



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ ΚΑΣΟΥΤΣΑ

A.M. 2011020035

ΘΕΜΑ

**«Επεξεργασία συνθετικών δεδομένων σεισμικής ανάκλασης για τη θαλάσσια περιοχή
δυτικά των Παξών»**

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Επιβλέπων: **ΒΑΦΕΙΛΗΣ ΑΝΤΩΝΗΣ** Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

Μέλη: **ΣΟΥΠΙΟΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ** Καθηγητής ΤΕΙ Κρήτης

ΚΡΗΤΙΚΑΚΗΣ ΓΙΩΡΓΟΣ ΕΔΙΠ Πολυτεχνείου Κρήτης

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

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	7
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ –ΠΕΡΙΓΡΑΦΜΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ	7
1.2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	7
1.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ	11
1.3.3 ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗ.....	12
1.4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ	15
1.4.1 ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΑ ΟΡΙΑ (ABSORBING BOUNDARIES)	17
2 ^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ	19
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	19
2.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	19
2.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	20
3 ^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ	29
3.1. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	29
3.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	29
3.1.2 ΑΝΑΚΛΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ GHOST).....	30
3.1.2.1 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ GHOST ΣΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΚΑΛΩΔΙΑ (streamers)	32
3.1.2.2 ΓΕΩΔΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ Η ΑΡΧΗ ΔΙΠΛΟΥ ΑΙΣΘΗΡΗΡΑ	32
3.1.3 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ GHOST.....	35
3.2 ΑΝΑΔΙΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΚΟΙΝΟΥ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ (CMP) .	39
3.2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	39
3.2.2 ΣΥΝΘΕΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΚΟΙΝΟΥ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ	43
3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ.....	45
3.4 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ (NMO)	48
3.4.1 ΓΕΝΙΚΑ	48
3.4.2 ΔΙΟΡΘΩΣΗ NMO ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	51
3.5 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΥΠΕΡΘΕΣΗ (STACKING).....	52
3.5.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	52

3.5.2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΥΠΕΡΘΕΣΗ (STACKING) ΣΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	52
3.6 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ (MIGRATION)	54
3.6.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	54
4 ^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ	57
4.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	57
4.1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	57
4.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	57
4.3 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	58
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	59

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Γνωρίζουμε ότι τα τελευταία χρόνια οι ορυκτοί πόροι της Γης εξαντλούνται. Αυτό έχει οδηγήσει τους επιστήμονες στην αναζήτηση νέων κοιτασμάτων πετρελαίου. Η Ελλάδα κατέχει ένα πολύ σημαντικό ρόλο σε αυτή την αναζήτηση, καθώς τόσο στο Αιγαίο όσο και στο Ιόνιο έχουν βρεθεί κοιτάσματα πετρελαίου. Αυτό το γεγονός για την Ελλάδα είναι πολύ σημαντικό, διότι πέρα από το ενεργειακό κομμάτι μπορεί να καλύψει και ένα μέρος του οικονομικού προβλήματος της χώρας μας που επικρατεί τα τελευταία χρόνια. Μέχρι σήμερα η Ελλάδα είχε μια μικρή παραγωγή πετρελαίου, αλλά στηριζόταν κυρίως στην εισαγωγή του. Με το άνοιγμα αυτό θα μπορέσει να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες τόσο της χώρας, αλλά θα μπορέσει να κάνει και εξαγωγές και να τονώσει την οικονομία της. Επίσης, θα συμβάλλει σημαντικά και στο ενεργειακό πρόβλημα που επικρατεί και στην Ευρώπη.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, καλείται να εξετάσει και να ερμηνεύσει μέσω συνθετικών δεδομένων σεισμικής ανάκλασης τα αποτελέσματα μιας γραμμής μελέτης στο θαλάσσιο χώρο των Παξών, όπου υπάρχει πιθανότητα να φιλοξενοούνται στο υπέδαφος υδρογονάνθρακες. Η επεξεργασία των δεδομένων αυτών πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά, τον επιβλέποντα καθηγητή Αντώνιο Βαφείδη που μου έδωσε την ευκαιρία να πραγματοποιήσω την εν λόγω διπλωματική, καθώς και για όλη τη βοήθεια που μου προσέφερε όλο αυτό το διάστημα. Ειδικότερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Γεώργιο Κρητικάκη που με αμέριστη υπομονή και στήριξη με καθοδήγησε σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Περικλή και Δήμητρα για τη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια που δεν ήταν μόνο οικονομική αλλά και συναισθηματική, την αδερφή μου Χριστίνα, τους φίλους μου Μαριανέλλα, Ευσταθία και Νίκο καθώς και τους καθηγητές μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης που έβαλαν με τον τρόπο τους ένα λιθαράκι ακόμα στις γνώσεις μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η απομάκρυνση των πολλαπλών ανακλάσεων (φαινόμενο Ghost) που προέρχονται από την επιφάνεια και τον πυθμένα της θάλασσας. Το φαινόμενο Ghost παρουσιάζεται στις θαλάσσιες διασκοπήσεις όταν τα εκπεμπόμενα ηχητικά κύματα επιδρούν στην θαλάσσια επιφάνεια και αυτή με τη σειρά της επιδρά σαν τέλειος ακουστικός καθρέπτης δημιουργώντας επιφανειακές ανακλάσεις. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε αύξηση της χρονικής διάρκειας των ανακλάσεων. Η χρονική ανάλυση των ταχυτήτων, ταυτόχρονα, υποβαθμίζεται, λόγω του ότι οι καταγραφές θα εμφανιστούν ετεροχρονισμένες σε σχέση με τις ανακλάσεις που προέρχονται από τους σχηματισμούς. Το αποτέλεσμα είναι πως τα σεισμικά δεδομένα παρουσιάζονται αλλοιωμένα, οπότε και τελικά είναι απαραίτητος ο εντοπισμός και η απομάκρυνσή αυτών των ανακλάσεων.

Στα αρχικά στάδια της παρούσας μελέτης υλοποιήθηκε η προσομοίωση της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων σε περιβάλλον Matlab. Τα πραγματικά αυτά συνθετικά σεισμικά δεδομένα, αντλήθηκαν από τμήμα σεισμικής τομής που βρίσκεται στο νησί των Παξών. Τα δεδομένα της χερσαίας τομής χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξαχθούν αντίστοιχα συμπεράσματα σε θαλάσσια περιοχή. Το ίδιο λογισμικό πακέτο χρησιμοποιήθηκε για την απομάκρυνση των ανακλάσεων από την θαλάσσια επιφάνεια, ενώ ακολουθήθηκε συμβατική επεξεργασία των δεδομένων, όπου και πραγματοποιήθηκε αναδιάταξη των καταγραφών κοινής πηγής σε δεδομένα κοινού ενδιάμεσου σημείου, διόρθωση της κανονικής χρονικής απόκλισης και σεισμική χωροθέτηση. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου για την απομάκρυνση επιφανειακών ανακλάσεων, αξιολογήθηκαν και έγινε σύγκριση τους με αποτελέσματα που προήλθαν με τη χρήση ορίων απορρόφησης στην ανώτερη επιφάνεια αντίστοιχου μοντέλου, έτσι ώστε να μην παράγονται επιφανειακές σεισμικές ανακλάσεις (φαινόμενο ghost).

Συμπερασματικά, προκύπτει ότι τα συνθετικά δεδομένα είναι απαλλαγμένα όσο το δυνατόν από τις επιφανειακές ανακλάσεις, όπως επίσης τα συνθετικά δεδομένα υψηλής ευκρίνειας που προκύπτουν δύνανται να χρησιμοποιηθούν για την ερμηνεία και την κατανόηση πραγματικών δεδομένων που λαμβάνονται από την περιοχή μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ –ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Σε αυτή την παράγραφο γίνεται μια σύντομη αναφορά σε όλες τις ενότητες και τα κεφάλαια που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται σύντομη περιγραφή της περιοχής μελέτης και παρουσιάζεται εν συντομία η γεωλογία, η τεκτονική και η στρωματογραφία της περιοχής. Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης, στη συμπεριφορά των ελαστικών κυμάτων καθώς και στον τρόπο διεξαγωγής μίας θαλάσσιας σεισμικής έρευνας. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού εξηγείται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών με τη βοήθειά της οποίας υλοποιήθηκε η προσομοίωση της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων σε περιβάλλον Matlab. Στη συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του τρόπου δημιουργίας συνθετικών δεδομένων. Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται σε γενικό πλαίσιο της δημιουργίας των συνθετικών δεδομένων και επεξηγείται ο λόγος που πραγματοποιήθηκε δημιουργία συνθετικών δεδομένων με όρια απορρόφησης στην επιφάνεια του μοντέλου. Ακόμα, γίνεται αναφορά και στα προβλήματα που προέκυψαν από το γεγονός ότι κατά την προσομοίωση, τοποθετήθηκε στην ίδια θέση η πηγή με το δέκτη. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων σε περιβάλλον Matlab με σκοπό να γίνει η ερμηνεία των σεισμικών αποτελεσμάτων. Ειδικότερα στην ενότητα αυτή αναλύεται το φαινόμενο ghost και πως γίνεται η απομάκρυνσή του, η αναδιάταξη των δεδομένων σε καταγραφές κοινής πηγής, η διόρθωση της κανονικής χρονικής απόκλισης και η σεισμική υπέρθεση και χωροθέτηση. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία και για μελλοντική επίλυση προβλημάτων που εντοπίστηκαν στην παρούσα εργασία.

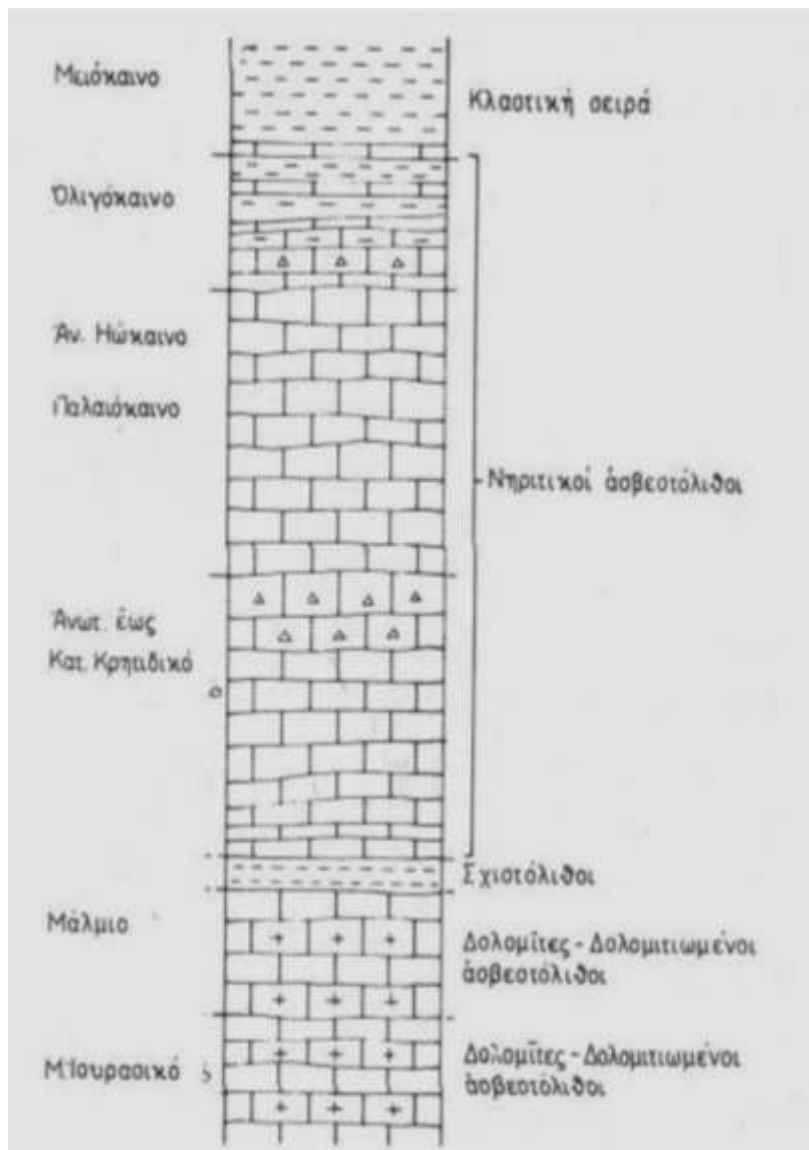
1.2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στη Δυτική Ελλάδα, η Ιόνιος και η προ-Απούλια ζώνη αντιπροσωπεύουν, αντίστοιχα, τη λεκάνη και τη μεταβατική ζώνη για την Απούλια πλατφόρμα. Η Απούλια πλατφόρμα

αποτελεί το ασθενώς παραμορφωμένο άκρο των εξωτερικών Ελληνίδων. Η προ-Απούλια ζώνη εμφανίζεται στα Ιόνια Νησιά και το ανατολικό Ιόνιο Πέλαγος, ενώ η Απούλια πλατφόρμα βρίσκεται αποκλειστικά στο Ιόνιο Πέλαγος. Η Ιόνιος ζώνη που αποτελείται από Τριαδικούς εβαπορίτες, του Ιουρασικού ανώτερου Ηώκαινου (κυρίως πελαγικά ανθρακικά, λίγους κερατόλιθους, και σχιστόλιθους), υπερκαλύφθηκε από φλύσχη του Ολιγόκαινου. Πλούσια σε οργανική ύλη μητρικά πετρώματα (source rocks) εμφανίζονται μέσα στους εβαπορίτες του Τριαδικού και στα πελαγικά αργίλο-πυριτικά πετρώματα Ιουρασικού-Κρητιδικού. Η προ-Απούλια ζώνη αποτελείται από Τριαδικές έως Μειώκενες αποθέσεις, κυρίως μικτών νιτρικών πελαγικών ανθρακικών πετρωμάτων. Οι σχηματισμοί που είναι πηγές υδρογονανθράκων περιλαμβάνουν πελαγικές και ημι-πελαγικές αποθέσεις πλούσιες σε θαλάσσια οργανική ύλη. Χερσαία οργανική ύλη βρίσκεται επίσης σε κλαστικούς πυριτικούς (siliciclastic) σχηματισμούς.

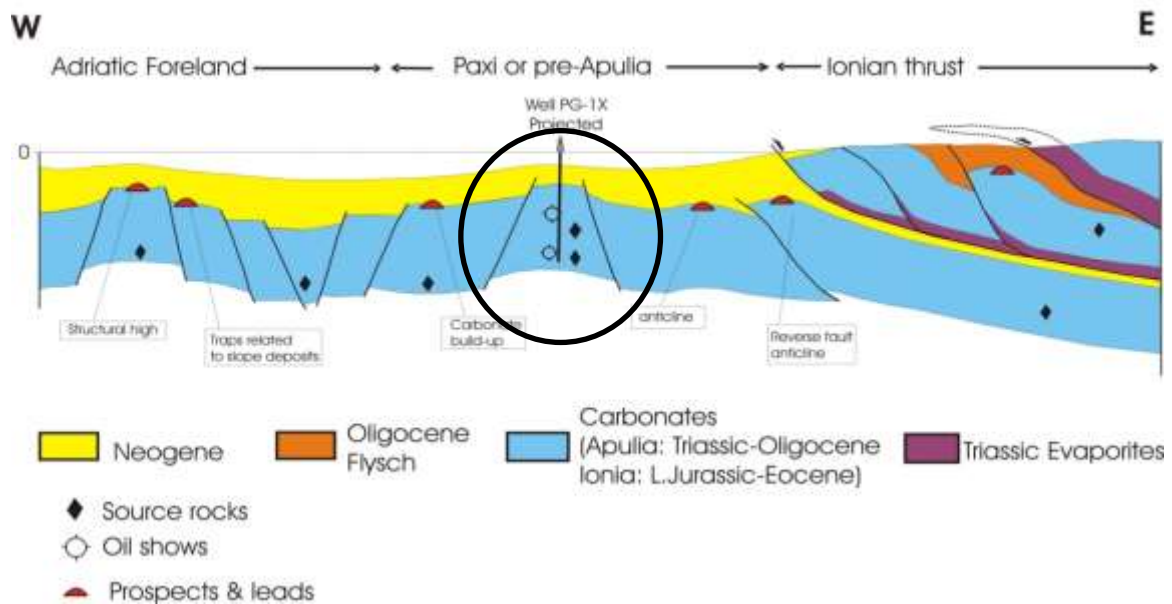
Η ζώνη των Παξών εμφανίζεται στο δυτικότερο τμήμα της Ελλάδος και πιο συγκεκριμένα καταλαμβάνει το δυτικό μέρος σε ορισμένων νησιών του Ιονίου πελάγους, όπως η Ζάκυνθος, η Κεφαλονιά, η Λευκάδα, η Ιθάκη, οι Παξοί, από όπου και πήρε το όνομά της. Θεωρείται ως μια σχετικά ομοιόμορφη ζώνη, με Μεσοζωικούς-Καινοζωικούς ανθρακικούς σχηματισμούς, μεταβατική μεταξύ της Απούλιας πλατφόρμας και της Λεκάνης του Ιονίου. Η ακολουθία των αποθέσεων στην ζώνη των Παξών αρχίζει με ασβεστόλιθους Τριαδικού που περιέχουν στρώσεις από μαύρους σχιστόλιθους και ανυδρίτες (Σχήμα 1.1). Η διαδοχή Άνω Ιουρασικό-Κατώτερο Κρητιδικό αποτελείται από λευκό αλευρώδη ασβεστόλιθο με στρώσεις δολομίτη, που συνοδεύεται από σπάνιο κερατόλιθο και οργανικό άνθρακα, πλούσιο μαύρο σχιστόλιθο, που περιέχει πλαγκτόν μαζί με είδη φυκών. Στη συνέχεια από το Κρητιδικό και το Μέσο Μειόκαινο υπάρχει νηρητική ανθρακική ιζηματογένεση με ασβεστολίθους. Στο Ανώτερο Μειόκαινο αρχίζει μια κλαστική ιζηματογένεση από πηλίτες και ψαμμίτες, η οποία δεν χαρακτηρίζεται ως φλύσχης σύμφωνα με ορισμένους συγγραφείς.

Τα υπερκείμενα του Ολιγόκαινου ιζήματα της προ-Απούλιας ιζήματα δείχνουν το προοδευτικό πέρασμα από τον τυπικό φλύσχη της ζώνης του Ιονίου σε μια πιο ασβεστολιθική (ηλικιακά-ισοδύναμη) μορφή στην προ-Απούλια ζώνη, υποδεικνύοντας ότι τα ιζήματα αυτά αντιστοιχούν σε ένα άτυπο φλύσχη. Έτσι η ζώνη των Παξών από γεωτεκτονική άποψη στερείται τυπικού φλύσχη και τεκτονικά, χαρακτηρίζεται ως μια αυτόχθονη ζώνη.

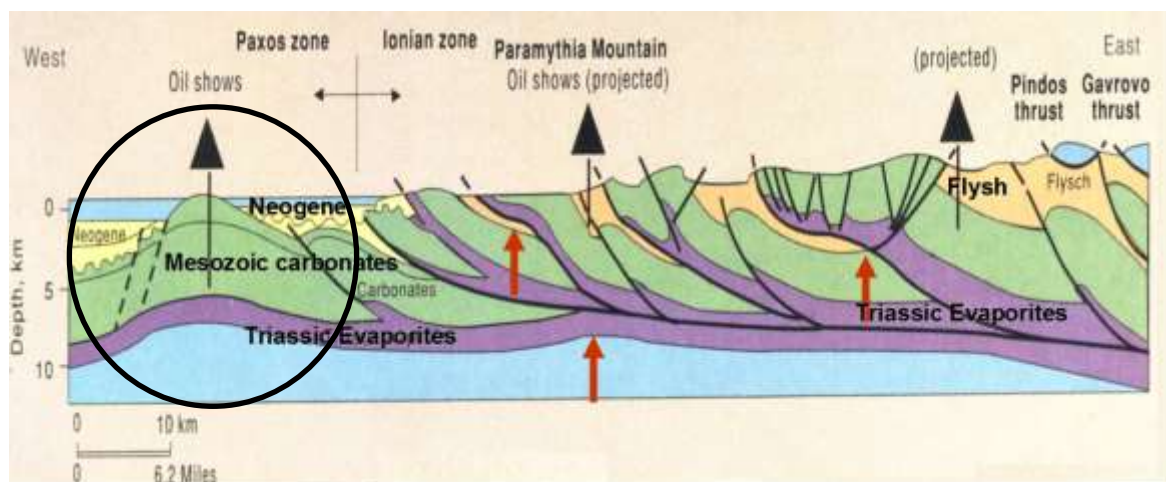


Σχήμα 1.1: Απλοποιημένη στρωματογραφική στήλη της ζώνης Παξών (Μανούτσου, 2013).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από σεισμικό μοντέλο χερσαίας περιοχής. Τα πραγματικά συνθετικά σεισμικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, αντλήθηκαν από τμήμα σεισμικής τομής που βρίσκεται στο νησί των Παξών στο βόρειο Ιόνιο πέλαγος (Σχήμα 1.2). Η εν λόγω σεισμική τομή παρουσιάστηκε από τα ΕΛΠΕ (Ελληνικά Πετρέλαια) κατά τον Οκτώβριο του 2015 στα Χανιά στο συνέδριο Γεωφυσικής. Τα δεδομένα της χερσαίας αυτής τομής χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξαχθούν ανάλογα συμπεράσματα σε θαλάσσια περιοχή.



Σχήμα 1.2: Μορφή υπεδάφους σε Μεσοζωικούς ανθρακίτες καλυμμένους από Νεογενή ιζήματα στην Αποούλια πλατφόρμα. (ΕΛΠΕ, 20015)



Σχήμα 1.3: Γεωλογική τομή της περιοχής μελέτης όπου αποτυπώνονται οι θέσεις εμφάνισης υδρογονανθράκων (oil shows) καθώς και πιθανές θέσεις παγίδευσης υδρογονανθράκων (κόκκινα βέλη) κάτω από εβαπορίτες του Τριαδικού. (ΕΛΠΕ, 2015)

1.3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ

1.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης αποτελεί το εργαλείο της έρευνας για την γεωλογική δομή μιας περιοχής. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στους νόμους της διάδοσης των ελαστικών κυμάτων, τα οποία παράγονται από πηγές πάνω στην επιφάνεια της γης ή σε

βάθη πολύ κοντά στην επιφάνειά της. Τα ελαστικά αυτά κύματα διαδίδονται στα στρώματα του φλοιού, ενώ είναι σαφές πως κατά τη διάρκεια της μετάδοσής τους πραγματοποιούνται συνεχείς διαθλάσεις και ανακλάσεις στις διαχωριστικές επιφάνειες των στρωμάτων της γης. Τα δεδομένα της διάδοσης των κυμάτων στα στρώματα του φλοιού της γης συλλέγονται από κατάλληλα όργανα. Στην περίπτωση χερσαίων διασκοπήσεων χρησιμοποιούνται γεώφωνα, ενώ στην περίπτωση των θαλάσσιων διασκοπήσεων χρησιμοποιούνται υδρόφωνα. Η καταλληλότερη και προβλεπόμενη θέση τους είναι σε μικρές αποστάσεις από το σημείο παραγωγής των κυμάτων. Ιδανικά τοποθετούνται σε ισαποστάσεις μεταξύ τους και σε αποστάσεις από την πηγή που είναι σε μικρότερες αποστάσεις από το επιθυμητό βάθος διασκόπησης.

1.3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ

Για να μπορέσει να γίνει σωστά ο προσδιορισμός του μετώπου του κύματος γίνεται χρήση ορισμένων απλών αρχών της κυματικής Φυσικής. Οι αρχές αυτές δίνονται στη συνέχεια.

Αρχή Huygens

Κάθε σημείο του μετώπου σφαιρικού κύματος μέσα σε ισότροπο και ομοιογενές μέσο μπορεί να θεωρηθεί σαν πηγή νέου σφαιρικού κύματος. Έχοντας τη θέση του μετώπου σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, η θέση που θα έχει το μέτωπο μετά από χρόνο Δt μπορεί να βρεθεί εύκολα αν θεωρήσουμε κάθε σημείο του πρώτου μετώπου σαν νέα πηγή κύματος (Αποστολόπουλος, 2013).

Αρχή Fermat

Η αρχή αυτή που ανέπτυξε ο Fermat είναι γνωστή και ως αρχή του ελάχιστου χρόνου. Η αρχή αυτή αναφέρεται στο ότι η διάδοση των κυμάτων μεταξύ δυο σταθερών σημείων (πηγή-γεώφωνο) ακολουθεί διαδρομή της οποίας ο χρόνος διάδοσης είναι ο ελάχιστος, από όλες τις άλλες πιθανές διαδρομές. Δηλαδή, τα σεισμικά κύματα ακολουθούν τροχιές ελάχιστου χρόνου. Εφαρμόζοντας την αρχή Fermat προκύπτει ότι η τροχιά ενός κύματος πρέπει να είναι ευθεία γραμμή σε ένα μέσο με σταθερή ταχύτητα. Αυτό συμβαίνει διότι η ευθεία είναι η συντομότερη απόσταση μεταξύ δυο σημείων και καθώς η ταχύτητα διατηρείται σταθερή, η απόσταση μεταξύ των δυο σημείων θα είναι εκείνη με τον ελάχιστο χρόνο διάδοσης. Καθώς το κύμα αυξάνει την απόστασή του από το αρχικό

κέντρο (πηγή) η ακτίνα καμπυλότητας θα αυξηθεί τόσο με αποτέλεσμα να θεωρηθεί ως επίπεδο μετωπικό κύμα (Παπαδόπουλος, 2010).

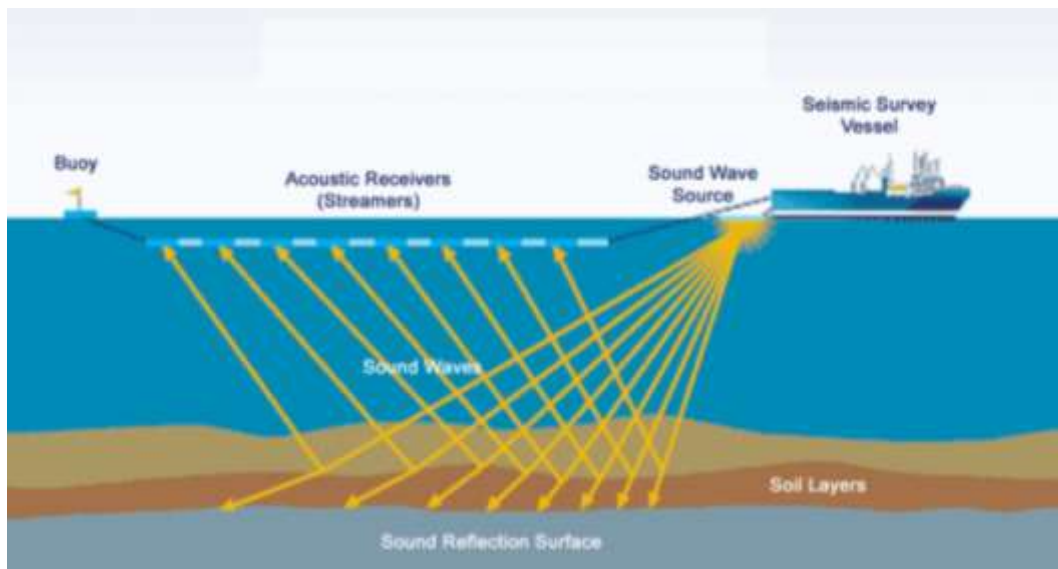
Νόμος του Snell

Όταν ένα σεισμικό κύμα προσπέσει πάνω σε επιφάνεια που χωρίζει δυο μέσα με διαφορετικές ελαστικές ιδιότητες (ταχύτητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων ή/και πυκνότητα μέσου), μέρος της ενέργειας ανακλάται και παραμένει στο ίδιο μέσο όπως η αρχική ενέργεια, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια διαθλάται μέσα στο άλλο μέσο με σύγχρονη μεταβολή στη διεύθυνση διάδοσης. Ο τρόπος ανάκλασης και διάθλασης των σεισμικών κυμάτων είναι βασικά ο ίδιος όπως στη γεωμετρική οπτική και για μεγάλες αποστάσεις από την πηγή μπορούμε να προσεγγίσουμε τα κύματα με σεισμικές ακτίνες. Έτσι οι αρχές Huygens και Fermat μπορούν να εφαρμοστούν και για σεισμικά κύματα (Αποστολόπουλος, 2013).

1.3.3 ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗ

Γνωρίζουμε ότι η σεισμική ανάκλαση αποτελεί μια από τις πλέον αξιόπιστες μεθόδους για την εξερεύνηση των υδρογονανθράκων. Σαν στόχο έχει τη δημιουργία ενός γεωλογικού μοντέλου, το οποίο να μπορεί να δικαιολογήσει την ύπαρξη ενός κοιτάσματος υδρογονανθράκων. Με τη βοήθεια της μεθόδου αυτής είναι δυνατή η απεικόνιση του υπεδάφους σε βάθος που κυμαίνεται από 20 μέτρα μέχρι και μερικά χιλιόμετρα.

Στις θαλάσσιες διασκοπήσεις, χρησιμοποιείται ένα πλοίο, το οποίο σέρνει ένα σεισμικό καλώδιο μήκους 6-12 km (Σχήμα 1.4). Στο πλοίο αυτό βρίσκεται μια συστοιχία αεροβόλων που δημιουργούν τα σεισμικά κύματα. Το καλώδιο μπορεί να βρίσκεται βυθισμένο σε βάθος 8-20 m από την επιφάνεια της θάλασσας ανάλογα με τα καιρικά φαινόμενα και τον κυματισμό που επικρατεί. Σε όλο το μήκος του καλωδίου υπάρχουν τοποθετημένοι δέκτες σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Οι δέκτες αυτοί είναι ευαίσθητοι στη μεταβολή της πίεσης του νερού, ή/και στην ταχύτητα ταλάντωσης των μορίων του νερού σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Τα μεγέθη αυτά καταγράφονται σε συνάρτηση με το χρόνο σε πολυκάναλα ψηφιακά καταγραφικά.



Σχήμα 1.4: Σχηματική αναπαράσταση θαλάσσιας σεισμικής διασκόπησης (Μούχου,2014).

Άλλα όργανα του πλοίου που λαμβάνουν βοηθητικά δεδομένα είναι τα εξής:

- Όργανα εντοπισμού θέσης πλοίου,
- Κεραία λήψης σημάτων και παρακολούθησης δορυφόρων,
- Όργανα GPS,
- Βυθόμετρα,
- Γυροσκοπικές πυξίδες,
- Ραντάρ,
- Συσκευές ραδιοεπικοινωνίας.

Όλα τα δεδομένα συλλέγονται και αφού οι συντεταγμένες του καλωδίου υπολογιστούν, καθορίζεται το σχήμα του βάσει καμπύλης προσαρμογής. Επίσης, κατά την διαδικασία συλλογής δεδομένων και εξαγωγής συμπερασμάτων, προκύπτουν οι τελικές θέσεις των πηγών και των υδροφώνων όπως τέλος απορρίπτονται οποιεσδήποτε μη κανονικές μετρήσεις συλλέχθηκαν.

1.3.3.1 ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ, ΑΕΡΟΒΟΛΟ, ΥΔΡΟΦΩΝΑ

Η βασική λειτουργική αρχή κάθε θαλάσσιας σεισμικής πηγής, είναι να προκαλέσει την απότομη δημιουργία μιας περιοχής υποπίεσης ή υπερπίεσης μέσα στη μάζα του νερού, προκαλώντας έτσι τη γένεση σεισμικών κυμάτων.

Μια ανεπιθύμητη συνέπεια της δημιουργίας σεισμικών παλμών μέσα στο νερό, είναι η πρόκληση φυσαλίδων που δρουν σαν δευτερογενείς σεισμικοί παλμοί, αυξάνοντας έτσι σημαντικά το επίπεδο θορύβου στο αναγραφόμενο σήμα. Οι δημιουργούμενες φυσαλίδες μεγαλώνουν σφαιρικά σε όγκο και αδιαβατικά, μέχρις ότου η πίεση που επικρατεί στο εσωτερικό τους εξισωθεί με την εξωτερική πίεση που δημιουργείται λόγω της συρρίκνωσης που συμβαίνει στην εξωτερική ζώνη της φυσαλίδας συνέπεια της ψύξης της από το νερό. Στη συνέχεια η φυσαλίδα αρχίζει να συρρικνώνεται με αποτέλεσμα το κέντρο της να θερμαίνεται αδιαβατικά και κατόπιν να παρατηρείται η επαναδιαστολή της. Η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται 2-3 φορές.

Είναι χαρακτηριστικό ότι παρατηρείται μια συνεχής μείωση της περιόδου ταλάντωσης των φυσαλίδων, προφανώς λόγω απωλειών ενέργειας, ενώ το πλάτος και η ενέργεια του πρώτου παλμού εξαρτώνται από το βάθος και τα χαρακτηριστικά της σεισμικής πηγής.

Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται αρκετές φορές για να εξουδετερωθεί το φαινόμενο της φυσαλίδας, είναι να τοποθετηθεί η σεισμική πηγή σε μικρό βάθος, έτσι ώστε οι δημιουργούμενες φυσαλίδες να φθάνουν γρήγορα στην επιφάνεια. Η μέθοδος αυτή έχει πολύ καλά αποτελέσματα, παρουσιάζει όμως το μειονέκτημα ότι ένα μεγάλο ποσοστό της εκπεμπόμενης ενέργειας χάνεται.

Αεροβόλο

Τα αεροβόλα αποτελούν τις πιο συνηθισμένες θαλάσσιες σεισμικές πηγές. Αποτελούνται από δυο δοχεία υψηλής πίεσης, που συνδέονται με ένα κινούμενο έμβολο. Αρχικά, διοχετεύεται στο δοχείο (Α) κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης, αέρας υψηλής πίεσης (2000psi) και δια μέσου οπής που υπάρχει στο στέλεχος του εμβόλου, εισέρχεται στο δοχείο (Β). Στη συνέχεια, ανοίγει μια σωληνοειδής βαλβίδα με τη βοήθεια ενός ηλεκτρικού παλμού που διοχετεύει αέρα μεγάλης πίεσης κάτω από την πάνω επιφάνεια του εμβόλου, προκαλώντας την προς τα πάνω κίνηση του και την απότομη διαφυγή του αέρα, που βρίσκεται στο κάτω δοχείο, στο νερό. Ακολούθως η πίεση που υπάρχει στο δοχείο Α ωθεί το έμβολο στην κατώτερη θέση και ο κύκλος επαναλαμβάνεται. (Αποστολόπουλος,2013)

Υδρόφωνα

Οι διατάξεις αυτές χρησιμεύουν για την ανίχνευση των κυμάτων πίεσης που προκαλούν οι θαλάσσιες σεισμικές πηγές. Οι μεταβολές πίεσης διαβιβάζονται δια μέσου του κελύφους

του οργάνου επάνω σε λεπτά φύλλα χαλαζία, αναπτύσσοντας έτσι πιεζοηλεκτρικές τάσεις που είναι ανάλογες των μεταβολών πίεσης. Επομένως, τα υδρόφωνα μετρούν επιταχύνσεις παρά ταχύτητες. Τα υδρόφωνα ευρίσκονται μέσα σε κατάλληλα σεισμικά καλώδια τα οποία σύρονται μαζί με συστοιχίες αεροβόλων από κατάλληλα διαμορφωμένα πλοία. (Αποστολόπουλος, 2013)

Τα υδρόφωνα χρησιμοποιούνται μαζί με τους γεωαισθητήρες με σκοπό τα ανερχόμενα και κατερχόμενα κυματικά πεδία να διαχωρίζονται. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η επεξεργασία των δεδομένων με σκοπό την απομάκρυνση των ανακλάσεων των ανεπιθύμητων κατερχόμενων φανταστικών (ghost) κυματικών πεδίων.

1.4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

Η επιστήμη της Γεωφυσικής για να περιγράψει το εσωτερικό της Γης κάνει χρήση απλοποιημένων προσομοιωμάτων. Το εσωτερικό της Γης αποτελείται από γεωλογικούς σχηματισμούς με πλευρικές ασυνέχειες, των οποίων τα όρια έχουν πολύπλοκη γεωμετρία και η σύστασή τους είναι ανομοιογενής, με αποτέλεσμα οι γεωφυσικές ιδιότητες τους να ποικίλουν ακόμα και μέσα στους ίδιους τους γεωλογικούς σχηματισμούς. Έτσι, είναι δύσκολο να βρεθούν αναλυτικές λύσεις για τα τρισδιάστατα ή ακόμα και τα δισδιάστατα προσομοιώματα της Γης, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα στις γεωφυσικές μελέτες.

Ένα άλλο πρόβλημα που επικρατεί είναι η επίλυση της εξίσωσης της σεισμικής κίνησης. Για σχετικά απλά προσομοιώματα της δομής του εσωτερικού της Γης στη μία και στις δύο διαστάσεις η επίλυσή της με αναλυτικές μεθόδους είναι δυνατή. Αντίθετα, στα πολύπλοκα ή αρκετά ρεαλιστικά προσομοιώματα της δομής του εσωτερικού της Γης, δεν μπορούν να προσδιοριστούν λύσεις με αναλυτικές μεθόδους. Για το λόγο αυτό έχουν δημιουργηθεί αναλυτικές μέθοδοι, οι οποίες μπορούν να υπολογίσουν τη σεισμική απόκριση για μονοδιάστατα προσομοιώματα δομής π.χ. η μέθοδος Kennett-Kerry (Kennett and Kerry, 1979) ενώ ένα παράδειγμα μεθόδου που υπολογίζει την αναλυτική λύση για απλά προβλήματα (π.χ. ομογενή ημιχώρο) αλλά και πιο σύνθετα (π.χ. επιφανειακά στρώματα υπερκείμενα σε ημιχώρο) στις μία και στις δύο διαστάσεις είναι η μέθοδος του Διακριτού Κυματάριθμου (Bouchon, 1981). Στην περίπτωση που υπάρχουν τέτοιου είδους

προβλήματα στις τρεις διαστάσεις, γίνεται εφαρμογή σε προσεγγιστικές-αριθμητικές μεθόδους.

«Οι αριθμητικές μέθοδοι δημιουργήθηκαν με σκοπό το μετασχηματισμό μιας κλασικής ή ολοκληρωτικής διαφορικής εξίσωσης 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» (Σκαρλατούδης, 2009).

Υπάρχουν αριθμητικές μέθοδοι που κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης σεισμικών κυμάτων περιγράφουν τυχόν ανισοτροπία του μέσου, ενσωματώνουν με ρεαλιστικό τρόπο την ανελαστική απόσβεση και τη γεωμετρική διασπορά των σεισμικών κυμάτων, καθώς επίσης περιγράφουν την επίδραση της τοπογραφίας της ελεύθερης επιφάνειας στη σεισμική κίνηση και δίνουν ρεαλιστικά αποτελέσματα για ένα ικανοποιητικό φάσμα συχνοτήτων. Οι μέθοδοι αυτές θα πρέπει παράλληλα να είναι υπολογιστικά αποδοτικές (οικονομική στη χρήση υπολογιστικής μνήμης και χρόνου).

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών (Π.Δ.) ανήκει στις μεθόδους πλέγματος, επομένως 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. Παρόλο που η κανονικότητα του κανάβου στο χώρο και στο χρόνο είναι γενικά αυθαίρετη, επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια της προσέγγισης. Η παράγωγος μιας συνάρτησης προσεγγίζεται από τον τύπο των Π.Δ. που χρησιμοποιεί τιμές της συνάρτησης σε συγκεκριμένα σημεία του κανάβου.

Η μέθοδος των Π.Δ. αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές αριθμητικές μεθόδους στην προσομοίωση της σεισμικής κίνησης. Το γεγονός οφείλεται στο ότι 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).

Η αριθμητική μέθοδος των Π.Δ. βεβαίως διαθέτει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στα πλεονεκτήματα της συγκαταλέγεται η απλότητά της στην εφαρμογή ακόμα και σε αρκετά σύνθετα προβλήματα. Το μεγάλο αυτό πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί και το κριτήριο επιλογής της από πολλούς ερευνητές οδηγώντας τους σε λανθασμένα μερικές φορές αποτελέσματα. Η ευστάθεια και το ελάχιστο βήμα χωρικής διακριτοποίησης σε συνάρτηση με το ελάχιστο μήκος κύματος που διαδίδεται σε ένα υπολογιστικό προσομείωμα είναι παράγοντες που οδηγούν στο φαινόμενο της αριθμητικής διασποράς και αποτελούν μειονεκτήματα της μεθόδου.

1.4.1 ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΑ ΟΡΙΑ (ABSORBING BOUNDARIES)

Το πλέγμα των Π.Δ. έχει στο χώρο πεπερασμένες διαστάσεις και για το λόγο αυτό θα πρέπει να περιοριστεί από τεχνητά όρια, π.χ. επίπεδα πλέγματα που δεν έχουν γειτονικά πλέγματα από τη μία πλευρά. Τα όρια αυτά ονομάζονται όρια απορρόφησης. Οι οριακές αυτές συνθήκες που εισάγονται στα άκρα του μαθηματικού μοντέλου έχουν ως στόχο τη λύση του προβλήματος της διάδοσης των κυμάτων σε ένα μέσο, το οποίο όμως δεν είναι ορισμένο σε οποιαδήποτε διεύθυνση αλλά υπακούει σε συγκεκριμένες συνθήκες.

Στις περισσότερες περιπτώσεις τα όρια αυτά είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να αφήνουν την ενέργεια των κυμάτων να περνά μόνο από τη μία πλευρά τους. Στην περίπτωση αυτή ονομάζονται *μη ανακλαστικά* ή *απορροφητικά όρια* ή *συνθήκες απορροφητικών ορίων* (*Absorbing Boundary Conditions ABC*). Στις Π.Δ. ένα τέτοιο είδος ορίων μπορεί να περιγραφεί μόνο κατά προσέγγιση (Σκαρλατούδης, 2009).

Κατά τη μέθοδο των σύνθετων ορίων απορρόφησης πραγματοποιείται ένας συνδυασμός ανάμεσα σε συνθήκες ορίων απορρόφησης μικρής γωνίας πρόσπτωσης. Αυτός ο συνδυασμός μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση μονοδιάστατης κυματικής εξίσωσης στα όρια του μοντέλου και τον σχεδιασμό, μιας ενδιάμεσης ζώνης μεταξύ του μοντέλου και των ορίων του όπου θα δρα ένα ανισότροπο φίλτρο. Το ανισότροπο φίλτρο ρυθμίζει την κατεύθυνση διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, έτσι ώστε η γωνία πρόσπτωσης στο όριο του μοντέλου να είναι 90° . Με την περιγραφόμενη μεθοδολογία γίνεται απορρόφηση στα επιφανειακά κύματα, αλλά και στα κύματα χώρου. Αριθμητικά παραδείγματα

επεξηγούν την αποτελεσματικότητα των μεθόδων αυτών στην απορρόφηση των τεχνητών ανακλάσεων από τα όρια του μοντέλου (Dai et al, 1994).

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία του σεισμικού μοντέλου, καθώς και αυτή των συνθετικών δεδομένων. Γίνεται αρχικά αναφορά στις πληροφορίες που αφορούν τον υπό μελέτη σχηματισμό. Έπειτα, περιγράφεται 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 ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 1.2, η γραμμή μελέτης βρίσκεται στην περιοχή των Παξών. Ειδικότερα, η σεισμική γραμμή μελέτης διαθέτει 10 km σεισμικό καλώδιο και πραγματοποιείται σε βάθος 12 km από την επιφάνεια της θάλασσας και 30 km μήκος.

Παρακάτω γίνεται συνοπτική αναφορά των βημάτων που ακολουθήθηκαν, ώστε να γίνει κατανοητή η διαδικασία δημιουργίας του σεισμικού μοντέλου. Για τη δημιουργία του σεισμικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν ως βάση πραγματικά σεισμικά δεδομένα από ένα τμήμα σεισμικής τομής που βρίσκεται στο νησί των Παξών (Σχήμα 1.3). Η γεωλογία της περιοχής που απεικονίζεται στο Σχήμα 1.3 θεωρήθηκε ότι θεωρήθηκε ότι αντιπροσωπεύει και το θαλάσσιο χώρο νότια των Παξών. Για αυτό στο σεισμικό μοντέλο που μελετήθηκε προστέθηκε ένα στρώμα νερού μέσης στάθμης 1500m πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια του μοντέλου που απεικονίζεται στην τομή του Σχήματος 1.3. Από τη γεωλογία της περιοχής αποδείχθηκε πως η δομή μελέτης αποτελείται από 5 στρώματα (4 διεπιφάνειες). Το πρώτο στρώμα αντιστοιχεί σε θαλάσσιο νερό, το δεύτερο σε Μειοκαινικά-Νεογενή ιζήματα, το τρίτο σε Ανθρακικά ιζήματα, το τέταρτο σε Εβαπορίτες και το πέμπτο αποτελείται από Ανθρακικά ιζήματα. Οι τμηματικές ταχύτητες κάθε στρώματος, αλλά και

η πυκνότητά τους παρατίθενται στον Πίνακα 2.1. Η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων για το στρώμα του θαλασσινού νερού, αν και είναι μηδενική, τέθηκε ίση με 0.01 m/s για λόγους ευστάθειας των υπολογισμών στο σχήμα των πεπερασμένων διαφορών.

	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\rho(\text{g/cm}^3)$
Θάλασσα	1500	0.01	1.023
Νεογενές	2800	1617	2.6
Ανθρακικά	4500	2600	2.7
Εβαπορίτες	5500	3175	2.5
Τριαδικό	4500	2600	2.7

Πίνακας 2.1: Διαμήκης (Vp) και εγκάρσια (Vs) ταχύτητα και πυκνότητα (ρ) κάθε στρώματος

2.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για να γίνει εφικτή η δημιουργία και η 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.

Για να δημιουργηθεί το συνθετικό μοντέλο, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν μερικές παράμετροι, ώστε να αποφευχθούν προβλήματα ευστάθειας και αριθμητικής διασποράς που μπορεί να προκύψουν κατά την επίλυση της διαφορικής κυματικής εξίσωσης με τη χρήση των πεπερασμένων διαφορών.

- **Αριθμητική διασπορά (μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης με την συχνότητα):**
Για την συγκεκριμένη παράμετρο το κριτήριο το οποίο θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν για την αποφυγή προβλημάτων είναι το ακόλουθο:

$$Grid \leq \frac{\lambda_{min}}{6} = \frac{Vs_{min}}{6 \times f_{max}} \cong \frac{Vs_{min}}{15 \times f_{central}} = 10m$$

Όπου :

Grid: ελάχιστο βήμα χωρικής διακριτοποίησης. Χρησιμοποιήθηκε η τιμή 10m η οποία πληροί το κριτήριο διασποράς.

V_{min}: η ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, εξαιρουμένη αυτής των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων στο θαλασσίνο νερό, η οποία θεωρητικά είναι μηδενική. Χρησιμοποιήθηκε η τιμή 1500 m/s.

λ_{min}: το ελάχιστο μήκος κύματος

f_{max}: η μέγιστη συχνότητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων

f_{central}: η κεντρική συχνότητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων. Χρησιμοποιήθηκε η τιμή 10Hz.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή ισαπόστασης των υδροφώνων πρέπει να διαιρείται ακέραια από την τιμή του ελάχιστου βήματος χωρικής διακριτοποίησης. (Grid).

- **Ευστάθεια:** Για αυτή την παράμετρο θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν το εξής κριτήριο:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \times V_{pmax} \leq \frac{2}{3}$$

Όπου:

V_{pmax}: η μέγιστη ταχύτητα των P – κυμάτων. Χρησιμοποιήθηκε η τιμή 5500 m/s.

Δt: ελάχιστο βήμα χρονικής διακριτοποίησης.

Δx: ελάχιστο βήμα χωρικής διακριτοποίησης (Grid). Χρησιμοποιήθηκε η τιμή 10m.

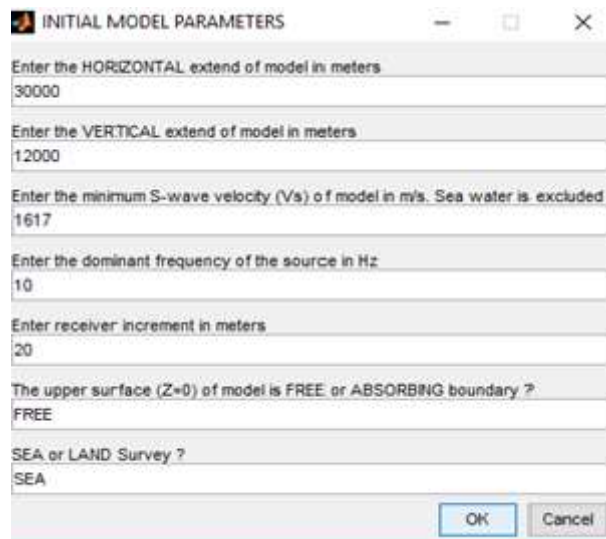
Πιο συγκεκριμένα έχουμε, $\frac{\Delta t}{10} \times 5500 \leq \frac{2}{3}$. Άρα, $\Delta t = 0.12$ ms. Έτσι ο αλγόριθμος θα επιλέξει την ακέραια τιμή $\Delta t = 0.1$ ms.

Λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω περιορισμούς, θα ακολουθήσει η δημιουργία των συνθετικών δεδομένων στο περιβάλλον της Matlab, αφού πρώτα ορίσουμε τις παραμέτρους των υδροφώνων καθώς και της πηγής.

Αρχικά, με την εντολή **PSV_SYNTHETICS_VER11**; μέσω του λογισμικού Matlab γίνεται η δημιουργία του σεισμικού μοντέλου.

Για την δημιουργία του μοντέλου και με βάση τους κατάλληλους περιορισμούς ορίστηκαν οι παράμετροι του πλέγματος, το χρονικό βήμα $\Delta t=0.1$ ms, οι διαστάσεις του κάθε κελιού οι οποίες καθορίζονται από τις αποστάσεις των κόμβων στις διευθύνσεις X και Z, με Δx Δz ίσες με 10 m.

Στη συνέχεια εισάγεται η οριζόντια έκταση 30000m και το βάθος του μοντέλου 12000m, η ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης στα υπάρχοντα στρώματα (εκτός του στρώματος νερού) 1500 m/s, η συχνότητα της πηγής 10Hz και η ισαπόσταση των υδροφώνων 20m (Σχήμα 2.1)



INITIAL MODEL PARAMETERS

Enter the HORIZONTAL extend of model in meters
30000

Enter the VERTICAL extend of model in meters
12000

Enter the minimum S-wave velocity (Vs) of model in m/s. Sea water is excluded
1617

Enter the dominant frequency of the source in Hz
10

Enter receiver increment in meters
20

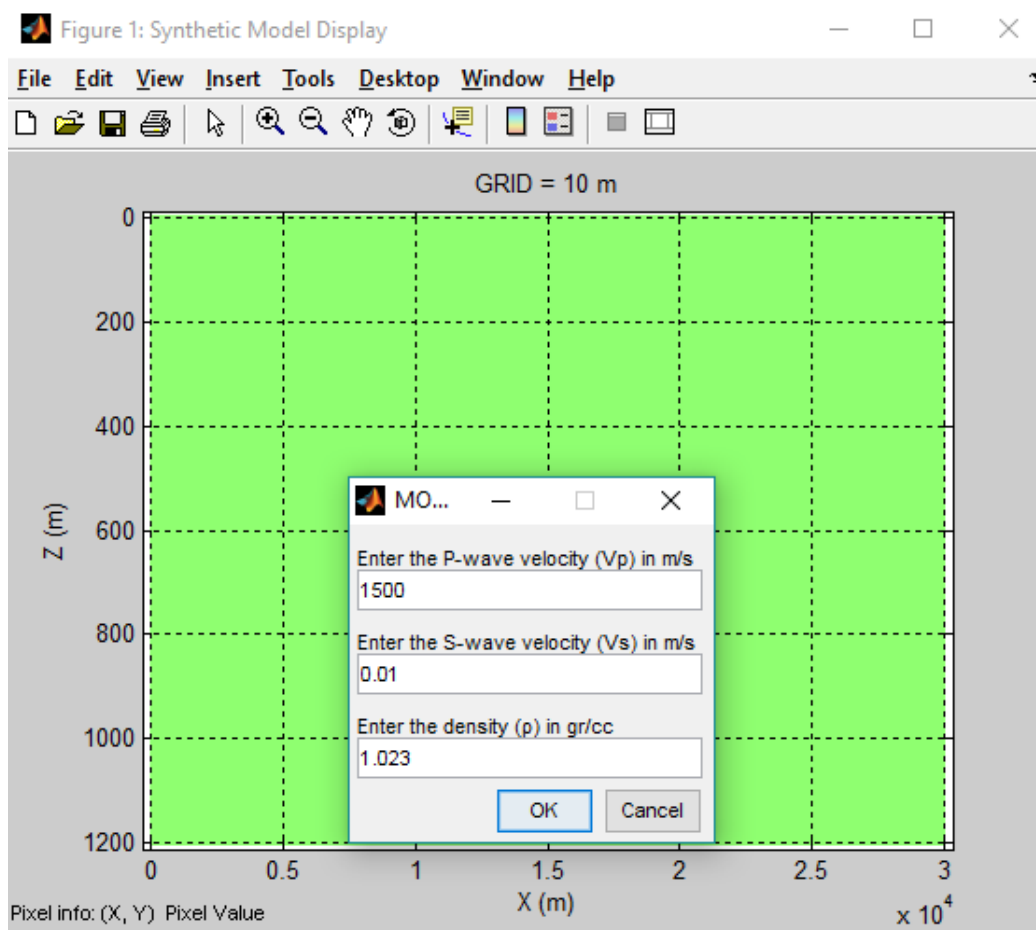
The upper surface (Z=0) of model is FREE or ABSORBING boundary ?
FREE

SEA or LAND Survey ?
SEA

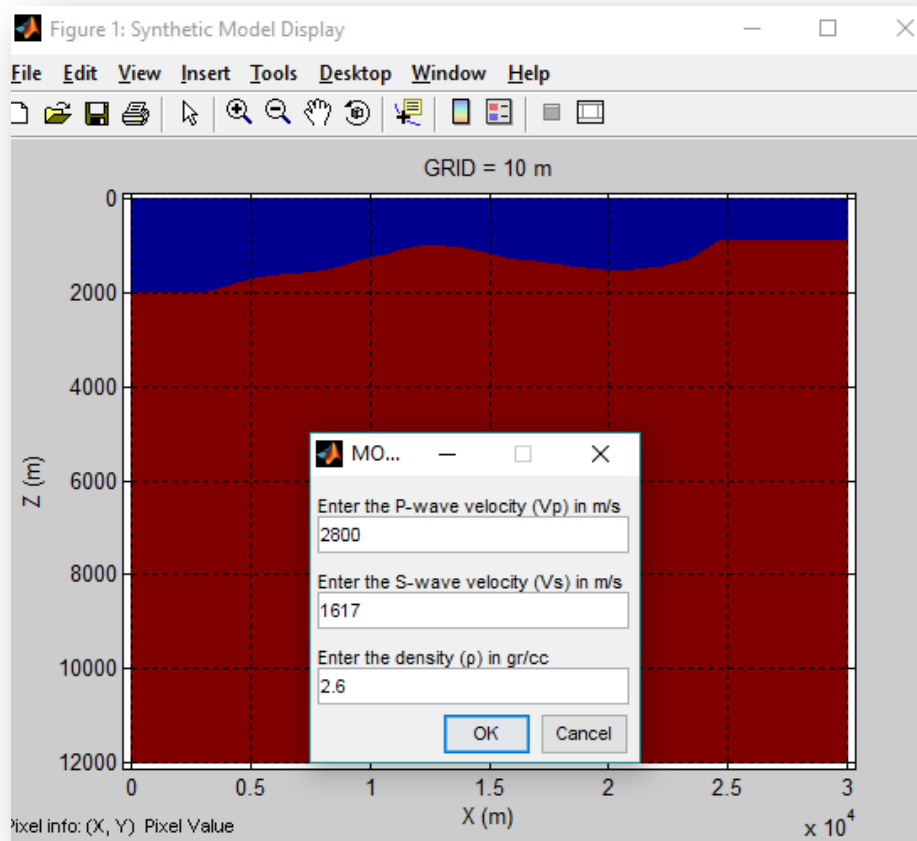
OK Cancel

Σχήμα 2.1: Ορισμός αρχικών παραμέτρων μοντέλου

Έπειτα, πραγματοποιήθηκε η οριοθέτηση των γεωλογικών στρωμάτων του μοντέλου. Αυτό έγινε δίνοντας τις συντεταγμένες για τα όρια κάθε στρώματος μέσω πινάκων Matlab™. Μετά την οριοθέτηση κάθε στρώματος γίνεται εισαγωγή των τιμών των ταχυτήτων του V_p , V_s καθώς και της πυκνότητάς του. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία για την δημιουργία και των υπόλοιπων στρωμάτων. Οι παράμετροι των στρωμάτων παρουσιάστηκαν ήδη στον Πίνακα 2.1.

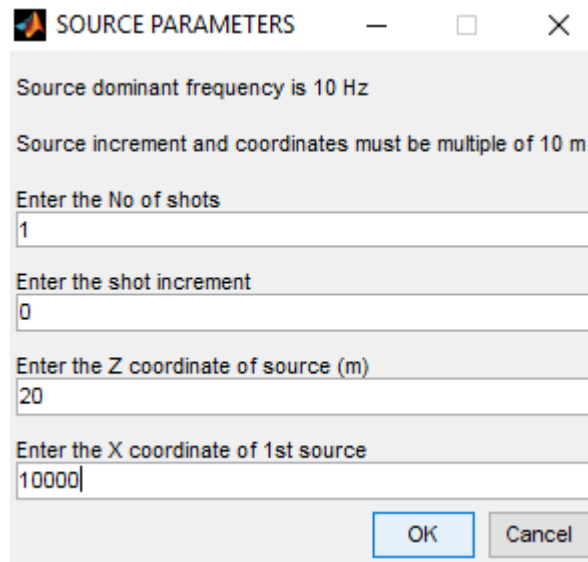


Σχήμα 2.2: Παράμετροι στρώματος Θάλασσας.



Σχήμα 2.3: Παράμετροι στρώματος Μειοκαινικών – Νεογενών

Αφού έχει δημιουργηθεί το μοντέλο, ορίζονται οι παράμετροι των υδροφώνων και της πηγής. Στα Σχήματα 2.4 και 2.5 απεικονίζονται αναλυτικά οι τιμές που δόθηκαν, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση της απόκτησης των σεισμικών δεδομένων ανάκλασης. Όπως φαίνεται και από τα σχήματα στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε *free surface* και *sea survey*, καθώς ο σχηματισμός που θα μελετηθεί βρίσκεται σε θαλάσσιο περιβάλλον.



SOURCE PARAMETERS

Source dominant frequency is 10 Hz

Source increment and coordinates must be multiple of 10 m

Enter the No of shots

1

Enter the shot increment

0

Enter the Z coordinate of source (m)

20

Enter the X coordinate of 1st source

10000

OK Cancel

Σχήμα 2.4: Παράμετροι πηγής

Μία πηγή (Σχήμα 2.4) συνοδεύεται από 501 δέκτες. Κατά την οριζόντια διεύθυνση η πρώτη πηγή τοποθετήθηκε στα 10.000 m (Σχήμα 2.4), ενώ ο πρώτος δέκτης στα 0 m και ο τελευταίος (501) στα 10.000 m. Αρχικά, η ισαπόσταση των πηγών ήταν στα 1000m, αλλά λόγω του ότι δεν υπήρχε καθαρή εικόνα έγινε εκ νέου προσομοίωση, ώστε η τελική ισαπόσταση των πηγών να είναι 500m. Επομένως, η δεύτερη πηγή βρίσκεται στα 10.500m (όλη η διάταξη πηγής-υδροφώνων μεταφέρθηκε 500 m δεξιά). Για να καλυφθεί όλο το μοντέλο τοποθετήθηκαν συνολικά 40 πηγές. Η τελευταία πηγή τοποθετήθηκε στα 29.500 m. 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 ($3 \cdot \Delta x = 10\text{m}$) από οποιαδήποτε διαχωριστική επιφάνεια ή όριο του μοντέλου. Για αυτό το λόγο, οι πηγές τοποθετήθηκαν από την επιφάνεια της θάλασσας σε βάθος 20 m, το οποίο αντιστοιχεί περίπου σε αυτό που χρησιμοποιείται στην πραγματικότητα σε θαλάσσιες διασκοπήσεις σεισμικής ανάκλασης.

Σχήμα 2.4: Παράμετροι υδροφώνων

Κατά το τελευταίο στάδιο της δημιουργίας του συνθετικού μοντέλου τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας αποθηκεύονται σε τρεις πίνακες (*.mat) της Matlab:

- V_x (οριζόντια ταχύτητα ταλάντωσης σωματιδίων)
- V_z (κατακόρυφη ταχύτητα ταλάντωσης σωματιδίων) και
- V_{pr} (πίεση)

Μέσω των V_x δεδομένων η απεικόνιση των απευθείας κυμάτων είναι πιο καθαρή από ότι των ανακλώμενων διότι η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας ταλάντωσης τους (V_x) αποκτά μηδενικές τιμές, καθώς τα σεισμικά κύματα διαδίδονται και ανακλώνται σχεδόν σε κατακόρυφη διεύθυνση. Αντίστοιχα, μέσω των V_z δεδομένων η απεικόνιση των ανακλώμενων κυμάτων είναι πολύ καθαρότερη.

Αφού ολοκληρωθεί η δημιουργία των συνθετικών δεδομένων όλες οι πληροφορίες για τις παραμέτρους των πηγών αποθηκεύονται σε αρχείο*.SRC, για τα υδρόφωνα σε αρχείο *.RCV, ενώ οι παράμετροι του μοντέλου σε αρχείο με επέκταση *.SMP.

- Το αρχείο *.SRC περιλαμβάνει πληροφορίες για τον αριθμό των πηγών που χρησιμοποιήθηκε, την ισαπόσταση των πηγών, τις ακριβείς θέσεις των πηγών πάνω

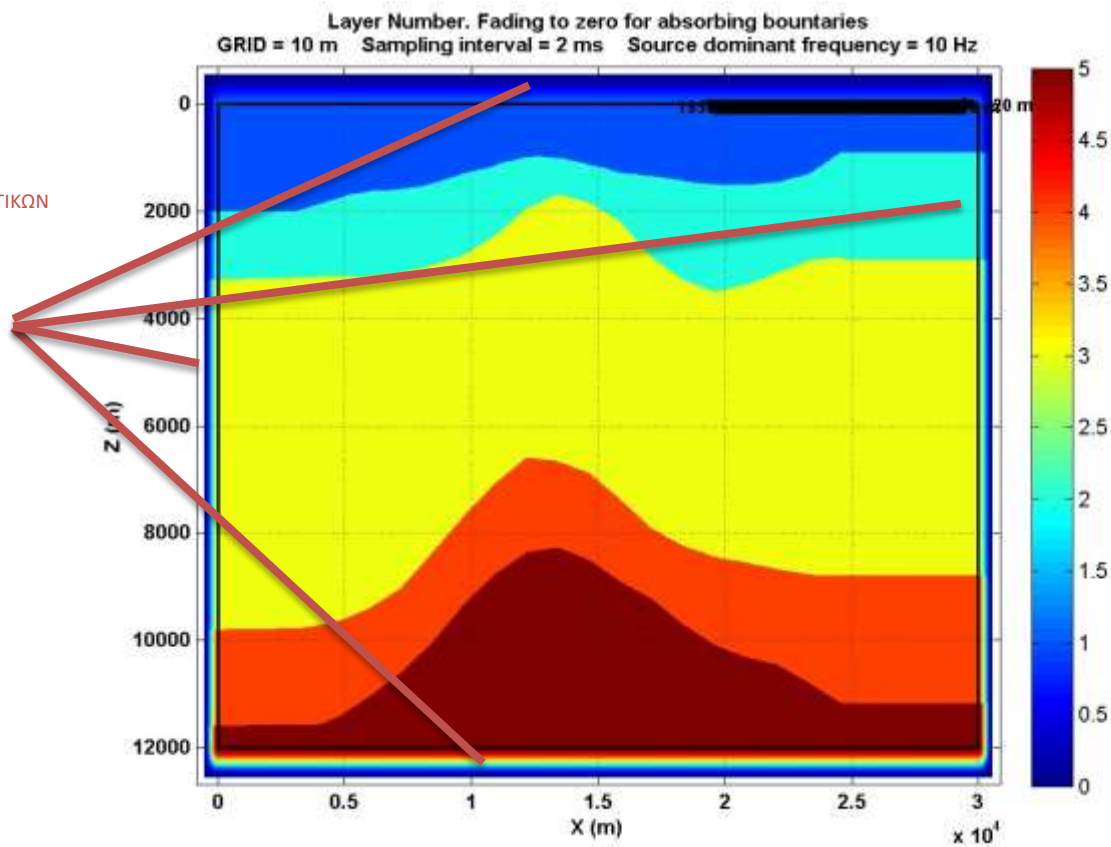
στο σεισμικό μοντέλο, τη κυματομορφή της πηγής καθώς και τη διάρκεια ταλάντωσής της.

- Το αρχείο *.RCV περιλαμβάνει πληροφορίες για την ισαπόσταση των δεκτών και πηγών, τις ακριβείς θέσεις των δεκτών πάνω στο σεισμικό μοντέλο, το ελάχιστο βήμα χρονικής διακριτοποίησης και τον συνολικό χρόνο καταγραφής.
- 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.

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) (Σχήμα 2.5). 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 συνθετικών δεδομένων απαλλαγμένων από τις επιφανειακές ανακλάσεις (ghost) που καταγράφονται 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 2.1) αντί για FREE πληκτρολογήθηκε ABSORBING.

ΖΩΝΕΣ
ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΩΝ
ΟΡΙΩΝ



Σχήμα 2.5: Συνθετικό μοντέλο με όρια απορρόφησης σε όλες τις πλευρές. Η πηγή τοποθετημένη είναι στα 29500 m, ενώ τα 501 υδρόφωνα έχουν τοποθετηθεί σε ισαποστάσεις των 20m από τα 19500m έως και τα 29500m. Τα διαφορετικά χρώματα αντιστοιχούν στον αύξοντα αριθμό του κάθε στρώματος, αρχής γενομένης (1) από το επιφανειακό στρώμα της θάλασσας.

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

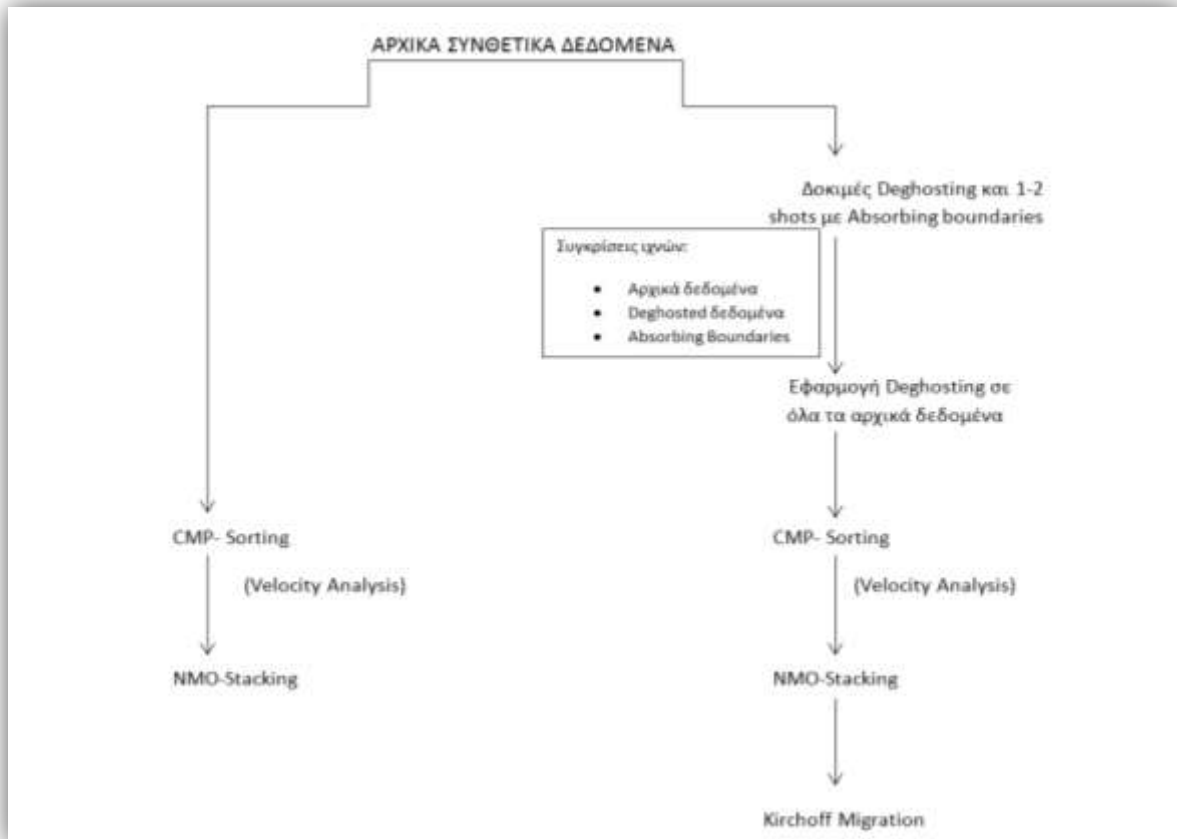
3.1. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιαστούν αναλυτικά 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 πιο κοντά στα πραγματικά δεδομένα. 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 αφιερώνεται στις διεργασίες απαλλαγής του σήματος από το ‘ghost’ φαινόμενο. Στο δεύτερο 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.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας δεδομένων

3.1.2 ΑΝΑΚΛΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ GHOST)

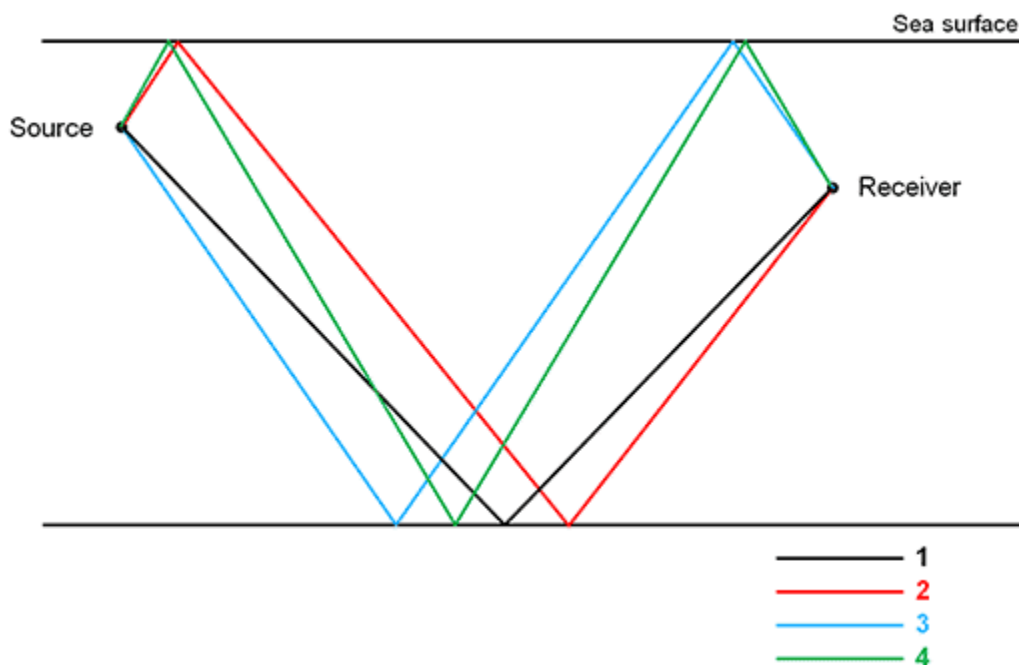
Το φαινόμενο Ghost παρουσιάζεται στις θαλάσσιες διασκοπήσεις όταν τα εκπεμπόμενα ηχητικά κύματα επιδρούν στην θαλάσσια επιφάνεια και αυτή με τη σειρά της επιδρά σαν τέλειος ακουστικός καθρέπτης δημιουργώντας επιφανειακές ανακλάσεις.

Οι συγκεκριμένες ανακλώμενες σεισμικές ακτίνες από τις διεπιφάνειες των σχηματισμών, ακολουθούνται απευθείας, μέσα στη γη από ετεροχρονισμένες ανακλάσεις οι οποίες προκαλούνται από την επιφάνεια της θάλασσας με άμεσο αποτέλεσμα τον υποβιβασμό

των καταγραφών που προέρχονται από χαμηλόσυχνα και υψίσυχνα κύματα, έτσι ώστε να μην δύναται η απεικόνιση του υπεδάφους με όλες τις σεισμικές συχνότητες. Αντιστοίχως, σε κάθε σημείο θέσης δέκτη του καλωδίου, μια ετεροχρονισμένη ανάκλαση επιδρά διαρκώς και με όχι επιθυμητό τρόπο με το σεισμικό κυματικό πεδίο. Στο Σχήμα 3.2 αποτυπώνονται σχηματικά τέσσερις περιπτώσεις ανακλάσεων και φαινομένου Ghost για την ανάλυση των σεισμικών κυματικών δεδομένων.

Οι υποβιβασμένες συχνότητες των κορυφών τείνουν σε χαμηλότερες τιμές, καθώς το βάθος του καλωδίου αυξάνεται, και το αντίστροφο (PGS, 2016).

Το φαινόμενο Ghost, η φύση των παρεμβολών του κύριου κυματικού πεδίου και το βάθος του καλωδίου είναι υπεύθυνο για την ανωτέρω διαπίστωση.



Σχήμα 3.2: Το συμβάν 1 είναι η κύρια διαδρομή της ακτίνας από την πηγή στον δέκτη.

Το συμβάν 2 περιλαμβάνει ένα φαινόμενο ghost στην πηγή από ανάκλαση στον πυθμένα της θάλασσας.

Το συμβάν 3 περιλαμβάνει ένα φαινόμενο ghost στον δέκτη από ανάκλαση στον πυθμένα της θάλασσας.

Το συμβάν 4 περιλαμβάνει φαινόμενα ghost τόσο στην πηγή όσο και στον δέκτη.

Πηγή:(PGS,2016).

3.1.2.1 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ GHOST ΣΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΚΑΛΩΔΙΑ (streamers)

Τα συμβατικά καλώδια (streamers) χρησιμοποιούν αισθητήρες πίεσης που ονομάζονται υδρόφωνα. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των υδρόφωνων είναι η μη ικανότητά τους να κάνουν διάκριση μεταξύ των καθυστερημένων χρονικά κυματικών σημάτων που διαδίδονται προς τα κάτω από την ανάκλαση του κύριου κυματικού πεδίου στην επιφάνεια της θάλασσας (Ghost δέκτη) και της αντίθετης πολικότητας σεισμικών κυμάτων που διαδίδονται προς τα πάνω, λόγω της ανάκλασής του σε κάποια διεπιφάνεια. Άμεση συνέπεια του κυματικού πεδίου που δημιουργείται από τις ανακλάσεις στην επιφάνεια της θάλασσας (Ghost) είναι ότι επιδρά καταστροφικά σε συγκεκριμένες ομάδες συχνοτήτων, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την ποιοτική ανάλυση της σεισμικής εικόνας, ελαττώνοντας κατά πολύ την χρησιμότητα των δεδομένων για την ακριβή απεικόνιση του υπεδάφους.

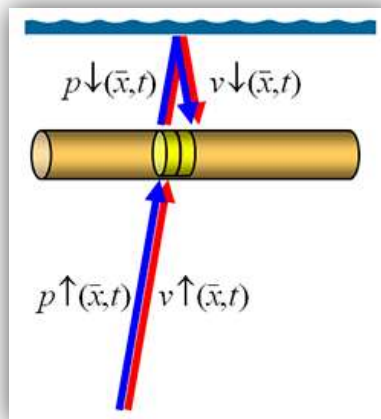
Λαμβανομένου υπ' όψιν ότι κάθε σεισμικό κυματικό πεδίο δύναται να περιγραφεί σε σχέση με μία φυσική ιδιότητα όπως την ταχύτητα των σωματιδίων του, με τη χρήση των συμβατικών καλωδίων η πίεση και η ταχύτητα των σωματιδίων μπορούν να συσχετισθούν σε χαμηλές συχνότητες και μόνο όταν τα επίπεδα θορύβου είναι εξαιρετικά χαμηλά.

3.1.2.2 ΓΕΩΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ Η ΑΡΧΗ ΔΙΠΛΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

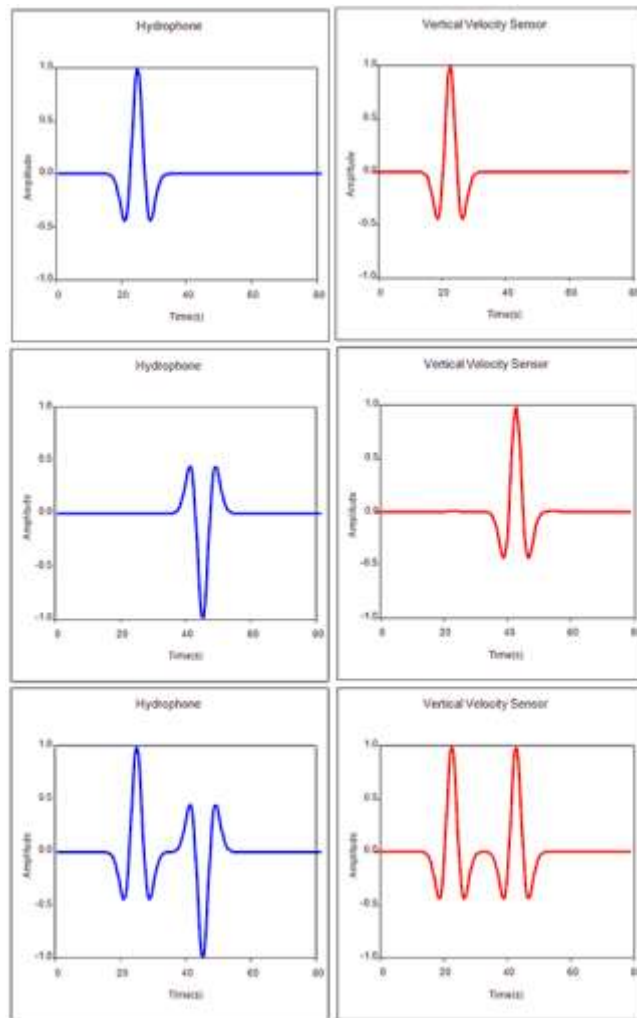
Οι γεωαισθητήρες είναι συσκευές που λειτουργούν ως δέκτες κυμάτων και λύνουν ένα σημαντικό πρόβλημα που παρουσιάζεται από το ghost κυματικό πεδίο του δέκτη, αφού επιτρέπουν στο γεωκαλώδιο να μετρά απευθείας την ταχύτητα των σωματιδίων σε όλες τις συχνότητες, ανιχνεύοντας αυτά τα χρονικά καθυστερημένα κύματα με διαφορετική πολικότητα από αυτή του υδροφώνου. Αυτό που εφαρμόζεται στη μέθοδο του διπλού αισθητήρα είναι ουσιαστικά η αφαίρεση του σήματος που οφείλεται στο ghost του δέκτη κατά τη φάση της επεξεργασίας, από τα δεδομένα που καταγράφονται από τους γεωαισθητήρες μέσω του γεωκαλωδίου (geostreamer) σε συνδυασμό με τα δεδομένα των υδροφώνων.

3.1.2.3 ΑΡΧΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΜΕ ΓΕΩΚΑΛΩΔΙΟ (GEOSTREAMER) ΔΙΠΛΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω με την αρχή καταγραφής με γεωκαλώδιο διπλών αισθητήρων (υδροφώνων και γεωαισθητήρων) επιτρέπεται η επεξεργασία των δεδομένων για την απομάκρυνση των ανακλάσεων των ανεπιθύμητων κατερχόμενων επιφανειακών ανακλάσεων (ghost). (Σχ 3.3 και 3.4). Τα ανερχόμενα στην επιφάνεια της θάλασσας κυματικά πεδία τόσο της πίεσης (P) όσο και της ταχύτητας των σωματιδίων (V) ανακλώνται από την επιφάνεια της με κατερχόμενη κατεύθυνση δημιουργώντας τα κατερχόμενα κυματικά πεδία τα οποία καταφέρνουμε μέσω τη αρχής των διπλών αισθητήρων να απομονώσουμε και να αφαιρέσουμε κατά τη φάση της επεξεργασίας.



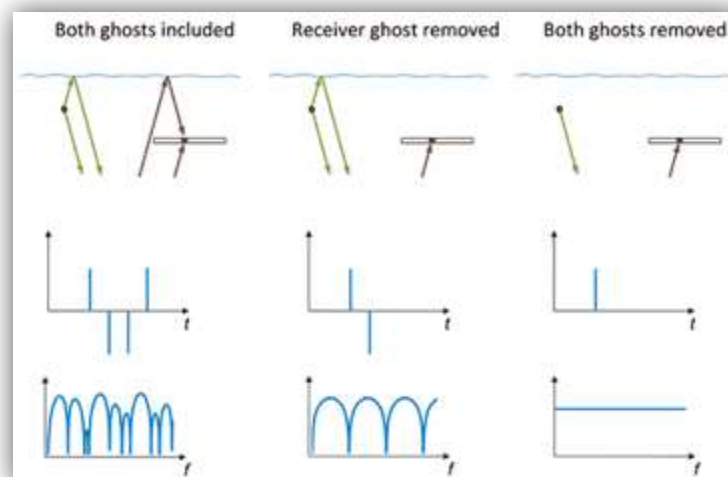
Σχήμα 3.3: Σχηματική απεικόνιση ενός γεωκαλωδίου (geostreamer) και αρχής λειτουργίας. Πηγή: (PGS, 2016).



Σχήμα 3.4: Ταυτόχρονη χρήση υδροφώνων και γεωσθητήρων. Πηγή: (PGS, 2016).

3.1.2.4 ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΚΛΑΣΕΩΝ (*ghost free data*)

Τα συμβατικά καλώδια που απαρτίζονται μόνο από υδρόφωνα καταγράφουν και τα τέσσερα (4) συμβάντα που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.2 για κάθε γεωλογική διεπιφάνεια στη γη. Άμεσο αποτέλεσμα είναι η χαμηλή σεισμική ανάλυση των σεισμικών εικόνων. Όπως προαναφέρθηκε η μέθοδος του διπλού αισθητήρα με γεωκαλώδιο (*geostreamer*) επιτρέπει την ολική αφαίρεση των επιφανειακών ανακλάσεων στον δέκτη και στην πηγή. Η απόκριση της γης η οποία παρέχεται από την απαλλαγή των επιφανειακών ανακλάσεων από τα πραγματικά δεδομένα προσφέρουν βελτιωμένη μελέτη του υπεδάφους.



Σχήμα 3.5: Αφαίρεση επιφανειακών ανακλάσεων με την χρήση της μεθόδου διπλού αισθητήρα. Πηγή: (PGS,2016).

Σχηματική απεικόνιση των βημάτων που οδηγούν σε δεδομένα χωρίς επιφανειακές ανακλάσεις (ghost) με τη χρήση του διπλού αισθητήρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5. Στα αριστερά, συμβατικά δεδομένα από καλώδια με υδρόφωνα μονό, τα οποία περιέχουν τέσσερα μόνο ανακλώμενα κύματα, το κύριο και τρία μετέπειτα γεγονότα που σχετίζονται με το ghost της πηγής και του δέκτη. Το πλάτος του φάσματος εμφανίζει αρκετά «ελάχιστα» και απώλεια πληροφοριών του σήματος. Στην μέση του Σχήματος 3.5 το γεωκαλώδιο επιτρέπει την απομάκρυνση του ghost του δέκτη μειώνοντας το ανακλώμενο κύμα σε δυο γεγονότα. Το πλάτος του φάσματος εξακολουθεί να επηρεάζεται από εγκοπές που σχετίζονται με το ghost της πηγής. Στα δεξιά, με την επιπρόσθετη χρήση της τεχνολογίας geosource γίνεται δυνατή η απομάκρυνση του ghost της πηγής αναδεικνύοντας το ανακλώμενο κύμα σε ένα επιθυμητό γεγονός. Συνεπώς, ανακτώνται, ίσα πλάτη για όλες τις συχνότητες της απόκρισης του εδάφους (PGS, 2016).

3.1.3 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ GHOST

Τα τελευταία χρόνια επιστήμονες έχουν προσπαθήσει να βρουν με διάφορες μεθόδους έναν τρόπο να εξαφανίσουν ή να εξασθενίσουν το φαινόμενο του ghost, καθώς αυτό δυσκολεύει κατά πολύ τη μελέτη των σεισμικών δεδομένων. Οι Barr και Sanders (1989) δημιούργησαν την σχέση (3.1) που συνδέει την μετατόπιση λόγω ταχύτητας σωματιδίων με την ταλάντωση λόγω πίεσης :

$$D = Pr + aVz \quad (3.1)$$

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

Όπου:

D: τα δεδομένα απαλλαγμένα από ghost (deghosted data)

Pr: ταλάντωση σωματιδίων λόγω πίεσης

Vz: κατακόρυφη ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων

Pr_{max}: μέγιστη τιμή ταλάντωσης σωματιδίων λόγω πίεσης στην περιοχή των απευθείας σεισμικών κυμάτων

Vz_{max}: μέγιστη τιμή ταχύτητας μετατόπισης σωματιδίων στην περιοχή των απευθείας σεισμικών κυμάτων

Ο πολλαπλασιαστής α 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).

Πάνω σε αυτή την σχέση ο Βαγγέλης Κακάρογλου (2016) δημιούργησε έναν αλγόριθμο (Σχήμα 3.6), ο οποίος χρησιμοποιήθηκε μέσω του λογισμικού Matlab και έτσι δημιουργήθηκαν τα degghosted δεδομένα. Δεδομένα εισόδου του αλγόριθμου είναι ο πίνακας Vz και ο πίνακας Pr και τα δεδομένα εξόδου είναι ο πολλαπλασιαστής α, καθώς και τα degghosted δεδομένα (D).

Για κάθε πηγή επαναλαμβάνεται μια διαδικασία όπου εντοπίζονται τα απευθείας κύματα οι πίνακες από τα απευθείας κύματα και επιλέγονται οι μέγιστες απόλυτες τιμές της πίεσης και της ταχύτητας αυτών των κυμάτων. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται ο συντελεστής α και δημιουργείται ο πίνακας D που περιέχει πλέον συνδυασμό ταχυτήτων και πιέσεων και άρα δεδομένα απαλλαγμένα από ανεπιθύμητες επιφανειακές ανακλάσεις.

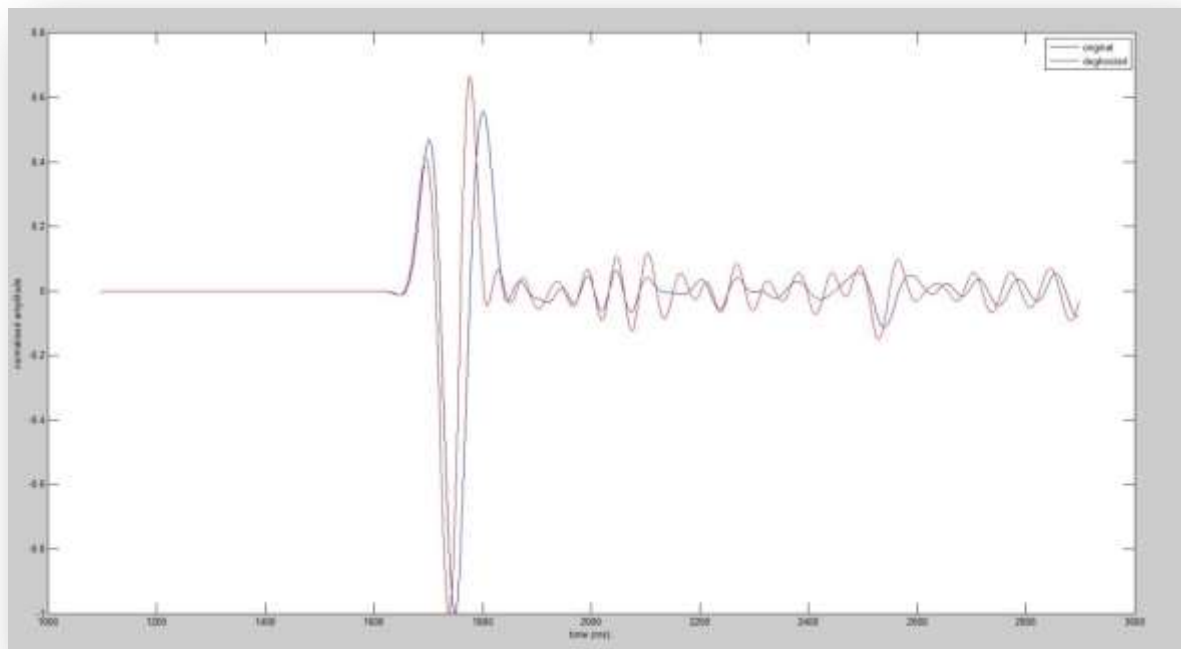


```
1 function D = multiplier1(Vzfree,Prfree,sourcep);
2 ap=Vzfree(1:1800,sourcep);
3 appr=Prfree(1:1800,sourcep);
4 apz=ap;
5 apzabs=abs(apz);
6 apzabs=max(abs(apz));
7 apzabs=max(abs(apz));
8 apprabs=max(abs(appr));
9 a=apprabs/apzabs;
10 a=apprabs./apzabs;
11 for i=1:12502; Za(i,:)=a.*Vzfree(i,:);
12 end
13 D=Prfree+Za;
```

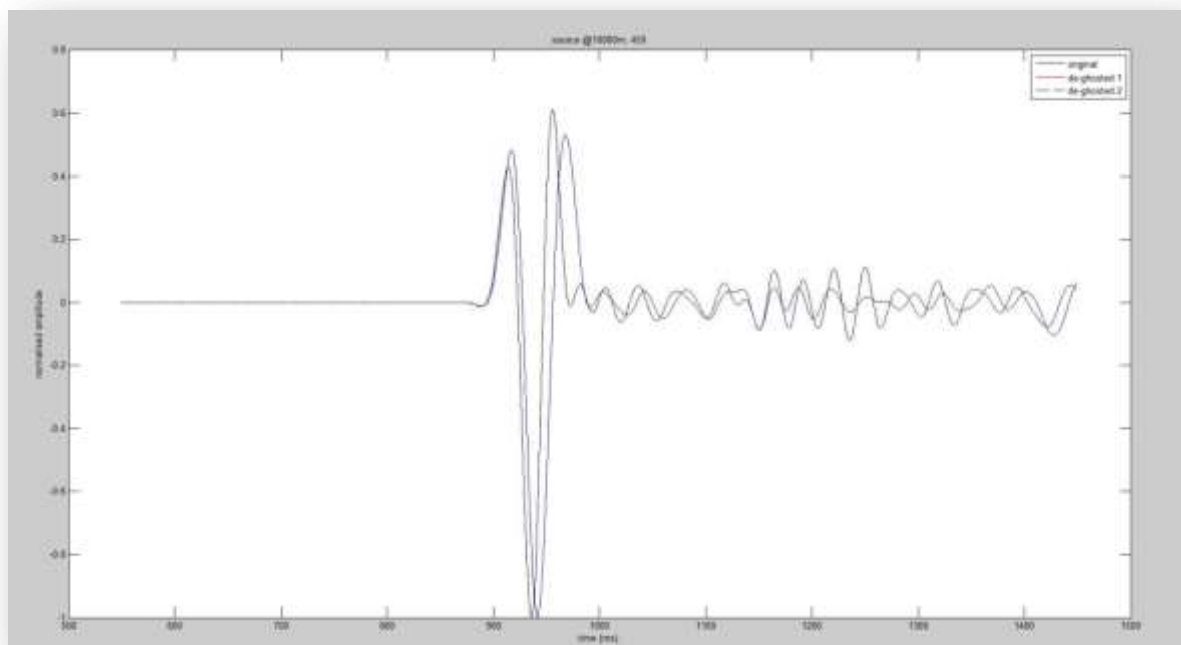
Σχήμα 3.6: Αλγόριθμος για τον προσδιορισμό του πολλαπλασιαστή ή των απαλλαγμένων από τα φαινόμενα ghost δεδομένων (D)
Πηγή: (Κακάρογλου,2016).

Παρακάτω, παρουσιάζονται σε ένα διάγραμμα τα αποτελέσματα πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου (Σχ.3.7), καθώς ταυτόχρονα συγκρίνονται τα δεδομένα από τις καταγραφές με τη χρήση απορροφητικών ορίων στην επιφάνεια του μοντέλου (Σχ.3.8). Όπως, έχει ήδη αναφερθεί με τη χρήση των απορροφητικών ορίων προσομοιάζονται όσο το δυνατόν καλύτερα τα επιθυμητά αποτελέσματα, τα οποία και είναι απαλλαγμένα από επιφανειακές ανακλάσεις (φαινόμενο ghost).

Στο Σχήμα 3.7 απεικονίζεται ένα τμήμα από τα ανακλώμενα κύματα του πυθμένα για το ίχνος 450 από πηγή με $X=10000$ m. Στο Σχήμα 3.8 απεικονίζεται το ίδιο τμήμα, όμως έχει γίνει διαδικασία deghosted, ενώ παρατίθεται και το αντίστοιχο σεισμικό ίχνος από τα δεδομένα με τη χρήση απορροφητικών ορίων (absorbing boundaries).



Σχήμα 3.7: Σχηματική απεικόνιση των δεδομένων.



Σχήμα 3.8: Σχηματική απεικόνιση των δεδομένων.

Στο σχήμα 3.7 παρατηρείται μείωση της διάρκειας της κυματομορφής των ανακλώμενων κυμάτων λόγω της απομάκρυνσης του φαινομένου ghost. Ακόμα, παρατηρείται ότι τα de-ghosted δεδομένα ταυτίζονται με τα δεδομένα των απορροφητικών ορίων (absorbing boundaries) τα οποία έχουν εξ' ορισμού δεν αναμένεται να παρουσιάζουν το φαινόμενο ghost.

3.2 ΑΝΑΔΙΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΚΟΙΝΟΥ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ (CMP)

3.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Γνωρίζουμε ότι η διαδικασία καταγραφής των σεισμικών κυμάτων καθώς και η απόκτηση των δεδομένων ανάκλασης εξαρτάται από διακριβωμένα όργανα (dual sensors στην προκειμένη περίπτωση), τα οποία είναι ευαίσθητα στην πίεση και κατανέμονται κατά μήκος της γραμμής μελέτης.

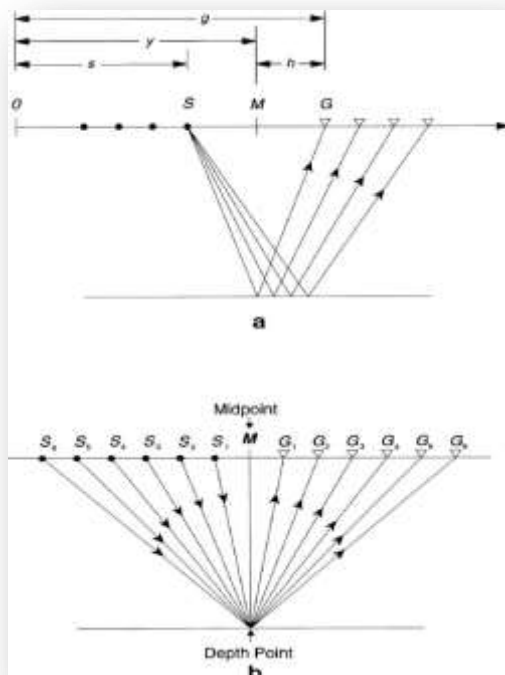
Σαν αποτέλεσμα της εκτόνωσης μιας πηγής και των δονήσεων που έχουν καταγραφεί από πολλούς δέκτες είναι τα σεισμικά ίχνη, από τα οποία αποτελείται η διάταξη κοινής πηγής. Η πηγή και οι δέκτες είναι τοποθετημένοι κατά μήκος μιας ευθείας.

Αφού ολοκληρωθεί η αρχική καταγραφή, η διάταξη του αναπτύγματος πηγής – γεωφώνων θα μετατοπιστεί κατά μήκος της γραμμής με αποτέλεσμα το επόμενο σήμα της πηγής που θα καταγραφεί να βρίσκεται στις καινούριες θέσεις των γεωφώνων. Στις θαλάσσιες διασκοπήσεις η διάταξη μετακινείται καθώς την μεταφέρει το πλοίο. Στις χερσαίες διασκοπήσεις η διάταξη μετακινείται ηλεκτρονικά χωρίς να μετακινηθούν τα γεωφώνων από τις αρχικές τους θέσεις με αποτέλεσμα να πρέπει να συνδεθούν στο καταγραφικό μεγαλύτερος αριθμός γεωφώνων από αυτόν που απαιτείται.

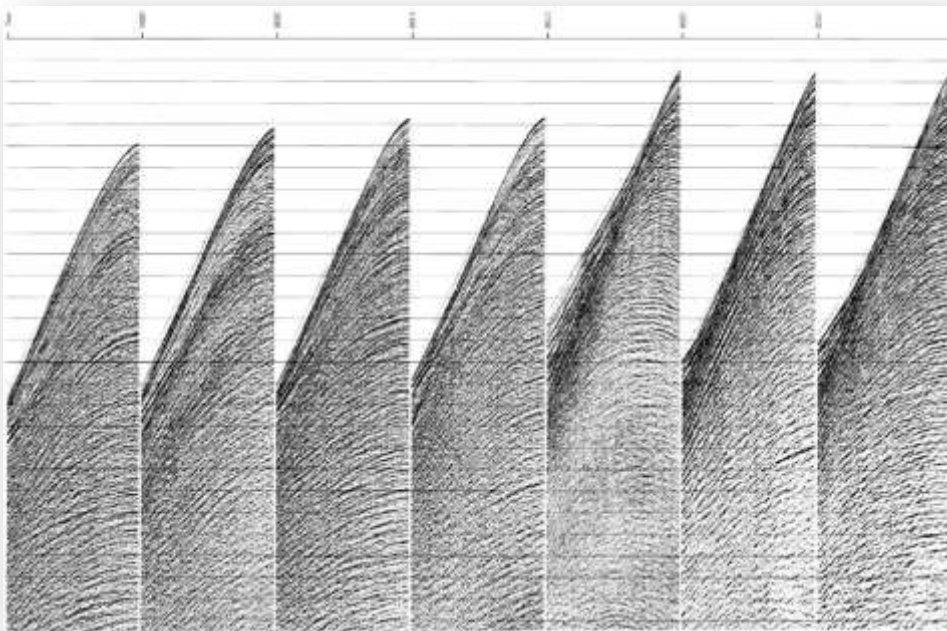
Η λήψη σεισμικών δεδομένων με πολλαπλή κάλυψη γίνεται σε συντεταγμένες πηγής-δέκτη (s , g). Το Σχήμα 3.9α είναι μια σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας μιας καταγραφής κοινής πηγής και των διαδρομών ακτινών που προέρχονται από ένα επίπεδο ανακλαστήρα. Η επεξεργασία σεισμικών δεδομένων, από την άλλη πλευρά, συμβατικά γίνεται σε συντεταγμένες απόστασης από το ενδιάμεσο σημείο (y , h). Ο απαιτούμενος

μετασχηματισμός συντεταγμένων επιτυγχάνεται με τη διαλογή των δεδομένων στη διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου (Common Mid-Point). Με βάση τις πληροφορίες γεωμετρίας πεδίου, κάθε επιμέρους ίχνος αποδίδεται στο ενδιάμεσο σημείο μεταξύ των πηγής και δέκτη που σχετίζονται με αυτό το ίχνος. Αυτά τα ίχνη με το ίδιο ενδιάμεσο σημείο συγκεντρώνονται μαζί, σχηματίζοντας μια διάταξη CMP. Αν και λανθασμένα, ο όρος κοινό σημείο βάθους (CDP) και κοινό ενδιάμεσο σημείο (CMP) χρησιμοποιούνται συχνά εναλλακτικά.

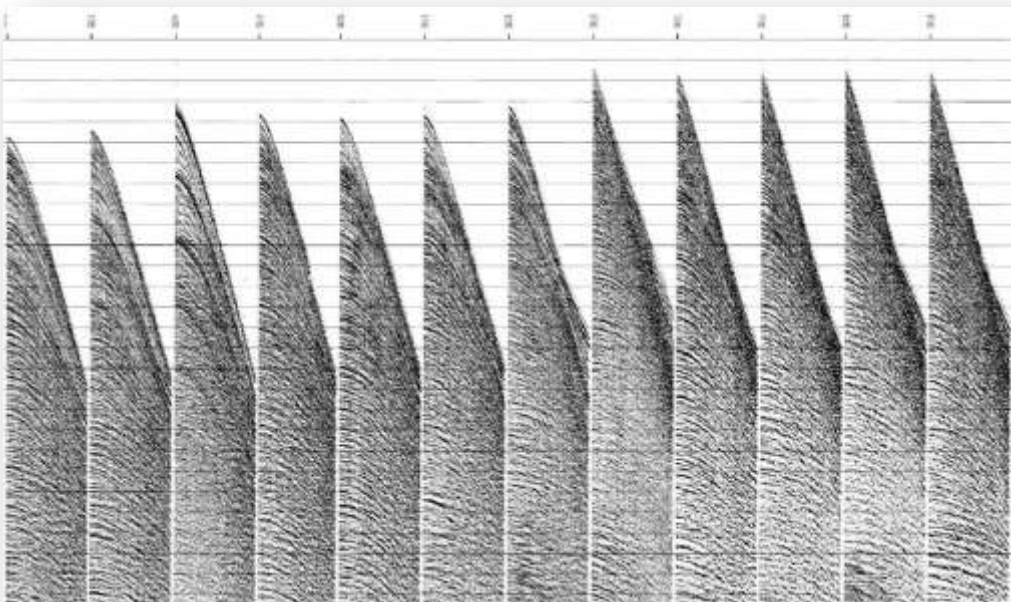
Το Σχήμα 3.9β απεικονίζει τη γεωμετρία μιας καταγραφής CMP και των διαδρομών των σεισμικών ακτίνων που προέρχονται από το ίδιο σημείο ανάκλασης ενός επίπεδου ανακλαστήρα. Σημειώνετε ότι η καταγραφή CDP είναι ισοδύναμη με την καταγραφή CMP μόνο όταν οι ανακλαστήρες είναι οριζόντιοι και οι ταχύτητες δεν μεταβάλλονται οριζόντια. Ωστόσο, όταν υπάρχουν κεκλιμένοι ανακλαστήρες, αυτές οι δύο έννοιες δεν είναι ισοδύναμες και θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο ο όρος CMP. Οι επιλεγμένες καταγραφές CMP λαμβάνονται από την ταξινόμηση των καταγραφών κοινής πηγής του σχήματος 3.10 και παρουσιάζονται στο σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.9: (α) Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας εγγραφής και των διαδρομών ακτίνων που σχετίζονται με ένα επίπεδο ανακλαστήρα (β) Γεωμετρία μιας καταγραφής CMP και των διαδρομών των σεισμικών ακτίνων που προέρχονται από το ίδιο σημείο ανάκλασης ενός επίπεδου ανακλαστήρα



Σχήμα 3.10: Ταξινόμηση των καταγραφών κοινής πηγής.



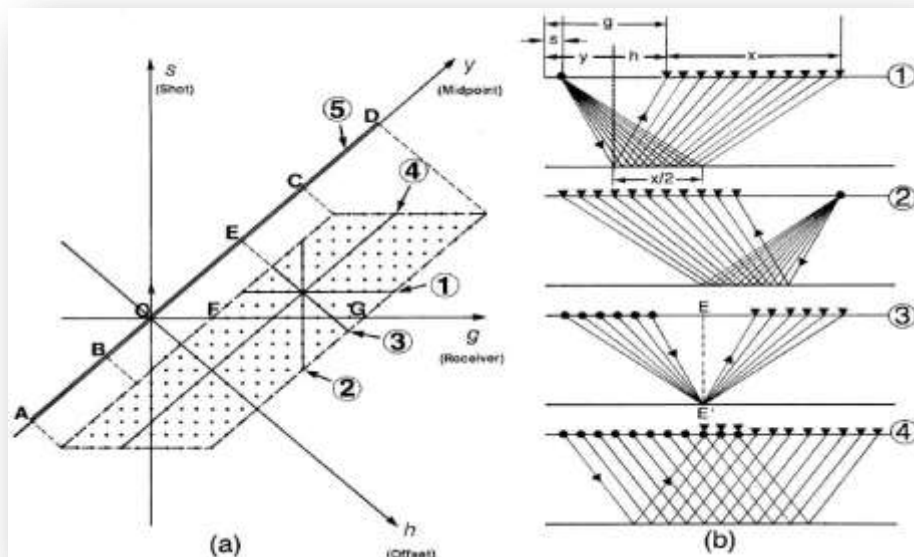
Σχήμα 3.11: Καταγραφές CMP λαμβάνονται από την ταξινόμηση των καταγραφών κοινής πηγής του σχήματος 3.10.

Σχετικά με τη διαδικασία μετατροπής των καταγραφών κοινής πηγής σε καταγραφές CMP, παρουσιάζεται το Σχήμα 3.12

Κάθε τελεία στο σχήμα αυτό αντιπροσωπεύει ένα σεισμικό ίχνος με τον χρονικό άξονα κάθετο προς το επίπεδο του χαρτιού. Οι ακόλουθοι τύποι καταγραφών προσδιορίζονται στο Σχήμα 3.12:

1. Καταγραφή κοινής πηγής,
2. Καταγραφή κοινού γεωφώνου,
3. Καταγραφή κοινού ενδιάμεσου σημείου,
4. Καταγραφή κοινής απόστασης πηγής-γεωφώνου,
5. Σεισμική τομή υπέρθεσης.

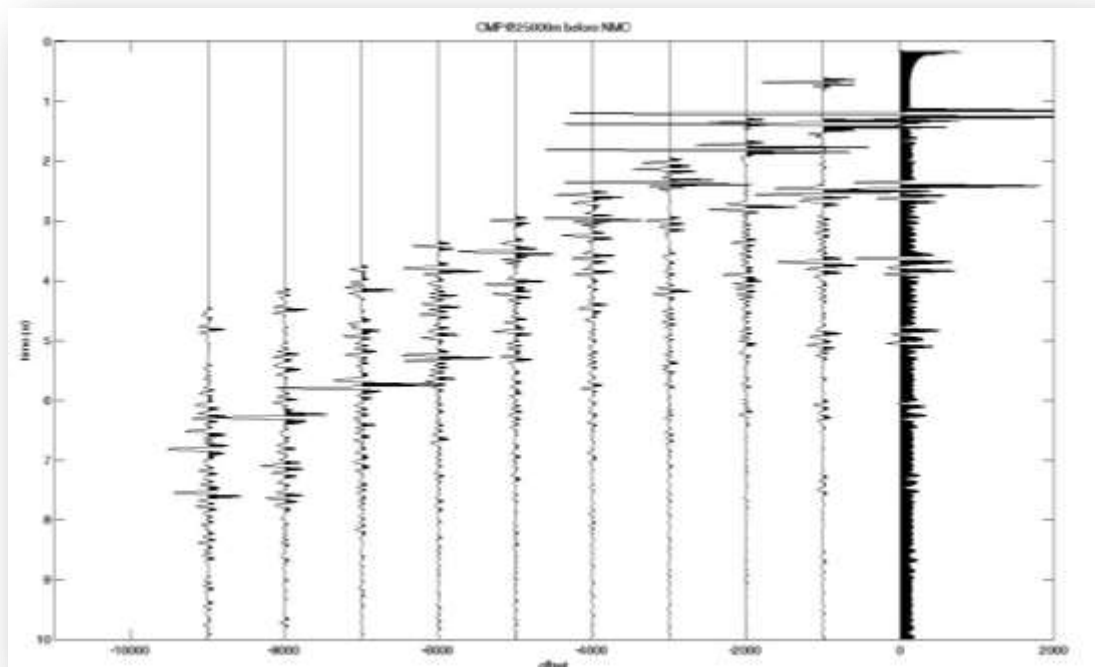
Το μήκος του αναπτύγματος των δεκτών αντιστοιχεί στο τμήμα FG ενώ το συνολικό μήκος γραμμής είναι το τμήμα AD. Ο αριθμός των κουκίδων κατά μήκος του άξονα h (διατομή 3) είναι ίσος με την υπεδαφική κάλυψη (fold). Η υπεδαφική κάλυψη ελαττώνεται στα άκρα του προφίλ (τμήματα AB και CD). Η μέγιστη υπεδαφική κάλυψη κατά μήκος της γραμμής βρίσκεται στα μεσαία σημεία της τομής (BC). Το διάγραμμα στο Σχήμα 3.12 είναι γνωστό ως διάγραμμα υπέρθεσης και είναι χρήσιμο κατά τη ρύθμιση της γεωμετρίας μιας γραμμής για προεπεξεργασία. Εάν υπάρχει μια καταγραφή κοινής πηγής που λείπει ή ένας κακός δέκτης, τα επηρεαζόμενα κοινά ενδιάμεσα σημεία αναγνωρίζονται εύκολα.



Σχήμα 3.12: Σχηματική αναπαράσταση της ταξινόμησης των καταγραφών κοινής πηγής σε καταγραφές CMP

3.2.2 ΣΥΝΘΕΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΚΟΙΝΟΥ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ

Μετά την αρχική επεξεργασία των συνθετικών καταγραφών, για την απομάκρυνση του φαινομένου ghost, τα δεδομένα μετατρέπονται από καταγραφές κοινής πηγής σε καταγραφές κοινού ενδιάμεσου σημείου. Για αυτή τη διαδικασία απαιτούνται πληροφορίες από την γεωμετρία του πειράματος.



Σχήμα 3.13: Καταγραφές κοινού ενδιαμέσου σημείου στα deghosted δεδομένα. Η θέση του CMP βρίσκεται στα 25000m της γραμμής μελέτης. Η υπεδαφική κάλυψη είναι 10.

Ο αριθμός των υδροφώνων που συμμετέχουν σε κάθε CMP gather αποτελεί σημαντική παράμετρο της μεθόδου της σεισμικής ανάκλασης. Ονομάζεται υπεδαφική κάλυψη (Fold) και είναι καθοριστική για την ποιότητα των καταγραφών (Βαφείδης, 2011). Η μέγιστη υπεδαφική κάλυψη σε ένα συμβατικό πείραμα σεισμικής ανάκλασης δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Fold} = \min\{\text{Αρ. πηγών}, (N/2) * (\Delta x / \Delta s)\} \quad (2.1)$$

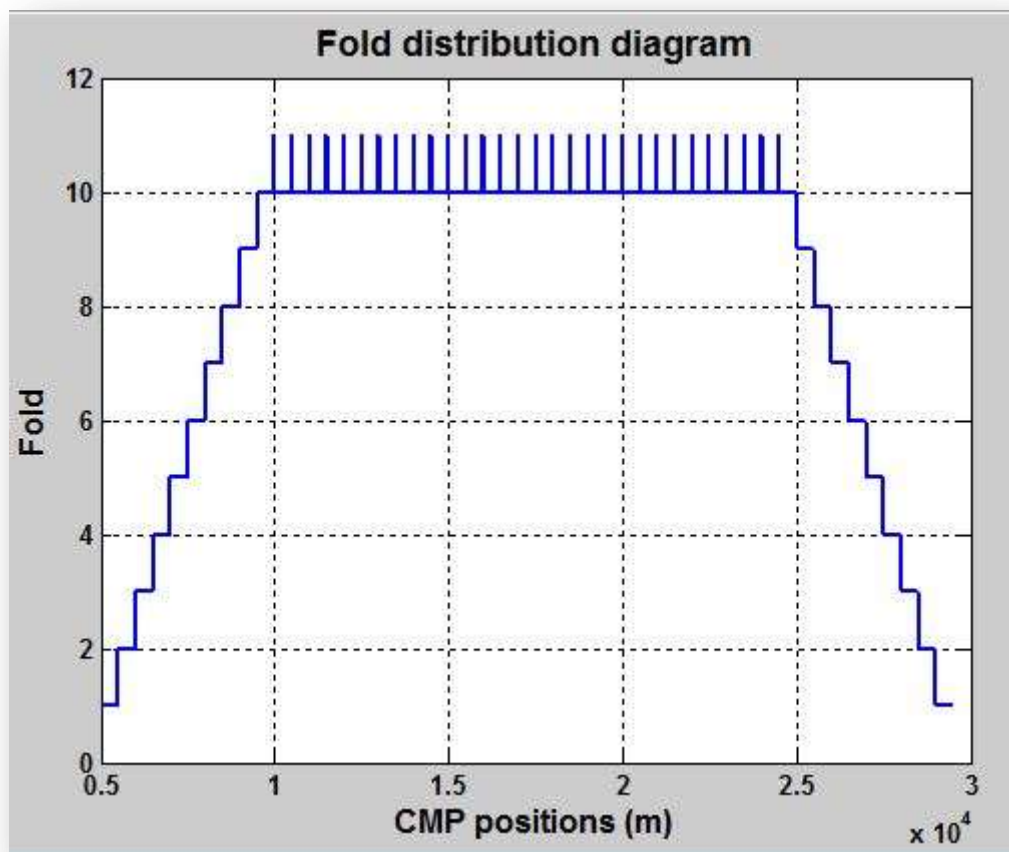
Όπου:

N: Αριθμός καναλιών

Δx : Ισαπόσταση γεωφώνων

Δs : Ισαπόσταση πηγών

Στο Σχήμα 3.14 απεικονίζεται η μεταβολή της υπεδαφικής κάλυψης κατά μήκος της γραμμής μελέτης.



Σχήμα 3.14: Διακύμανση της υπεδαφικής κάλυψης (fold) κατά μήκος του μοντέλου.

Παρατηρείται ότι έχουμε fold 10 και σε κάποιες περιπτώσεις έχουμε κορυφές και το fold είναι 11. Αν παρατηρηθεί σωστά οι κορυφές είναι κάθε 500m και αυτό γιατί κάθε 500m έχουμε μετατόπιση του καλωδίου, όπου γίνεται νέα καταγραφή. Ακόμα, η πηγή βρίσκεται στην ίδια θέση με το υδρόφωνο, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αυτές οι κορυφές.

3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή της διαδικασίας της ανάλυσης ταχυτήτων. Περιγράφεται η διαδικασία που γίνεται σε θεωρητικό στάδιο, αλλά και η διαδικασία που ακολουθήθηκε, ώστε να βρεθεί η ανάλυση της ταχύτητας. Για να προκύψει η ανάλυση της ταχύτητας, θα πρέπει πρώτα να γίνει ταξινόμηση των καταγραφών κοινής πηγής σε καταγραφές κοινού ενδιάμεσου σημείου.

Μέσω αυτής της διαδικασίας προσδιορίζεται η μέση τετραγωνική ταχύτητα (V_{rms}) και από τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των ταχυτήτων λαμβάνονται τα

πρώτα στοιχεία για την υπό μελέτη περιοχή. Σε περίπτωση που από τα αποτελέσματα προκύψει κάποια αλλαγή στην τιμή της ταχύτητας, τότε αυτό μπορεί να συνεπάγεται με στρωματογραφικές ή/και λιθολογικές μεταβολές.

Η όλη αυτή διαδικασία είναι πολύ χρονοβόρα, αλλά με την εύρεση της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας (V_{rms}), μέσω της ανάλυσης ταχυτήτων δημιουργείται η βάση για την διόρθωση Κανονικής Χρονικής Απόκλισης (NMO). Οι ταχύτητες οι οποίες θα έχουν υπολογιστεί, θα χρησιμοποιηθούν, ώστε να γίνει ευθυγράμμιση των ανακλάσεων των καταγραφών κοινού ενδιαμέσου σημείου με απώτερο στόχο τη σεισμική υπέρθεση.

Για οριζόντια στρωματωμένο μέσο 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):

$$V_n = \left[\frac{\sum_{j=1}^n \alpha_j^2 t_j}{\sum_{j=1}^n t_j} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

$$t_j = 2 \frac{d_j}{a_j} \quad (3.4)$$

Όπου:

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

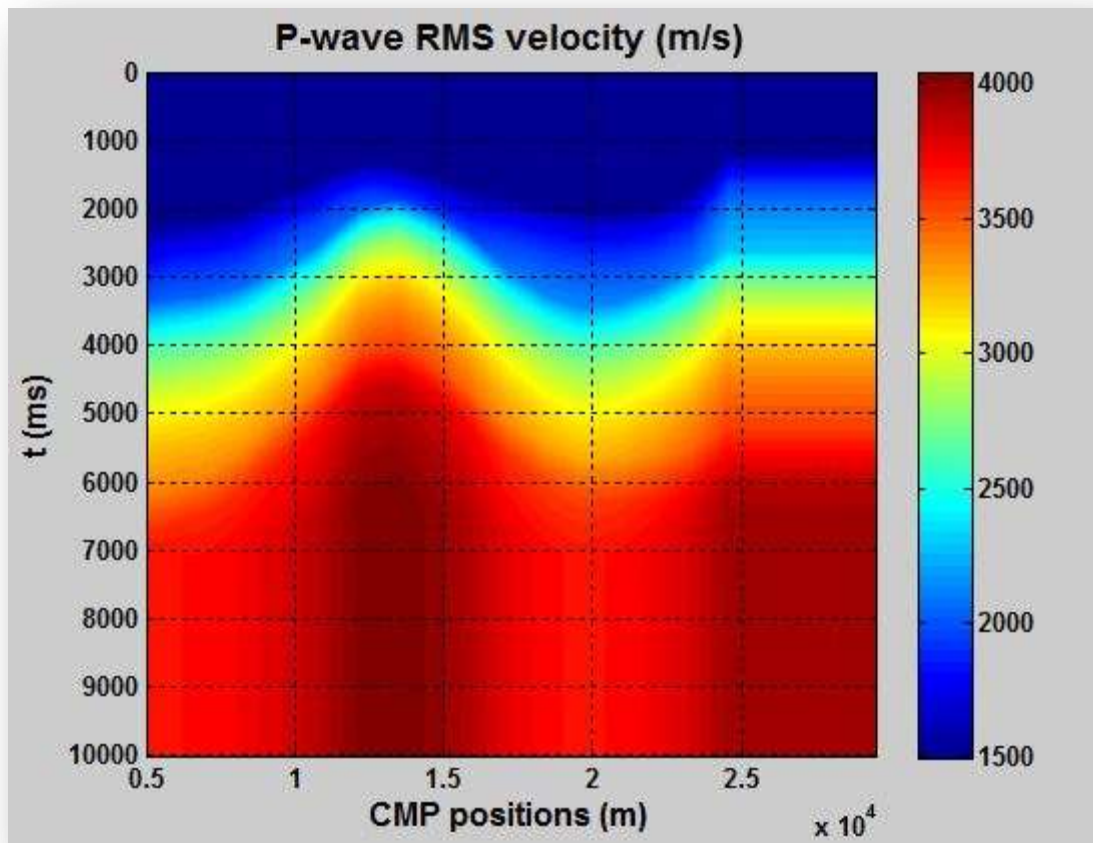
$$\alpha_n^2 = \frac{V_n^2 T_n(0) - V_{n-1}^2 T_{n-1}(0)}{T_n(0) - T_{n-1}(0)} \quad (3.5)$$

Όπου:

- V_n : μέση τετραγωνική ταχύτητα στο στρώμα n
- T_n : διπλός χρόνος διαδρομής για το στρώμα n

Κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, έγινε αυτόματος υπολογισμός της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας V_{rms} , χρησιμοποιώντας τις τμηματικές ταχύτητες του μοντέλου και τις εξισώσεις 3.3 και 3.4.

Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζονται οι ταχύτητες V_{rms} του μοντέλου. (Αυτή η διαδικασία είχε ως αποτέλεσμα να γίνει ο υπολογισμός της ταχύτητας, χωρίς να χρειαστεί να γίνει ο προσδιορισμός της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας από τα διαγράμματα συνάφειας.



Σχήμα 3.15: Οι τιμές της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας του μοντέλου σε (m/s).

3.4 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ (NMO)

3.4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Πριν την υπέρθεση (stacking) των σεισμικών ιχνών της διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου, είναι απαραίτητη η εφαρμογή της διόρθωσης (NMO). Η διόρθωση αυτή εφαρμόζεται στους χρόνους διαδρομής των ανακλώμενων κυμάτων για τα παραπάνω σεισμικά ίχνη και σκοπός της είναι, η αναγωγή των αρχικών χρόνων διαδρομής σε αντίστοιχους χρόνους κυμάτων που διαδίδονται στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η διαδικασία αυτή θεωρεί ότι η πηγή και ο δέκτης συμπίπτουν και βρίσκονται στη θέση του κοινού ενδιαμέσου σημείου της διάταξης (Μπραουδάκη, 2004).

Η «κανονική χρονική απόκλιση» (NMO correction) υπολογίζεται ανακλαστήρες από τη σχέση:

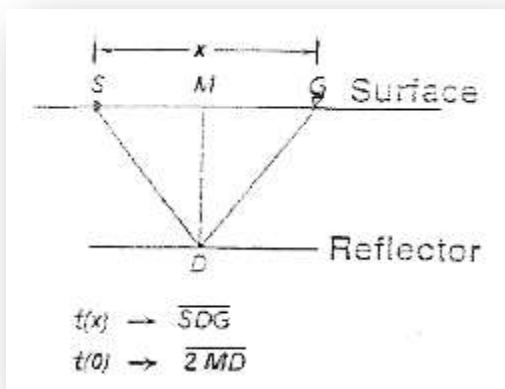
$$\Delta T_{NMO} = t(x) - t(0) = t(0) * \left\{ \left[1 + \left(\frac{x}{V_{NMO} * t(0)} \right)^2 \right]^{1/2} - 1 \right\} \quad (3.6)$$

όπου:

- $t(x)$: ο διπλός χρόνος διαδρομής και αναφέρεται σε γεώφωνο που απέχει από την πηγή απόσταση x ,

- V_{NMO} : η μέση τετραγωνική ταχύτητα διόρθωσης NMO και

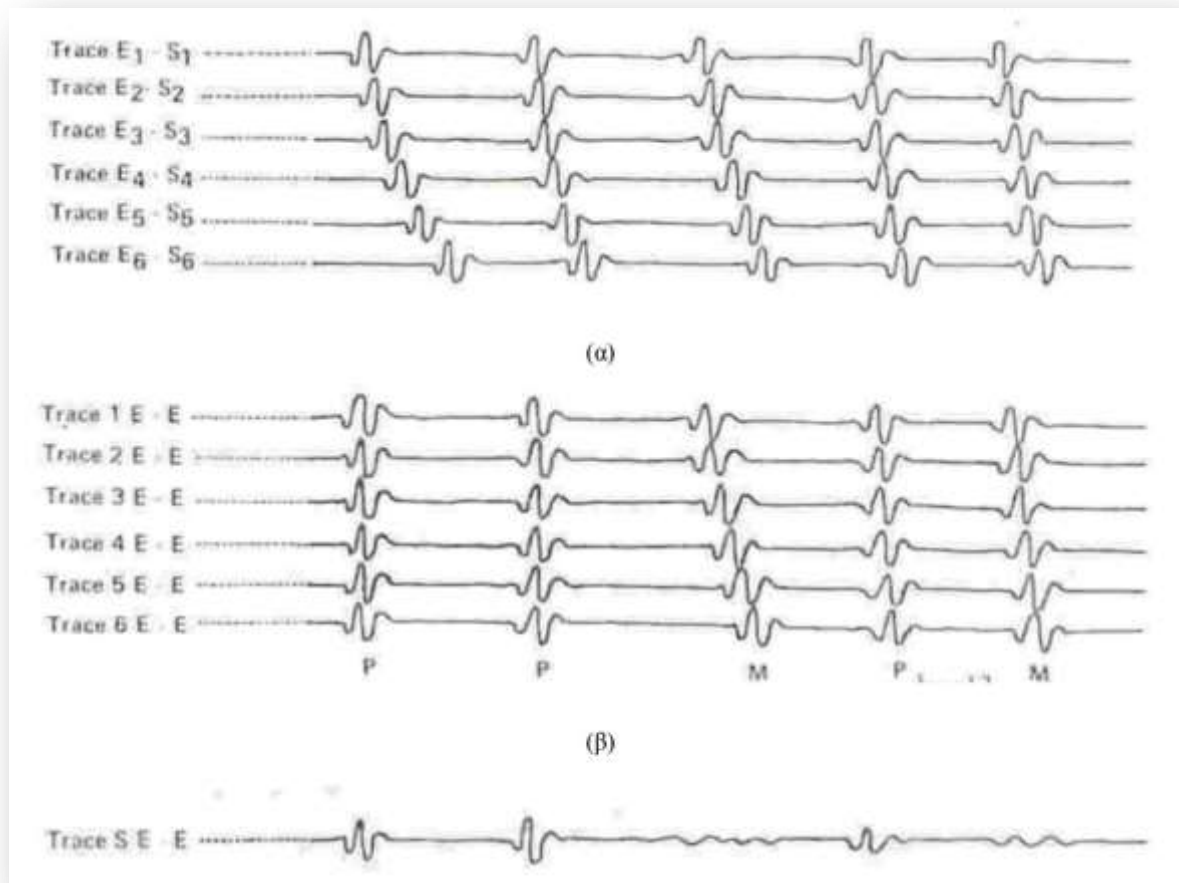
- $t(0)$: ο διπλός κατακόρυφος χρόνος (two-way-time) που χρειάζεται το κύμα για να διατρέξει την απόσταση MD (σχήμα 3.16) δύο φορές.



Σχήμα 3.16: Διόρθωση (NMO) για την περίπτωση οριζόντιου ανακλαστήρα (Yilmaz, 1987).

Ερμηνεύοντας την παραπάνω εξίσωση διαπιστώνεται ότι η κανονική χρονική απόκλιση αυξάνει ανάλογα με την απόσταση πηγής-γεωφώνου (offset), ενώ μειώνεται με το διπλό χρόνο κατακόρυφης ακτίνας $t(0)$ και την αύξηση των τιμών της ταχύτητας. Η διόρθωση NMO εφαρμόζεται ικανοποιητικά για αποστάσεις πηγής – γεωφώνου (x) μικρότερες από το βάθος από το οποίο προέρχονται οι ανακλάσεις. Αυτό πολλές φορές έχει ως αποτέλεσμα την ανεπαρκή διόρθωση NMO, ειδικά σε ανακλάσεις που έχουν καταγραφεί. Θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην χρησιμοποίηση της σωστής ταχύτητας του μέσου. Στην περίπτωση που η πραγματική ταχύτητα είναι μικρότερη από αυτή που έχει χρησιμοποιηθεί τότε αυτό συνεπάγεται με το ότι η διόρθωση θα είναι μικρότερη της πραγματικής (undercorrection), ενώ αν η πραγματική ταχύτητα του μέσου είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα, η διόρθωση είναι μεγαλύτερη της πραγματικής (overcorrection).

Στο Σχήμα 3.17 που ακολουθεί φαίνεται η διαδικασία της δυναμικής διόρθωσης που οδηγεί σε ίχνη σεισμικής υπέρθεσης (Cordier, 1985).



Σχήμα 3.17: Παράδειγμα διορθώσεων (NMO) που οδηγούν σε ένα ίχνος σεισμικής υπέρθεσης (Cordier, 1985).

(α) Διάταξη κοινού ενδιαμέσου σημείου για 6 ίχνη. Τα ίχνη φαίνονται πριν τη δυναμική διόρθωση και έχουν τοποθετηθεί κατά σειρά ως προς την απόσταση της πηγής (ή του δέκτη) από το κοινό ενδιαμέσο σημείο.

(β) Διάταξη κοινού ενδιαμέσου σημείου με 6 ίχνη, μετά τη διόρθωση NMO,

(γ) Σεισμικό ίχνος που προέκυψε από το άθροισμα των ιχνών του (β) (σεισμική υπέρθεση).

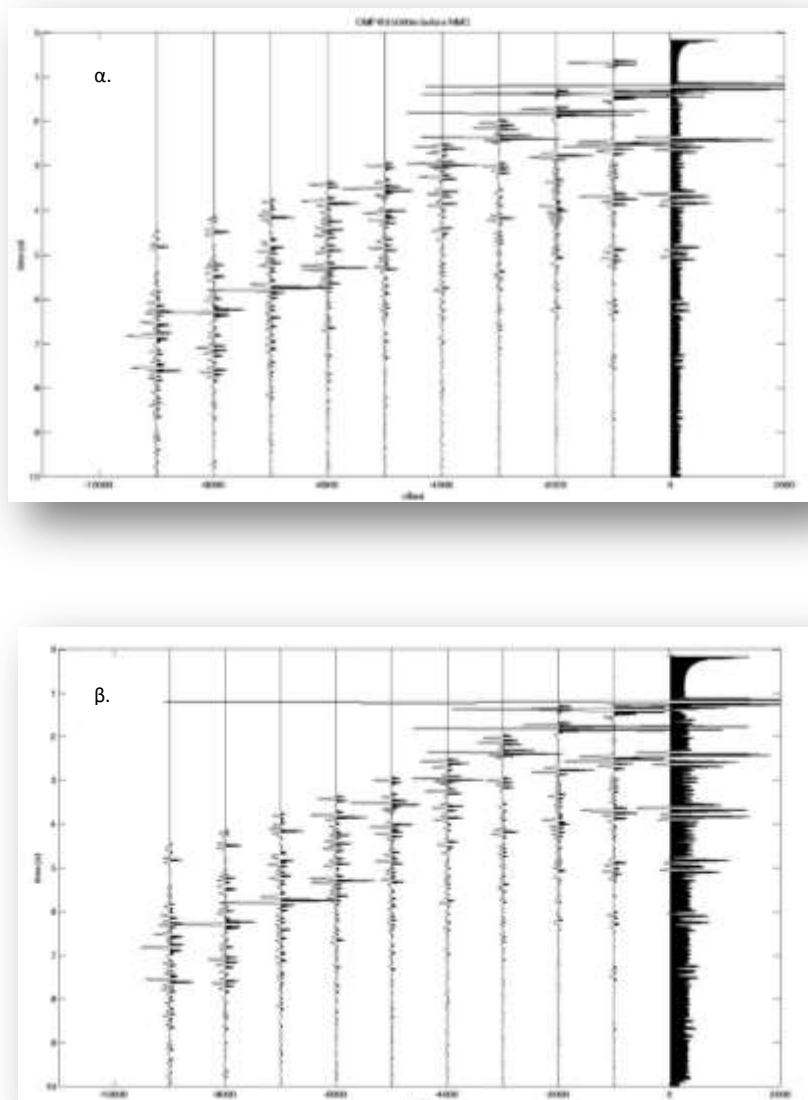
Γενικά ισχύει ότι η διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό της διόρθωσης NMO στα σειсмоγράμματα διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου γίνεται με τον ίδιο τρόπο τόσο στις οριζόντιες όσο και στις κεκλιμένες διαχωριστικές επιφάνειες. Παρόλα αυτά στην περίπτωση που η ανάκλαση προέρχεται από οριζόντια διαχωριστική επιφάνεια, η ταχύτητα V_{NMO} αντιστοιχεί στη μέση τετραγωνική ταχύτητα.

Μετά τη δυναμική διόρθωση και την άθροιση (stacking) των σεισμικών ιχνών, παρατηρείται τόσο ενίσχυση των πλατών των ανακλώμενων κυμάτων όσο και μείωση του

όγκου των δεδομένων κατά το ποσό της υπεδαφικής κάλυψης. Τα σεισμικά ίχνη κοινού ενδιάμεσου σημείου αθροιζόμενα δημιουργούν τη σεισμική τομή υπέρθεσης.

3.4.2 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΝΜΟ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Μετά την αναδιάταξη των συνθετικών δεδομένων σε καταγραφές κοινού ενδιάμεσου σημείου, πραγματοποιήθηκε διόρθωση της κανονικής χρονικής απόκλισης (βλέπε Σχήμα 3.18).



Σχήμα 3.18: Δεδομένα CMP που αντιστοιχούν πριν (α) στα 25000m του μοντέλου και (β) μετά τη δυναμική διόρθωση.

3.5 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΥΠΕΡΘΕΣΗ (STACKING)

3.5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σεισμική υπέρθεση (stacking) ονομάζεται η άθροιση των σειсмоογραμμάτων που έχουν κοινό ενδιαμέσο σημείο (common midpoint, CMP) μεταξύ σεισμικής πηγής και γεωφώνου. Κατά τη διαδικασία αυτή συλλέγονται τα σειсмоογράμματα κοινού ενδιαμέσου σημείου (CMP sorting), εφαρμόζεται σ' αυτά δυναμική διόρθωση και στη συνέχεια αθροίζονται (CMP stacking).

Όταν η στρωμάτωση είναι οριζόντια και επίπεδη, η τομή υπέρθεσης μοιάζει με τη γεωλογική τομή. Για πολύπλοκες όμως γεωλογικές δομές η αντίστοιχη σεισμική τομή υπέρθεσης μπορεί να φαίνεται διαφορετική από τη γεωλογική. Το πρόβλημα εντοπίζεται στο ότι, ενώ η ανακλώμενη ακτίνα στην πραγματικότητα είναι κάθετη στον ανακλαστήρα, η ίδια ακτίνα στην τομή υπέρθεσης σχεδιάζεται στο ενδιαμέσο σημείο μεταξύ πηγής και γεωφώνου.

Οι κυριότεροι στόχοι της υπέρθεσης είναι:

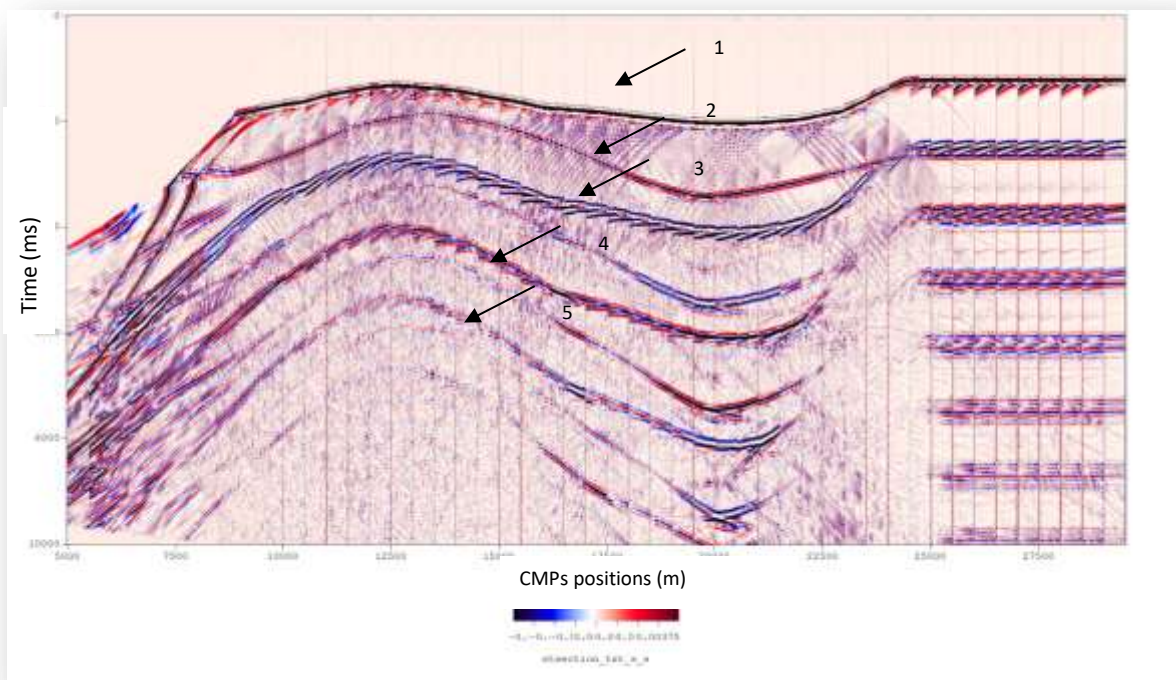
1. Η αύξηση του σήματος σε σχέση με το συναφή και τυχαίο θόρυβο.
2. Η βελτίωση του αρχικού σήματος σε σχέση με τις πολλαπλές ανακλάσεις οι οποίες εξασθενούν με τη διαδικασία αυτή.
3. Η μείωση του όγκου των σεισμικών δεδομένων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για θαλάσσιες διατάξεις οι οποίες συχνά έχουν πολύ μεγάλη υπεδαφική κάλυψη (π.χ. >48)
4. Επιτρέπει την εμφάνιση των ιχνών σε μία μορφή που μοιάζει με αυτή της μηδενικής απόστασης πηγής-γεωφώνου (normal-incidence section).

3.5.2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΥΠΕΡΘΕΣΗ (STACKING) ΣΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

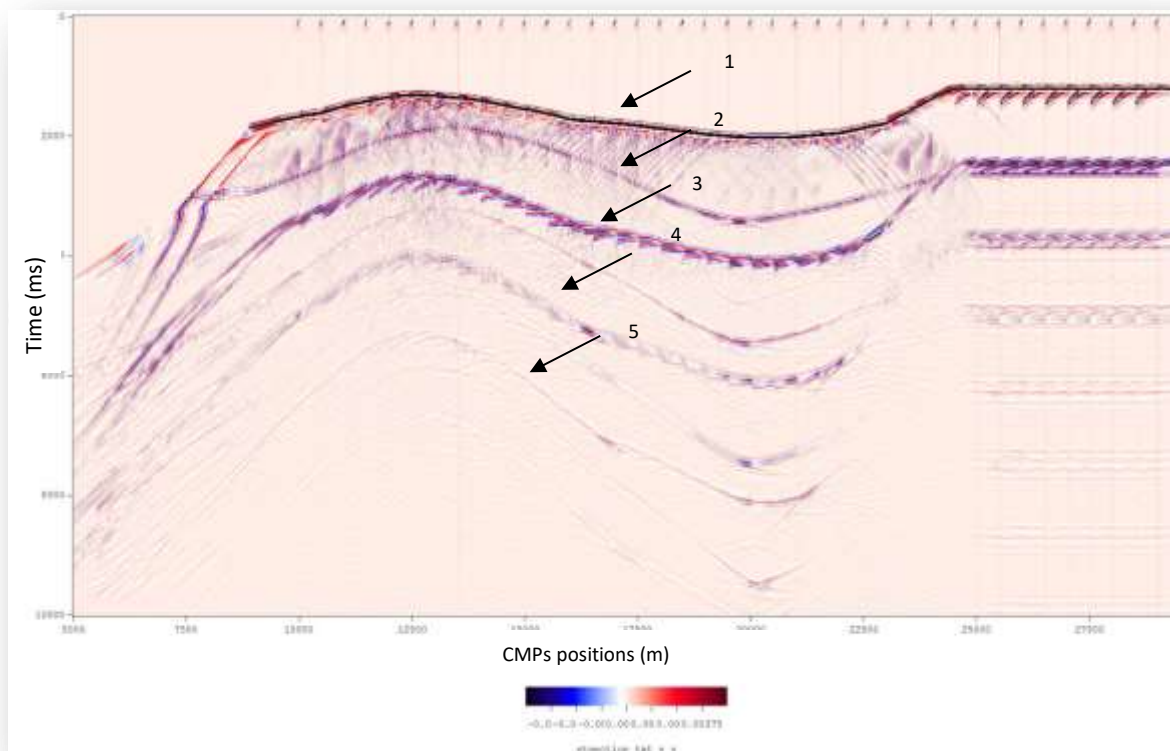
Στο Σχήμα 3.19 φαίνεται μια τομή σεισμικής υπέρθεσης για δεδομένα με ghost. Ο πρώτος ανακλαστήρας, ο οποίος αντιστοιχεί στον πυθμένα της θάλασσας φαίνεται σε χρόνο

περίπου 2000ms, ο δεύτερος σε χρόνο 4200ms, ο τρίτος σε χρόνο 6100ms, ο τέταρτος σε χρόνο 7200ms και ο πέμπτος σε χρόνο 7800ms. Στο Σχήμα 3.20 φαίνεται μια τομή σεισμικής υπέρθεσης για δεδομένα χωρίς ghost. Ο πρώτος ανακλαστήρας φαίνεται σε χρόνο 2000ms, ο δεύτερος σε χρόνο 4200ms, ο τρίτος σε χρόνο 6100ms, ο τέταρτος σε χρόνο 7200ms και ο πέμπτος σε χρόνο 7800ms. Φαίνεται η διαφορά με την προηγούμενη εικόνα, καθώς πολλές επιφανειακές ανακλάσεις έχουν αφαιρεθεί.

Ακόμα, λόγω του ότι οι αποστάσεις πηγής-γεωφώνου είναι μεγαλύτερες από το βάθος από το οποίο προέρχονται οι ανακλάσεις με αποτέλεσμα να μην προκύπτει επαρκής διόρθωση NMO. Ένα μέτρο αντιμετώπισης της ανεπαρκούς διόρθωσης NMO είναι η τμηματική άθροιση των σεισμικών ιχνών, επιλέγοντας κατά την άθροιση μόνο τα ίχνη που προέρχονται από μικρές αποστάσεις πηγής-γεωφώνου (offsets). Στο σχήμα 3.19 απεικονίζεται η σεισμική τομή τμηματικής υπέρθεσης (partial stacking) χρησιμοποιώντας ίχνη από αποστάσεις πηγής γεωφώνου μικρότερες από 10000m.



Σχήμα 3.19: Τομή σεισμικής υπέρθεσης για συνθετικά δεδομένα στα οποία δεν έχει αφαιρεθεί το φαινόμενο ghost.



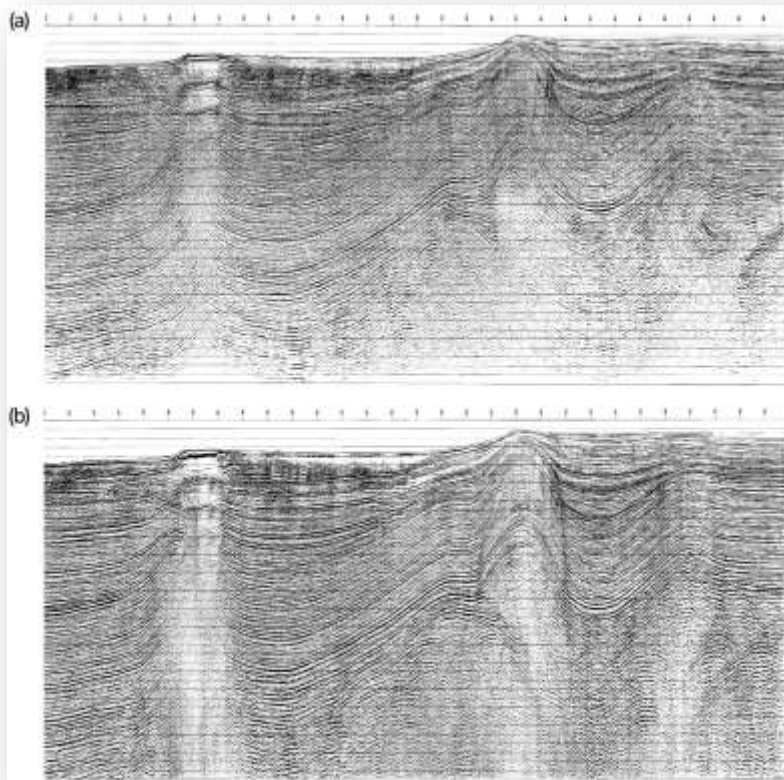
Σχήμα 3.20: Τομή σεισμικής υπέρθεσης για συνθετικά δεδομένα στα οποία έχει αφαιρεθεί το φαινόμενο ghost.

3.6 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ (MIGRATION)

3.6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η διαδικασία της σεισμικής χωροθέτησης έχει σαν στόχο την ανακατασκευή και σωστή τοποθέτηση των επιφανειών ανάκλασης που παρουσιάζουν κλίση (dipping seismic events) σε μία τομή υπέρθεσης, με σκοπό να μπορεί να γίνει σύγκριση με την αντίστοιχη γεωλογική απεικόνιση. Είναι πολύ σημαντική διαδικασία στην επεξεργασία, παρόλη την πολυπλοκότητά της, καθώς συμβάλλει σημαντικά στην βελτιστοποίηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας της σεισμικής τομής.

Είναι πολύ συνηθισμένο φαινόμενο, οι ορίζοντες που εμφανίζονται σε μία τέτοια τομή να παρουσιάζουν μικρότερη κλίση και μεγαλύτερο μήκος σε σχέση με τους αντίστοιχους ορίζοντες στη γεωλογική τομή (Yilmaz, 1987).



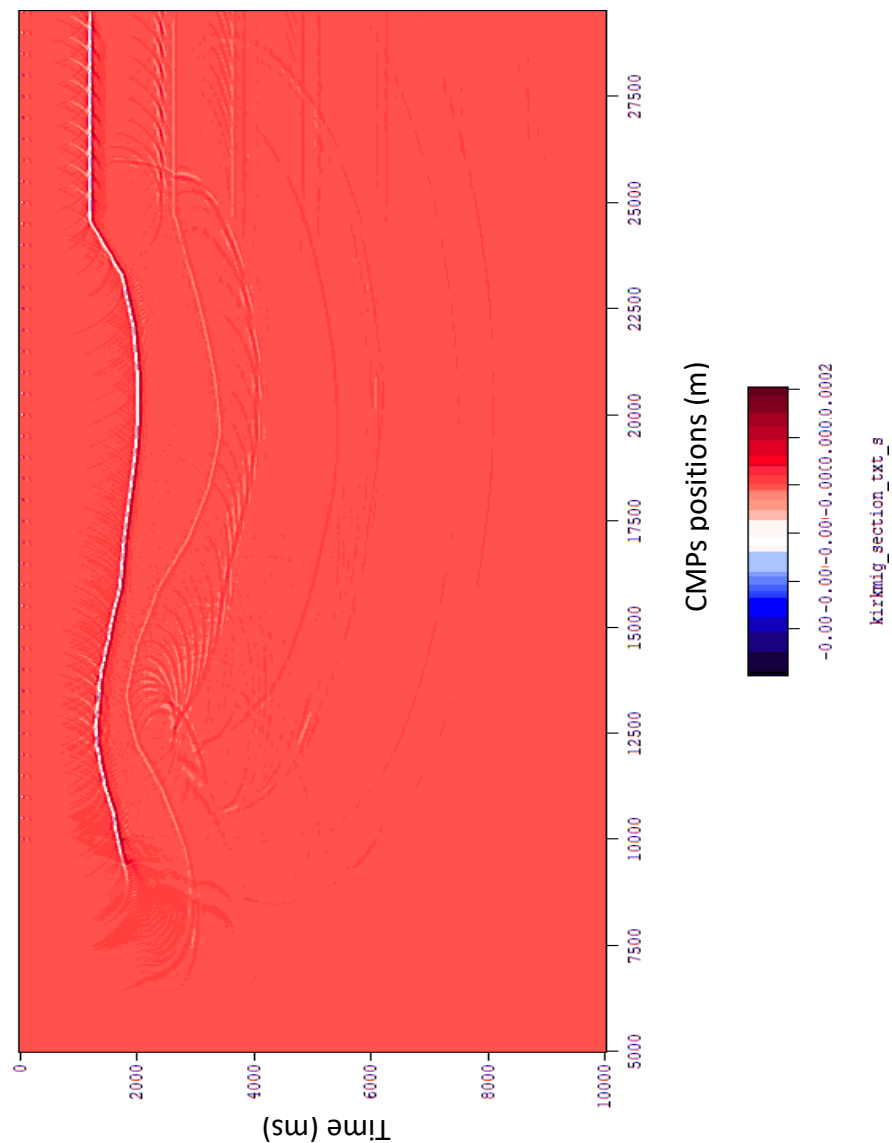
Σχήμα 3.21: Σεισμικές τομές στην ίδια περιοχή (a) πριν την χωροθέτηση και (b) μετά την χωροθέτηση, όπου παρατηρείται η ροποθέτηση των κεκλιμένων ανακλαστήρων στη σωστή τους θέση (Yilmaz, 1987).

Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν χωροθετούνται όλα τα γεγονότα σωστά, λόγω του ότι έχει προσδιοριστεί η κατάλληλη ταχύτητα χωροθέτησης με αποτέλεσμα όταν υπάρχουν ταυτόχρονα πλευρικές μεταβολές να χρησιμοποιείται μια ακολουθία από διαφορετικές τιμές ταχυτήτων μέχρι η χωροθέτηση να είναι αποδεκτή.

Έχει παρατηρηθεί ότι σε περιοχές με ρήγματα η σεισμική χωροθέτηση βελτιώνει τις τομές υπέρθεσης. Αυτό συμβαίνει καθώς όταν τα ελαστικά κύματα προσπίπτουν στα άκρα των ρηγματωμένων στρωμάτων να δημιουργείται το φαινόμενο της περίθλασης. Η σεισμική χωροθέτηση επανατοποθετεί όλες τις αφίξεις που προέρχονται από περίθλαση στη σωστή τους θέση επιτυγχάνοντας έτσι ακριβέστερη εικόνα των τεκτονικά ρηγματωμένων περιοχών.

Κατά την επεξεργασία της σεισμικής χωροθέτησης, έγινε η χρήση του αλγορίθμου Kirchhoff στο λογισμικό Matlab™.

Στο Σχήμα 3.22 παρατίθενται τα αποτελέσματα της χωροθέτησης σε δεδομένα χωρίς επιφανειακές ανακλάσεις (ghost). Το πλεονέκτημα του αλγορίθμου σεισμική χωροθέτησης Kirchhoff, σε σχέση με την τομή υπέρθεσης είναι ότι επιτυγχάνεται εξομάλυνση των ανακλάσεων και πιο ακριβής απεικόνιση.



Σχήμα 3.22: Εφαρμογή αλγόριθμου σεισμικής χωροθέτησης Kirchhoff στα deghosted δεδομένα.

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

4.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο κεφάλαιο πραγματοποιείται ανασκόπηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου στα συνθετικά σεισμικά δεδομένα, καθώς και αξιολόγησή της. Τελικά, παρατίθενται προτάσεις για την βελτίωση της για μελλοντική χρήση.

4.1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα στάδια της διπλωματικής εργασίας που έλαβαν χώρα είναι, αρχικά, η δημιουργία σεισμικού μοντέλου από γεωλογική τομή που βρίσκεται σε παράκτια περιοχή (νησί των Παξών), στη συνέχεια η δημιουργία συνθετικών δεδομένων που προσομοιάζουν θαλάσσια σεισμική διασκόπηση και τέλος η απομάκρυνση των επιφανειακών ανακλάσεων που προέκυψαν λόγω θαλάσσιου περιβάλλοντος. Μια ουσιαστικότερη, με βαρύτερη σημασία έρευνα στην αναζήτηση και εκμετάλλευση υποθαλάσσιων ορυκτών πόρων, θα λάμβανε υπ' όψιν της τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αφού παρέχουν μια ευκρινέστερη εικόνα του υπεδάφους. Η χρήση της μεθόδου με την απομάκρυνση των επιφανειακών ανακλάσεων προτείνεται και ενθαρρύνεται να εφαρμοστεί, ενώ το πραγματικό και το τελικό συνθετικό μοντέλο παρουσιάζουν πρόδηλη αντιστοιχία.

4.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρακάτω παρουσιάζονται ομαδοποιημένα τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία, ενώ παράλληλα γίνεται αναφορά και σε μελλοντικές προτάσεις για την ανάπτυξη των συνθετικών δεδομένων ανάκλασης.

1. Τα δεδομένα που έχουν γίνει deghosted ταυτίζονται με τα δεδομένα από τη χρήση απορροφητικών ορίων, τα οποία εξ' ορισμού δεν αναμένεται να παρουσιάζουν το φαινόμενο ghost.
2. Όταν η πηγή βρίσκεται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο με τα υδρόφωνα, η υπεδαφική κάλυψη (fold) δεν παραμένει σταθερή.
3. Σε μεγάλες αποστάσεις πηγής-γεωφώνου μεγαλύτερες από το βάθος από το οποίο προέρχονται οι ανακλάσεις δεν έχουμε επαρκή διόρθωση NMO και ως τρόπος

αντιμετώπισης επιλέγεται τμηματική άθροιση των σεισμικών ιχνών από μικρές αποστάσεις πηγής-γεωφώνου.

4. Η μέθοδος ανάλυσης είναι σχετικά γρήγορη και αξιόπιστη.

4.3 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

1. Προτείνεται διαφορετική τοποθέτηση πηγών και υδροφώνων. Για να ελεγχθούν όλες οι δυνατές περιπτώσεις γεωμετρίας πειράματος, θα πρέπει να αλλαχθούν οι θέσεις των υδροφώνων τόσο σε οριζοντιογραφία όσο και διαφορετικό βάθος σε σχέση με τις πηγές.

Το φαινόμενο ghost επηρεάζεται από το βάθος της πηγής και των δεκτών. Προτείνεται μια πιο ενδελεχή μελέτη για το πώς επιδρά το βάθος της πηγής και των δεκτών στο ghost με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας για την ελάττωση για την ελάττωση του φαινομένου ghost.

2. Δημιουργία αλγόριθμου διόρθωσης NMO, ο οποίος θα διορθώνει ικανοποιητικά τις ανακλάσεις που παρατηρούνται σε μικρά βάθη με απώτερο σκοπό την επαρκή διόρθωση NMO σε μεγάλες αποστάσεις πηγής γεωφώνων.

3. Εφαρμογή της μεθόδου σε συνθετικά δεδομένα όπου έχει γίνει εισαγωγή θορύβου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Barr Fred J. and Sanders Joe I. Attenuation of water-column multiples using pressure and velocity detectors in a water-bottom cable [Conference] // 59th Annual International SEG Meeting, Expanded Abstracts. - 1989. - pp. 653-656.

Bouchon, M. A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, Bull. Seism. Soc. Am., -1981. – pp. 71, 959-971.

Cordier Jean-Pierre. Velocities in Reflection Seismology [Book]. - [s.l.] : Springer, 1985.

Dai N., Vafidis A., Kanasevich E. Composite Absorbing Boundaries for the Numerical Simulation of Seismic Waves, Bulletin of the Seismological Society of America -1994.- v. 84, No 1. pp. 185-191.

Dix Dix-Durbin-Kerry formula [Online]. - 2015. - http://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Dix_formula.

Karakitsios V. Western Greece and Ionian Seapetroleum systems

Kennett B. L. N., N. J. Kerry Seismic waves in a stratified half space, Geophys. J. Int., - 1979. – pp. 57, 557–583.

PGS PGS - GeoStreamer [Online]. - PGS, 2016. <https://www.pgs.com/marineacquisition/toolsand-techniques/geostreamer/>.

Vafidis A. Supercomputer Finite Difference Methods for Seismic Wave Propagation [Book].- [s.l.]:University of Alberta, 1988.

Yilmaz O. Seismic data processing [Book]. - [s.l.] : Society of Exploration Geophysicists, 1987.

Αποστολόπουλος Γ. Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής [Book], 2013

Βαφείδης Α. Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Ι - Σεισμικές μέθοδοι, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής [Book]. - Χανιά : Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, 2011.

Κακάρογλου Ε. Ανάπτυξη μεθοδολογίας επεξεργασίας θαλάσσιων δεδομένων σεισμικής ανάκλασης διπλού αισθητήρα για την απομάκρυνση των ανακλάσεων που προέρχονται από την επιφάνεια της θάλασσας. Εφαρμογή σε συνθετικά δεδομένα από το Νότιο Αιγαίο. [Book]. - [s.l.] : Πολυτεχνείο Κρήτης, 2016.

Μανούτσογλου Ε. Γεωλογία της Ελλάδος [Book]. - Χανιά : Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, 2013.

Μούχου Αποστολία Μαρία Επεξεργασία Θαλάσσιων Δεδομένων Σεισμικής Ανάκλασης από το Νότιο Αιγαίο [Book]. - [s.l.] : Πολυτεχνείο Κρήτης, 2014.

Μπραουδάκη Γ. Σεισμικά Ανάκλασης στο Ιόνιο, Διπλωματική Εργασία [Book].-Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, 2004.

Παγιαλάκης Μ. Προσομείωση δεδομένων σεισμικής ανάκλασης για το σχεδιασμό διασκόπησης στο θαλάσσιο χώρο του Πατραϊκού κόλπου [Book]. - [s.l.] : Πολυτεχνείο Κρήτης, 2014.

Παπαδόπουλος Α. Τ. Εισαγωγή στη Γεωφυσική [Book]. - 2010.

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