



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Σχεδιασμός πειράματος σεισμικής ανάκλασης για την απεικόνιση του
υπεδάφους στην κατολίσθηση Vajont στην Β. Ιταλία**

Κυριακόπουλος Κων/νος Ιάσωνας
Α.Μ: 2009020034

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

- **ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ**, Καθηγητής Π.Κ (Επιβλέπων)
- **ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ**, Αν. Καθηγητής Π. Κ.
- **Δρ. ΚΡΗΤΙΚΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**, Ε.ΔΙ.Π Π.Κ.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Σχεδιασμός πειράματος σεισμικής ανάκλασης για την απεικόνιση του υπεδάφους στην κατολίσθηση Vajont στην Β.Ιταλία» υλοποιήθηκε στη σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και έχει ως κύριο σκοπό τη εκτέλεση βέλτιστου πειράματος σεισμικής ανάκλασης. Απώτερος και ιδανικός σκοπός, είναι μια καλύτερη επεξεργασία των δεδομένων για την απόκτηση περισσότερων στοιχείων που προκάλεσαν την κατολίσθηση.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία περιγραφή της περιοχής μελέτης, το μέγεθος της κατολίσθησης και των προβλημάτων που προκάλεσε καθώς και τα μέτρα που έχουν παρθεί από τη στιγμή του συμβάντος.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται σε θεωρητικό επίπεδο τα ανακλώμενα κύματα, μια τυπική εκτέλεση της μεθόδου σεισμικής ανάκλασης και η ενοποίηση των «κόσμων» των μαθηματικών και των φυσικών επιστημών με το προγραμματιστικό περιβάλλον.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η διαδικασία της ανάγνωσης των δεδομένων και μοντελοποίησης της περιοχής μελέτης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η διαδικασία της επεξεργασίας των δεδομένων που αποκτήθηκαν από το μοντέλο.

Καταλήγοντας γράφηκαν τα τελικά συμπεράσματα ύστερα από την συγκεκριμένη διαδικασία επεξεργασίας και προτάσεις βελτίωσής της.

Καταλήγοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Δρ Κρητικάκη Γεώργιο, κο Ανδρονικίδη Γεώργιο και Δρ Οικονόμου Νικόλαο, για τον χρόνο που αφιέρωσαν και της συμβουλές τους. Τον Αν. Καθηγητή κ Στειακάκη Εμμανουήλ για τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις του στο κείμενο. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Βαφείδη Αντώνιο για την συνεχή επίβλεψη και καθοδήγηση όλης της διπλωματικής εργασίας μέχρι την ολοκλήρωσή της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η μοντελοποίηση της πειραματικής διαδικασίας σεισμικής ανάκλασης στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab σε περιοχή που εξελίχθηκε η κατολίσθηση του Vajont. Στα πρώτα κεφάλαια περιγράφεται η περιοχή μελέτης και καλύπτεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο.

Στη συνέχεια ακολουθείται η περιγραφή της μοντελοποίησης με τη βοήθεια του προγράμματος Autocad. Από εργασίες ερευνητών της περιοχής συλλέχθηκαν οι συντεταγμένες και τα υπόλοιπα απαραίτητα στοιχεία για την διαδικασία αυτή.

Αφότου δημιουργήθηκε το μοντέλο της περιοχής μελέτης εισάχθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab και εκτελέστηκε το πείραμα της σεισμικής ανάκλασης. Συλλέχθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα από τη Matlab. Δηλαδή οι χρόνοι των ανακλώμενων κυμάτων μέσω των συνθετικών δεδομένων για τις εκάστοτε σεισμικές γραμμές μελέτης.

Εν ακολουθία τα δεδομένα επεξεργάστηκαν. Έγινε εκτίμηση των μέσων τετραγωνικών ταχυτήτων V_{RMS} με τις οποίες δημιουργήθηκε δρομοχρονικό διάγραμμα. Με τη βοήθεια του διαγράμματος αναγνωρίστηκαν τα απευθείας κύματα του πρώτου στρώματος τα οποία αποκόπηκαν για τη μείωση θορύβου στα δεδομένα.

Το επόμενο στάδιο ήταν η δημιουργία μοντέλου μέσης τετραγωνικής ταχύτητας (V_{RMS}) ώστε να εκτελεστεί χωροθέτηση κατά Kirchhoff δεδομένων κοινής πηγής. Έτσι εξασφαλίζεται η ανακατασκευή των ανακλαστήρων και η σωστή τοποθέτησή τους. Στο πρώτο μέρος της διεργασίας εκτελούνταν χωροθέτηση των δεδομένων κοινής πηγής σε κάθε μία πηγή ξεχωριστά και στην συνέχεια υπερθέτονταν τα δεδομένα από όλες τις πηγές, με αποτέλεσμα την διαμόρφωση της χωροθετημένης σεισμικής τομής. Για την εκτέλεση της παραπάνω διαδικασίας αναπτύχθηκε αλγόριθμος στο περιβάλλον της Matlab.

Ακολούθησαν αρκετές δοκιμές αλλάζοντας το εύρος των καταγραφών και επηρεάζοντας τον παράγοντα της ταχύτητας, έτσι αποκτήθηκε πλήθος σεισμικών καταγραφών. Οι

καταγραφές υπερτέθηκαν με το μοντέλο ταχυτήτων ως προς τον χρόνο που δημιουργήθηκε έτσι ώστε να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ VAJONT 1963	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Περιγραφή Περιοχής Μελέτης Κατολίσθησης Vajont 1963	3
1.3 Χαρακτηριστικά κατολισθήσεων	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ	9
2.1 Εισαγωγή	9
2.2 Βασικοί Νόμοι Ανακλώμενων Κυμάτων	10
2.3 Όργανα Σεισμικής Ανάκλασης	12
2.4 Επεξεργασία Μετρήσεων	12
2.4.1 Αποσυνέλιξη (Deconvolution)	12
2.4.2 Σεισμική υπέρθεση (Stacking)	13
2.4.3 Σεισμική χωροθέτηση (Migration)	14
2.6 Αλγόριθμος Συνθετικών Δεδομένων	15
2.7 Πεπερασμένες Διαφορές Στην Εξίσωση P-SV	18
2.8 Ακρίβεια, Σύγκλιση, Ευστάθεια, Διασπορά	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	22
3.1 Δημιουργία Μοντέλου Συνθετικών Δεδομένων	22
3.2 Δημιουργία Συνθετικών Δεδομένων Στο Περιβάλλον της MatLab	24
3.2.1 Εισαγωγή Μοντέλου Στον Αλγόριθμο Προσομοίωσης	24
3.2.2 Καθορισμός των παραμέτρων του πειράματος	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	31
4.1 Εισαγωγή	31
4.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΣΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ-ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΡΟΜΟΧΡΟΝΙΚΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ-ΑΠΟΚΟΠΗ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΚΥΜΑΤΩΝ	31
4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΣΗΣ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	38
4.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΕ ΥΠΕΡΘΕΣΗ	40
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	48
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	49
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	50

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣ ΝΑΪΟΝΤ 1963

1.1 Εισαγωγή

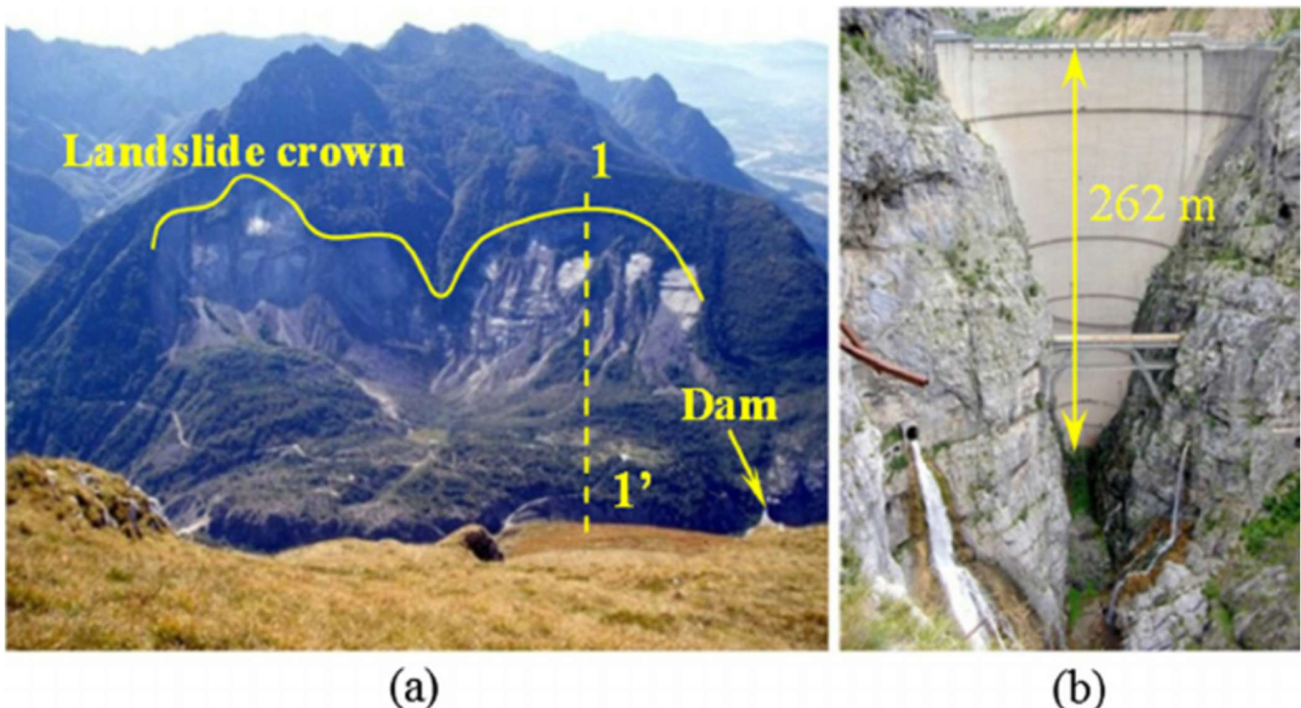
Ο άνθρωπος στην εξελικτική του πορεία ανά τους αιώνες συνάντησε πολλές δυσκολίες που κλήθηκε να αντιμετωπίσει. Μέσω της φιλοσοφίας και των επιστημών κατάφερε να διευκολύνει τις συνθήκες διαβίωσης του, να διευρύνει σε ικανοποιητικό επίπεδο την κατανόηση του για το σύμπαν που τον περιβάλλει και αποτελεί ο ίδιος μέρος του και μάλιστα να θεωρηθεί κυρίαρχος του ζωικού βασιλείου της Γης. Εξακολουθεί εντούτοις να αντιμετωπίζει τους ίδιους κινδύνους με τους προγόνους του και αυτοί είναι τα φυσικά φαινόμενα. Μπορεί να χειριστεί και να επηρεάσει καταστάσεις, δεν μπορεί παρά ταύτα να αποφύγει τη δύναμη που έχει η φύση. Ένα από τα προβλήματα για τις σύγχρονες κοινωνίες του ανθρώπου το οποίο προκύπτει από τις φυσικές διαδικασίες, αποτελούν οι κατολισθήσεις.

Οι κατολισθήσεις ίσως αποτελούν δείγμα του ότι ο άνθρωπος της τεχνολογίας, της σύγχρονης εποχής, βρίσκεται ακόμα σε νηπιακό επίπεδο σε σχέση με αυτά που μπορεί να καταφέρει. Είναι ικανές να προκαλέσουν καταστροφές όπως αποκλεισμό δρόμων μέχρι καταπλάκωση κατοικήσιμων περιοχών όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω, αναλόγως του μεγέθους τους. Πολλές μπορεί να είναι οι αιτίες που προκαλούν μια κατολίσθηση όπως βροχοπτώσεις, σεισμοί, ηφαιστειακές εκρήξεις ή επιπλέον από κάποια αστάθεια του εδάφους. Συνήθεις περιοχές που ο κίνδυνος εκδήλωσης κατολισθήσεων είναι αυξημένος αποτελούν οι περιοχές στις οποίες έχουν ήδη προκληθεί κατολισθήσεις, στη βάση ή την κορυφή απότομων πρανών (κλιτύων) ή εκσκαφών και επιχωμάτων. Επίσης συχνό φαινόμενο αποτελεί η εμφάνιση κατολισθήσεων κατά τη διάρκεια ή ως συνέπεια των σεισμών καθώς το έδαφος υφίσταται ισχυρή ανατάραξη. Όλες αυτές τις αιτίες ο άνθρωπος καλείται να τις κατανοήσει, να τις αναγνώσει έτσι ώστε να μεριμνήσει.

Σημαντικό εργαλείο της κατανόησης και της ανάγνωσης αυτών των φυσικών ιδιοτήτων της Γης και κατ' επέκταση των κατολισθήσεων για τον άνθρωπο, αποτελούν οι γεωφυσικές μέθοδοι. Η Γεωφυσική ως επιστήμη μελετά τη Γη εφαρμόζοντας τους νόμους της Φυσικής. Η γεωφυσική έρευνα έχει στόχο την αξιοποίηση των γεωφυσικών γνώσεων για πρακτικούς σκοπούς, όπως τα αίτια που προκάλεσαν μια κατολίσθηση ή την πρόβλεψη μιας κατολίσθησης. Μια γεωφυσική έρευνα μπορεί να γίνει με τη χρήση πολλών μεθόδων (σεισμικές, βαρυτικές, μαγνητικές ηλεκτρικές, ηλεκτρομαγνητικές κ.α.) αναλόγως περιπτώσεων και προβλημάτων. *“Οι σεισμικές μέθοδοι διακρίνονται κυρίως στις μεθόδους ανάκλασης και διάθλασης. Οι σεισμικές μέθοδοι είναι οι πιο ακριβείς μέθοδοι καθορισμού της δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Οι βαρυτικές μέθοδοι έχουν σαν άμεσο στόχο τον προσδιορισμό της κατανομής της πυκνότητας των πετρωμάτων. Οι μαγνητικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται στον εντοπισμό μαγνητισμένων πετρωμάτων. Οι ηλεκτρικές και οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι καθορίζουν την γεωηλεκτρική δομή των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού. Σε ειδικές περιπτώσεις πραγματοποιούνται μετρήσεις της φυσικής ραδιενέργειας (ραδιομετρική μέθοδος) ή της θερμοκρασίας (θερμική μέθοδος).* (Βαφείδης, 1993) Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία γίνεται χρήση και ανάλυση μίας εκ των σεισμικών μεθόδων, της Σεισμικής Ανάκλασης με αντικείμενο την κατολίσθηση του όρους Τοκ στην κοιλάδα του ποταμού Βάιοντ.

1.2 Περιγραφή Περιοχής Μελέτης Κατολίσθησης Vajont 1963

Η περιοχή μελέτης αφορά την τεραστίων διαστάσεων κατολίσθηση του όρους Τοκ 100 Km Βόρεια της Βενετίας στην Ιταλία. Το 1959 στην κοιλάδα του ποταμού Βάιοντ χτίστηκε το ψηλότερο για την εποχή φράγμα στον κόσμο, 262m ύψος, στη βάση του έχει 27m πλάτος και 22,11m πάχος ενώ στην κορυφή του 191m πλάτος, 3.4m πάχος. Είχε όγκο 360 χιλιάδες m^3 και μπορούσε να συγκρατήσει $168.715.000m^3$ νερού. (Εικόνα 1)



Εικόνα 1.1: a) Κορυφή της κατολίσθησης, b) Φράγμα Βάιοντ [2]

Στις 9 Οκτωβρίου 1963 μια τεράστια μάζα ασβεστόλιθων, λάσπη αργίλου και μαργών, όγκου περίπου 270 εκατομμυρίων m^3 του όρους Τοκ ολίσθησε προκαλώντας τσουνάμι στην τεχνητή λίμνη του φράγματος της τάξης των 50 εκατομμυρίων m^3 νερού. Το νερό ξεπέρασε το φράγμα (262m ύψος) με συνέπεια σοβαρές καταστροφές μεταξύ των οποίων και τον θάνατο 1910 ανθρώπων [1].[3]. Οι μηχανικοί της εποχής αν και είχαν τρεις (3) ερευνητικές γεωτρήσεις απέτυχαν να εντοπίσουν κάποια μεγάλη επιφάνεια αστοχίας μιας και δεν διεξήχθησαν στα πρηνή. Η γεωμορφολογία της περιοχής καθώς και η γεωλογία (τεράστιο σύγκλινο, σημάδια προϊστορικής κατολίσθησης, τεράστιες επιφάνειες με μικρή κλίση σε ένα περιβάλλον με απότομες πλαγιές, οριζόντες αργίλου σε διαστρωμάτωση με ασβεστόλιθους), έκρουαν τον κώδωνα κινδύνου για τα νότια πρηνή κυρίως. Παρόλα

αυτά και τις επιστολές από τους κατοίκους οι οποίες κατέγραφαν ανησυχίες για τις συνεχείς κατολισθήσεις στην τεχνητή λίμνη οι οποίες αγνοήθηκαν πλήρως, αποφασίστηκε από τους μηχανικούς του έργου ότι δεν συνέτρεχε λόγος ανησυχίας. Αργότερα διαπιστώθηκε ότι η κατολίσθηση ήταν αναπόφευκτη, αντίθετα η απότομη πτώση της στάθμης του φράγματος βοήθησε την κατάσταση λόγω μείωσης των πιέσεων.

Η κατολίσθηση αυτή αποτελεί μέχρι και σήμερα μια από τις μεγαλύτερες φυσικές καταστροφές με αιτία τις ενέργειες ανθρώπων. Μάλιστα, 55 χρόνια μετά την κατολίσθηση η περιοχή έχει και συνεχίζει να ερευνάται από διάφορες ομάδες επιστημόνων λόγω του ενδιαφέροντος που έχει. Η μορφολογία της κατολίσθησης, η δομή της και οι μηχανισμοί αστοχίας δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως. Είναι δύσκολο σε τόσο μεγάλες μάζες να κατανοηθούν οι μηχανισμοί και η εξελικτική πορεία της κατολίσθησης. Έχουν εφαρμοστεί διάφορες τεχνικές για τη συλλογή δεδομένων (BISTACCHI 2013):

- γεωλογικές
- σεισμικές διασκοπίσεις
- ηλεκτρικές διασκοπίσεις
- ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι
- φωτογραμμετρική ανάλυση
- πετρολογικοί χαρακτηρισμοί
- υψομετρικά τοπογραφικά (DEM)
- εναέρια και γήινη έρευνα

Αν και τα περισσότερα στοιχεία που έχουμε καθώς και η επανεξέταση των δεδομένων με νέες τεχνικές για την ανάλυση βραχομαζών προέρχονται από τις γεωτρήσεις που είχαν ανοιχτεί λίγο μετά την κατολίσθηση.

Ο όγκος που ολίσθησε αποτελείται από τρεις (3) σχηματισμούς. Στο πάνω μέρος βρίσκεται ο σχηματισμός Soccher, ενδιάμεσα ο σχηματισμός Fonzaso και στο κάτω ο σχηματισμός Vajont. Οι σχηματισμοί Soccher και Fonzaso περιέχουν κυρίως ασβεστόλιθους και μάργες καθώς παρουσιάζουν διάφορους βαθμούς θραυσμού. Ενδιάμεσα του σχηματισμού Fonzaso έχει ενσωματωμένα αργιλικά στρώματα διάφορων παχών, από μερικά cm μέχρι 3m, τα οποία θεωρούνται μία από τις αιτίες της αστοχίας. Για την ακρίβεια τα στρώματα αυτά εκτείνονται συνεχόμενα, σε μεγάλη έκταση στην περιοχή της αστοχίας, σε βάθη από 110m έως 160m. Λόγω αυτής της μεγάλης έκτασης των αργιλικών σχηματισμών και λόγω ότι αποτελούν την επιφάνεια που αστόχησε, ο

σχηματισμός Fonzaso χωρίζεται σε πάνω και κάτω σχηματισμός Fonzaso με όριο τα αργιλικά στρώματα.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι αξιοσημείωτη επιρροή στα αίτια της κατολίσθησης είχε το υπόγειο νερό του οποίου η στάθμη ανέβηκε. Η μέθοδος όμως της σεισμικής ανάκλασης που θα ασχοληθούμε σε αυτή τη διπλωματική δεν βρίσκει εφαρμογή στα υπόγεια νερά, οπότε δεν θα τα λάβουμε υπόψη.

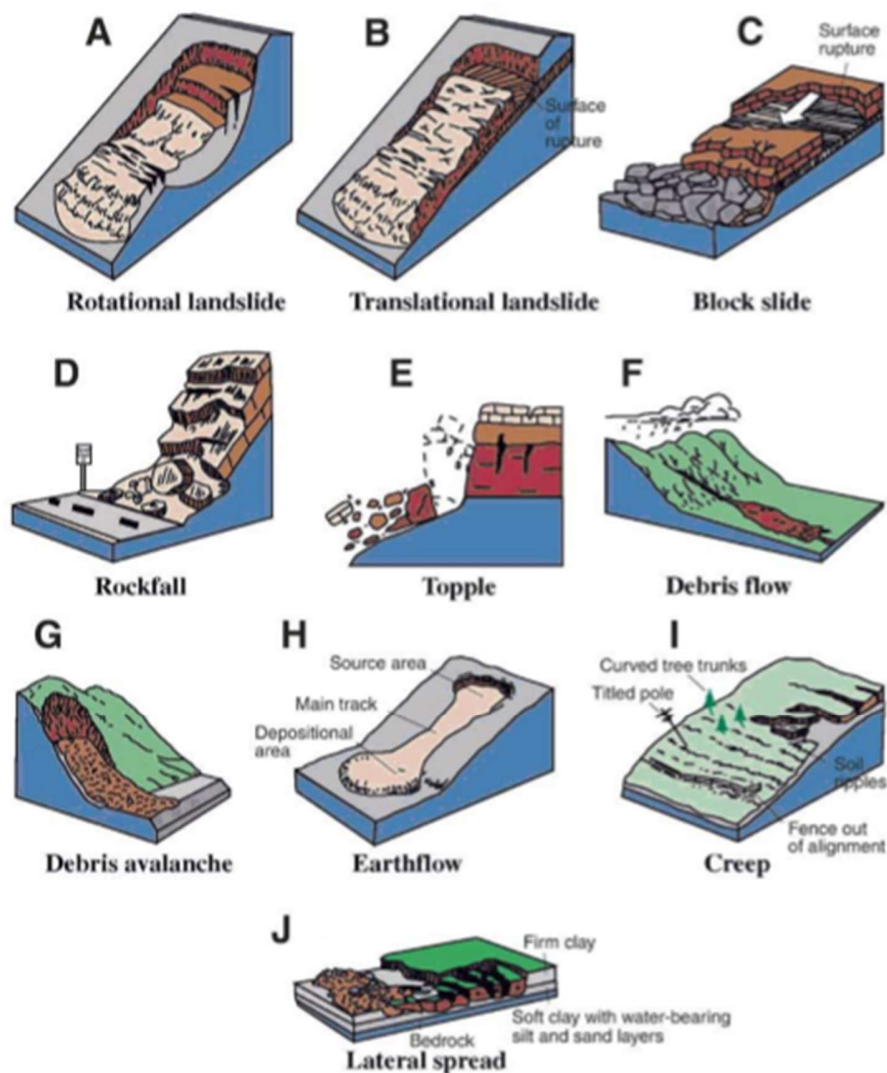
Στη μελέτη που έγινε στην έρευνα του Petronio et al. (2016) υπήρχαν ακόμα οι προβληματισμοί που αναφέρθηκαν παραπάνω. Έγινε ένας καλύτερος γεωφυσικός χαρακτηρισμός της κατολίσθησης του Βάιοντ ως προς τα υλικά του όγκου που ολίσθησε και την γεωμετρία της στρωματογραφίας του. Ο συνδυασμός των σεισμικών τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν πρόσθεσε νέες πληροφορίες στα ήδη υπάρχοντα δεδομένα για την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών της αστοχίας.

Η μέθοδος η οποία χρησιμοποιήθηκε ήταν η σεισμική ανάκλαση. Για την ακρίβεια χρησιμοποιήθηκαν:

1. Υψηλής ανάλυσης ανάκλαση διαμήκη κυμάτων (P-wave).
2. Υψηλής ανάλυσης ανάκλαση διατμητικών κυμάτων (SH-wave)
3. Ανάλυση επιφανειακών κυμάτων από ελεγχόμενη πηγή.

1.3 Χαρακτηριστικά κατολισθήσεων

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή είναι πολλές οι αιτίες πρόκλησης μιας κατολίσθησης όπως και οι επιπτώσεις που μπορούν να προκαλέσουν. Οι μετακινήσεις βραχών ή εδαφών που λαμβάνουν χώρα σε κεκλιμένες μορφολογικά επιφάνειες όπου περιγράφει τις κατολισθήσεις, έχουν κοινό παράγοντα και αίτιο την βαρύτητα. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζονται μερικοί τύποι κατολισθήσεων.



Σχήμα 1.1: Παράδειγμα διαφορετικών τύπων κατολισθήσεων (Wieczorek and Snyder, 2009, Cruden and Varnes, 1996)

Βασικό χαρακτηριστικό διάκρισης των κατολισθήσεων σύμφωνα με τον Varnes (1978) αποτελεί η ταχύτητα εξέλιξής τους. Διακρίνονται σε αργές μέτριες και γρήγορες (Πίνακας 1.3.1)

Ταχύτητα μετακίνησης	Χαρακτηρισμός της μετακίνησης
---	έξαιρετικά γρήγορη
---3m/sec	πολύ γρήγορη
---	γρήγορη
---0,3m/min	μέτρια
---	αργή
---1,5m/d	πολύ αργή
---	έξαιρετικά αργή
---1,5m/μήνα	

---1,5m/χρόνο	

---0,6m/χρόνο	

Πίνακας 1.1: Κλίμακα ταχύτητας μετακίνησης των πρανών (Στειακάκης, 2012, Varnes, 1978).

Στην περίπτωση του φράγματος Vajont στο όρος Τοκ, οι μηχανικοί της εποχής καθώς αύξαναν την ποσότητα του νερού στο φράγμα παρατήρησαν για διάστημα μερικών μηνών μια μετακίνηση της τάξης των 0.3 cm/d. Στην συνέχεια με την περεταίρω πλήρωση του φράγματος οι μετακινήσεις αυξήθηκαν στα 0.8 cm/d, δηλαδή περίπου 3m/year, μια πολύ αργή κατολίσθηση. Όταν το νερό του φράγματος έφτασε στα 245m, οι ταχύτητες σε σημεία του πρανούς άγγιζαν τα 3.5 cm/d, δηλαδή 1,16 m/μήνα, μια σχεδόν μέτρια κατολίσθηση. Να σημειωθεί ότι οι ταχύτητες αυτές δήλωσαν εμφάνιση σε σημεία του πρανούς, το οποίο υποδηλώνει ακόμα ένα χαρακτηριστικό των κατολισθήσεων. Πολλές κατολισθήσεις, ανεξάρτητα του μεγέθους τους, παρουσιάζουν κατά τη διάρκεια της εξέλιξής τους μικτούς χαρακτήρες, δηλαδή τμήματα (ή και το σύνολο) της κατολισθαίνουσας μάζας παρουσιάζουν διαφορετικές ταχύτητες μετακίνησης. Εκεί οι μηχανικοί αποφάσισαν να μειώσουν τη στάθμη του νερού του φράγματος αλλά οι καταγραφές της ταχύτητας είχαν αυξητική πορεία φτάνοντας τα 20 cm/d. Εν τέλει το πρανές κατέρρευσε και οι κατολίσθηση άγγιξε ταχύτητες των 30 m/sec.

Ακόμα ένα βασικό χαρακτηριστικό των κατολισθήσεων αποτελεί το μέγεθος μετακίνησης της κατολισθαίνουσας μάζας. Πρέπει να ληφθεί υπόψιν έτσι ώστε να εφαρμοστούν οι κατάλληλες κατασκευές και τεχνικά έργα για την προστασία των πρανών. Η μετακίνηση που μπορεί να κυμαίνεται από λίγα εκατοστά μέχρι μερικά χιλιόμετρα θα πρέπει να εξετάζεται συνδυάστηκε με την ταχύτητα και τις διαστάσεις (όγκος) της κατολίσθησης.

Τέλος, να σημειωθεί ότι οι κατολισθήσεις μεγάλης έκτασης, δεν αφορούν συνήθως μια κατολίσθηση, αλλά σμήνος μικρών και μεγάλων ομοειδών κατολισθήσεων, οι οποίες επειδή βρίσκονται κάτω από τους ίδιους ή παρεμφερείς μηχανισμούς γένεσης, εξελίσσονται ομαδικά ή αλυσιδωτά (Στειακάκης, 2012).

Συγκεκριμένα για την κατολίσθηση του όρους Τόκ, καταγραφές δείχνουν ότι η πλειονότητα της μάζας μετακινήθηκε ενιαία εκτός από μια ελάχιστη γενική περιστροφή και έφτασε ως την απέναντι όχθη της κοιλάδας Vajont χωρίς αλλαγή της μορφής της. Το άνωθεν συμπέρασμα υποδεικνύεται από την μορφολογία της επιφάνειας, την γεωλογική δομή και την ακολουθία των στρωμάτων του υπεδάφους της κατολίσθησης που κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Οπότε πρόκειται για μια μεταθετική ολίσθηση (translational slide) ή ερπυσμό βάθους ενδιάμεσα των σχηματισμών Upper και Lower Fonzaso καθώς η κατολίσθηση είχε εξελικτική πορεία με μικρές μετακινήσεις σε βάθος χρόνου, μέχρι την αύξηση του ρυθμού της και την αστοχία του πρανούς. Εκτεταμένη ανάλυση των σχηματισμών θα γίνει παρακάτω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ

2.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης αποτελεί μέθοδο εξερεύνησης γεωφυσικών δεδομένων της οποίας οι αρχές βασίζονται στη σεισμολογία και την διάδοση κυμάτων. Βρίσκει για πρώτη φορά εφαρμογή το 1914 μέσω του Fessenden που υπολόγισε το βάθος του πυθμένα της θάλασσας υπολογίζοντας τις ταχύτητες των ανακλώμενων κυμάτων. Πλέον αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία των φυσικών διασκοπήσεων. Η ακρίβεια που προσφέρει στη χαρτογράφηση των υπόγειων στρωμάτων είναι συγκρίσιμη με δεδομένα γεωτρήσεων. Γεγονός που την καθιστά τόσο σημαντική ως μέθοδο. Με αυτή τη μέθοδο μπορεί να προσδιοριστεί η στρωματογραφία ενώ δεν επηρεάζεται από τις αντίστροφες ταχύτητες.

Παλαιότερα η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης χρησιμοποιούνταν κυρίως για την ανίχνευση δομών στις οποίες ήταν πιθανός ο εντοπισμός κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου. Σήμερα η εφαρμογή της έχει επεκταθεί στους τομείς της ανίχνευσης υπογείων υδάτων και γεωθερμικών πεδίων στην μελέτη του φλοιού της γης, σε χαρτογραφήσεις αρχαιολογικών χώρων καθώς και σε γεωτεχνικές μελέτες θεμελίωσης (Βαφείδης, 1993). Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων, θα πρέπει να προκύπτει λαμβάνοντας υπόψιν τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει και από άλλες γεωφυσικές διασκοπίσεις στην ίδια περιοχή, καθώς και τις γεωλογικές πληροφορίες που αφορούν την περιοχή μελέτης.

Περίληπτικά η διαδικασία της μεθόδου σεισμικής ανάκλασης μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Τα κύματα που παράγονται στην επιφάνεια (πίπτον βάρος, δυναμίτης κ.α.) διαδίδονται στους υπόγειους σχηματισμούς και ανακλώνται πάνω σε μία ή περισσότερες διαχωριστικές επιφάνειες τους ανακλαστήρες, με τα κύματα να καταλήγουν ξανά στην επιφάνεια. Μέσω των γεωφώνων που είναι καρφωμένα κοντά στην επιφάνεια

λαμβάνονται χρόνοι άφιξης, δηλαδή χρόνοι διαδρομής των κυμάτων. Τα σεισμικά κύματα λειτουργούν όπως τα κύματα φωτός βάση θεωρίας Huygens (Χόυχενς). Οπότε από τους χρόνους διαδρομής υπολογίζονται, η σεισμική ταχύτητα και το πάχος των γεωλογικών στρωμάτων. Μπορεί να ληφθεί μια καλή εικόνα της στρωματογραφίας του υπεδάφους. Περαιτέρω ανάλυση θα γίνει παρακάτω.

2.2 Βασικοί Νόμοι Ανακλώμενων Κυμάτων

“Η Γεωμετρική Οπτική και η Κυματική Θεωρία αποτελούν τις δύο Κύριες θεωρίες που περιγράφουν τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης. Όπως στην Οπτική χρησιμοποιούμε τις φωτεινές ακτίνες για να δείξουμε την πορεία που ακολουθεί το φως, έτσι και στις σεισμικές μεθόδους η πορεία των σεισμικών κυμάτων περιγράφεται από τις σεισμικές ακτίνες” (Βαφείδης, 2011). Μέσω αντίστοιχων νόμων γίνεται ο προσδιορισμός του μετώπου κύματος. Δηλαδή ο γεωμετρικός τόπος στον οποίο καταφθάνουν ταυτόχρονα τα σεισμικά κύματα και ανακλώνται. Βασικοί νόμοι προς μετάφραση (ανάγνωση, κατανόηση) των ανακλώμενων κυμάτων αποτελούν η αρχή του Huygens, η αρχή του Fermat και ο νόμος του Snell όπου περεταίρω ανάλυση θα γίνει παρακάτω:

Αρχή Huygens:

Η αρχή του Huygens θεωρεί ότι το κύμα διαδίδεται μέσω της ταλάντωσης των υλικών σημείων ενώς μέσου όπου το ένα υλικό σημείο εξαναγκάζει σε ταλάντωση το αμέσως επόμενο. Ισχύει μόνο για μικρά μήκη σεισμικών κυμάτων που ανήκουν σε ένα είδος κυμάτων (διαμήκη, εγκάρσια). Σε περίπτωση ταυτόχρονης διάδοσης διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων, η εφαρμογή της αρχής γίνεται ξεχωριστά για κάθε κύμα.

Αρχή Fermat:

Ο Fermat διατύπωσε την αρχή των ελάχιστων χρόνων, που είναι γνωστή και ως η αρχή του Fermat. Σύμφωνα με την αρχή αυτή, “το κύμα το οποίο φθάνει σε ορισμένο δέκτη από ορισμένη πηγή, ακολουθεί το συντομότερο από τους δρόμους που είναι δυνατό να ακολουθήσει, δηλαδή αυτόν που απαιτεί τον ελάχιστο χρόνο”. Έχοντας γνωστή την ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων σε ένα μέσο, είναι εφικτή η χάραξη σεισμικών ακτινών [\[4\]](#).

Νόμος του Snell:

Όταν ένα διάμηκες κύμα προσπέσει στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων, τα σημεία της επιφάνειας αυτής γίνονται εστίες διαμηκών ανακλώμενων και διαθλώμενων κυμάτων. Σύμφωνα με τον νόμο του Snell “ο λόγος των ημιτόνων των γωνιών που σχηματίζουν οι σεισμικές ακτίνες με την κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων, είναι ίσος με το λόγο των αντίστοιχων ταχυτήτων διάδοσης των κυμάτων”.

Διαμήκη, Εγκάρσια κύματα

Τα ανακλώμενα κύματα αποτελούν **κύματα χώρου** και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα **διαμήκη** και τα **εγκάρσια**. Ως κύματα χώρου, διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις. Η διαφορά τους έγκειται στον τρόπο μετάδοσης των υλικών σημείων. Στην περίπτωση των διαμηκών κυμάτων η διεύθυνση ταλάντωσης των υλικών σημείων (μετατόπιση) συμπίπτει με την διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Συμβολίζονται με “P” (P-waves) από το λατινικό Primus (πρώτο) καθώς φτάνουν πρώτα στα γεώφωνα λόγω του ότι διαδίδονται πιο γρήγορα σε σχέση με τα άλλα σεισμικά κύματα. Αντίθετα στα εγκάρσια κύματα, η διεύθυνση ταλάντωσης των υλικών σημείων είναι κάθετη προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος και συμβολίζονται με “S” (S-waves). Σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι δεν διαδίδονται σε μέσα με μηδενικό συντελεστή ακαμψίας (μ) όπως το νερό λόγω χαλαρών μοριακών δεσμών.

2.3 Όργανα Σεισμικής Ανάκλασης

Για την εκτέλεση μιας διασκόπισης σεισμικής ανάκλασης σε εδαφική επιφάνεια χρειάζονται, η πηγή που θα παράξει τα σεισμικά κύματα και οι δέκτες αυτών των κυμάτων, τα γεώφωνα. Μέχρι τη δεκαετία του 1950 αποκλειστική σεισμική πηγή αποτελούσαν οι εκρήξεις δυναμιτών. Είναι μια σχετικά φθηνή μέθοδος που μπορεί να παράξει υψηλής ενέργειας σεισμικά κύματα. Στις μέρες μας το είδος της πηγής επιλέγεται κυρίως από τον στόχο της έρευνας. Για ρηχές διασκοπήσεις συνήθως επιλέγονται τα Vibroseis (μεγαλύτερο συχνοτικό περιεχόμενο σε σχέση με τη χρήση εκρηκτικών) προκειμένου να έχουμε μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα σε μικρά βάθη.

Τα γεώφωνα αναλαμβάνουν την καταγραφή των σεισμικών κυμάτων αφότου διαδοθούν μέσα στους γεωλογικούς σχηματισμούς. Αποτελούν ευαίσθητα όργανα στις εδαφικές κινήσεις και τα πιο κοινότυπα για σεισμικές διασκοπίσεις είναι αυτά που είναι ευαίσθητα κυρίως στην κατακόρυφη κίνηση των σχηματισμών.

2.4 Επεξεργασία Μετρήσεων

Αφότου αποκτηθούν τα σεισμικά δεδομένα από την διασκόπιση, υφίστανται επεξεργασία ώστε να έχουμε καθαρές μετρήσεις και ακριβή αποτελέσματα. Τα θεμελιώδη στάδια αυτής της επεξεργασίας στα οποία θα γίνει περεταίρω ανάλυση παρακάτω είναι τα εξής:

- A) Αποσυνέλιξη
- B) Σεισμική υπέρθεση
- Γ) Σεισμική χωροθέτηση

2.4.1 Αποσυνέλιξη (Deconvolution)

Αποτελεί μια εκ των τριών μεθόδων όπως αναφέρθηκε παραπάνω η οποία βελτιώνει την χρονική διάρκεια του κυματίου. Επίσης απομακρύνει μέρος των πολλαπλά ανακλώμενων ακτινών οι οποίες παγιδεύονται στο στρώμα του νερού σε θαλάσσιες διασκοπίσεις. Επι της ουσίας απομακρύνει την κυματομορφή της σεισμικής πηγής ώστε να έχουμε

καλύτερη εικόνα των ανακλάσεων του υπεδάφους και κάποιες φορές αποσβένει θόρυβο ο οποίος προκαλείται από σεισμικά κύματα που ανακλώνται πολλαπλές φορές. Η αποσυνέλιξη συνήθως εκτελείται πριν την υπέρθεση, πολλές φορές όμως εφαρμόζεται αποσυνέλιξη στα αποτελέσματα σεισμικών τομών υπέρθεσης.

2.4.2 Σεισμική υπέρθεση (Stacking)

Η σεισμική υπέρθεση έχει ως σκοπό την μείωση του τυχαίου θορύβου και την ενίσχυση του σήματος των σεισμικών ανακλάσεων. Αυτό επιτυγχάνεται προσθέτοντας σειсмоγράμματα κοινού ενδιάμεσου σημείου (CMD-CommonMidPoint). Τα συγκεκριμένα σειсмоγράμματα έχουν κοινό σημείο ανάκλασης προέρχονται όμως από διαφορετικές πηγές και γεώφωνα, τα οποία ισαπέχουν από το κοινό ενδιάμεσο σημείο. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι τα κύματα που έρχονται σε συμφωνία, δηλαδή τα ανακλώμενα να παρουσιάζουν αύξηση πλάτους ενώ τα κύματα που προκαλούν θόρυβο να αλληλοαναιρούνται. Δημιουργείται μια καλύτερη αναλογία σήματος-θορύβου με συνέπεια την καλύτερη απεικόνιση των ανακλαστήρων.

Συνεπώς η μέθοδος Κοινού Ενδιάμεσου Σημείου (CMP) δεν αποτελεί μέθοδο συλλογής δεδομένων στο ύπαιθρο. Είναι μια μέθοδος επεξεργασίας των σεισμικών δεδομένων που συλλέχθηκαν από τη χρήση της διάταξης κοινής πηγής. Κατά τη μέθοδο αυτή, τα σεισμικά ίχνη των διαφόρων καταγραφών κοινής πηγής τα οποία μεταξύ τους έχουν κοινό ενδιάμεσο σημείο ομαδοποιούνται. Η ομαδοποίηση αυτή των ιχνών ονομάζεται CMPgathers. Να σημειωθεί ότι το κοινό ενδιάμεσο σημείο το οποίο χαρακτηρίζει ένα CMPgather, δεν είναι απαραίτητο ότι θα αποτελεί κάποιο γεώφωνο ή πηγή. Είναι ένα σημείο που ορίζουμε

Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι πριν την άθροιση (stacking) των σειсмоγραμμάτων εκτελείται απαραίτητα δυναμική διόρθωση (NMO). *“Σκοπός της δυναμικής διόρθωσης είναι η αναγωγή όλων των χρόνων διαδρομής των ανακλώμενων κυμάτων σε χρόνους διαδρομής ανακλώμενων κυμάτων που προσπίπτουν κάθετα στις διαχωριστικές επιφάνειες, δηλαδή προέρχονται από πειράματα όπου η πηγή και το γεώφωνο είναι τοποθετημένο στη θέση του ενδιάμεσου κοινού σημείου της διάταξης.”*

(Βαφειδής 2011). Η κανονική χρονική απόκλιση (NormalMoveout, NMO) δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta T_{NMO} = t(x) - t(0) = t(0) \left[\left(1 + \frac{x^2}{V_{NMO}^2 t(0)^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (2.1)$$

Όπου $t(x)$ αναφέρεται σε γεώφωνο το οποίο απέχει από την πηγή απόσταση x , ενώ $t(0)$ είναι ο διπλός χρόνος διαδρομής κατακόρυφης ακτίνας. Η ταχύτητα V_{NMO} είναι ίση με τη μέση τετραγωνική ταχύτητα στην περίπτωση ανάκλασης από οριζόντια διαχωριστική επιφάνεια.

2.4.3 Σεισμική χωροθέτηση (Migration)

Η σεισμική χωροθέτηση είναι μια ακόμα διαδικασία με την οποία οι σεισμικές ανακλάσεις επανατοποθετούνται γεωμετρικά σε οποιοδήποτε χώρο ή χρόνο στη θέση που συνέβη το συμβάν στην υπόγεια επιφάνεια και όχι στη θέση που καταγράφηκε, δημιουργώντας έτσι μια πιο ακριβή εικόνα του υπεδάφους. Ουσιαστικά είναι υπεύθυνη για την σωστή τοποθέτηση της στρωματογραφίας σε σχέση με την ατόφια εικόνα που παρουσιάζουν τα δεδομένα που καταφθάνουν στα γεώφωνα. Αποτελεί αναντικατάστατη διαδικασία στην αλυσίδα επεξεργασίας των μετρήσεων [5].

Μια πιο αναλυτική αλυσίδα επεξεργασίας μετρήσεων βάση Yilmaz, (1987) όπου αναλόγως περίστασης και προβληματισμού ακολουθείται διαφορετική σειρά επεξεργασίας των μετρήσεων:

- 1) Εισαγωγή δεδομένων (Preprocessing) – δεδομένα κοινής πηγής
- 2) Γεωμετρική διασπορά (Geometric Spreading) – φίλτρο
- 3) Αποσυνέλιξη (Deconvolution) – βελτιώνει την ανάλυση της σεισμικής ροής μειώνοντας τη διάρκεια κύματος
- 4) Εξισορρόπηση ίχνους (Trace Balancing)

- 5) Ταξινόμηση των ιχνών σε διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου (CMP Sorting - CommonMidPointSorting)
- 6) Εκτίμηση της σεισμικής ταχύτητας (Velocity Analysis)
- 7) Στατικές διορθώσεις για το ανάγλυφο (χερσαία δεδομένα) και για το υπολειμματικό πεδίο (Residual Corrections)
- 8) Δυναμική διόρθωση (NMO Correction) – απαλλάσσει το χρόνο διαδρομής του ανακλώμενου κύματος από τον επιπλέον χρόνο που οφείλεται στην απόσταση πηγής-γεωφώνου
- 9) Υπέρθεση (Stacking) – άθροιση των ιχνών διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου με σκοπό τη βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο
- 10) Φίλτρο μεταβαλλόμενης χρονικά ενίσχυσης (Time-Variant Band-Pass Filtering)
- 11) Χωροθέτηση (Migration) – τοποθετεί τους ανακλαστήρες στην πραγματική τους θέση
- 12) Ενίσχυση (Gain)

2.6 Αλγόριθμος Συνθετικών Δεδομένων

Για την παραγωγή συνθετικών δεδομένων χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι οι οποίοι με βάση την κυματική εξίσωση προσομοιώνουν την διάδοση των σεισμικών κυμάτων στο υπέδαφος. Αποτελεί μια υπερβολική μερική διαφορική εξίσωση, συνεπώς περιέχει άγνωστες συναρτήσεις πολλαπλών μεταβλητών και τις μερικές παραγώγους αυτών [6]. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα δεδομένα των περισσότερων γεωφυσικών προβλημάτων, καθώς ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες και μηχανικές ιδιότητες των στρωμάτων, συνδέονται με μη γραμμικές σχέσεις με τις παραμέτρους του

μοντέλου. Με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σφάλματα που πρέπει να επιλυθούν όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

Οι Kelly et al. (1976) επισήμαναν ότι δύο διατυπώσεις της κυματικής εξίσωσης μπορούν να επιλύσουν το πρόβλημα.

- **Η ομογενής προσέγγιση**, στην οποία για κάθε στρώμα ξεχωριστά επιλύεται η κυματική εξίσωση. Είναι απαραίτητο να τεθούν οι οριακές συνθήκες των διεπιφανειών μεταξύ των στρωμάτων.
- **Η ετερογενής προσέγγιση**, στην οποία επιλύεται η κυματική εξίσωση άμεσα για όλα τα στρώματα. Στην συγκεκριμένη προσέγγιση οι οριακές συνθήκες των διεπιφανειών ικανοποιούνται εμμέσως και οι πιο περίπλοκες γεωμετρίες του υπεδάφους μπορούν να γίνουν αποδεκτές χωρίς επιπλέον προσπάθεια.

Επομένως η ετερογενής προσέγγιση βρίσκει ευκολότερη εφαρμογή συγκριτικά με την ομογενή προσέγγιση, διότι δεν απαιτούνται σπουδαίες αλλαγές στον κώδικα του προγράμματος από τη στιγμή που μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλαπλές γεωμετρίες του μοντέλου.

Για να γίνει επίλυση της κυματικής εξίσωσης δευτέρου βαθμού σε προγραμματιστικό περιβάλλον όπως αυτό της Matlab είναι απαραίτητη η αριθμητική παραγωγή αυτής. Ένα πρώτου βαθμού σύστημα στις διαστάσεις μήκους (x) και βάθους (z) μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\partial_t U(x, z, t) = A \partial_x U(x, z, t) + B \partial_z U(x, z, t) \quad (2.2)$$

Με U διάνυσμα εξαρτημένο από x, z και τον χρόνο (t). Εμπεριέχει στοιχεία όπως ταχύτητες και τάσεις. A και B είναι οι πίνακες που εμπεριέχουν μηχανικές ιδιότητες του υπεδάφους συναρτήσει των x, z, με $0 < x < H_x$ και $0 < z < H_z$, όπου H_x και H_z τα τελικά σημεία του δικτύου. Τέλος $\partial(x, z, t)$ αποτελεί μερική παράγωγο έχοντας ως βάση μια χωρική (x,z) ή χρονική (t) μεταβολή.

Η αριθμητική λύση της εξίσωσης βρίσκεται επιτυχώς μέσω της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών. Για να εφαρμοστεί η μέθοδος στο περιβάλλον της Matlab δημιουργήθηκαν τα εξής διανύσματα:

- $x_j = jh$ με $j = 0, 1, \dots, J$
- $z_m = mh$ με $m = 0, 1, \dots, M$

Τα οποία αποτελούν τη χωρική μεταβολή με βήμα $h > 0$ και παράλληλα τη δημιουργία του κανάβου (grid) και:

- $t_n = nk$ με $k = 0, 1, \dots, N$

Η χρονική μεταβολή με βήμα $k > 0$. Τα $J > 0$, $M > 0$, $N > 0$ είναι ακέραιοι αριθμοί.

Η αριθμητική διατύπωση της εξίσωσης που έχουμε καταλήξει είναι η παρακάτω, την οποία για λόγους ακρίβειας λύνουμε ξεχωριστά για x, z :

$$\partial_t U(x, z, t) = A \partial_x U(x, z, t) \quad (2.3)$$

$$U_{j,m}^{(1)} = U_{j,m}^n - \frac{p}{6} A_{j,m} (7U_{j,m}^n - 8U_{j+1,m}^n + U_{j+2,m}^n) \quad (2.4)$$

$$U_{j,m}^{n+1} = \frac{1}{2} (U_{j,m}^{(1)} + U_{j,m}^n) + \frac{p}{12} A_{j,m} (7U_{j,m}^{(1)} - 8U_{j-1,m}^{(1)} + U_{j-2,m}^n) \quad (2.5)$$

Όπου ο εκθέτης (1) υποδηλώνει ένα ενδιάμεσο χρονικό βήμα. Αυτό χρησιμοποιείται σε εναλλασσόμενα χρονικά βήματα με:

$$U_{j,m}^{(1)} = U_{j,m}^n + \frac{p}{6} A_{j,m} (7U_{j,m}^n - 8U_{j-1,m}^n + U_{j-2,m}^n) \quad (2.6)$$

$$U_{j,m}^{n+1} = \frac{1}{2} (U_{j,m}^{(1)} + U_{j,m}^n) - \frac{p}{12} A_{j,m} (7U_{j,m}^{(1)} - 8U_{j+1,m}^{(1)} + U_{j+2,m}^n) \quad (2.7)$$

Οι εξισώσεις (2.6),(2.7) αντιστοιχούν στους μονοδιάστατους διαφορικούς τελεστές F_x, F_x^+ στην προσέγγιση του διανύσματος U :

$$U^{n+2} = F_x F_z F_z^+ F_x^+ U^n \quad (2.8)$$

Παρόμοιες εξισώσεις περιγράφουν τους τελεστές $F_z F_z^+$.

2.7 Πεπερασμένες Διαφορές Στην Εξίσωση P-SV

Χρησιμοποιείται η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών πάρα το γεγονός ότι είναι μια τεχνική εύρεσης λύσεων κατά προσέγγιση. Σκοπός των πεπερασμένων διαφορών είναι η αντικατάσταση των παραγώγων μιας διαφορικής εξίσωσης με προσεγγίσεις των αποτελεσμάτων τους. Έτσι η τελική λύση της διαφορικής εξίσωσης δεν θα έχει καθόλου παραγώγους και θα είναι μια πλήρης αλγεβρική εξίσωση. Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, η χρήση της αλγεβρικής εξίσωσης έγκειται στη φύση της λειτουργίας των υπολογιστών της τωρινής γενιάς.

Για παράδειγμα η λύση της δισδιάστατης ελαστικής εξίσωσης κύματος σε ομογενές μέσο με μια γραμμική σεισμική πηγή διαμορφώνεται και εφαρμόζεται σε σχέση με τις ταχύτητες των σωματιδίων. Για να λυθεί όμως το πρόβλημα της διάδοσης σεισμικών κυμάτων σε δύο διαστάσεις, (βάση θεώρησης επιπέδων κυμάτων) θα χρειαστούν μόνο η οριζόντια και η κατακόρυφη (x,z) συνιστώσα. Ενώ στην τρίτη συνιστώσα (y) η ταλάντωση των σωματιδίων θεωρείται μηδενική. Οι κύριες εξισώσεις για τη διάδοση κυμάτων σε ανομοιογενή μέσα είναι (Βαφείδης, 1988):

$$\begin{aligned} \rho(x,z) \frac{\partial^2 u(x,z,t)}{\partial t^2} = & \frac{\partial}{\partial x} \left((\lambda(x,z) + 2\mu(x,z)) \frac{\partial w(x,z,t)}{\partial z} + \lambda(x,z) \frac{\partial u(x,z,t)}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu(x,z) \frac{\partial w(x,z,t)}{\partial x} + \mu(x,z) \frac{\partial u(x,z,t)}{\partial z} + \mu(x,z) \frac{\partial w(x,z,t)}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \rho(x,z) \frac{\partial^2 w(x,z,t)}{\partial t^2} = & \frac{\partial}{\partial z} \left((\lambda(x,z) + 2\mu(x,z)) \frac{\partial w(x,z,t)}{\partial z} + \lambda(x,z) \frac{\partial u(x,z,t)}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu(x,z) \frac{\partial u(x,z,t)}{\partial z} + \mu(x,z) \frac{\partial w(x,z,t)}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Όπου $u(x,z,t)$, $w(x,z,t)$: μετατοπίσεις στις x και z διεύθυνση

$\mu(x,z)$, $\lambda(x,z)$: παράμετροι Lamé

$\rho(x,z)$ η πυκνότητα και ∂ υποδηλώνει μερική παράγωγο.

Το συγκεκριμένο σύστημα δεύτερης τάξης, θα πρέπει να επιλυθεί αριθμητικά ως σύστημα πρώτης τάξης. Θα αποτελείται από τις εξισώσεις κίνησης για τις συνιστώσες x και z :

$$\rho(x,z)\partial_t \dot{u}(x,z,t) = \partial_x \sigma_{xx}(x,z,t) + \partial_z \sigma_{xz}(x,z,t) \quad (2.11)$$

$$\rho(x,z)\partial_t \dot{w}(x,z,t) = \partial_x \sigma_{xz}(x,z,t) + \partial_z \sigma_{zz}(x,z,t) \quad (2.12)$$

και τις εξισώσεις των τάσεων/παραμορφώσεων

$$\partial_t \sigma_{xx}(x,z,t) = (\lambda(x,z) + 2\mu(x,z))\partial_x \dot{u}(x,z,t) + \lambda(x,z)\partial_z \dot{w}(x,z,t) \quad (2.13)$$

$$\partial_t \sigma_{xz}(x,z,t) = \mu(x,z)\partial_x \dot{w}(x,z,t) + \mu(x,z)\partial_z \dot{u}(x,z,t) \quad (2.14)$$

$$\partial_t \sigma_{zz}(x,z,t) = \lambda(x,z)\partial_x \dot{u}(x,z,t) + (\lambda(x,z) + 2\mu(x,z))\partial_z \dot{w}(x,z,t) \quad (2.15)$$

όπου σ_{xx} , σ_{xz} , σ_{zz} , αποτελούν τον τανυστή των τάσεων και οι τελείες είναι παράγωγα ως προς τον χρόνο.

Για να γίνουν οι υπολογισμοί γρήγορα και αποτελεσματικά σε έναν υπολογιστή θα πρέπει να γίνουν ταυτόχρονα σε διαφορετικά μέρη. Οι εξισώσεις (1) και (2) μπορούν να γραφούν ως ένα σύστημα εξισώσεων σε μορφή πίνακα:

$$\partial_t \begin{bmatrix} u \\ w \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \rho^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \rho^{-1} \\ \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \partial_x \begin{bmatrix} u \\ w \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \rho^{-1} \\ 0 & 0 & 0 & \rho^{-1} & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \partial_z \begin{bmatrix} u \\ w \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

ή

$$\partial U = A \partial_x U + B \partial_z U \quad (2.17)$$

Το σύστημα αυτό μπορεί να γραφτεί:

$$E_0 \partial_t U = A_0 \partial_x U + B_0 \partial_z U \quad (2.18)$$

2.8 Ακρίβεια, Σύγκλιση, Ευστάθεια, Διασπορά

Έχουν καθιερωθεί ποικίλες διαφορετικές προσεγγίσεις για υπερβολικά συστήματα και έχουν εφαρμοστεί σε διάφορα πεδία. Περαιτέρω ανάλυση του συστήματος γίνεται στην εργασία του Παγιαλάκη, 2014. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι σημαντικό να αναφερθούν τα κριτήρια που πρέπει να ελεγχθούν για την σταθερότητα, την ευστάθεια και γενικότερα την ομαλή διεξαγωγή ενός ρεαλιστικού μοντέλου. Τα κριτήρια είναι τα εξής:

- **Ακρίβεια**

Για να ελεγχθεί η ακρίβεια του μοντέλου μας, αρκεί η διαφορά E , μεταξύ της ακριβούς λύσης της διαφορικής εξίσωσης W με την αριθμητική λύση αυτής, U , σε ένα τυχαίο σημείο του δικτύου. (j,h,m,h,nk) .

$$E_{j,m}^n = W_{j,m}^n - U_{j,m}^n \quad (2.19)$$

- **Σύγκλιση**

Η σύγκλιση του συστήματος επιτυγχάνεται όταν επέλθει ένα τέλος στις λύσεις του συστήματος. Μπορεί να εξασφαλιστεί όταν το σύστημα είναι σταθερό και το σφάλμα αποκοπής να τείνει στο μηδέν. Όπου σφάλμα αποκοπής περιέχεται εντός της εξίσωσης και ορίζεται ως:

$$P = \frac{k}{h} \quad (2.20)$$

Άρα το k , δηλαδή η χρονική μεταβολή, να τείνει στο μηδέν.

- **Ευστάθεια**

Για την ευστάθεια του συστήματος θα πρέπει να επαληθεύεται η συνθήκη των Gottlieb και Turkel (1976):

$$\frac{\Delta_t}{\Delta_x} * V_{P_{max}} \leq \frac{2}{3} \quad (2.21)$$

Όπου $V_{P_{max}}$: η μέγιστη ταχύτητα P- κυμάτων.

Δ_t : η διακριτοποίηση στο χώρο του χρόνου (t) και Δ_x : η διακριτοποίηση στο χώρο του χώρου (x-z).

- **Διασπορά**

Για την αριθμητική διασπορά, δηλαδή τα σφάλματα φάσης που δημιουργούνται λόγω του ότι έχουμε διακριτό χώρο μετάδοσης, πρέπει να πληρείται το παρακάτω κριτήριο:

$$\frac{\lambda_{min}}{h} > 6 \quad (2.22)$$

Όπου $\lambda = \frac{a_{min}}{f_{max}}$

Με a_{min} : ελάχιστη ταχύτητα των S-κυμάτων

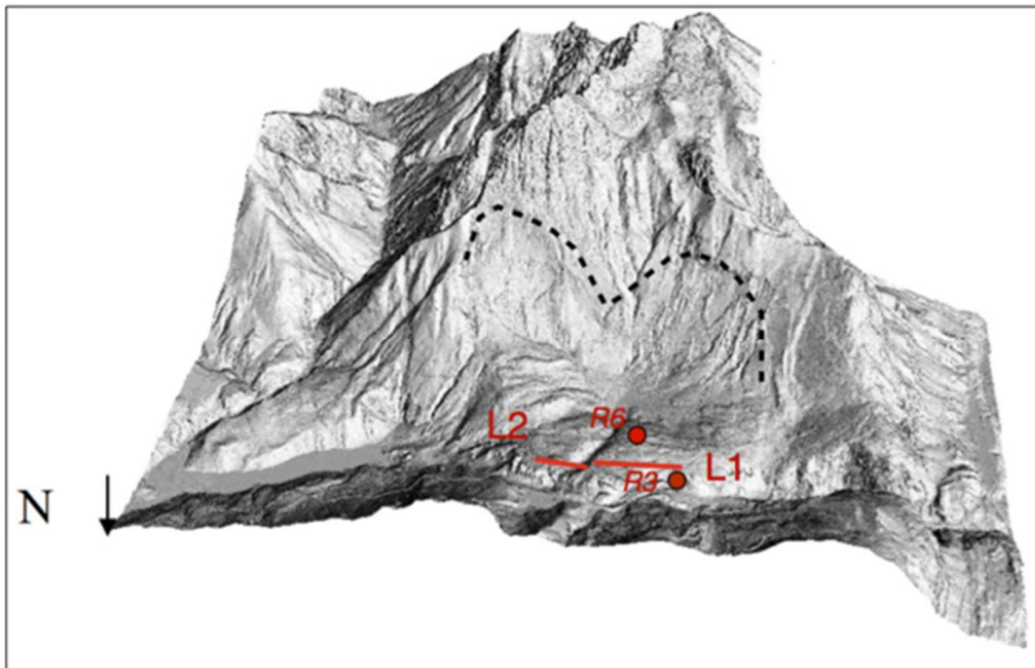
f_{max} : κεντρική συχνότητα διάδοσης κυμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ3:

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ

ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1 Δημιουργία Μοντέλου Συνθετικών Δεδομένων

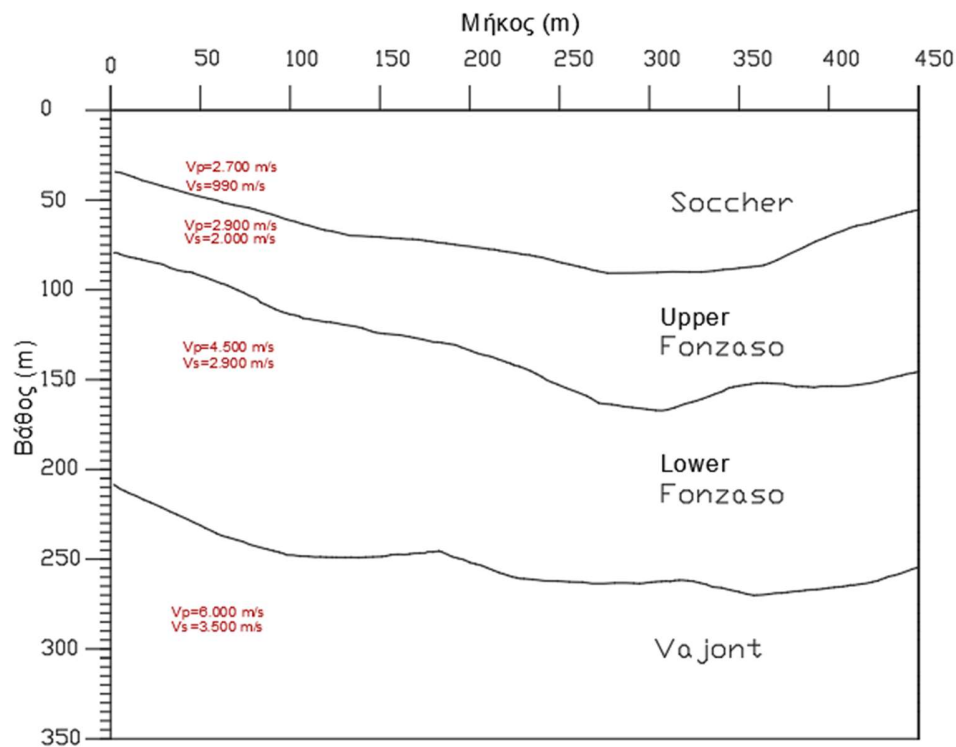


Εικόνα 3.1: L1, L2: γραμμές μελέτης του paper των Petronio et al (2016), R6, R3: προ υπάρχουσες γεωτρήσεις από παλαιότερες μελέτες, Διακεκομμένη Γραμμή: κορυφή της κατολίσθησης

Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από την εργασία των Petronio et al (2016). Συγκεκριμένα εξετάστηκε η σεισμική γραμμή μελέτης L1 που διασκοπήθηκε στην περιοχή της κατολίσθησης (Εικόνα 3.1). Το μοντέλο ταχυτήτων της L1 προέκυψε από το συνδυασμό των αποτελεσμάτων της σεισμικής ανάκλασης P και S-κυμάτων καθώς και της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων. Το μοντέλο αυτό επιβεβαιώθηκε από τα στοιχεία της γεώτρησης R3.

Για να επιτευχθεί η μοντελοποίηση της έρευνας των Petronio et al. (2016) χρειάστηκαν οι ακριβείς θέσεις των διεπιφανειών μεταξύ των στρωμάτων, οι ταχύτητες V_p , V_s των στρωμάτων και οι πυκνότητές τους. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πιθανή καλύτερη πρόταση ως προς την εκτέλεση της διασκόπισης σεισμικής ανάκλασης και επεξεργασίας των δεδομένων. Γι' αυτό έγινε χρήση των αποτελεσμάτων της έρευνας των Petronio et al. (2016).

Έγινε χρήση των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων και ενός διαγράμματος που απεικονίζει τα βασικά στρώματα που συνθέτουν την κατολίσθηση. Μια φωτογραφία δεν είναι αξιόλογη πηγή για την συλλογή μετρήσεων καθώς η κλίμακα είναι παραμορφωμένη και με το μάτι δεν είναι εφικτή η ακριβής συλλογή δεδομένων σε μεγέθη μεγάλης διάστασης. Με τη βοήθεια του προγράμματος AutoCAD 2017 αναπροσαρμόστηκαν οι άξονες του διαγράμματος στην σωστή τους κλίμακα. Με αυτόν τον τρόπο ψηφιοποιήθηκε η εικόνα ώστε να είναι εφικτή η προσέγγιση των συντεταγμένων του κάθε στρώματος, με σφάλμα που να μην επηρεάζει την μετέπειτα πορεία της διπλωματικής εργασίας. Με τις συγκεκριμένες συντεταγμένες δημιουργήθηκε ένα βοηθητικό διάγραμμα για την περαιτέρω συλλογή δεδομένων. Τα αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω.



Σχήμα 3.2: Μοντέλο των στρωματογραφίας της προς εξέταση περιοχής

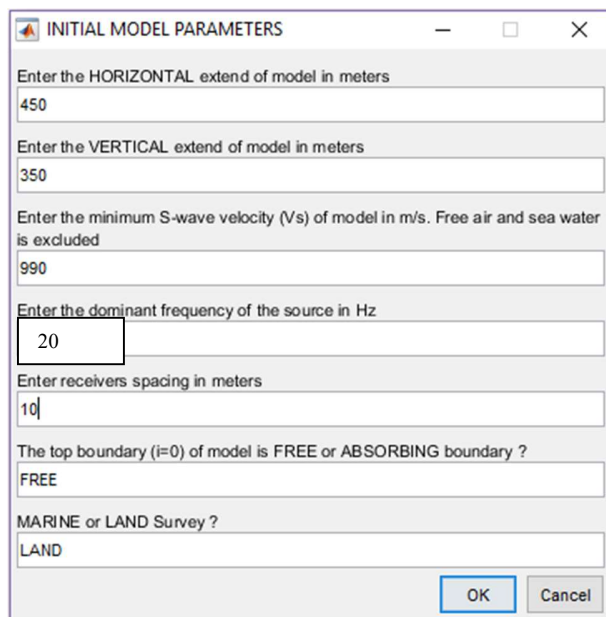
Μέσω του διαγράμματος ευρέθη ο μέσος χρόνος καταγραφής T_δ των ανακλώμενων διαμήκων κυμάτων (V_p), οι διπλοί κατακόρυφοι χρόνοι $T_i(0)$ και οι πυκνότητες των στρωμάτων $\rho_{(i)}$ οι οποίες προσδιορίστηκαν με εμπειρικό τύπο.

3.2 Δημιουργία Συνθετικών Δεδομένων Στο Περιβάλλον Της MatLab

3.2.1 Εισαγωγή Μοντέλου Στον Αλγόριθμο Προσομοίωσης

Λαμβάνοντας υπόψιν το θεωρητικό υπόβαθρο καθώς και όλα τα απαραίτητα στάδια ελέγχου που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, δημιουργήθηκε το μοντέλο στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab. Οι αλγόριθμοι διάδοσης σεισμικών κυμάτων (P-SV) σε δύο (2) διαστάσεις με τη χρήση πεπερασμένων, αναπτύχθηκαν στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Αρχικά κατά την εκτέλεση του προγράμματος απαιτείται να εισαχθεί η οριζόντια έκταση και το βάθος του μοντέλου (450m x 350m), η ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων που αντιστοιχεί στον σχηματισμό Soccher (990m/s), η κυρίαρχη συχνότητα της πηγής (20Hz) και η απόσταση μεταξύ πηγής-γεωφώνων (10m).



INITIAL MODEL PARAMETERS

Enter the HORIZONTAL extend of model in meters
450

Enter the VERTICAL extend of model in meters
350

Enter the minimum S-wave velocity (Vs) of model in m/s. Free air and sea water is excluded
990

Enter the dominant frequency of the source in Hz
20

Enter receivers spacing in meters
10

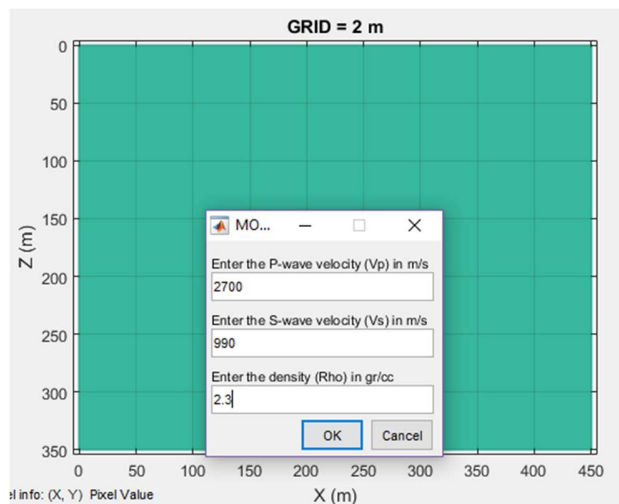
The top boundary (i=0) of model is FREE or ABSORBING boundary ?
FREE

MARINE or LAND Survey ?
LAND

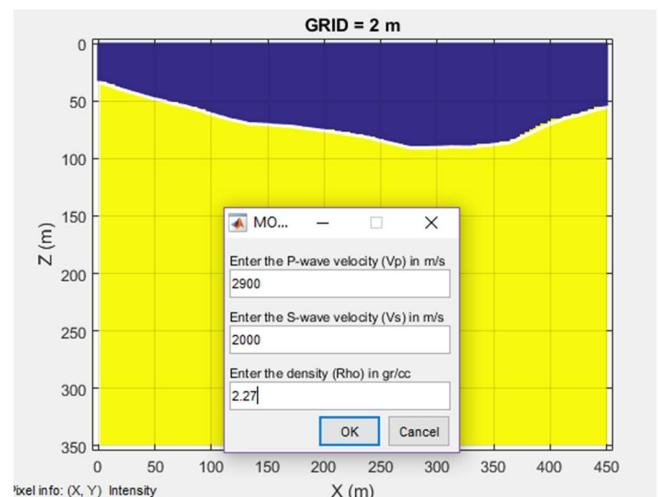
OK Cancel

Σχήμα 3.3: Απεικόνιση αρχικών παραμέτρων του μοντέλου.

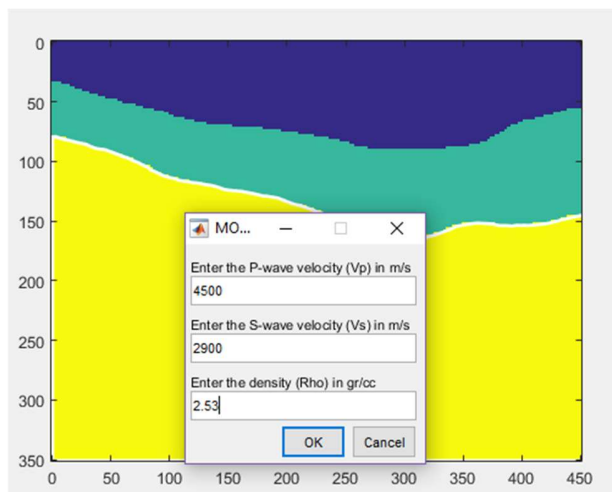
Στη συνέχεια εισάγουμε τις συντεταγμένες των στρωμάτων που συγκεντρώσαμε μέσω της ψηφιοποίησης του διαγράμματος της εργασίας των Petronioetal (2016). Τα στρώματα και συνεπώς το σύνολο του μοντέλου επιβάλλεται να περιορίζεται από κάποια όρια, αλλιώς θα υπάρξουν προβλήματα με την χωρητικότητα της μνήμης του υπολογιστή.



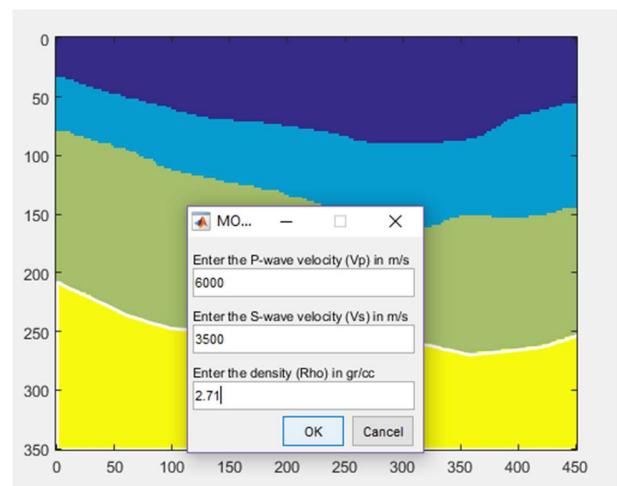
Σχήμα 3.4: Παράμετροι σεισμικού μοντέλου για το στρώμα Soccher



Σχήμα 3.5: Παράμετροι σεισμικού μοντέλου για το στρώμα Upper Fonzaso



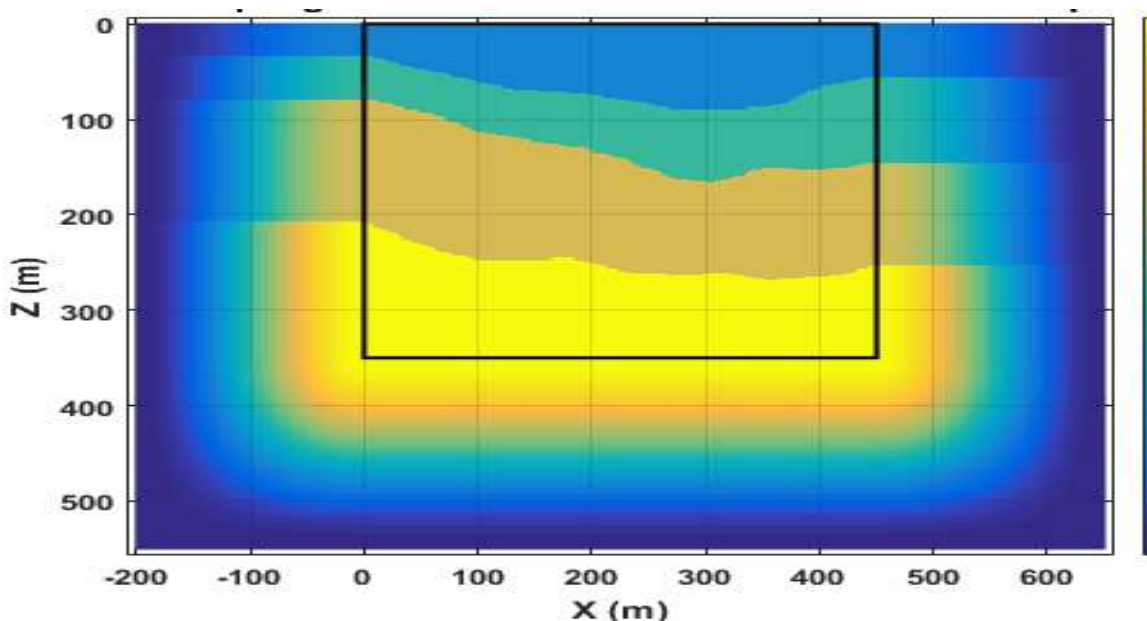
Σχήμα 3.6: Παράμετροι σεισμικού μοντέλου για το στρώμα Lower Fonzaso



Σχήμα 3.4: Παράμετροι σεισμικού μοντέλου για το στρώμα Vajont

«Οι μέθοδοι των σύνθετων ορίων απορρόφησης έχουν αναπτυχθεί για την αριθμητική προσομοίωση των σεισμικών κυμάτων. Αυτές οι μέθοδοι συνδυάζουν συνθήκες ορίων απορρόφησης χαμηλής γωνίας, με βάση την χαρακτηριστική ανάλυση της μονοδιάστατης κυματικής εξίσωσης και την εφαρμογή, είτε ανισότροπου φίλτρου είτε “φίλτρου-σφουγγάρι”. Η μέθοδος ανισότροπων φίλτρων ρυθμίζει την κατεύθυνση διάδοσης των κυμάτων, έτσι ώστε το όριο της γωνίας πρόσπτωσης να είναι 90ο. Η μέθοδος του «φίλτρου-σφουγγάρι» προσδίδει στη μεταβατική ζώνη ένα μηχανισμό διάχυσης ο οποίος αποσβένει επιλεκτικά τα εισερχόμενα κύματα. Αυτές οι μέθοδοι απορροφούν όχι μόνο τα κύματα του χώρου, αλλά και τα επιφανειακά κύματα. Μια στενή ζώνη μετάβασης, της οποίας το πλάτος είναι μικρότερο απ’ ότι στην προσέγγιση του “φίλτρου-σφουγγάρι”, εισάγεται δίπλα σε ένα υπολογιστικό όριο. Αριθμητικά παραδείγματα επεξηγούν την αποτελεσματικότητα των μεθόδων αυτών στην απορρόφηση των τεχνητών ανακλάσεων» (Παγιαλάκης, 2014).

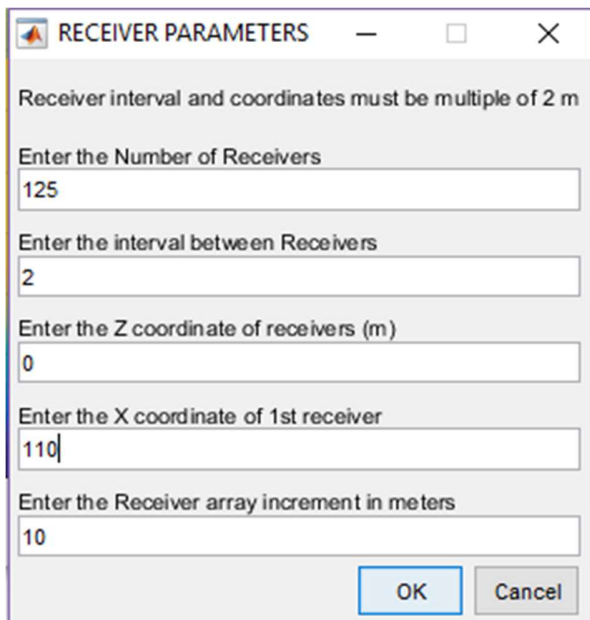
Κατ' ακολουθίαν τα όρια του μοντέλου πρέπει να συμπεριφέρονται ως μη υπαρκτά όπως στο φυσικό περιβάλλον (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3: Το μαύρο πλαίσιο απεικονίζει το μοντέλο προς μελέτη.

3.2.2 Καθορισμός των παραμέτρων του πειράματος

Επόμενο βήμα ήταν ο ορισμός της σεισμικής γραμμής, δηλαδή ο αριθμός των γεωφώνων (125) και των πηγών (18). Η οριζόντια θέση της πρώτης ορίστηκε στα 100m ενώ του πρώτου γεωφώνου στα 110m, με ισαπόσταση μεταξύ των γεωφώνων να ισούται με 2m. Κατά το βάθος τα γεωφώνα βρίσκονται στα 0m ενώ η πηγή στα 4m. Η μετακίνηση της σεισμικής γραμμής γινόταν ανά 4m. Να σημειωθεί ότι η πηγή βρίσκεται στα 4m κάτω από το έδαφος λόγω περιορισμού. Η ελάχιστη απόσταση που μπορεί να έχει μια πηγή από οποιαδήποτε διαχωριστική επιφάνεια ή όριο του μοντέλου πρέπει να είναι τριπλάσια της ισαπόστασης των διαδοχικών κόμβων του πλέγματος.



RECEIVER PARAMETERS

Receiver interval and coordinates must be multiple of 2 m

Enter the Number of Receivers
125

Enter the interval between Receivers
2

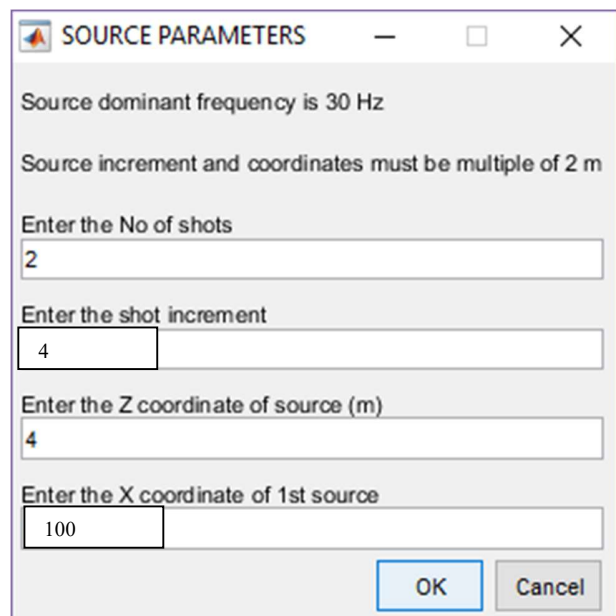
Enter the Z coordinate of receivers (m)
0

Enter the X coordinate of 1st receiver
110

Enter the Receiver array increment in meters
10

OK Cancel

Σχήμα 3.4: Παράμετροι γεωφώνων



SOURCE PARAMETERS

Source dominant frequency is 30 Hz

Source increment and coordinates must be multiple of 2 m

Enter the No of shots
2

Enter the shot increment
4


Enter the Z coordinate of source (m)
4

Enter the X coordinate of 1st source
100

OK Cancel

Σχήμα 3.5: Παράμετροι πηγών

Στο τελευταίο βήμα ορίζεται ο συνολικός χρόνος καταγραφής όπως και επιπρόσθετες επιλογές για τους χρόνους στους οποίους το πρόγραμμα θα αποθηκεύσει χρονικά στιγμιότυπα της διάδοσης του σεισμικού κύματος.

 T..
 —
□
✕

Enter the record length (ms)

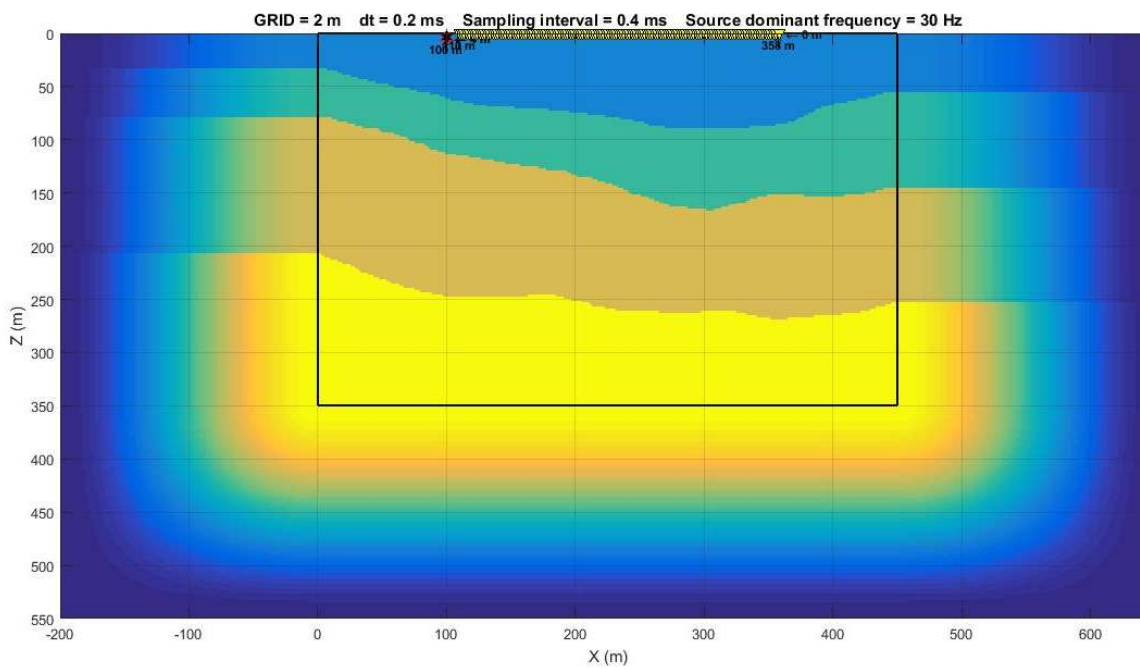
Enter the Number of Snapshots

Enter the first snapshot time (ms)

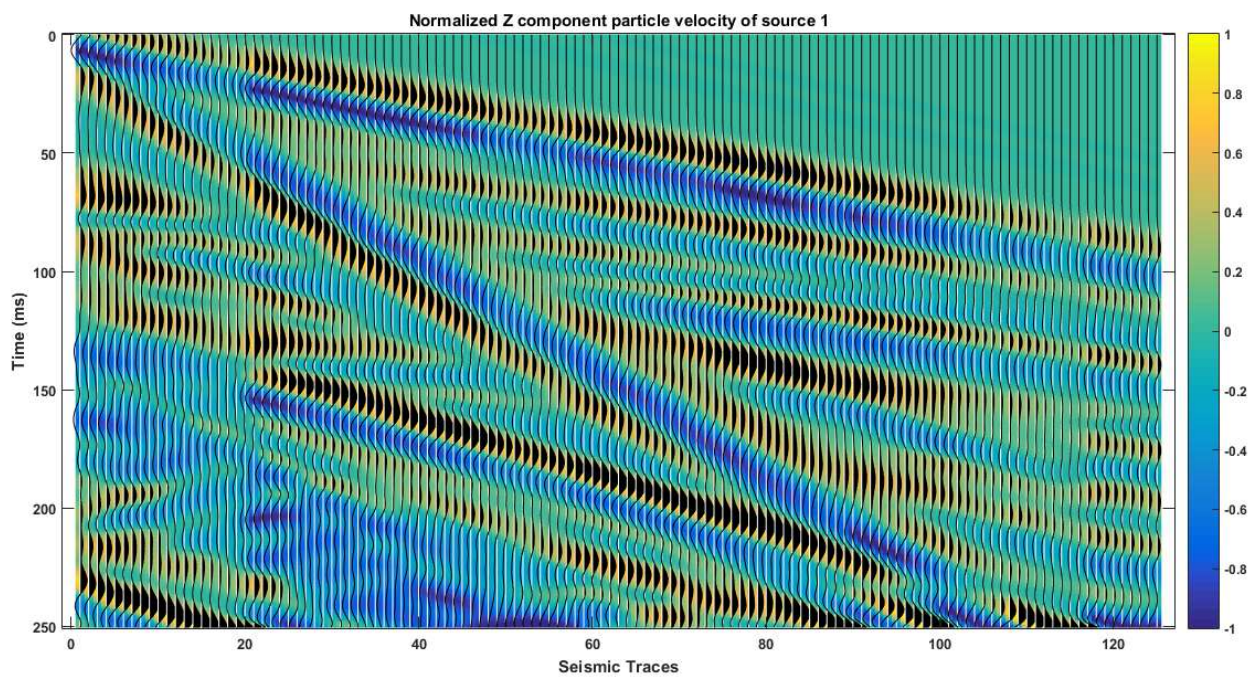
Enter snapshot increment (ms)

Σχήμα3.6: Παράμετροι Χρόνου

Τα αποτελέσματα για την πρώτη πηγή φαίνονται παρακάτω στα σχήματα 3.7, 3.8.



Σχήμα 3.7: Μοντέλο βάθους. Στην οριζόντια διεύθυνση η έκταση του μοντέλου είναι 450m ενώ στην κατακόρυφη (βάθος) είναι 350m. Το κόκκινο αστέρι απεικονίζει την πηγή στα 100m, τα κίτρινα τρίγωνα απεικονίζουν τα γεωφώνα με ισαπόσταση 2m και θέση πρώτου γεωφώνου στα 110m



Σχήμα 3.8: Συνθετικά δεδομένα για την πηγή που βρίσκεται στα 100m του μοντέλου. Θέση πρώτου γεωφώνου στα 110m

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Τα βήματα επεξεργασίας των δεδομένων είναι τα ακόλουθα:

- 1) Εκτίμηση των μέσων τετραγωνικών ταχυτήτων V_{RMS} στις θέσεις των πηγών.
- 2) Δημιουργία δρομοχρονικού διαγράμματος για κάθε πηγή και αναγνώριση των ανακλώμενων κυμάτων στα συνθετικά δεδομένα.
- 3) Αποκοπή απευθείας κυμάτων.
- 4) Δημιουργία μοντέλου μέση τετραγωνικής ταχύτητας.
- 5) Χωροθέτηση δεδομένων κοινής πηγής.
- 6) Υπέρθεση για τη δημιουργία χωροθετημένης τομής

4.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΣΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ-ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΡΟΜΟΧΡΟΝΙΚΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ-ΑΠΟΚΟΠΗ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΚΥΜΑΤΩΝ

Για τον υπολογισμό και εντοπισμό των απευθείας κυμάτων, έγινε χρήση του αρχικού διαγράμματος της γεωμετρίας του μοντέλου ώστε να υπολογιστούν οι ακριβείς διπλοί κατακόρυφοι χρόνοι κάτω από κάθε πηγή. Αρχικά έγινε υπολογισμός των κατακόρυφων αποστάσεων που απέχουν οι πηγές από κάθε ανακλαστήρα (Πίνακας 1) με τη χρήση του Διαγράμματος (Σχήμα 3.2).

Θέσεις Πηγής (m)	Soccher- z_1 (m)	Upper Fonzaso- z_2 (m)	Lower Fonzaso- z_3 (m)
100	61,25	113,6	247,62
104	62,35	114,39	247,99
108	63,53	115,86	248,29
112	64,59	116,48	248,52
116	65,81	117,15	248,61

120	66,77	117,83	248,77
124	67,44	118,21	248,83
128	68,4	118,97	248,88
132	69,4	119,66	248,89
136	69,8	120,27	248,94
140	69,94	121,2	248,88
144	70,18	122,61	248,7
148	70,39	123,77	248,57
152	70,7	124,3	248,31
156	71,11	124,64	247,44
160	71,29	124,97	247,17
164	71,59	125,63	247,31
168	71,69	126,4	246,79

Πίνακας 4.1: Βάθος των κύριων ανακλαστήρων κάτω από τις θέσεις της πηγής

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι διπλοί κατακόρυφοι χρόνοι κάτω από κάθε πηγή, για όλα τα στρώματα (Πίνακας 2).

Θέσεις πηγών (m)	Soccher- $T_1(0)$ (m)	Upper Fonzaso- $T_2(0)$ (m)	Lower Fonzaso- $T_3(0)$ (m)
100	0,04537	0,123715	0,2337685
104	0,046185	0,125075	0,2352926
108	0,047059	0,126963	0,2373138
112	0,047844	0,128175	0,2386288
116	0,048748	0,129541	0,2400346
120	0,049459	0,130721	0,2412858
124	0,049956	0,13148	0,2420708
128	0,050667	0,132715	0,2433283
132	0,051407	0,133932	0,2445493
136	0,051704	0,134649	0,2452885
140	0,051807	0,135394	0,2460069
144	0,051985	0,136544	0,2470771
148	0,052141	0,137499	0,2479749
152	0,05237	0,138095	0,2484545
156	0,052674	0,138633	0,248606
160	0,052807	0,138994	0,2488469
164	0,05303	0,139671	0,2495866
168	0,053104	0,140276	0,2499606

Πίνακας 4.2: Διπλοί κατακόρυφοι χρόνοι κάτω από κάθε πηγή για κάθε κύριο ανακλαστήρα

Με:

$$Tn(0) = \sum_{i=1}^n \frac{2z_i}{v_{p_i}} \quad (4.1)$$

Όπου V_{p_i} : ταχύτητα των κυμάτων για το εκάστοτε στρώμα, z_i .

Με τη χρήση του παρακάτω τύπου υπολογίστηκαν οι μέσες τετραγωνικές ταχύτητες V_{RMS}

$$V_{RMS}^2 = \frac{\sum_i v_{p_i}^2 t_i}{\sum_i t_i} \quad (4.2)$$

Όπου V_{p_i} : ταχύτητα των κυμάτων για το εκάστοτε στρώμα,

t_i : διπλός κατακόρυφος χρόνος για κάθε στρώμα ξεχωριστά.

Θέσεις πηγών (m)	Soccher- V_{RMS} (1) (ms)	Upper Fonzaso- V_{RMS} (2) (ms)	Lower Fonzaso- V_{RMS} (3) (ms)
100	2700	2828,296	3710,3439
104	2700	2827,796	3706,2584
108	2700	2827,52	3700,4748
112	2700	2827,001	3696,7262
116	2700	2826,399	3692,2568
120	2700	2825,994	3688,6131

124	2700	2825,678	3686,1938
128	2700	2825,317	3682,2647
132	2700	2824,908	3678,3402
136	2700	2824,877	3676,204
140	2700	2825,144	3673,9371
144	2700	2825,525	3670,3048
148	2700	2825,825	3667,3358
152	2700	2825,82	3665,117
156	2700	2825,677	3661,9992
160	2700	2825,683	3660,4764
164	2700	2825,732	3658,7235
168	2700	2825,952	3656,1637

Πίνακας 4.3: Μέσες τετραγωνικές ταχύτητες κάτω από κάθε πηγή για κάθε κύριο ανακλαστήρα

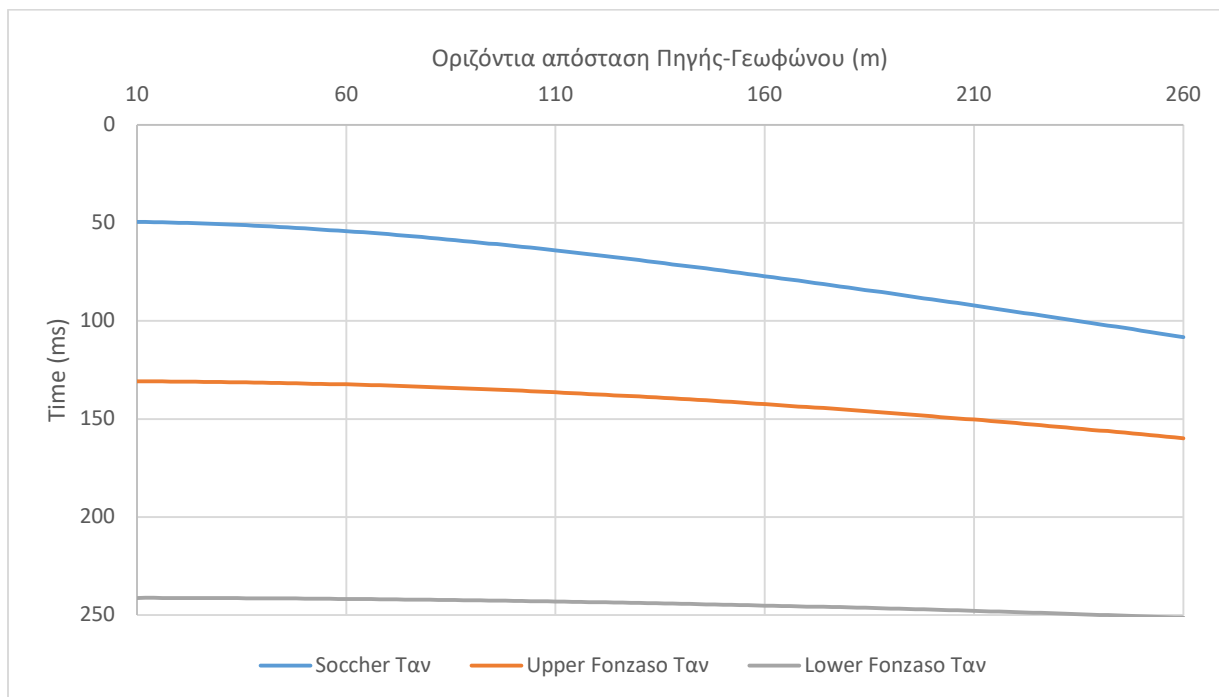
Για την εύρεση του χρόνου διαδρομής των ανακλώμενων κυμάτων από την πηγή σε όλα τα γεώφωνα, σε όλες τις θέσεις των πηγών, έγινε χρήση της εξίσωσης (4.3) με σκοπό την αναγνώριση των ανακλώμενων κυμάτων (Σχήμα 4.1).

$$T_{AN}^2 = \frac{T_i(0)^2 + d_j^2}{V_{RMSi}^2} \quad (4.3)$$

Όπου V_{RMSi} : μέση τετραγωνική ταχύτητα για τον i ανακλαστήρα,

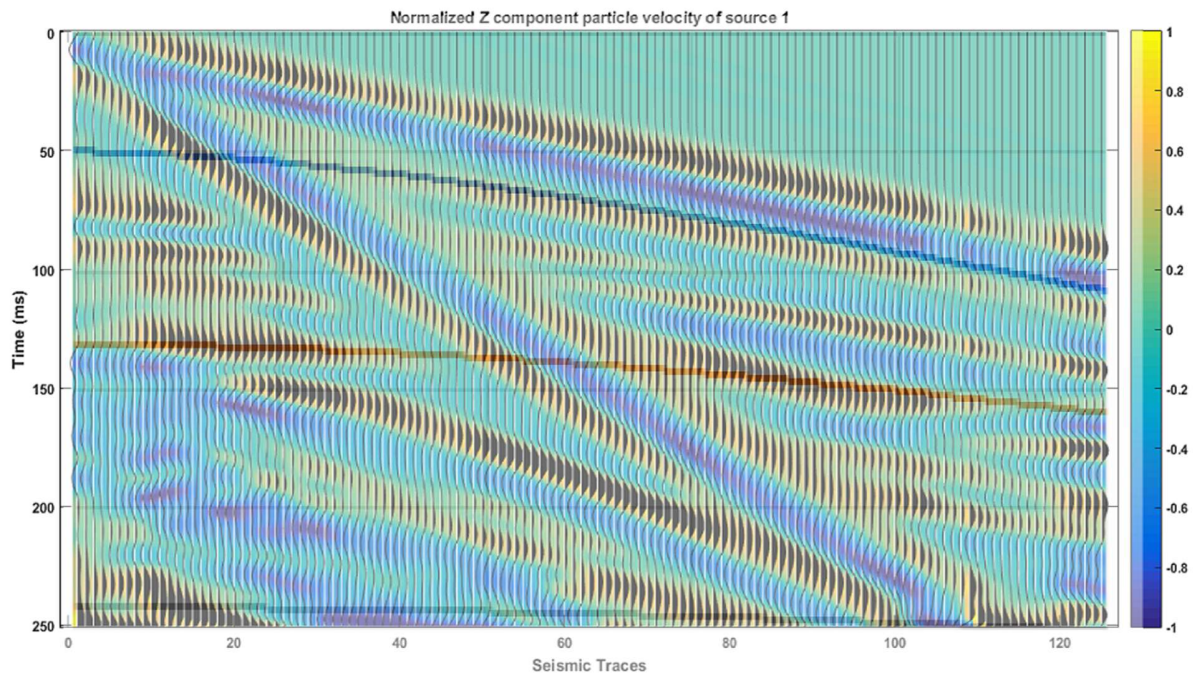
d_j : απόσταση μεταξύ πηγής με γεώφωνο j .

Ενδεικτικά στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το δρομοχρονικό διάγραμμα για ανακλώμενα κύματα και θέση πηγής 6, στα 120m.



Σχήμα 4.1: Δρομοχρονικό Διάγραμμα πηγής 6, στα 120m.

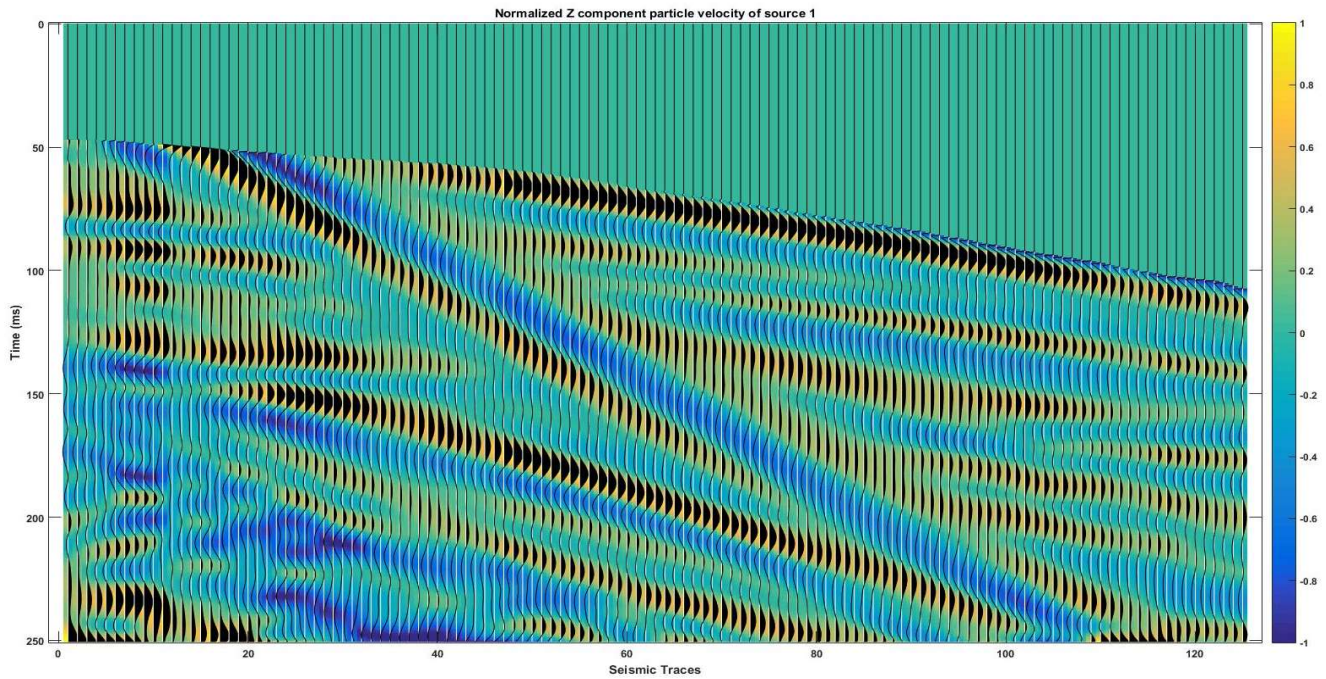
Υπερθέτοντας τα διαγράμματα (CorelDRAWX5) με τα αντίστοιχα δρομοχρονικά και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τις συνθετικές καταγραφές, παρατηρείται ότι είναι εύκολο να εντοπιστούν τα απευθείας κύματα. Δημιουργώντας μία «μάσκα» μέσω του προγράμματος Matlab, μηδενίστηκαν όλες οι καταγραφές των απευθείας κυμάτων και κρατήθηκαν οι υπόλοιπες. Σε μεγάλες αποστάσεις τα απευθείας κύματα παραμένουν.



Σχήμα 4.2: Συνθετικά δεδομένα με υπέρθεση το αντίστοιχο δρομοχρονικό διάγραμμα (πηγή 6, στα 120 m).

Στο Σχήμα 4.2 παρατηρείται έντονα η καταγραφή από το πρώτο γεώφωνα έως το εκατοστό. Για την επιβεβαίωση ότι πρόκειται για θόρυβο από επιφανειακά κύματα πρέπει να γίνει έλεγχος της ταχύτητας διάδοσης των συγκεκριμένων κυμάτων. Ελέγχοντας την κλίση των καταγραφών είναι εφικτός ο υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης. Ορίζονται δύο καθαρά σημεία στο εικοστό και το εκατοστό γεώφωνο τα οποία έχουν απόσταση μεταξύ τους $\Delta x = 160\text{m}$ και εν συνεχεία υπολογίζεται η διαφορά στο χρόνο από την πρώτη καταγραφή που λαμβάνουν τα δύο γεώφωνα από το συγκεκριμένο κύμα, η οποία είναι $\Delta t = 175\text{ms}$. Η ταχύτητα διάδοσης που προκύπτει είναι $u = 900\text{m/s}$.

Επομένως, η ταχύτητα όντας μικρότερη των S-κυμάτων του πρώτου στρώματος, καθώς τα επιφανειακά κύματα ταξιδεύουν με χαμηλότερες ταχύτητες, συμπεραίνεται πως πρόκειται για επιφανειακά κύματα τα οποία παρουσιάζουν μεγάλα πλάτη κύματος και έχουν σαν αποτέλεσμα την υποβάθμιση της καταγραφής.



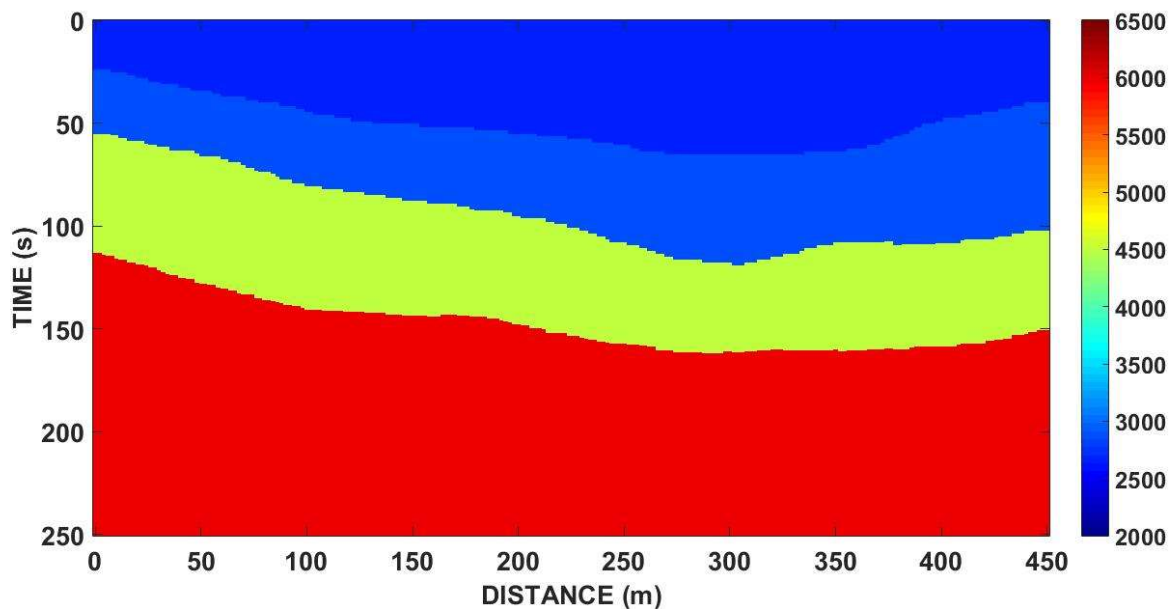
Σχήμα 4.3: Συνθετικά δεδομένα με μάσκα (πηγή 6, 120m).

Μετά την αποκοπή της πρώτης άφιξης (Σχήμα 4.3) παρατηρείται πως παραμένει μέρος των απευθείας κυμάτων λόγω του ότι η κυρίαρχη συχνότητα των διαδιδόμενων κυμάτων είναι σχετικά μικρή. Αυτό είναι δυνατό να αποτελέσει θόρυβο στα τελικά αποτελέσματα.

4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΣΗΣ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Μοντέλο τμηματικής ταχύτητας (VelocityModel)

Το μοντέλο τμηματικής ταχύτητας, όπως αρχικά είχε οριστεί, περιγράφει τις ταχύτητες σε σχέση με το βάθος (z). Για να είναι εφικτή η υπέρθεση του μοντέλου με τα αποτελέσματα της χωροθέτησης έπρεπε να μετατραπεί σε μοντέλο τμηματικής ταχύτητας (V_{int}) ως προς τον χρόνο (t). Η μετατροπή έγινε με τη χρήση του κώδικα στη Matlab (Σχήμα 4.4).

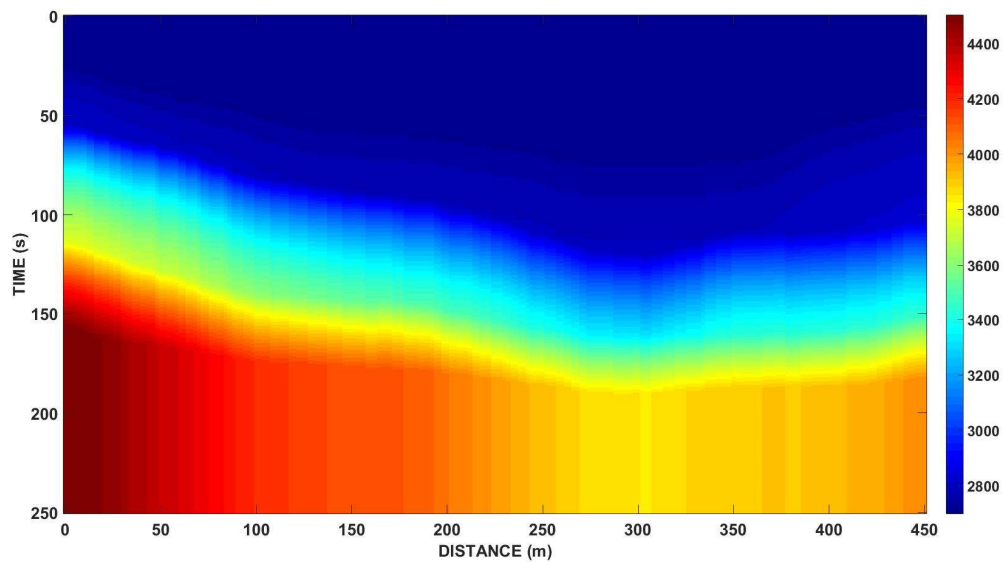


Σχήμα 4.4: Μοντέλο τμηματικής ταχύτητας (V_{int}).

Γνωρίζοντας τις τμηματικές ταχύτητες (V_{int}) και έχοντας υπολογίσει τους διπλούς χρόνους διαδρομής (T_0), είναι εφικτός ο υπολογισμός της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας (V_{rms}) της σχέσης 4.2.

Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο GridData στο λογισμικό της Matlab, εφαρμόζεται η σχέση 4.2 για κάθε θέση που είναι γνωστή η μέση τετραγωνική ταχύτητα (V_{rms}) και

προκύπτει το παρακάτω μοντέλο μέσης τετραγωνικής ταχύτητας απεικονισμένο σε χρωματική κλίμακα.



Σχήμα 4.5: Μοντέλο μέσης τετραγωνικής ταχύτητας V_{rms}

4.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΕ ΥΠΕΡΘΕΣΗ

Σεισμική Χωροθέτηση (Kirchhoff migration), Υπέρθωση (Stacking)

Η μέθοδος χωροθέτησης Kirchhoff κατέχει εξέχουσα θέση στην επεξεργασία σεισμικών δεδομένων. Στην ουσία, αυτός ο τύπος χωροθέτησης είναι μια μέθοδος επεξεργασίας εικόνας. Επιπλέον αυτή η μέθοδος σεισμικής χωροθέτησης δεν παρουσιάζει προβλήματα στην χωροθέτηση ανακλαστήρων με μεγάλη κλίση.

Η σεισμική χωροθέτηση Kirchhoff είναι μια μέθοδος στην οποία οι ανακλαστήρες επανατοποθετούνται γεωμετρικά σε οποιοδήποτε χώρο ή χρόνο στη θέση που συνέβη το συμβάν στην υπόγεια επιφάνεια και όχι στη θέση που καταγράφηκε, δημιουργώντας έτσι μια πιο ακριβή εικόνα του υπεδάφους. Ουσιαστικά είναι υπεύθυνη για την σωστή τοποθέτηση της στρωματογραφίας σε σχέση με τις καταγραφές που λαμβάνουν τα γεώφωνα πριν υποστούν κάποια επεξεργασία. Αποτελεί αναντικατάστατη διαδικασία στην αλυσίδα επεξεργασίας των μετρήσεων.

Η μέθοδος Kirchhoff επιλέγεται συνήθως για την χωροθέτηση σεισμικών δεδομένων ως προς το βάθος και περιγράφεται από τη λύση του Kirchhoff. Από τη λύση της κυματικής εξίσωσης μέσω του ολοκληρώματος Kirchhoff προκύπτει το κυματικό πεδίο σε βάθος z από το κυματικό πεδίο που καταγράφηκε στην επιφάνεια ($z=0$).

Μία από τις κύριες παραμέτρους στην χωροθέτηση με την μέθοδο Kirchhoff είναι το μήκος της υπερβολής (πόσα ίχνη θα χρειαστούν για να συμπεριλάβουν την περίθλαση). Η βέλτιστη επιλογή συνήθως είναι να χρησιμοποιηθούν όλα τα ίχνη από την τομή υπέρθεσης που όμως θα αυξήσει το χρονικό κόστος. Επίσης επιλέγεται ο ελάχιστος και μέγιστος χρόνος καθώς και η μέγιστη κλίση των προς χωροθέτηση ανακλαστήρων. Η συγκεκριμένη μέθοδος χειρίζεται-χωροθετεί με επιτυχία ανακλαστήρες με μεγάλη κλίση.

Πριν την άθροιση πλατών κατά μήκος μιας καμπύλης περίθλασης θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν τρεις συντελεστές:

1) Ο συντελεστής απόκλισης ο οποίος, σχετίζεται με την εξάρτηση του πλάτους από τη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κατακορύφου και της σεισμικής ακτίνας. Αυτός ο συντελεστής ισούται με το συνημίτονο της προαναφερθείσας γωνίας.

- 2) Τον συντελεστή σφαιρικής διασποράς ο οποίος είναι ανάλογος της ποσότητας $\sqrt{1/V_r}$ για διάδοση στις δύο διαστάσεις όπου η απόσταση της πηγής από το μέτωπο κύματος.
- 3) Το χαρακτηριστικό του κύματιδίου. Το κυματίδιο σχεδιάζεται έτσι ώστε να έχει σταθερή φάση συναρτήσει της συχνότητας (f) και πλάτος ανάλογο της \sqrt{f} .

Η χωροθέτηση μπορεί να πραγματοποιηθεί και σε δεδομένα πριν την υπέρθεση (Pre-stack migration). Η χωροθέτηση πηγής-γεωφώνου αποτελεί ίσως την πιο διαδεδομένη μέθοδο χωροθέτησης δεδομένων πριν την υπέρθεση ιχνών που ανήκουν στη διάταξη κοινής πηγής. Μια καταγραφή κοινής πηγής περιέχει το κυματικό πεδίο που παράγεται κατά την ενεργοποίηση της πηγής. Το καταγραφόμενο κυματικό πεδίο στην επιφάνεια διαδίδεται πίσω στον χρόνο και προς τα κάτω μέχρις ότου τα γεωφώνω συναντήσουν τον ανακλαστήρα. Παρόμοια, σε δεδομένα κοινού γεωφώνου, το κυματικό πεδίο διαδίδεται προς τα κάτω στο χώρο και προς τα πίσω στον χρόνο έως ότου οι πηγές συναντήσουν τον ανακλαστήρα.

Όταν επιτευχθεί το μέγιστο επιθυμητό βάθος, ίχνη μηδενικής απόστασης από την πηγή επιλέγονται και τοποθετούνται μαζί για να δημιουργηθεί η τομή της χωροθέτησης. Αυτή η μέθοδος χωροθέτησης είναι αρκετά χρονοβόρα γιατί απαιτεί την συνεχή διάταξη των ιχνών από κοινής πηγής σε κοινού γεωφώνου για κάθε βήμα βάθους. Η απουσία ιχνών μικρής απόστασης πηγής-γεωφώνου σε δεδομένα διάταξης κοινής πηγής, αντισταθμίζεται με την δημιουργία ιχνών τα οποία έχουν μηδενικά πλάτη πριν ξεκινήσει η διαδικασία της διάδοσης του κυματικού πεδίου στο υπέδαφος.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε αλγόριθμος στο περιβάλλον του Matlab ο οποίος εκτελεί χωροθέτηση στα δεδομένα κάθε πηγής και στη συνέχεια υπερθέτει τα χωροθετημένα δεδομένα με αποτέλεσμα την τελική χωροθετημένη σεισμική τομή. Για την υλοποίηση της σεισμικής χωροθέτησης μέσω κώδικα, ήταν απαραίτητο το μοντέλο μέσης τετραγωνικής ταχύτητας (Σχήμα 4.5), οι θέσεις των πηγών και γεωφώνων, ο χρόνος διαδρομής των κυμάτων και τέλος τα δεδομένα της σεισμικής γραμμής.

Συγκεκριμένα ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε είναι ο ακόλουθος:

```
count1=0;stack=zeros(627,451);
for n = 100:4:168;
    count1=count1+1;
    shotrec=Vz{1,count1};
    xshot=n;

    [shotmig,tmig,xmig]=kirk_shot(shotrec,t,x,xshot,velmod*0.7,tv,xv,[60 3
1]);
    stack=stack+shotmig;
    n
end
figure;imagesc(stack);
```

Όπου:

xshot : θέση της πηγής

velmod : ταχύτητες rms

tv : χρόνος (διάνυσμα) για το πεδίο θέσης

xv : θέση

x : θέση του γεωφώνου

t : χρόνος διαδρομής

shotrec : δεδομένα εισόδου

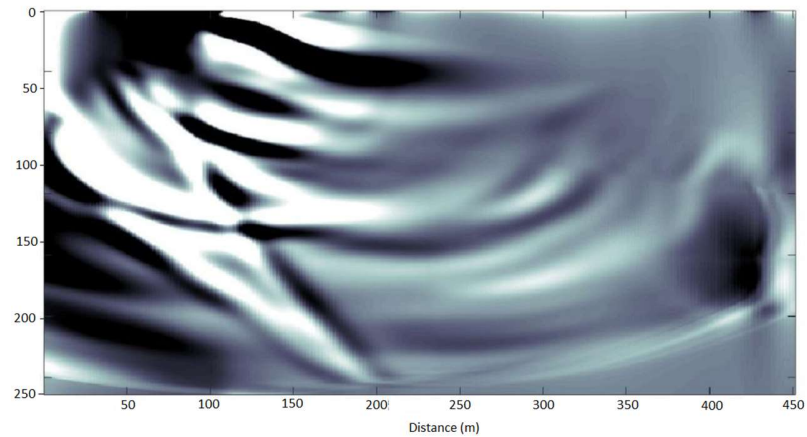
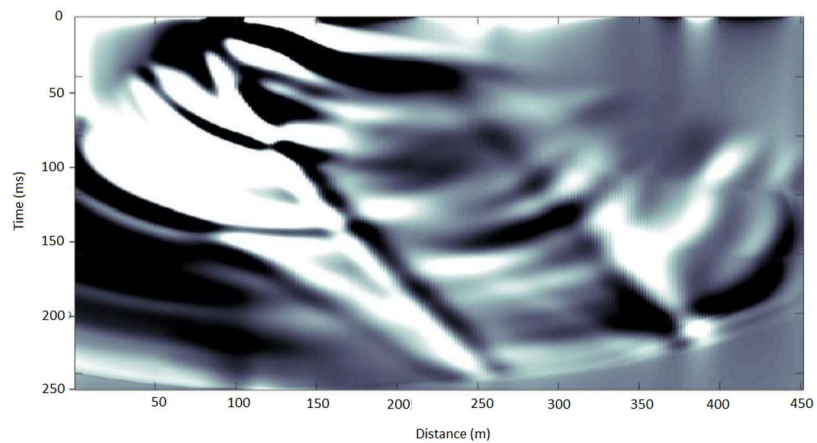
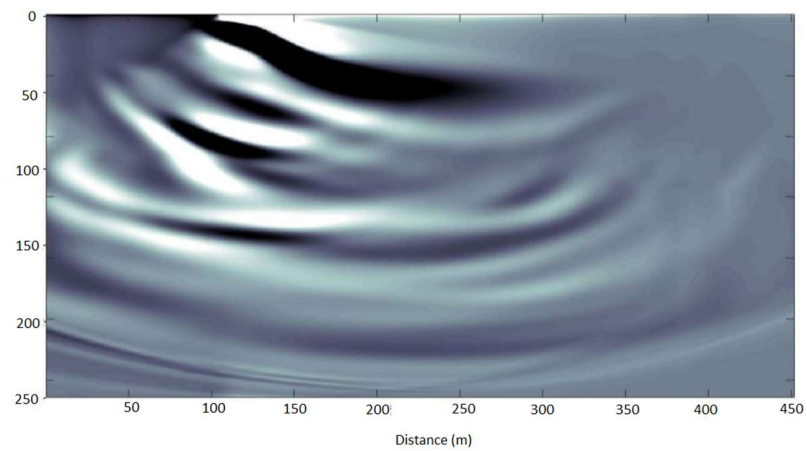
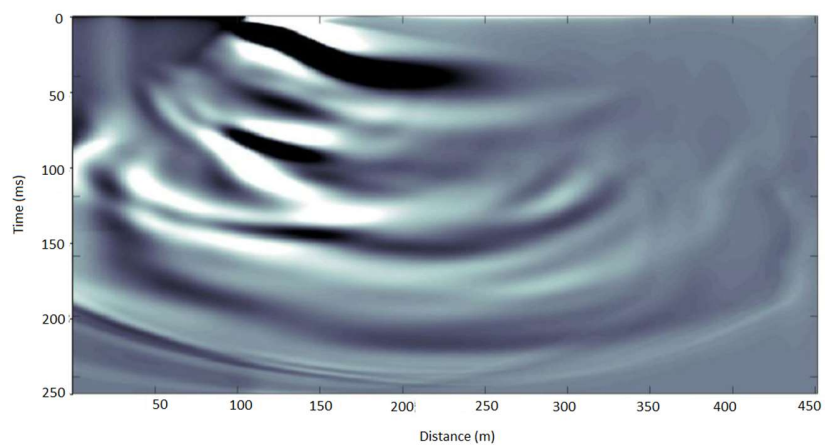
shotmig : δεδομένα εξόδου

Ο κώδικας kirk_shot παρουσιάζεται παρακάτω στο παράρτημα.

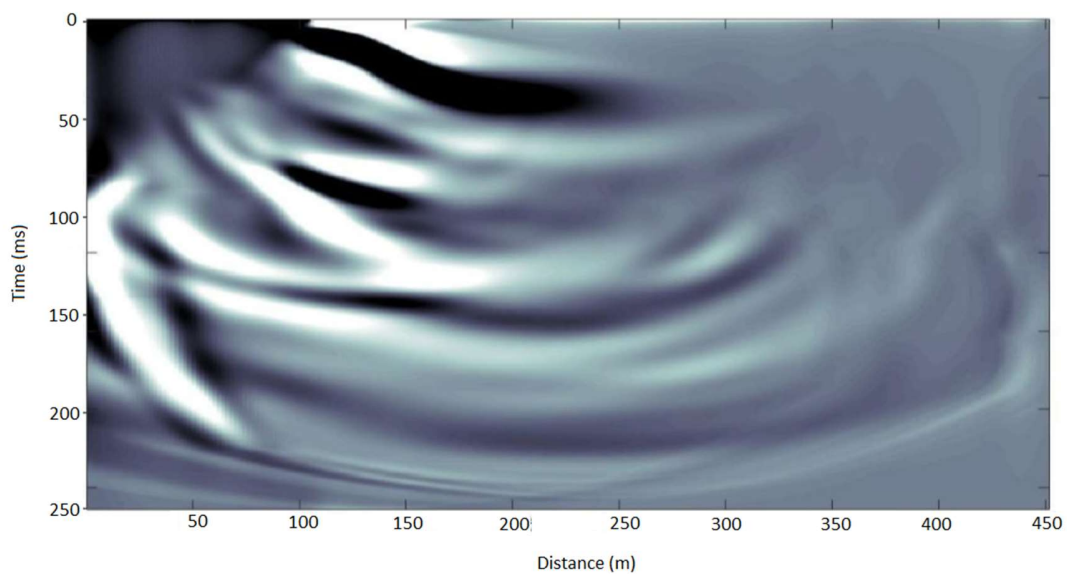
Έτσι ήταν εφικτό να εκτελεστούν διάφορες δοκιμές αλλάζοντας πολλαπλασιαστικό παράγοντα στο μοντέλο μέσης τετραγωνικής ταχύτητας, καθώς και το πλήθος των καταγραφών που λαμβάνονταν υπ' όψη για κάθε γεώφωνο. Στο τέλος υπερθέτονταν σε μια τομή τα δεδομένα.

Πολλαπλασιαστικός παράγοντας	Πλήθος καταγραφών	Σχήμα
0,7	ΌΛΑ	4.6
0,8	ΌΛΑ	4.6
0,7	60	4.6
0,7	120	4.6
0,7	240	4.7

Πίνακας 4.4: Δοκιμές στον αλγόριθμο της χωροθέτησης.



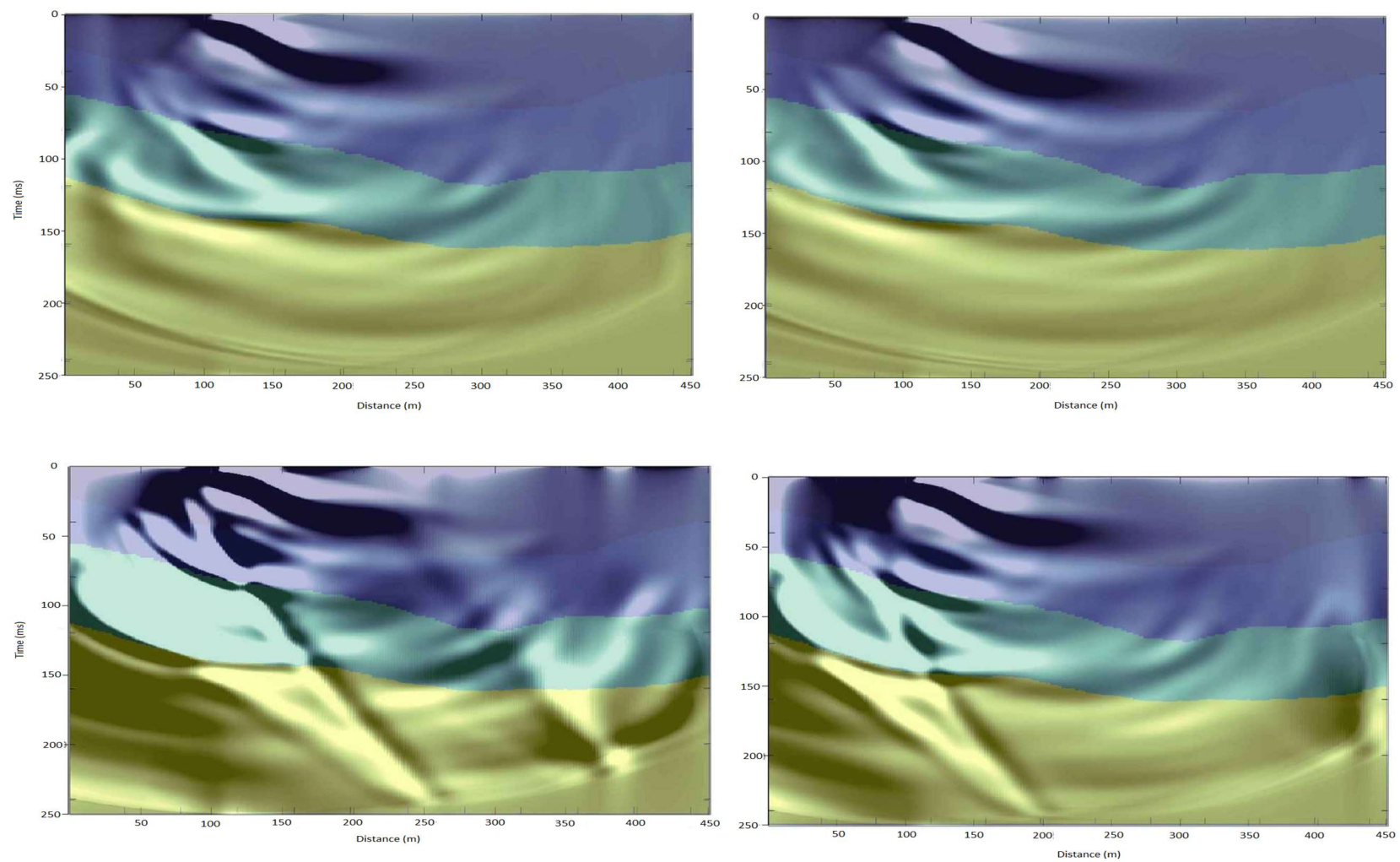
Σχήμα 4.6: Πάνω αριστερά- Π.Π.: 0.7, Πάνω Δεξιά- Π.Π.: 0.8, Κάτω αριστερά- Π.Π.: 0.7, Π.Κ.: 60, Κάτω Δεξιά- Π.Π.: 0.7, Π.Κ.: 120



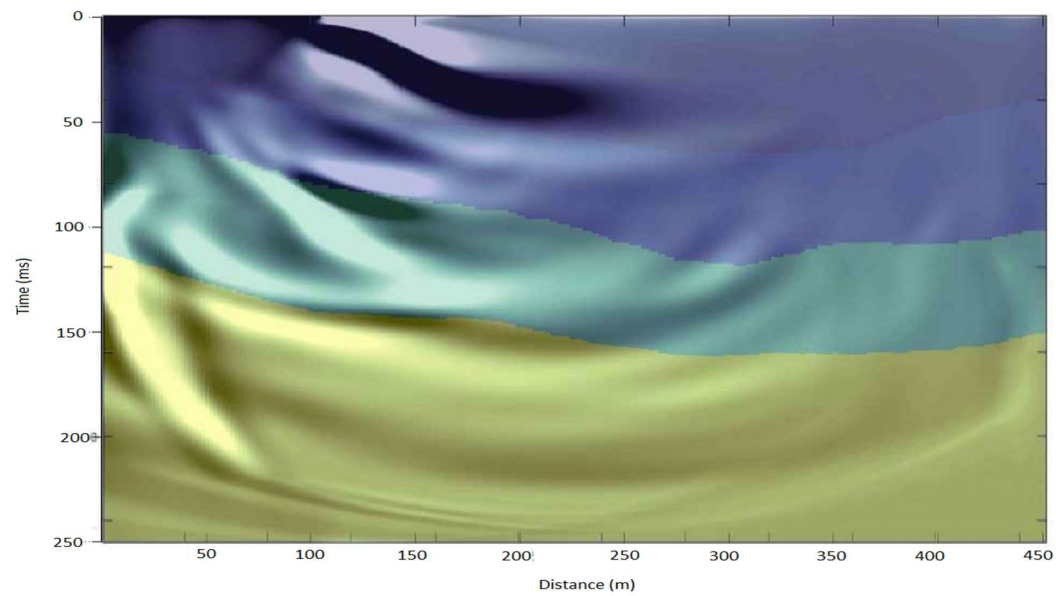
Σχήμα 4.7:Π.Π.:0.7, Π.Κ. 240

Στις χωροθετημένες τομές (σχήματα 4.6, 4.7) απεικονίζονται τμήματα των τριών ανακλαστήρων. Παρατηρείται ειδικότερα στο σχήμα 4.6 κάτω αριστερά και κάτω δεξιά η επικάλυψη των ανακλώμενων κυμάτων από τα επιφανειακά. Κυριαρχεί η επιρροή των επιφανειακών κυμάτων.

Στα παραπάνω αποτελέσματα έγινε σύγκριση με το μοντέλο ταχυτήτων υπερθέτοντας τα.



Σχήμα 4.8: Πάνω αριστερά- Π.Π.: 0.7, Πάνω Δεξιά- Π.Π.: 0.8, Κάτω αριστερά- Π.Π.: 0.7, Π.Κ.: 60, Κάτω Δεξιά- Π.Π.: 0.7, Π.Κ.: 120



Σχήμα 4.9: Π.Π.: 0.7, Π.Κ.: 240

Στην υπέρθεση του μοντέλου ταχύτητας στην χωροθετημένη τομή (Σχήμα 4.8) παρατηρείται η μειωμένη ευκρίνεια απεικόνισης των ανακλαστήρων εξαιτίας της χαμηλής κυρίαρχης συχνότητας των ανακλώμενων κυμάτων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Με βάση τα συμπεράσματα του προηγούμενου κεφαλαίου, το κύριο πρόβλημα που απαντάται στις καταγραφές είναι η έντονη παρουσία των επιφανειακών κυμάτων, σε σημείο που επικαλύπτουν τα ανακλώμενα κύματα. Με αποτέλεσμα την απεικόνιση μεμονωμένων τμημάτων των τριών ανακλαστήρων.

Επομένως απαιτείται επανασχεδιασμός του πειράματος με στόχο την εξασθένιση των επιφανειακών κυμάτων και την ανάδειξη των ανακλώμενων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους.

Πρώτον με συστοιχίες γεωφώνων. Δηλαδή να εφαρμοστεί άλλου τύπου διάταξη, τέτοια ώστε να καταγράφεται ένα ανακλώμενο κύμα από πολλά γεώφωνα ομαδοποιημένα. Το μήκος της κάθε συστοιχίας γεωφώνων θα πρέπει να ισούται με το μήκος κύματος των επιφανειακών κυμάτων που δεν αποκόπηκαν στο Σχήμα 4.2. Έτσι ώστε τα γεώφωνα να καταγράψουν μήκη κύματος αντίστοιχα των επιφανειακών κυμάτων, με αποτέλεσμα την εξασθένησή τους.

Δεύτερον μέσω της αύξησης της απόστασης μεταξύ της πηγής και του πρώτου γεωφώνου. Εάν για παράδειγμα η πρώτη πηγή παραμείνει στα 100m και το πρώτο γεώφωνο τοποθετηθεί στα 210m, δηλαδή βάση του πειράματος που εκτελέστηκε, στην θέση του εκατοστού γεωφώνου, θα αποφευχθούν όλες οι καταγραφές των επιφανειακών κυμάτων που εντοπίστηκαν στο Σχήμα 4.3.

Ένας ακόμη τρόπος που προτείνεται για να απεικονιστούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια οι ανακλαστήρες, είναι η αύξηση της κυρίαρχης συχνότητας των ανακλώμενων κυμάτων χρησιμοποιώντας υψίσυχη πηγή καθώς και αντίστοιχα γεώφωνα (συχνότητας μεγαλύτερης των π.χ. 100 Hz). Να σημειωθεί πως χρησιμοποιώντας αποκλειστικά και μόνο υψίσυχνα γεώφωνα, χωρίς να υπάρξει κάποια αλλαγή στην πηγή, είναι πιθανή η αποφυγή του θορύβου των επιφανειακών κυμάτων καθώς τα συγκεκριμένα γεώφωνα θα καταγράψουν μόνο τις υψηλές συχνότητες και όχι τις χαμηλές που δημιουργούν το πρόβλημα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βαφείδης Α., 2011, Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Ι – Σεισμικές Μέθοδοι, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
2. 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.
3. Στειακάκης Εμμανουήλ, 2012. Τεχνική Γεωλογία-Εδαφομηχανική, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
4. Bistacchi A., 2013, A 3D geological model of the 1963 vajont landslide, Università degli Studi di Milano Bicocca.
5. Cruden D.M., Varnes D.J., 1996. Landslide Types and Processes, Special Report, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 247:36-75.
6. Gottlieb, D. and Turkel, E., 1976, “Dissipative Two-Four Methods for TimeDependent Problems.
7. Kelly K. R., Ward R. W., Treitel S. and Alford R. M., 1976, Synthetics seismograms: A finite difference approach: Geophysics, 41, 2-27.
8. Petronio L., Boaga J., Cassiani G., 2016, Characterization of Vjont landslide (North-Eastern Italy) by means of reflection and surface wave seismics.
9. Vafidis A., 1988, Supercomputer Finite Difference Methods for Seismic Wave Propagation, University of Alberta.
10. Varnes DJ (1978) Slope movement types and processes.
11. Wieczorek, G.F. and Snyder, J.B., 2009. Monitoring slope movements, Geological Society of America, Boulder, Colorado, USA, 245-271
12. Yilmaz O., 1987, Seismic data processing Society of Exploration Geophysicists.

ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΥΚΤΙΟ

[1]:https://en.wikipedia.org/wiki/Vajont_Dam

[2]:https://www.researchgate.net/figure/Panoramic-view-of-the-Vajont-landslide-a-Landslide-crown-and-analysed-cross-section-b_fig8_286511226

[3]:<https://geognosis.wordpress.com/2012/01/07/%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%87%CE%AF%CE%B1->

%CF%86%CF%81%CE%AC%CE%B3%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF
%CF%82-vaiont/

[4]:https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%AE_%CF%84%CE%BF%CF%85_%CE%B5%CE%BB%CE%B1%CF%87%CE%AF%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%85_%CF%87%CF%81%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85

[5]:https://en.wikipedia.org/wiki/Seismic_migration

[6]:https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%85%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%B5%CE%BE%CE%AF%CF%83%CF%89%CF%83%CE%B7#%CE%93%CE%B5%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%BB%CF%8D%CF%83%CE%B7

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Συντεταγμένες των ανακλαστήρων

	Soccher		Upper Fonzaso		Lower Fonzaso	
	Μήκος	Βάθος	Μήκος	Βάθος	Μήκος	Βάθος
1	0.0000	33.7730	0.0000	79.3699	0.0000	208.5157
2	2.0592	34.1409	1.5998	79.3699	1.5501	208.5157

3	2.0592	33.7729	2.2696	79.1311	2.4533	208.7669
4	2.0592	34.1409	2.2696	79.1311	2.4533	208.7669
5	5.9895	34.7542	3.7525	79.4177	3.7822	209.8659
6	5.9895	34.7542	3.7525	79.4177	3.7822	209.8659
7	9.6744	36.1034	4.9484	80.0386	5.2401	210.7709
8	9.6744	36.1034	4.9484	80.0386	5.2401	210.7709
9	13.1135	37.2073	7.7706	80.9463	7.7364	211.8968
10	13.1135	37.2073	7.7706	80.9463	7.7364	211.8968
11	17.4127	38.9244	10.4018	81.6628	9.8131	213.0338
12	17.4127	38.9244	10.4018	81.6628	9.8131	213.0338
13	22.4486	40.2736	13.7025	82.2837	14.0108	214.6197
14	28.5901	42.1134	13.7025	82.2837	18.2816	216.7797
15	34.8543	43.8305	17.1464	83.0481	22.1655	218.3426
16	41.4870	45.7930	21.7389	84.2423	28.0696	220.9684
17	47.7512	47.5102	26.1876	85.1020	32.8911	223.2882
18	54.1384	48.9820	28.9329	85.7010	36.7307	225.0280
19	58.8619	49.9999	32.7599	87.5639	42.8471	227.7494
20	62.1783	51.2263	37.2565	89.0448	46.2845	229.4893
21	64.8804	51.8397	41.6095	89.8091	49.9011	231.0507
22	68.6880	52.6982	44.1925	90.0001	52.4457	232.4783
23	73.8469	53.6794	45.6757	90.4300	56.2852	234.2180
24	76.7948	54.1701	48.5458	91.5764	58.8299	235.5118
25	80.4797	55.2740	52.8509	93.0095	61.8209	236.8501
26	84.5330	56.5005	55.7210	94.1082	65.3479	237.7424
27	89.4462	57.8497	61.4783	96.3662	70.2142	239.2145
28	92.8853	58.9536	63.1899	96.6985	73.5263	240.0577

29	97.6755	60.6707	64.9490	97.5057	77.0850	241.6579
30	102.5886	61.8972	67.7545	98.7401	82.8231	243.2581
31	106.8149	63.2505	70.6547	100.0696	87.1382	244.3693
32	110.5095	64.1130	74.0779	101.5889	90.6965	245.2584
33	115.0367	65.5510	76.9785	103.1082	93.8102	246.0584
34	118.9924	66.6145	81.1603	104.8115	96.6128	246.8585
35	123.4047	67.2982	83.4973	106.9945	97.7693	247.5696
36	129.1101	68.6655	85.9094	107.9732	101.5950	247.6585
37	133.2942	69.7290	88.3219	109.1023	105.4645	248.1920
38	138.9997	69.8809	91.4127	110.6078	110.3577	248.3698
39	145.3898	70.2608	95.2573	112.1887	113.8498	248.6831
40	150.1061	70.4886	97.6695	112.8662	116.6966	248.5942
41	155.6595	71.0964	99.6297	113.5437	119.7217	248.7720
42	161.3260	71.3502	103.0973	114.0707	123.0579	248.8163
43	165.0481	71.6796	105.2081	114.8234	125.7266	248.8608
44	167.8280	71.6796	107.0926	115.7268	130.2637	248.9052
45	171.4086	71.9619	110.7111	116.2537	133.8225	248.8608
46	175.3663	72.5736	120.0781	117.8463	137.8703	248.9943
47	178.7587	72.9500	122.3259	117.9211	141.8737	248.7720
48	181.9626	73.5616	125.3233	118.4448	146.0106	248.6385
49	186.5799	73.9850	129.8939	119.3428	150.7703	248.4608
50	191.7627	74.7378	135.8884	120.2406	153.3024	248.1386
51	197.0530	75.4460	140.3840	121.2882	156.0225	247.4453
52	200.1811	75.7257	144.8797	122.9343	160.1307	247.1679
53	203.4026	76.2853	147.3525	123.6825	163.6004	247.3620
54	207.6046	76.7514	152.4477	124.3559	166.5977	246.9738

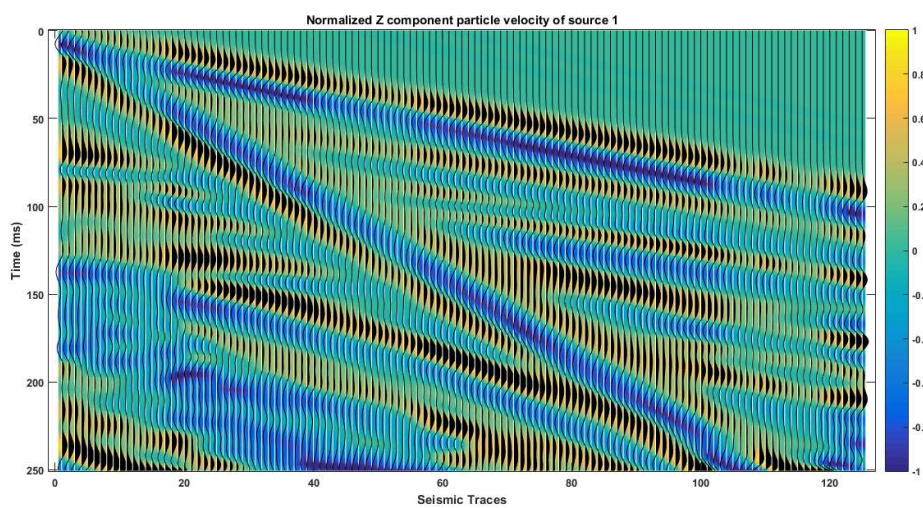
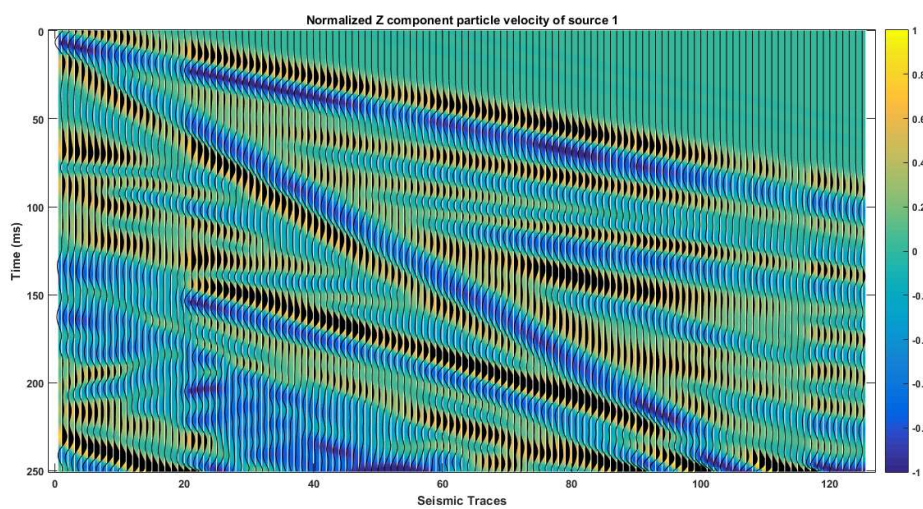
55	210.5462	77.2643	160.8709	125.0450	169.1513	246.6409
56	213.5342	77.4508	166.1466	126.0241	172.0102	246.5301
57	216.3354	78.0569	168.6678	126.5369	174.9525	246.5022
58	220.2108	78.6631	173.7103	127.5160	176.5169	245.7566
59	225.3911	79.3434	179.9787	129.0499	179.2093	245.8398
60	228.3891	79.9883	181.9090	129.0499	182.7623	245.3959
61	230.6033	80.3568	184.5080	129.3465	184.0666	245.7566
62	233.0018	80.4949	188.1462	130.0138	187.2032	247.1710
63	234.4779	80.8173	191.8590	130.5328	189.9511	248.5023
64	236.7382	81.2779	195.1261	131.8674	193.5318	249.3899
65	239.9669	81.7847	200.5465	133.8694	196.7239	250.2220
66	243.3803	82.7519	203.7392	135.1299	199.8882	251.7198
67	246.3786	83.4889	207.7487	136.2421	203.1076	252.5795
68	248.5464	84.2259	211.5356	136.9835	206.5491	253.4114
69	251.2681	84.8707	215.5451	138.4664	209.3642	254.6564
70	255.2349	85.6999	220.5158	140.2223	212.9866	256.0629
71	260.9982	87.0569	222.6378	140.9592	216.2172	257.3773
72	264.3758	87.7524	224.4368	141.7883	218.4555	258.0689
73	267.8926	88.8651	227.5734	142.6174	221.0857	258.8989
74	270.6434	89.3518	231.1712	143.9532	223.4395	259.6830
75	276.4209	90.5715	233.6158	145.0126	226.0236	260.2594
76	291.4834	90.4830	236.8909	146.6708	228.0313	260.7435
77	304.1083	90.2208	240.1326	148.3801	230.1425	260.7428
78	312.7027	89.7784	242.7712	150.2150	234.9250	261.1907
79	321.9170	89.9553	245.7865	151.3912	241.7999	261.9375
80	328.8280	89.9553	248.7549	152.6144	248.6749	262.0869

81	336.0046	89.3360	253.4194	154.5435	255.5498	262.5348
82	340.9665	88.6283	259.7901	156.8880	262.5742	262.6842
83	345.4850	88.3627	265.0191	159.0327	267.9545	263.4310
84	350.0923	87.7434	267.2604	160.2449	274.5303	263.4310
85	356.1172	87.1241	271.6023	162.9025	280.6584	263.1322
86	361.6105	86.5933	274.4972	163.3686	286.7860	263.1322
87	363.7370	86.1508	278.9792	163.7416	291.3724	263.2829
88	366.7495	85.0892	282.1543	164.2079	294.2927	263.4580
89	371.2680	83.2312	285.6535	164.9281	297.2712	263.2246
90	377.2044	80.2230	290.4012	165.3930	298.9064	262.8744
91	385.8449	76.2756	298.3146	166.3691	300.8336	262.7577
92	388.5339	74.9057	303.5279	167.0198	303.1700	262.4660
93	392.3201	72.9878	307.1120	167.1128	306.8492	262.2908
94	397.9723	70.7959	309.7654	166.6944	309.2438	262.1158
95	402.6599	68.7064	314.0942	165.4859	311.3465	262.2908
96	408.1965	66.8457	319.5131	163.4377	314.0913	261.7656
97	411.3907	65.4104	323.7639	162.3693	316.5446	261.5905
98	415.2769	64.2408	326.0194	161.7051	318.4135	261.5905
99	420.4407	63.2308	329.1714	160.6656	321.4502	261.8824
100	423.2239	62.5969	333.3066	159.1352	324.3181	262.2223
101	425.6939	61.8922	336.1692	158.0379	327.9356	263.0565
102	427.7609	61.1874	339.8507	156.7057	331.6457	263.9832
103	431.0374	60.2813	341.3572	156.1416	335.0774	265.3735
104	434.4150	59.2746	342.4554	155.2328	340.0860	265.8369
105	437.0866	58.6203	344.3697	154.5120	344.8162	267.0418
106	440.3127	57.6638	346.7548	153.9792	349.7317	268.0613

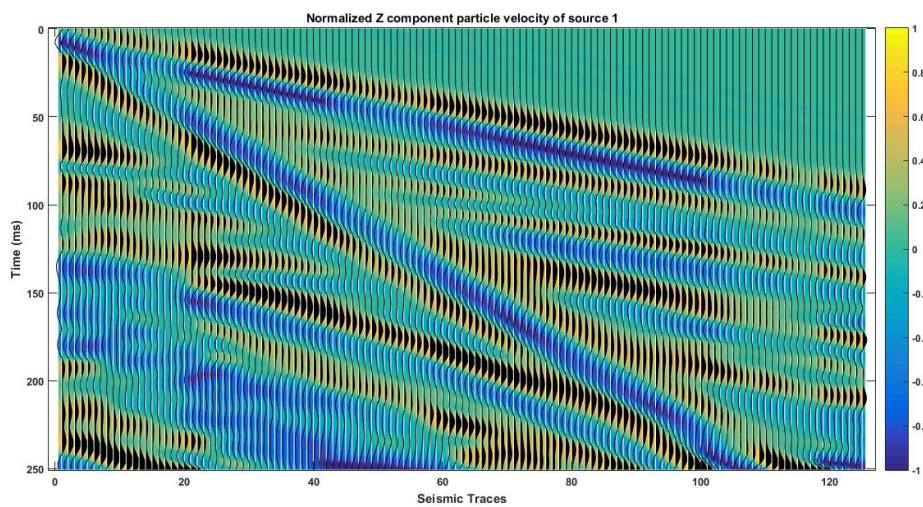
107	442.8333	56.9087	350.0501	153.3838	353.9057	269.2660
108	446.0090	56.2040	353.2825	152.8510	357.9866	270.0076
109	448.0330	55.7201	356.5778	152.3497	359.9343	269.9148
110	452.0000	55.3124	359.9044	151.8796	363.2733	269.7296
111			362.9171	151.7542	366.4269	269.3588
112			365.4478	151.8352	369.9512	268.8027
113			368.0593	151.9933	373.4759	268.7101
114			375.2602	152.3884	376.8149	268.3393
115			378.9792	153.3366	380.4324	267.8759
116			381.5904	153.8107	383.2147	267.6905
117			384.7559	153.7317	386.7391	267.2272
118			388.0793	153.8897	390.1707	266.8564
119			391.7192	154.2058	393.1389	266.7636
120			395.8341	153.5736	396.6632	266.3930
121			399.0784	153.6527	399.8168	265.9295
122			401.3733	153.5736	402.9704	265.5589
123			406.5168	153.6527	405.5674	265.3735
124			410.7109	153.4156	407.8863	265.0955
125			416.0125	152.7834	410.1121	264.7248
126			422.1056	151.9933	411.8745	264.3540
127			426.2239	151.1610	413.7296	264.3540
128			429.9598	150.1792	416.4193	263.8906
129			433.5976	149.0502	418.6451	263.6124
130			438.2183	148.0685	421.2421	263.2419
131			440.5781	147.5776	424.1176	262.5931
132			443.1833	146.7921	427.2708	261.8516

133			445.7396	146.3504	429.3117	261.0174
134			450.0000	145.9577	431.6302	260.1833
135					433.2072	259.5345
136					436.1749	258.8858
137					438.9573	258.1444
138					441.7401	257.1249
139					444.0586	256.2907
140					446.1918	255.4566
141					448.7888	254.7151
142					450.0000	253.8809

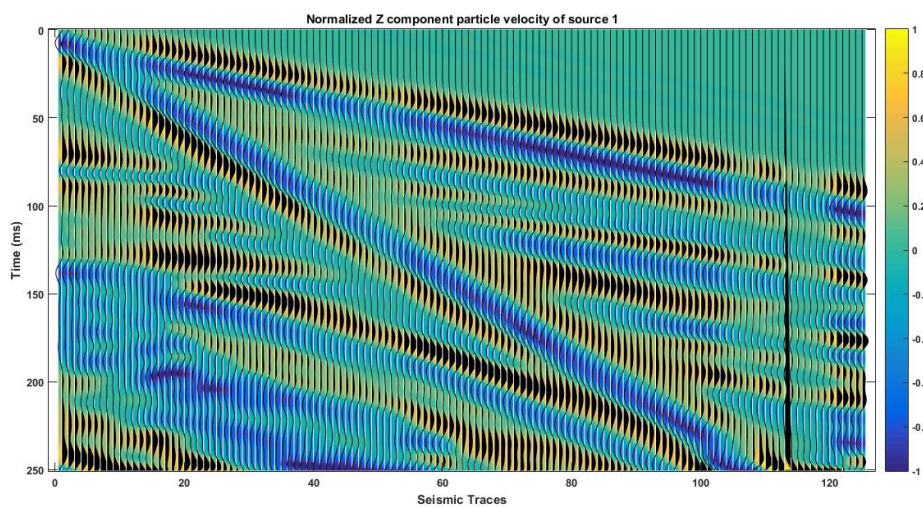
Συνθετικά Δεδομένα:



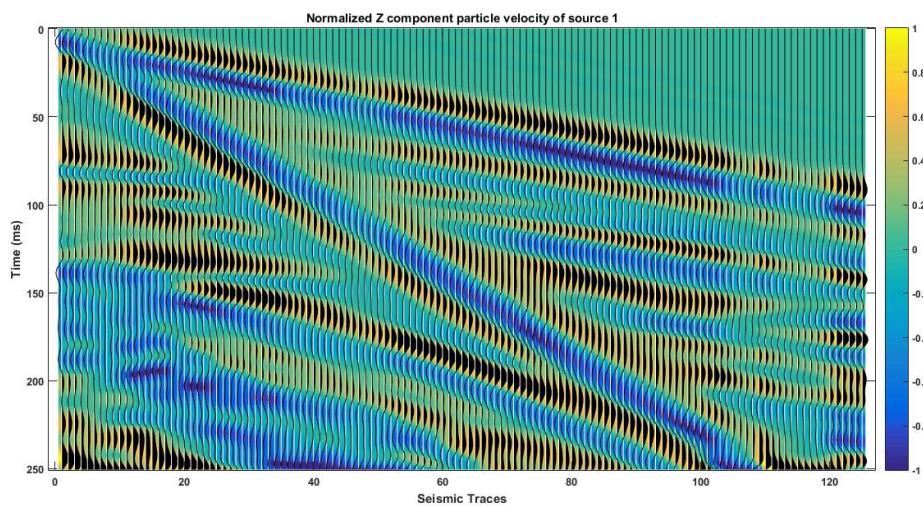
Πάνω: Πηγή 100, Γεώφωνο 110- Κάτω: Πηγή 104, Γεώφωνο 114



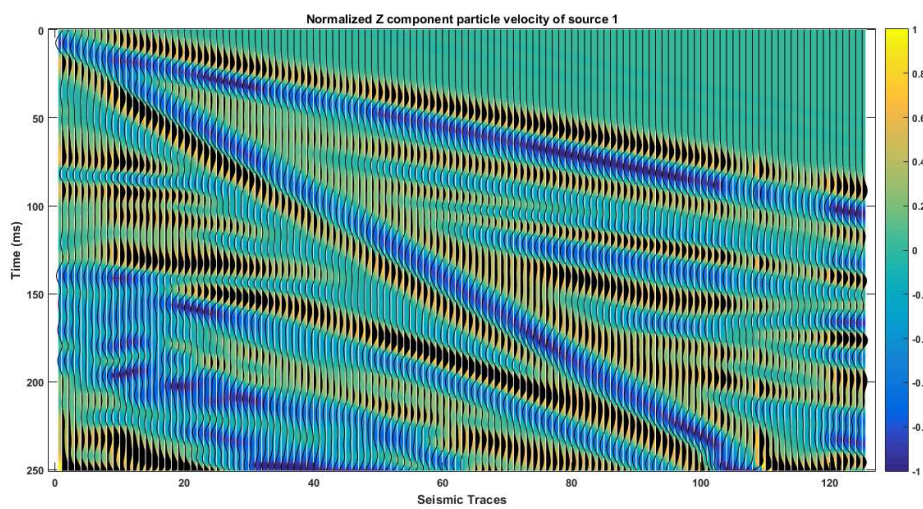
Πηγή 108, Γεώφωνο 118



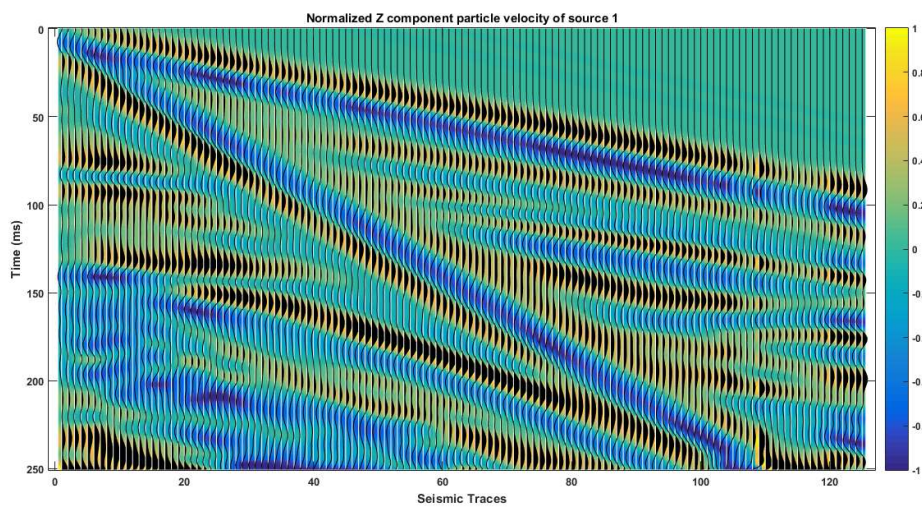
Πηγή 112, Γεώφωνο 122



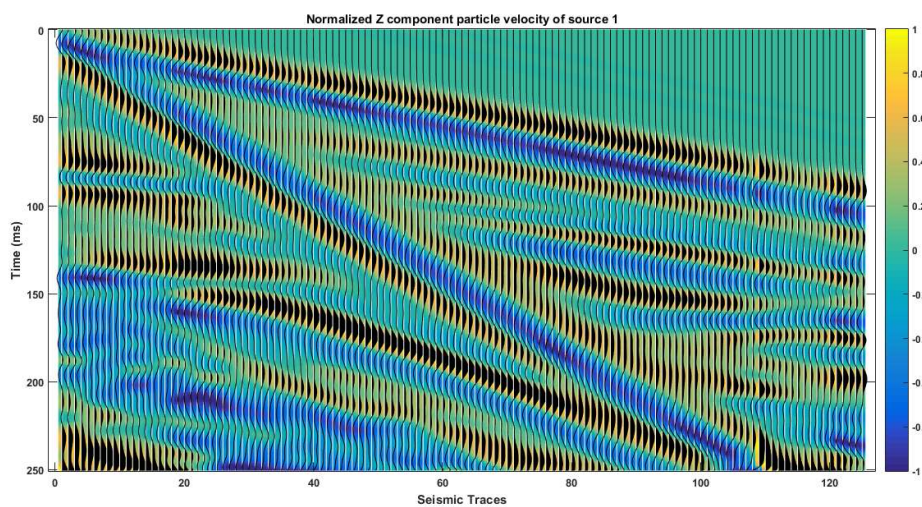
Πηγή 116, Γεώφωνο 126



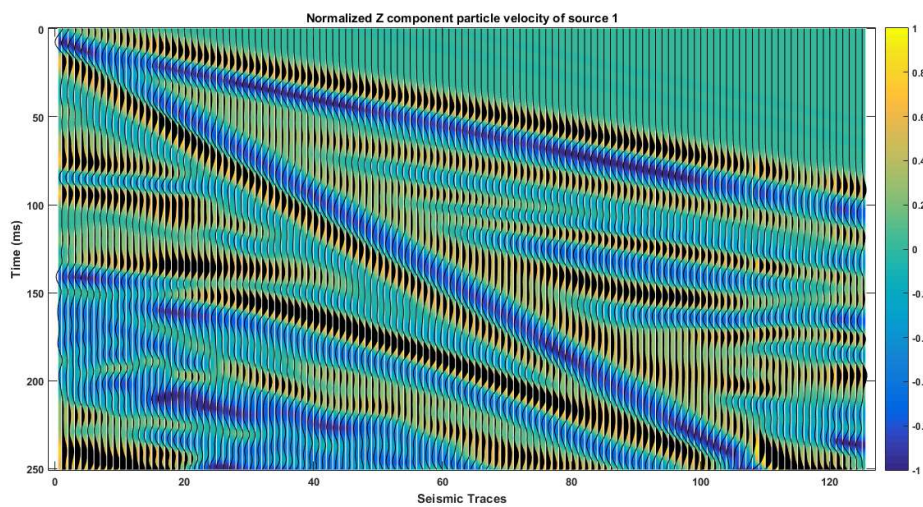
Πηγή 120, Γεώφωνο 130



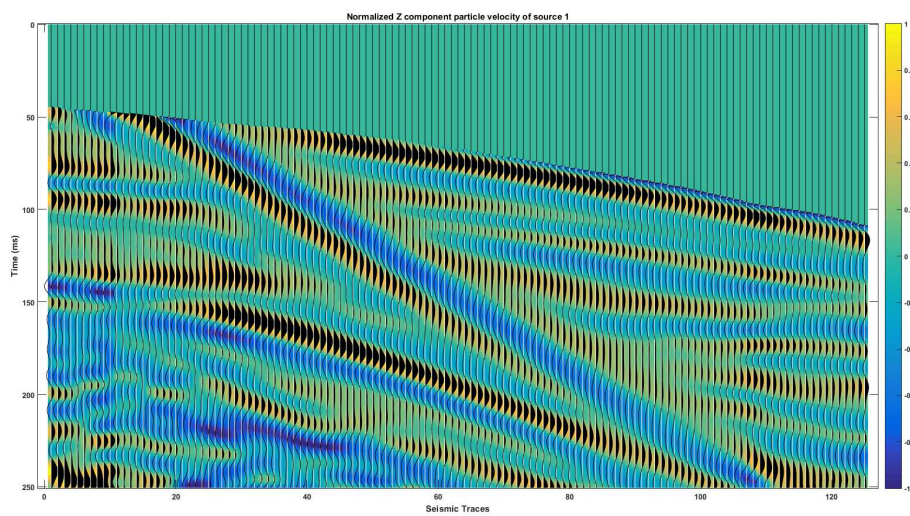
Πηγή 124, Γεώφωνο 1134



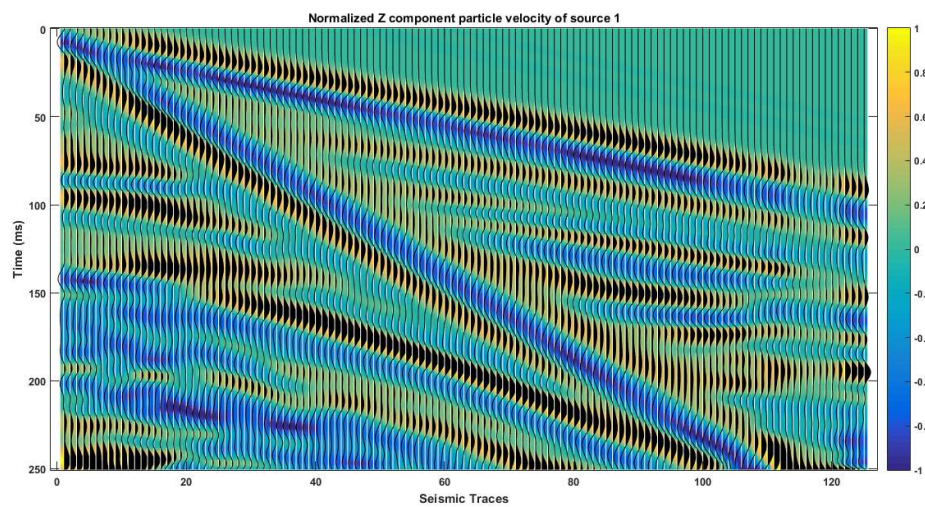
Πηγή 128, Γεώφωνο 138



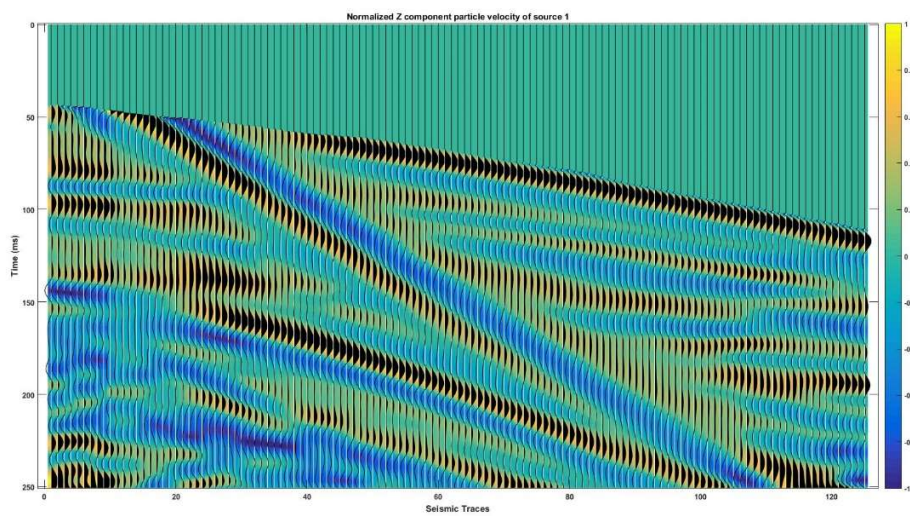
Πηγή 132, Γεώφωνο 142



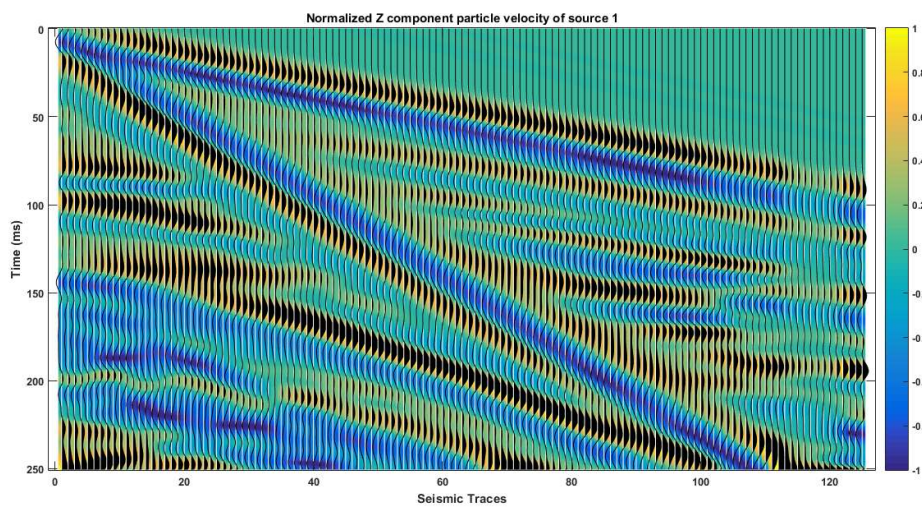
Πηγή 136, Γεώφωνο 146



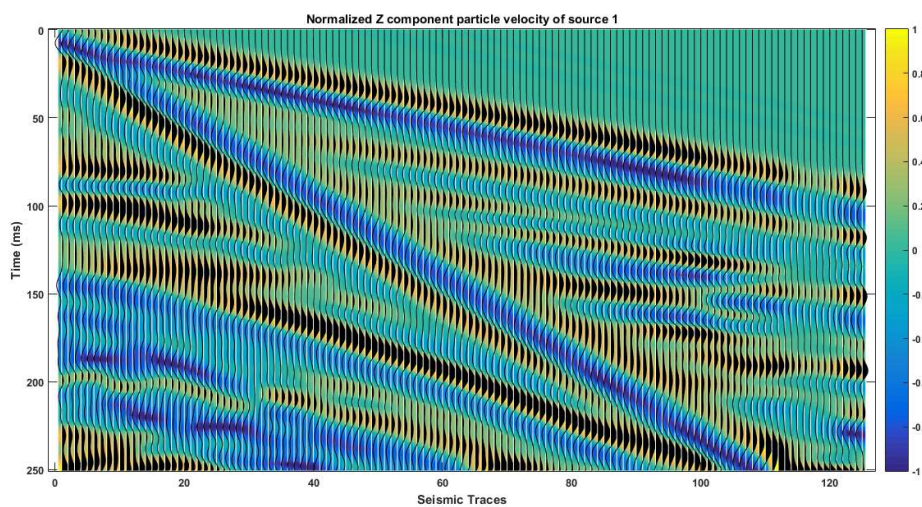
Πηγή 140, Γεώφωνο 150



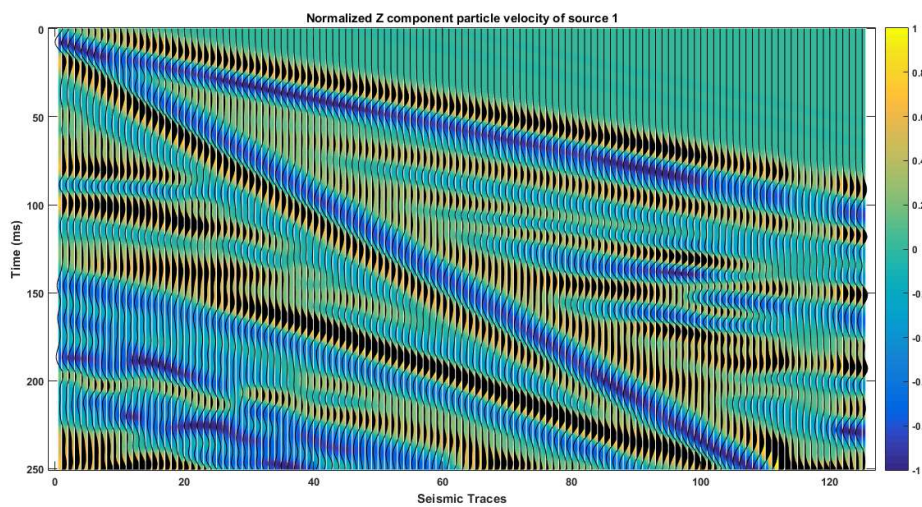
Πηγή 144, Γεώφωνο 154



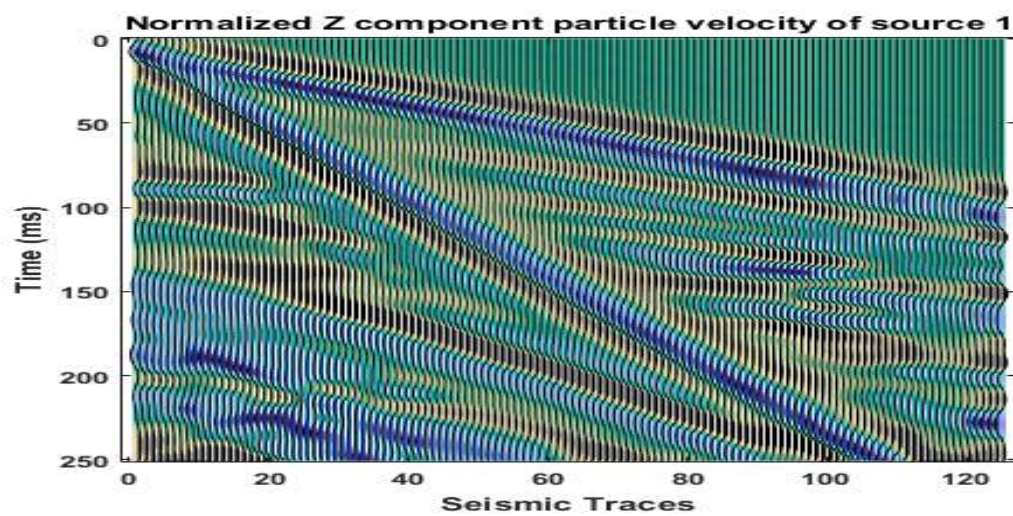
Πηγή 148, Γεώφωνο 158



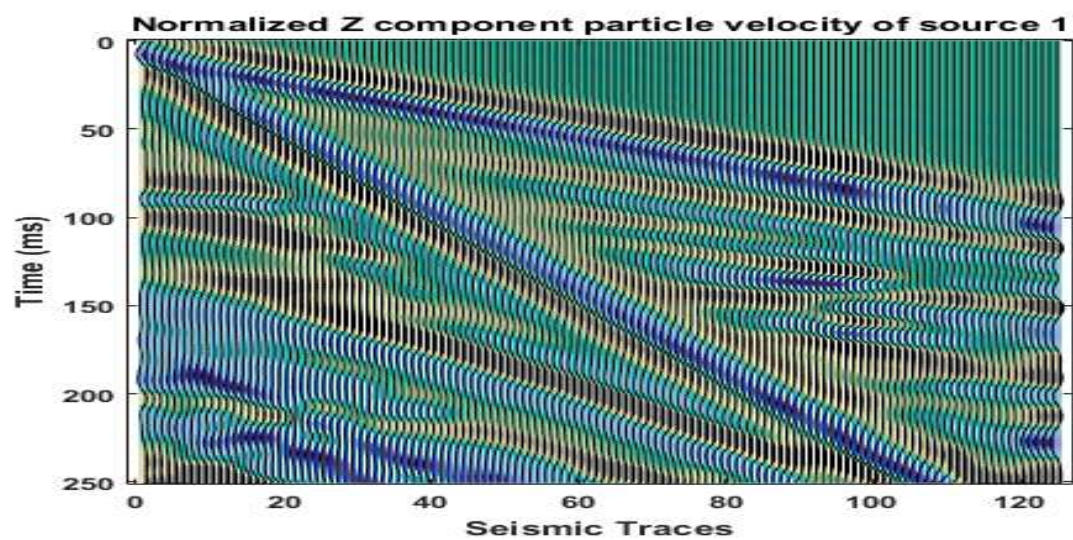
Πηγή 152, Γεώφωνο 162



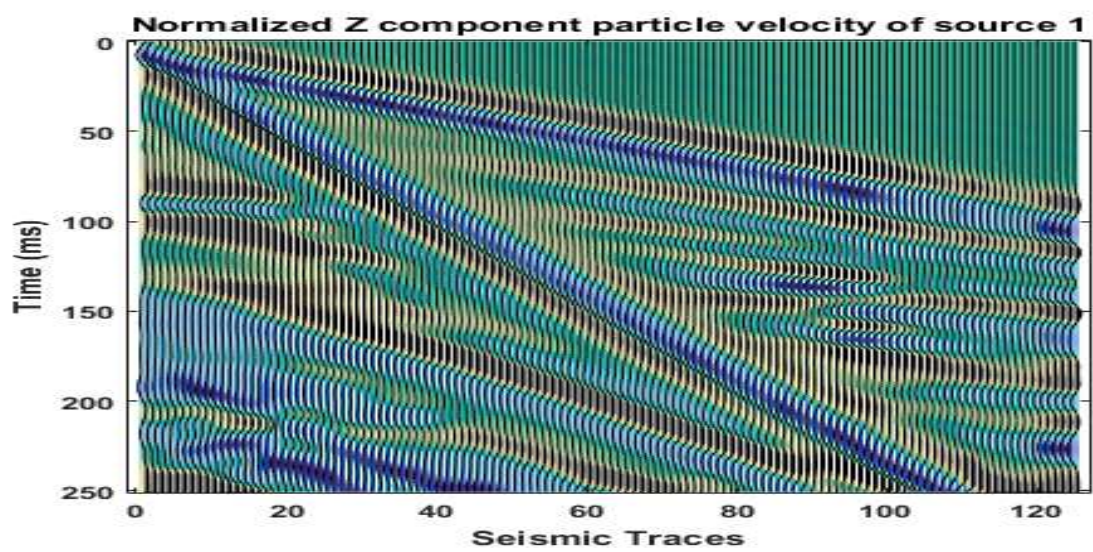
Πηγή 156, Γεώφωνο 166



Πηγή 160, Γεώφωνο 170



Πηγή 164, Γεώφωνο 174



Πηγή 168, Γεώφωνο 178

Κώδικας Kirk_shot:

```
% ---- test velocity info ----

if(length(tv)~=nvsamp)

    error('Time vector for velocity model is incorrect')

end

if(length(xv)~=nvtr)

    error('Space coordinate vector for velocity model is incorrect')

end

if(min(tv)>min(t) || max(tv)<max(t))

    error('Time vector for velocity model must span that for data')

end

if(min(xv)>min(x) || max(xv)<max(x))

    error('Space vector for velocity model must span that for data')

end


% ---- examine parameters ----

nparams=13;                                % number of defined parameters


if(nargin<8)                                % no parameters inputted

    params= nan*ones(1,nparams);

end


if(length(params)<nparams)

    params = [params nan*ones(1,nparams-length(params))];
```

```
end
```

```
%assign parameter defaults
```

```
if( isnan(params(1)) )
```

```
    aper = abs(max(xv)-min(xv));
```

```
else
```

```
    aper = params(1);
```

```
end
```

```
if( isnan(params(2)) )
```

```
    width1 = aper/20;
```

```
else
```

```
    width1 = params(2);
```

```
end
```

```
if( isnan(params(3)) )
```

```
    itaper1 = 1;
```

```
else
```

```
    itaper1 = params(3);
```

```
end
```

```
if( isnan(params(4)) )
```

```
    ang_limit = pi/3;
```



```

else
    ang_limit = params(4)*pi/180;
end

if( isnan(params(5)) )
    width2 = 0.15*ang_limit;
    if(width2>pi/2-ang_limit)
        width2=pi/2-ang_limit;
    end
else
    width2 = params(5)*pi/180;
end
angle1 = ang_limit + width2;

if( isnan(params(6)) )
    itaper2 = 1;
else
    itaper2 = params(6);
end

if itaper2 ~= 1 && itaper2 ~= 0
    error('the angle limit taper type: params(6) should be 0 and 1 !');
end

if( isnan(params(7)) )

```

```

        interp_type = 1;
    else
        interp_type = params(7);
    end
    if interp_type < 1 || interp_type > 4
        error('the interpolation indexx paarams(7) should be 1, 2, 3 and 4 !');
    end

    if( isnan(params(8)) )
        tmig1 = min(tv);
    else
        tmig1 = params(8);
    end

    if( isnan(params(9)) )
        tmig2 = max(tv);
    else
        tmig2 = params(9);
    end

    if tmig2 < tmig1
        error(['the target time window start time should be smaller than the end time !'...
            ' i.e. paraams(8) < params(9)']);
    end
end

```

```

if( isnan(params(10)) )
    xmig1 = min(xv);
else
    xmig1 = params(10);
    ix=near(xv,xmig1);
    xmig1=xv(ix);
end
if( isnan(params(11)) )
    xmig2 = max(xv);
else
    xmig2 = params(11);
    ix=near(xv,xmig2);
    xmig2=xv(ix);
end
if xmig2 < xmig1
    error(['the start location of target trace range should be less than the end location'...
        ' i.e. params(10) < params(11)']);
end

if( isnan(params(12)) )
    ibcfilter = 0;
else
    ibcfilter = params(12);
end

```

```

if( isnan(params(13)) )
    dxmig=mean(diff(x))/2;
else
    dxmig = params(13);
end

if ibcfilter
    % get a cumulative array from shotrec
    aycum=cumsum(shotrec);
end

%one way time
dt1=.5*dt;
t1=t/2;

%compute maximum time needed. This is the traveltime for a scatterpoint
%when the source and receiver are colocated a distance aper away.
vmin=min(velmod(:));
tmax=sqrt(tmig2^2 + (2*aper/vmin)^2);

%pad input to tmaxin
npad=ceil(tmax/dt1)-nsamp+5;
if( npad > 0)

```

```

        shotrec= [shotrec; zeros(npad,ntr)];

        t1 = [t1',(nsamp+1:nsamp+npad)*dt1]';

    if ibcfilter
        ariycum=[ariycum; ones(npad,1)*ariycum(nsamp,:)];
    end
end

t2= t1.^2;

%output samples targeted
samptarget=near(t,tmig1,tmig2);
tmig=t(samptarget);

%output traces desired
%trtarget= near(xv,xmig1,xmig2);
xmig=xmig1:dxmig:xmig2;

%initialize output array
shotmig=zeros(length(samptarget),length(xmig));

%loop over migrated traces
%
kmig=0;

disp(' ');

```

```

disp([' --- Total number of migrated traces : ' int2str(length(xmig)) ' ---']);
disp(' ');

clock1=cputime;
steptimes=nan*ones(size(xmig));
ntimes=0;
ievery=20;%print a progress message every this many traces
%save1=zeros(size(xmig));
% loop over traces in aperture
for ktr=1:length(xmig)                                % ktr--the index of the output trace
    xtr=xmig(ktr);%x coordinate of target
    kmig=kmig+1;                                       % trace counter

    %determine input traces in aperture
    inaper=near(x,xtr-aper,xtr+aper);

    %shot offset and velocity
    offsetshot2=(xtr-xshot)^2;
    xvshotside=(xshot+xtr)/2;
    ivshot=near(xv,xvshotside);
    vshot2 = velmod(:,ivshot(1)).^2;
    %gather=zeros(length(tmig),length(inaper));
    for kaper=1:length(inaper)
        xnow=x(inaper(kaper));

```

```

%receiver offset and velocity

offsetrec2=(xtr-xnow)^2;

xvrecside=(xnow+xtr)/2;

ivrec=near(xv,xvrecside);

vrec2 = velmod(:,ivrec(1)).^2;


        % source-receiver travel time via double square root equation

tsr= sqrt(offsetshot2./vshot2(samptarget) + t2(samptarget))+...
      sqrt(offsetrec2./vrec2(samptarget) + t2(samptarget))+100*eps;


        %cosine theta amplitude correction

costheta = tmig./tsr;

tanalpha = sqrt(1-costheta.^2);


%angle limit and the taper


ind = find( costheta < cos(angle1) );

i1=1;

if(~isempty(ind))

    i1 = ind(end);

end

ind = find( costheta < cos(ang_limit) );

i2=1;

if(~isempty(ind))

```

```

    i2 = ind(end);
end

if i1 < i2
    if itaper2 == 0
        coef2 = lin_taper(i2,i1);
    else
        coef2 = cos_taper(i2,i1);
    end
    costheta(1:i1) = zeros(i1,1);
    costheta(i1+1:i2) = coef2(i2-i1:-1:1)'.*costheta(i1+1:i2);
end

% boxcar anti-aliasing filter
if ibcfilter
    lt0=round((dx*tanalpha./velmod(samptarget,ktr)/dt));
    indt = round((tsr/dt))+1;
    lentr = nsamp+npad;
    lt = ones(lentr,1)*max(lt0);
    lt(indt)=lt0;
    lt(max(indt)+1:lentr) = ones(lentr-max(indt),1)*min(lt0);
    it = (1:lentr)';
    l1=it-lt-1;
    l2=it+lt;

```



```

ind = find(l1 < 1);

l1(ind) = ones(length(ind),1);

ind = find(l2> lentr);

l2(ind)=ones(length(ind),1)*lentr;

tmp0=t;

tmp0(1) = arycum(1,inaper(kaper));

ind = 2:lentr;

tmp0(ind) = (arycum(l2(ind),inaper(kaper))-
arycum(l1(ind),inaper(kaper)))...

./ (l2(ind)-l1(ind));

else

tmp0 = shotrec(:,inaper(kaper));

end

%interpolation

% Linear

if interp_type == 1

tnumber = tsr/dt;

it0 = floor( tnumber ) + 1;

it1 = it0+1;

xt0 = tnumber - it0 + 1;

xt1 = it0-tnumber;

tmp = xt1.*tmp0(it0)+xt0.*tmp0(it1);

end

% Spline

```

```

if interp_type == 2

    tmp = interp1(t,tmp0,tsr,'spline');

end

% Cubic

if interp_type == 3

    tmp = interp1(t,tmp0,tsr,'cubic');

end

% Sinc

if interp_type == 4

    tmp = sinci(tmp0,t,tsr);

end


% aperture taper

aper_weight = 1.0/length(inaper);

xtest=abs(aper-abs(xtr-xnow));%distance of trace from edge of aper

if xtest < width1

if(itaper1==1)

    aper_weight=(.5+.5*cos(pi*(xtest-width1)/(180*width1)))/length(inaper);

else

    aper_weight=(xtest-width1)/(width1*length(inaper));

end

end


tmp = tmp .* aper_weight;

```

```

        tmp = tmp.* sqrt(costheta.^3);

    %save1(kmig)=save1(kmig)+sum(costheta);

    %gather(:,kaper)=tmp;

    shotmig(:,kmig)= shotmig(:,kmig)+tmp;

end

% scaling and 45 degree phase shift
ivmig=near(xv,xtr);

scalemig = velmod(samptarget,ivmig(1)).*sqrt(pi.*(tmig+0.0001)) ;

shotmig(:,kmig) = phsrot(shotmig(:,kmig),-45)./scalemig ;

if(rem(kmig,ievery)==0)

    disp([' Completed migrated trace no. ',int2str(kmig) ,' of '
int2str(length(xmig)) ]);

    timenow=cputime-clock1;

    ntimes=ntimes+1;

    steptimes(ntimes)=timenow;

    if(ntimes>1)

        timeremaining = (length(x)/(length(inaper)+1))*(timenow-steptimes(ntimes-
1))*(length(xmig)-ktr)/ievery;

```

```

else
    timerremaining = (length(x)/(length(inaper)+1))*timenow*(length(xmig)-
ktr)/ievery;
    end

    disp([' time so far ' num2str(timenow) ' estimated remaining '
num2str(timerremaining) ]);
    end

end

% ind=find(isnan(step times));
% step times(ind)=[ ];

totaltime=cputime-clock1;
disp(['Total time required ' num2str(totaltime)])

```