



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΔΑΣΚΑΛΑΚΗΣ

«Σχεδιασμός πειράματος σεισμικής ανάκλασης για την
απεικόνιση του υπεδάφους σε περιοχή νότια της Κρήτης»



ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης (Επιβλέπων)

Μανούτσογλου Εμμανουήλ, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

Κρητικάκης Γεώργιος, Μέλος ΕΔΙΠ Πολυτεχνείου Κρήτης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	2
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	4
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	10
2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΡΗΤΗΣ.....	10
2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΜΕΣΣΑΡΑΣ.....	13
3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ	16
3.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ	16
3.2 ΕΙΔΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ.....	18
3.3 ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ.....	21
3.4 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	24
3.5 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ.....	25
3.6 ΥΠΕΔΑΦΙΚΗ ΚΑΛΥΨΗ.....	27
3.7 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ.....	28
3.8 ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ.....	30
3.9 ΜΕΣΗ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	32
3.10 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ.....	33
3.11 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ (Normal Moveout Correction - NMO).....	34
3.12 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΥΠΕΡΘΕΣΗ (Stacking)	36
3.13 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ (Migration).....	37
4. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	42

5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	48
5.1 ΑΝΑΔΙΑΤΑΞΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΚΟΙΝΟΥ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ (CMP sorting).....	49
5.2 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ (NMO – Normal MoveOut)	51
5.3 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΥΠΕΡΘΕΣΗ (Stacking).....	53
5.4 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ (Migration)	54
5.4.1 Σεισμική χωροθέτηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference).....	54
5.4.2 Kirchhoff Migration.....	56
5.4.3 Phase Shift.....	58
5.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ	61
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	66
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	67

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εξώφυλλο: <https://ocr.org/sounds/seismic-airgun-surveys/>

Εικόνα 2.1.1: “Η γεωλογική εξέλιξη της Κρήτης” (Fassoulas, 1999).

Εικόνα 2.1.2: “Η γεωλογική δομή της Κρήτης με τα αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα” (Fassoulas, 1999).

Εικόνα 2.1.3: Στρωματογραφικές - τεκτονικές Ενότητες της Κρήτης, Φυτρολάκης, 1978

Εικόνα 2.2.1: Γενικός γεωγραφικός χάρτης της Κρήτης (Κρίνης, 2009).

Εικόνα 2.2.2: Τεκτονοστρωματογραφικός χάρτης λεκάνης της Μεσσαράς (Χαρτογράφηση ΙΓΜΕ κλίμακας 1:50.000 ψηφιοποίηση από Vafidis et al, 2012)

Εικόνα 3.3.1: Αρχή του Huygens (Βαφείδης, 2011).

Εικόνα 3.3.2: Αρχή του Fermat (Βαφείδης, 2011).

Εικόνα 3.3.3: <http://www.geo.auth.gr/432/PDF/DIA8LASH-1.pdf>, Νόμος του Snell.

Εικόνα 3.5.1: Σχηματική απεικόνιση των διάφορων διατάξεων πηγής-δέκτη, (Βαφείδης Α., n.d.).

Εικόνα 3.5.2: Σχηματική απεικόνιση καταγραφής κοινής πηγής, http://www.kgs.ku.edu/Dakota/vol3/fy89/app_c.htm

Εικόνα 3.9.1: α) μοντέλο πολλών οριζόντιων γεωλογικών στρωμάτων και β) ισοδύναμο μοντέλο ομογενούς στρώματος, του οποίου η ταχύτητα είναι ίση με τη μέση ταχύτητα ή τη μέση τετραγωνική ταχύτητα (Βαφείδης, 2011).

Εικόνα 3.11: Διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου και καταγραφές πριν και μετά τη δυναμική διόρθωση, https://en.wikipedia.org/wiki/Normal_moveout#/media/File:NMO_Correction.png.

Εικόνα 3.12: Διάταξη πριν και μετά τη σεισμική υπέρθεση, <https://www.slideshare.net/alymohamed9693001/simple-seismic-processing-workflow>

Εικόνα 3.13.1: Εφαρμογή χωροθέτησης στην ίδια περιοχή α) μετά την υπέρθεση, β) πριν την υπέρθεση όπου παρατηρείται βελτίωση των αποτελεσμάτων («Μεγάλης κλίμακας γεωφυσικές διασκοπήσεις στην ευρύτερη περιοχή του Ερεθυμίου Απόλλωνος στο χωριό Θεολόγος Ρόδου» Γεωργιά, 1998).

Εικόνα 3.13.2: α) θέση του ανακλαστήρα CD στο γεωλογικό μοντέλο βάθους και β) ο ανακλαστήρας C'D' που αντιστοιχεί στη τομή υπέρθεσης, θα μετακινηθεί στην θέση CD στην τομή χωροθέτησης (Yilmaz, 1987).

Εικόνα 3.13.3: <https://slideplayer.com/slide/8567850/>

Εικόνα 3.13.4: Εφαρμογή σεισμικής χωροθέτησης (α) πριν την υπέρθεση και (β) μετά την υπέρθεση, όπου παρατηρείται βελτίωση των αποτελεσμάτων, δηλαδή η τομή (b) είναι απαλλαγμένη από τις περιθλάσεις και οι ανακλαστήρες είναι επανατοποθετημένοι στις σωστές τους θέσεις (Yilmaz, 1987).

Εικόνα 4.1: Μοντέλο σεισμικών στρωμάτων

Εικόνα 5.1.1: Καταγραφές κοινού ενδιαμέσου σημείου πριν την εφαρμογή της δυναμικής διόρθωσης [όπου $x=3900\text{m}$, $TWT = T(x)$, offset: η απόσταση πηγής – υδροφώνου (σε m)].

Εικόνα 5.1.2: Μοντέλο μέσης τετραγωνικής ταχύτητας (σε m/s)

Εικόνα 5.2.1: Καταγραφές κοινού ενδιαμέσου σημείου πριν την εφαρμογή της δυναμικής διόρθωσης [όπου $x=3900\text{m}$, $TWT = T(x)$, offset: η απόσταση πηγής – υδροφώνου (σε m)].

Εικόνα 5.2.2: Καταγραφές κοινού ενδιαμέσου σημείου μετά την εφαρμογή της δυναμικής διόρθωσης [όπου $x=3900$, $TWT = T(0)$ που είναι ο διπλός κατακόρυφος χρόνος]

Εικόνα 5.3: Τομή σεισμικής υπέρθεσης.

Εικόνα 5.4.1: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (finite difference)

Εικόνα 5.4.2.1: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο του Kirchhoff. Περιλαμβάνει 50 ίχνη και η μέγιστη κλίση είναι 60° .

Εικόνα 5.4.2.2: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο του Kirchhoff. Έχει μέγιστη κλίση 90° και 50 ίχνη.

Εικόνα 5.4.3: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο στο χώρο συχνότητας – κυματαριθμού. Η μέγιστη κλίση είναι στις 90° .

Εικόνα 5.5.1: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών σε σύγκριση με το σεισμικό μοντέλο.

Εικόνα 5.5.2: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο Kirchhoff (“Kirk_Mig_50_60_Daskalakis”) σε σύγκριση με το σεισμικό μοντέλο.

Εικόνα 5.5.3: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο Kirchhoff (“Kirk_Mig_50_90_Daskalakis”) σε σύγκριση με το σεισμικό μοντέλο.

Εικόνα 5.5.4: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο Kirchhoff (“Kirk_Mig_7897p5_90_Daskalakis”) σε σύγκριση με το σεισμικό μοντέλο.

Εικόνα 5.5.5: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο στο χώρο συχνότητας-κυματαριθμού σε σύγκριση με το σεισμικό μοντέλο.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η υλοποίηση της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης, έχοντας ως απώτερο στόχο την προσομοίωση ενός σεισμικού πειράματος και τη δημιουργία συνθετικών δεδομένων σεισμικής ανάκλασης και την επεξεργασία αυτών με τις κατάλληλες μεθόδους.

Πριν από την έναρξη της παρουσίασης, θα ήθελα να αναφερθώ στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Βαφείδη Αντώνιο, τον οποίο ευχαριστώ πρωτίστως για την ανάθεση του θέματος, αλλά και για την πολύτιμη βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Δρ. Ανδρονικίδη Νικόλαο και Δρ. Κρητικάκη Γεώργιο για την άρτια συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το διάστημα, την αμέριστη βοήθεια που παρείχαν και τις πολύτιμες συμβουλές τους αλλά και την Χριστίδη Λουίζα για την παραχώρηση του μοντέλου και αρκετών δεδομένων.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συνεχή στήριξη που έδειξε όλα αυτά τα χρόνια, αλλά και τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου αυτό τον καιρό.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση πειράματος σεισμικής ανάκλασης με στόχο την εύρεση κοιτασμάτων υδρογονανθράκων σε μια θαλάσσια περιοχή μελέτης στα νότια της Κρήτης.

Προκειμένου να σχεδιαστεί το πείραμα αυτό, δημιουργήθηκαν συνθετικά δεδομένα στο λογισμικό περιβάλλον της Matlab με χρήση των κατάλληλων αλγόριθμων. Η συνολική οριζόντια έκταση του μοντέλου είναι 8.345 μέτρα. Το μέγιστο βάθος είναι τα 6.000 μέτρα. Τα δεδομένα που προκύπτουν από την συγκεκριμένη διαδικασία είναι ταξινομημένα σε διάταξη κοινής πηγής.

Αρχικά, τα συνθετικά δεδομένα κοινής πηγής ταξινομούνται σε διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου (CMP) και εν συνεχεία ακολουθούν τα υπόλοιπα στάδια επεξεργασίας. Το πρώτο στάδιο αφορά τη δυναμική διόρθωση (NMO) που έχει ως στόχο να απαλλαχθεί το ανακλώμενο κύμα από τον επιπλέον χρόνο που αυτό χρειάζεται για να διαδοθεί, δεδομένου ότι η απόσταση μεταξύ πηγής και υδροφώνων θα αλλάζει συνεχώς.

Το αμέσως επόμενο στάδιο επεξεργασίας περιλαμβάνει τη σεισμική υπέρθεση (Stacking). Στο στάδιο αυτό γίνεται άθροιση όλων των σειсмоγραμμάτων στη διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου. Αυτό αποσκοπεί στην ενίσχυση του πλάτους των ανακλώμενων κυμάτων καθώς και του συνολικού σήματος των σεισμικών ανακλάσεων.

Αμέσως μετά από αυτή τη διαδικασία, ακολουθεί η σεισμική χωροθέτηση (Migration), με απώτερο σκοπό την ανακατασκευή των ανακλαστήρων αλλά και την σωστή τοποθέτηση τους. Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας αυτής, εφαρμόζονται τρεις μέθοδοι χωροθέτησης για να καταλήξουμε στην πιο αποτελεσματική μέθοδο που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Οι τρεις αυτές μέθοδοι είναι: η χωροθέτηση κατά Kirchhoff (Kirchhoff Migration), η χωροθέτηση με χρήση Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Differences) και η μέθοδος στο χώρο συχνότητας – κυματαριθμού (Phase Shift).

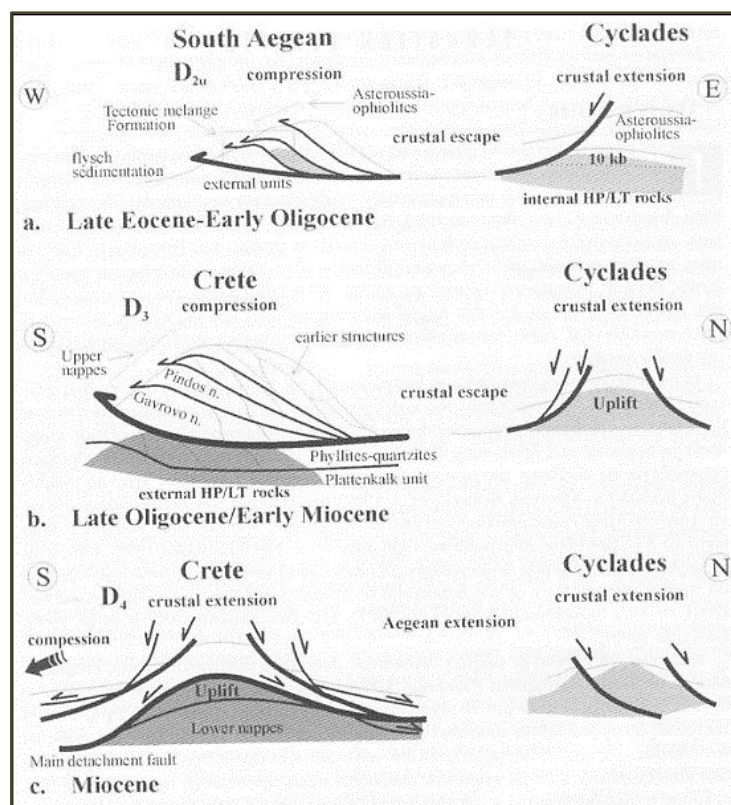
Μετά την εφαρμογή των συγκεκριμένων μεθόδων χωροθέτησης καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα βέλτιστα αποτελέσματα τα παρέχει η μέθοδος στο χώρο συχνότητας – κυματαριθμού. Η μέθοδος αυτή αποτελεί την πλέον κατάλληλη για ανάδειξη των κύριων ανακλαστήρων, διότι τοποθετεί πιο σωστά από τις υπόλοιπες μεθόδους τους ανακλαστήρες, απεικονίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια το υπέδαφος και είναι απαλλαγμένη από περιθλάσεις.

Τέλος, παρουσιάζονται συμπεράσματα αλλά και προτάσεις που αφορούν την επεξεργασία του συγκεκριμένου μοντέλου, έτσι ώστε να γίνει πιο λεπτομερής ανάλυση της περιοχής μελέτης.

2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΡΗΤΗΣ

Η Κρήτη χαρακτηρίζεται από έντονη πολυπλοκότητα όσον αφορά τη γεωλογική της δομή, η οποία οφείλεται στη σύγκλιση δύο πλακών στην περιοχή: της Ευρασιατικής Πλάκας και της Αφρικανικής Πλάκας. Το νησί αποτελείται από αλληπάλληλα διαδοχικά τεκτονικά καλύμματα η δημιουργία των οποίων οφείλεται σε τεκτονικές ενότητες, που τοποθετούνται η μία πάνω στην άλλη ανάλογα με τη στρωματογραφική τους θέση και την μεταμορφική τους ιστορία (Εικόνα 2.1.1). Με αυτό τον τρόπο οι τεκτονικές ενότητες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα ανώτερα και τα κατώτερα καλύμματα.



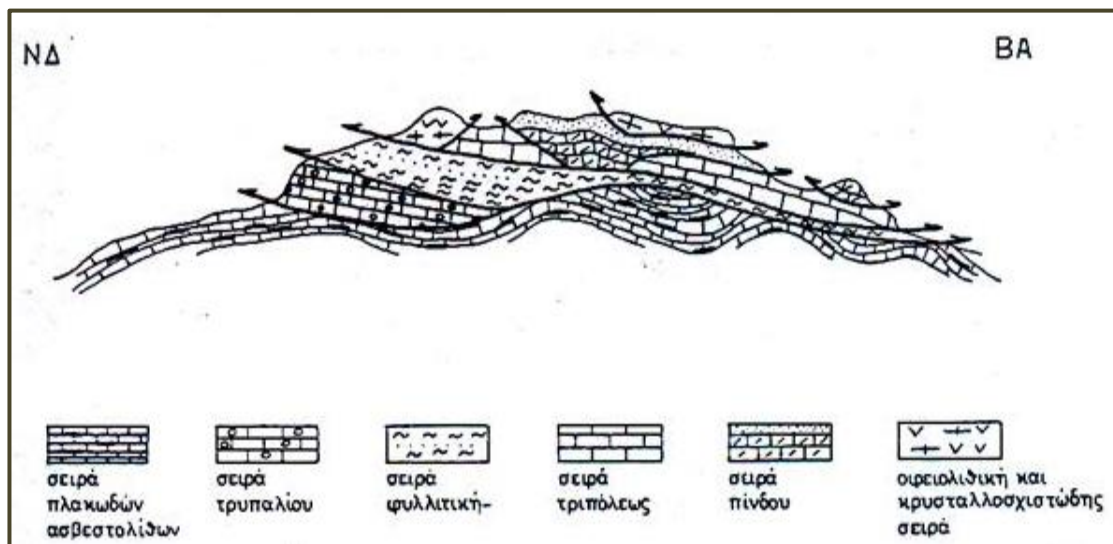
Εικόνα 2.1.1: «Η γεωλογική εξέλιξη της Κρήτης» (Fassoulas, 1999).

Πιο συγκεκριμένα, το αλπικό υπόβαθρο αποτελείται από πλακώδεις ασβεστόλιθους (τυπικοί πλακώδεις ασβεστόλιθοι με πυριτικές ενστρώσεις και κερατολιθικούς κονδύλους, καθώς επίσης και δολομίτες, ασβεστολιθικά

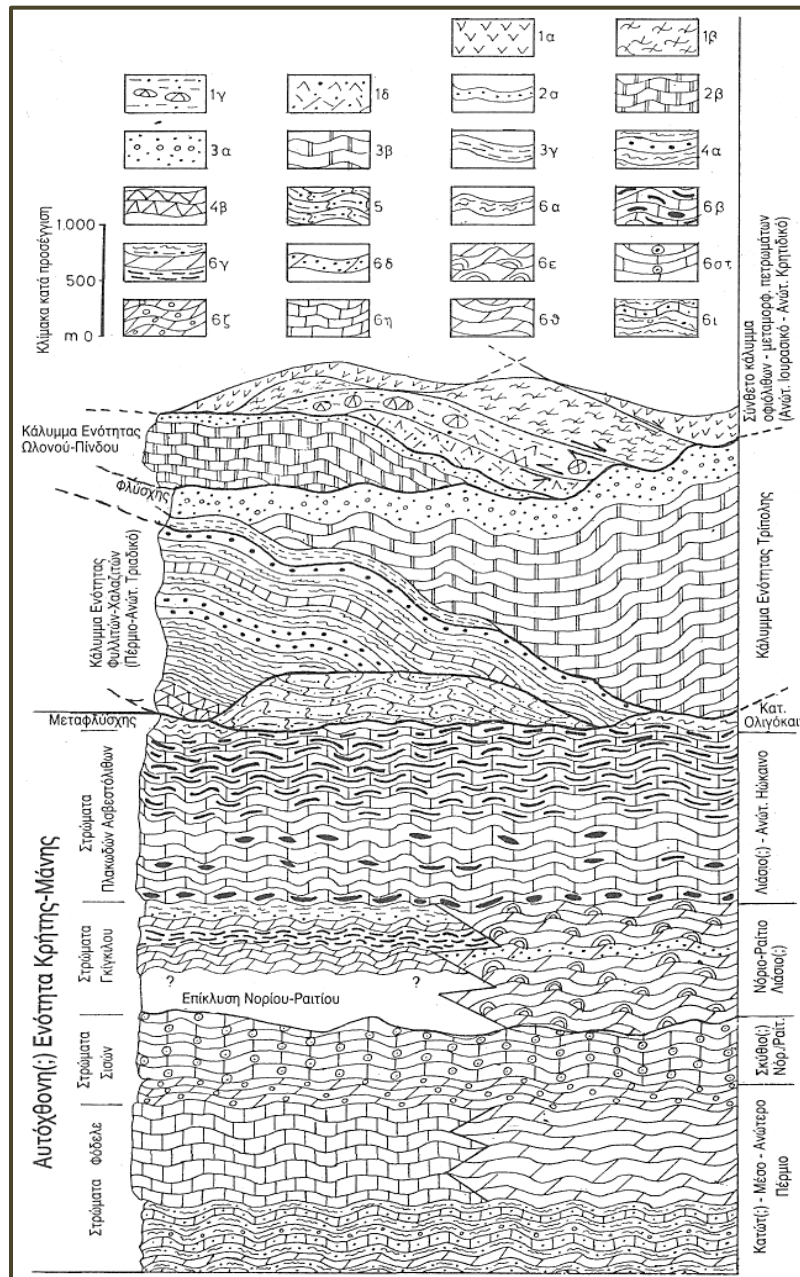
κροκαλοπαγή και μαζώδεις ασβεστόλιθους), οι οποίοι σε μεγάλες εκτάσεις εμφανίζονται στα κεντρικά της Κρήτης και πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή των Ταλαίων Ορέων, το σύστημα Φυλλιτών - Χαλαζιτών (φυλλίτες, χαλαζίτες, κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, μάρμαρα, μεταβασίτες και ανδεσίτες) και τους σχηματισμούς φλύσχη και ασβεστόλιθων των ζωνών Τρίπολης και Πίνδου. Συναντώνται, ακόμη, νεογενείς αποθέσεις (αστεστόλιθοι, μάργες, άμμοι, ιλύολιθοι) και τεταρτογενή κλαστικά ιζήματα. Χαρακτηριστικό λουπόν στοιχείο της δομής της Κρήτης, είναι η παρουσία αλληπάλληλων διαδοχικών τεκτονικών καλυμμάτων των διαφόρων ζωνών, τα οποία εμφανίζονται πάνω στην ενότητα Ταλέα Όρη - πλακώδων ασβεστόλιθων.

Τα καλύμματα των τεκτονικών ζωνών κατατάσσονται από κάτω προς τα πάνω στις παρακάτω ενότητες (Εικόνα 2.1.2):

- Ταλέα Όρη - πλακωδών ασβεστόλιθων
- Τρυπαλίου
- Φυλλιτών - Χαλαζιτών
- Πίνδου



Εικόνα 2.1.2: Η γεωλογική δομή της Κρήτης με τα αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα. (Fassoulas, 1999)



Εικόνα 2.1.3: Στρωματογραφικές - τεκτονικές Ενότητες της Κρήτης (Ομάδα των Πλακωδών Ασβεστολίθων, Ενότητα Τρυπαλίου, Φυλλιτική - Χαλαζιτική σειρά, ζώνη Γαβρόβου - Τρίπολης, ζώνη Πίνδου. (Φυτρολάκης, 1978). Υπόμνημα: 1α: Οφιόλιθοι, 1β: Κρυσταλλοσχιτώδη πετρώματα, 1γ: Ανθρακικά ιζήματα με ερυθρές σχιστοφυείς μάργες και κερατόλιθους (Τριαδικό - Κρητιδικό), που συνοδεύονται από βασικούς ηφαιστίτες, 1δ: Φλυσχοειδή ιζήματα με διάβασες και ογκόλιθους. 2: Ενότητα Ολονού - Πίνδου, (2α: Φλύσχης, 2β: Ασβεστόλιθο με ραδιολαρίτες). 3: Ενότητα Τρίπολης, (3α: Φλύσχης, 3β: Ανθρακική σειρά, 3γ: Αργιλοσχιστολιθική - ανθρακική - φυλλιτική σειρά). 4: Ενότητα Φυλλιτών - Χαλαζιτών, (4α: Φυλλίτες - χαλαζίτες, 4β: Κυρίως ραουβάκες και εβαπορίτες). 5: Ενότητα Τρυπαλίου, 6: Ομάδα των Πλακωδών Ασβεστολίθων (Ενότητα Κρήτης - Μάνης). (6α: Μεταφλύσχης, 6β: Πλακώδεις ασβεστόλιθοι, 6γ: Στρώματα Γκιγκίλου, 6δ: Δολοαρενίτες και μικροκλαστικά ιζήματα, 6ε: Στρωματολιθικοί δολομίτες, 6στ: Κυρίως ωολιθικά ανθρακικά ιζήματα, 6ζ: Δολομιτικά κροκαλοπαγή, 6η: Ανοικτόχρωμοι συμπαγείς ασβεστόλιθοι, 6θ: Στρωματώδεις βιτουμενιούχοι δολομίτες και 6ι: Εναλλαγές βιτουμενιούχων ανθρακικών μετακλαστικών ιζημάτων.

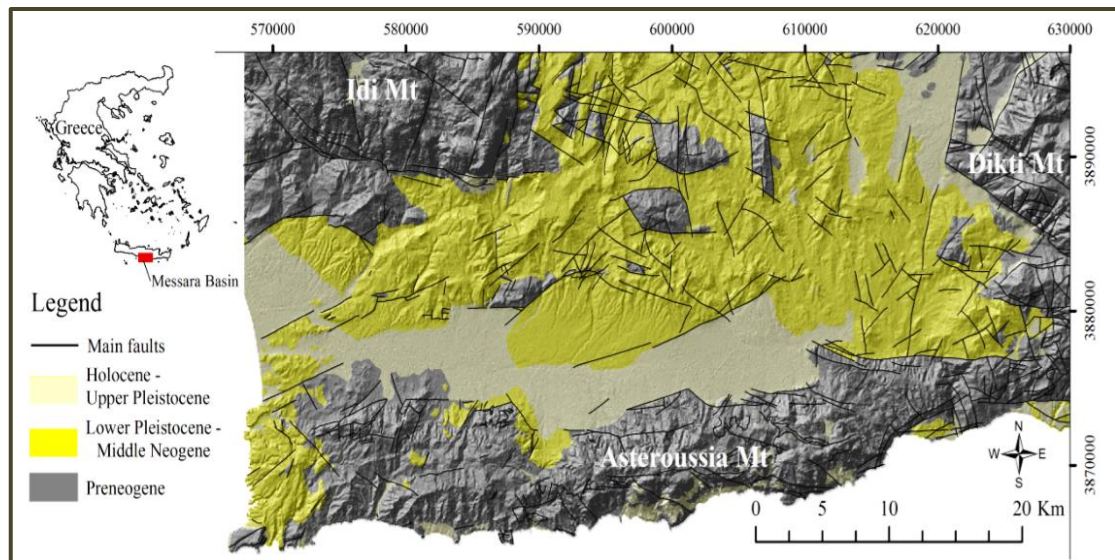
2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΜΕΣΣΑΡΑΣ

Η Μεσσαρά αποτελεί τη μεγαλύτερη πεδιάδα της Κρήτης. Βρίσκεται στη νότια πλευρά του νησιού, πιο συγκεκριμένα στο νομό του Ηρακλείου, και έχει ένα μικρό θαλάσσιο μέτωπο στα δυτικά. Η εν λόγω πεδιάδα, εκτείνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά στη νότια ακτή της Κρήτης. Στα βόρεια συνορεύει με τον Ψηλορείτη και νότια με την οροσειρά των Αστερουσίων, ενώ στα δυτικά βρέχεται από τον ομώνυμο κόλπο της Μεσσαράς, που αποτελεί τμήμα του Λιβυκού πελάγους (Εικόνα 2.2.1). Στα ανατολικά, εκτείνεται ως τις παρυφές του όρους Δίκτη. Μια χαμηλή ανύψωση του εδάφους, στο χωριό Ασήμι, χωρίζει την περιοχή σε δύο λεκάνες, την Άνω και την Κάτω Μεσσαρά.



Εικόνα 2.2.1: Γενικός γεωγραφικός χάρτης της Κρήτης (Κρίνης, 2009).

Η περιοχή καλύπτει μια έκταση 1000 km². Μόλις στο 1% της περιοχής παρατηρείται πυκνή δασική έκταση, ενώ περίπου το 5% αποτελείται από εκτάσεις αραιής βλάστησης και απογυμνωμένων βράχων. Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης είναι περίπου τα 450 μέτρα. Αποτελεί μια περιοχή που εμφανίζει αρκετά έντονη διακύμανση στο ανάγλυφό της, με ήπιες έως μηδενικές κλίσεις στο πεδινό τμήμα της λεκάνης και πιο έντονες κλίσεις στο ορεινό τμήμα (βορειοδυτικό, νότιο και ανατολικό) (Εικόνα 2.2.2).



Εικόνα 2.2.2: Τεκτονοστρωματογραφικός χάρτης λεκάνης της Μεσσαράς (Χαρτογράφηση ΙΓΜΕ κλίμακας 1:50.000 ψηφιοποίηση από Vafidis et al, 2012)

Στην περιοχή παρατηρείται ύπαρξη αλπικών σχηματισμών, ενώ η λεκάνη καλύπτεται από μεταλικά ιζήματα, τα οποία αποτελούν μεταγενέστερους σχηματισμούς του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς. Οι λιθοστρωματογραφικές ενότητες που παρατηρούνται, ταξινομούνται στις εξής ομάδες σχηματισμών:

- **Ομάδα της Πρίνα:** Αποτελείται από ασβεστολιθικά χονδρόκοκκα λατυποπαγή και λατυποκροκαλοπαγή και ασβεστόλιθους με μη θαλάσσιο έως και υφάλμυρο περιβάλλον απόθεσης.
- **Ομάδα Τεφελίου:** Βρίσκεται πάνω στην Πρίνα και περιέχει κροκαλοπαγή, άμμους και αργίλους.
- **Ομάδα Βρυσσών:** Βρίσκεται είτε πάνω στο αλπικό υπόβαθρο είτε πάνω από την ομάδα του Τεφελίου και αποτελείται από θαλάσσιους ασβεστόλιθους, εναλλαγές μαργών και παρεμβολές γύψων.
- **Ομάδα Ελληνικού:** Είναι είτε υπερκείμενη πάνω σε παλαιότερους Νεογενείς σχηματισμούς, είτε πάνω στην ομάδα Βρυσσών και αποτελείται από χερσαίας προέλευσης κροκαλοπαγή, γύψους και λεπτόκοκκες υφάλμυρες αποθέσεις.

- **Ομάδα Φοινικιάς:** Είναι η ομάδα πάνω από αυτή του Ελληνικού, των Βρυσσών ή στο προνεογενές υπόβαθρο αποτελούμενη από θαλάσσιες μάργες και αργίλους.
- **Αγία Γαλήνη:** Υπερκείμενη της ομάδας Φοινικιάς. Περιέχει χερσαία κροκαλοπαγή και ποταμολιμναίες άμμους και αργίλους.

3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ

3.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ

Οι σεισμικές μέθοδοι είναι ιδιαίτερα σημαντικές όσον αφορά την εφαρμογή τους στις μέρες μας διότι, κατά κύριο λόγο, δίνουν λύσεις σε σημαντικά σύγχρονα προβλήματα. Για παράδειγμα, το ενεργειακό πρόβλημα ή ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζεται ο σεισμικός κίνδυνος αποτελούν τέτοιου είδους προβλήματα. Σημαντικό επίσης είναι ότι παρέχουν πληροφορίες για τις σεισμικές ταχύτητες και την στρωματογραφία του φλοιού της Γης. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, οι σεισμικές μέθοδοι, χωρίζονται σε μεθόδους ανάκλασης και διάθλασης. Τα πλεονεκτήματα των σεισμικών μεθόδων είναι η υψηλή ακρίβεια που εμφανίζουν καθώς μπορούν να περιγράψουν με μεγάλη λεπτομέρεια τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους, η δυνατότητα απεικόνισης οποιασδήποτε μεταβολής του πορώδους ή της διαπερατότητας καθώς επίσης και η ικανότητα για άμεσο εντοπισμό κοιτασμάτων πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Στα αρνητικά χαρακτηριστικά των μεθόδων αυτών συναντάται ο μεγάλος όγκος δεδομένων που ενδέχεται να προκύψει λόγω κυρίως του μεγάλου αριθμού πληροφοριών που παρέχουν. Στα μειονεκτήματα επίσης είναι και η οικονομική παράμετρος των μεθόδων αυτών, διότι τόσο ο εξοπλισμός που απαιτείται όσο και η απόκτηση και επεξεργασία των δεδομένων έχουν υψηλό κόστος.

Ανάκλαση, γενικότερα, θεωρείται το φαινόμενο αλλαγής διεύθυνσης διάδοσης μετώπου κύματος, μέσα στο ίδιο μέσο, από μια διαχωριστική επιφάνεια. Τα συνηθέστερα παραδείγματα ανάκλασης είναι αυτά του φωτός, του ήχου, του νερού, καθώς επίσης και των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων όπου με βάση αυτή την ιδιότητα επιτυγχάνεται ο ραδιοεντοπισμός στόχων ή η λήψη των σεισμικών κυμάτων.

Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης στηρίζεται στους νόμους διάδοσης των ελαστικών κυμάτων. Τα ελαστικά κύματα τα οποία παράγονται είτε φυσικά είτε τεχνητά και μπορεί να παραχθούν μέσα ή πάνω στην επιφάνεια της Γης ονομάζονται σεισμικά κύματα.

Η μέθοδος αυτή εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα όπως:

- I. Το γεγονός ότι οι σεισμικές καταγραφές μπορούν να συλλεχθούν σε μικρές αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη.
- II. Οι καταγραφές μπορούν να ελεγχθούν και να ερμηνευθούν σχετικά γρήγορα, ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα της γεωλογίας της περιοχής.
- III. Οι σεισμικές παρατηρήσεις χρησιμοποιούν ολόκληρη την ανακλώμενη κυματομορφή, δηλαδή έχουμε ολόκληρη την κίνηση καταγεγραμμένη στις διάφορες αποστάσεις πηγής-δέκτη.
- IV. Είναι δυνατή η απεικόνιση πολύπλοκων δομών του υπεδάφους, μέσω μετρήσεων που έχουν γίνει.

Η σεισμική ανάκλαση θεωρείται η πιο αξιόπιστη γεωφυσική μέθοδος στην αναζήτηση υδρογονανθράκων και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία του πετρελαίου παρά το υψηλό κόστος. Το 95% των δαπανών διατίθεται στη σεισμική ανάκλαση. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται τόσο στο προγεωτρητικό στάδιο της αναζήτησης των υδρογονανθράκων όσο και σε συμπληρωματικές μετρήσεις μέσα στη γεώτρηση. Η συλλογή των δεδομένων αποτελεί το ακριβότερο κομμάτι της διασκόπησης από άποψη κόστους. Στην ξηρά, μάλιστα, το κόστος είναι δέκα (10) φορές μεγαλύτερο από ότι στη θάλασσα. Τα θαλάσσια σεισμικά δεδομένα είναι συνήθως πιο καλής ποιότητας σε σχέση με τα δεδομένα της ξηράς.

3.2 ΕΙΔΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Τα σεισμικά κύματα είναι διαφορετικών ειδών και ποικίλουν ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο διαδίδονται. Έτσι, έχουμε τα **κύματα χώρου** και τα **επιφανειακά κύματα**. Στα κύματα χώρου η διάδοση της διαταραχής γίνεται προς όλες τις κατευθύνσεις του στερεού σώματος, για παράδειγμα το εσωτερικό της Γης, ενώ στα επιφανειακά κύματα η διαταραχή διαδίδεται σε διαχωριστικές επιφάνειες, όπως για παράδειγμα η επιφάνεια της Γης (ή αλλιώς όρια των στρωμάτων της Γης).

- **ΚΥΜΑΤΑ ΧΩΡΟΥ (BODY WAVES)**

Διαδίδονται στο εσωτερικό της Γης. Καταφθάνουν στον δέκτη πιο γρήγορα από ότι τα επιφανειακά κύματα. Τα κύματα χώρου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στα διαμήκη κύματα (P) και στα εγκάρσια (S).

1. ΔΙΑΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΑ (P-WAVES)

Είναι κύματα των οποίων η διεύθυνση ταλάντωσης των υλικών σημείων συμπίπτει με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Συμβολίζονται με P. Ο συμβολισμός προέρχεται από το λατινικό «Primus» που σημαίνει πρώτο, αφού λόγω της μεγάλης ταχύτητας διάδοσης που έχουν, καταφθάνουν πρώτα στο σταθμό παρατήρησης σε σχέση με τα άλλα είδη των σεισμικών κυμάτων. Τα συγκεκριμένα κύματα διαδίδονται τόσο μέσω στερεών, όσο και μέσω υγρών, όπως για παράδειγμα το νερό. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων αυτών (3.2.1) συμβολίζεται με α και εξαρτάται από την πυκνότητα ρ και τις σταθερές λ , μ και $Lame$. Ισχύει ότι:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (3.2.1)$$

Τα συγκεκριμένα κύματα είναι πιο εύκολο να αναγνωρισθούν και για αυτό χρησιμοποιούνται τόσο συχνά στις σεισμικές μεθόδους για την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά τη δομή των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης. Τα διαμήκη κύματα είναι γνωστά και ως

συμπιεστικά κύματα, λόγω της ώθησης και της μετακίνησης που δημιουργούν.

2. ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΚΥΜΑΤΑ (S-WAVES)

Αμέσως μετά τα διαμήκη κύματα καταφθάνουν στους δέκτες τα εγκάρσια. Είναι πιο αργά (έως και δύο φορές περίπου πιο αργά), ακολουθούν τα διαμήκη στο σειсмоγράφημα. Συμβολίζονται με S από το λατινικό «Secundus», που σημαίνει δεύτερο, διότι όπως αναφέρθηκε, καταφθάνουν μεταγενέστερα από τα διαμήκη. Η διεύθυνση ταλάντωσης των υλικών σημείων σε αυτού του είδους τα κύματα είναι κάθετη προς την επιφάνεια διάδοσης του κύματος. Η ταχύτητα διάδοσής τους συμβολίζεται με β και εξαρτάται από τον συντελεστή ακαμψίας μ (ή αλλιώς μέτρο διατμητικής παραμόρφωσης) και την πυκνότητα ρ :

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3.2.2)$$

Τα S-WAVES δεν μπορούν να διαδοθούν σε ρευστό (υγρό ή αέριο), διότι σε αυτές τις συνθήκες έχουμε $\mu=0$ και $\beta=0$. Μπορούν να διαδοθούν σε οποιοδήποτε άλλο μέσο αρκεί ο συντελεστής μ να είναι διάφορος του μηδενός ($\mu \neq 0$).

- **ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΚΥΜΑΤΑ**

Τα επιφανειακά κύματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Τα κύματα Rayleigh, τα κύματα Love και τα κύματα ψεύδο-Rayleigh. Όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια της Γης τόσο μικραίνει το πλάτος τους. Έχουν μεγαλύτερα πλάτη από τα κύματα χώρου, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα να προκύπτει καθαρότερη εικόνα στο σειсмоγράφημα για αυτά. Οι καταστροφές που συνδέονται με τους σεισμούς, οφείλονται κατά κύριο λόγο σε αυτού του είδους τα κύματα, παρά το γεγονός ότι καταφθάνουν πιο αργά από τα κύματα χώρου.

1. KYMATA RAYLEIGH

Πρόκειται για σύνθετα κύματα, δηλαδή οι ταλαντώσεις των υλικών σημείων γίνονται στο κατακόρυφο επίπεδο το οποίο περιέχει τη διεύθυνση διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων. Τα κύματα R είναι τα πιο αργά αλλά και πιο περίπλοκα κύματα σε σύγκριση με όλα τα υπόλοιπα είδη σεισμικών κυμάτων. Επίσης, προκαλούν τη μεγαλύτερη μετατόπιση του εδάφους. Η ταχύτητα των Rayleigh κυμάτων εξαρτάται από τις ελαστικές σταθερές, την πυκνότητα και τη συχνότητα (ή το μήκος κύματος), όταν τα κύματα αυτά βρίσκονται σε μη ομογενή μέσα διάδοσης.

2. KYMATA L (LOVE WAVES)

Όπως όλα τα επιφανειακά κύματα, έτσι και τα Love Waves, είναι πιο αργά από τα κύματα χώρου. Είναι όμως και τα πιο γρήγορα επιφανειακά κύματα με κίνηση οριζόντια στην επιφάνεια του εδάφους. Η ταχύτητα τους εξαρτάται από τη συχνότητα. Σε πολύ υψηλές συχνότητες, η ταχύτητά τους θα μπορούσε να συγκριθεί με τα εγκάρσια κύματα (S-WAVES). Είναι πολύ καταστρεπτικά και είναι η κύρια αιτία για μια πιθανή κατάρρευση κτηρίου κατά τη διάρκεια ενός σεισμού.

Για να δημιουργηθούν τα κύματα αυτά, απαραίτητη προϋπόθεση είναι το γεωλογικό στρώμα να βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια της Γης και να έχει πολύ λεπτό πάχος. Τα υλικά σημεία των κυμάτων L πραγματοποιούν ταλαντώσεις οριζόντιας διεύθυνσης, η οποία είναι κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

3. KYMATA ΨΕΥΔΟ-RAYLEIGH

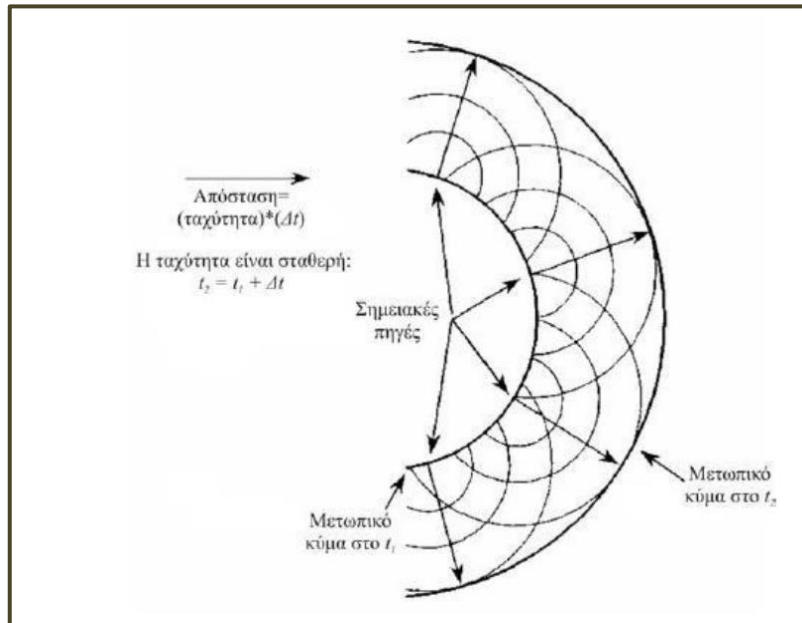
Τα συγκεκριμένα κύματα δημιουργούνται από τη συμβολή πολλαπλά ανακλώμενων κυμάτων P ή/και SV.

3.3 ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης (όπως και όλες οι ενεργητικές γεωφυσικές σεισμικές μέθοδοι) προϋποθέτει την σεισμική διέγερση του υπεδάφους με τη χρήση τεχνητής σεισμικής πηγής. Κατά τη διέγερση αυτή παράγονται τα σεισμικά κύματα τα οποία διαδίδονται στο υπέδαφος. Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων στα οποία φτάνει το σεισμικό κύμα ταυτόχρονα, ονομάζεται μέτωπο του κύματος. Για να προσδιοριστεί το μέτωπο αυτό, αρκεί η χρήση βασικών νόμων-αρχών της κινηματικής φυσικής. Η αρχή του Huygens, η αρχή του Fermat και ο νόμος του Snell αποτελούν τους τρεις πιο βασικούς νόμους περιγραφής της διάδοσης των ελαστικών κυμάτων.

- **Αρχή του Huygens**

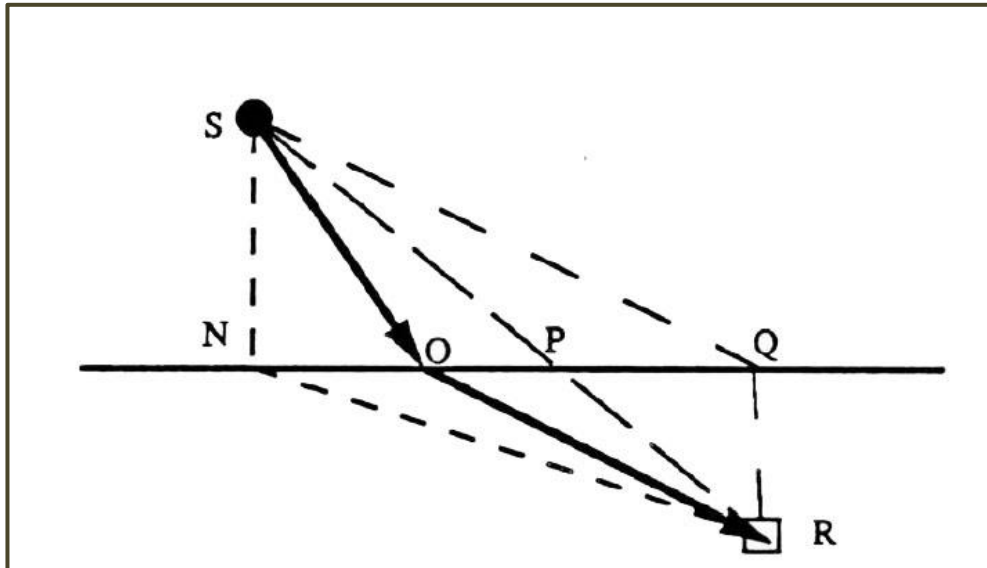
Σύμφωνα με την αρχή αυτή, κάθε σημείο του μετώπου κύματος, της επιφάνειας δηλαδή όπου τα υλικά σημεία ταλαντώνονται με την ίδια φάση, αποτελεί δευτερεύουσα πηγή σεισμικών κυμάτων. Κατά αυτό τον τρόπο, μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες για τη θέση του μετώπου κύματος οποιαδήποτε χρονική στιγμή (Εικόνα 3.3.1). Η συγκεκριμένη αρχή μπορεί να περιγράψει τη διάδοση μόνο ενός είδους σεισμικών κυμάτων, πράγμα που σημαίνει ότι στην περίπτωση που έχουμε ταυτόχρονα διαμήκη και εγκάρσια κύματα, θα εφαρμόσουμε ξεχωριστά την αρχή αυτή για κάθε είδος κύματος. Τέλος, η αρχή του Huygens ισχύει για μικρά μήκη κύματος και δεν έχει τη δυνατότητα να ερμηνεύσει φαινόμενα όπως η περίθλαση των σεισμικών κυμάτων σε ανώμαλες διαχωριστικές επιφάνειες (π.χ. ρήγματα).



Εικόνα 3.3.1: Αρχή του Huygens (Βαφείδης, 2011).

- **Αρχή του Fermat**

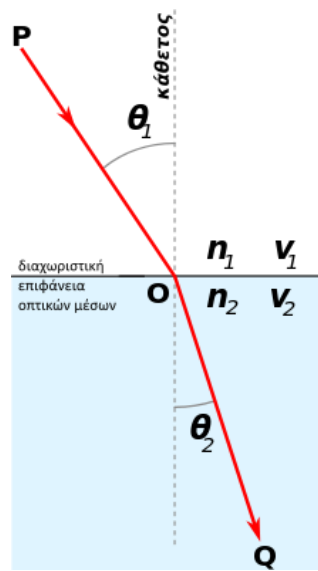
Σύμφωνα με αυτή την αρχή, η σεισμική ακτίνα ακολουθεί την ελάχιστη χρονικά δυνατή διαδρομή, εφόσον πηγή και γεώφωνο βρίσκονται σε διαφορετικά στρώματα. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι τα σεισμικά κύματα ακολουθούν τροχιές ελάχιστου χρόνου. Προκύπτει, βάσει των παραπάνω, ότι η τροχιά του κύματος θα είναι ευθεία γραμμή σε ένα μέσο με σταθερή ταχύτητα, κάτι το οποίο είναι απόλυτα φυσιολογικό καθώς η ευθεία είναι η συντομότερη απόσταση μεταξύ δύο σημείων. Επιπροσθέτως, από την στιγμή που διατηρούμε την ταχύτητα σταθερή, η απόσταση μεταξύ των δύο σημείων θα είναι εκείνη με τον ελάχιστο χρόνο διάδοσης (Εικόνα 3.3.2). Με αυτό τον τρόπο, είναι δυνατή η χάραξη των σεισμικών ακτινών σε ελαστικό μέσο, στο οποίο η κατανομή ταχύτητας διάδοσης των ελαστικών κυμάτων είναι γνωστή.



Εικόνα 3.3.2: Αρχή του Fermat (Βαφείδης, 2011).

- **Νόμος του Snell**

«Το ημίγινόμενο της γωνίας πρόσπτωσης της σεισμικής ακτίνας προς τη σεισμική ταχύτητα είναι αριθμός σταθερός και χαρακτηριστικός κάθε ακτίνας. Αυτός, παριστάνεται με το p και λέγεται παράμετρος της σεισμικής ακτίνας» (Εικόνα 3.3.3).



Εικόνα 3.3.3: Νόμος του Snell, https://el.wikipedia.org/wiki/Νόμος_του_Σνελ

3.4 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για την καταγραφή και τη συλλογή των δεδομένων ανάκλασης χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός οργάνων. Τα συγκεκριμένα όργανα είναι είτε γεώφωνα, στην περίπτωση που βρισκόμαστε σε μετρήσεις στην ξηρά, είτε υδρόφωνα στην αντίστοιχη περίπτωση για τη θάλασσα. Εάν πραγματοποιηθεί μέτρηση στην ξηρά, τότε τα όργανα εμφανίζουν μεγάλη ευαισθησία στις μεταβολές ταχύτητας, ενώ αντίστοιχα στην περίπτωση μετρήσεων στη θάλασσα, οι δέκτες είναι ευαίσθητοι στην μεταβολή της πίεσης. Οι διαδικασίες αυτές πραγματοποιούνται με πρωταρχικό στόχο τη συλλογή πληροφοριών από τα σημεία ανάκλασης των σεισμικών ακτινών πάνω στις διεπιφάνειες των εδαφικών στρωμάτων, έτσι ώστε να είναι εφικτός ο διαχωρισμός του σήματος από τον εδαφικό θόρυβο, αλλά και για την εξάλειψη πιθανών σφαλμάτων που προέκυψαν κατά τη διαδικασία, έτσι ώστε να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα.

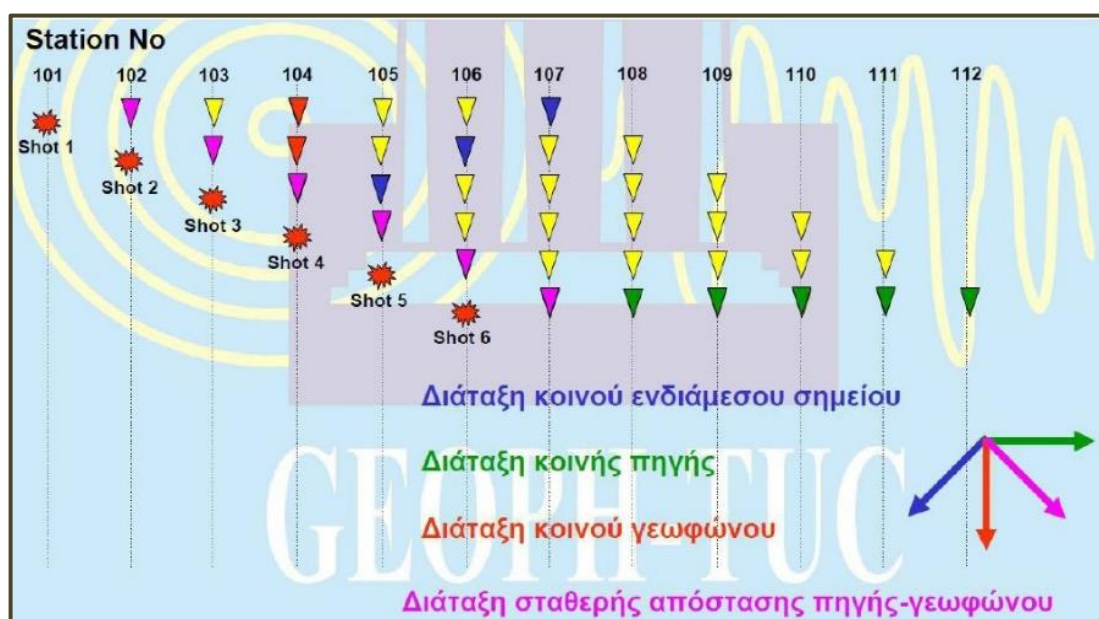
Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε προσομοίωση πειράματος σεισμικής ανάκλασης σε θαλάσσιο περιβάλλον. Στις διασκοπήσεις αυτού του τύπου, χρησιμοποιούνται υδρόφωνα πιεζοηλεκτρικού τύπου, κάτι που σημαίνει ότι η πίεση που ασκείται μετατρέπεται σε ηλεκτρική τάση. Τα υδρόφωνα τοποθετούνται σε θαλάμους πλαστικού κυλινδρικού καλωδίου, ενώ το υλικό που περιέχεται μέσα σε αυτά είναι συνήθως τιτανιούχο βάριο.

Ένα καράβι σέρνει καλώδιο μεγάλου μήκους (π.χ. 6-12 km). Ανάλογα τις καιρικές συνθήκες αλλά και τις συνθήκες που επικρατούν στην επιφάνεια της θάλασσας, το σεισμικό καλώδιο θα τοποθετηθεί λίγο πιο κάτω από την επιφάνεια. Το καλώδιο αυτό, είναι εξοπλισμένο με δέκτες υψηλής ευαισθησίας στην μεταβολή της πίεσης του νερού (υδρόφωνα). Οι μεταβολές θα καταγραφούν σε συνάρτηση με το χρόνο από ψηφιακά καταγραφικά πολλών καναλιών. Πάνω στο ίδιο πλοίο βρίσκεται συστοιχία αεροβόλων, τα οποία θα δημιουργήσουν τα σεισμικά κύματα.

3.5 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

- **Διάταξη κοινής πηγής**

Τοποθέτηση της πηγής αλλά και των δεκτών κατά μήκος μιας ευθείας. Στη συγκεκριμένη διάταξη έχουμε ίχνη που προέρχονται από μία πηγή, ενώ η καταγραφή των δονήσεων γίνεται από πολλούς δέκτες. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία, πηγή και γεωφώννα μετατοπίζονται κατά μήκος της ίδιας γραμμής μελέτης και έτσι θα καταγραφεί το νέο σήμα στις καινούργιες θέσεις πηγής-γεωφώννων. Στην περίπτωση της ξηράς η μεταφορά αυτή γίνεται ηλεκτρονικά χωρίς να είναι απαραίτητη η μετακίνηση των γεωφώννων. Στις θαλάσσιες διασκοπήσεις η μετακίνηση της διάταξης γίνεται μετακινώντας την πίσω από το πλοίο.



Εικόνα 3.5.1: Σχηματική απεικόνιση των διάφορων διατάξεων πηγής-δέκτη, (Βαφείδης Α., n.d.).

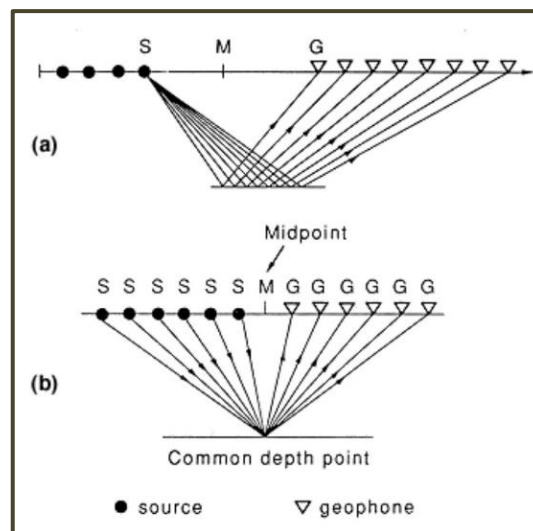
- **Διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου**

Όταν ο ανακλαστήρας είναι παράλληλος στην επιφάνεια, το σημείο αυτό του υπεδάφους βρίσκεται ακριβώς κάτω από ένα σημείο της επιφάνειας, γύρω από τα ζευγάρια πηγής-γεωφώννων που είναι συμμετρικά κατανομημένα. Το σημείο εκείνο ονομάζεται «κοινό ενδιάμεσο σημείο». Η συλλογή των σειсмоγραμμάτων στη συγκεκριμένη διάταξη απαιτεί την ακριβή γνώση γεωμετρίας του

πειράματος. Ο αριθμός των σειсмоγραμμάτων διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου ονομάζεται υπεδαφική κάλυψη (fold). Η υπεδαφική κάλυψη αποτελεί μια από τις πιο βασικές παραμέτρους των σεισμικών διασκοπήσεων. Η διάταξη αυτή θεωρείται πιο αποτελεσματική στην περίπτωση όπου έχουμε οριζόντια επιφάνεια ανάκλασης.

- **Διάταξη κοινού σημείου βάθους**

Η προβολή του κοινού ενδιάμεσου σημείου στην επιφάνεια ανάκλασης ονομάζεται «κοινό σημείο βάθους» και συμβολίζεται διεθνώς με CDP (Common Depth Point). Για κάθε σημείο που ανακλάται έχουμε ένα αντίστοιχο επαρκή αριθμό καταγραφών, στη συγκεκριμένη διάταξη, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα την πολλαπλή κάλυψη της επιφάνειας ανάκλασης και τη διάκριση των ανακλώμενων κυμάτων στα σειсмоγράμματα, άρα και την εξασφάλιση μιας πιο αναλυτικής και λεπτομερούς εικόνας για το υπέδαφος.



Εικόνα 3.5.2: Σχηματική απεικόνιση καταγραφής κοινής πηγής,

http://www.kgs.ku.edu/Dakota/vol3/fy89/app_c.htm

3.6 ΥΠΕΔΑΦΙΚΗ ΚΑΛΥΨΗ

Η μέγιστη υπεδαφική κάλυψη (fold) αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς όρους στη διαδικασία της σεισμικής ανάκλασης. Αποτελεί το σύνολο των ιχνών που ανήκουν στην ίδια διάταξη «κοινού ενδιάμεσου σημείου». Ο όρος μπορεί μαθηματικά να προσδιοριστεί από την εξής σχέση:

$$\text{Fold} = \min \{ \text{αριθμός πηγών}, (NC / 2) \times (\Delta x / \Delta s) \} \quad (3.6.1)$$

- NC: αριθμός καναλιών καταγραφικού
- Δx : ισαπόσταση γεωφώνων
- Δs : ισαπόσταση πηγών

3.7 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ

Για τον καθορισμό ενός μοντέλου ταχυτήτων στο υπέδαφος είναι απαραίτητη η ερμηνεία των σεισμικών καταγραφών. Η ταχύτητα με την οποία διαδίδονται τα ελαστικά κύματα μέσα στα στερεά σώματα εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Θα πρέπει, λοιπόν, να ληφθούν υπόψη αρκετές παράμετροι, οι οποίες θα συσχετιστούν με τις ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων. Τέτοιες παράμετροι είναι η λιθολογία που συναντάται ανάλογα με την περίπτωση και κάποιες ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών όπως η πυκνότητα, το πορώδες, ο βαθμός και ο τρόπος ρηγμάτωσης, η ηλικία του γεωλογικού σχηματισμού και το βάθος του, καθώς και το είδος του ρευστού των πόρων.

Πιο ειδικά, τα ιζηματογενή πετρώματα (όπως ψαμμίτες, σχιστόλιθοι) είναι κοκκώδη υλικά και η πυκνότητά τους εξαρτάται από το πορώδες τους. Επίσης, σε αυτή την κατηγορία πετρωμάτων η ταχύτητα των επιμηκών κυμάτων εξαρτάται από την ηλικία T και το βάθος ταφής z .

Τα πετρώματα χαμηλού πορώδους (όπως εβαπορίτες, πυριγενή και μεταμορφωμένα) έχουν ταχύτητες που εξαρτώνται κυρίως από τη σύσταση του πετρώματος και ο υπολογισμός τους γίνεται με βάση τις ταχύτητες διάδοσης αυτών στα κύρια ορυκτά των πετρωμάτων.

Σημαντική παράμετρος είναι και το βάθος ταφής. Σε χαμηλού πορώδους πετρώματα οι μικρορωγμές ελαττώνουν την τιμή της ταχύτητας σε βάθη μικρότερα από 3 χιλιόμετρα (Griffiths and King, 1981). Αν θεωρήσουμε a την αρχική ταχύτητα του κύματος και b την ταχύτητα για παρουσία μικρορωγμών, έχουμε ότι:

$$a = \sqrt{3} * b \quad (3.7.1)$$

Στα πετρώματα που εμφανίζουν υψηλό πορώδες, η ταχύτητα εξαρτάται από το είδος του ρευστού που υπάρχει στους πόρους.

Στην περίπτωση που πυκνότητα και μέσο ατομικό βάρος είναι δεδομένα, τότε η ταχύτητα μπορεί να προσδιοριστεί χωρίς να γίνει λεπτομερής ανάλυση της ορυκτολογίας του πετρώματος.

3.8 ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ

Σε μια ιζηματογενή λεκάνη, η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων, κατά τη διάδοσή των σε οριζόντια διεύθυνση, παραμένει σχετικά σταθερή, αφού υφίσταται μικρές έως και μηδενικές μεταβολές. Αντίθετα, όταν τα σεισμικά κύματα διαδίδονται σε κατακόρυφη διεύθυνση η μεταβολή της ταχύτητάς τους είναι σαφώς μεγαλύτερη. Το συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι η σεισμική ταχύτητα υπολογίζεται συναρτήσει του βάθους. Το παραπάνω συμπέρασμα ισχύει σε περίπτωση που έχουμε κατακόρυφη διεύθυνση, αλλά μπορεί να ισχύει και σε περίπτωση οριζόντιας διεύθυνσης, όταν για παράδειγμα έχουμε κεκλιμένα στρώματα με μικρή κλίση. Όταν φτάσουμε στο σημείο η ταχύτητα να εξαρτάται μόνο από το βάθος, τότε για τον υπολογισμό της γίνεται αναγκαία η μελέτη των ανακλώμενων κυμάτων, τα οποία διαδίδονται σε, σχεδόν, κατακόρυφες διευθύνσεις. Την ίδια μεθοδολογία θα εφαρμόσουμε και σε περίπτωση που η κλίση των διαχωριστικών επιφανειών θα είναι μικρότερη των 3 μοιρών.

Στην περίπτωση που έχουμε πολυστρωματικό μοντέλο n οριζόντιων στρωμάτων και ακτίνα με κατακόρυφη διεύθυνση διάδοσης (3.8.1) και εφόσον τ_j ο απαραίτητος χρόνος που χρειάζεται η ακτίνα να διασχίσει το στρώμα j , ισχύει το εξής:

$$\tau_j = \frac{d_j}{\alpha_j} \quad (3.8.1)$$

- d_j : πάχος
- α_j : η ταχύτητα διάδοσης του σεισμικού κύματος στο στρώμα j

Στην περίπτωση που η ακτίνα προσπίπτει κάθετα στη νιοστή (n) διαχωριστική επιφάνεια, η μέση ταχύτητα της ακτίνας αυτής ορίζεται από την παρακάτω σχέση (3.8.2):

$$\overline{\alpha_n} = \frac{\sum_{j=1}^n d_j}{\sum_{j=1}^n \tau_j} = \frac{\sum_{j=1}^n \alpha_j \tau_j}{\sum_{j=1}^n \tau_j} \quad (3.8.2)$$

- τ_j : χρόνοι διαδρομής στο αντίστοιχο στρώμα

Διπλός χρόνος διαδρομής $T_n(x)$, ονομάζεται ο χρόνος που χρειάζεται ένα σεισμικό κύμα να διανύσει τη διαδρομή από την πηγή έως την ανακλαστική επιφάνεια και από την επιφάνεια αυτή έως το υδροφώνο. Ο χρόνος αυτός στην περίπτωση που έχουμε κατακόρυφη ακτίνα, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$T_n(0) = \frac{2h_n}{\alpha_n} = 2 \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{a_j} \quad (3.8.3)$$

- h_n : βάθος μέχρι τη διαχωριστική επιφάνεια

Ο χρόνος που αντιστοιχεί σε οριζόντια απόσταση πηγής – υδροφώνου, υπολογίζεται ως εξής:

$$T_n^2(x) = T_n(0)^2 + \frac{x^2}{(V_n)^2} \quad (3.8.4)$$

- V_n : μέση τετραγωνική ταχύτητα

3.9 ΜΕΣΗ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ

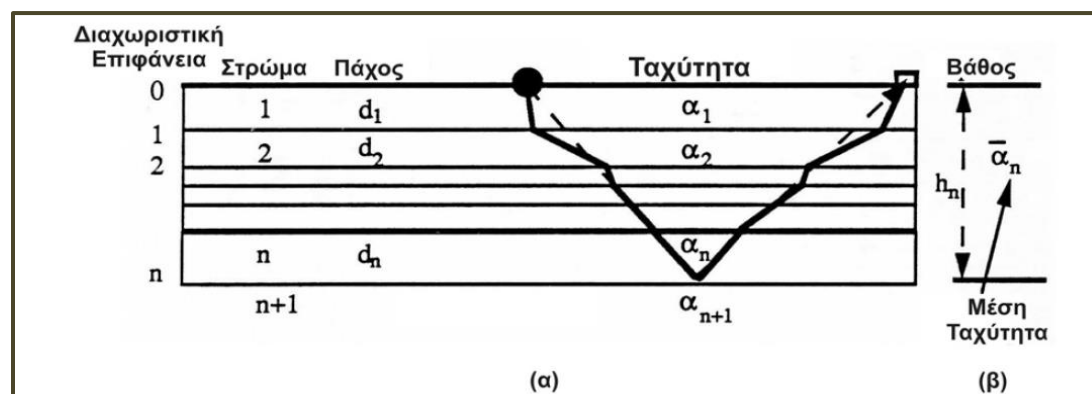
Η διαδικασία ανάλυσης της ταχύτητας έχει ως στόχο τον καθορισμό της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας (V_{rms}). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται στις διατάξεις κοινού ενδιάμεσου σημείου. Με το πέρας αυτής της διαδικασίας, παρέχονται τα πρώτα στοιχεία για την περιοχή μελέτης. Η ύπαρξη αλλαγών στην τιμή της ταχύτητας μπορεί να οφείλεται σε στρωματογραφικές ή/και λιθολογικές μεταβολές (Εικόνα 3.9.1).

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_j . Η ποσότητα, V_n , ονομάζεται μέση τετραγωνική ταχύτητα (Βαφείδης, 2011).

$$V_n = \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_j^2 t_j}{\sum_{j=1}^n t_j} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.9.1)$$

όπου,

$$t_j = 2 \frac{d_j}{a_j}$$



Εικόνα 3.9.1: α) Μοντέλο πολλών οριζόντιων γεωλογικών στρωμάτων και β) ισοδύναμο μοντέλο ομογενούς στρώματος, του οποίου η ταχύτητα είναι ίση με τη μέση ταχύτητα ή τη μέση τετραγωνική ταχύτητα (Βαφείδης, 2011).

3.10 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Στόχος της ανάλυσης της ταχύτητας ήταν ο προσδιορισμός της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας, η οποία υπολογίστηκε από το γεωλογικό μοντέλο – μοντέλο τμηματικών ταχυτήτων. Στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του τμήματος και μέσω του λογισμικού περιβάλλοντος της Matlab δημιουργήθηκε αρχείο ταχυτήτων "Vrms_correct_0_8345". Το αρχείο αυτό αφορά την οριζόντια έκταση από 0 έως 8345 μέτρα. Από το εν λόγω αρχείο προέκυψε η μέση τετραγωνική ταχύτητα. Με την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας προέκυψαν στοιχεία που αφορούσαν την δομή του υπεδάφους.

3.11 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ (Normal Moveout Correction - NMO)

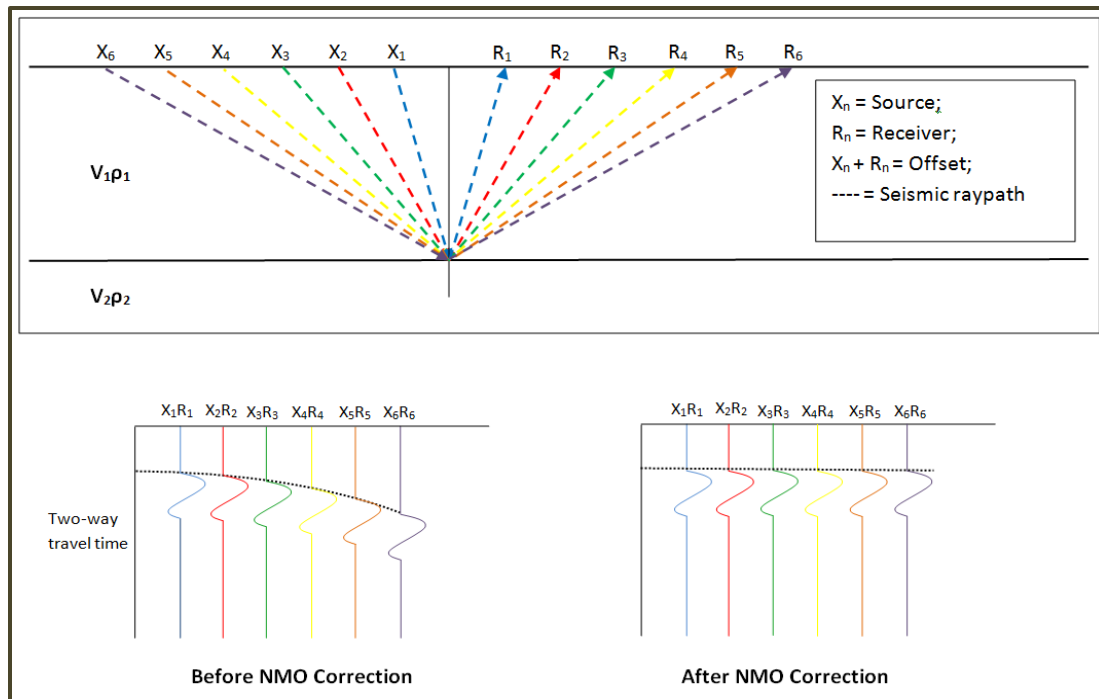
Πριν την άθροιση των σειсмоγραμμάτων της διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου, είναι πολύ σημαντικό να εφαρμοστεί η μέθοδος της δυναμικής διόρθωσης (NMO). Η κανονική χρονική απόκλιση (NMO_correction) υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (Βαφείδης, 2011):

$$\Delta t_{\text{NMO}} = T(x) - T(0) = T(0) \left[\left(1 + \frac{x^2}{V_{\text{NMO}}^2 T(0)^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (3.11.1)$$

- **T(x)**: διπλός χρόνος διαδρομής
- **T(0)**: διπλός χρόνος διαδρομής κατακόρυφης ακτίνας
- **x**: απόσταση του δέκτη από την πηγή
- **V_{NMO}**: μέση τετραγωνική ταχύτητα για ανάκλαση από οριζόντια διαχωριστική επιφάνεια

Κατά τη διαδικασία της δυναμικής διόρθωσης αφαιρείται ο χρόνος που είναι ίσος με την χρονική απόκλιση, από το χρόνο διαδρομής του ανακλώμενου κύματος το οποίο εμφανίζεται σε σεισμόγραμμα διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου (Βαφείδης, 2011). Οι χρόνοι διαδρομής των ανακλώμενων κυμάτων είναι δυνατό να αναχθούν σε αντίστοιχους χρόνους κυμάτων που διαδίδονται στην κατακόρυφη διεύθυνση, μέσω της διαδικασίας της δυναμικής διόρθωσης. Μετά από αυτή τη διόρθωση, η πηγή και ο δέκτης θεωρείται ότι βρίσκονται στην ίδια θέση, την θέση του κοινού ενδιαμέσου σημείου.

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση (3.11), παρατηρούμε ότι η κανονική χρονική απόκλιση αυξάνεται, καθώς αυξάνεται και η απόσταση μεταξύ πηγής και γεωφώνου. Η απόκλιση αυτή μειώνεται, σε περίπτωση που μειωθεί ο διπλός χρόνος διαδρομής της κατακόρυφης ακτίνας (T(0)) ή αυξηθεί η ταχύτητα V_{NMO}. Η συγκεκριμένη παράμετρος χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, διότι ανάλογα με την ταχύτητα που θα επιλεγεί θα γίνει και η αντίστοιχη διόρθωση (Εικόνα 3.11).



Εικόνα 3.11: (πάνω) Διάταξη κοινού ενδιαμέσου σημείου και (κάτω) καταγραφές πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τη δυναμική διόρθωση.

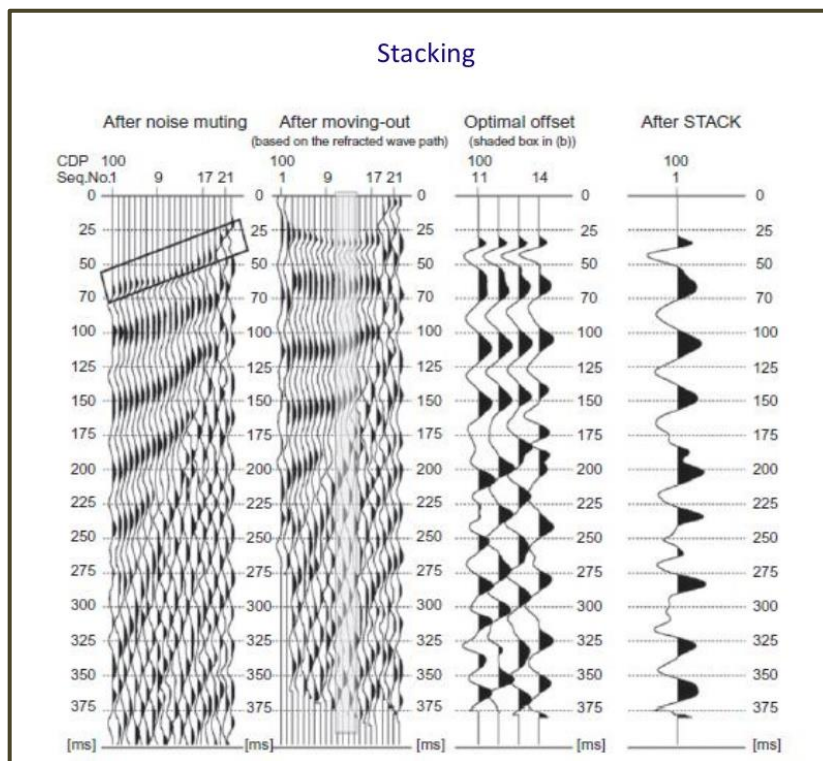
Κατά τη διόρθωση της κανονικής χρονικής απόκλισης (NMO) προκαλείται και μία μη επιθυμητή επιμήκυνση του σεισμικού ίχνους (stretch), με τρόπο, ο οποίος εξαρτάται από τον χρόνο (Yilmaz, 1987). Για μεγάλες αποστάσεις πηγής - γεωφώνου (offsets) και μικρούς κατακόρυφους χρόνους, αυτή η μη επιθυμητή επιμήκυνση αυξάνεται. Για την αποφυγή του συγκεκριμένου προβλήματος στο στάδιο ακριβώς πριν την εφαρμογή της σεισμικής υπέρθεσης, απομακρύνεται η συγκεκριμένη ζώνη που είναι επηρεασμένη από την ανεπιθύμητη επιμήκυνση.

3.12 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΥΠΕΡΘΕΣΗ (Stacking)

Η σεισμική υπέρθεση (Stacking) αποτελεί το επόμενο βήμα έπειτα από τη δυναμική διόρθωση. Απαιτεί τη λεπτομερή γνώση της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στα υπό μελέτη γεωλογικά στρώματα.

Κατά τη διαδικασία αυτή, αθροίζονται όλα τα σειсмоγράμματα της διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου που έχουν διορθωθεί για την κανονική χρονική απόκλιση (NMO) (Εικόνα 3.12). Έτσι, ενισχύονται τα πλάτη των ανακλώμενων κυμάτων κατά την υπεδαφική κάλυψη (fold). Επίσης κατά fold έχει μειωθεί και ο όγκος των καταγραφών, κυρίως σε θαλάσσιες διασκοπήσεις όπου ο όγκος των δεδομένων είναι μεγάλος. Ταυτόχρονα, αυξάνεται το σήμα σε σχέση με τον τυχαίο θόρυβο, ενώ παρατηρείται βελτίωση του αρχικού σήματος παρά τις πολλαπλές ανακλάσεις, οι οποίες τείνουν να εξασθενούν το σήμα.

Εκτός όλων αυτών, η διαδικασία αυτή είναι σημαντική, διότι δίνει τη δυνατότητα απεικόνισης της δομής του υπεδάφους.

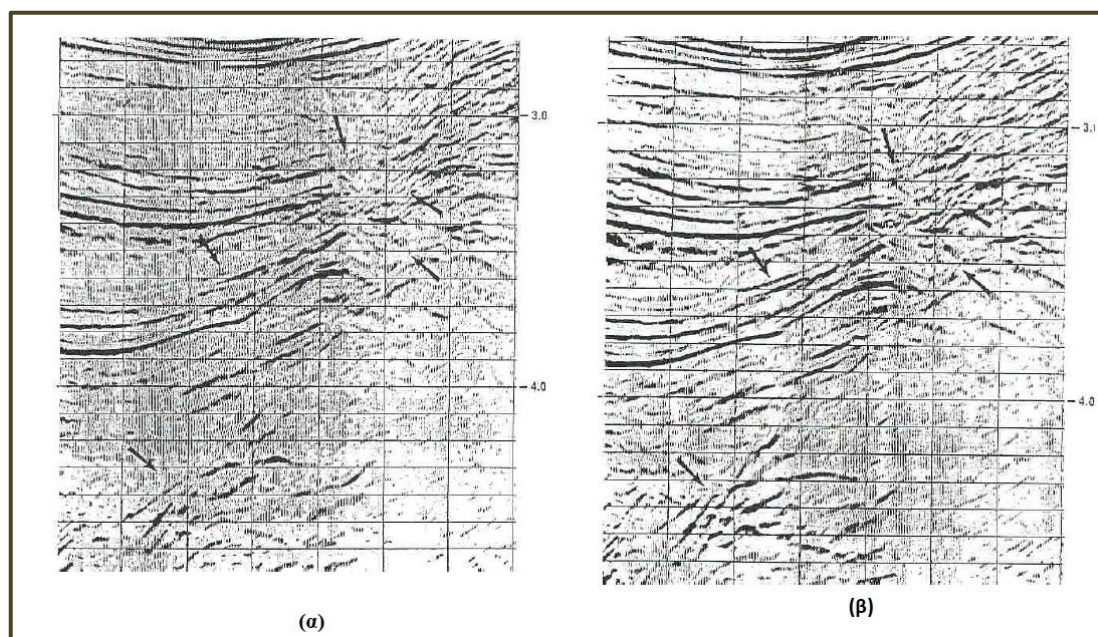


Εικόνα 3.12: Διάταξη πριν και μετά τη σεισμική υπέρθεση, <https://www.slideshare.net/alymohamed9693001/simple-seismic-processing-workflow>

3.13 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ (Migration)

Κατά την επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων, γίνονται υποθέσεις για ύπαρξη απλούστερων γεωλογικών δομών, δηλαδή για ύπαρξη ενός υπεδάφους με οριζόντια στρώματα, του οποίου οι φυσικές ιδιότητες εξαρτώνται μόνο από το βάθος και μεταβάλλονται σε σχέση με αυτό. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις, τέτοιες υποθέσεις δεν είναι ρεαλιστικές. Για αυτό τον λόγο, πραγματοποιείται η σεισμική χωροθέτηση (migration) (Εικόνα 3.13.1).

Σε μια τομή υπέρθεσης, η σεισμική χωροθέτηση ανακατασκευάζει και τοποθετεί στη σωστή θέση τις σεισμικές ανακλάσεις, στην περίπτωση που οι ανακλαστήρες δεν είναι οριζόντιοι αλλά εμφανίζουν ορισμένη κλίση ή ρήγματα. 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).

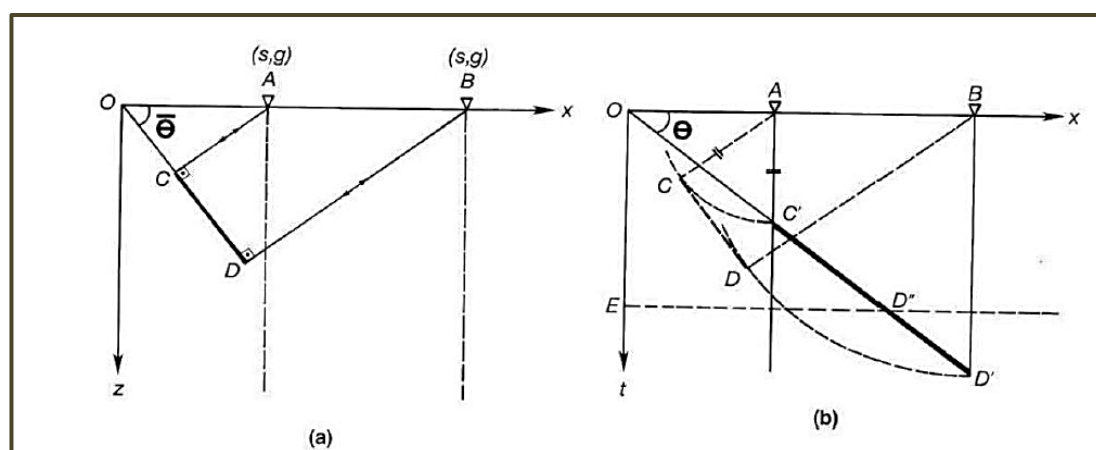


Εικόνα 3.13.1: Εφαρμογή χωροθέτησης στην ίδια περιοχή α) μετά την υπέρθεση, β) πριν την υπέρθεση όπου παρατηρείται βελτίωση των αποτελεσμάτων («Μεγάλης κλίμακας γεωφυσικές διασκοπήσεις στην ευρύτερη περιοχή του Ερεθυμίου Απόλλωνος στο χωριό Θεολόγος Ρόδου» Γεωργιλιά, 1998).

Η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα από τα πιο βασικά στάδια της επεξεργασίας των σεισμικών δεδομένων. Παρά το γεγονός ότι είναι μια χρονοβόρα διαδικασία, είναι εξαιρετικά σημαντική. Οι λόγοι που την καθιστούν τόσο σημαντική μέθοδο είναι:

- Βελτιώνει την χωρική διακριτική ικανότητα, τοποθετώντας τις ανακλάσεις στη σωστή θέση (στο σωστό βάθος).
- Βελτιώνει την σεισμική τομή, στην περίπτωση ύπαρξης ρηγμάτων στην περιοχή μελέτης.
- Διορθώνει, στη σεισμική τομή, τις κλίσεις των κεκλιμένων ανακλαστικών επιφανειών. Αυτό το επιτυγχάνει μετακινώντας τις ανακλάσεις σε ρηχότερες θέσεις.
- Καθιστά την σεισμική τομή συγκρίσιμη με την αντίστοιχη γεωλογική τομή που θέλουμε να ερμηνεύσουμε, καθώς επανατοποθετεί όλες τις αφίξεις που προέρχονται από περίθλαση στην θέση που βρίσκεται η δομή που προκάλεσε την περίθλαση.

Το στάδιο αυτό, έπεται της δυναμικής διόρθωσης (NMO), αλλά και της σεισμικής υπέρθεσης. Υπάρχει βέβαια και το ενδεχόμενο η συγκεκριμένη μέθοδος να εφαρμοστεί πριν τη σεισμική υπέρθεση (pre-stack migration).



Εικόνα 3.13.2: α) θέση του ανακλαστήρα CD στο γεωλογικό μοντέλο βάθους και β) ο ανακλαστήρας C'D' που αντιστοιχεί στη τομή υπέρθεσης, θα μετακινηθεί στην θέση CD στην τομή χωροθέτησης (Yilmaz, 1987).

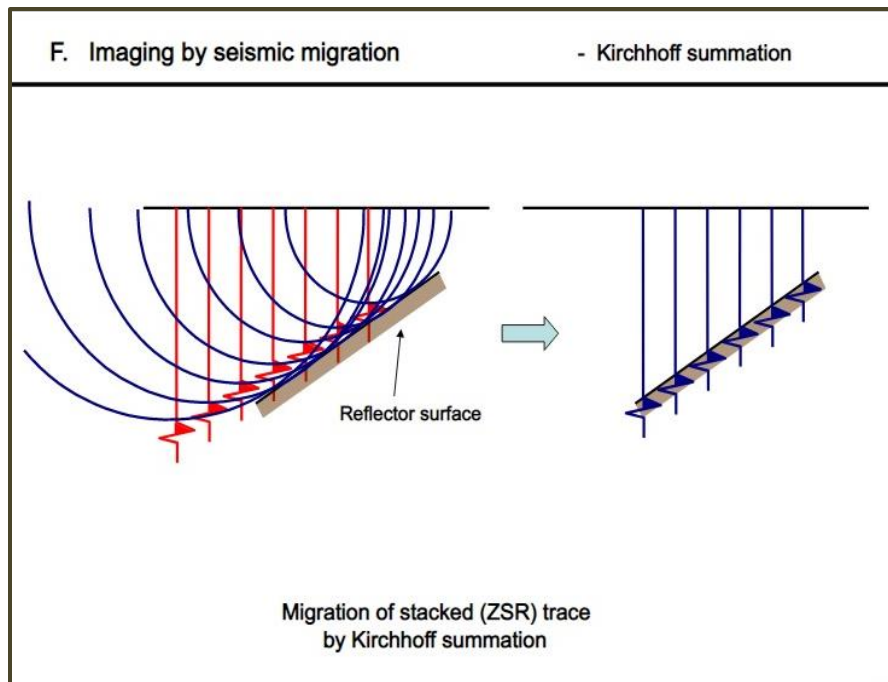
Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι σεισμικής χωροθέτησης, βάση του είδους της σεισμικής τομής που θα χωροθετηθεί. Έχουμε λοιπόν τις ακόλουθες κατηγορίες:

- I. **Σεισμική χωροθέτηση βάθους.** Η συγκεκριμένη αποτελεί την πλέον ιδανική μέθοδο. Παρά το γεγονός ότι είναι χρονοβόρα διαδικασία, είναι πολύ σημαντική καθώς συμπεριλαμβάνει όλες τις πλευρικές μεταβολές που υφίσταται η ταχύτητα. Όπως προκύπτει και από την ονομασία της, ο κατακόρυφος άξονας της σεισμικής τομής που προκύπτει από αυτή τη μέθοδο αντιστοιχεί σε βάθος και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που οι πλευρικές μεταβολές της ταχύτητας είναι αρκετά έντονες και οφείλονται σε ανακλαστές που παρουσιάζουν μεγάλη κλίση.
- II. **Χρονική σεισμική χωροθέτηση.** Ο κατακόρυφος άξονας της σεισμικής τομής που προκύπτει από αυτή τη μέθοδο αντιστοιχεί σε χρόνο. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των στρωμάτων και στο συγκεκριμένο θέμα προτιμάται από άλλες μεθόδους. Χρησιμοποιείται, επίσης, όταν δεν έχουμε έντονες πλευρικές μεταβολές στην ταχύτητα.

Οι μέθοδοι της χωροθέτησης, που συνήθως χρησιμοποιούνται, είναι η σεισμική χωροθέτηση Kirchhoff, η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (**Finite Difference**) και η μέθοδος σεισμικής χωροθέτησης στο χώρο συχνοτήτων (Phase Shift). Αναλυτικότερα:

I. Σεισμική χωροθέτηση κατά Kirchhoff

Η μέθοδος του Kirchhoff στηρίζεται στην αρχή του Huygens. Το κύμα δεν διαδίδεται προς την πηγή επειδή τα μέρη των δευτερευόντων μετώπων κύματος που διαδίδονται προς την πηγή αλληλοαναιρούνται (Βαφείδης, 2011). Η μέθοδος αυτή θεωρεί την κορυφή της καμπύλης περίθλασης ως θέση του ανακλαστήρα. Κατά μήκος αυτής της περίθλασης πραγματοποιείται άθροιση των πλατών λαμβάνοντας υπόψη κάποιες διορθώσεις. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται διορθώσεις οι οποίες αφορούν τον συντελεστή κατεύθυνσης στα πλάτη αλλά και τον συντελεστή κυματομορφής, ενώ η τρίτη διόρθωση αφορά τη γεωμετρική διασπορά (Εικόνα 3.13.3).



Εικόνα 3.13.3: <https://slideplayer.com/slide/8567850/>

II. Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference)

Οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών αποτελούν μια μεγάλη κατηγορία μεθόδων σεισμικής χωροθέτησης, που απαιτούν υψηλούς ρυθμούς δειγματοληψίας ενώ παράλληλα, λόγω του όγκου δεδομένων που παρέχουν, δημιουργείται η ανάγκη για επαρκή μνήμη, ικανή να αποθηκεύσει μεγάλο αριθμό στοιχείων.

Κατά τη μέθοδο αυτή υπολογίζεται το προς τα κάτω διαδιδόμενο κυματικό πεδίο και βασίζεται στην επίλυση της εξής κυματικής εξίσωσης (3.13.1):

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (3.13.1)$$

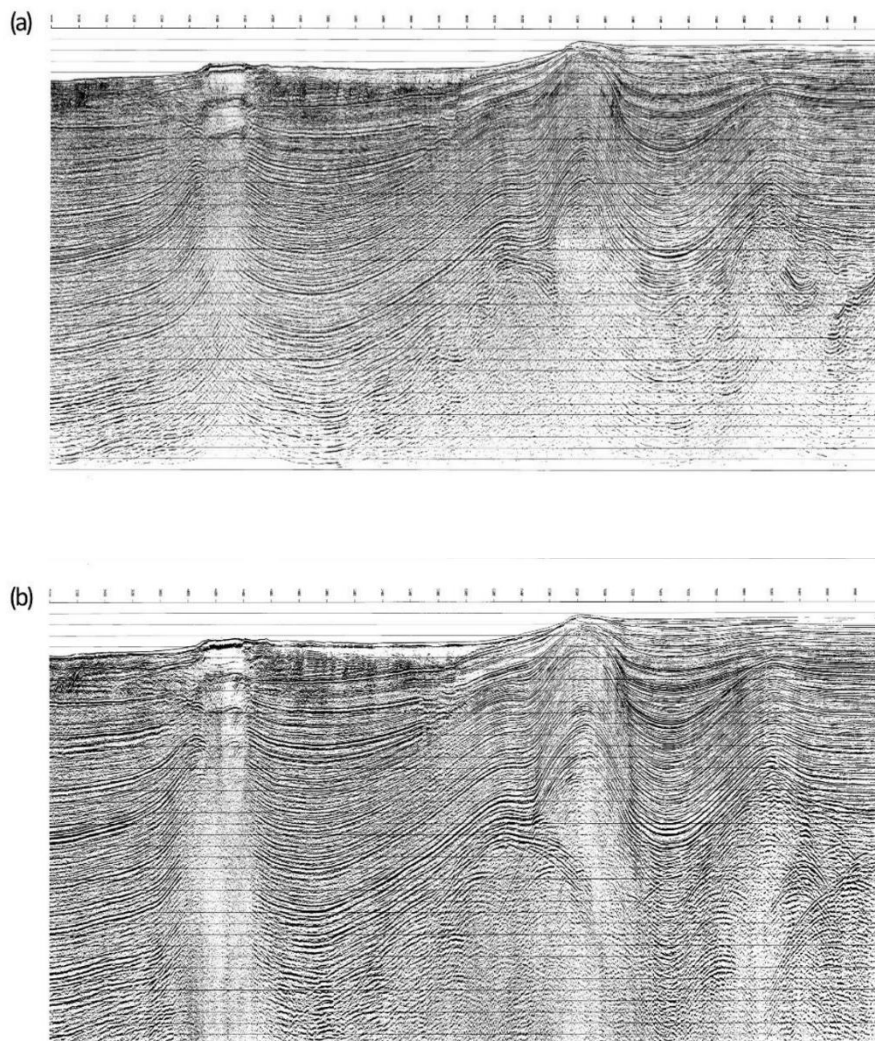
Όπου:

$$\nabla^2 = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2}$$

με $\Phi(x,y,z,t)$ το κυματικό πεδίο.

III. Σεισμική μέθοδος με τη μέθοδο στο χώρο συχνότητας-κυματοαριθμού (Phase Shift)

Στη συγκεκριμένη μέθοδο θεωρείται ότι πραγματοποιείται αλλαγή φάσης του κυματικού πεδίου προς τα κάτω σε συνάρτηση με το βάθος. Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται οι τμηματικές ταχύτητες (Εικόνα 3.13.4).



Εικόνα 3.13.4: Εφαρμογή σεισμικής χωροθέτησης (a) πριν την υπέρθεση και (b) μετά την υπέρθεση, όπου παρατηρείται βελτίωση των αποτελεσμάτων, δηλαδή η τομή (b) είναι απαλλαγμένη από τις περιθλάσεις και οι ανακλαστήρες είναι επανατοποθετημένοι στις σωστές τους θέσεις (Yilmaz, 1987).

4. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για τη δημιουργία του γεωλογικού μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα σεισμικής ανάκλασης νότια της Κρήτης. Τα εν λόγω δεδομένα αντιστοιχούν στα δεδομένα της διπλωματικής εργασίας της Βασιλικής-Λουίζας Χρηστίδη. Από τον γεωλογικό χάρτη της Μεσσαράς αλλά και από σεισμικά δεδομένα της περιοχής αντλήσαμε πληροφορίες τόσο για το πάχος των στρωμάτων όσο και για τις ταχύτητές τους. Με βάση το μοντέλο αυτό, δημιουργήθηκαν συνθετικά δεδομένα σεισμικής ανάκλασης με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών και κατάλληλων αλγόριθμων που έχουν αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής στο λογισμικό περιβάλλον της Matlab.

Πριν όμως από την εισαγωγή των δεδομένων, βασικό θέμα αποτέλεσε η αποφυγή δύο πολύ βασικών προβλημάτων που εμφανίζονται κατά την επίλυση της διαφορικής κυματικής εξίσωσης με τη χρήση πεπερασμένων διαφορών. Αυτά τα δύο προβλήματα είναι η ευστάθεια (4.1) και η αριθμητική διασπορά (4.2).

Πιο συγκεκριμένα:

- Το κριτήριο για την διατήρηση της αριθμητικής ευστάθειας στο αριθμητικό σχήμα των πεπερασμένων διαφορών είναι:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} * \alpha_{\max} \leq \frac{2}{3} \quad (4.1)$$

Όπου:

- α_{\max} = η μέγιστη ταχύτητα των Ρ-κυμάτων
- Δ_t = το βήμα χρονικής διακριτοποίησης
- Δ_x = το βήμα χωρικής διακριτοποίησης

- Στην αριθμητική διασπορά έχουμε τη μεταβολή ταχύτητας διάδοσης σε σχέση με τη συχνότητα. Έτσι το κριτήριο είναι το εξής:

$$\frac{\lambda_{\min}}{\Delta_x} > 6 \quad (4.2)$$

Έχουμε ακόμη ότι:

$$\lambda_{min} = \frac{a_{min}}{f_{max}}$$

Όπου:

- a_{min} = η ελάχιστη ταχύτητα των S-κυμάτων
- f_{max} = η μέγιστη συχνότητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων

Αφού, λοιπόν, εφαρμόσαμε τους παραπάνω περιορισμούς για την αποφυγή των προβλημάτων, η πρώτη εντολή που δόθηκε για τη λειτουργία του αλγόριθμου αλλά και την δημιουργία του μοντέλου ήταν:

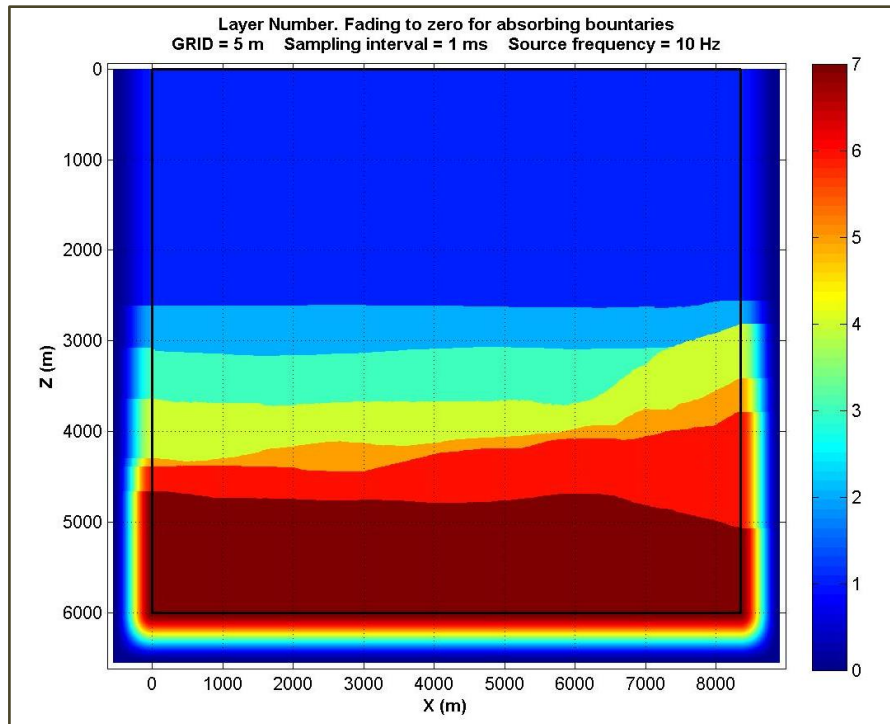
```
>>PSV_SYNTHETICS_VER11;
```

Αρχικά, ορίστηκαν οι αρχικές παράμετροι για τη δημιουργία των δεδομένων. Τα δεδομένα εισαγωγής είναι η οριζόντια έκταση (horizontal_extend) και το βάθος (vertical_extend) σε μέτρα, η ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης (minimum_S-wave velocity) σε m/s , η κύρια συχνότητα της πηγής (dominant_frequency) σε Hz, καθώς και η ισαπόσταση των υδροφώνων (receivers_pacing) σε m. Στον Πίνακα 4.1 παρατίθενται οι αρχικές παράμετροι που ορίστηκαν για την προσομοίωση.

Πίνακας 4.1: Εισαγωγή των αρχικών παραμέτρων στο πρόγραμμα.

Enter the HORIZONTAL extend of model in meters	8345
Enter the VERTICAL extend of model in meters	6000
Enter the minimum S-wave velocity (Vs) of model in m/s. Sea water is excluded	100
Enter the dominant frequency of the source in Hz	10
Enter receiver spacing in meters	5
The upper surface (Z=0) of model is FREE or ABSORBING boundary?	FREE
SEA or LAND Survey?	SEA

Στην συνέχεια εισάγονται τα σεισμικά στρώματα (Εικόνα 4.1), με την χρήση των πινάκων Matlab που δίνουν τις συντεταγμένες για τα όρια του κάθε στρώματος.



Εικόνα 4.1: Μοντέλο σεισμικών στρωμάτων

Έπειτα, εισήχθησαν τα σεισμικά στρώματα με τα όριά τους καθώς και οι ταχύτητες V_p, V_s των διαμηκών και εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων αντίστοιχα και η πυκνότητα των σχηματισμών (Πίνακας 4.2).

Πίνακας 4.2: Εισαγωγή των παραμέτρων ταχύτητας (P και S κυμάτων) και της πυκνότητας (ρ) για το στρώμα της θάλασσας.

Enter the P-wave velocity (V_p) in m/s	1500
Enter the S-wave velocity (V_s) in m/s	0.01
Enter the density (ρ) in gr/cc	1.023

Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι παράμετροι V_p, V_s και ρ που εισήχθησαν στο PSV_SYNTHETICS, ξεχωριστά για κάθε στρώμα. Τα εγκάρσια κύματα δε διαδίδονται στα ρευστά επομένως η ταχύτητά τους στο νερό θα ήταν 0. Στην προκειμένη περίπτωση τέθηκε ίση με 0,01 m/s για λόγους ευστάθειας των υπολογισμών.

Πίνακας 4.3: Τιμές ταχυτήτων και πυκνότητας για κάθε σεισμικό στρώμα

<u>A/A</u>	<u>Vp (m/s)</u>	<u>Vs (m/s)</u>	<u>r (gr/cc)</u>
1° στρώμα (νερό)	1500	0,01	1.023
2° στρώμα (τεταρτογενές)	1800	900	1.8
3° στρώμα (πλειόκαινο)	2200	1100	1.9
4° στρώμα (μειόκαινο)	2500	1250	2
5° στρώμα	3000	1500	2.2
6° στρώμα (ανθρακικά Κρητιδικού)	3800	1900	2.4
7° στρώμα (ανθρακικοί σχηματισμοί υποβάθρου)	5500	2750	2.65

Στη συνέχεια εισήχθησαν οι παράμετροι που σχετίζονται με τη γεωμετρία του πειράματος της σεισμικής ανάκλασης και αφορούν την πηγή. Οι παράμετροι αυτοί είναι: η διεύθυνση μετατόπισης της πηγής. Ορίστηκε μετατόπιση στην οριζόντια διεύθυνση. Ο αριθμός των πηγών καθώς και η ισαπόσταση τους, και οι συντεταγμένες της πρώτης πηγής (X,Z) (Πίνακας 4.4).

Πίνακας 4.4: Εισαγωγή των παραμέτρων της πηγής.

Enter the No. of shots	4
Enter the shot increment	500
Enter the Z coordinate of source (m)	10
Enter the X coordinate of 1 st source	250

Πιο αναλυτικά, από το πείραμα της Βασιλικής-Λουίζας Χρηστίδη χρησιμοποιήθηκαν 4 αρχεία πηγών. Το κάθε αρχείο περιλάμβανε 4 πηγές ανά 500 μέτρα. Άρα το εύρος των πηγών ήταν από 500 έως 8000 μέτρα. Οι πηγές ήταν στις

θέσεις: 500, 2500, 4500 και 6500 μέτρα. Στις συγκεκριμένες πηγές προστέθηκαν και οι πηγές του εν λόγω πειράματος που ήταν 4, με κάθε αρχείο να περιλαμβάνει 4 πηγές ανά 500 μέτρα. Το εύρος ήταν από 250 έως 6250 μέτρα. Οι θέσεις των πηγών ήταν: 250, 2250, 4250 και 6250 μέτρα. Το σύνολο των πηγών που χρησιμοποιήθηκε τελικά ήταν 16.

Το επόμενο βήμα ήταν η εισαγωγή των παραμέτρων για τα υδρόφωνα, δηλαδή ο αριθμός των υδροφώνων, η ισαπόσταση τους, η θέση τους με συντεταγμένες (X,Z) και η απόσταση μετακίνησης/πηγή της συστοιχίας των δεκτών.

Πίνακας 4.5: Εισαγωγή των παραμέτρων για τα υδρόφωνα.

Enter the Number of receivers	1670
Enter the Z coordinate of receivers (m)	0
Enter the X coordinate of 1 st receiver	0
Enter the Receiver array increment in meters	0

Εφόσον, λοιπόν, εισήχθησαν όλες οι παράμετροι του πειράματός μας, δημιουργούνται στο περιβάλλον της Matlab ορισμένα αρχεία εξόδου («*.SMP», «*.SRC», «*.RCV», «V_x», «V_z»).

Αναλυτικότερα:

- Το αρχείο «***.SMP**».

Το συγκεκριμένο αρχείο περιλαμβάνει πληροφορίες που αφορούν τις παραμέτρους του σεισμικού μοντέλου που επεξεργαζόμαστε. Περιλαμβάνει, δηλαδή, το ελάχιστο βήμα χωρικής και χρονικής διακριτοποίησης, καθώς και την κυρίαρχη συχνότητα της πηγής. Ακόμη, περιέχει ταχύτητες διάδοσης των εγκάρσιων και διαμηκών κυμάτων, αλλά και πίνακα με τη μέση τετραγωνική ταχύτητα. Διαθέτει πίνακα που μας δείχνει εάν έχουν εφαρμοστεί τα όρια απορρόφησης στην άνω επιφάνεια του μοντέλου, και τέλος έναν πίνακα με τα όρια απορρόφησης για όλες τις πλευρές του μοντέλου.

- Το αρχείο «***.RCV**».

Το συγκεκριμένο αρχείο περιλαμβάνει πληροφορίες που αφορούν τις θέσεις των υδροφώνων. Πιο συγκεκριμένα, περιέχει στοιχεία για τις ακριβείς θέσεις των δεκτών (σε μέτρα αλλά και σε κόμβους) του μοντέλου, την ισαπόσταση μεταξύ των δεκτών, το συνολικό χρόνο καταγραφής και το ελάχιστο βήμα χρονικής διακριτοποίησης.

- Το αρχείο «***.SRC**».

Περιλαμβάνει πληροφορίες που αφορούν τις θέσεις της πηγής. Δηλαδή περιέχει στοιχεία για τον αριθμό και την ισαπόσταση των πηγών. Αρχεία που δείχνουν τις ακριβείς θέσεις των πηγών και την κυματομορφή τους. Τέλος, μας δείχνει και τη διάρκεια ταλάντωσης της πηγής.

- Τα αρχεία «***V.mat**».

Στα εν λόγω αρχεία έχουν αποθηκευτεί οι μεταβλητές κελιά (cell) « V_x », « V_z » και « V_{pr} » στην περίπτωση που έχουμε θαλάσσια δεδομένα. Όσο είναι το πλήθος των πηγών τόσες είναι και οι στήλες κελιά του πίνακα αυτού. Κάθε κελί (cell) περιλαμβάνει πίνακες με την κατακόρυφη (V_z) και την οριζόντια (V_x) συνιστώσα της ταχύτητας ταλάντωσης των σωματιδίων σε κάθε δέκτη, καθώς και της πίεσης (V_{pr}), όταν πρόκειται για θαλάσσια δεδομένα. Σε κάθε πίνακα, το πλήθος των στηλών και των γραμμών είναι ίσο με τους δέκτες και τα δείγματα στο χρόνο, αντίστοιχα.

5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

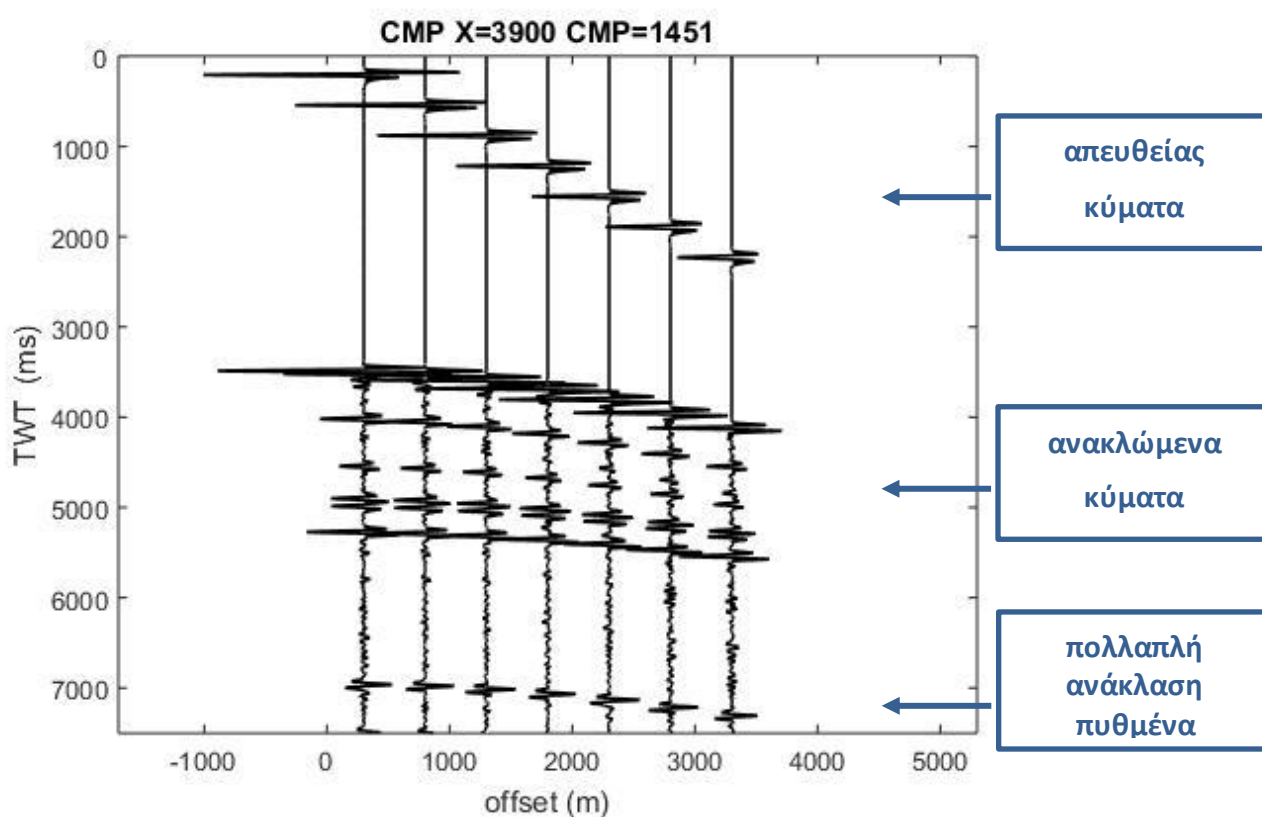
Στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab, χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους αλγόριθμους, πραγματοποιήθηκε, εκτός από την δημιουργία των συνθετικών δεδομένων, και η επεξεργασία τους. Ο στόχος της επεξεργασίας των δεδομένων ήταν η τελική τομή μας να είναι όσο το δυνατόν συγκρίσιμη με την αρχική γεωλογική τομή της περιοχής που μελετήσαμε.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε αναδιάταξη καταγραφών κοινής πηγής σε καταγραφές κοινού ενδιάμεσου σημείου (CMP Sorting), ενώ στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν τα τρία βασικά στάδια επεξεργασίας συνθετικών δεδομένων. Τα στάδια αυτά ήταν κατά σειρά τα παρακάτω:

1. Διόρθωση της κανονικής χρονικής απόκλισης (NMO – Normal MoveOut)
2. Σεισμική υπέρθεση (Stacking)
3. Σεισμική χωροθέτηση (Migration)

5.1 ΑΝΑΔΙΑΤΑΞΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΚΟΙΝΟΥ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ (CMP sorting)

Μετά την αρχική επεξεργασία του σήματος, τα δεδομένα μετατρέπονται από καταγραφές κοινής πηγής σε καταγραφές κοινού ενδιάμεσου σημείου. Αυτή η αναδιάταξη των αποκτηθέντων δεδομένων απαιτεί πληροφορίες από την γεωμετρία του πειράματος. Να σημειωθεί ότι ο όρος κοινού σημείου βάθους (common depth point – CDP) συχνά χρησιμοποιείται αντί του όρου κοινού ενδιάμεσου σημείου (common midpoint) (Yilmaz, 1987).

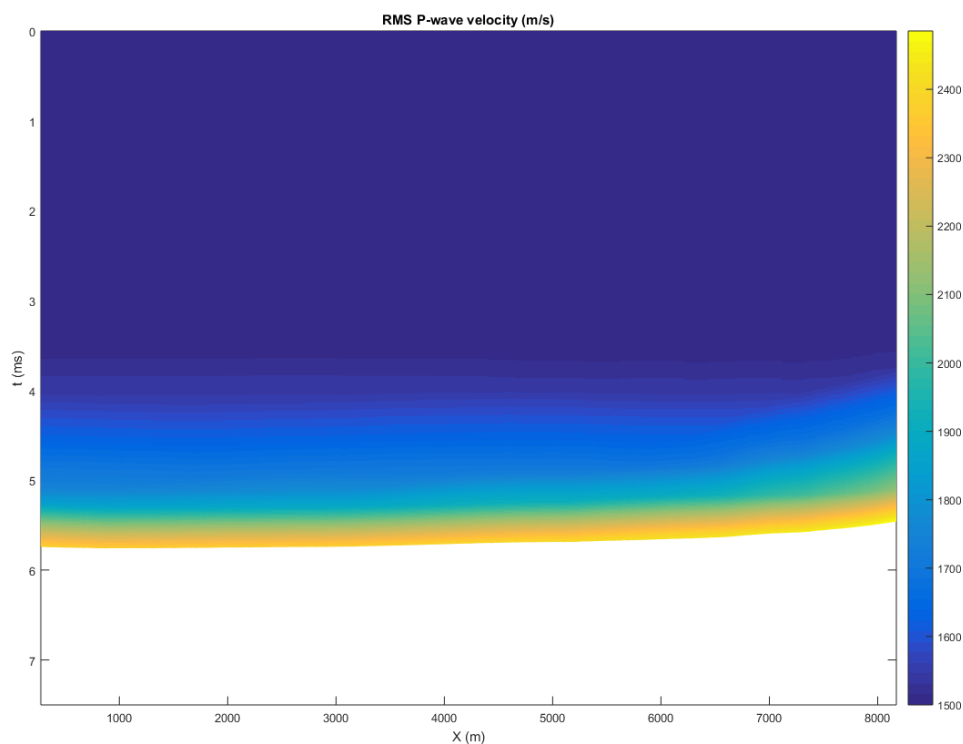


Εικόνα 5.1.1: Καταγραφές κοινού ενδιάμεσου σημείου πριν την εφαρμογή της δυναμικής διόρθωσης [όπου $x=3900$ m., $TWT=T(x)$, offset: η απόσταση πηγής – υδροφώνου (σε m)]

Στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 5.1.1) το CMP βρίσκεται στη θέση $x=3900$ m. Στο συγκεκριμένο μοντέλο εμφανίζονται 7 ίχνη, δεδομένου ότι και τα στρώματα αντίστοιχα είναι 7. Το σύνολο των ανακλαστήρων είναι 6. Όπως αναγράφεται στην

εικόνα, στο πάνω μέρος εμφανίζονται τα απευθείας κύματα, στο κέντρο της εικόνας τα ανακλώμενα κύματα και στο κάτω μέρος η πολλαπλή ανάκλαση του πυθμένα, όπου τα στρώματα έχουν ταχύτητα νερού.

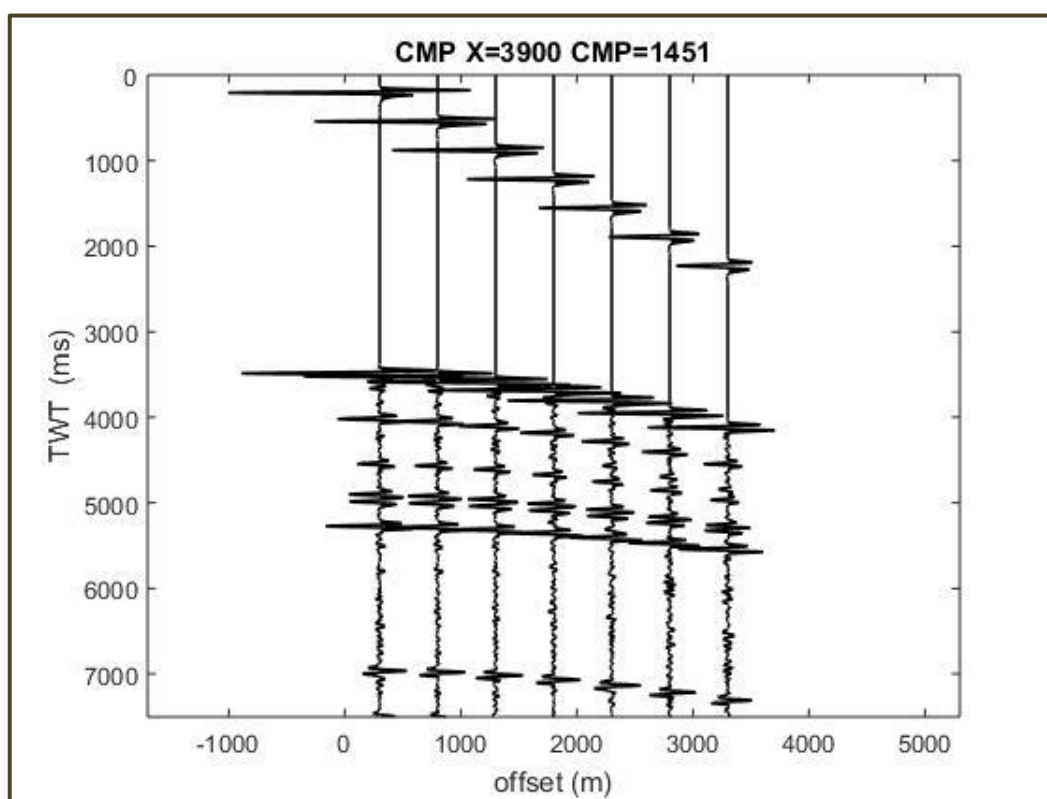
Η μετατροπή των δεδομένων κοινής πηγής σε δεδομένα κοινού ενδιαμέσου σημείου εκτελείται με την εντολή [CMPx, CMPz]=CMP_Synthetics_Ver11. Από τη συγκεκριμένη εντολή προκύπτουν δεδομένα CMPx, CMPz και ταυτόχρονα γίνεται ο υπολογισμός της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας V_{rms} , όπως φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 5.1.2).



Εικόνα 5.1.2: Μοντέλο μέσης τετραγωνικής ταχύτητας (σε m/s)

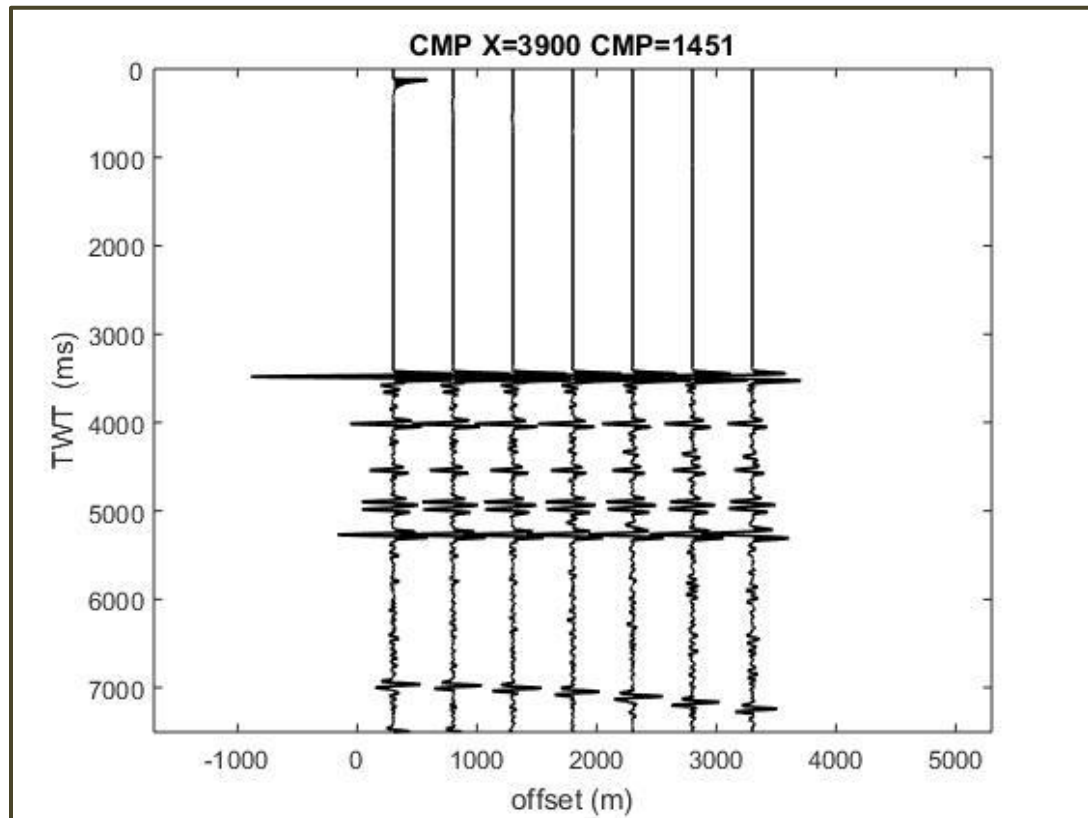
5.2 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ (NMO – Normal MoveOut)

Αποτελεί το πρώτο από τα τρία στάδια επεξεργασίας των συνθετικών δεδομένων. Η διαδικασία αυτή, λαμβάνει χώρα σε καταγραφές κοινού ενδιαμέσου σημείου. Παρακάτω, παρατίθενται οι εικόνες με την εφαρμογή της δυναμικής διόρθωσης NMO. Στην **πρώτη εικόνα (5.2.1)** παρατηρούνται ότι οι ανακλάσεις οριοθετούνται πάνω σε υπερβολικού τύπου καμπύλες (hyperbolas) στο διάγραμμα x-t, πράγμα που οφείλεται στην απόσταση πηγής και δεκτών. Στην επόμενη **εικόνα (5.2.2)** παρατηρείται ότι οι καμπύλες αυτές οριζοντιώθηκαν, πράγμα που δείχνει ότι εφαρμόστηκε η διόρθωση NMO. Δηλαδή, όλες οι ανακλάσεις που προέρχονται από το ίδιο ενδιαμέσο σημείο (CMP) ανάχθηκαν σε ανακλάσεις που θα είχαν αποκτηθεί αν οι πηγές και οι δέκτες βρίσκονταν στην ίδια θέση, δηλαδή τη θέση του CMP. Τέλος, παρατηρείται ένας ανακλαστήρας στα 7000 ms ο οποίος δεν έχει οριζοντιωθεί. Η μη οριζοντίωση οφείλεται σε πολλαπλή ανάκλαση του πυθμένα και επομένως η ταχύτητα που έχει χρησιμοποιηθεί για τη NMO διόρθωση δεν αντιστοιχεί στη σωστή ταχύτητα (≈ 1500 m/s, ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών κυμάτων στη θάλασσα).



Εικόνα 5.2.1: Καταγραφές κοινού ενδιαμέσου σημείου πριν την εφαρμογή της δυναμικής διόρθωσης [όπου $x=3900$ m, $TWT = T(x)$, offset: η απόσταση πηγής – υδροφώνου (σε m)].

Στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 5.2.1) το CMP βρίσκεται στα 3900 μέτρα, ενώ παρατηρούνται επτά στρώματα κατά συνέπεια υπάρχουν και επτά ίχνη. Οι ανακλαστήρες στην εν λόγω περίπτωση είναι έξι.



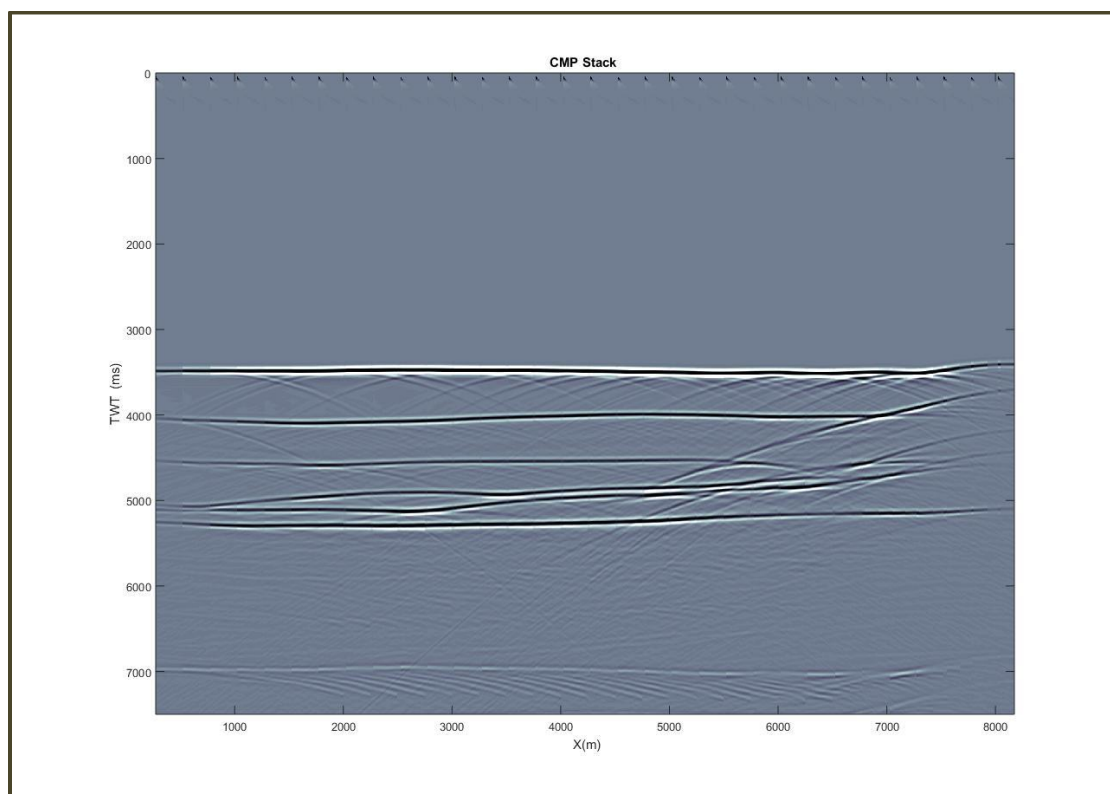
Εικόνα 5.2.2: Καταγραφές κοινού ενδιαμέσου σημείου μετά την εφαρμογή της δυναμικής διόρθωσης [όπου $x=3900$, $TWT = T(0)$ που είναι ο διπλός κατακόρυφος χρόνος]

5.3 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΥΠΕΡΘΕΣΗ (Stacking)

Στο συγκεκριμένο στάδιο, γίνεται η άθροιση όλων των σειсмоγραμμάτων κοινού ενδιάμεσου σημείου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός ίχνους για κάθε CMP.

Η σεισμική υπέρθεση αποτελεί μία πολύ σημαντική διαδικασία, διότι δίνει τη δυνατότητα της απεικόνισης όλων των ανακλαστήρων με μεγάλη λεπτομέρεια.

Στην παρακάτω **εικόνα (5.3)** έχουμε την τομή της σεισμικής υπέρθεσης. Για να αποφύγουμε ορισμένα ψευδοφαινόμενα, αποκλείστηκαν ίχνη πολύ κοντά ($> 50\text{m}$) αλλά και πολύ μακριά ($< 3500\text{m}$) από την πηγή. Ωστόσο, εξακολουθεί η ύπαρξη ορισμένων περιθλάσεων, όπως φαίνεται στην εικόνα. Οι περιθλάσεις αυτές αρχίζουν να εμφανίζονται περίπου στα 5.700 μέτρα έως και τα 7.200 μέτρα και σε χρόνους 4.500 ms και 4.000 ms αντίστοιχα. Οι περιθλάσεις αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι τα σεισμικά κύματα συναντούν εμπόδια και διαχέονται προς όλες τις κατευθύνσεις.



Εικόνα 5.3: Τομή σεισμικής υπέρθεσης.

5.4 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ (Migration)

Αποτελεί το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας των δεδομένων. Η σεισμική τομή που υφίσταται σεισμική χωροθέτηση εμφανίζει σαφή βελτίωση, ειδικά σε περιοχές που υπάρχουν ρήγματα, διότι απαλλάσσεται από τις περιθλάσεις, ενώ οι ανακλαστήρες επανατοποθετούνται σωστά.

Ανάλογα με τη μορφή της χωροθετημένης σεισμικής τομής που έχει δημιουργηθεί, διακρίνονται δύο είδη σεισμικών χωροθετήσεων. Το πρώτο είναι η χρονική σεισμική χωροθέτηση, ενώ το δεύτερο η σεισμική χωροθέτηση βάθους. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μόνο χρονική σεισμική χωροθέτηση.

Στη συγκεκριμένη φάση της επεξεργασίας, εφαρμόστηκαν τριών ειδών μέθοδοι χρονικής σεισμικής χωροθέτησης. Η σεισμική χωροθέτηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference), η σεισμική χωροθέτηση κατά Kirchhoff (Kirchhoff Migration) και η σεισμική χωροθέτηση με τη μέθοδο στο χώρο συχνότητας – κυματαριθμού (Phase Shift).

5.4.1 Σεισμική χωροθέτηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference)

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ήταν ο εξής:

$$[aryin,tmig,xmig]=fd15mig(aryin,aryvel,t,x,dtau);$$

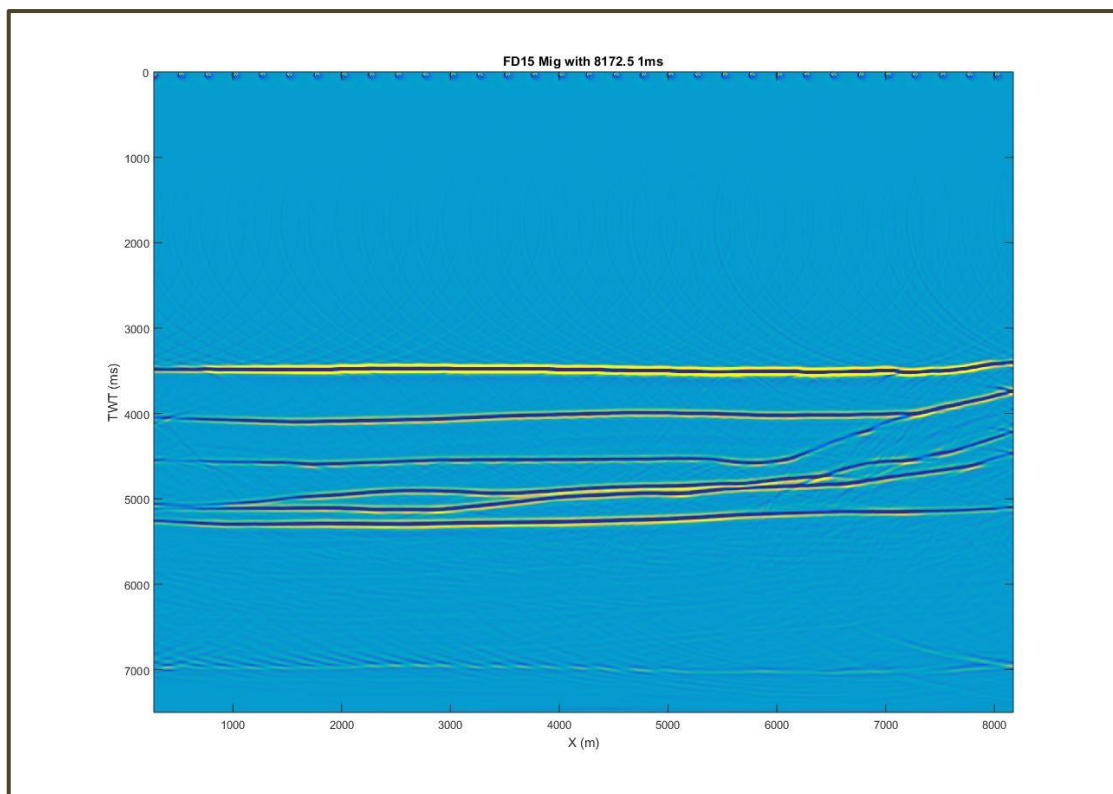
Στον συγκεκριμένο αλγόριθμο έχουμε δύο κατηγορίες δεδομένων. Είναι τα δεδομένα εισόδου και τα δεδομένα εξόδου.

Τα δεδομένα εισόδου είναι:

- *argin*: Πίνακας δεδομένων εισόδου. Ο συγκεκριμένος πίνακας προήλθε από τη σεισμική υπέρθεση.
- *argvel*: Πίνακας της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας (RMS) (Εικόνα 5.1.2). Θα πρέπει αυτοί οι δύο πίνακες (*argin*, *argvel*) να έχουν ίδιες διαστάσεις.
- *t*: Διάνυσμα χρόνου καταγραφής.
- *x*: Διάνυσμα αποστάσεων.
- *dtau*: Βήμα υπολογισμού του κυματικού πεδίου σε προγενέστερους χρόνους.

Αντίστοιχα, τα δεδομένα εξόδου είναι:

- *argmig*: Πίνακας σεισμικής χωροθέτησης με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών.
- *tmig*: *t* συντεταγμένες των αποτελεσμάτων της χωροθέτησης.
- *xmig*: *x* συντεταγμένες των αποτελεσμάτων της χωροθέτησης.



Εικόνα 5.4.1: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (finite difference)

Στην παραπάνω **εικόνα (5.4.1)**, απεικονίζεται η τομή σεισμικής χωροθέτησης με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Οι περιθλάσεις και τα ψευδοφαινόμενα φαίνονται να έχουν εξαλειφθεί σε σχέση με την προηγούμενη τομή υπέρθεσης, ενώ οι ανακλαστήρες είναι, πλέον, αρκετά διακριτοί και είναι έξι στο σύνολο.

5.4.2 Kirchhoff Migration

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε στη χωροθέτηση κατά Kirchhoff, ήταν ο παρακάτω:

```
[aryin,tmig,xmig]=kirk_mig2(aryin,aryvel,dt,dx,params);
```

Αναλυτικότερα, τα δεδομένα εισόδου ήταν:

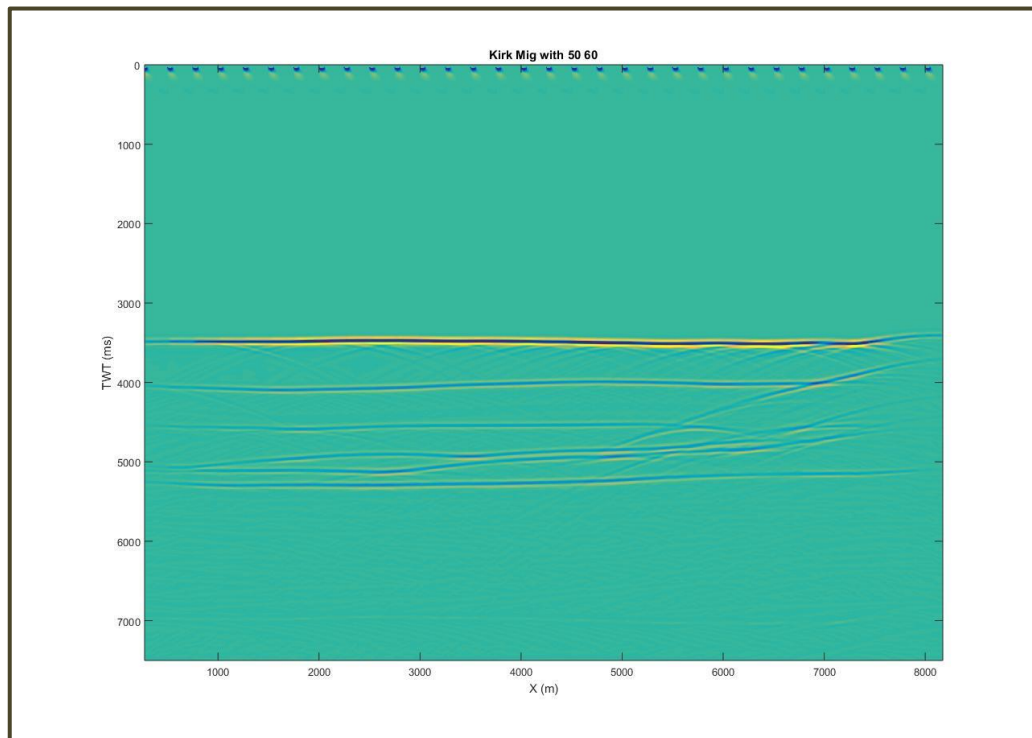
- **aryin**: Πίνακας δεδομένων εισόδου που έχει προέλθει από τη σεισμική υπέρθεση.
- **arvel**: Πίνακας των ταχυτήτων rms. Ο συγκεκριμένος πίνακας θα πρέπει να είναι ίδιων διαστάσεων με των πίνακα **aryin**.
- **t**: Διάνυσμα χρόνου καταγραφής.
- **x**: Διάνυσμα αποστάσεων.
- **params**: Διάνυσμα παραμέτρων χωροθέτησης. Οι παράμετροι είναι οι εξής:
 - Παράθυρο χωροθέτησης στην οριζόντια διεύθυνση και καθορισμός των ορίων του.
 - Μέγιστη γωνία χωροθέτησης (σε μοίρες).
 - Τύπος παρεμβολής μεταξύ των χρονικών δειγμάτων.
 - Όρια εφαρμογής της χωροθέτησης στην οριζόντια διάσταση και στον χρόνο.
 - Φίλτρο αποκοπής συχνοτήτων μεγαλύτερων από την συχνότητα Nyquist (fN).

Αντίστοιχα, τα δεδομένα εξόδου είναι:

- **arymig**: Πίνακας σεισμικής χωροθέτησης με τη μέθοδο του Kirchhoff.

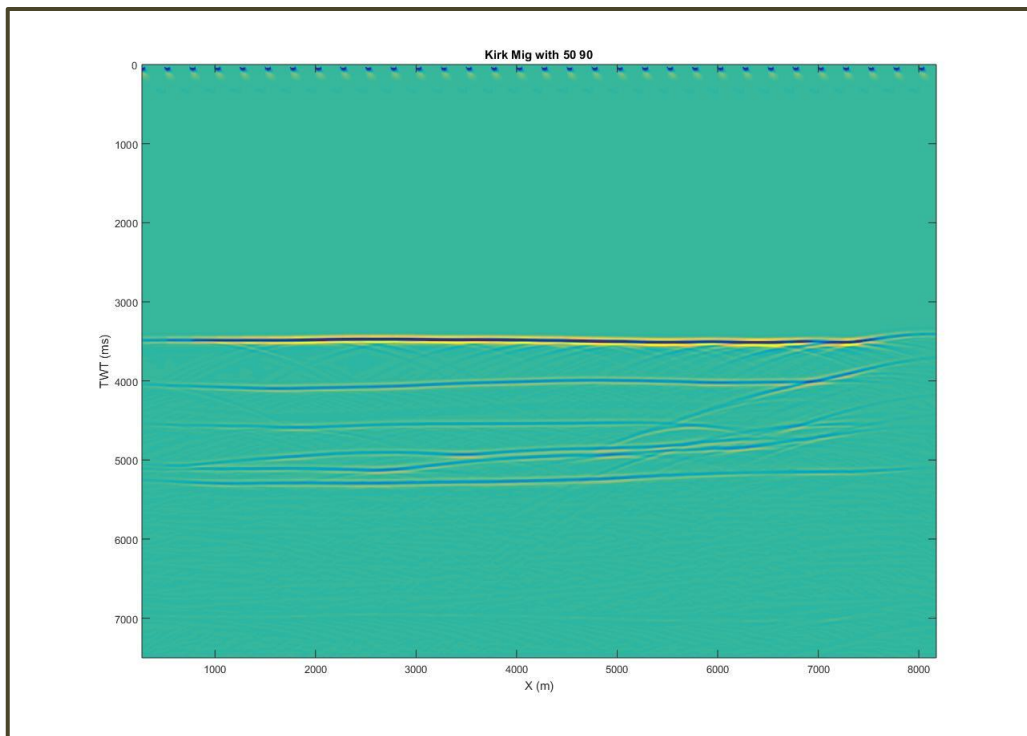
- t_{mig} : t συντεταγμένες των αποτελεσμάτων χωροθέτησης.
- x_{mig} : x συντεταγμένες των αποτελεσμάτων χωροθέτησης.

Παρακάτω, παρατίθενται οι εικόνες με τις χωροθετημένες σεισμικές τομές με τη μέθοδο Kirchhoff. Στην πρώτη εικόνα (5.4.2.1), έχουμε 50 ίχνη ενώ η μέγιστη κλίση είναι στις 60° . Στη συγκεκριμένη τομή, εμφανίζονται ξανά περιθλάσεις.



Εικόνα 5.4.2.1: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο Kirchhoff. Περιλαμβάνει 50 ίχνη και η μέγιστη κλίση είναι 60° .

Το ίδιο συμβαίνει και στην επόμενη τομή (Εικόνα 5.4.2.2), στην οποία έχουμε ξανά 50 ίχνη και η μέγιστη κλίση είναι 90° .



Εικόνα 5.4.2.2: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο Kirchhoff. Έχει μέγιστη κλίση 90° και 50 ίχνη.

5.4.3 Phase Shift

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε στην εν λόγω διαδικασία ήταν:

[out,tt]=ps_migt(seis,t,x,v,params);

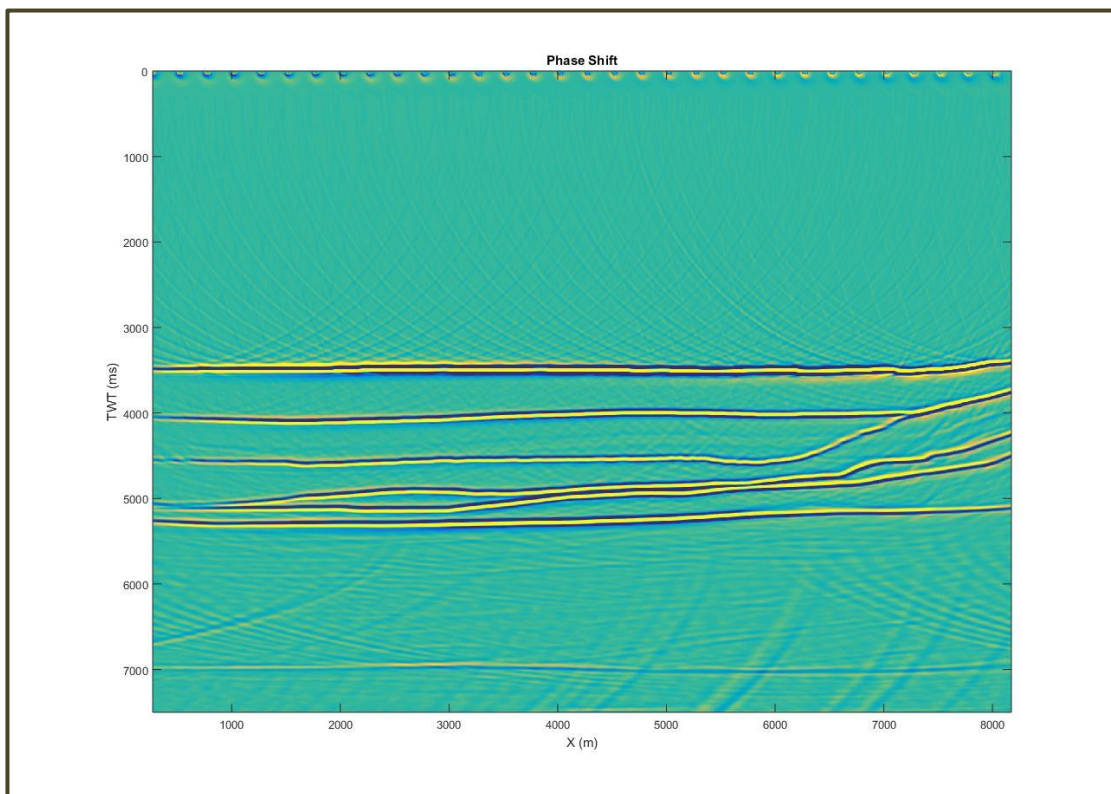
Τα δεδομένα εισόδου ήταν τα εξής:

- **seis:** Πίνακας δεδομένων εισόδου από τη σεισμική υπέρθεση
- **t:** Διάνυσμα χρόνου καταγραφής
- **x:** Διάνυσμα αποστάσεων
- **v:** Πίνακας τμηματικών ταχυτήτων. Ο πίνακας αυτός θα πρέπει να έχει ίδιες διαστάσεις με τον πίνακα **seis**.
- **params:** Διάνυσμα παραμέτρων χωροθέτησης.
 - **params (1):** Προσθήκη δειγμάτων μηδενικού πλάτους στο χρόνο (t) (ορισμένα σε s).

- params (2): Προσθήκη δειγμάτων μηδενικού πλάτους στο χώρο (x) (ορισμένα σε m).
- params (3): Βήμα εκτύπωσης της προόδου της χωροθέτησης.
- params (4): Μέγιστη γωνία χωροθέτησης (σε μοίρες).

Αντίστοιχα, τα αποτελέσματα εξόδου είναι:

- out: Πίνακας σεισμικής χωροθέτησης.
- tt: Συνολικός χρόνος υπολογισμού της χωροθετημένης τομής.



Εικόνα 5.4.3: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο στο χώρο συχνότητας - κυματαριθμού. Η μέγιστη κλίση είναι στις 90°.

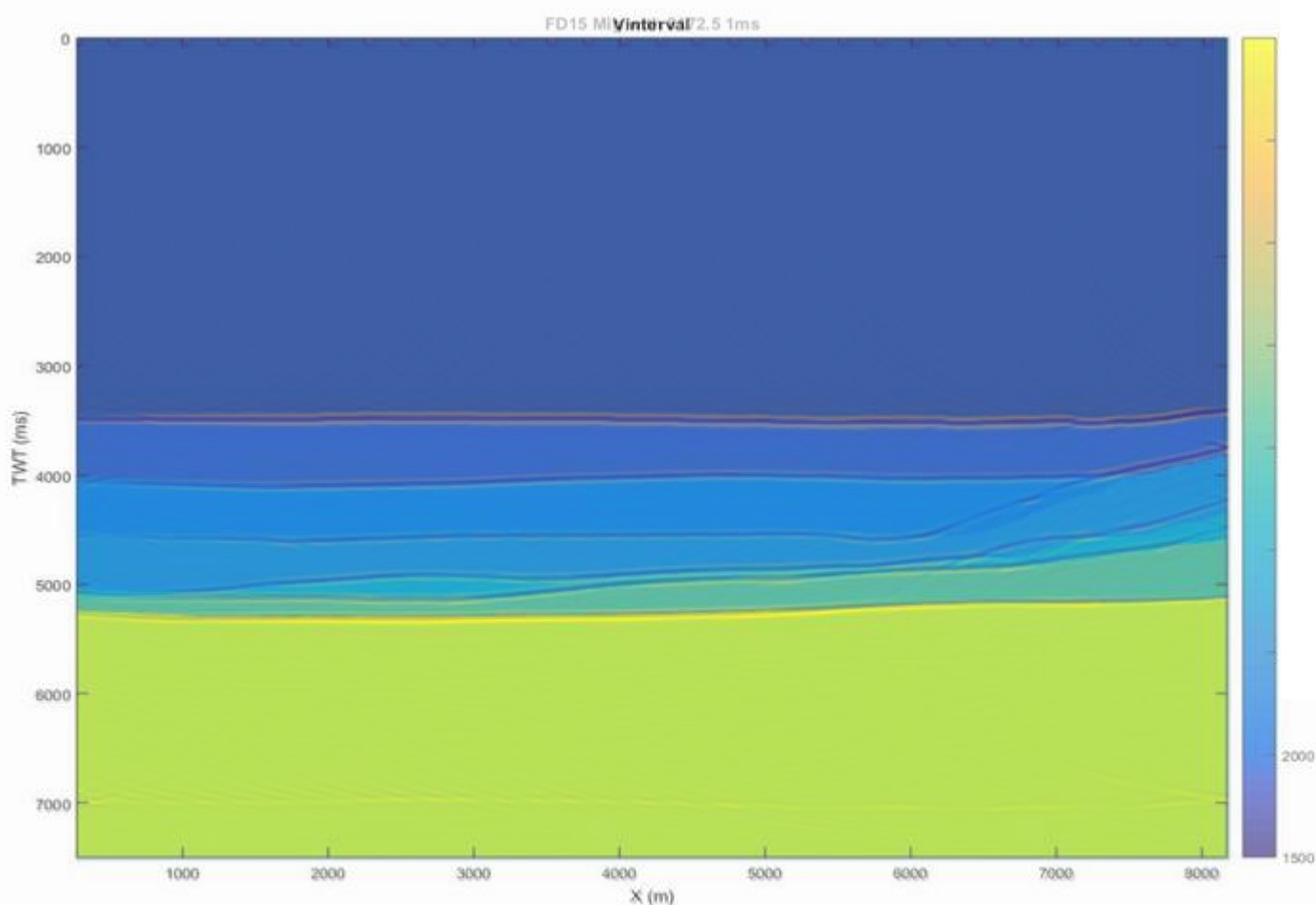
Στην παραπάνω **εικόνα (5.4.3)**, απεικονίζεται η χωροθετημένη τομή με τη μέθοδο στο χώρο συχνότητας - κυματαριθμού (Phase_Shift). Παρατηρείται ότι οι ανακλαστήρες είναι ευδιάκριτοι και δεν υπάρχουν ψευδοφαινόμενα. Η τομή είναι πλέον απαλλαγμένη από τις περιθλάσεις. Ωστόσο, υπήρξαν ορισμένα φαινόμενα

υπερχωροθέτησης, τα οποία ήταν διακριτά κυρίως στον πυθμένα της θάλασσας, αλλά και στο υπόβαθρο, τα οποία όμως δεν επηρέασαν ουσιαστικά την απεικόνιση των ανακλαστήρων.

5.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

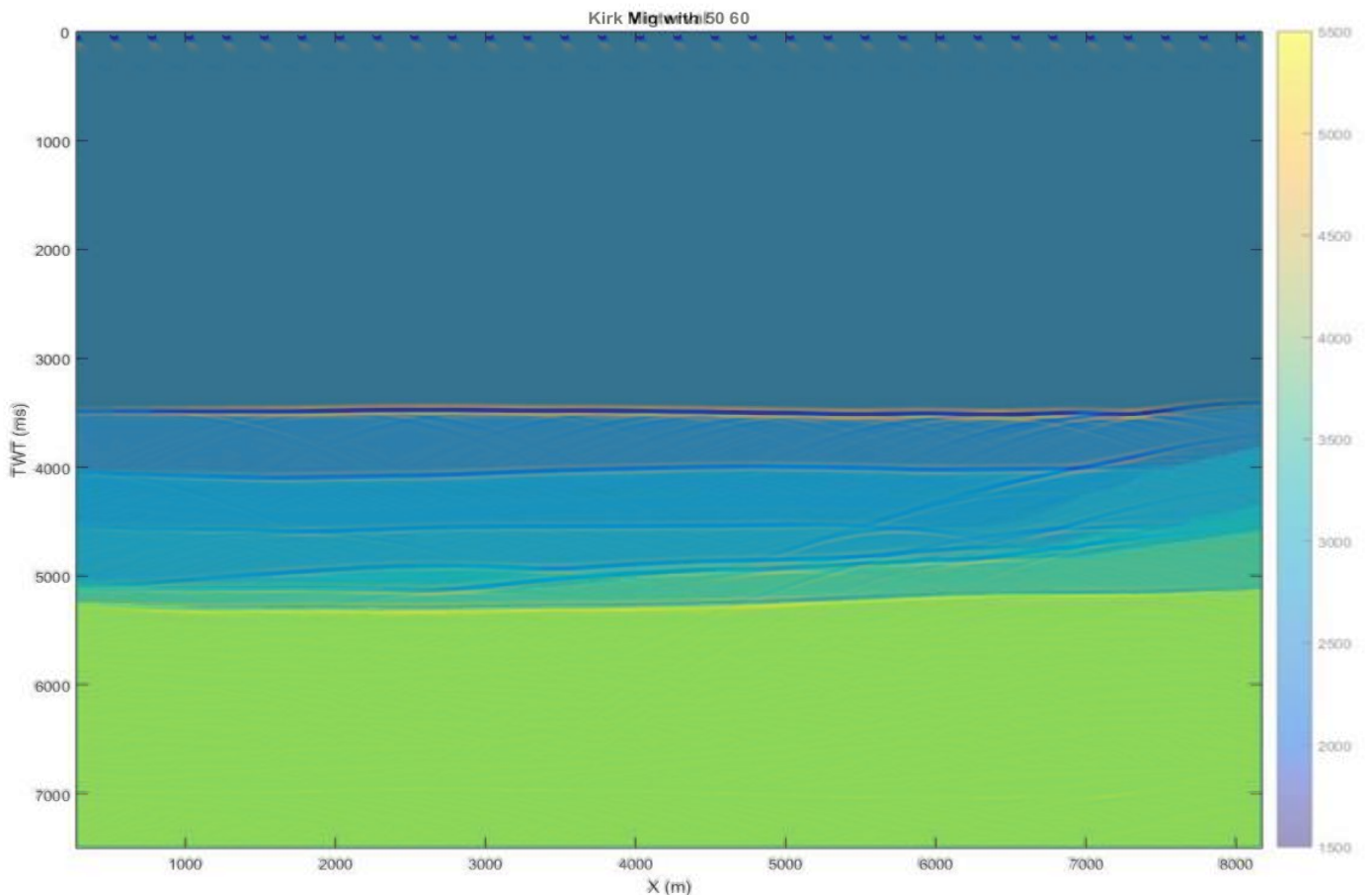
Έχοντας ως στόχο να καταλήξουμε στο ποια μέθοδος ήταν η πιο αποτελεσματική, θα πρέπει πρώτα να γίνει μία αξιολόγηση των τομών χωροθέτησης σε σχέση με το μοντέλο της τμηματικής ταχύτητας και να γίνει η σύγκριση μεταξύ των. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε υπέρθεση των τομών χωροθέτησης επί του μοντέλου ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκε.

Στην παρακάτω εικόνα (5.5.1) παρουσιάζεται η σεισμική τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών σε σύγκριση με το μοντέλο τμηματικής ταχύτητας. Παρατηρείται ότι οι επιφάνειες ανάκλασης της τομής είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους.

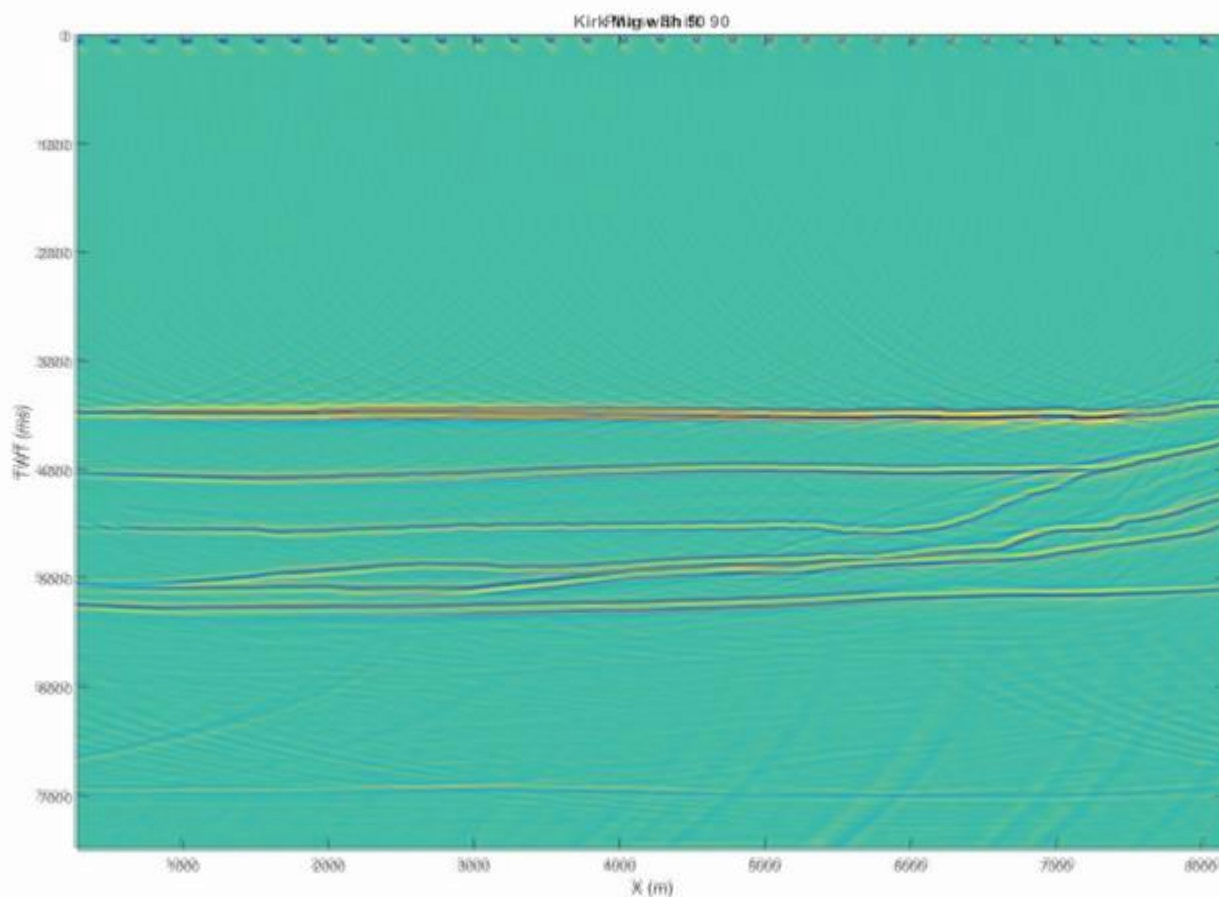


Εικόνα 5.5.1: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών σε σύγκριση με το σεισμικό μοντέλο.

Εν συνεχεία, στις Εικόνες 5.5.2 και 5.5.3, παρουσιάζονται οι σεισμικές τομές χωροθέτησης με τη μέθοδο του Kirchhoff σε σύγκριση με το σεισμικό μοντέλο. Παρατηρείται ότι οι επιφάνειες ανάκλασης της σεισμικής τομής απέχουν από τις διαχωριστικές επιφάνειες κάθε ορίζοντα, πράγμα που υφίσταται στα σημεία ύπαρξης ορισμένων περιθλάσεων. Αυτά τα αποτελέσματα δεν είναι τα επιθυμητά.

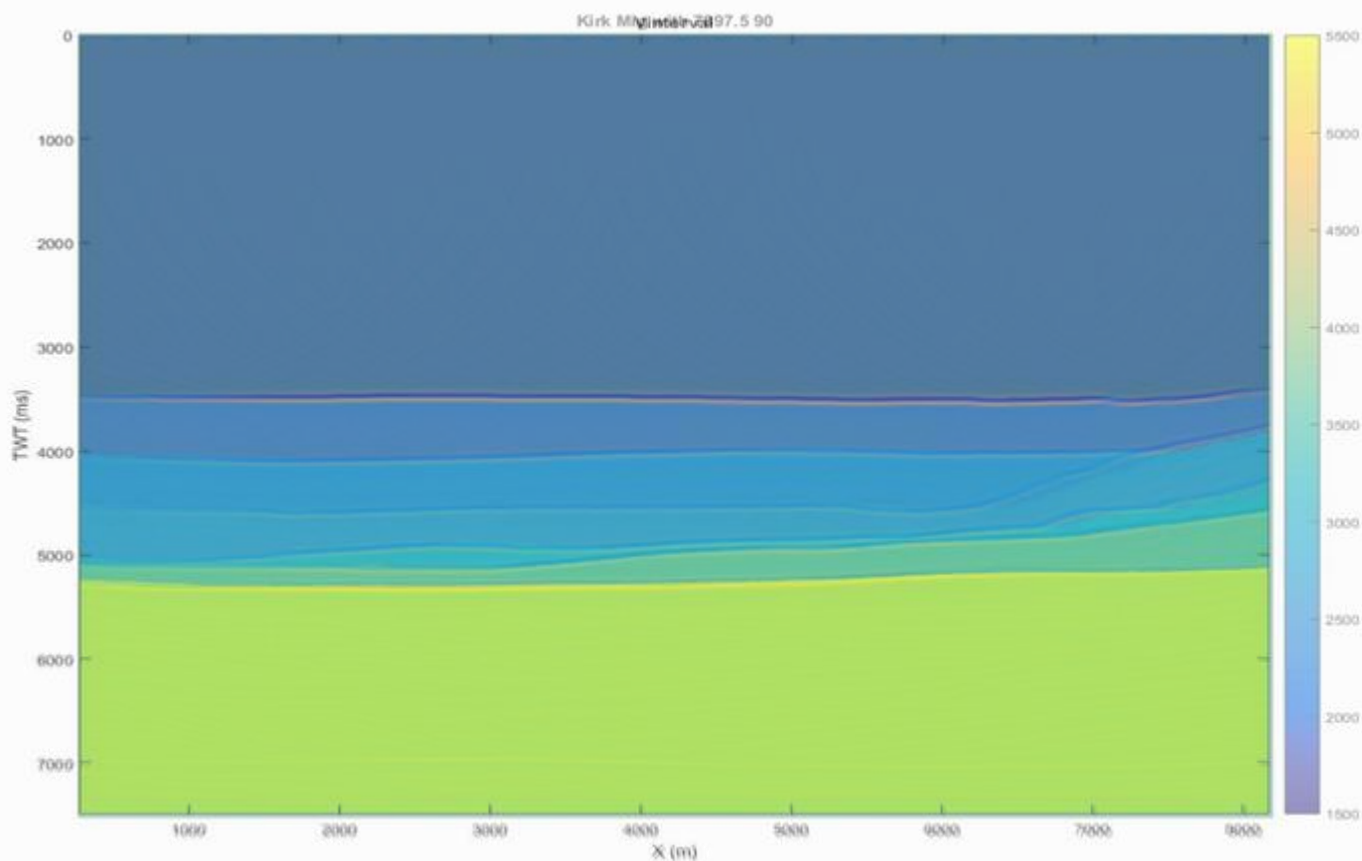


Εικόνα 5.5.2: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο Kirchhoff ("Kirk_Mig_50_60_Daskalakis") σε σύγκριση με το σεισμικό μοντέλο.



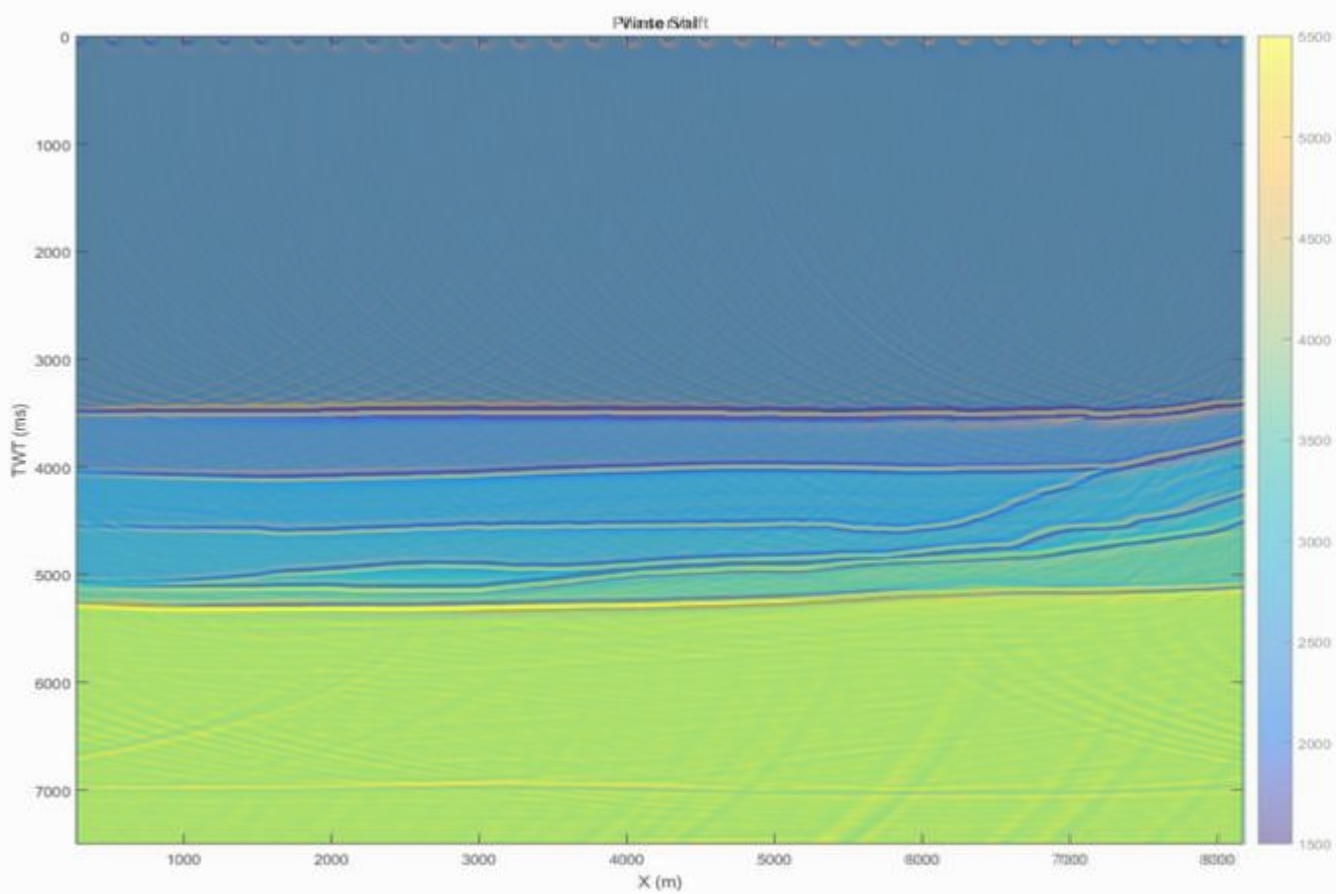
Εικόνα 5.5.3: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο Kirchhoff ("Kirk_Mig_50_90_Daskalakis") σε σύγκριση με το σεισμικό μοντέλο.

Παρακάτω, στην **εικόνα 5.5.4**, παρουσιάζεται η σεισμική τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο του Kirchhoff σε σύγκριση με το σεισμικό μοντέλο. Στην συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρείται ότι οι επιφάνειες ανάκλασης της σεισμικής τομής χωροθέτησης είναι πολύ κοντά στις διαχωριστικές επιφάνειες του σεισμικού μοντέλου, άρα το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι σαφώς καλύτερο των προηγούμενων και κατά συνέπεια πιο επιθυμητό.



Εικόνα 5.5.4: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο Kirchhoff ("Kirk_Mig_7897p5_90_Daskalakis") σε σύγκριση με το σεισμικό μοντέλο.

Τέλος, στην **εικόνα 5.5.5**, παρουσιάζεται η σεισμική τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο στο χώρο συχνότητας - κυματαριθμού. Παρατηρείται ότι, οι επιφάνειες ανάκλασης της σεισμικής τομής εφάπτονται πλήρως στις διαχωριστικές επιφάνειες στο σεισμικό μοντέλο. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο φαίνεται να καταλήγουμε στο πιο επιθυμητό αποτέλεσμα χωροθέτησης σε σύγκριση με τα παραπάνω.



Εικόνα 5.5.5: Τομή χωροθέτησης με τη μέθοδο στο χώρο συχνότητας-κυματιριθμού σε σύγκριση με το σεισμικό μοντέλο.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ένα από τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν καθ' όλη τη διάρκεια της επεξεργασίας είναι ότι κατά τη δημιουργία των συνθετικών δεδομένων υπάρχει μεγάλη ευελιξία για τη διαμόρφωση αρκετών μοντέλων που απεικονίζουν το υπέδαφος. Τα μοντέλα αυτά, μπορούμε να τα επεξεργαστούμε με διαφορετικούς τρόπους, έτσι ώστε να καταλήξουμε στο καλύτερο αποτέλεσμα. Ένα βασικό πλεονέκτημα είναι ότι όλα αυτά τα πιθανά σενάρια που ακολουθούμε κατά την επεξεργασία μπορούν να γίνουν μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, χωρίς δηλαδή την διεξαγωγή πραγματικών πειραμάτων σεισμικής ανάκλασης. Με αυτόν τον τρόπο εξοικονομούμε χρήματα, διότι το κόστος είναι πολύ χαμηλότερο, αλλά και χρόνο σε σχέση με την εκτέλεση ενός πραγματικού πειράματος.

Συγκρίνοντας όλες τις μεθόδους που ακολουθήσαμε στην επεξεργασία του μοντέλου, αλλά και πιο ειδικά τις μεθόδους χωροθέτησης, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι το βέλτιστο αποτέλεσμα προέρχεται από τη μέθοδο της χωροθέτησης στο χώρο συχνοτήτων – κυματαριθμού (Phase Shift), διότι στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν εμφανίστηκαν περιθλάσεις. Τέλος με την μέθοδο αυτή, δεν εμφανίστηκαν φαινόμενα υποχωροθέτησης (ταχύτητες πολύ μικρότερες από τις πραγματικές), ενώ τα φαινόμενα υπερχωροθέτησης (ταχύτητες πολύ μεγαλύτερες από τις πραγματικές) που εμφανίστηκαν (κυρίως στον πυθμένα) δεν επηρέασαν ουσιαστικά την απεικόνιση των ανακλαστήρων και κατά συνέπεια το αποτέλεσμα.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βαφείδης Α., 2011, Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Ι – Σεισμικές Μέθοδοι, Πανεπιστημιακές σημειώσεις Προπτυχιακού μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Γεωργιλά Θ., 1998, Συμβολή της σεισμικής ανάκλασης στην επίλυση υδρογεωλογικών προβλημάτων, Μεταπτυχιακή εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Δίκτυο Εργαστηρίων Πανεπιστημίου Πατρών, Τομογράφος Υποδομής Πυθμένα τύπου Pinger.

Δρακοπούλου Α., 2014, Εφαρμογή γεωλογικών γεωφυσικών και υδρογεωλογικών μεθοδολογιών στην επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων, Τμήμα Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Χανιά.

Καπακτσή Α., 2018, Επεξεργασία συνθετικών δεδομένων σεισμικής ανάκλασης για την περιοχή του Βόρειου Ιονίου πελάγους, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Κρίνης Π., 2009. Εφαρμογή μοντέλων βροχόπτωσης – απορροής σε λεκάνες του ελληνικού χώρου (Λεκάνη Μεσσαράς του νομού Ηρακλείου, νότια Κρήτη). Διατριβή ειδίκευσης, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Εφαρμοσμένης & Περιβαλλοντικής Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας.

Μανούτσογλου Ε., 2008, Εισαγωγή στη γεωλογία Ελλάδος, Πανεπιστημιακές σημειώσεις Προπτυχιακού μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Μορέλας Β., 2014, Τρισδιάστατη Γεωλογική προσομοίωση του Πλειο-Τεταρτογενούς της πεδιάδας της Μεσσαράς, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Μπραουδάκη Κ., 2004, Σεισμικά Ανάκλασης στο Ιόνιο, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

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, Χανιά.

Φασουλάς Χ., 1995, Κινηματική και Παραμόρφωση των καλυμμάτων της Κεντρικής Κρήτης, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη.

Φυτρολάκης Ν., 1978, Συμβολή στη γεωλογική έρευνα της Κρήτης, Δελτ. Ελλην. Γεωλ. Εταιρ., XIII/2, Αθήνα.

Χριστίδη Β., 2019, Σχεδιασμός πειράματος σεισμικής ανάκλασης για την απεικόνιση του υπεδάφους σε περιβάλλον βαθιάς θάλασσας νότια της Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Fassoulas, C., 1999, The structural evolution of central Crete: insight into the tectonic evolution of the south Aegean (Greece), *Journal of Geodynamics*, 27, 23-43.

Griffiths D. H. and King R. F., 1981, *Applied Geophysics for Geologists and Engineers*, Pergamon International Library of Science, Technology, Engineering and Social Studies, Publisher Robert Maxwell M.C..

Vafidis A., Andronikidis N., Economou N., Panagopoulos G., Zelilidis A., Manoutsoglou E., 2012, Reprocessing and interpretation of seismic reflection data at Messara Basin, Crete, Greece, *Journal of the Balkan Geophysical Society*.

Yilmaz O., 1987, *Seismic data processing* Society of Exploration Geophysicists.

ΔΙΚΤΥΟΓΡΑΦΙΑ

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%81%CE%AE%CF%84%CE%B7>

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%B5%CF%83%CF%83%CE%B1%CF%81%CE%AC>

[https://www.symposia.gr/wp-content/uploads/2014/10/10S2012_139 Rousakis .pdf](https://www.symposia.gr/wp-content/uploads/2014/10/10S2012_139_Rousakis.pdf)