριθμός των σεισμικών ιχνών, που ανήκουν στην ίδια διάταξη «κοινού ενδιάμεσου σημείου (CMP)», εκφράζει την υπεδαφική κάλυψη (Fold), η οποία είναι μία από τις κυριότερες παραμέτρους στη σεισμική ανάκλαση. Για το συγκεκριμένο πείραμα η μέγιστη υπεδαφική κάλυψη (fold) ισούται με 10 (Σχήμα 3.17). Η διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου μέχρι σήμερα χρησιμοποιείται κατά κόρον, επειδή βελτιώνεται αρκετά ο λόγος σήματος προς θόρυβο, ενώ παράλληλα εξασθενούν αρκετά και οι πολλαπλές ανακλάσεις (Κόκκινου, 2002). Επίσης πρέπει αναφερθεί ότι η αναδιάταξη αυτή έγινε με σκοπό να πραγματοποιηθούν και τα επόμενα στάδια της επεξεργασίας, που είναι κατά σειρά η ανάλυση ταχυτήτων, η διόρθωση της κανονικής χρονικής απόκλισης (NMO), η σεισμική υπέρθεση και η χωροθέτηση.



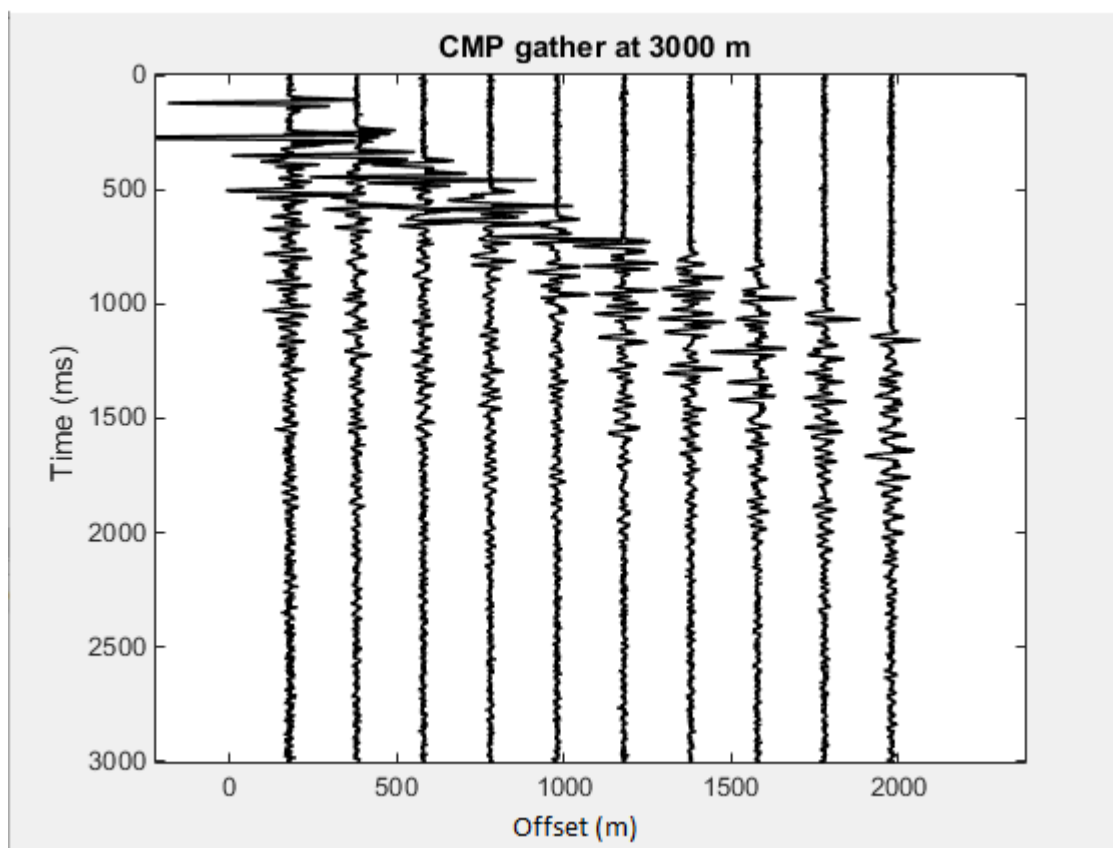


**Σχήμα 3.17:** Διακύμανση της υπεδαφικής κάλυψης (fold) κατά μήκος του μοντέλου.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την συγκεκριμένη αναδιάταξη είναι:

```
[CMPx, CMPz]=CMP_Synthetics_Ver11;
```

Και σε αυτό το στάδιο έγινε αναδιάταξη των δεδομένων πριν και μετά την εφαρμογή του φίλτρου αποσυνέλιξης. Επομένως και σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος έτρεξε δύο φορές προκειμένου να δημιουργηθούν τα επιθυμητά CMPs. Μετά την πληκτρολόγηση της εντολής ο χρήστης καλείται να εισάγει τα δεδομένα της γεωμετρίας του πειράματος (.SRC,.RCV,.SMP) καθώς και τα δεδομένα  $V_z$  (βλ. §2.3). Μετά την εισαγωγή των παραπάνω, θα προκύψουν δεδομένα CMPx και CMPz. Και σε αυτή την περίπτωση για όλες τις απαραίτητες συγκρίσεις, απεικονίσεις αλλά και τα επόμενα στάδια επεξεργασίας θα χρησιμοποιηθούν τα CMPz δεδομένα. Στο Σχήμα 3.18 παρουσιάζονται τα 10 σεισμικά ίχνη (υπεδαφική κάλυψη = 10) για το κοινό ενδιαμέσο σημείο στα 3000m του μοντέλου προσομοίωσης, συναρτήσει της απόστασης των δεκτών από την εκάστοτε πηγή. Το συγκεκριμένο κοινό ενδιαμέσο σημείο παρουσιάζει μέγιστη υπεδαφική κάλυψη στο μοντέλο.



**Σχήμα 3.18:** Σεισμικά ίχνη για το κοινό ενδιάμεσο σημείο στα 3000 m.

## 3.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο της επεξεργασίας περιγράφεται η διαδικασία της ανάλυσης ταχυτήτων. Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης ταχύτητας (velocity analysis) έγινε ταξινόμηση των καταγραφών κοινής πηγής σε καταγραφές κοινού ενδιάμεσου σημείου. Η συγκεκριμένη ανάλυση αποτελεί ένα από τα πιο χρονοβόρα τμήματα της επεξεργασίας και απαιτεί εξαιρετική προσοχή. Με την διαδικασία αυτή προσδιορίζεται η μέση τετραγωνική ταχύτητα ( $V_{rms}$ ). Κατά την ολοκλήρωση της ανάλυσης ταχυτήτων (velocity analysis) παρέχονται τα πρώτα στοιχεία για την περιοχή που ερευνάται και τυχόν αλλαγές στην τιμή της ταχύτητας είναι δυνατό να υποδηλώνουν στρωματογραφικές ή/και λιθολογικές μεταβολές. Η εύρεση της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας ( $V_{rms}$ ) έχει μεγάλη σημασία για την περαιτέρω πορεία της επεξεργασίας, αλλά και για τη μετατροπή του χρόνου διαδρομής σε βάθος. Σύμφωνα με απόσπασμα της διπλωματικής εργασίας του Μπριντάκη Ιωάννη (2016) η ανάλυση της ταχύτητας (velocity analysis) είναι η βάση για τη διόρθωση της Κανονικής Χρονικής Απόκλισης (NMO). Οι υπολογισθείσες ταχύτητες

χρησιμοποιούνται στην εν λόγω διόρθωση για να ευθυγραμμιστούν οι ανακλάσεις των καταγραφών κοινού ενδιάμεσου σημείου.

Η μέση τετραγωνική ταχύτητα ορίζεται ως η τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής του τετραγώνου των ταχυτήτων πολλαπλασιασμένων με συντελεστές βαρύτητας, τους διπλούς χρόνους διαδρομής, t. Η αντίστοιχη εξίσωση παρουσιάζεται παρακάτω (Βαφείδης, 2011):

$$V_n = \left[ \frac{\sum_{j=1}^n \alpha_j^2 t_j}{\sum_{j=1}^n t_j} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

$$t_j = 2 \frac{d_j}{a_j} \quad (3.6)$$

Όπου: -  $V_n$ : η μέση τετραγωνική ταχύτητα

-  $\alpha_j$ : η ταχύτητα διάδοσης του σεισμικού κύματος στο στρώμα j.

-  $t_j$ : ο διπλός χρόνος διαδρομής στο στρώμα j

-  $d_j$ : το πάχος του στρώματος j

Η εξίσωση της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας υπολογίσθηκε από τους Dix(1955) και Durbraun(1954) και Kerry(1951) και αποτελεί την σημαντικότερη εξίσωση για τον υπολογισμό των σεισμικών ταχυτήτων.

Η τμηματική ταχύτητα  $a_n$  στο νιοστό στρώμα κατά την μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης, υπολογίζεται με τη βοήθεια των μέσων τετραγωνικών ταχυτήτων,  $V_{rms}(n)$  και των διπλών χρόνων διαδρομής της κατακόρυφης ακτίνας,  $T_n(0)$  και  $T_{n-1}(0)$ . Η αντίστοιχη εξίσωση είναι:

$$\alpha_n^2 = \frac{V_n^2 T_n(0) - V_{n-1}^2 T_{n-1}(0)}{T_n(0) - T_{n-1}(0)} \quad (3.7)$$

Όπου:-  $V_n$ : μέση τετραγωνική ταχύτητα

-  $T_n$ : διπλός χρόνος διαδρομής

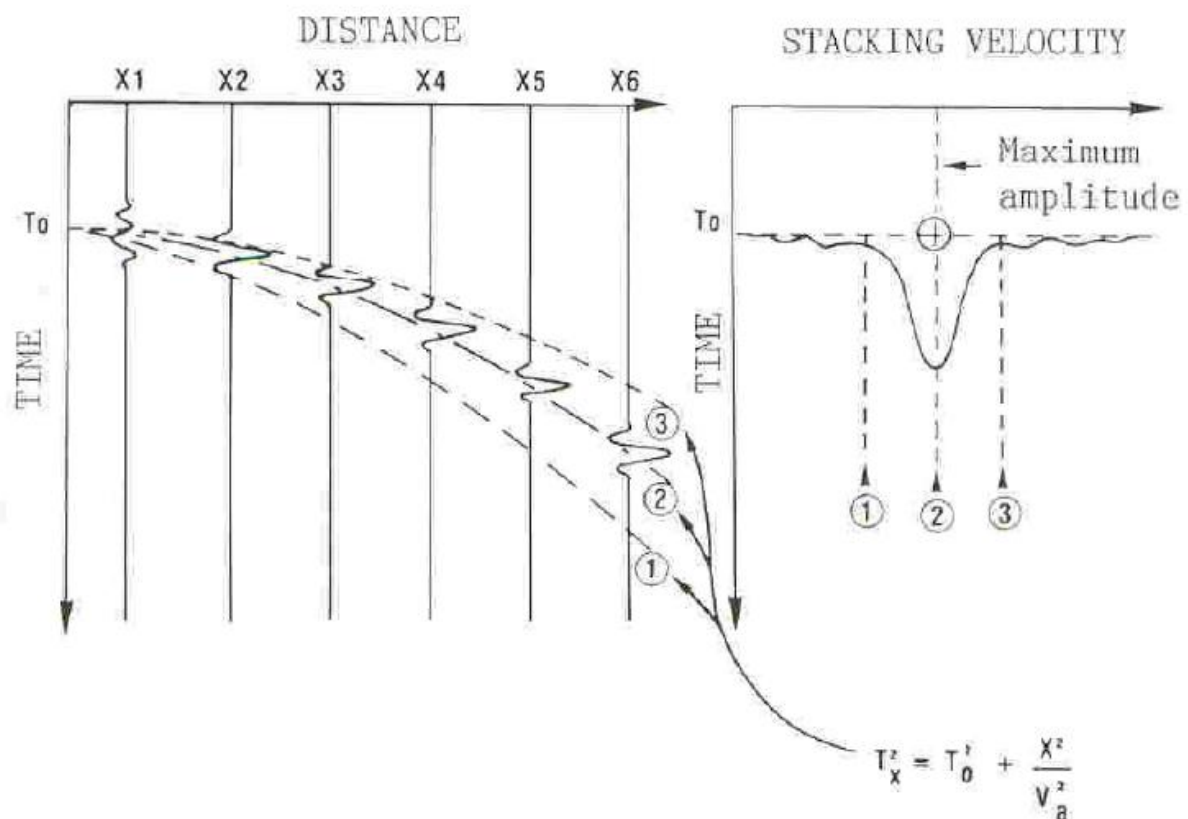
Στο συγκεκριμένο σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν πολλοί τρόποι πραγματοποίησης της διαδικασίας της ανάλυσης ταχύτητας. Σκοπός της ανάλυσης είναι η αναζήτηση της εξίσωσης της υπερβολής που ταιριάζει καλύτερα στις καταγραφές από ανακλώμενα κύματα. Η σωστή τοποθέτηση καθορίζεται οπτικά ή αριθμητικά. Για τα ίχνη που προέρχονται από κοινό σημείο ανάκλασης (δεδομένα CDP), ο υπολογισμός της ταχύτητας ξεκινάει με την εκτίμηση του κάθετου διπλού χρόνου διαδρομής  $T_0$ . Για την τιμή αυτή του χρόνου, επιλέγεται ένας αριθμός τιμών  $V_{RMS}$  και υπολογίζεται η συνάφεια των σημάτων για κάθε ίχνος κατά μήκος της υπερβολής με εξίσωση:

$$Tx^2 = T_0^2 + \frac{x^2}{V_{rms}^2} \quad (3.8)$$

Όπου:

- $T_x$  : ο ολικός χρόνος διαδρομής
- $X$  : η απόσταση πηγής δέκτη
- $T_0$  : ο διπλός κατακόρυφος χρόνος
- $V_{rms}$  : μέση τετραγωνική ταχύτητα

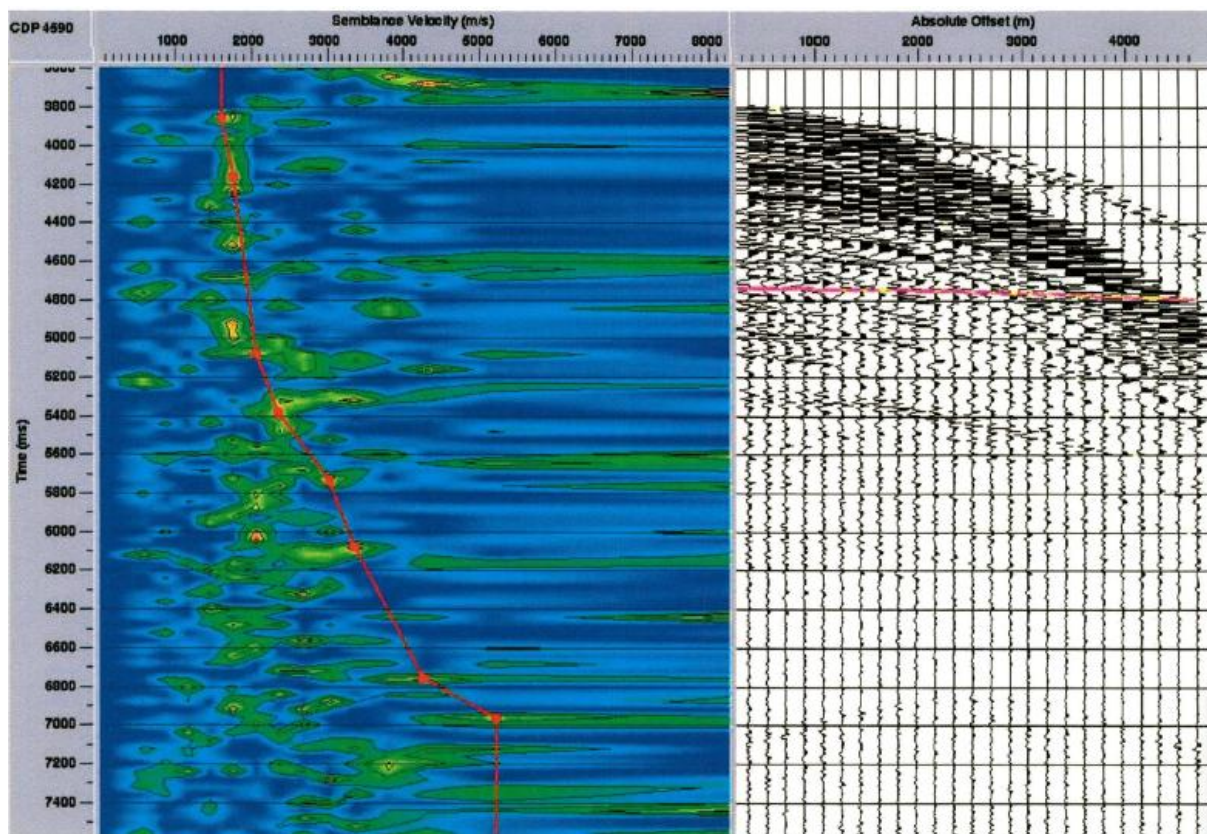
Από την υπερβολή με την καλύτερη συνάφεια θα προκύψει η βέλτιστη ταχύτητα  $V_{RMS}$  για τη δεδομένη τιμή του  $T_0$ . Η ίδια διαδικασία για την συγκεκριμένη καταγραφή CMP, πραγματοποιείται για διάφορες τιμές διπλών κατακόρυφων χρόνων ( $T_0$ ).



Σχήμα 3.19: Αρχή της ανάλυσης ταχύτητας (Cordier, 1985).

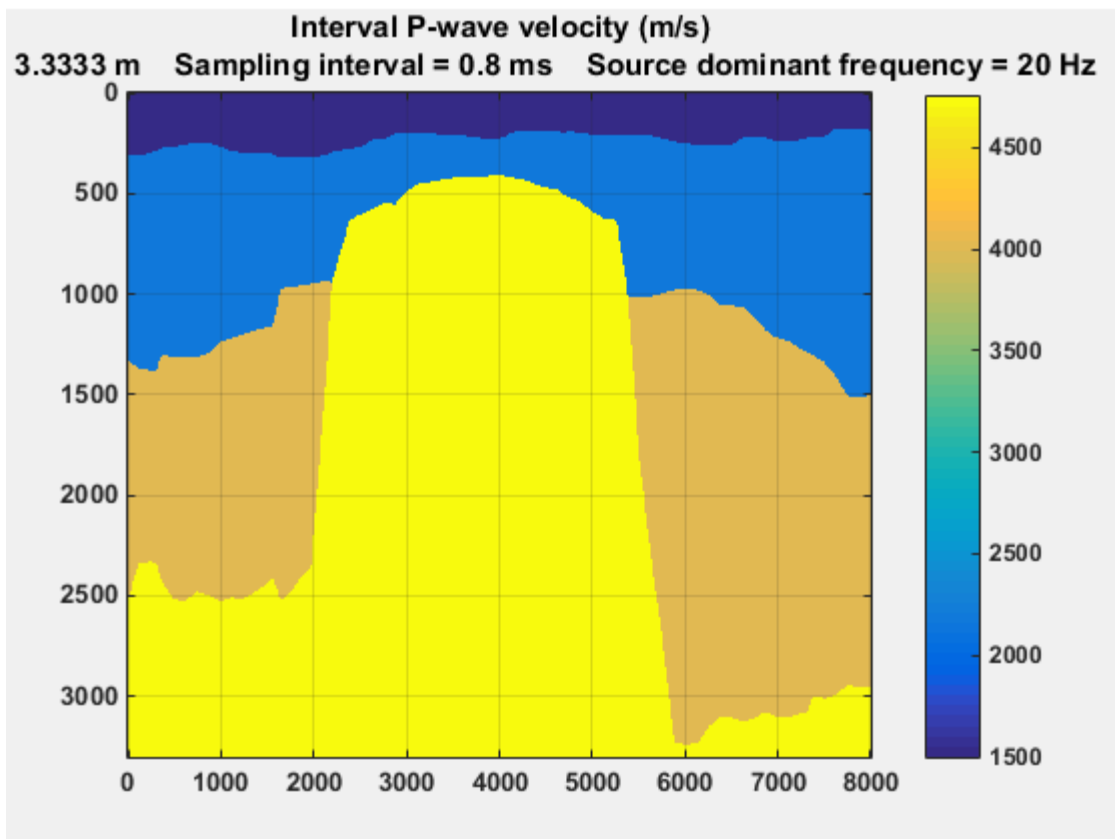
Στο Σχήμα 3.19 η υπερβολή (2) είναι αυτή που αποτυπώνει καλύτερα τα σήματα που βρίσκονται σε φάση και έτσι καθορίζει την ταχύτητα. Ακόμα και στις λεπτομερείς καταγραφές, οι ανακλάσεις δε βρίσκονται ακριβώς πάνω στην υπερβολή και έτσι η τιμή της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας αντιστοιχεί στην καλύτερη δυνατή προσέγγιση της υπερβολής για κάθε περίπτωση. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για μία επόμενη τιμή του  $T_0$ , η οποία προκύπτει από την

προηγούμενη τιμή αν προστεθεί σε αυτή το μισό του μήκους του παραθύρου που χρησιμοποιείται στην ανάλυση (Μπραουδάκη, 2004). Κατά την ανάλυση των ταχυτήτων, για κάθε εξεταζόμενη καταγραφή CMP, προκύπτει το διάγραμμα συνάφειας (Σχήμα 3.20(α)). Από την επιλογή (του χρήστη) των μέγιστων τιμών της συνάφειας στο διάγραμμα αυτό, προκύπτει η μεταβολή της ταχύτητας  $V_{rms}$  συναρτήσει του διπλού κατακόρυφου χρόνου καταγραφής. Αναλυτικά, στο Σχήμα 3.20 παρουσιάζεται η ανάλυση για μια ομάδα καταγραφών CDP (CDP 4590 της σεισμικής γραμμής μελέτης ION-7). Αριστερά εμφανίζεται το διάγραμμα της συνάφειας με την ταχύτητα στον οριζόντιο άξονα και το διπλό χρόνο διαδρομής στον κατακόρυφο άξονα, ενώ δεξιά εμφανίζεται η ομάδα CDP. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα σημεία ελάχιστης συνάφειας και με κόκκινο χρώμα τα σημεία μέγιστης συνάφειας.

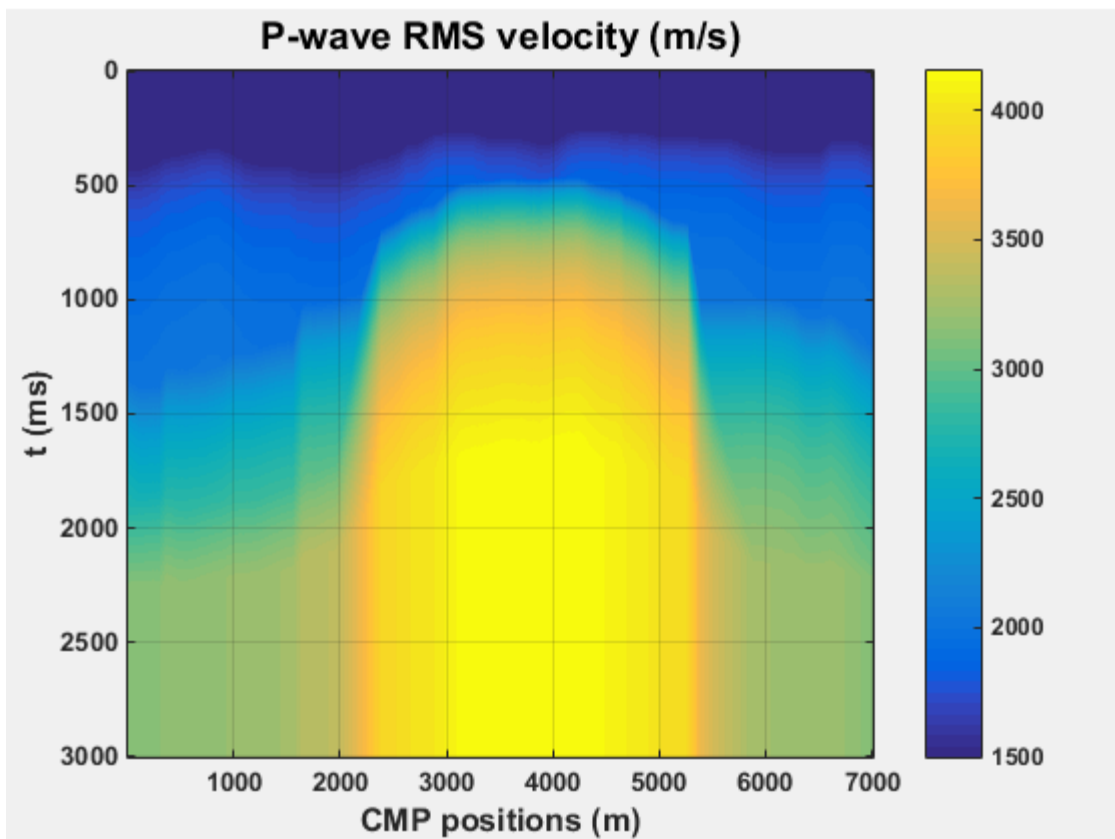


**Σχήμα 3.20:** Ανάλυση ταχύτητας, (α) Το διάγραμμα συνάφειας και οι ταχύτητες που έχουν εντοπιστεί, (β) Οι καταγραφές κοινού σημείου βάθους (Κόκκινου, 2002).

Κατά την αναδιάταξη των δεδομένων από κοινής πηγής σε κοινού ενδιαμέσου σημείου με την εντολή `[CMPx,CMPz]=CMP_Synthetics_Ver11;` έγινε και αυτόματος υπολογισμός της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας  $V_{rms}$  με την χρήση της σχέσης (3.5), όπου η τμηματική ταχύτητα ( $\alpha_j$ ) και το πάχος ( $d_j$ ) των σχηματισμών προκύπτουν από το αρχικό μοντέλο ταχυτήτων (Σχήμα 3.21). Στο Σχήμα 3.22 παρουσιάζονται οι ταχύτητες  $V_{rms}$  του μοντέλου. Επομένως δεν χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της ανάλυσης ταχυτήτων από τις καταγραφές, που περιγράφεται παραπάνω.



**Σχήμα 3.21:** Οι τμηματικές ταχύτητες  $V$  ( $\alpha_j$ ) του μοντέλου σε (m/s).



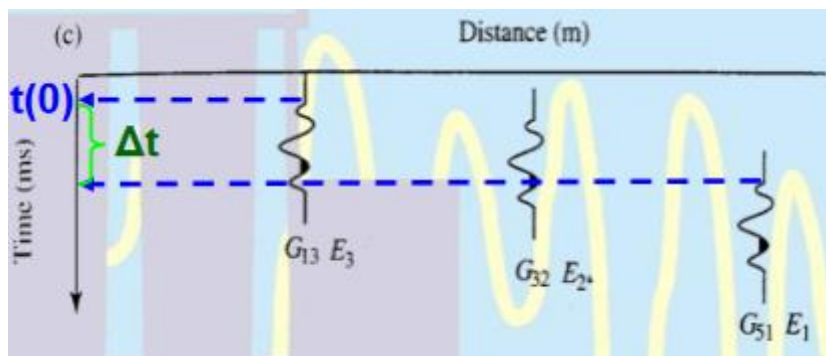
**Σχήμα 3.22:** Οι τιμές της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας του μοντέλου σε (m/s).



## 3.7 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΥΠΕΡΘΕΣΗ

### 3.7.1 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ (NMO)

Η εφαρμογή της διόρθωσης NMO πραγματοποιείται πριν την άθροιση των σεισμικών ιχνών (Σεισμική υπέρθεση ή Stacking) της διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου. Η δυναμική διόρθωση NMO ισοδυναμεί με την αφαίρεση χρόνου ίσου με την κανονική χρονική απόκλιση, από το χρόνο διαδρομής του ανακλώμενου κύματος το οποίο εμφανίζεται σε σεισμόγραμμα διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου (Βαφείδης, 2011). Για ένα τυχαίο κοινό ενδιαμέσο σημείο με υπεδαφική κάλυψη (fold) =3, η κανονική χρονική απόκλιση ( $\Delta t$ ) του ίχνους του πιο απομακρυσμένου δέκτη φαίνεται στο Σχήμα 3.23. Η διόρθωση αυτή γίνεται για να αναχθούν όλοι οι χρόνοι διαδρομής των ανακλώμενων κυμάτων σε χρόνους διαδρομής κυμάτων που διαδίδονται σε κατακόρυφη διεύθυνση. Δηλαδή μετά την διόρθωση τα αποτελέσματα που λαμβάνονται, προέρχονται από ένα υποθετικό πείραμα όπου πηγή και δέκτης είναι τοποθετημένα στη θέση του κοινού ενδιαμέσου σημείου της διάταξης.



Σχήμα 3.23: Απεικόνιση κανονικής χρονικής απόκλισης  $\Delta t$  [8].

Η κανονική χρονική απόκλιση για οριζόντιο και μη ανακλαστήρα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (Βαφείδης, 2011):

$$\Delta t_{NMO} = t(x) - t(0) = t(0) \cdot \left[ \left( 1 + \frac{x^2}{V_{NMO}^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (3.8)$$

Όπου:  $-t(0)$  : διπλός χρόνος κατακόρυφης ακτίνας

<sup>8</sup> πηγή από το διαδίκτυο, στις διαλέξεις του μαθήματος Σεισμικές Μέθοδοι (Βαφείδης) - [https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/MHXOP102/STATIC%2BNMO\\_CORRECTION.pdf](https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/MHXOP102/STATIC%2BNMO_CORRECTION.pdf)

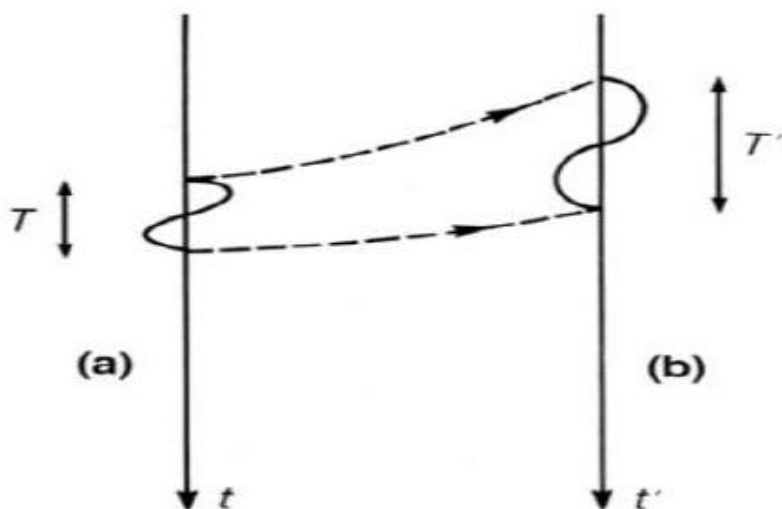
- $t(x)$  : χρόνος διαδρομής του ανακλώμενου κύματος για τον οποίο η απόσταση πηγής - γεωφώνου είναι  $X$

- $X$  : απόσταση πηγής -γεωφώνου

- $V_{NMO}$  : η ταχύτητα υπέρθεσης NMO

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι η κανονική χρονική απόκλιση αυξάνει ανάλογα με την απόσταση πηγής-γεωφώνου ( $X$ ), ενώ μειώνεται με το διπλό χρόνο κατακόρυφης ακτίνας  $t(0)$  και την αύξηση των τιμών της ταχύτητας ( $V_{NMO}$ ). Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι η επιλογή σωστής ταχύτητας  $V_{NMO}$  για την παραπάνω εξίσωση θέλει μεγάλη προσοχή. Αν η χρησιμοποιούμενη ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από την πραγματική, η διόρθωση είναι μικρότερη της πραγματικής (undercorrection), ενώ αν η ταχύτητα είναι μικρότερη από την πραγματική ταχύτητα του μέσου, η διόρθωση είναι μεγαλύτερη της πραγματικής (overcorrection) (Μπραουδάκη, 2014). Η ταχύτητα  $V_{NMO}$  είναι ίση με τη μέση τετραγωνική ταχύτητα  $V_{RMS}$  στην περίπτωση ανάκλασης από οριζόντια διαχωριστική επιφάνεια.

Τέλος, η διόρθωση την κανονικής χρονικής απόκλισης (NMO), εκτός της μετατροπής όλων των χρόνων διαδρομής των ανακλώμενων κυμάτων σε χρόνους διαδρομής κυμάτων που διαδίδονται σε κατακόρυφη διεύθυνση, προκαλεί και μία μη επιθυμητή επιμήκυνση του σεισμικού ίχνους (stretch), με τρόπο ο οποίος εξαρτάται από τον χρόνο (Yilmaz, 1987). Η μη επιθυμητή επίδραση της διόρθωσης NMO στις καταγραφές, αυξάνεται για μικρούς χρόνους και μεγάλες αποστάσεις (offsets) των σεισμικών ιχνών. Για να αποφευχθεί ο υποβιβασμός της διακριτικής ικανότητας των διαχωριστικών επιφανειών, ιδιαίτερα σε περιοχές αβαθών ανακλαστήρων, επιλέγεται η επηρεασμένη ζώνη από την επιμήκυνση (stretch) των σεισμικών ιχνών να διαγράφεται πριν την σεισμική υπέρθεση. Στο Σχήμα 3.24 απεικονίζεται το αποτέλεσμα της διόρθωσης NMO ενός χαρακτηριστικού σεισμικού ίχνους, όπου είναι εμφανής η αλλαγή της θέσης του ίχνους, μετά την αφαίρεση της κανονικής χρονικής απόκλισής αλλά και η επιμήκυνση του (stretch).

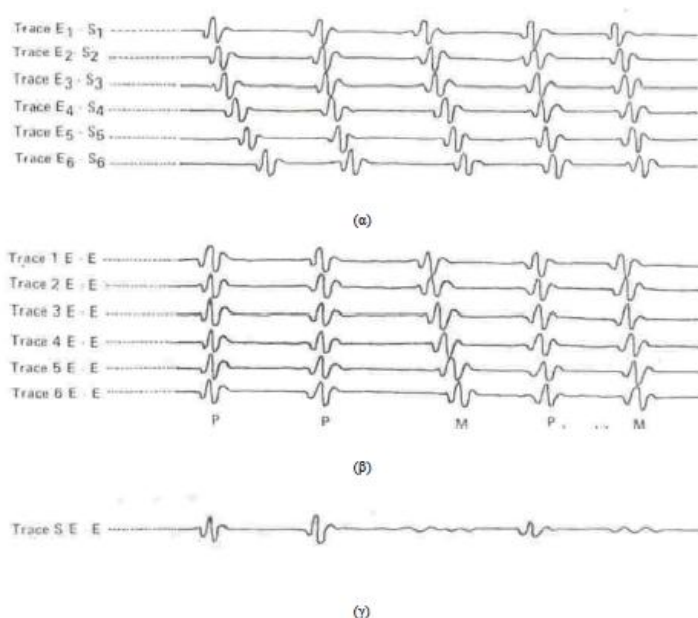


**Σχήμα 3.24:** Αποτέλεσμα της διόρθωσης NMO σε ένα σεισμικό ίχνος (Μπριντάκης, 2016).



### 3.7.2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΥΠΕΡΘΕΣΗ

Μετά την διόρθωση NMO το επόμενο στάδιο της επεξεργασίας είναι η σεισμική υπέρθεση ή άθροιση (stacking). Κατά την διαδικασία αυτή πραγματοποιείται άθροιση των σεισμογραμμάτων που έχουν κοινό ενδιάμεσο σημείο (CMP). Στο Σχήμα 3.25 παρουσιάζονται 6 σεισμικά ίχνη (που προέρχονται από το ίδιο κοινό ενδιάμεσο σημείο) πριν και μετά τη δυναμική διόρθωση καθώς και μετά την σεισμική υπέρθεση (stacking). Μετά την ολοκλήρωση του σταδίου της υπέρθεσης παρατηρείται επιπλέον αύξηση του σήματος σε σχέση με το συναφή και τυχαίο θόρυβο, καθώς οι καταγραφές του θορύβου αλληλοαναιρούνται (Μούχου, 2014). Η ενίσχυση του πλάτους του σήματος είναι ανάλογη με την υπεδαφική κάλυψη (fold). Επίσης με την διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται περιορισμένη εξασθένηση πολλαπλών ανακλάσεων, επομένως επέρχεται περεταίρω βελτιωμένο το αρχικό σήμα. Τέλος, άθροιση των σεισμικών ιχνών με κοινό ενδιάμεσο σημείο οδηγεί σε μείωση του όγκου των δεδομένων κατά το ποσό της υπεδαφικής κάλυψης. Μετά την άθροιση των σεισμογραμμάτων προκύπτει η σεισμική τομή υπέρθεσης (stacked seismic section). Η τομή αυτή είναι σημαντική, γιατί δίνει μία χαρτογράφηση της δομής του υπεδάφους χωρίς να υπάρχει καμία προηγούμενη γνώση γι' αυτήν. Η τομή υπέρθεσης μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με τη γεωλογική τομή, όταν η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από οριζόντια και επίπεδη στρωματογραφία. Όταν η γεωλογική τομή είναι περίπλοκη, τότε δεν παρουσιάζουν τις επιθυμητές ομοιότητες οι δύο τομές. Αυτό εξηγείται καθώς ενώ η ανακλώμενη ακτίνα είναι κάθετη στον ανακλαστήρα, η ίδια ακτίνα στην τομή υπέρθεσης σχεδιάζεται κάτω από το κοινό ενδιάμεσο σημείο πηγής-δέκτη. Το πρόβλημα αυτό μπορεί αντιμετωπιστεί, εφαρμόζοντας σεισμική χωροθέτηση (migration) στα δεδομένα που θα προκύψουν από την σεισμική υπέρθεση.



**Σχήμα 3.25** Παράδειγμα δυναμικών διορθώσεων που οδηγούν σε ένα αθροισμένο ίχνος (Cordier, 1985). (α) Διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου για τα 6 ίχνη που θα αθροιστούν. Τα ίχνη φαίνονται πριν τη δυναμική διόρθωση και έχουν τοποθετηθεί κατά σειρά ως προς την απόσταση της πηγής (ή του δέκτη) από το κοινό ενδιάμεσο σημείο, (β) Διάταξη

κοινού ενδιαμέσου σημείου για τα 6 ίχνη μετά τη δυναμική διόρθωση, (γ) Σεισμικό ίχνος που προέκυψε από την σεισμική υπέρθεση των 6 διορθωμένων ως προς την δυναμική διόρθωση ιχνών.

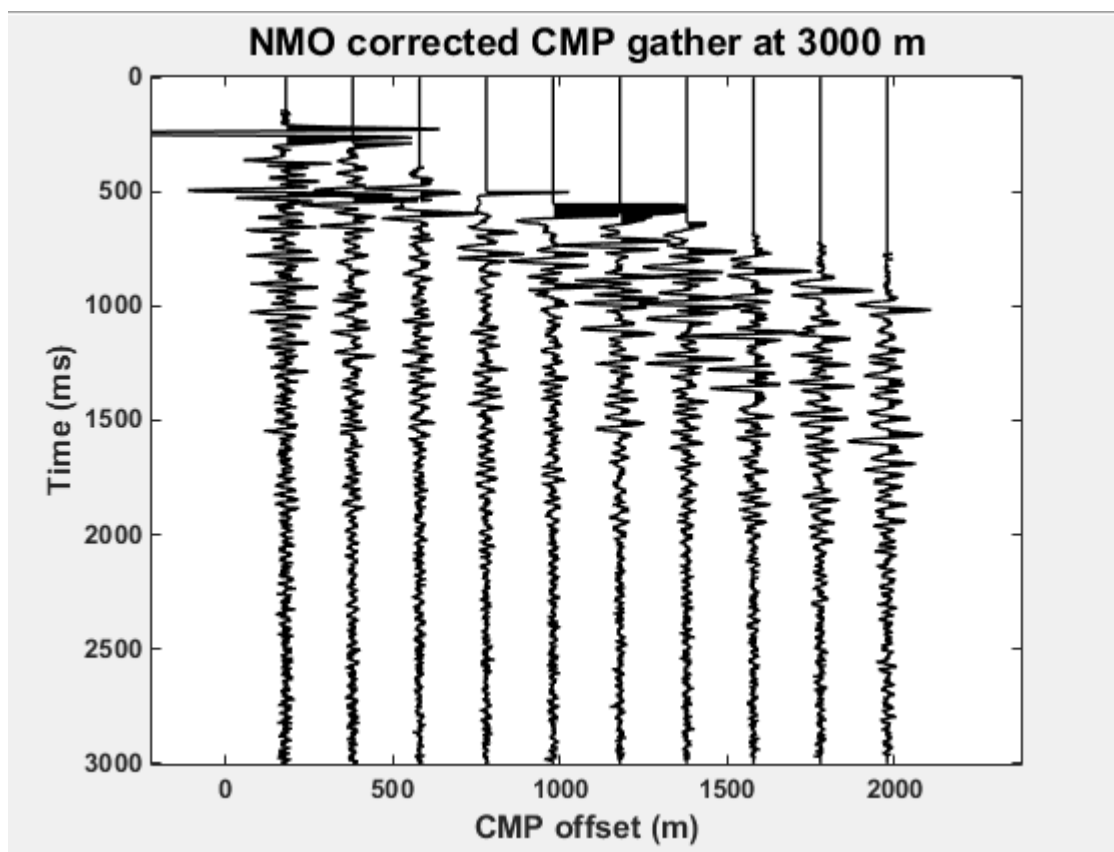
### 3.7.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΥΠΕΡΘΕΣΗΣ

Για την εφαρμογή της δυναμικής διόρθωσης NMO και της σεισμικής υπέρθεσης (stacking) στις διατάξεις κοινού ενδιαμέσου σημείου (CMP) χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος:

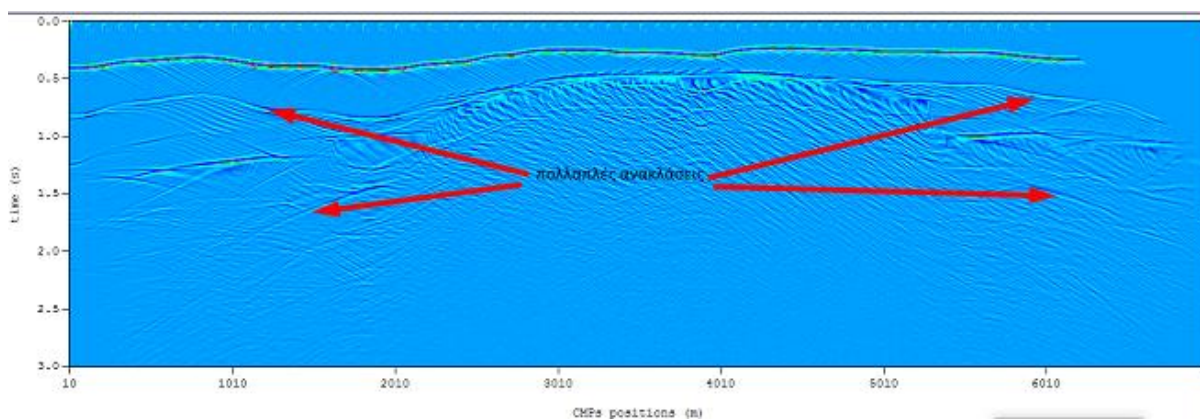
```
[stsection]=nmostacking_ver11(CMPz,dt,stretch,plcmp);
```

Ο παραπάνω αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε δύο φορές. Μία για τα δεδομένα πριν και μια για τα δεδομένα μετά την αποσυνέλιξη πρόβλεψης, με σκοπό να γίνει σύγκριση των δύο τομών υπέρθεσης που θα προκύψουν. Όσον αφορά τις παραμέτρους εισαγωγής του αλγορίθμου, η παράμετρος CMPz αναφέρεται στα δεδομένα κοινού ενδιαμέσου σημείου που πρέπει να εισάγει ο χρήστης, η dt είναι ο χρόνος δειγματοληψίας (0.0008 s), η stretch είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό παραμόρφωσης της κυματομορφής ανάκλασης κατά την διόρθωση NMO (δόθηκε η τιμή 30%), και η plcmp αναφέρεται στην οριζόντια θέση ενός από τα CMPs που επιθυμείται η απεικόνιση (ορίστηκε στα 3000m). Όσον αφορά στις μεταβλητές εξόδου, η stsection είναι τα δεδομένα μετά την εφαρμογή της δυναμικής διόρθωσης και σεισμικής υπέρθεσης. Όταν η εισαγωγή των παραμέτρων ολοκληρώθηκε, έγινε αυτόματη απεικόνιση του κοινού ενδιαμέσου σημείου που επιλέξαμε στα 3000m, αφού είχε εφαρμοστεί πάνω σε αυτό διόρθωση NMO (Σχήμα 3.26).

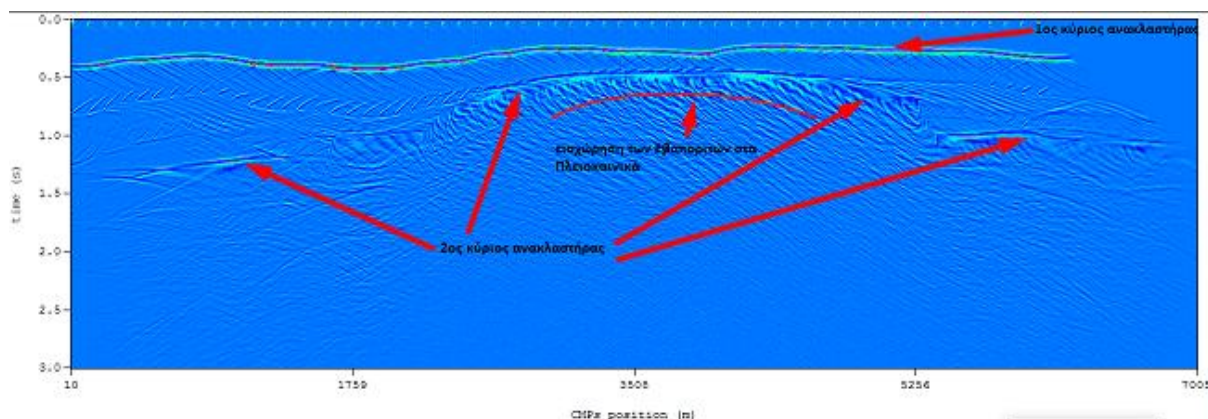
Επόμενο βήμα ήταν η απεικόνιση των σεισμικών τομών υπέρθεσης πριν και μετά την αποσυνέλιξη πρόβλεψης με την βοήθεια του προγράμματος Transform (Σχήμα 3.27 και 3.28 αντίστοιχα). Και στις δύο εικόνες ο οριζόντιος άξονας περιγράφει τις θέσεις των κοινών ενδιαμέσων σημείων (CMPs). Το πρώτο CMP βρίσκεται στα 10m και το τελευταίο στα 7005 m (ισαπόσταση CMPs 5m). Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στον συνολικό χρόνο καταγραφής (3,0008 s) σε s. Συγκρίνοντας τις δύο εικόνες, συμπεραίνεται ότι και σε αυτή την περίπτωση είναι εμφανής η αποτελεσματικότητα του φίλτρου αποσυνέλιξης πρόβλεψης. Όπως φαίνεται το Σχήμα 3.28 είναι απαλλαγμένο από αρκετές πολλαπλές ανακλάσεις που δημιουργούν προβλήματα στην ανίχνευση των διαχωριστικών επιφανειών. Είναι φανερό ότι η σεισμική τομή Υπέρθεσης των δεδομένων αποσυνέλιξης πρόβλεψης (Σχήμα 3.28) παρέχει μια αρκετά ικανοποιητική χαρτογράφηση της περιοχής μελέτης. Φαίνονται ολοκάθαρα οι δύο πρώτοι κύριοι ανακλαστήρες, ενώ στην περιοχή από τα 2500 έως 5010 m περίπου είναι εμφανής η εισχώρηση των Εβαποριτών στο στρώμα των Πλειοκαινικών. Η απουσία του τρίτου κύριου ανακλαστήρα από την συγκεκριμένη τομή, ενδεχομένως, οφείλεται στο μεγάλο βάθος της διαχωριστικής επιφάνειας του στρώματος, και επομένως στην δυσκολία που εμφανίζουν τα ανακλώμενα κύματα αυτού του ανακλαστήρα να φθάσουν στους δέκτες (λόγω της εξασθένησής τους κατά την διάδοσή τους στο υπέδαφος).



Σχήμα 3.26: Σεισμικά ίχνη για το κοινό ενδιάμεσο σημείο στα 3000m μετά την Δυναμική διόρθωση NMO.



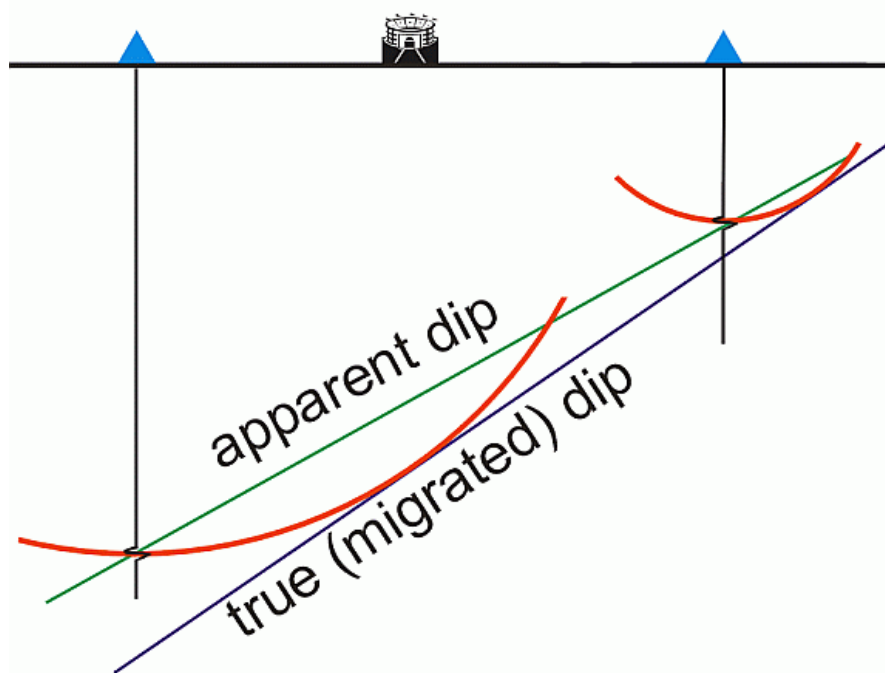
Σχήμα 3.27: Σεισμική τομή υπέρθεσης πριν από την χρήση αποσυνέλιξης πρόβλεψης.



**Σχήμα 3.28:** Σεισμική τομή υπέρθεσης μετά από την χρήση αποσυνέλιξης πρόβλεψης.

### 3.8 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ

Το τελευταίο κεφάλαιο της επεξεργασίας αναφέρεται στην σεισμική χωροθέτηση (migration). Η διαδικασία αυτή συνήθως εφαρμόζεται μετά το στάδιο της σεισμικής υπέρθεσης, εφόσον αυτό έχει εξασφαλίσει καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο. Βέβαια, σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο και δύσκολη γεωλογία προτιμάται η εφαρμογή της σεισμικής χωροθέτησης και πριν την σεισμική υπέρθεση, αφού όπως έδειξαν οι Schultz και Sherwood (1980) και Hatton et al. (1981), η υπέρθεση εξομαλύνει και κάποιες φορές καταστρέφει αρκετές πληροφορίες ανάκλασης. Η σεισμική χωροθέτηση (migration) τοποθετεί στην σωστή θέση τις επιφάνειες ανάκλασης (Σχήμα 3.29) που παρουσιάζουν κλίση σε μία τομή υπέρθεσης. Πολύ συχνά, οι διαχωριστικές επιφάνειες που εμφανίζονται σε μία τέτοια τομή υπέρθεσης παρουσιάζουν μικρότερη κλίση και μεγαλύτερο μήκος σε σχέση με τις αντίστοιχες επιφάνειες στη γεωλογική τομή (Yilmaz, 1987). Μετά την εφαρμογή της σεισμικής χωροθέτησης, καθίσταται συγκρίσιμη η σεισμική τομή με την αντίστοιχη γεωλογική. Επίσης σε περιοχές που είναι έντονο το φαινόμενο της περίθλασης λόγω ρηγματωμένων στρωμάτων, η σεισμική χωροθέτηση επανατοποθετεί όλες τις αφίξεις που προέρχονται από περίθλαση, στη θέση που βρίσκεται το ρήγμα, με αποτέλεσμα η σεισμική τομή υπέρθεσης να βελτιώνεται και η εικόνα των τεκτονικά ρηγματωμένων περιοχών να είναι ακριβέστερη. Η διαδικασία της σεισμικής χωροθέτησης αν και διακρίνεται από μία πολυπλοκότητα, αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων, αφού συμβάλλει στη βελτίωση της χωρικής διακριτικής ικανότητας της σεισμικής τομής.



**Σχήμα 3.29:** Σεισμικής χωροθέτηση (Μούχου, 2014)

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές σεισμικής χωροθέτησης. Όσον αφορά στη μορφή της σεισμικής τομής που παράγεται, διακρίνονται δύο είδη σεισμικής χωροθέτησης. Η πρώτη ονομάζεται χρονική σεισμική χωροθέτηση (time migration), και κατά την εφαρμογή της παράγεται σεισμική τομή σε συνάρτηση με το χρόνο. Το συγκεκριμένο είδος χωροθέτησης συνιστάται σε περιπτώσεις όπου οι πλευρικές μεταβολές της ταχύτητας δεν είναι έντονες. Το δεύτερο είδος ονομάζεται σεισμική χωροθέτηση βάθους (depth migration), και κατά την εφαρμογή της η σεισμική τομή παρουσιάζεται σε συνάρτηση με το βάθος. Η δεύτερη περίπτωση επιλέγεται όταν οι πλευρικές μεταβολές είναι έντονες, οι οποίες πολλές φορές οφείλονται σε ανακλαστήρες που παρουσιάζουν μεγάλη κλίση, παραδείγματος χάριν σε περιοχές διαπυρισμού. Γενικά η σεισμική χωροθέτηση βάθους είναι η ιδανική μέθοδος, καθώς λαμβάνει υπόψη και τις πλευρικές μεταβολές της ταχύτητας που συμβαίνουν στην ύπαιθρο, παρόλα αυτά προτιμάται η απεικόνιση της τομής να γίνεται συναρτήσει του χρόνου. Η επιλογή της πρώτης περίπτωσης οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχει περιορισμένη ακρίβεια στον προσδιορισμό των ταχυτήτων, και στο ότι η διαδικασία χωροθέτησης βάθους είναι πιο χρονοβόρα (Μπραουδάκη, 2004). Επίσης μετά την εφαρμογή της χρονικής σεισμικής χωροθέτησης, ελέγχεται η αξιοπιστία των τομών χωροθέτησης, αφού μπορεί να γίνει απευθείας σύγκριση με τη σεισμική τομή Υπέρθωσης, τα δεδομένα της οποίας βρίσκονται και αυτά στην κλίμακα του χρόνου. Στο συγκεκριμένο σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι, η ερμηνεία μιας σεισμικής τομής, ανεξάρτητα του αλγόριθμου χωροθέτησης που χρησιμοποιείται, εξαρτάται από την ποιότητα της τομής υπέρθεσης, το λόγο σήματος προς θόρυβο, και τις ταχύτητες που χρησιμοποιούνται για την χωροθέτηση (Κόκκινου, 2002).

Το 1985 ο Claerbout επινόησε ένα καινούργιο τρόπο χωροθέτησης, ο οποίος βασίζεται στην χρήση πεπερασμένων διαφορών (finite difference method) για την επίλυση της εξίσωσης του προς τα κάτω διαδιδόμενου κυματικού πεδίου. Για τους σκοπούς της διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος, ο οποίος βασίζεται στην προσέγγιση του Claerbout (1985). Ο

συγκεκριμένος αλγόριθμος μπορεί να χαρακτηριστεί ως χρονική σεισμική χωροθέτηση και είναι ο παρακάτω :

```
[arymig, tmig, xmig]=fd15mig(aryin, aryvel, t, x, dtau)
```

Με δεδομένα εισόδου: -*aryin*: Πίνακας αποτελεσμάτων σεισμικής υπέρθεσης

-*arvel*: Πίνακας ταχυτήτων rms, ίδιες διαστάσεις με τον παραπάνω πίνακα.

-*t*: Διάνυσμα χρόνου καταγραφής (s)

-*x*: Διάνυσμα θέσεων των κοινών ενδιάμεσων σημείων (m)

- *dtau*: Παράμετρος που υποδεικνύει το παράθυρο στο χρόνο (s)

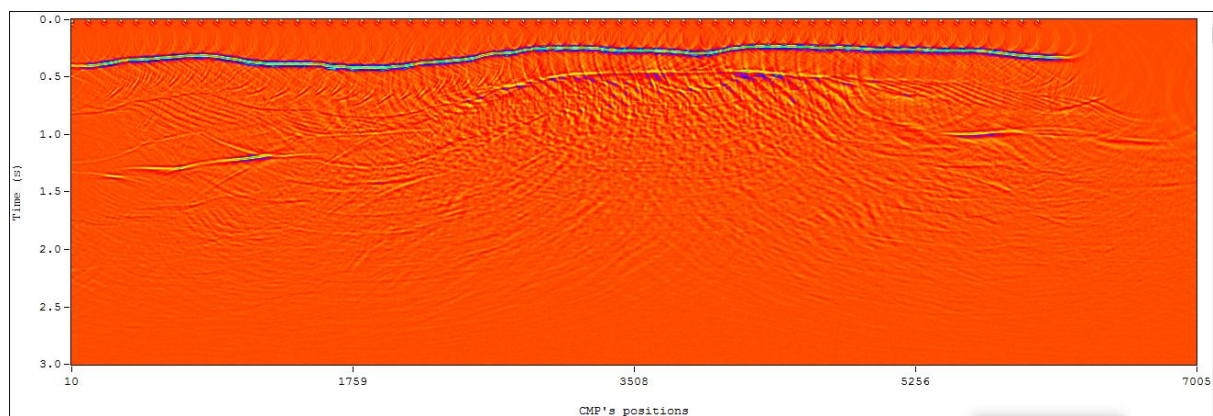
Με αποτελέσματα εξόδου : - *arymig*: Πίνακας αποτελεσμάτων σεισμικής Χωροθέτησης

-*tmig*: Διάνυσμα χρόνου των αποτελεσμάτων χωροθέτησης (s)

-*xmig*: Διάνυσμα θέσεων των κοινών ενδιάμεσων σημείων των αποτελεσμάτων (m)

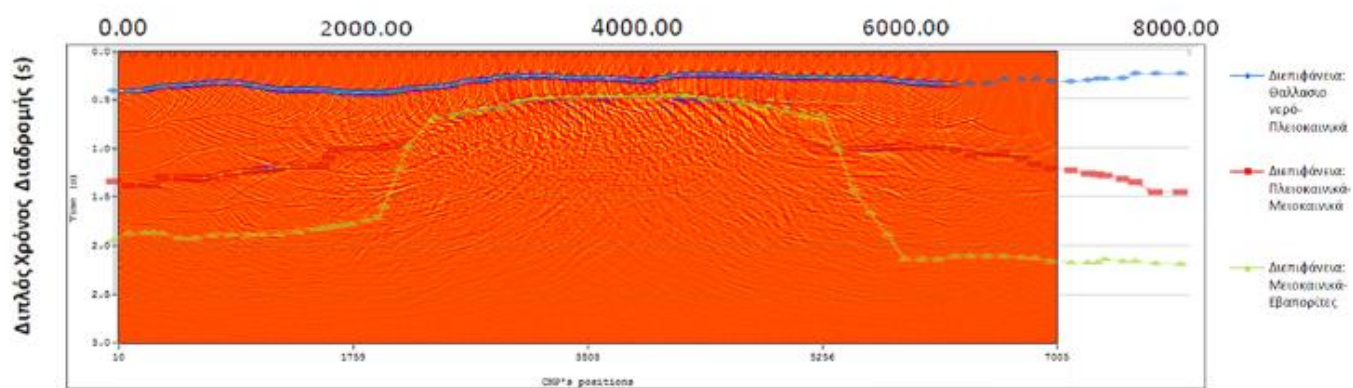
Έχοντας καταλήξει στο συμπέρασμα, από το προηγούμενο κεφάλαιο, ότι η εικόνα της σεισμικής τομής υπέρθεσης των δεδομένων στα οποία έχει εφαρμοστεί αποσυνέλιξη πρόβλεψης είναι καθαρότερη από την εικόνα των δεδομένων που δεν έχει εφαρμοστεί το φίλτρο αποσυνέλιξης, θεωρήθηκε λογικό να χρησιμοποιηθούν μόνο τα πρώτα δεδομένα σε αυτό το στάδιο της επεξεργασίας. Έτσι ο αλγόριθμος αυτός εφαρμόστηκε μόνο στα δεδομένα αποσυνέλιξης, με σκοπό να γίνει σύγκριση της σεισμικής τομής υπέρθεσης με την διορθωμένη που θα προκύψει μετά την χωροθέτηση. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι η σταθερά *dtau* ορίστηκε 0.001 s μετά από πειραματική διαδικασία που είχε πραγματοποιηθεί στη διπλωματική εργασία του Παγιαλάκη (2014). Η απεικόνιση των αποτελεσμάτων της σεισμικής χωροθέτησης *arymig* έγινε με την βοήθεια του προγράμματος Transform (Σχήμα 3.30). Συγκρίνοντας την τομή αυτή με την τομή υπέρθεσης του Σχήματος 3.28 είναι φανερό ότι οι θέσεις αλλά και οι κλίσεις των επιφανειών ανάκλασης έχουν αλλάξει. Αν γίνει υπέρθεση του Σχήματος 2.1 (βλ. §2.2) πάνω στο Σχήμα 3.30 διαπιστώνεται ότι ο αλγόριθμος πεπερασμένων διαφορών λειτούργησε σωστά στην επανατοποθέτηση των ανακλαστήρων στις σωστές θέσεις (Σχήμα 3.31).





**Σχήμα 3.30:** Σεισμική τομή δεδομένων αποσυνέλιξης πρόβλεψης μετά την διαδικασία της σεισμικής χωροθέτησης.

### Οριζόντια Απόσταση - Διπλός Χρόνος Διαδρομής



### Οριζόντια απόσταση (m)

**Σχήμα 3.31:** Αξιολόγηση αποτελεσμάτων σεισμικής χωροθέτησης.

# 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται όλα τα κρίσιμα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την προετοιμασία και εκτέλεση του πειράματος, και κατά την επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων. Στην συνέχεια, προτείνονται πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις για την διόρθωση και βελτίωση των ήδη προϋπαρχόντων σταδίων επεξεργασίας, και για την εφαρμογή νέων μεθόδων και διεργασιών επεξεργασίας συνθετικών δεδομένων.

### 4.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη μελέτη της δομής των γεωλογικών σχηματισμών σε περιοχή κοντά στον Πατραϊκό κόλπο. Πιο συγκεκριμένα καλείται να εξετάσει και να επεξεργαστεί πληροφορίες που προκύπτουν από τη δομή-στρωματογραφία της περιοχής μελέτης, καθώς και να απεικονίσει και να ερμηνεύσει τα αποτελέσματα της επεξεργασίας. Για να επιτευχθούν οι στόχοι της παρούσας εργασίας αρχικά σχεδιάζεται και προετοιμάζεται το πείραμα της θαλάσσιας σεισμικής έρευνας. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται στο λογισμικό Matlab, σχεδιάζοντας ένα σεισμικό μοντέλο (προσομοίωμα), από το οποίο μετά την εκτέλεση του πειράματος, θα πραγματοποιηθεί απόκτηση των συνθετικών δεδομένων σεισμικής ανάκλασης. Επομένως μετά την προετοιμασία του πειράματος, ακολουθεί η εκτέλεση του. Μόλις ολοκληρωθεί η πειραματική διαδικασία, δημιουργούνται τα συνθετικά δεδομένα, τα οποία βρίσκονται σε διάταξη κοινής πηγής. Επόμενο στάδιο είναι η επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων έτσι ώστε η τελική σεισμική τομή που θα προκύψει να είναι όσο το δυνατόν συγκρίσιμη με την γεωλογική τομή της περιοχής.

Κατά το στάδιο εκτέλεσης της πειραματικής διαδικασίας, συμπεραίνεται ότι ο τρόπος απόκτησης συνθετικών δεδομένων ανάκλασης, προσομοιάζει σε μεγάλο βαθμό την διαδικασία απόκτησης σεισμικών δεδομένων κατά τις θαλάσσιες διασκοπήσεις που πραγματοποιούνται στην ύπαιθρο. Στην πραγματικότητα κατά την διάρκεια μιας θαλάσσιας σεισμικής έρευνας (βλ. §1.3.4), τόσο η πηγή, όσο και τα υδρόφωνα μετακινούνται κατά μήκος γραμμών μελέτης και ανά συγκεκριμένα διαστήματα (ισαπόστασης πηγών) πραγματοποιείται εκτόνωση της πηγής και συλλογή των σεισμικών δεδομένων. Για τον λόγο αυτό, κατά το στάδιο της δημιουργίας των συνθετικών δεδομένων, η απόκτηση των σεισμικών δεδομένων ανάκλασης, προέκυψε από συστοιχία πηγής-υδροφώνων (1 πηγή αντιστοιχεί σε 200 υδρόφωνα) η οποία τοποθετήθηκε πάνω στο σεισμικό μοντέλο και μετακινούταν 100 m (ισαπόσταση πηγών) κάθε φορά για την εκτόνωση



της πηγής και την καταγραφή των σεισμικών κυμάτων από τους δέκτες. Η οριζόντια έκταση του σεισμικού μοντέλου είναι 8 km . Οι συνολικές εκτονώσεις της πηγής ήταν 61. Η πρώτη εκτόνωση της πραγματοποιήθηκε στα 10 m και μετά από 60 διαδοχικές μετατοπίσεις (100m) της συστοιχίας πηγής-υδροφώνων η τελική εκτόνωση πραγματοποιήθηκε στα 6010 m.

Μετά την απόκτηση των συνθετικών δεδομένων, κατά το στάδιο της επεξεργασίας αυτών προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η εισαγωγή τυχαίου θορύβου σε κάθε σεισμικό ίχνος του δέκτη, δημιουργεί συνθετικά δεδομένα ανάκλασης τα οποία είναι πιο αληθοφανή, και προσομοιάζουν περισσότερο αυτά που προκύπτουν από μία καταγραφή πραγματικών δεδομένων σεισμικής ανάκλασης. Η επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων που προκύπτουν μετά την εισαγωγή του θορύβου είναι πιο δύσκολη, καθώς ο λόγος σήματος/θόρυβο και η διακριτική ικανότητα των στρωμάτων έχει μειωθεί.

- Οι διεργασίες απομάκρυνσης του ghost φαινομένου από τα συνθετικά δεδομένα λειτούργησαν αρκετά ικανοποιητικά, καθώς έχει μειωθεί η διάρκεια ταλάντωσης της κυματομορφής των ανακλώμενων κυμάτων που οφειλόταν στην επίδραση του ghost φαινομένου. Η αποτελεσματικότητα των διεργασιών αυτών γίνεται αντιληπτή και από την σύγκριση ενός σεισμικού ίχνους απαλλαγμένο από το ghost φαινόμενο με ένα σεισμικό ίχνος που έχει προκύψει από δημιουργία συνθετικών δεδομένων με απορροφητικά όρια στην επιφάνεια του μοντέλου (βλ. §3.3.3). Τα δύο σεισμικά ίχνη σχεδόν συμπίπτουν, επομένως το ghost φαινόμενο έχει εξασθενήσει σε μεγάλο βαθμό.

- Η μέθοδος της αποσυνέλιξης πρόβλεψης έδρασε πολύ αποτελεσματικά στα συνθετικά δεδομένα, καθώς το μεγαλύτερο μέρος των πολλαπλών ανακλάσεων που μόλυναν τις καταγραφές, έχει εξαλειφθεί. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου δεν είναι τόσο εμφανής κατά την απεικόνιση των συνθετικών δεδομένων σε διάταξη κοινής απόστασης πηγής-δέκτη (Common offset), όσο στις απεικονίσεις της σεισμικής τομής υπέρθεσης (έχει προέλθει από αναδιάταξη δεδομένων κοινής πηγής σε κοινού ενδιαμέσου σημείου) και της τομής που έχει προκύψει μετά από σεισμική χωροθέτηση.

- Η διόρθωση της κανονικής χρονικής απόκλισης NMO (Normal MoveOut) λειτούργησε ικανοποιητικά στα συνθετικά δεδομένα που βρίσκονταν σε διάταξη κοινού ενδιαμέσου σημείου, παρόλα αυτά δημιούργησε μία επιμήκυνση της κυματομορφής των ανακλώμενων κυμάτων (stretch).

- Μέσω όλων των απεικονίσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά το στάδιο της επεξεργασίας με την βοήθεια των προγραμμάτων Matlab και Transform, δείχθηκε ότι τα σεισμικά ίχνη των δεκτών εξασθενούν σε μεγαλύτερους χρόνους. Έτσι ενώ το σεισμικό μοντέλο αποτελείται από τρεις διαχωριστικές επιφάνειες, κατά την απεικόνιση των συνθετικών δεδομένων καταγραφής είναι εμφανείς μονάχα οι δύο πρώτοι κύριοι ανακλαστές, ενώ ο τρίτος πιθανολογείται ότι βρίσκεται ανάμεσα σε ένα εύρος τιμών διπλών κατακόρυφων χρόνων διαδρομής. Η μη καθαρή εμφάνιση της τρίτης διαχωριστικής επιφάνειας, οφείλεται στην εξασθένηση του σεισμικού κύματος κατά την διάδοση του στο υπέδαφος, με αποτέλεσμα να μην υπάρξει καταγραφή του από τους δέκτες ή το σήμα της καταγραφής του να είναι πολύ ασθενές.

-Συγκρίνοντας την σεισμική τομή υπέρθεσης με την τομή που προέκυψε μετά την μέθοδο της σεισμικής χωροθέτησης στα συνθετικά δεδομένα, συμπεραίνεται ότι έχει γίνει μία επανατοποθέτηση των επιφανειών ανάκλασης στις σωστές θέσεις, αφού οι κλίσεις και οι θέσεις των ανακλαστήρων έχουν αλλάξει.

#### 4.3 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στη παράγραφο αυτή προτείνονται τρόποι αντιμετώπισης των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν κατά την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και πιθανές μελλοντικές προτάσεις για τη βελτιστοποίηση των ήδη προτεινόμενων τεχνικών επεξεργασίας συνθετικών δεδομένων. Επίσης προτείνονται ορισμένες καινούργιες μέθοδοι επεξεργασίας συνθετικών δεδομένων, για την αντικατάσταση κάποιων άλλων, που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία. Οι κυριότερες μελλοντικές προτάσεις που προέκυψαν είναι:

-Πραγματοποίηση ενίσχυσης σήματος σε μεγαλύτερους χρόνους καταγραφών.

-Εκτενέστερη μελέτη της περιοχής με μικρότερη ισαπόσταση πηγών και υδροφώνων

-Δημιουργία συνθετικών δεδομένων με μεγαλύτερη κεντρική συχνότητα πηγής  $f$  ( $>20$  Hz).

-Κατά την διεργασία απομάκρυνσης του ghost φαινομένου (deghosting), προτείνεται η χρησιμοποίηση μεταβλητού συντελεστή  $\alpha$  ( $\frac{Pr_{max}}{Vz_{max}}$ ) (μέσω υπολογισμού του  $\alpha$  για κάθε σεισμικό ίχνος του δέκτη ξεχωριστά), αντί τη χρησιμοποίηση του ίδιου συντελεστή  $\alpha$  για κάθε στοιχείο του πίνακα  $Vz$ .

-Δημιουργία συνθετικών δεδομένων που προκύπτουν από την εφαρμογή ορίων απορρόφησης σε όλες τις πλευρές του σεισμικού μοντέλου, και για τις 61 πηγές και όχι μόνο για την 1<sup>η</sup>. Τα συνθετικά δεδομένα για τις 61 πηγές που προέκυψαν από όρια απορρόφησης σε όλες τις πλευρές, να συγκριθούν διαδοχικά με τα αντίστοιχα συνθετικά δεδομένα των 61 πηγών που προέρχονται από σεισμικό μοντέλο χωρίς όρια απορρόφησης στην επιφάνεια και έχει απομακρυνθεί το ghost φαινόμενο, και με τα συνθετικά δεδομένα των 61 πηγών, χωρίς όρια απορρόφησης στην επιφάνεια, που προκύπτουν μετά την μέθοδο της αποσυνέλιξης πρόβλεψης. Οι δύο συγκρίσεις με τα συνθετικά δεδομένα από όρια απορρόφησης σε όλες τις πλευρές του σεισμικού μοντέλου, θα οδηγήσει σε λεπτομερέστερα συμπεράσματα στην απόσβεση ή εξασθένιση των δύο διαφορετικών ειδών πολλαπλής ανάκλασης.

-Εφαρμογή της μεθόδου αποσυνέλιξης αιχμής (spiking deconvolution) στα συνθετικά δεδομένα, με σκοπό την βελτίωση της χρονικής διακριτικής ικανότητας. Η συγκεκριμένη μέθοδος θα βοηθήσει στη διάκριση ιδιαίτερα λεπτών στρωμάτων, τα οποία πριν από την αποσυνέλιξη εμφανίζονταν ως μία ανάκλαση.

-Για την εφαρμογή της μεθόδου αποσυνέλιξης πρόβλεψης θεωρήθηκε η περιοδικότητα των πολλαπλών ανακλάσεων σταθερή. Προτείνεται να πραγματοποιηθεί εφαρμογή χρονικά μεταβαλλόμενης αποσυνέλιξης στα συνθετικά δεδομένα, όπου λαμβάνεται υπόψη η περίπτωση της μεταβολής της περιοδικότητας των πολλαπλών ανακλάσεων.

-Να πραγματοποιηθεί σεισμική χωροθέτηση βάθους (depth migration), η οποία ενδείκνυται όταν οι πλευρικές μεταβολές της ταχύτητας είναι έντονες, οι οποίες πολλές φορές οφείλονται σε ανακλαστήρες που παρουσιάζουν μεγάλη κλίση, παραδείγματος χάριν σε περιοχές διαπυρισμού.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική Βιβλιογραφία:

1. Αποστολόπουλος Γ., 2013, Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών Τομέας Μεταλλευτικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
2. Βαφειδής Α., 2011, Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Ι – Σεισμικές Μέθοδοι, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
3. Κατσικάτσου .Χ. Γεωργίου ,1992 , Γεωλογία της Ελλάδας.
4. Κόκκινου Ε., 2002, Επεξεργασία και ερμηνεία θαλάσσιων σεισμικών καταγραφών ανάκλασης στην περιοχή του Ιονίου, Διδακτορική διατριβή, Πολ. Κρήτης.
5. Μανούτσογλου Ε., 2008, *Εισαγωγή στην Γεωλογία Ελλάδος* , Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
6. Μούχου Α. , 2014 , Επεξεργασία θαλάσσιων δεδομένων σεισμικής ανάκλασης από το νότιο Αιγαίο, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
7. Μπραουδάκη Γ. Κ., 2004, Σεισμικά Ανάκλασης στο Ιόνιο, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
8. Μπριντάκης Ι., 2016, Συμβολή της σεισμικής ανάκλασης στην παρακολούθηση της γεωλογικής αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
9. Παγιαλάκης Μ., 2014, Προσομοίωση δεδομένων σεισμικής ανάκλασης για το σχεδιασμό διασκόπησης στο θαλάσσιο χώρο του Πατραϊκού Κόλπου, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

10. Σκαρλατούδης Α., 2009, Προσομοίωση της σεισμικής κίνησης με τη χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

### Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία:

1. Barr J., F., Sanders I., J., 1989, Attenuation of Water-Column Reverberations Using Pressure and Velocity Detectors in a Water-Bottom Cable, Halliburton Geophysical Services, Inc.
2. Bayliss, A., Jordan, K. E., LeMesurier, B. J., and Turkel, E., 1986, A fourth-order accurate finite-difference scheme for the computation of elastic waves: Bull. Seis. ot. Am., 76, 1115-1132.
3. Brigham O., 1974, The Fast Fourier Transform.
4. Claerbout, J.F., 1985, Imaging the earth's interior: Blackwell Scientific Publications.
5. Cordier J.-P., 1985, Velocities in Reflection Seismology, Seismic reflection method.
6. Dai N., Vafidis A., Kanasewich E., 1994, Composite Absorbing Boundaries for the Numerical Simulation of Seismic Waves, Bulletin of the Seismological Society of America, v. 84, No 1. pp. 185-191.
7. Dix, C. H., 1955, Seismic velocities from surface measurements: Geophysics, 20, 68-86.
8. Hatton, L., L. K. Lerner, and B. S. Gibson, 1981, Migration of seismic data from inhomogeneous media: Geophysics, 46, 751-767.
9. Hirn, A., Sachpazi, M., Siliqi, R., Me Bride J., Mamelis, F., Cemobori, L., and the STREAMERS - PROFILES group, 1996, A traverse of the Ionian islands front with coincident normal incidence/ and wide angle seismics: Tectonophysics 264, 35 -49.
10. Kamberis, E., Mamelis, F., Loucoyannakis, M., Maltezos, F., Him, A., and the STREAMERS group, 1996, Structure and deformation of the External Hellenides based on seismic data from offshore Western Greece, EAGE Special Publication 5, 207 - 214.
11. Kamberis, E., Sotiropoulos, S., Aximniotou, O., Tsaila - Monopoli, S., and Ioakim, C., 2000, Late Cenozoic deformation of the Gavrovo and Ionian zones in NW Peloponnesos (Western Greece): Annali di Geofisica, 43, No. 5, 905 - 919.
12. Lamer, K.L., Hatton, L., Gibson, B.S., Hsu, I.C., 1981, Depth migration of imaged time sections: Geophysics, 46, 734 - 750.
13. Monopolis, D., Bruneton, A., 1982, Ionian Sea (Western Greece): its structural outline deduced from drilling and geophysical data: Tectonophysics, 83, 227 - 242.
14. Nicolaou, C., 1986, Contribution to the knowledge of the Neogene sediments and the tectonic boundaries between Ionian and pre - Apulia zones based on geological observations (oil research studies) in Strophades, Zakynthos and Kefallinia islands: Phd Thesis, Athens Univ. (in Greek).

15. Oladapo and Michael Ilesanmi, 2013, Linearization of Zoeppritz equations and practical utilization, Department of Applied Geophysics, Federal University of Technology, Akure, Nigeria.
16. Robinson, E. A. and Treitel, S., 1980, Geophysical signal analysis: Prentice-Hall Book Co.
17. Schultz, P.S., and Sherwood, J.W.C., 1980, Depth migration before stack: Geophysics, 45, 376 – 393.
18. Sheriff R. E. and Geldart L. P., 1995, Exploration seismology. Cambridge Univ. Press.
19. Sodbinow E. S. 1989, Stacking, Filtering, and Display, Exploration Geophysics. GP 406.
20. Sorel, D., 1992, L' évolution structurale de la Grèce nord-occidentale depuis le Miocène, dans le cadre géodynamique de l'arc Egéen: Thèse d'Etat, Univ. of Paris XI - Orsay, 475.
21. Underhill, J.R., 1988, Trassic evaporites and Plio - Quaternary diapirism in W. Greece: Journal of the Geological Society of London, 145, 269 - 282.
22. Vafidis A., 1988, Supercomputer Finite Difference Methods for Seismic Wave Propagation, University of Alberta.
23. Virieux J., 1986, P-SC/ wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method.
24. Yilmaz O., 1987, Seismic data processing Society of Exploration Geophysicists.

### Πηγές από το Διαδίκτυο:

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Zoeppritz\\_equations](https://en.wikipedia.org/wiki/Zoeppritz_equations)
- [2] [http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/m/multiple\\_reflection.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/m/multiple_reflection.aspx)
- [3] [https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/MHXOP102/02\\_Diata3eis\\_NMO2012.pdf](https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/MHXOP102/02_Diata3eis_NMO2012.pdf).
- [4] <http://users.ntua.gr/gerolymo/COMPUTATIONAL-GEOTECHNICS-BOOK.pdf>
- [5] <https://www.pgs.com/marine-acquisition/tools-and-techniques/geostreamer/>
- [6] <https://www.seismic-lab.physics.ualberta.ca>
- [7] [https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/MHXOP102/02\\_Diata3eis\\_NMO2012.pdf](https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/MHXOP102/02_Diata3eis_NMO2012.pdf)
- [8] [https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/MHXOP102/STATIC%2BNMO\\_CORRECTION.pdf](https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/MHXOP102/STATIC%2BNMO_CORRECTION.pdf)

### Χρήσιμοι Σύνδεσμοι:

<https://www.eclass.tuc.gr/courses/MHXOP102/>

<http://users.ntua.gr/caridis/methodoi/keimena/chap%2011/Chapter%2011.pdf>

[http://wiki.seg.org/wiki/Predictive\\_deconvolution](http://wiki.seg.org/wiki/Predictive_deconvolution)

<http://www.orykta.gr/geologia-oryktologia/geologia-elladas>

[http://www.energia.gr/article.asp?art\\_id=81800](http://www.energia.gr/article.asp?art_id=81800)

<http://nemertes.lis.upatras.gr/>

<http://www.openarchives.gr/>

<http://www.didaktorika.gr/>

<http://www.academicjournals.org/journal/IJPS/article-full-text-pdf/DDCDE9D16418>

<http://geophysics.geo.auth.gr>

<http://www.metal.ntua.gr/>

<https://ikee.lib.auth.gr/>