



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΜΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ  
ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ**



**ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ – ΜΕΝΙΔΙΑΤΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ :**

ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ, Καθηγητής, Π.Κ (επιβλέπων)

ΣΟΥΠΙΟΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Καθηγητής, Τ.Ε.Ι. Κρήτης

ΚΡΗΤΙΚΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, Ε.ΔΙ.Π., Π.Κ.

Χανιά, Μάρτιος 2017

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

*Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Αντώνιου Βαφείδη. Η συγκεκριμένη εργασία πραγματεύεται την επεξεργασία και την ερμηνεία συνθετικών δεδομένων για τον εντοπισμό ρήγματος κατά τη διάρκεια κατασκευής μιας σήραγγας πραγματοποιώντας τις μετρήσεις κατά τη διάρκεια διάνοιξής της.*

*Στην ολοκλήρωση της εργασίας καταλυτικό ρόλο έπαιξε ο επιβλέπων Καθηγητής, Βαφείδης Αντώνιος, ο οποίος με την καθοδήγησή του και τις εύστοχες παρατηρήσεις του, αποτέλεσε σημαντικό στήριγμα στις δυσκολίες που παρουσιάστηκαν. Για τον λόγο αυτό, αλλά και για την αμέριστη συμπαράσταση που μου έδειξε, τον ευχαριστώ θερμά.*

*Ειδικότερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον βοηθό του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, δρ. Κρητικάκη Γεώργιο για την συνεχή παρακολούθηση της εξέλιξης της εργασίας καθώς και για τις εύστοχες παρατηρήσεις του.*

*Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω προς τον Καθ. κ. Παντελή Σουπιό για την αποδοχή του για την αξιολόγηση της παρούσας εργασίας, ο οποίος με τίμησε ως μέλος της εξεταστικής επιτροπής*

*Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου, τόσο για την οικονομική, όσο και για την ηθική στήριξη που μου έδωσαν από τα πρώτα κιόλας χρόνια της εκπαίδευσής μου. Δεν θα μπορούσα να παραλείψω βέβαια, να μην ευχαριστήσω τους φίλους μου για την περίοδο των σπουδών μου στα Χανιά.*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το κύριο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αυτής, είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας έγκαιρου εντοπισμού ρήγματος ή διαφοροποίησης του σχηματισμού διάτρησης σήραγγας με χρήση σεισμικών δεδομένων. Για την προσέγγιση του προβλήματος αυτού μελετήθηκε η πρόσφατη βιβλιογραφία και πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της διάδοσης σεισμικών κυμάτων σε μοντέλα όπου η σεισμική πηγή και τα γεώφωνα τοποθετούνται στα τοιχώματα της σήραγγας.

Ειδικότερα, στα αρχικά στάδια της εργασίας δημιουργήθηκαν συνθετικά μοντέλα στις δύο διαστάσεις. Ένα μοντέλο με τον ανακλαστήρα να απέχει 100m από το μέτωπο της σήραγγας και ένα δεύτερο με τον ανακλαστήρα να απέχει 80m. Η σεισμική πηγή τοποθετήθηκε στο μέτωπο της σήραγγας ενώ οι δέκτες κατά μήκος αυτής. Λόγω της πολυπλοκότητας των συνθετικών καταγραφών εξαιτίας της σήραγγας, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές χωρίς να υπάρχει το σώμα της σήραγγας στο μοντέλο. Με αυτόν τον τρόπο ήταν ευκολότερη η αναγνώριση των σεισμικών κυμάτων και η περαιτέρω επεξεργασία τους. Στα συνθετικά σεισμικά δεδομένα εφαρμόστηκε μετασχηματισμός αντίστοιχος με τη διόρθωση της κανονικής χρονικής απόκλισης που εφαρμόζεται στη μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης. Ο μετασχηματισμός αυτός μετατρέπει τον χρόνο διαδρομής σε διπλό χρόνο ανάκλασης από το μέτωπο της σήραγγας μέχρι τον ανακλαστήρα και δημιουργεί σεισμική τομή. Το τελικό στάδιο της επεξεργασίας περιλαμβάνει την εφαρμογή φίλτρου ενδιάμεσης τιμής (medianfilter) στα μετασχηματισμένα δεδομένα, το οποίο ανέδειξε τα ανακλώμενα διαμήκη κύματα, ενώ παράλληλα εξασθένησε τα άλλα είδη κυμάτων.

Η απομόνωση των ανακλώμενων κυμάτων στα πειράματα χωρίς τη σήραγγα ήταν ιδεατή, κάτι που βοήθησε και στην αναγνώριση των αντίστοιχων ανακλώμενων κυμάτων στα πιο σύνθετα δεδομένα από τα μοντέλα με τη σήραγγα.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΤΟΧΟΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ .....	5
1.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	5
1.2 ΕΙΔΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ .....	6
1.3 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ, ΓΕΩΦΩΝΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΙΚΑ.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ .....	15
3.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	15
3.2 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ (Pioraadit).....	16
3.3 ΕΡΜΗΝΕΙΑ .....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 :ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	34
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	34
5.2ΔΗΜΙΟΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	34
5.3ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	34
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	36
ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ.....	36
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	37

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΤΟΧΟΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τον εντοπισμό ρήγματος ή σπηλαίωσης κατά τη διάνοιξη σήραγγας μελετώντας τα ανακλώμενα σεισμικά κύματα. Ο αρχικός στόχος ήταν η προσομοίωση του πειράματος στις τρεις διαστάσεις με τους κώδικες SW4<sup>[1]</sup> και e-3D<sup>[2]</sup>, κάτι που δεν έφερε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Για αυτό χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος *PSV\_SYNTHETICS\_VER11* για προσομοίωση στις δύο διαστάσεις (2D) που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης.

## 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Γεωφυσική είναι η επιστήμη που εφαρμόζει τους νόμους της Φυσικής για να μελετήσει τη Γη. Με την πλατιά αυτή έννοια, η Γεωφυσική μελετάει τις φυσικές ιδιότητες της Γης από το κέντρο της μέχρι και την εξωτερική ατμόσφαιρα, δηλαδή, περιλαμβάνει την μελέτη της "στερεάς" Γης, της θάλασσας, της ατμόσφαιρας και της ιονόσφαιρας. Έχει επικρατήσει όμως διεθνώς, η Γεωφυσική να ταυτίζεται σχεδόν με τη Φυσική της "στερεάς" Γης, δηλαδή την Φυσική του εσωτερικού της Γης, ενώ για τις άλλες επιστήμες χρησιμοποιούνται ειδικά ονόματα όπως Ωκεανογραφία, Μετεωρολογία, Φυσική της Ατμόσφαιρας κ.λπ.

Η Εφαρμοσμένη Γεωφυσική, ο κλάδος της Γεωφυσικής, ο οποίος ασχολείται με τη ανεύρεση δομών οικονομικής σημασίας, χρησιμοποιεί τις ακόλουθες μεθόδους:

- Σεισμικές
- Βαρυτικές
- Μαγνητικές
- Ηλεκτρικές
- Ηλεκτρομαγνητικές
- Ραδιομετρική
- Θερμική

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 τα της φυσικής ραδιενέργειας (ραδιομετρική μέθοδος) ή της θερμοκρασίας (θερμική μέθοδος).

## 1.2 ΕΙΔΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Τα σεισμικά κύματα διακρίνονται σε διαφορετικά είδη ανάλογα με τα χαρακτηριστικά διάδοσής των. Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες: στην πρώτη ανήκουν τα κύματα χώρου και στην δεύτερη τα επιφανειακά κύματα. Στα κύματα χώρου η διαταραχή διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις στερεού σώματος π.χ. της γης, ενώ στα επιφανειακά κύματα η διαταραχή διαδίδεται παράλληλα σε διαχωριστικές επιφάνειες όπως η επιφάνεια της Γης.

Κύματα χώρου είναι τα διαμήκη και τα εγκάρσια. Το χαρακτηριστικό των διαμήκων κυμάτων είναι ότι η διεύθυνση ταλάντωσης των υλικών σημείων (μετατόπιση) συμπίπτει με την διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Τα διαμήκη κύματα συμβολίζονται με το "P" από το λατινικό Primus (πρώτο), καθώς λόγω του ότι διαδίδονται με τη μεγαλύτερη ταχύτητα, φθάνουν στο σταθμό παρατήρησης πριν από τα άλλα είδη σεισμικών κυμάτων. Η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων εξαρτάται από τις σταθερές του Lamé,  $\lambda$  και  $\mu$  και από τη πυκνότητα  $\rho$ :

$$a = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

(1.1)

Τα κύματα P είναι ευκολότερο να αναγνωρισθούν και για αυτό χρησιμοποιούνται κατά κόροστις σεισμικές μεθόδους για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη δομή των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης.

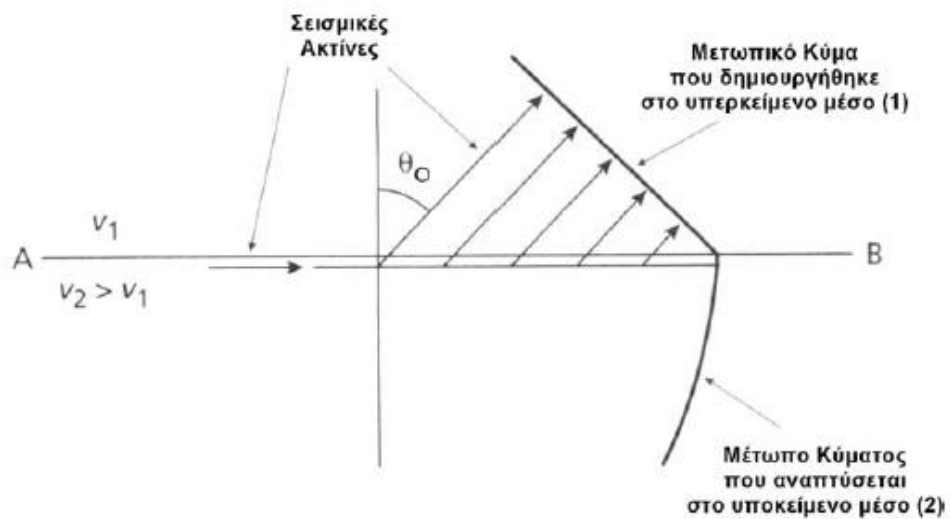
Στα εγκάρσια κύματα, η διεύθυνση ταλάντωσης των υλικών σημείων είναι κάθετη προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων δίνεται από τη σχέση:

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

Τα εγκάρσια κύματα μπορούν να διαδοθούν σε οποιοδήποτε μέσο, αρκεί να παρουσιάζει έστω και την ελάχιστη αντίσταση στην κάμψη δηλαδή ο συντελεστής ακαμψίας μ (ή το μέτρο διατμητικής παραμόρφωσης) να είναι διάφορος του μηδενός.

Από τη σύγκριση των παραπάνω σχέσεων προκύπτει ότι η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων. Για αυτό, τα εγκάρσια κύματα φθάνουν σε ορισμένο σταθμό μετά τα διαμήκη κύματα και συμβολίζονται με το S (secundus) (Βαφείδης, 2011).

Στην περίπτωση πρόσπτωσης του κύματος με οριακή γωνία, το κύμα διαθλάται και διαδίδεται στο δεύτερο υποκείμενο μέσο (2) κατά μήκος της διαχωριστικής επιφάνειας με ταχύτητα  $V_2 (V_2 > V_1)$ . Αλλά στη διάρκεια της διάδοσης η διαχωριστική επιφάνεια αρχίζει να πάλλεται σε κάθε σημείο της με αποτέλεσμα να δημιουργούνται δευτερεύοντα κύματα έτσι ώστε η ενέργεια να διαδίδεται ξανά στο επάνω μέσο (1) με ακτίνες που σχηματίζουν πάλι οριακή γωνία  $\theta_0$  και τα κύματα αυτά λέγονται μετωπικά κύματα (headwaves) (Αποστολόπουλος, 2013).



Σχήμα 1.1: Τρόπος διάδοσης μετωπικών κυμάτων (Αποστολόπουλος, 2013)

Όταν σεισμικό κύμα συναντήσει διεπιφάνεια, μέρος της ενέργειάς του ανακλάται και επιστρέφει πίσω (ανακλώμενο κύμα). Το κύμα που διαθλάται στην διεπιφάνεια και συνεχίζει στο άλλο μέσο. Στη μέθοδο σεισμικής ανάκλασης μελετήθηκαν κυρίως ανακλώμενα κύματα P, τα οποία διαδίδονται στην κατακόρυφη διεύθυνση. Στη περίπτωση αυτή, η διεύθυνση ταλάντωσης των νυλικών σημείων είναι κατακόρυφη.

Οι ελαστικές σταθερές του Lamé προσδιορίζονται από τον συνδυασμό μελέτης των ταχυτήτων διάδοσης των κυμάτων P και S.

Στην επιφάνεια της γης διαδίδονται επιφανειακά κύματα Rayleigh, Love και ψευδό-Rayleigh. Το κυριότερο χαρακτηριστικό των επιφανειακών κυμάτων είναι ότι το πλάτος τους ελαττώνεται όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια της Γης.

Τα κύματα Rayleigh είναι σύνθετα κύματα. Δηλαδή, οι ταλαντώσεις των υλικών σημείων γίνονται στο κατακόρυφο επίπεδο το οποίο περιέχει την διεύθυνση διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων Rayleigh είναι μικρότερη από την ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων. Η ταχύτητα τους εξαρτάται από τις ελαστικές σταθερές, τη πυκνότητα αλλά και από την συχνότητα (ή το μήκος κύματος), όταν τα κύματα Rayleigh διαδίδονται σε μη ομογενή μέσα.

Τα κύματα Love και ψευδό-Rayleigh δημιουργούνται από τη συμβολή ολικά ανακλώμενων κυμάτων χώρου. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία αυτών των κυμάτων είναι η ύπαρξη λεπτού γεωλογικού στρώματος κοντά στην επιφάνεια της

γης. Στις υψηλές συχνότητες, τα κύματα Love διαδίδονται με ταχύτητες συγκρίσιμες των κυμάτων S. Τα κύματα ψευδό-Rayleigh δημιουργούνται από τη συμβολή πολλαπλά ανακλώμενων κυμάτων P ή/και SV (Βαφείδης Α., 2011).

### **1.3 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ, ΓΕΩΦΩΝΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΙΚΑ**

Τα απαραίτητα όργανα για την πραγματοποίηση διασκοπήσεων με τη μέθοδο σεισμικής ανάκλασης ή τη μέθοδο σεισμικής διάθλασης είναι η σεισμική πηγή, τα γεώφωνα και τοκαταγραφικό. Ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στην υπό μελέτη περιοχή (ξηρά, θάλασσα κλπ) και τον επιδιωκόμενο σκοπό (βαθιά ή επιφανειακή διασκόπηση) έχει αναπτυχθεί κατάλληλος εξοπλισμός.

Τα τεχνητά παραγόμενα σεισμικά κύματα αναγράφονται από όργανα ευαίσθητα στις εδαφικές κινήσεις (γεώφωνα). Τα σήματα από τα γεώφωνα ενισχύονται, ψηφιοποιούνται και μεταφέρονται σε μαγνητικό μέσο (ψηφιακός καταγραφέας).

#### ***Σεισμικές πηγές ξηράς***

##### ***Εκρηκτικά***

Αποτελούν το 45% των χρησιμοποιούμενων σήμερα σεισμικών πηγών. Αυτά που χρησιμοποιούνται στη γεωφυσική είναι κυρίως δύο τύπων: Τρινιτροτολουόλιο και Νιτρικό αμμώνιο. Βρίσκονται συσκευασμένα σε μικρούς κυλίνδρους διαμέτρου περίπου 5cm και περιέχουν 0.5-5kg εκρηκτικό και εκρήγνυνται με τη βοήθεια ηλεκτρικού καψυλλίου. Η έκρηξη γίνεται μέσα σε γεωτρήσεις και κάτω από το επιφανειακό στρώμα για να ελαχιστοποιηθεί ο προκαλούμενος σεισμικός θόρυβος και να αυξηθεί η διάδοση της σεισμικής ενέργειας, σύζευξη με το έδαφος. Επίσης, όταν γίνει η έκρηξη κάτω από το επιφανειακό στρώμα, αποφεύγεται η απορροφητική του επίδραση που τυχόν θα έχει επάνω στα δημιουργούμενα σεισμικά κύματα.

##### ***Σφυρί και Πίπτον Βάρος***

Το Πίπτον Βάρος είναι μεγάλη μεταλλική πλάκα που πέφτει από ύψος 3m. Πολλές φορές χρησιμοποιούνται 3 συνεχή ταυτόσημα χτυπήματα αυξάνοντας τον λόγο σήματος προς θόρυβο. Είτε με σφυρί είτε με πίπτον βάρος, τη στιγμή της επαφής με το έδαφος υπάρχει σύστημα που ευαισθητοποιεί το καταγραφικό όργανο.



Σχήμα 1.2: Σφυρί και Πίπτον Βάρος (Αποστολόπουλος, 2013)

Πλεονεκτήματα : είναι φτηνό, χρησιμοποιείται σε κατοικημένες περιοχές, είναι καλό σε περιοχές χαμηλού θορύβου, είναι πηγή χαμηλής συχνότητας και πυκνότητας ενέργειας και χρησιμοποιείται σε δύσκολες καιρικές συνθήκες.

Μειονεκτήματα : ενεργεί σαν φίλτρο που βγάζει τις υψηλές συχνότητες, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ανώμαλο ή σε υδάτινο περιβάλλον, δεν μπορούν να υπάρξουν συγχρονισμένες εκτονώσεις της σεισμικής ενέργειας (Αποστολόπουλος, 2013).

### *Vibroseis*

Το Vibroseis είναι η πιο διαδεδομένη σεισμική πηγή. Αποτελείται από χαλύβδινη πλάκα και υδραυλικό σύστημα παραγωγής ταλαντώσεων. Το Vibroseis παράγει περιοδικά κτυπήματα μικρού πλάτους και συνεχώς αυξανόμενης συχνότητας (από 6-8 Hz). Το Vibroseis παράγει διαμήκη ή εγκάρσια κύματα χωρίς να προκαλεί περιβαλλοντικές καταστροφές με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται ακόμη και σε κατοικημένες περιοχές.



*Σχήμα 1.3: Vibroseis<sup>[2]</sup>*

Το κόστος της διασκόπησης είναι αυξημένο γιατί απαιτούνται τρία ή τέσσερα Vibroseis. Τα σειсмоγράμματα είναι πολύπλοκα, λόγω της μεγάλης διάρκειας της κυματομορφής του Vibroseis (περίπου 7s). Τα σειсмоγράμματα απαλλάσσονται από το μεγάλης διάρκειας σήμα της πηγής, όταν γίνει συσχέτιση των σημάτων με την κυματομορφή της πηγής.

#### *Γεώφωνα*

Στις χερσαίες διασκοπήσεις η εδαφική κίνηση γίνεται αισθητή από τα γεώφωνα. Τα γεώφωνα είναι όργανα ευαίσθητα στις εδαφικές κινήσεις και τα πιο διαδεδομένα στις σεισμικές διασκοπήσεις είναι αυτά της κατακόρυφης συνιστώσας

Κατά τη μελέτη των επιμήκων και εγκάρσιων κυμάτων είναι απαραίτητη η χρήση γεωφώνων τριών συνιστωσών. Γεωφώνων δηλαδή, τα οποία είναι ευαίσθητα όχι μόνο στις κατακόρυφες αλλά και στις οριζόντιες εδαφικές κινήσεις (Βαφείδης, 2011).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Για την δημιουργία και επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων σεισμικής ανάκλασης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Matlab<sup>(TM)</sup>, κατάλληλοι αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης για την προσομοίωση της διάδοσης σεισμικών κυμάτων (P-SV) σε 2 διαστάσεις με τη χρήση πεπερασμένων διαφορών. Για τη αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας στηνοποιά στηρίζεται ο προσομοιωτής προτείνονται τα άρθρα Vafidis, et al., (1987), Vafidis et al., (1992).

Η εντολή όπου χρησιμοποιήθηκε για να λειτουργήσει ο αλγόριθμος και να δημιουργηθεί το μοντέλο είναι:

*PSV\_SYNTHETICS\_VER11;*

Για την αποφυγή προβλημάτων ευστάθειας και αριθμητικής διασποράς κατά την επίλυση της διαφορικής κυματικής εξίσωσης με την χρήση των πεπερασμένων διαφορών θα πρέπει να πληρούνται οι κατάλληλοι περιορισμοί (Vafidis, 1988).

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

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} * \alpha_{\max} \leq \frac{2}{3} \quad (2.1)$$

Όπου  $\alpha_{\max}$ : η μέγιστη ταχύτητα των P-κυμάτων,  $\Delta t$  διακριτοποίηση στο χώρο του χρόνου(t) και  $\Delta x$  η διακριτοποίηση στο χώρο του χώρου(x-z).

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

$$\frac{\lambda_{min}}{\Delta x} > 6 \quad (2.2)$$

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

$a_{min}$ : η ελάχιστη ταχύτητα των S- κυμάτων

$f_{max}$ :κεντρική συχνότητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων

Αφού έγιναν οι κατάλληλοι περιορισμοί βάση των παραπάνω κριτηρίων ορίστηκαν οι παράμετροι του πλέγματος και το χρονικό βήμα  $\Delta t=0.01\text{ms}$ , ενώ οι διαστάσεις του κάθε κελιού καθορίζονται από τις ισαποστάσεις των κόμβων στην X και Z διεύθυνση οι οποίες είναι ίσες με  $\Delta x=\Delta z=0,1\text{m}$

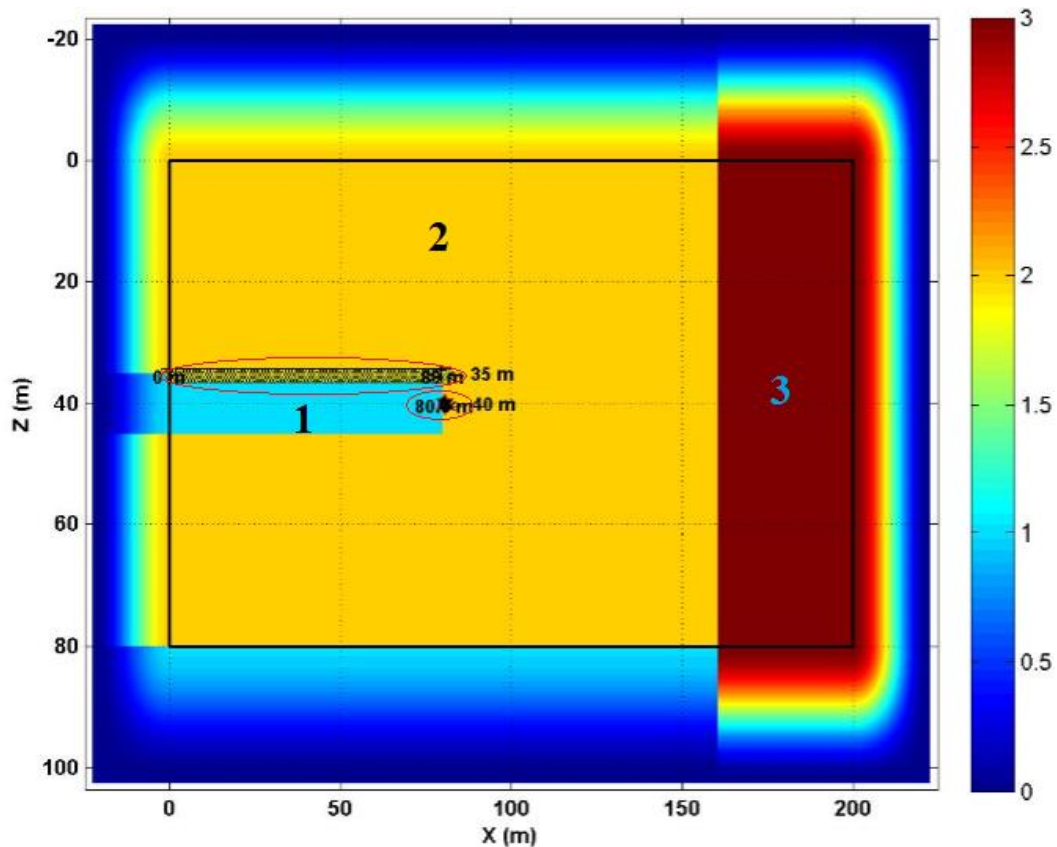
Αρχικά δημιουργήθηκε το μοντέλο (220m μήκος και 80m βάθος), ορίστηκε μέγιστη και ελάχιστη ταχύτητα των P και S κυμάτων και περιμετρικά σε αυτό τοποθετήθηκαν απορροφητικά όρια (Daietal, 1994) για να μην δημιουργηθούν τεχνητές ανακλάσεις από τα όρια του μοντέλου. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν η σήραγγα (στρώμα 1) και το ρήγμα (στρώμα 3). Οι παράμετροι παρατίθενται στον πίνακα 1.1.

*Πίνακας 1: Διαμήκη ( $V_p$ ) και εγκάρσια ( $V_s$ ) ταχύτητα και πυκνότητα ( $\rho$ ) κάθε στρώματος.*

ΣΤΡΩΜΑ	$V_p(\text{m/s})$	$V_s(\text{m/s})$	$\rho(\text{g/cm}^3)$
<b>Στρώμα 1</b>	330	0.1	1
<b>Στρώμα 2</b>	4500	2600	2.7
<b>Στρώμα 3</b>	3500	1680	2.6

Για το στρώμα 1, που είναι η σήραγγα, οι τιμές για την ταχύτητα των S κυμάτων ( $V_s$ ) και την πυκνότητα ( $\rho$ ) θεωρήθηκαν μηδενικές για την αποφυγή αριθμητικής αστάθειας της προσομοίωσης. Με βάση το παραπάνω μοντέλο τοποθετήθηκε το

ρήγμα σε αποστάσεις 180m και 160m. Στην δεύτερη περίπτωση η προχώρηση της σήραγγας είναι 20m. Στο επόμενο βήμα τοποθετήθηκαν 81 γεώφωνα, ανά μισό μέτρο, (το πρώτο γεώφωνο τοποθετήθηκε στα 0m), στο πάνω μέρος της σήραγγας σε βάθος 35 m και η πηγή, με συχνότητα 200Hz στο άκρο της διάταξης των γεωφώνων και μισό μέτρο εσωτερικά του τοιχώματος, σε βάθος 40m.



Σχήμα 2.1 : Απεικόνιση πηγής – γεωφώνων του μοντέλου όπου φαίνονται και οι θέσεις της πηγής(αστεράκια) και των γεωφώνων (τρίγωνα)

Τέλος ορίζεται ο συνολικός χρόνος καταγραφής (100ms) καθώς επίσης η απεικόνιση και αποθήκευση στιγμιότυπων (snapshots) του κυματικού πεδίου σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές.

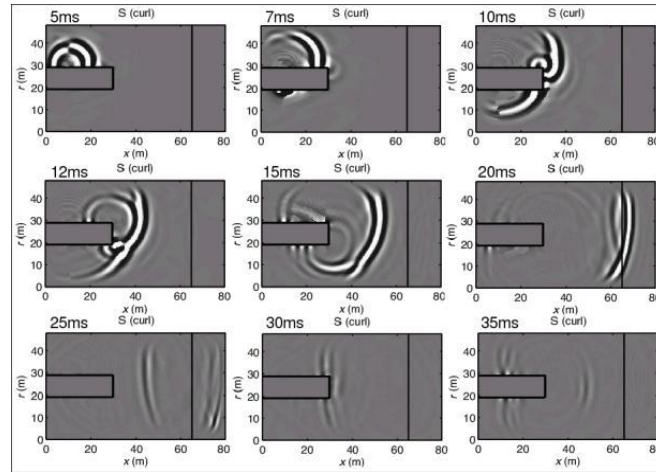
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Αντίστοιχο πείραμα περιγράφεται στο άρθρο « Seismic prediction ahead of a tunnel face - Modeling, field surveys, geotechnical interpretation – » (Lüthetal., 2008) με δοκιμές σε μοντέλο 2D αλλά και 3D. Οι δοκιμές έγιναν στο Gotthard Base Tunnel στην Ελβετία και συγκεκριμένα στη θέση «Piora adit».

Μια σημαντική προϋπόθεση για την υπόγεια κατασκευή είναι η λεπτομερής γνώση των συνθηκών του εδάφους της περιοχής κατασκευής. Πριν ανασκαφεί μία σήραγγα, γίνονται διερευνητικές γεωτρήσεις ώστε να αναγνωριστεί το γεωλογικό περιβάλλον κατά μήκος της προβλεπόμενης γραμμής διάνοιξης. Αυτές όμως, παρέχουν μόνο δεδομένα σε περιορισμένο αριθμό θέσεων (έρευνες επιφάνειας).

Με τις σεισμικές μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί μπορεί να προβλεφθεί ένα ρήγμα μπροστά από σήραγγα κατά τη διάρκεια της κατασκευής της (Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο σεισμικά κύματα (P και S) παράγονται κοντά στον τοίχωμα της σήραγγας ή απευθείας στο μέτωπο της σήραγγας. Αυτά τα κύματα ανακλώνται σε γεωλογικούς σχηματισμούς και οι ανακλάσεις τους παρατηρούνται από γεώφωνα που είναι τοποθετημένα γύρω ή στο μέτωπο της σήραγγας. Ένα από τα πιο διαδεδομένα συστήματα ανίχνευσης είναι το Sonic Softground (SSP) (Kneibetal., 2000). Αυτό το σύστημα αποτελείται από πιεζοηλεκτρικές πηγές και γεώφωνα ενσωματωμένα στη κοπτική κεφαλή μηχανήματος (Μηχάνημα διάνοιξης σιράγγων, TBM). Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε χαλαρούς σχηματισμούς.

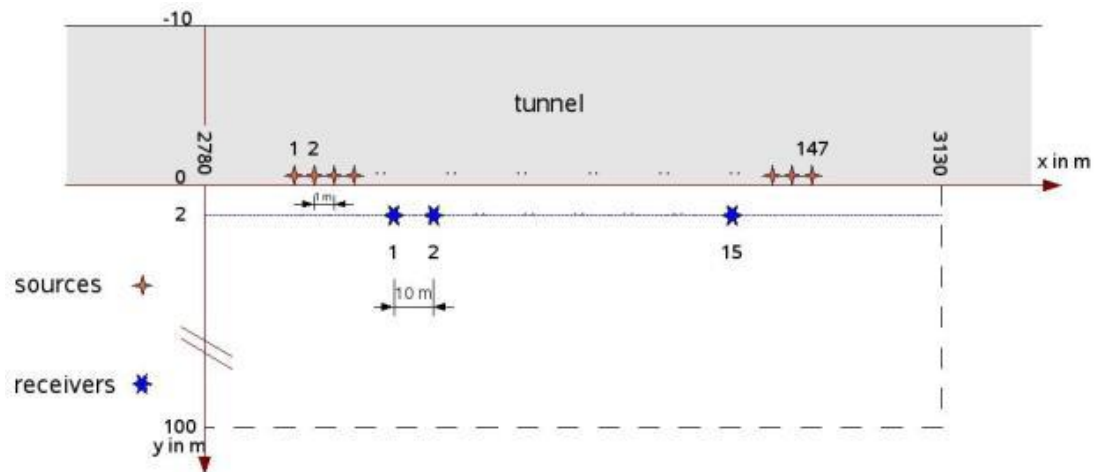


*Σχήμα 3.1: Στιγμιότυπα κύματος μεταξύ 5ms και 35ms σε 2D. Στα 65m (από την πηγή) έχουμε τη ζώνη του ρήγματος, όπου ανακλώνται τα κύματα(Lüthetal., 2008)*

Στις προσομοιώσεις, θεωρήθηκε σήραγγα διαμέτρου 10m. Μπροστά από το τούνελ, τοποθετήθηκε μια ζώνη η οποία χαρακτηρίζεται από χαμηλές ταχύτητες και ισχυρή απορρόφηση. Το Σχήμα 3.1 δείχνει στιγμιότυπα κύματος μεταξύ 5ms και 35ms μετά το χτύπημα του σφυριού στο πλευρικό τοίχωμα της σήραγγας. Τα στιγμιότυπα δείχνουν S-κύματα. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας των P-κυμάτων μεταδίδεται στα τοιχώματα όταν η πηγή βρίσκεται στο τοίχωμα της σήραγγας, οπότε τα P-κύματα δεν είναι χρήσιμα για την εξερεύνηση μπροστά από το μέτωπο. Παρατηρήθηκε η παραγωγή κύματος Rayleigh που ταξιδεύει κατά μήκος του τοιχώματος της σήραγγας. Μετά από περίπου 7ms, αυτό το κύμα Rayleigh φθάνει στο μέτωπο της σήραγγας. Στα επόμενα στιγμιότυπα (Σχήμα 3.1), το παραπάνω κύμα μετατρέπεται σε S-κύμα και διαδίδεται από το μέτωπο της σήραγγας προς τη ζώνη του ρήγματος. Στα 20ms, ένα μέρος του ανακλάται στην ζώνη του ρήγματος και επιστρέφει στο μέτωπο της σήραγγας, όπου μετατρέπεται πάλι σε κύμα Rayleigh περίπου στα 30ms.

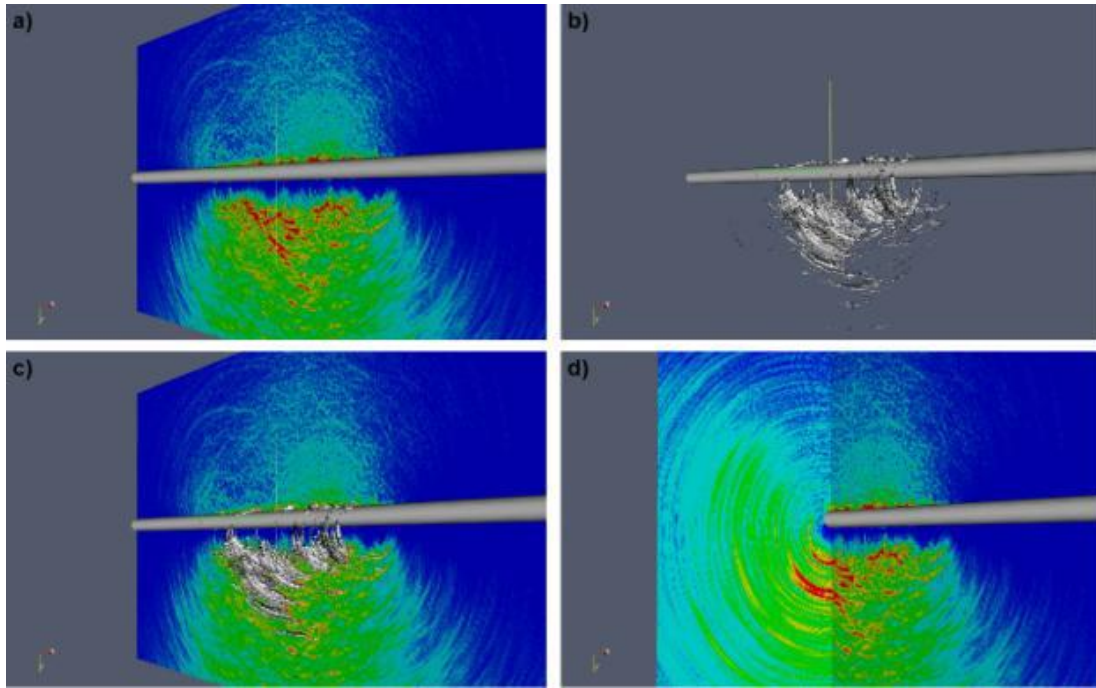
### 3.2 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ (Pioraadit)

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 15 γεώφωνα και 147 πηγές (Σχήμα 3.2). Τα γεώφωνα βρίσκονται σε απόσταση 2m από το τοίχωμα της σήραγγας και οι πηγές στην επιφάνειά της κάθε 1m.



Σχήμα 3.2 : Σχηματική απεικόνιση πηγών δεκτών κατά μήκος της σήραγγας (Lüthetal., 2008).

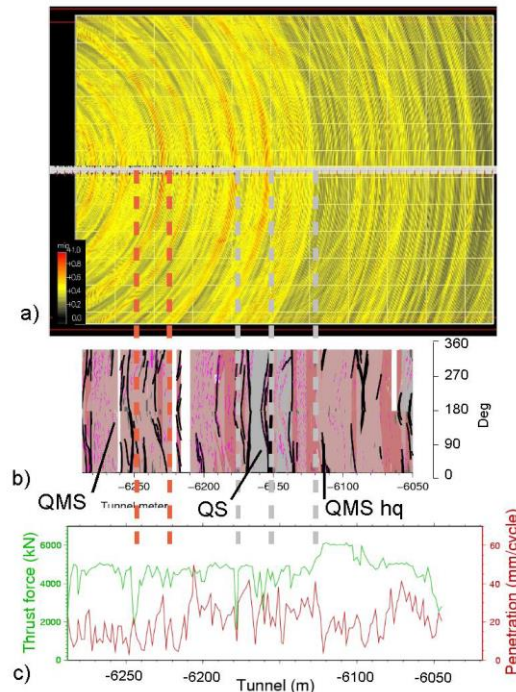
Από την επεξεργασία των καταγραφών στις 2 διαστάσεις η σεισμική ταχύτητα προσαρμόστηκε περιμετρικά γύρω από τον άξονα της σήραγγας προκειμένου να καθοριστεί η ταχύτητα στα 3D μοντέλα για την σεισμική απεικόνιση η οποία βασίζεται στην ανάλυση των συνιστωσών της μετατόπισης των υλικών σημείων στη θέση των γεωφώνων και στην χωροθέτηση των καταγραφών. Αυτή η μέθοδος απεικόνισης δεν λαμβάνει υπ' υπόψη τη γωνία πρόσπτωσης των κυμάτων, έτσι ώστε οι ανακλαστήρες να εμφανίζονται σαν ομόκεντρα κελύφη γύρω από την σήραγγα. Στο σχήμα 3.3, μετά την εφαρμογή της προαναφερθείσας επεξεργασίας εμφανίζονται με κόκκινο τα ανακλώμενα κύματα που προέρχονται από τη ζώνη του ρήγματος τα οποία απεικονίζουν μερικώς αυτή τη ζώνη.



*Σχήμα 3.3: Εικόνες από τις μετρήσεις κατά μήκος της σήραγγας. a) εικόνα κατά μήκος της σήραγγας, b) 3D εικόνα από τις κύριες ανακλάσεις (τιμές πάνω από 80% όριο), c) υπέρθεση εικόνων a, b σε 3D, d) σύνθεση από εικόνες κατά μήκος της σήραγγας και κάθετες σε αυτή (Lüthetal., 2008).*

### 3.3 ΕΡΜΗΝΕΙΑ

Οι μετρήσεις με γεωφυσικές μεθόδους από το εσωτερικό σήραγγας είναι περιορισμένες με αποτέλεσμα να είναι και περιορισμένη η απεικόνιση των ανωμαλιών του εδάφους. Σεισμικές μετρήσεις σε συνδυασμό με γεωλογική χαρτογράφηση πραγματοποιήθηκαν σε σήραγγα στο Glendoe (Σκωτία). Στο σχήμα 3.4 φαίνεται η χωρική κατανομή των σεισμικών κυμάτων κατά μήκος της σήραγγας όπως προκύπτει από τα κύματα που παράγονται στο μέτωπο της σήραγγας. Επίσης, συγκρίνονται τα σεισμικά δεδομένα με τη γεωλογική χαρτογράφηση όπως εκτελείται κατά τη διάρκεια της εκσκαφής και για τον έλεγχο των παραμέτρων του μηχανήματος διάνοιξης σιράγγων (TBM), ώθηση δύναμης και ποσοστό διείδυσης.



Σχήμα 3.4: a) Καταγραφές από ένα τμήμα της σήραγγας κατά την διάρκεια κατασκευής. Κόκκινα χρώματα δείχνουν ισχυρή ανακλαστικότητα, αχνό κίτρινο υποδεικνύει χαμηλή ανακλαστικότητα, b) γεωλογική χαρτογράφηση των τοιχωμάτων της σήραγγας, c) ώθηση δύναμης και ποσοστό διεύθυνσης του TBM κατά τη διάρκεια της εκσκαφής (Lüthetal., 2008).

Η σεισμική μοντελοποίηση σε σήραγγες έχει δείξει ότι μπορούν να εντοπιστούν ρηξιγενείς ζώνες και όρια γεωλογικών στρωμάτων με σεισμικά δεδομένα. Σε σύγκριση με τις μετρήσεις από την επιφάνεια, το εύρος καταγραφής είναι μικρότερο, αλλά μπορεί να μεγαλώσει με ειδικά μέσα όπως καταγραφικό σύστημα τριών συνιστώσων, την αξιολόγηση της πολικότητας ή με την εκπομπή σεισμικών κυμάτων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας σε περιορισμένη γωνία διάδοσης. Σεισμικές μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί σε πολλές σήραγγες κατά την διάρκεια κατασκευής τους χρησιμοποιώντας πηγές και γεώφωνα 10m και 30m πίσω από το μέτωπο. Σε αυτή την περίπτωση τα κύματα διαδίδονται στην κατεύθυνση της σήραγγας. Εικόνες από τα ανακλώμενα κύματα δείχνουν ρήγματα ή μεταβαλλόμενες συνθήκες της βραχομάζας, που εντοπίζονται από την γεωλογική χαρτογράφηση και την αξιολόγηση των παραμέτρων του TBM. Για τα επιθυμητά αποτελέσματα πρέπει να συνδυαστούν όλες οι γεωλογικές, γεωτεχνικές και γεωφυσικές πληροφορίες που είναι διαθέσιμες για την αντίστοιχη σήραγγα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

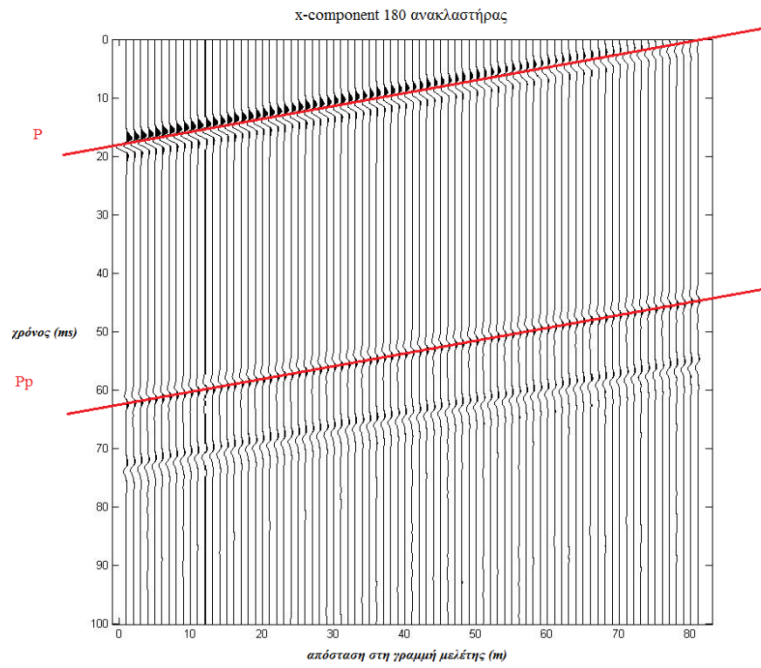
Σε αυτό το κεφαλαίο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των δοκιμών στο πρόγραμμα προσομοίωσης, και της επεξεργασίας των συνθετικών καταγραφών για την αναγνώριση των σεισμικών κυμάτων και την απεικόνιση δομών μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας..

Δημιουργήθηκαν δύο μοντέλα για την προσομοίωση της προχώρησης της σήραγγας και αυτό πραγματοποιήθηκε μικραίνοντας την απόσταση της σήραγγας από τον ανακλαστήρα του ρήγματος. Στο πρώτο μοντέλο ο ανακλαστήρας είναι τοποθετημένος στα 180m και στο δεύτερο στα 160m (δηλαδή πιο κοντά στο μέτωπο της σήραγγας), διατηρώντας σταθερό το μήκος της σήραγγας που είναι 80m.

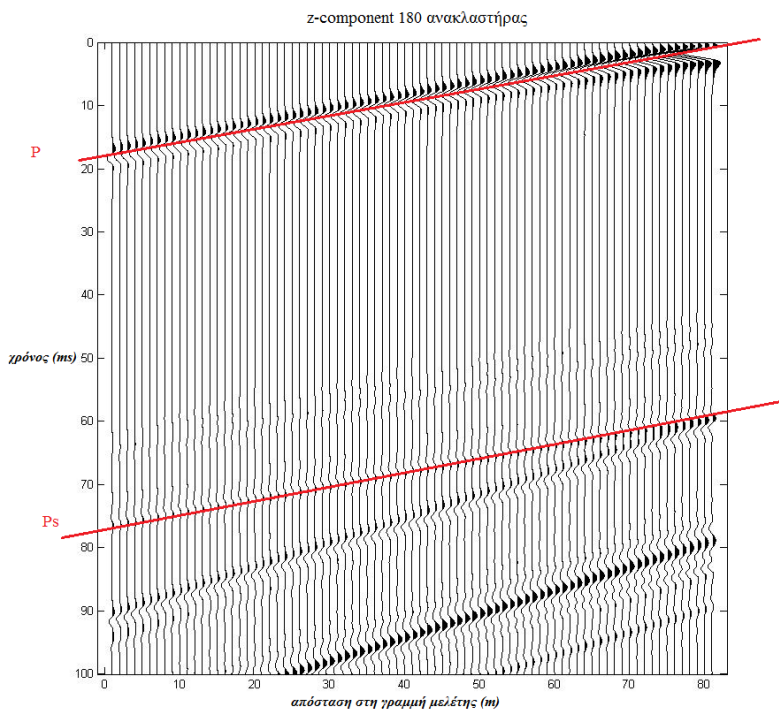
Επειδή η αναγνώριση των πρώτων αφίξεων και των ανακλώμενων κυμάτων δεν ήταν εύκολη όταν στο μοντέλο υπήρχε η σήραγγα, πραγματοποιήθηκε το πείραμα χωρίς τη σήραγγα για την αναγνώρισή τους.

Κατά την επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων, το πρώτο βήμα ήταν να πολλαπλασιαστεί κάθε στοιχείο του ίχνους με τον αντίστοιχο χρόνο διαδρομής (t), για να ενισχυθούν οι καταγραφές μας και να είναι ευκολότερη η αναγνώριση των κυμάτων.

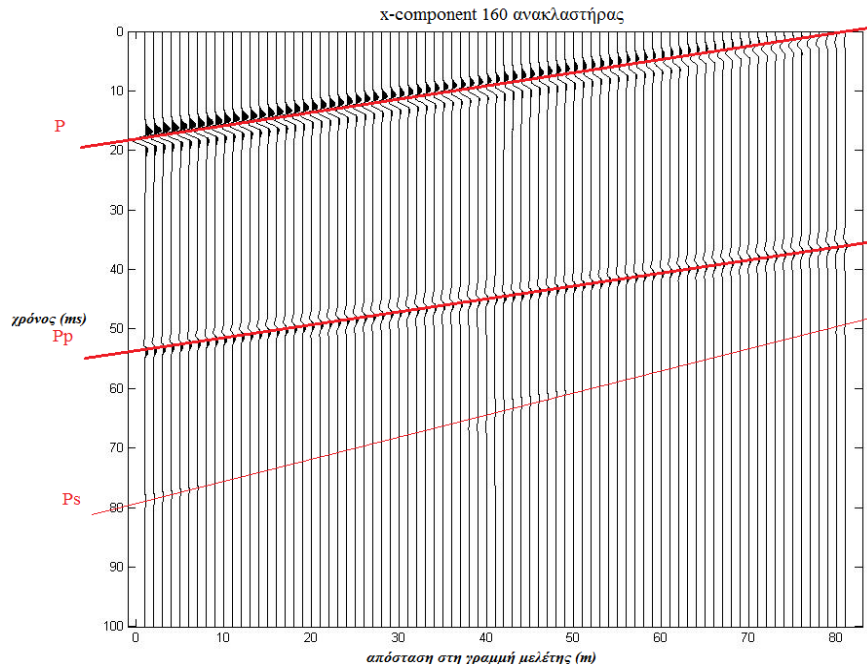
Τα αποτελέσματα των πειραμάτων χωρίς σήραγγα με τους ανακλαστήρες στα 180m και στα 160m και στις δυο συνιστώσες ταλάντωσης των σωματιδίων (x,z), παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν (σχήματα 4.1 έως 4.4). Τα είδη κυμάτων που αναγνωρίστηκαν είναι τα απευθείας (P), τα ανακλώμενα (PP) και (PS).



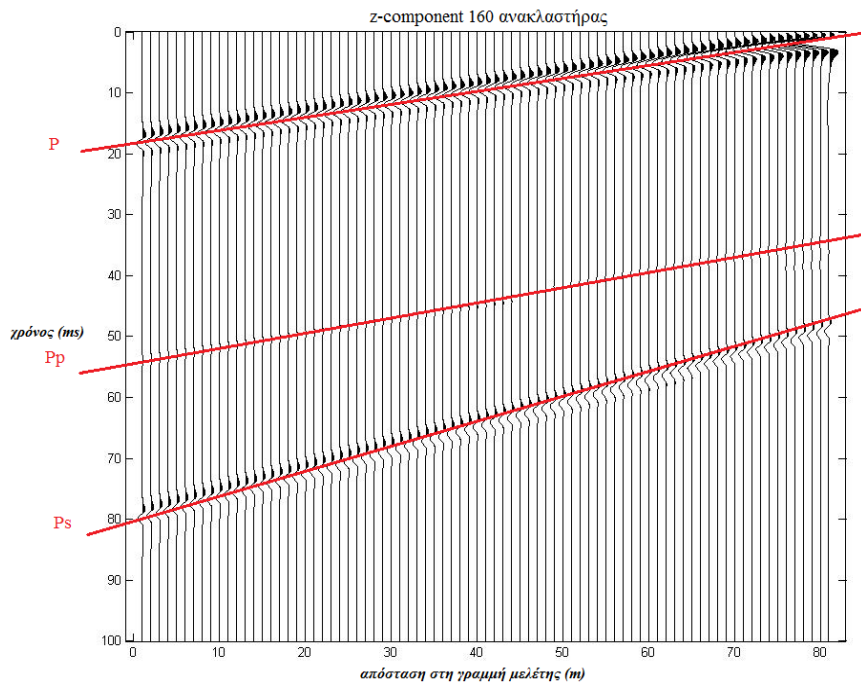
Σχήμα 4.1: Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη x-συνιστώσα με τον ανακλαστήρα στα 180m χωρίς τη σήραγγα.



Σχήμα 4.2: Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη z-συνιστώσα με τον ανακλαστήρα στα 180m χωρίς τη σήραγγα.



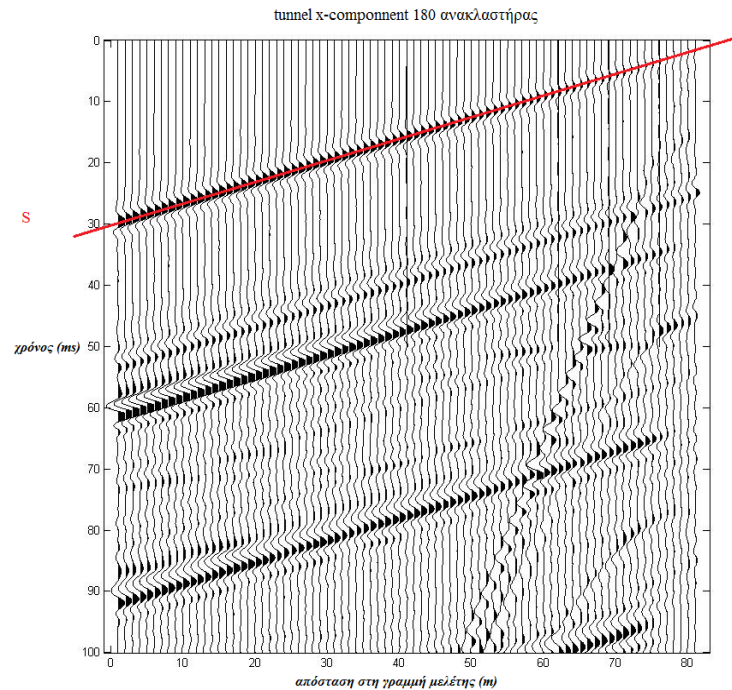
Σχήμα 4.3: Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη x-συνιστώσα με τον ανακλαστήρα στα 160m χωρίς τη σήραγγα.



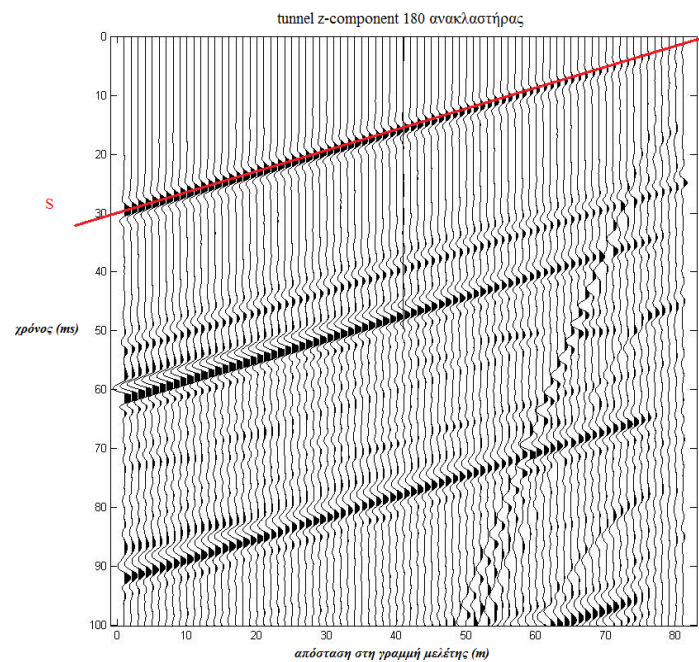
Σχήμα 4.4: Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη z-συνιστώσα με τον ανακλαστήρα στα 160m χωρίς τη σήραγγα.

Παρατηρείται ότι στη συνιστώσα-x φαίνονται καλύτερα τα ανακλώμενα PP ενώ στη συνιστώσα-z τα ανακλώμενα PS, καθώς επίσης ότι οι μετρήσεις είναι πιο καλές όταν

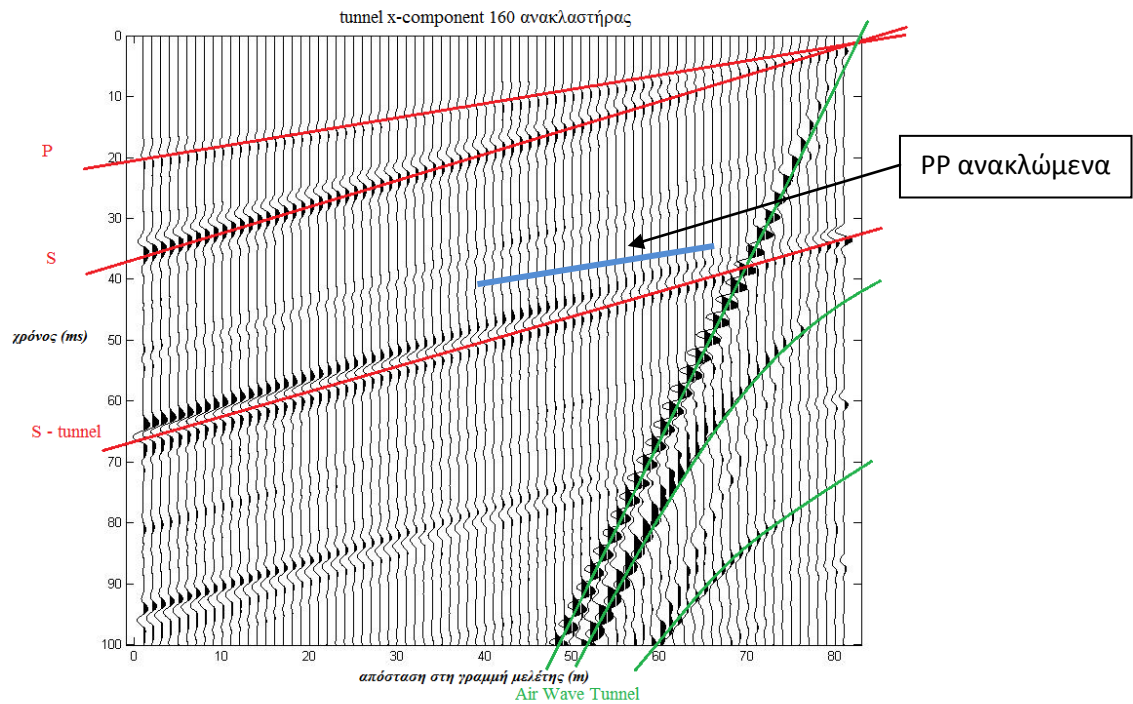
ο ανακλαστήρας είναι στα 160m. Στη συνέχεια εισάγεται στο μοντέλο η σήραγγα και αφού αναγνωρίστηκαν τα κύματα στα προηγούμενα μοντέλα, ήταν ευκολότερη η αναγνώριση των κυμάτων στις πολύπλοκες καταγραφές των σχημάτων 4.5 έως 4.8.



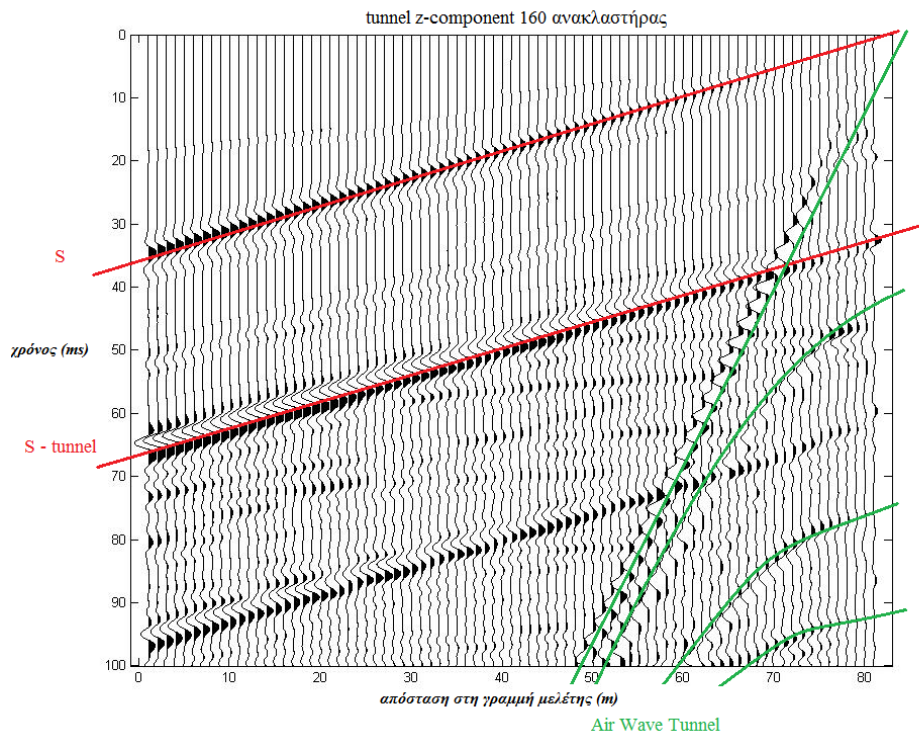
Σχήμα 4.5: Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη x-συνιστώσα με τον ανακλαστήρα στα 180m με τη σήραγγα.



Σχήμα 4.6: Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη z-συνιστώσα με τον ανακλαστήρα στα 180m με τη σήραγγα.

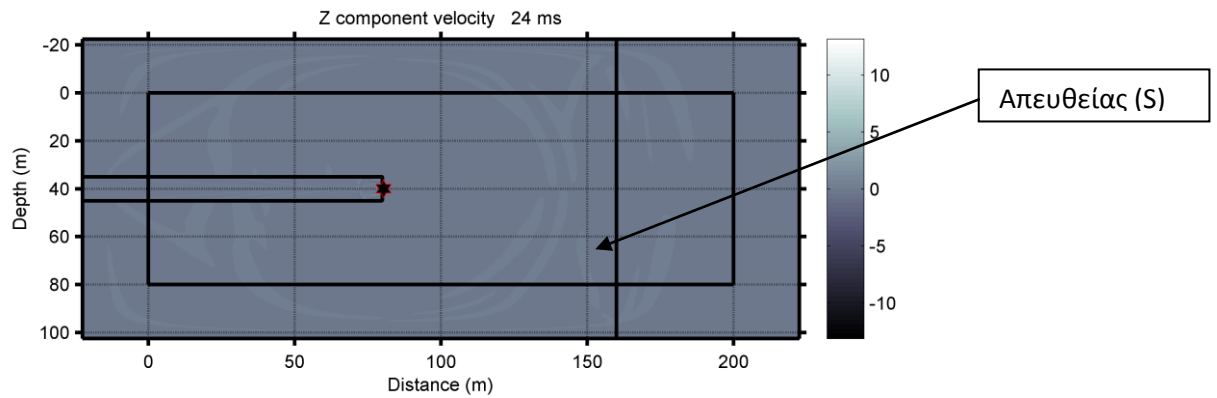


Σχήμα 4.7: Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη x-συνιστώσα με τον ανακλαστήρα στα 160m με τη σήραγγα.

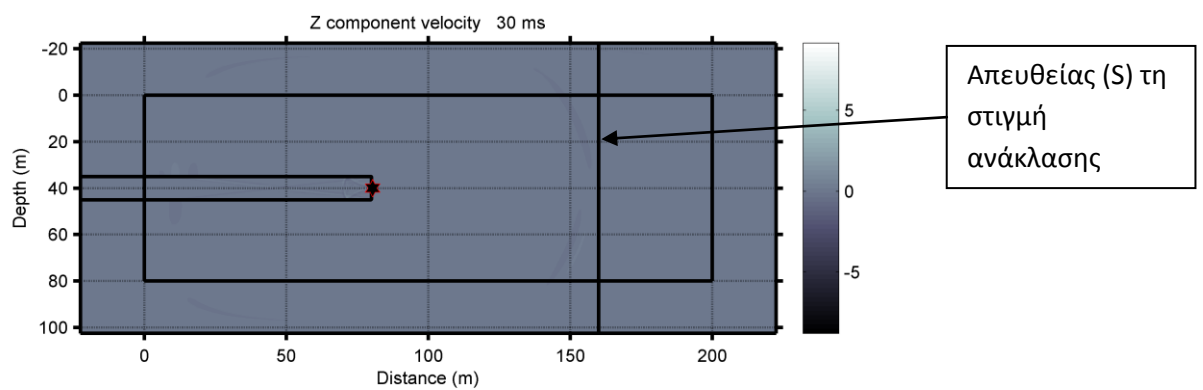


Σχήμα 4.8: Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη z-συνιστώσα με τον ανακλαστήρα στα 160m με τη σήραγγα.

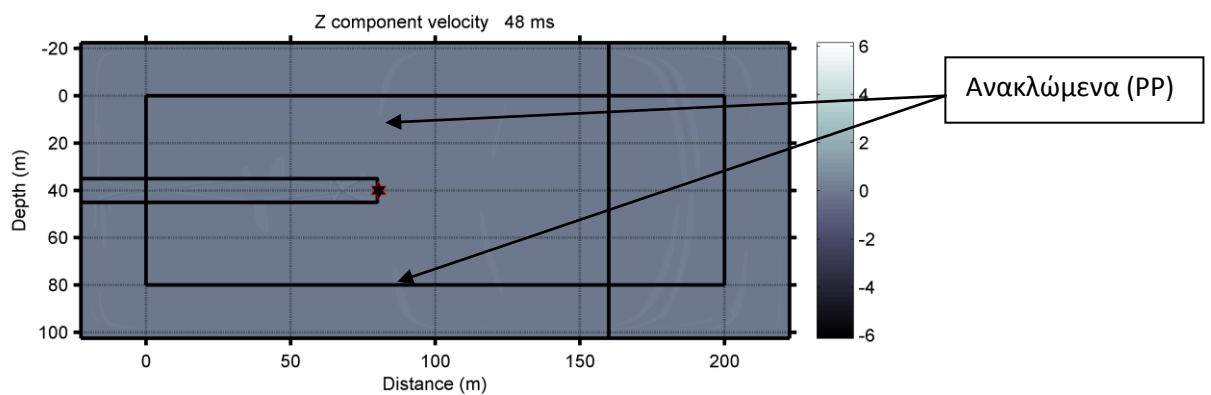
Στα σχήματα 4.9 έως 4.11 παρουσιάζονται επιλεγμένα στιγμιότυπα της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας ταλάντωσης των σωματιδίων στο μοντέλο με τον ανακλαστήρα στα 160m, για να είναι ευκολότερη η κατανόηση των καταγραφών.



Σχήμα 4.9 : Στιγμιότυπο στα 24ms για τη συνιστώσα-z της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων.



Σχήμα 4.10 : Στιγμιότυπο στα 30ms για τη συνιστώσα-z της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων.



Σχήμα 4.11 : Στιγμιότυπο στα 48ms για τη συνιστώσα-z της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων.

Το επόμενο βήμα ήταν η εφαρμογή χρονικής διόρθωσης η οποία μετατρέπει τον χρόνο διαδρομής ανακλώμενου P-κύματος σε διπλό χρόνο ανάκλασης από το μέτωπο της σήραγγας μέχρι τον ανακλαστήρα και την οριζόντια απόσταση των γεωφώνων σε βάθος του σημείου ανάκλασης. Αυτό επιτεύχθηκε με τη δημιουργία κατάλληλης συνάρτησης (function) στη MATLAB,

***Function [x0,z0,dt,sc]=functiontest2(xg,zg,xs,zs,x0,vp,seis,k)\****

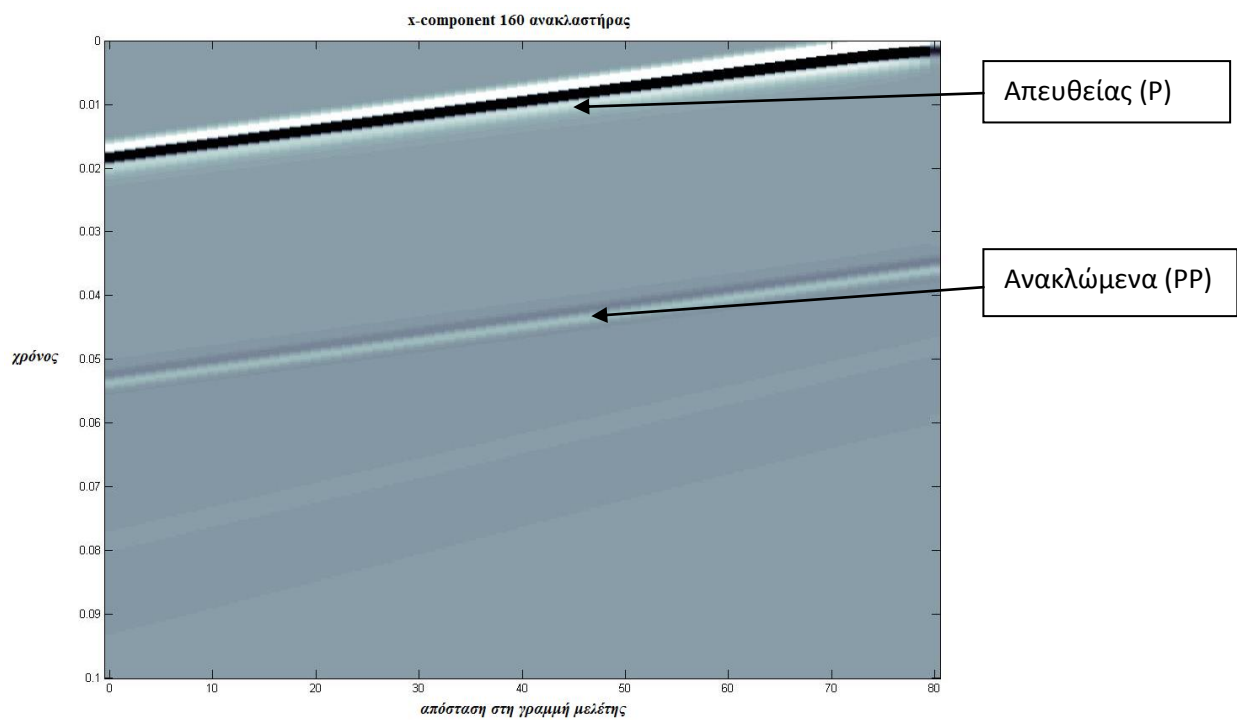
Όπου για τα δεδομένα εισόδου :

- xg και zg είναι οι συντεταγμένες της θέσης του γεωφώνου,
- xs και zs είναι οι συντεταγμένες της θέσης της πηγής,
- x0 η θέση του ανακλαστήρα,
- vp η ταχύτητα των P κυμάτων στο μέσο διάδοσης,
- seis είναι πίνακας των συνθετικών δεδομένων,
- k είναι το διάστημα δειγματοληψίας

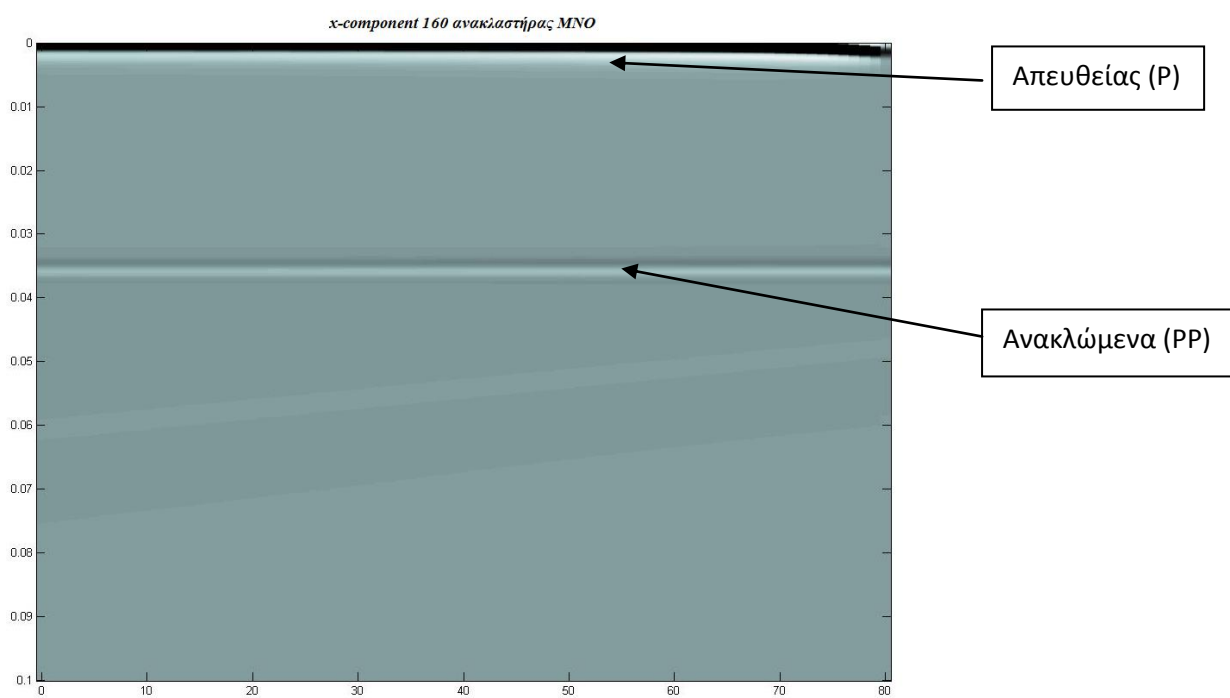
και για τα δεδομένα εξόδου όπου:

- x0 και z0 διανύσματα που περιλαμβάνουν τις συντεταγμένες της θέσης του σημείου ανακλαστήρα,
- dt είναι διάνυσμα που περιλαμβάνει τους διπλούς χρόνους ,
- sc είναι πίνακας των μετασχηματισμένων δεδομένων

Ο αλγόριθμος αυτός ελέγχθηκε στις καταγραφές για το μοντέλο με τον ανακλαστήρα στα 160m με και χωρίς σήραγγα. Στα σχήματα 4.12 και 4.13, παρουσιάζονται οι καταγραφές πριν και μετά την εφαρμογή της παραπάνω διόρθωσης.



Σχήμα 4.12: Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη  $x$ -συνιστώσα με τον ανακλαστήρα στα 160 χωρίς τη σήραγγα



Σχήμα 4.13 : Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη  $x$ -συνιστώσα με τον ανακλαστήρα στα 160 χωρίς τη σήραγγα μετά την εφαρμογή της χρονικής διόρθωσης. (Άξονας  $y$ - διπλός χρόνος και άξονας  $x$ - αρίθμηση γεωφώνων)

Στο σχήμα 4.13 παρατηρείται ότι ανακλώμενα κύματα (PP) απεικονίζονται σε ευθεία μετά την εφαρμογή της εν λόγω διόρθωσης,

Για την απομάκρυνση των υπόλοιπων κυμάτων που εμφανίζονται στις καταγραφές εφαρμόστηκε στη συνέχεια φίλτρο ενδιάμεσης τιμής στις μετρήσεις από γειτονικά ίχνη οι οποίες καταγράφονται την ίδια χρονική στιγμή χρησιμοποιώντας την εντολή MedianFilter 2 (`B = medfilt2(A, [mn])`) της MATLAB.

Όπου A είναι ο πίνακας των συνθετικών καταγραφών μετά την χρονική διόρθωση

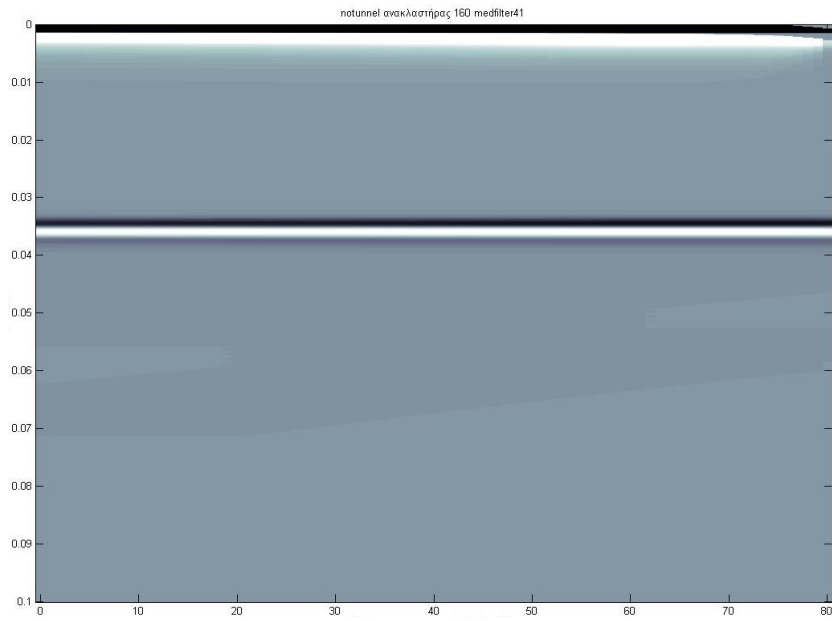
m το δείγμα χρόνου ,

n το δείγμα στην απόσταση

Με το MedianFilter 2 , κάθε στοιχείο εξόδου περιέχει τη ενδιάμεση τιμή ανάμεσα στο m, n γύρω από το εκάστοτε στοιχείο στα δεδομένα εισόδου. Το MedianFilter 2 εφαρμόστηκε στις καταγραφές από όλα τα μοντέλα με τρεις σταθερές τιμές για m, n που ήταν 11, 41, 81 σεισμικά ίχνη.



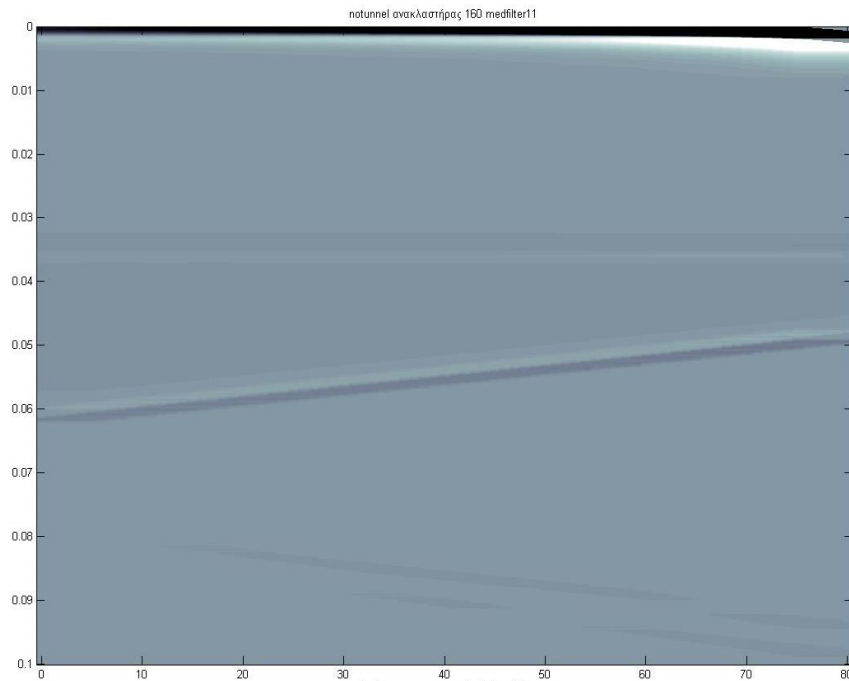
Σχήμα 4.14 :Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη x-συνιστώσα για τον ανακλαστήρα στα 160m χωρίς σήραγγα μετά την εφαρμογή φίλτρου ενδιάμεσης τιμής (medianfilter 11). ( Άξονας y- διπλός χρόνος και άξονας x- αρίθμηση γεωφώνων)



Σχήμα 4.15: Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη  $x$ -συνιστώσα για τον ανακλαστήρα στα 160m χωρίς σήραγγα μετά την εφαρμογή φίλτρου ενδιάμεσης τιμής (*medianfilter41*). (Άξονας  $y$ - διπλός χρόνος και άξονας  $x$ - αρίθμηση γεωφώνων)



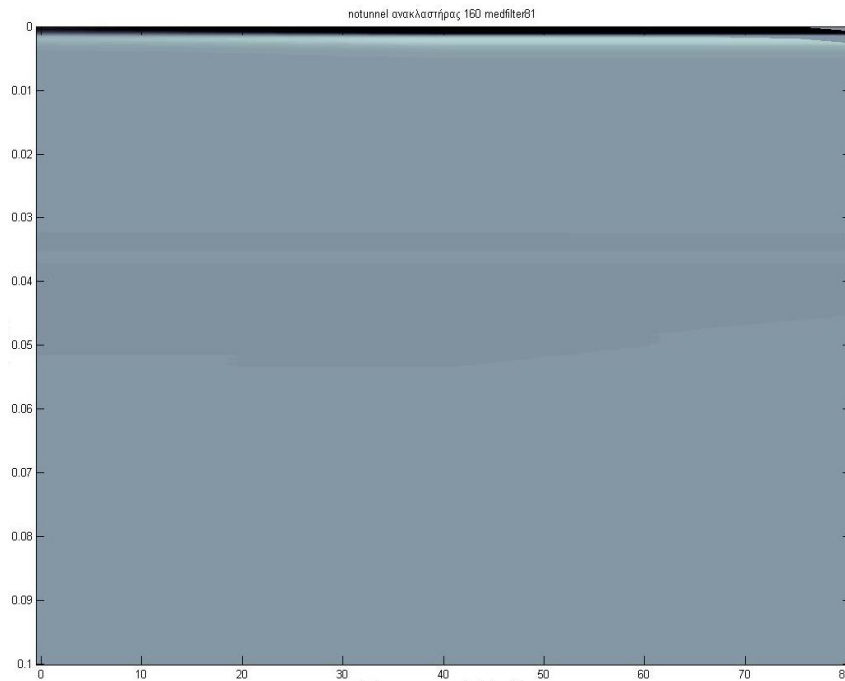
Σχήμα 4.16 : Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη  $x$ -συνιστώσα για τον ανακλαστήρα στα 160m χωρίς σήραγγα μετά την εφαρμογή φίλτρου ενδιάμεσης τιμής (*medianfilter 81*). (Άξονας  $y$ - διπλός χρόνος και άξονας  $x$ - αρίθμηση γεωφώνων)



Σχήμα 4.17 :Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη z-συνιστώσα για τον ανακλαστήρα στα 160mχωρίς σήραγγα μετά τηνεφαρμογή φίλτρου ενδιάμεσης τιμής (medianfilter 11).( Άξονας y- διπλός χρόνος και άξονας x- αρίθμηση γεωφώνων)



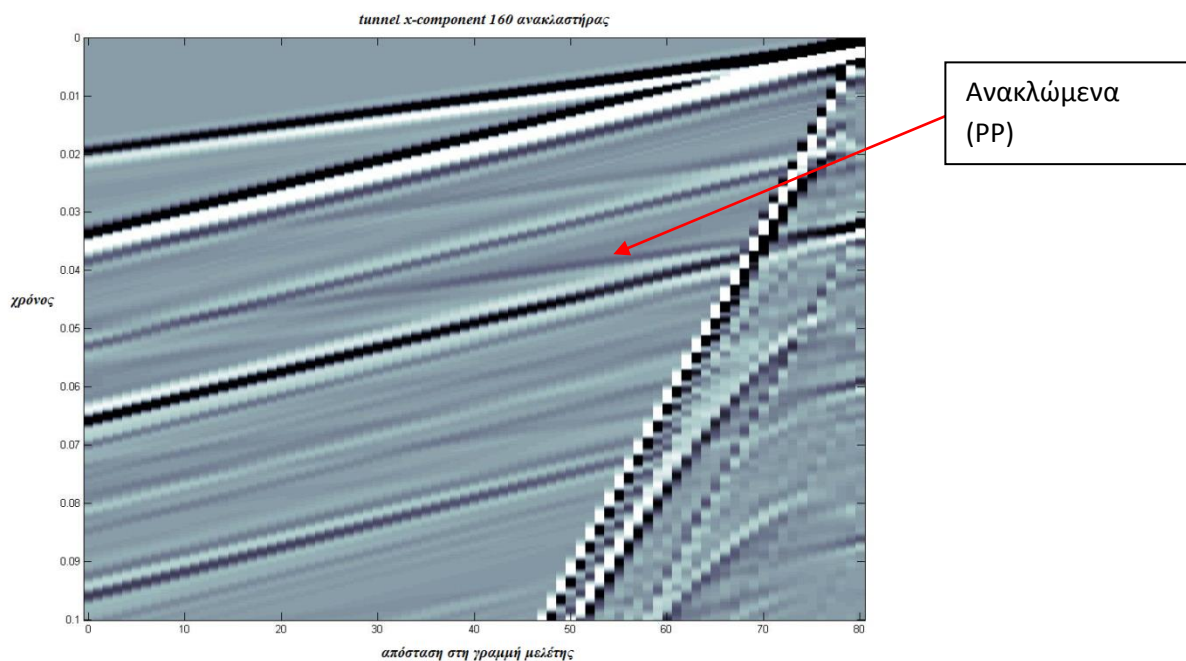
Σχήμα 4.18:Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη z-συνιστώσα για τον ανακλαστήρα στα 160mχωρίς σήραγγα μετά τηνεφαρμογή φίλτρου ενδιάμεσης τιμής (medianfilter41).( Άξονας y- διπλός χρόνος και άξονας x- αρίθμηση γεωφώνων)



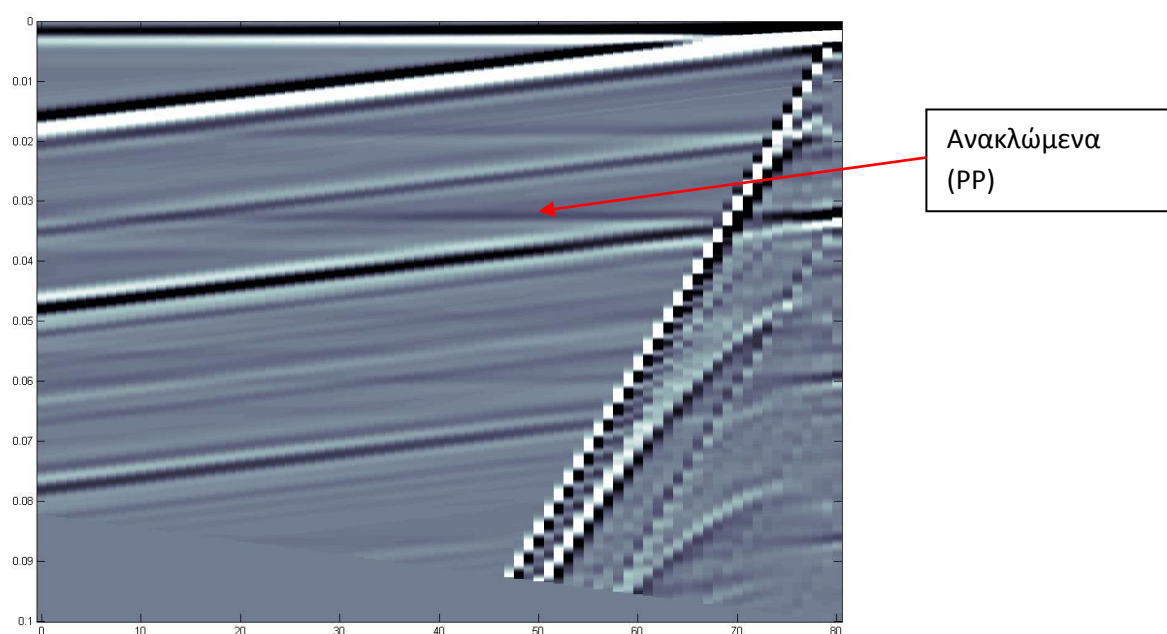
*Σχήμα 4.19 : Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη z-συνιστώσα για τον ανακλαστήρα στα 160m χωρίς σήραγγα μετά την εφαρμογή φίλτρου ενδιάμεσης τιμής (medianfilter81). (Άξονας y- διπλός χρόνος και άξονας x- αρίθμηση γεωφώνων)*

Παρατηρείται ότι τα ανακλώμενα κύματα τα παρουσιάζονται καλύτερα στη x-συνιστώσα.

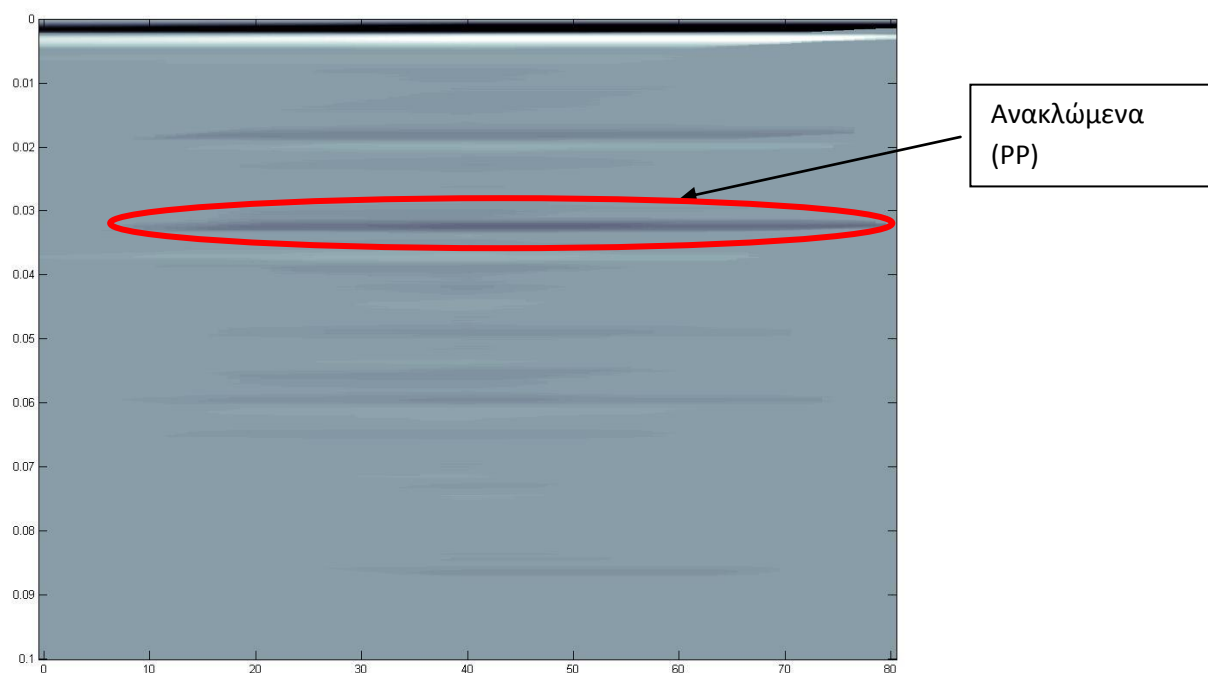
Από τα σχήματα 4.14 έως 4.16 παρατηρείται ότι τα καλύτερα αποτελέσματα, αντιστοιχούν για  $n = 81$ . Στη συνέχεια λοιπόν, παρουσιάζονται οι δοκιμές για τα αντίστοιχα δεδομένα της οριζόντιας συνιστώσας με παρουσία της σήραγγας και τον ανακλαστήρα στα 180m και 160m.



Σχήμα 4.20 : Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη  $x$ -συνιστώσα με τον ανακλαστήρα στα 160 με τη σήραγγα



Σχήμα 4.21 : Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη  $x$ -συνιστώσα με τον ανακλαστήρα στα 160 με τη σήραγγα μετά την εφαρμογή της χρονικής διόρθωσης(NMO). (Άξονας  $y$ - διπλός χρόνος και άξονας  $x$ - αρίθμηση γεωφώνων)



*Σχήμα 4.22: Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στηχ-συνιστώσα για τον ανακλαστήρα στα 160m με σήραγγα μετά την εφαρμογή φίλτρου ενδιάμεσης τιμής (medianfilter81). (Άξονας y- διπλός χρόνος και άξονας x- αρίθμηση γεωφώνων)*

Παρατηρείται ότι στις εικόνες για τις οποίες δεν εισάγεται η σήραγγα στο μοντέλο στηχ-συνιστώσα, μετά την εφαρμογή του φίλτρου ενδιάμεσης τιμής, επιτεύχθηκε η απομόνωση των ανακλώμενων κυμάτων. Για τα μοντέλα με τη σήραγγα, το φίλτρο ενδιάμεσης τιμής δεν κατάφερε να δώσει μια τόσο καλή εικόνα διότι στις καταγραφές κυριαρχούν τα σύνθετα κύματα Rayleigh-S. Παρόλα αυτά, τα ανακλώμενα κύματα (PP), ειδικά στο μοντέλο με τον ανακλαστήρα στα 160m, καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη ενέργεια και είναι ορατά. Επίσης παρατηρείται ότι όταν ο ανακλαστήρας είναι πιο κοντά στη σήραγγα (160m), το φίλτρο ενδιάμεσης τιμής απομονώνει καλύτερα τα ανακλώμενα PP και τα κάνει πιο ορατά από ότι όταν ο ανακλαστήρας βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση (180m) που όπως φαίνεται τα κύματα τα οποία οφείλονται στην παρουσία της σήραγγας είναι πιο ισχυρά.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 :ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

### **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το κύριο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αυτής, είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας έγκαιρου εντοπισμού ρήγματος ή διαφοροποίησης του σχηματισμού διάτρησης σήραγγας με χρήση της σεισμικής ανάκλασης. Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το πείραμα διασκοπήσεων σεισμικής ανάκλασης, αξιολογείται η πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης και στο τέλος πραγματοποιείται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

### **5.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

Αρχικά δημιουργήθηκαν συνθετικά μοντέλα στις δύο διαστάσεις, με και χωρίς τη σήραγγα. Αφού πραγματοποιηθεί η λήψη των ιχνών από την πειραματική διαδικασία, συλλέγονται τα σειсмоγράμματα και ενισχύονται με τον χρόνο για να εμφανιστούν καλύτερα τα ανακλώμενα κύματα. Δημιουργήθηκε αλγόριθμος ο οποίος αρχικά μετασχηματίζει τις καταγραφές από το χώρο (απόστασης πηγής-γεωφώνου, χρόνου) στον χώρο (βάθους σημείου ανάκλασης, διπλού χρόνου διαδρομής) και εφαρμόζει φίλτρο ενδιάμεσης τιμής (medianfilter) στα μετασχηματισμένα δεδομένα. Η εφαρμογή του παραπάνω αλγορίθμου στα συνθετικά δεδομένα για μοντέλα χωρίς την σήραγγα ανέδειξε τα ανακλώμενα διαμήκη κύματα, ενώ παράλληλα εξασθένησε τα άλλα είδη κυμάτων.

### **5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

Παρακάτω παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία, ενώ παράλληλα γίνεται αναφορά και σε προτάσεις για την για την ολοκλήρωση της μεθοδολογίας απεικόνισης του ανακλαστήρα.

Συμπεράσματα από την δημιουργία και επεξεργασία συνθετικών δεδομένων σεισμικής ανάλυσης στο λογισμικό Matlab.

- Στα μοντέλα με τη σήραγγα, παρατηρούνται πολλαπλές ανακλάσεις με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολη η αναγνώριση των κύριων ανακλάσεων λόγω της πολυπλοκότητας των καταγραφών .
- Στα μοντέλα με τη σήραγγα, η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας ανέδειξε τον ανακλαστήρα αλλά δεν κατάφερε να εξασθενίσει αρκετά τα άλλα είδη κυμάτων.

Μελλοντικές προτάσεις

- Η τοποθέτηση κεκλιμένου ανακλαστήρα έτσι ώστε να εφαρμοστεί ξανά η μέθοδος και να μελετηθούν τα αποτελέσματα.
- Αλλαγή στη διάταξη των γεωφώνων και της πηγής. Μπορεί να τοποθετηθεί η πηγή στο μέσο (40m) της σήραγγας και τα γεώφωνα απέναντι, και να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων.
- Προσομοίωση και εφαρμογή της μεθοδολογίας σε συνθετικά δεδομένα από μοντέλα στις τρεις διαστάσεις (3D).
- Εξέταση των συνθετικών δεδομένων με προσθήκη τυχαίου θόρυβου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Αποστολόπουλος, Γ., 2013**, Εφαρμοσμένη Γεωφυσική, Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
2. **Βαφειδής, Α., 2011**, Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Ι, Σεισμικές Μέθοδοι, Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
3. **Larsen, S., and C. A. Schultz, 1995**, ELAS 3D : 2D / 3D elastic finite-difference wave propagation code Lawrence Livermore National Laboratory Technical Report No. UCRL-MA-121792
4. **Lüth S., Rechlin A., Giese R., Tzavaras J., Gross K., Buske S., Jetschny S., Denil D., Bohlen T.**, Seismic prediction ahead of a tunnel face - Modeling, field surveys, geotechnical interpretation – Volume 4, Number 2, December 2008, pp.47-51
5. **A. Vafidis, F. Abramovici and E.R. Kanasewich**, Supercomputer finite-difference algorithms for use in seismic tomography as applied to oil sands projects, Proceedings 57th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists, New Orleans, LA, October 11-15, 1987, pp. 353-355
6. **A. Vafidis**, Supercomputer finite-difference methods for seismic wave propagation, Ph.D. Thesis, 1988, University of Alberta, Canada
7. **A. Vafidis, F. Abramovici and E.R. Kanasewich**, "Elastic wave propagation using fully vectorized high order finite differences", Geophysics, 1992, vol 57, pp. 218-232

## ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

<sup>[1]</sup> <https://geodynamics.org/cig/software/sw4>

<sup>[2]</sup> <https://www.google.gr/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwioiaq24MbSAhVMOBQKHdAOCbIQjRwIBw&url=http%3A%2F%2Fwww.indvehicles.com%2Findex.cfm%3Fid%3D3&bvm=bv.148747831,d.d24&psig=AFQjCNGWtINQ1HXwu8eh6P6r8QwX2daOHQ&ust=1489057183855572>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

```
%[x0,z0,dt,sc]=functiontest2(1,1,3,5,5,1400,seis,0.001)
function [x0,z0,dt,sc]=tunnelNMO(xg,zg,xs,zs,x0,vp,seis,k)
%Mapping the data from (xg,zg,t) domain to (xs,z0,t0)
%t0 : vector containing zero offset reflection times
%Input
%-----
----
%xg,zg: vector containing the coordinates of the sensor
%xs,zs: values of the coordinates of the source
%x0 : plane reflector X-position
%vp : P-wave velocity
%seis : matrix containing the data
%k : sample interval
%Output
%-----
----
%x0,z0: vector containing the coordinates of the reflecting point
%dt : vector containing the coordinates of the reflecting point
%sc : matrix containing the mapped data
%if seis<2
%    seis=ones(10);
%end
% calculation of travel time of reflected waves
% t: vector containing traveltimes
% s: vector containing distance
s=((zs-zg).^2+(2*x0-xs-xg).^2).^0.5;
t=vp^-1*s;
% calculation of z0 coordinate of the reflecting point
z0=zs-(x0-xs).*(zs-zg).*(2*x0-xs-xg).^-1;
% calculation of t0, dt
t0=2*vp^-1*(x0-xs);
dt=t-t0;
%n=int(t/k)+1=6
%seis(6)=2;
[ns,nx]=size(seis);
%n=int(dt/k)=2
n=round(dt/k);
%sc=seis;
sc=zeros(ns,nx);
for i=1:nx
sc(1:ns-n(i)+1,i)=seis(n(i):ns,i);
end
```