

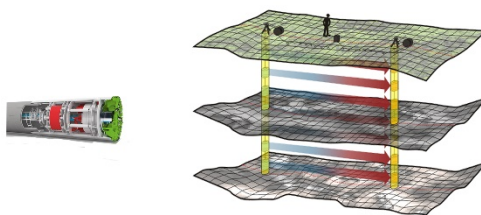


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΠΡΟΠΟΡΕΥΟΜΕΝΗΣ ΤΗΣ
ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ**

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Βαφείδης Αντώνιος (Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης) (επιβλέπων)

Γαλετάκης Μιχάλης (Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης)

Κρητικάκης Γεώργιος (Ε.Δ.Ι.Π. Πολυτεχνείου Κρήτης)

ΧΑΝΙΑ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2020

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Αντώνιου Βαφείδη και πραγματεύεται την ανάπτυξη μεθοδολογίας σεισμικής τομογραφίας προπορευόμενης της διάνοιξης μια σήραγγας

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή κ. Αντώνιο Βαφείδη που με δέχτηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής για να εκπονήσω την διπλωματική εργασία και για τις συμβουλές και την καθοδήγηση του στα προβλήματα που προέκυψαν.

Ειδικότερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον βοηθό του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, Δρ. Κρητικάκη Γεώργιο για την παρακολούθηση της εξέλιξης της εργασίας, την πολύτιμη βοήθεια και συμβολή του στην προετοιμασία, εκπόνηση και διόρθωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή κ. Γαλετάκη Μιχάλη.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας απεικόνισης του υπεδάφους που προπορεύεται του μετώπου διάνοιξης μιας σήραγγας με μετροπόντικα (TBM). Βασικός πυλώνας της εν λόγω μεθοδολογίας είναι η αντικατάσταση της παθητικής πηγής εδαφικών ταλαντώσεων (TBM) από εικονικές πηγές που είναι τοποθετημένες σε θέσεις παρατήρησης ταλαντώσεων (π.χ. γεώφωνα) μέσα σε γεωτρήσεις, οι οποίες προπορεύονται του έργου. Η τελευταία διαδικασία είναι δυνατό να υλοποιηθεί μέσω της ετεροσυσχέτισης των σεισμικών ιχνών μεταξύ των διαφορετικών θέσεων παρατήρησης. Ιδεατά, η μέγιστη τιμή της ετεροσυσχέτισης μεταξύ 2 σεισμικών ιχνών αντιστοιχεί σε χρονικό διάστημα (lag) ίσο με τον χρόνο άφιξης των σεισμικών κυμάτων που διαδίδονται μεταξύ των θέσεων παρατήρησης. Έτσι, οι χρόνοι αυτοί είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για την απεικόνιση του υπεδάφους μεταξύ των θέσεων παρατήρησης με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας.

Τα δεδομένα, στα οποία δοκιμάστηκε η προτεινόμενη μεθοδολογία, παράχθηκαν στον υπολογιστή, χρησιμοποιώντας μεθόδους προσομοίωσης των σεισμικών κυμάτων στις 2 διαστάσεις (2D), με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών σε περιβάλλον Matlab.

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν, αφενός ο σχεδιασμός κατάλληλης διάταξης γεωφώνων, προπορευόμενων του μετώπου μιας σήραγγας και αφετέρου, η μελέτη και υλοποίηση της αντικατάστασης της παθητικής (TBM) από εικονικές πηγές.

Για την επίτευξη των στόχων της εν λόγω εργασίας, δημιουργήθηκαν διάφορα μοντέλα προσομοίωσης για να δοκιμαστεί κατά ποσό το πλήθος, η διάταξη των γεωφώνων, η απόσταση της παθητικής πηγής, η στρωματογραφία και άλλοι παράγοντες επηρεάζουν τον υπολογισμό του χρόνου άφιξης των σεισμικών κυμάτων. Μελετήθηκαν μοντέλα για να διαπιστωθεί η ακρίβεια και η αποτελεσματικότητα της διάταξης με τα γεώφωνα στην κοντινότερη προς το μέτωπο της σήραγγας γεώτρηση να λειτουργούν ως εικονικές πηγές, ενώ τα γεώφωνα στην επιφάνεια και σε μια δεύτερη γεώτρηση ως δέκτες. Έγινε μελέτη για την διακριτική ικανότητα της μεθόδου σε ομοιογενής σχηματισμούς με διαφορετικά σενάρια στρωματογραφίας αλλά και για τους παράγοντες που την επηρεάζουν. Επίσης, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση για τα σφάλματα που παρουσιάζονται μεταξύ των αναλυτικών και των υπολογιζόμενων χρόνων άφιξης των σεισμικών κυμάτων και για τους λόγους που αυτά δημιουργούνται κατά την επιλογή των μέγιστων τιμών της ετεροσυσχέτισης.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν περάματα σεισμικής τομογραφίας με το λογισμικό Plotrefa για τον προσδιορισμό των τομών σεισμικής ταχύτητας (τομογράμματα) μεταξύ των θέσεων παρατήρησης (δύο γεωτρήσεις), με την χρήση των χρόνων άφιξης των σεισμικών κυμάτων που παράχθηκαν από την προτεινόμενη μεθοδολογία. Στα ίδια δεδομένα των χρόνων άφιξης των σεισμικών κυμάτων αναζητήθηκαν a-priori πληροφορίες (όπως τα πάχη και οι ταχύτητες των στρωμάτων) που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν κατά την αντιστροφή, έτσι ώστε να βελτιωθούν οι τομές που προέκυψαν από την σεισμική τομογραφία.

Συμπερασματικά, η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι αρκετά υποσχόμενη ως προς την απεικόνιση του υπεδάφους που προπορεύεται του μετώπου διάνοιξης μιας σήραγγας με μετροπόντικα (TBM). Ωστόσο, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί περαιτέρω διερεύνηση σχετικά με την βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων υπολογισμού του των χρόνων άφιξης των σεισμικών κυμάτων που προκύπτουν με την διαδικασία αντικατάστασης της παθητικής πηγής εδαφικών ταλαντώσεων (TBM) από αντίστοιχες εικονικές πηγές.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ.....	8
1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	9
1.2.1 Ετεροσυσχέτιση (Cross Corelation) σεισμικών ιχνών	11
1.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	15
1.4 ΘΕΜΕΛΙΩΔΗ ΒΗΜΑΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	18
1.4.1 Συλλογή των δεδομένων και επιλογή των πρώτων αφίξεων	19
1.4.2. Επίλυση του ευθέως προβλήματος	20
1.4.3. Αντιστροφή (Inversion)	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΕ 2 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	22
2.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ PSV_SYNTHETICS	22
2.2 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ PSV_SYNTHETICS	24
2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ PSV_SYNTHETICS.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	30
3.1 ΔΙΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΙΑ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ. 30	
3.1.1 Προσομοίωση 1: Μοντέλο με 2 πηγές ,2 στρώματα και επιφανειακά γεώφωνα.....	30
3.1.2 Προσομοίωση 2: Μοντέλο με 2 πηγές σε οριζόντια προχώρηση, σώμα και γεώφωνα σε γεώτρηση.	32
3.1.3 Προσομοίωση 3: Μοντέλο με 5 πηγές σε γεώτρηση, σώμα και γεώφωνα σε κατακόρυφη γεώτρηση.....	34
3.1.6 Προσομοίωση 4: Μοντέλο με 3 πηγές, σώμα και γεώφωνα σε γεώτρηση και στην επιφάνεια.	35
3.1.5 Προσομοίωση 5: Μοντέλο με 1 πηγή και διάταξη με γεώφωνα στις γεωτρήσεις και στην επιφάνεια.	39
3.1.6 Προσομοίωση 6: Μοντέλο με 1 πηγή και διάταξη με γεώφωνα στις γεωτρήσεις και στην επιφάνεια.	42
3.1.7 Προσομοίωση 7: Μοντέλο με 1 πηγή και διάταξη με γεώφωνα στις γεωτρήσεις και στην επιφάνεια.	43
3.1.10 Προσομοίωση 8: Μοντέλο με 1 πηγή και διάταξη με γεώφωνα στις γεωτρήσεις και στην επιφάνεια.	45
3.3 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΣΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕ ΔΕΚΤΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ	54
4.1 ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΤΕΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	54
4.1.1 Προσομοίωση 9: Μοντέλο με 1 πηγή και διάταξη με γεώφωνα στις γεωτρήσεις και στην επιφάνεια και ορθογώνιο σώμα	54

4.1.2 Προσομοίωση 10: Μοντέλο 300 x 40m με οριζόντια στρώματα, 1 πηγή και διάταξη με γεώφωνα στις γεώτρησεις και στην επιφάνεια.....	59
4.1.3 Προσομοίωση 11: Μοντέλο 1200 x 40 με 1 πηγή και διάταξη με γεώφωνα στις γεώτρησεις και στην επιφάνεια.....	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕ 2 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ.....	71
5.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 12: ΜΟΝΤΕΛΟ 1200X40 ΜΕ 2 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ 1 ΠΗΓΗ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕ ΓΕΩΦΩΝΑ ΣΤΙΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	71
5.1.1 Σεισμική Τομογραφία με το λογισμικό Plotrefa	73
5.1.2 Έλεγχος αποτελεσμάτων του SeisImager με το ReflexW.....	77
5.1.3 Αναλυτική επεξεργασία και διαγράμματα	80
5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 13: ΜΟΝΤΕΛΟ 1200X40 ΜΕ 2 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ ΜΕ ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ, 1 ΠΗΓΗ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕ ΓΕΩΦΩΝΑ ΣΤΙΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	82
5.2.1 Σεισμική Τομογραφία με το λογισμικό Plotrefa	83
5.2.2 Αναλυτική Επεξεργασία και Διαγράμματα	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ –ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	88
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το TBM (Tunnel boring machine) χρησιμοποιείται ευρέως για την μηχανική εκσκαφή σηράγγων. Για την βελτιστοποίηση της διάνοιξης και την ασφάλεια του έργου, η εκτίμηση της γεωλογίας της περιοχής που θα διατρηθεί είναι απαραίτητη.

Η παρούσα διπλωματική εργασία που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια των προπτυχιακών σπουδών στην Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης πραγματεύεται την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας απεικόνισης των γεωλογικών σχηματισμών και ασυνεχειών που προπορεύονται του μετώπου διάνοιξης μιας σήραγγας με μετροπόντικα (TBM) με σκοπό την αποφυγή προβλημάτων που προκαλούνται από την διαφοροποίηση των εδαφικών χαρακτηριστικών και δυσχεραίνουν την προσχώρηση αυξάνοντας παράλληλα τον κίνδυνο για τον ανθρώπινο παράγοντα. Το πρόβλημα αυτό είναι δυνατό να προσεγγιστεί αναπτύσσοντας μια μεθοδολογία αντικατάστασης της παθητικής πηγής (TBM) από εικονικές πηγές που βρίσκονται σε θέσεις παρατήρησης, δηλαδή γεώφωνα που βρίσκονται σε γεωτρήσεις που προπορεύονται του έργου.

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια διερεύνησης της δυνατότητας πραγματοποίησης παθητικής σεισμικής διασκόπησης σε σχηματισμούς που αναμένεται να εκσκαφθούν κατά την διάνοιξη σήραγγας μετρό. Έχοντας πληροφορίες για την στρωματογραφία των αναμενόμενων γεωλογικών σχηματισμών, αλλά και τυχόν ασυνεχειών, όπως ρήγματα και διακλάσεις, μπορούμε να αποφύγουμε ζημιογόνες και χρονοβόρες στάσεις των εργασιών και ζημιά του εξοπλισμού, αυξάνοντας την ασφάλεια τόσο στην περιοχή του εργοταξίου, όσο και στην επιφάνεια, καθώς η διάνοιξη γίνεται συνήθως σε αστικές περιοχές όπου το TBM λειτουργεί με συγκεκριμένους περιορισμούς (όρια δονήσεων, υπόγεια νερά, τεχνικά έργα κ.α.).

Η μεθοδολογία εξετάστηκε σε συνθετικά σεισμικά δεδομένα που προέκυψαν από την δημιουργία διαφορετικών μοντέλων προσομοίωσης ή/και παραμέτρων καταγραφής (διαφορετικές διατάξεις γεωφώνων και πηγών). Η προσομοίωση της διάδοσης των διαμηκών (P) και εγκάρσιων (SV) σεισμικών κυμάτων πραγματοποιήθηκε στις 2 διαστάσεις (2D) με την χρήση του λογισμικού Matlab και των αλγόριθμων **PSV_SYNTHETICS**, οι οποίοι βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και έχουν αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Στα παρακάτω κεφάλαια θα αναλυθούν ο σχεδιασμός της προτεινόμενης μεθοδολογίας, τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση καθώς και οι διαφορετικές παράμετροί τους. Αναλύεται επίσης η θεωρία για την καλύτερη κατανόηση της μεθόδου σεισμικής διασκόπησης, της δημιουργίας συνθετικών δεδομένων, της ετεροσυσχέτισης των κυμάτων (cross-correlation) και της επεξεργασίας με την μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας και απεικόνισης με το λογισμικό **SeisImager**.

Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα της απεικόνισης των σχηματισμών που προπορεύονται της διάνοιξης μιας σήραγγας και η οποία προέκυψε από την προτεινόμενη μεθοδολογία, καθώς και προτάσεις για την βελτίωση της εν λόγω μεθοδολογίας.

1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Θεωρητικά, κάθε μηχανική δόνηση στο υπέδαφος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως σεισμική πηγή με σκοπό την απεικόνιση της γεωλογίας του υπεδάφους. Η σεισμική διέγερση δεν χρειάζεται πάντα να γίνεται με σύνθετες και περίπλοκες πηγές όπως οι σεισμικοί ταλαντωτές (Vibrators), σφύρες αέρα ή εκρηκτικά. Μια ιδιαίτερη μηχανική δόνηση είναι αυτή που παράγεται από την κωνική κεφαλή ενός διατρητικού τρυπανιού κατά τη διάνοιξη ενός φρέατος (Hardage, 2009).

Στόχος της διπλωματικής ήταν η χρήση παθητικών πηγών για αυτό και μελετήθηκαν άρθρα όπου γίνεται γεωλογική απεικόνιση μεγάλης κλίμακας με την μελέτη του περιβάλλοντα σεισμικού θορύβου (ambient seismic noise). Σε τέτοιες περιπτώσεις, δέκτες τοποθετημένοι σε σταθμούς παρατήρησης συλλέγουν σεισμικά δεδομένα για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Κατ' επέκταση, γίνεται η ετεροσυσχέτιση του σεισμικού θορύβου με στόχο να προσδιοριστεί ο χρόνος διάδοσης των P-κυμάτων σε θέσεις μεταξύ των διαφορετικών σταθμών παρατήρησης (Roux et al, 2005). Η μελέτη του περιβάλλοντα (τυχαίου) σεισμικού θορύβου με την χρήση συνθετικών σεισμικών δεδομένων απορρίφθηκε λόγω αδυναμίας, στην παρούσα φάση, προσομοίωσης του τυχαίου θορύβου με τους αλγόριθμους του PSV_SYNTHETICS. Ωστόσο, τα ευρήματα της βιβλιογραφικής έρευνας βοήθησαν στο να δομηθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία.

Αποφασίστηκε η χρήση συνθετικών δεδομένων με ενεργητική πηγή για λόγους ευκολίας επεξεργασίας και δυνατότητας παραμετροποίησης των δεδομένων. Η πηγή αυτή θεωρήθηκε ότι μπορεί να προσεγγίσει μια στιγμιαία (διάρκειας μερικών ms) δόνηση που προκαλείται κατά την εκσκαφή του υπεδάφους από μια διατρητική κεφαλή (π.χ. TBM).

Η αρχή έγινε δημιουργώντας μοντέλα προσομοίωσης διάδοσης σεισμικών κυμάτων σε μικρότερη κλίμακα από τα πειράματα με σεισμικό θόρυβο που μελετήθηκαν στη βιβλιογραφία με χώρο μελέτης από μερικά έως εκατοντάδες χιλιόμετρα με την χρήση σεισμικών σταθμών. έτσι ώστε να μελετηθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία στην κλίμακα ενός τεχνικού έργου.

Η χρήση των σεισμικών κυμάτων που παράγονται από μια διατρητική κεφαλή για την γεωλογική αποτύπωση χρησιμοποιήθηκε αρχικά με δέκτες στην επιφάνεια ή και σε γειτονικές γεωτρήσεις όπως στην μέθοδο VSP.

Οι Petronio και Poletto (2002) έκαναν δοκιμές για να μετρήσουν το σεισμικό θόρυβο που παράγεται από ένα TBM (Tunnel Boring Machine) και κατέγραψαν κύματα με δέκτες πάνω στο TBM και στην επιφάνεια πάνω από το τούνελ που ανιχνεύονταν σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 700 m. Η ετεροσυσχέτιση του αρχικού κύματος σε συνδυασμό με τα δεδομένα που φτάνουν σε μακρινούς σεισμικούς σταθμούς έδειξε συναφή γεγονότα με τις αφίξεις P και S κυμάτων.

Αναπτύχθηκαν μέθοδοι απεικόνισης που λειτουργούν στην διάρκεια της διάνοιξης σήραγγων με δέκτες μπροστά, στα πλάγια του διατρητικού και σε συγκεκριμένες θέσεις κατά μήκος της σήραγγας όπως περιγράφονται από τους Polleto et al (2007) που αποτυπώνουν την γεωλογία μερικά μέτρα από το μέτωπο της διάνοιξης.

Άλλοι μελετητές προσέγγισαν το ίδιο πρόβλημα μελετώντας επιφανειακά κύματα (Jetschny, 2010) προσομοιώνοντας ένα χώρο μελέτης 90x60x60 m, που περιβάλλει μια σήραγγα ή χρησιμοποιώντας τον σεισμικό θόρυβο (ambient seismic noise) όπως προαναφέρθηκε, με σταθερούς δέκτες σε διάφορες θέσεις σε μία υπόγεια εκμετάλλευση με μέγιστο μέγεθος διάταξης μελέτης 900 m (Olivier et al, 2015).

Με γνώμονα αυτά τα ευρήματα, σχεδιάστηκε η μεθοδολογία για χρήση σε αστικές περιοχές, με πηγή τα σεισμικά κύματα που παράγονται από το TBM σε μία οριζόντια σήραγγα και δέκτες σε ζευγάρια γεωτρήσεων δειγματοληψίας σε απόσταση από το μέτωπο της προσχώρησης. Γίνεται χρήση της μεθόδου της ετεροσυσχέτισης (crosscorrelation) των καταγραφών σε δέκτες (γεώφωνα) στην κοντινότερη του TBM γεώτρηση με τις αντίστοιχες καταγραφές σε δέκτες τοποθετημένους σε δεύτερη (πιο απομακρυσμένη από την κεφαλή του TBM) γεώτρηση ή/και τοποθετημένους στην επιφάνεια του μοντέλου. Η ετεροσυσχέτιση μπορεί να θεωρηθεί ότι λειτουργεί σαν μηχανισμός μεταφοράς της πηγής από την θέση του TBM στις θέσεις των δέκτων που βρίσκονται στην κοντινότερη προς την σήραγγα γεώτρηση. Με αυτή τη μεθοδολογία, οι δέκτες της πρώτης γεώτρησης μπορούν να θεωρηθούν πλέον σαν εικονικές σεισμικές πηγές. Η ετεροσυσχέτιση των σεισμικών ιχνών αναμένεται να παρουσιάζει μέγιστη τιμή τη χρονική στιγμή (lag) που αντιστοιχεί στο χρόνο άφιξης του σεισμικού κύματος που διαδίδεται από την εκάστοτε εικονική πηγή στον

μελετούμενο δέκτη (τοποθετημένο σε δεύτερη γεώτρηση ή στην επιφάνεια). Βασική προϋπόθεση είναι η μέγιστη τιμή της ετεροσυσχέτισης να αντιστοιχεί στις πρώτες αφίξεις των σεισμικών κυμάτων. Δηλαδή, η κυματομορφή της πρώτης άφιξης στο γεώφωνο-πηγή θα πρέπει να είναι όμοια με την κυματομορφή στην πρώτη άφιξη στο γεώφωνο-δέκτη. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει πάντα με αποτέλεσμα να εισάγεται σφάλμα στον προσδιορισμό των χρόνων αφίξεων από την μεθοδολογία της ετεροσυσχέτισης, δεδομένου ότι η μέγιστη τιμή της δεν αντιστοιχεί πάντα στην πρώτη άφιξη. Στην επόμενη παράγραφο αναλύεται η προτεινόμενη μεθοδολογία μεταφοράς της σεισμικής πηγής από την θέση δημιουργίας των σεισμικών κυμάτων (TBM) σε θέσεις παρατήρησης (δέκτες στην κοντινή γεώτρηση) με τη χρήση της μεθόδου της ετεροσυσχέτισης.

Μετά τον υπολογισμό των χρόνων άφιξης των διαμηκών σεισμικών κυμάτων μεταξύ των δεκτών παρατήρησης, όπως προέκυψαν από την μέθοδο της ετεροσυσχέτισης, στην παρούσα εργασία προσδιορίστηκαν, για ορισμένα μοντέλα, οι τομές σεισμικής ταχύτητας (τομογράμματα) μεταξύ των θέσεων παρατήρησης, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας.

1.2.1 Ετεροσυσχέτιση (Cross Corelation) σεισμικών ιχνών

Με εφελτήριο την μεθοδολογία που μελετήθηκε στη βιβλιογραφία (Roux et al, 2005, Petronio and Poletto, 2002, Petronio et al, 2007, Jetschny, 2010 και Olivier et al, 2015) αποφασίστηκε η χρήση της ετεροσυσχέτισης των σεισμικών ιχνών (CrossCorelation) για την μελέτη της δομής του υπεδάφους που βρίσκεται μεταξύ (τουλάχιστον) δύο σημείων παρατήρησης (δέκτες) σεισμικών δονήσεων.

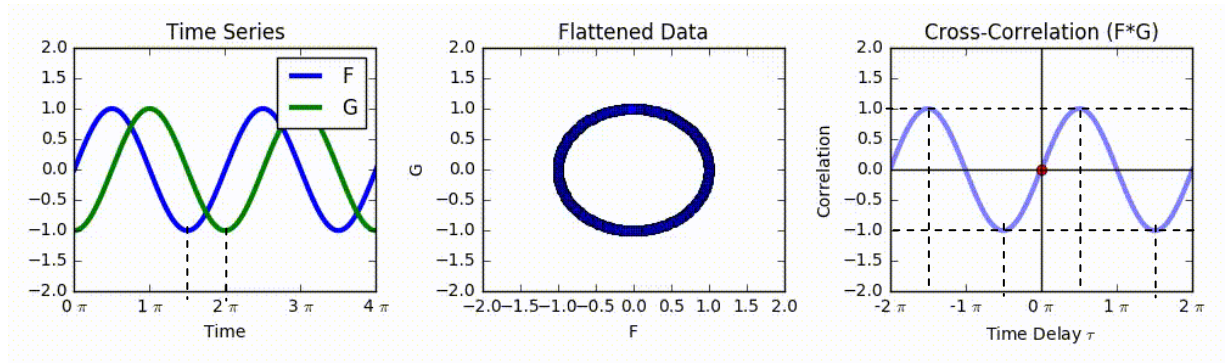
Η επεξεργασία σεισμικών δεδομένων συχνά απαιτεί την εκτίμηση της στατιστικής ομοιότητας μεταξύ δύο σεισμικών χρονοσειρών. Η συσχέτιση είναι μια διαδικασία που εφαρμόζεται στο πεδίο του χρόνου ή των συχνοτήτων και χρησιμοποιείται για αυτό το λόγο στην επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων. Για παράδειγμα, έχουμε τις ακόλουθες χρονοσειρές (Yilmaz, 2001):

Χρονοσειρά 1: (2, 1, -1, 0, 0)

Χρονοσειρά 2: (0, 0, 2, 1, -1)

Παρόλο που οι 2 χρονοσειρές είναι πανομοιότυπες σε σχήμα, η 2^η είναι μετατοπισμένη κατά δύο δείγματα σε σχέση με την 1^η. Η χρονική μετατόπιση (time-lag) στην οποία οι 2 χρονοσειρές παρουσιάζουν την μέγιστη συσχέτιση (στην εν λόγω περίπτωση είναι όμοιες) είναι δυνατό να προσδιοριστεί με την ετεροσυσχέτιση των χρονοσειρών αυτών. Γενικότερα, χρησιμοποιώντας την εντολή $r=xcorr(x,y)$ στο λογισμικό Matlab, είναι δυνατό να προσδιοριστεί η τιμή της συσχέτισης 2

χρονοσειρών συναρτήσει της χρονικής μετατόπισης (time-lag). Οι κανονικοποιημένες τιμές της ετεροσυσχέτισης 2 χρονοσειρών κυμαίνονται από 0 (καμία συσχέτιση) έως 1 (ή 100%, πλήρης συσχέτιση). Η μέγιστη τιμή της θα αντιστοιχεί στην χρονική μετατόπιση κατά την οποία τα 2 ίχνη παρουσιάζουν την μεγαλύτερη συσχέτιση (ομοιότητα).

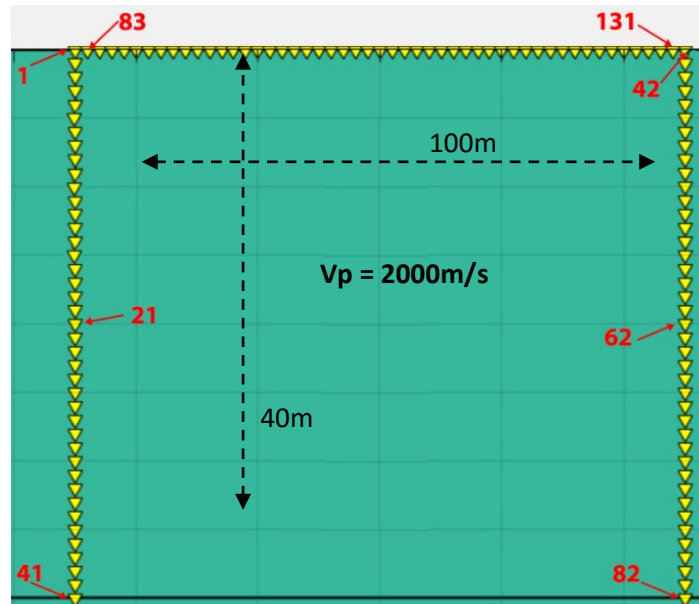


Σχήμα 1.1: Παράδειγμα ετεροσυσχέτισης για τις χρονοσειρές F και G . Οι μέγιστες τιμές ετεροσυσχέτισης (+1 ή -1) εμφανίζονται για χρονική μετατόπιση ίση με $n \cdot \pi/2$ όπου $n = \dots -3 -1 +1 +3 \dots$ (Cross-correlation Wikipedia, n.d.).

Η μαθηματική σχέση που περιγράφει την συνέλιξη για δύο χρονοσειρές $x(t)$ και $h(t)$ είναι (Brigham, 1974):

$$z(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) * h(t + \tau) dt \quad (1.1)$$

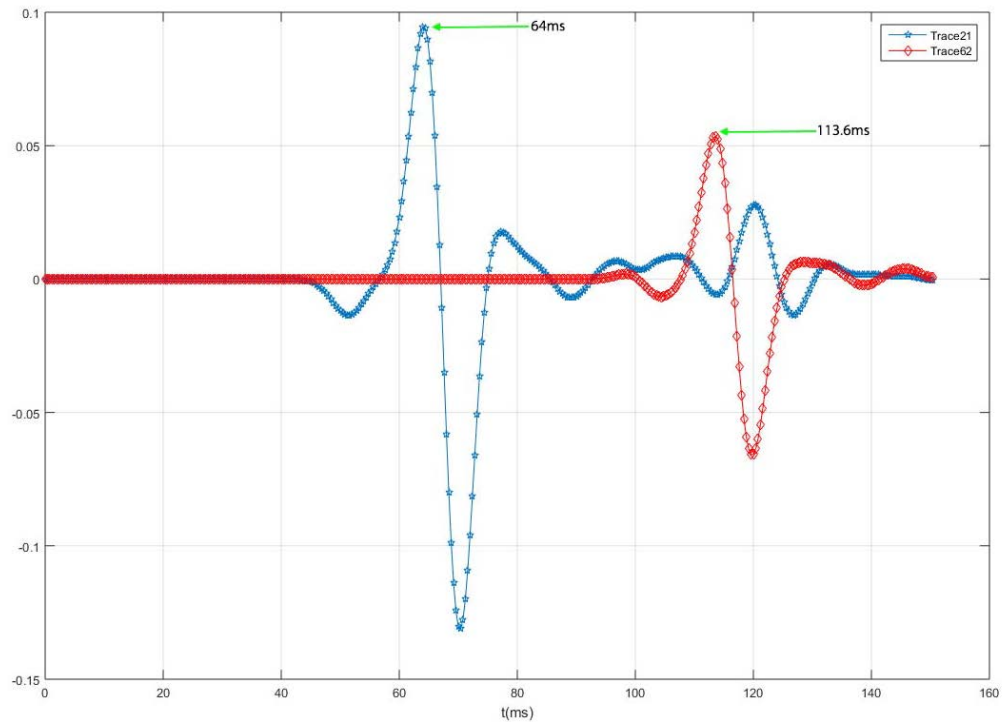
Προκειμένου να εδραιωθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία μεταφοράς της σεισμικής πηγής από την θέση δημιουργίας των σεισμικών κυμάτων (TBM) σε θέσεις παρατήρησης (δέκτες στην κοντινή γεώτρηση) με τη χρήση της μεθόδου της ετεροσυσχέτισης, στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται η διάταξη των γεωφώνων που χρησιμοποιήθηκε σε αρκετά από τα μοντέλα προσομοίωσης στην παρούσα εργασία. 82 δέκτες (γεωφώνα) βρίσκονται τοποθετημένοι σε 2 κάθετες γεωτρήσεις (41 δέκτες / γεώτρηση σε ισαποστάσεις του 1m) και 49 στην επιφάνεια μεταξύ των 2 γεωτρήσεων (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2: Διάταξη των γεωφώνων που χρησιμοποιήθηκε σε αρκετά από τα μοντέλα προσομοίωσης στην παρούσα εργασία. Κάθε γεώφωνο ονοματίζεται με έναν αύξοντα αριθμό (α/α).

Ακολουθεί παράδειγμα ετεροσυσχέτισης των καταγραφών δύο σεισμικών ιχνών (πλάτος ταλάντωσης συναρτήσει του χρόνου) στους δέκτες No21 και 62 (Σχήμα 1.2). Οι δέκτες αυτοί βρίσκονται σε βάθος 20m από την επιφάνεια του μοντέλου και απέχουν μεταξύ τους 100m. Η ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών (V_p) και των εγκάρσιων (V_s) σεισμικών κυμάτων στο μέσο είναι: $V_p=2000$ m/s και $V_s=1000$ m/s, αντίστοιχα. Η σεισμική πηγή έχει τοποθετηθεί στο ίδιο βάθος με τα 2 γεώφωνα αλλά σε απόσταση 1000 m αριστερά (δεν απεικονίζεται στο Σχήμα 1.2) του γεωφώνου No21. Το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας (Sampling Interval) κατά την προσομοίωση ορίστηκε στα 0.4 ms. Η παράμετρος αυτή είναι σημαντική καθώς, όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενα εδάφια της εργασίας αυτής, καθορίζει την αποδεκτή απόκλιση του χρόνου που υπολογίζεται από την ετεροσυσχέτιση από τον αναλυτικά υπολογιζόμενο χρόνο.

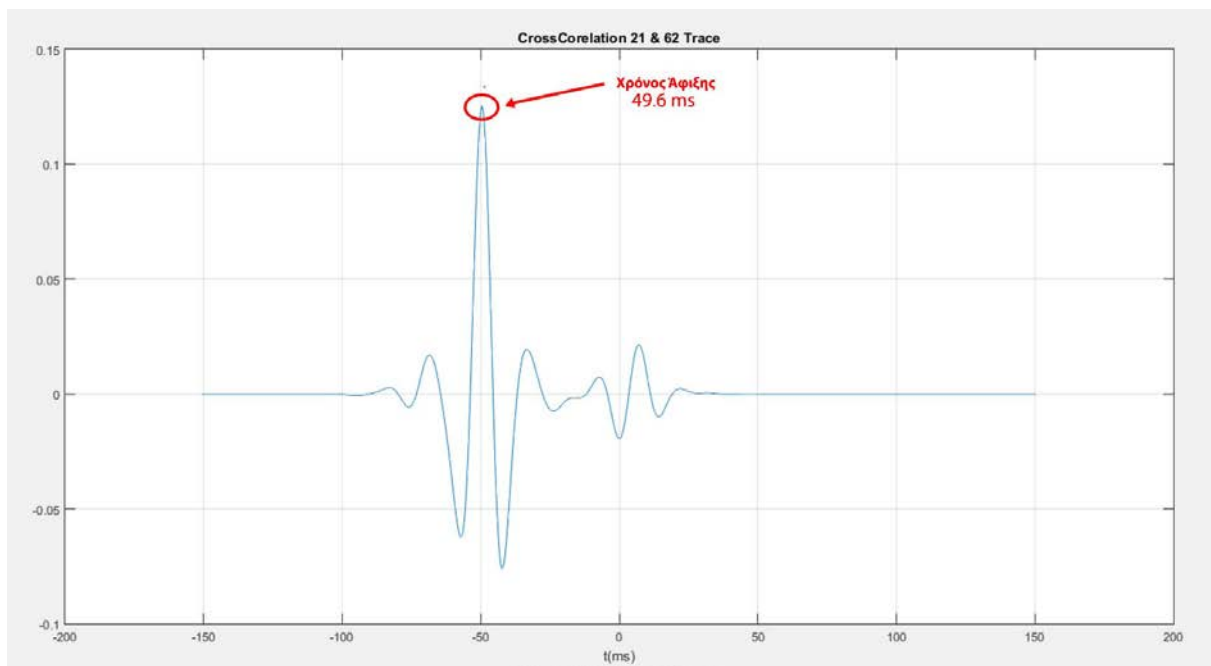
Στο Σχήμα 1.3 απεικονίζονται οι καταγραφές (οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας ταλάντωσης των σωματιδίων) στους δέκτες No21 και No62. Παρατηρείται ότι κορυφές του πλάτους των ιχνών εντοπίζονται σε χρόνους $t_1=64$ ms και $t_2=113.6$ ms, αντίστοιχα, δηλαδή διαφορά 49.6ms. Ωστόσο, ο αναλυτικά υπολογιζόμενος χρόνος άφιξης του διαμήκους σεισμικού κύματος στην εν λόγω περίπτωση είναι ίσος με 50 ms ($100\text{m} : 2000\text{m/s}$). Το παρατηρούμενο σφάλμα είναι ίσο με 0.4ms και ισούται με το διάστημα δειγματοληψίας (ακρίβεια) της προσομοίωσης.



Σχήμα 1.3: Σεισμικά ίχνη (πλάτος ταλάντωσης συναρτήσει του χρόνου) για τα γεώφωνα στις θέσεις 21 και 62 με τις κορυφές του πλάτους να εντοπίζονται σε χρόνους $t_1=64\text{ ms}$ και $t_2=113.6\text{ ms}$, αντίστοιχα.

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 1.4 απεικονίζεται η ετεροσυσχέτιση των σεισμικών ιχνών στους δέκτες No21 και No62. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της ετεροσυσχέτισης βρίσκεται σε χρόνο - 49.6ms. Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι η χρονοσειρά του ίχνους No62 πρέπει να μετατοπιστεί κατά 49.6ms πίσω στο χρόνο (αρνητική μετατόπιση) για να προκύψει η μέγιστη συσχέτιση με την χρονοσειρά του ίχνους No21. Παρατηρείται ότι η απόλυτη τιμή της χρονικής μετατόπισης στην μέγιστη τιμή της ετεροσυσχέτισης αντιστοιχεί στον χρόνο άφιξης του διαμήκους σεισμικού κύματος, όπως αυτός υπολογίζεται από τις κορυφές του πλάτους των συνθετικών σεισμικών ιχνών στους δέκτες No21 και No62.

Με το παράδειγμα αυτό αποδεικνύεται ότι η ετεροσυσχέτιση είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για τον προσδιορισμό του χρόνου άφιξης των διαμηκών σεισμικών κυμάτων μεταξύ δεκτών παρατήρησης σεισμικής ταλάντωσης. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμο (κάτω από προϋποθέσεις) με την μεταφορά της σεισμικής πηγής από την πραγματική της θέση σε μία από τις θέσεις παρατήρησης. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται συχνά στην εφαρμοσμένη γεωφυσική όταν η θέση της πηγής των δονήσεων δεν είναι γνωστή (π.χ. τυχαίος θόρυβος).



Σχήμα 1.4: Ετεροσυσχέτιση των ιχνών του Σχήματος 1.3. Η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί σε χρονική μετατόπιση -49.6ms.

1.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Το κύριο πρόβλημα στην μελέτη του υπεδάφους με σεισμικές μεθόδους είναι ο καθορισμός του πεδίου των σεισμικών ταχυτήτων. Ο πιο ακριβής τρόπος επίλυσης του προβλήματος είναι η μέτρηση της ταχύτητας σε γεωτρήσεις αλλά απαιτούνται πολλές γεωτρήσεις για να καλύψουμε την περιοχή ενδιαφέροντος, τεχνική που είναι απαγορευτική λόγω κόστους. Η σεισμική μέθοδος ανάκλασης σε συνδυασμό με τις πληροφορίες που λαμβάνονται από τις γεωτρήσεις δειγματοληψίας επιτρέπει τον καθορισμό του πεδίου ταχυτήτων.

Στη σεισμική τομογραφία ανάκλασης από το μεγάλο όγκο των χρόνων άφιξης ανακλώμενων κυμάτων από διαφορετικές διαχωριστικές επιφάνειες και τις αντίστοιχες αποστάσεις πηγής-γεωφώνου καθορίζεται η δομή του υπεδάφους από το πεδίο των ταχυτήτων. Είναι κατάλληλη για εφαρμογές τοπικής κλίμακας όπως υπόγεια έργα, ορυχεία ανοικτής εκμετάλλευσης όπου συμβάλει στον καλύτερο σχεδιασμό και ταμειυτήρες πετρελαίου όπου συμβάλει στην καλύτερη αποληψιμότητα (Βαφείδης, 1996)

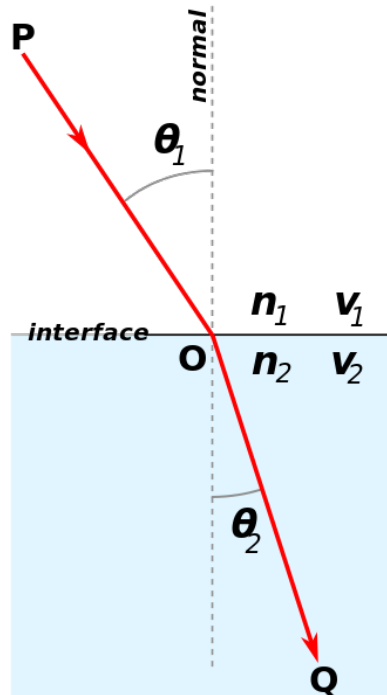
Στην σεισμική τομογραφία, για τον υπολογισμό των ταχυτήτων χρησιμοποιούνται οι χρόνοι άφιξης των σεισμικών κυμάτων. Η υπό μελέτη περιοχή διαιρείται σε δίκτυο από κελιά (τετράγωνα σταθερής ταχύτητας) όπου το πεδίο των ταχυτήτων αναπαράγεται με την χρήση μαθηματικής μεθόδου και παρουσιάζεται σε χάρτες ίσης ταχύτητας.

Οι διαστάσεις των κελιών, καθορίζουν την λεπτομέρεια στην απεικόνιση καθώς με την αύξηση του αριθμού των κελιών παρατηρείται μείωση του αριθμού των ακτινών που περνούν από κάποιο κελί και μείωση της ακρίβειας προσδιορισμού της σεισμικής ταχύτητας στο κελί αυτό.

Η ταχύτητα διάδοσης εξαρτάται κυρίως από τις μηχανικές ιδιότητες και την πυκνότητα των πετρωμάτων και η διαφοροποίηση στις ταχύτητες των κελιών μπορεί να σημαίνει μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων του σχηματισμού (λιθολογία, πορώδες, είδος και θερμοκρασία των περιεχόμενων ρευστών, ελαστικές σταθερές, πυκνότητα και κατάσταση ρηγματώσης, βάθος και διαφορική πίεση, δηλαδή διαφορά της ολικής πίεσης του σχηματισμού μείον την πίεση των ρευστών) ή διαφορετικό γεωλογικό σχηματισμό (Παγιαλάκης, 2014). Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι οι σεισμικές τομές ταχύτητας πρέπει να ερμηνεύονται και όχι απλά να γίνονται αποδεκτές ως σαφή δεδομένα της δομής του υπεδάφους.

Στη μέθοδο σεισμικής τομογραφίας διάδοσης (transmission tomography) παράγονται ελαστικά κύματα και μετρούνται οι χρόνοι άφιξης των πρώτων αφίξεων των P-κυμάτων (διαμήκη) ενώ οι μεταγενέστερες αφίξεις τους είναι πιο δύσκολο να αναγνωριστούν. Τα S-κύματα (εγκάρσια) χρησιμοποιούνται λιγότερο στη σεισμική τομογραφία διότι καταφθάνουν στα γεώφωνα μετά από τα P-κύματα και σε χρόνο παρόμοιο με αυτό των ανακλώμενων P-κυμάτων με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η επιλογή των πρώτων αφίξεων των S-κυμάτων.

Στην περίπτωση μελέτης των ανακλώμενων σεισμικών κυμάτων, πρόκειται για τομογραφία ανάκλασης (reflection tomography). Στην τομογραφία διάδοσης (transmission tomography) μελετώνται τα σεισμικά κύματα που διαδίδονται χωρίς αυτά να υφίστανται ανάκλαση. Για την ανάκλαση των ακτινών ισχύει ο νόμος της ανάκλασης ενώ για την διάθλαση των ακτινών ισχύει ο νόμος του Snell (Σχήμα 1.5).

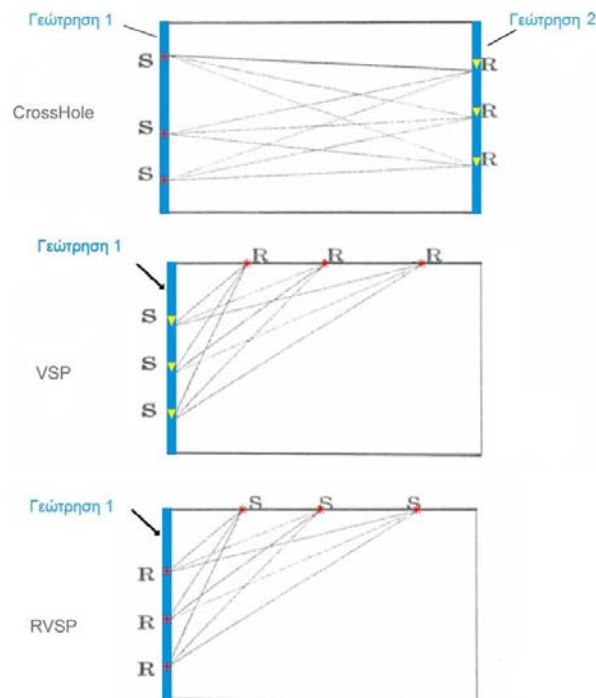


Σχήμα 1.5: Η γεωμετρική απεικόνιση του νόμου του Snell και η κάμψη της σεισμικής ακτίνας όταν περνά από το μέσο με ταχύτητα v_1 σε μέσο με ταχύτητα v_2 . (Snell's law Wikipedia, n.d.)

Κατά την πραγματοποίηση πειράματος σεισμικής διάδοσης προκύπτουν σειсмоγράμματα (διαγράμματα εδαφικής κίνησης συναρτήσει του χρόνου) με τα γεώφωνα να τοποθετούνται συνήθως σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις αλλά σε διαφορετικές διατάξεις που περιγράφονται παρακάτω (Σχήμα 1.6).

- Διάταξη γεώτρησης-γεώτρησης (Crosshole), με δέκτες και πηγές τοποθετημένα σε απέναντι κάθετες γεωτρήσεις.
- VSP (Vertical Seismic Profile), με δέκτες στην επιφάνεια και πηγές σε κάθετη γεώτρηση.
- RVSP (Reversed Vertical Seismic Profile), με δέκτες σε κάθετη γεώτρηση και πηγές στην επιφάνεια.

Οι εν λόγω διατάξεις είναι δυνατόν να υλοποιηθούν και συνδυαστικά.



Σχήμα 1.6: Διατάξεις γεωφώνων Crosshole, VSP, RVSP (+ αναφορά). Με S & R συμβολίζονται οι θέσεις των πηγών και των δεκτών, αντίστοιχα.

Η λεπτομέρεια στην απεικόνιση του υπεδάφους στην σεισμική τομογραφία εξαρτάται από τις διαστάσεις των κελιών. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κελιών παρατηρείται μείωση του αριθμού των ακτίνων που περνούν από κάποιο κελί και μείωση της ακρίβειας της σεισμικής ταχύτητας αυτού του κελιού. Η διακριτική ικανότητα της κάθε μεθόδου εξαρτάται από την συχνότητα της σεισμικής πηγής και την θέση που κατέχει το κελί στην τομή του σεισμογράμματος.

1.4 ΘΕΜΕΛΙΩΔΗ ΒΗΜΑΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

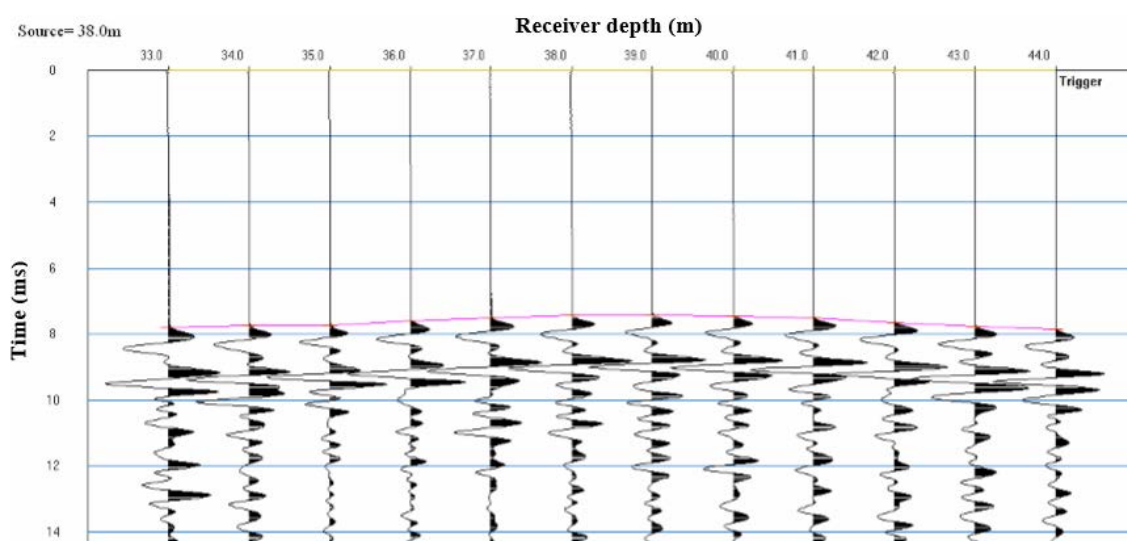
Η σεισμική τομογραφία υλοποιείται σε τρία θεμελιώδη βήματα :

- Συλλογή των δεδομένων (data gathering) όπου γίνεται η αναγνώριση (identification) των σεισμικών κυμάτων και η επιλογή των χρόνων άφιξης. Στην περίπτωση της τομογραφίας διάδοσης (transmission tomography) επιλέγονται οι πρώτες αφίξεις (first arrivals) των σεισμικών κυμάτων, οι χρονικές δηλαδή στιγμές που τα υπό μελέτη σεισμικά κύματα (διαμήκη, εγκάρσια κλπ) καταφθάνουν για πρώτη φορά, μετά από την ενεργοποίηση της πηγής, στους δέκτες.

- Επίλυση του ευθέως προβλήματος (forward modeling) όπου γίνεται η χάραξη της πορείας των ακτίνων (ray-tracing) και ο καθορισμός των εξισώσεων που εκφράζουν τους χρόνους άφιξης συναρτήσει της σεισμικής ταχύτητας και της απόστασης που διανύει η κάθε σεισμική ακτίνα.
- Αντιστροφή (Inversion) όπου επιλύεται το σύστημα των εξισώσεων που καθορίστηκε στο προηγούμενο βήμα με αγνώστους τις σεισμικές ταχύτητες.

1.4.1 Συλλογή των δεδομένων και επιλογή των πρώτων αφίξεων

Τυπική διάταξη πηγών και γεωφώνων για την εκτέλεση σεισμικής τομογραφίας, είναι η διάταξη διάδοσης μεταξύ γεωτρήσεων (crosshole tomography) την οποία χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η υπό μελέτη περιοχή βρίσκεται ανάμεσα σε δύο γεωτρήσεις, στην μία είναι τοποθετημένη η πηγή και στην άλλη οι δέκτες. Η πηγή ενεργοποιείται και καταγράφονται στους δέκτες οι διαταραχές των σωματιδίων του υπεδάφους που δημιουργούνται κατά την διάδοση των σεισμικών κυμάτων. Στην συνέχεια, η πηγή ή/και οι δέκτες τοποθετούνται σε άλλη θέση κατά μήκος των γεωτρήσεων και επαναλαμβάνεται η διαδικασία ώστε το δίκτυο των σεισμικών ακτίνων να καλύψει όλη την υπό μελέτη περιοχή. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ευκρινή καταγραφή των πρώτων αφίξεων των διαμηκών (P) σεισμικών κυμάτων, παρατίθεται εξιδανικευμένο παράδειγμα επιλογής πρώτων αφίξεων (Σχήμα 1.6).



Σχήμα 1.6: Παράδειγμα επιλογής πρώτων αφίξεων (ΓΕΩΤΕΚ Α.Τ.Ε, 2018).

1.4.2. Επίλυση του ευθέως προβλήματος

Για την επίλυση του ευθέως προβλήματος χρησιμοποιείται η ασυμπτωτική ακτινική θεωρία όπου η πορεία των σεισμικών κυμάτων περιγράφεται από τις σεισμικές ακτίνες και περιλαμβάνει την χάραξη της πορείας των σεισμικών ακτινών και τον υπολογισμό του χρόνου άφιξης κατά μήκος της διαδρομής αυτής (Σχήμα 1.7). Η υπό μελέτη περιοχή χωρίζεται σε κελιά και για κάθε ένα ορίζεται η ταχύτητα v_j , όπου $j=1, \dots, n$.

Ο χρόνος διαδρομής της σεισμικής ακτίνας (T_i) δίνεται από την σχέση:

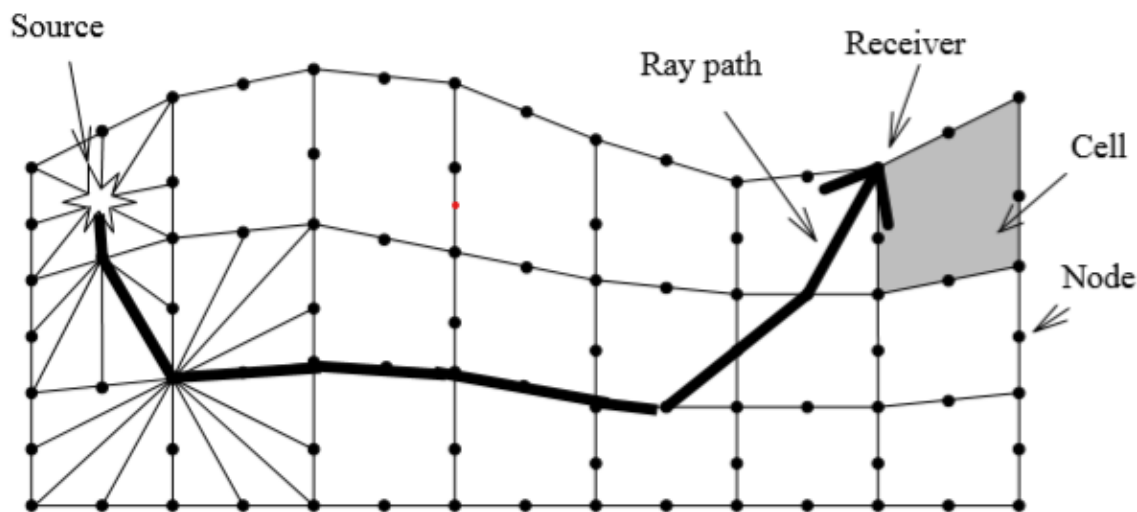
$$T_i = \sum_{j=1}^n d_{ij} S_j \quad (1.2)$$

Όπου ο δείκτης i αναφέρεται στην σεισμική ακτίνα ($i=1, \dots, N$), η $S_j = 1/v_j$ είναι η βραδύτητα στο κελί με δείκτη j και η d_{ij} είναι το διάστημα που διανύει η ακτίνα με το δείκτη i στο κελί με δείκτη j .

Οι εξισώσεις για όλες τις σεισμικές ακτίνες συνιστούν σύστημα εξισώσεων που γράφεται υπό μορφή πινάκων

$$T = D * S \quad (1.3)$$

Όπου το διάνυσμα T περιέχει ως στοιχεία τους χρόνους άφιξης των N ακτινών, ενώ το S βραδύτητες στα n κελιά και ο πίνακας D περιέχει τις τμηματικές αποστάσεις (d_{ij}). Συνήθως ο αριθμός των ακτινών και ο αριθμός των μετρήσεων, είναι στην πράξη κατά πολύ μεγαλύτερος του αριθμού των κελιών. Για την εκτίμηση της ταχύτητας σε ένα κελί είναι απαραίτητο να περνούν από αυτό αρκετές ακτίνες. Ζητούμενο στις παραπάνω εξισώσεις είναι να βρεθεί η διαδρομή ελάχιστου χρόνου που ακολουθεί η σεισμική ακτίνα όταν διαδίδεται από την πηγή στον δείκτη.



Σχήμα 1.7: Παράδειγμα χάραξης της πορείας των σεισμικών ακτίνων από την σεισμική πηγή προς τους δέκτες μέσω των κελιών σταθερής ταχύτητας (*Geometrics, 2005*)

1.4.3. Αντιστροφή (Inversion)

Στο τρίτο βήμα επιλύεται το σύστημα των εξισώσεων $T=D*S$, ως προς το άγνωστο διάνυσμα S της βραδύτητας και υπολογίζεται η κατανομή της ταχύτητας των κυμάτων στο υπέδαφος. Το ανακατασκευασμένο πεδίο των ταχυτήτων ονομάζεται τομόγραμμα (tomogram).

Για τον υπολογισμό των ταχυτήτων διάδοσης των διαμηκών κυμάτων ακολουθούνται δυο βασικά στάδια. Αρχικά στην περιοχή μελέτης τοποθετείτε πλέγμα (grid) και σημειώνονται οι θέσεις των πηγών και των δεκτών, έπειτα γίνεται τομογραφική ανακατασκευή (tomography reconstruction), δηλαδή κατασκευή του αγνώστου πεδίου ταχυτήτων χρησιμοποιώντας τους μετρούμενους χρόνους άφιξης και την γεωμετρία πηγής-γεωφώνων επιλύοντας το σύστημα των γραμμικών εξισώσεων. Αυτό επιτυγχάνεται θεωρώντας ότι τα σεισμικά κύματα ακολουθούν ευθύγραμμη πορεία.

Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι για την επίλυση του συστήματος εξισώσεων, όπως την Τεχνική Ελάχιστων Τετράγωνων, την Τεχνική Αλγεβρικής Ανακατασκευής κ.α. (Σουπιός, 1997).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΕ 2 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

Για την δημιουργία και επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων σεισμικής ανάκλασης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Matlab(TM) και οι αλγόριθμοι *PSV_SYNTHETICS* που 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 (Κρητικάκης, 2019).

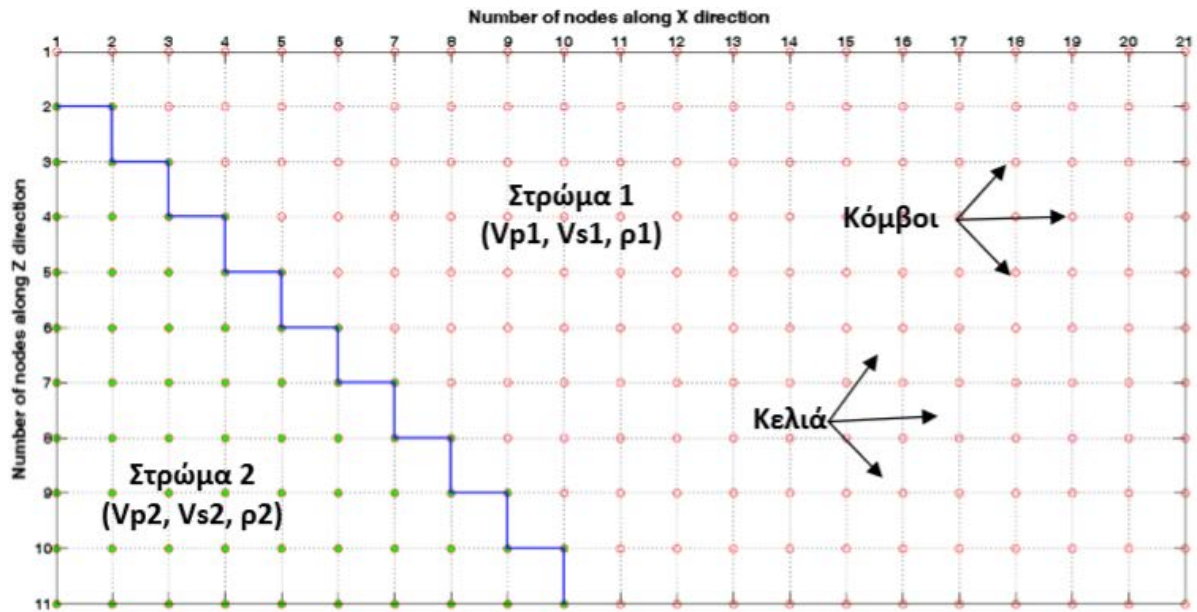
2.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ PSV SYNTHETICS

Η προσομοίωση της διάδοσης σεισμικών P και SV κυμάτων σε 2 διαστάσεις (2D) με την χρήση πεπερασμένων διαφορών πραγματοποιείται με την διακριτοποίηση ενός παραλληλόγραμμου (μοντέλο) στο χώρο Z (βάθος) και X (οριζόντια διάσταση) σε επιμέρους κελιά (cells). Κάθε κελί, συνορεύει με τα γειτονικά του μέσω των κόμβων (nodes) του μοντέλου.

Κάθε κελί έχει συγκεκριμένη διάσταση (GRID) και είναι ίδια τόσο στην κατακόρυφη (Z) όσο και στην οριζόντια (X) διεύθυνση. Κάθε κελί προσδιορίζεται από 3 παραμέτρους:

- 1) Την ταχύτητα διάδοσης των P κυμάτων (V_p),
- 2) Την ταχύτητα διάδοσης των S-κυμάτων (V_s)
- 3) Την πυκνότητα (ρ).

Από κάθε κόμβο διέρχονται οι διαχωριστικές επιφάνειες των διαφορετικών σεισμικών στρωμάτων, οι οποίες όμως δεν μπορούν να διχοτομήσουν ένα κελί. Στο παράδειγμα (Σχήμα 2.1) απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο διακριτοποιείται μια κεκλιμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ 2 σεισμικών στρωμάτων. Πάνω στους κόμβους τοποθετούνται υποχρεωτικά οι πηγές και οι δέκτες.



Σχήμα 2.1: Παράδειγμα διακριτοποίησης ενός μοντέλου με 10 κελιά στον Z άξονα και 20 κελιά στον X, όπου το κάθε κελί συνορεύει με τα γειτονικά μέσω κόμβων. (Κρητικάκης, 2019)

Η διάδοση του κυματικού πεδίου στο χώρο πραγματοποιείται σε διακριτά χρονικά στάδια (sampling interval) και ολοκληρώνεται σε συγκεκριμένο χρόνο (record length) μετρούμενα σε ms. Για αυτό το λόγο, πριν από την εκτέλεση του PSV_SYNTHETICS, ο χρήστης θα πρέπει να έχει πληροφορίες, τόσο για το σεισμικό μοντέλο που θα δημιουργήσει, όσο και για τις παραμέτρους καταγραφής των σεισμικών δεδομένων. Ειδικότερα:

1. Διαστάσεις του μοντέλου σε m (μήκος και βάθος)
2. Δισδιάστατη γεωμετρία των στρωμάτων του μοντέλου
3. Ταχύτητες P και S-κυμάτων σε m/s και την πυκνότητα σε gr/cm^3 για κάθε στρώμα
4. Κεντρική συχνότητα της πηγής σε Hz
5. Ισαπόσταση και θέση γεωφώνων και πηγών
6. Διάρκεια καταγραφής (record length) σε ms

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 (Vafeidis, 1988).

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

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

Όπου a_{max} : η μέγιστη ταχύτητα των P-κυμάτων, Δt η διακριτοποίηση στο χρόνο (t) και Δx η διακριτοποίηση στο χώρο ($x-z$).

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

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

Όπου $\lambda_{min} = \beta_{min} / f_{max}$

β_{min} : η ελάχιστη ταχύτητα των S- κυμάτων

$f_{max} \approx 2.5 f_{central}$: η μέγιστη (f_{max}) και η κυρίαρχη ($f_{central}$) συχνότητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων

Αφού έγιναν οι κατάλληλοι περιορισμοί βάσει 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 $\Delta x = \Delta z = 0,1 \text{ m}$.

2.2 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ PSV_SYNTHETICS

Πληκτρολογώντας την εντολή: `PSV_SYNTHETICS_VER12ELEV`; στο παράθυρο εντολών (Command Window) του Matlab εκτελείται ο αλγόριθμος και ο χρήστης καλείται να εισάγει (IMPORT) ένα μοντέλο ή να δημιουργήσει ένα καινούριο (CREATE), όπου θα οριστούν οι αρχικές παράμετροι του μοντέλου (Σχήμα 2.2).

PSV Modeler V12.1: INITIAL MODEL PARA...

Enter the HORIZONTAL extend of model in meters
500

Enter the VERTICAL extend of model in meters
200

Enter the minimum velocity of model in m/s. S-wave velocity of air or water excluded
1000

Enter the dominant frequency of the source in Hz
50

Enter receivers spacing in meters
5

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

Model for MARINE or LAND Survey ?
LAND

OK Cancel

Σχήμα 2.2: Εισαγωγή αρχικών παραμέτρων του μοντέλου

Αρχικά καθορίζονται από τον χρήστη οι διαστάσεις (2D) του μοντέλου, η κεντρική συχνότητα της πηγής, η ισαπόσταση των γεωφώνων και προσδιορίζεται ο τύπος της προσομοίωσης (επιφανειακό στρώμα θάλασσας ή όλα τα στρώματα στην ξηρά) και η ύπαρξη απορροφητικής ζώνης στην επιφάνεια ($Z=0$) του μοντέλου. Επίσης ορίζεται η ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης (V_{min}) των S κυμάτων που χρησιμοποιείται για την διακριτοποίηση του μοντέλου με σκοπό να πληροί το κριτήριο της αριθμητικής διασποράς.

$$GRID \leq \frac{\lambda_{min}}{6} = \frac{V_{min}}{6 \cdot f_{max}} \approx \frac{V_{min}}{6 \cdot 2.5 \cdot f_{dom}} \quad (2.3)$$

Από την ισαπόσταση των δεικτών ο αλγόριθμος ορίζει τις διαστάσεις των κελιών (GRID) χρησιμοποιώντας την σχέση:

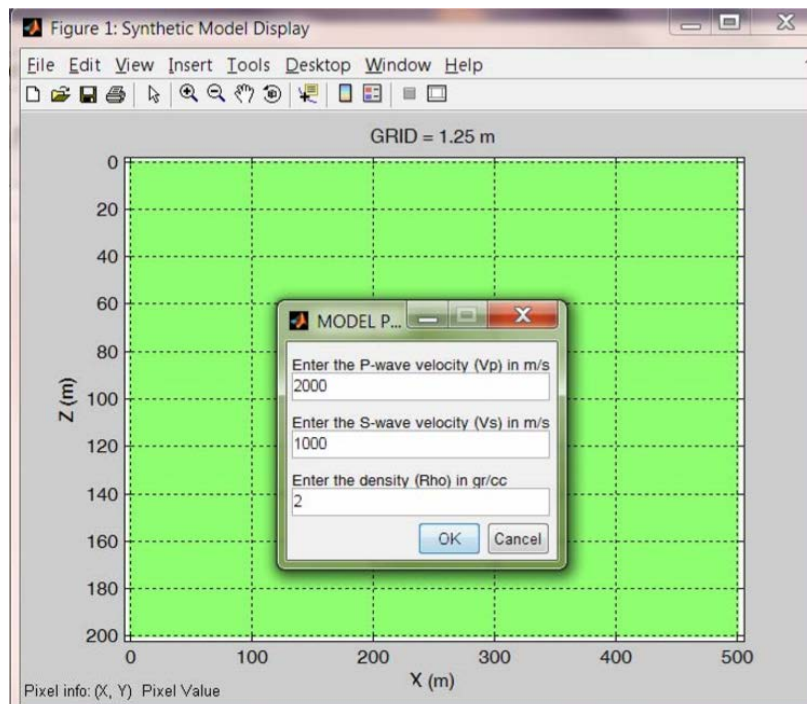
$$GRID = MK\Delta \left\{ dx, \frac{\lambda_{min}}{6} \right\} \quad (2.4)$$

Σε κάποια μοντέλα παραμετροποιήθηκε ειδικά ο αλγόριθμος ώστε να χρησιμοποιηθεί συγκεκριμένη διακριτοποίηση στο χώρο (GRID) που να ικανοποιεί όμως την σχέση 2.3.

Το επόμενο βήμα είναι ο ορισμός της γεωμετρίας των στρωμάτων και οι ταχύτητες των P και S κυμάτων στο κάθε στρώμα. Τα στρώματα σχεδιάζονται με την μορφή πολυγώνων των οποίων τις

διαστάσεις ορίζονται σχεδιάζοντας τα στο περιβάλλον της Matlab ή εισάγοντας τις διαστάσεις τους με την μορφή πίνακα. Για το κάθε στρώμα ορίζονται τιμές για την ταχύτητα διάδοσης V_s και V_p σε m/s και την πυκνότητα του σε gr/cm^3 (Σχήμα 2.3).

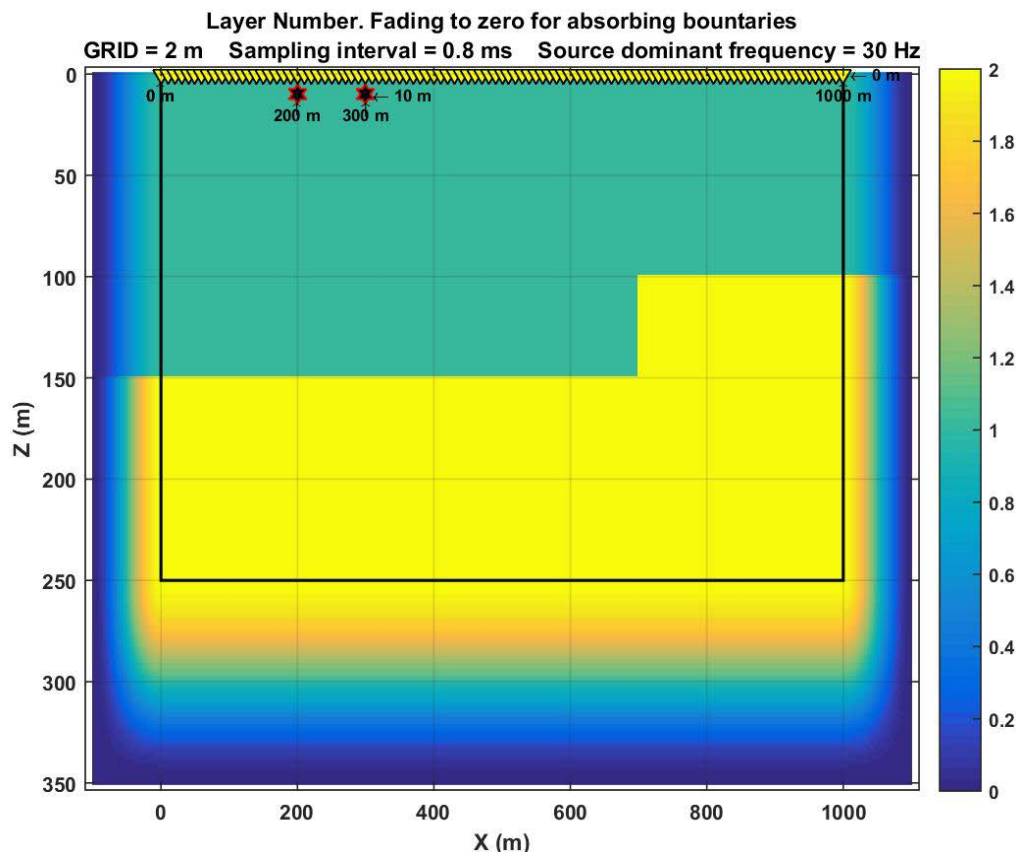
Ακολουθεί ο ορισμός της θέσης της αρχικής πηγής και της ισαπόστασης των υπόλοιπων, αν υπάρχουν. Οι πηγές αναπτύσσονται οριζόντια ή κάθετα σε σχέση με την αρχική θέση, ή εισάγεται πίνακας με τις θέσεις των πηγών με περιορισμό να μην τοποθετηθούν σε απόσταση μικρότερη των 3 κόμβων από οποιαδήποτε διεπιφάνεια (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.3: Παράδειγμα εισαγωγή παραμέτρων V_s , V_p , ρ για σεισμικό στρώμα.

Σχήμα 2.4: Παράδειγμα ορισμού των παραμέτρων της θέσης των πηγών για οριζόντιο ανάπτυγμα πηγών.

Οι δέκτες (γεώφωνα) μπορούν να αναπτυχθούν κατά μήκος οριζόντιας ή κατακόρυφης γραμμής μελέτης, κατά μήκος μιας διεπιφάνειας (π.χ. την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους) ή να γίνει εισαγωγή των θέσεων τους με την μορφή πίνακα (Σχήμα 2.5). Εισάγουμε τον αριθμό των δεκτών και τις συντεταγμένες του πρώτου δέκτη (Z,X) όπως επίσης την ισαπόσταση των δεικτών σε m, λαμβάνοντας υπόψη ότι πρέπει η απόσταση αυτή να διαιρείται ακριβώς με το μέγεθος των κελιών (GRID) και κανένας δέκτης να μην τοποθετηθεί εκτός των ορίων του μοντέλου.

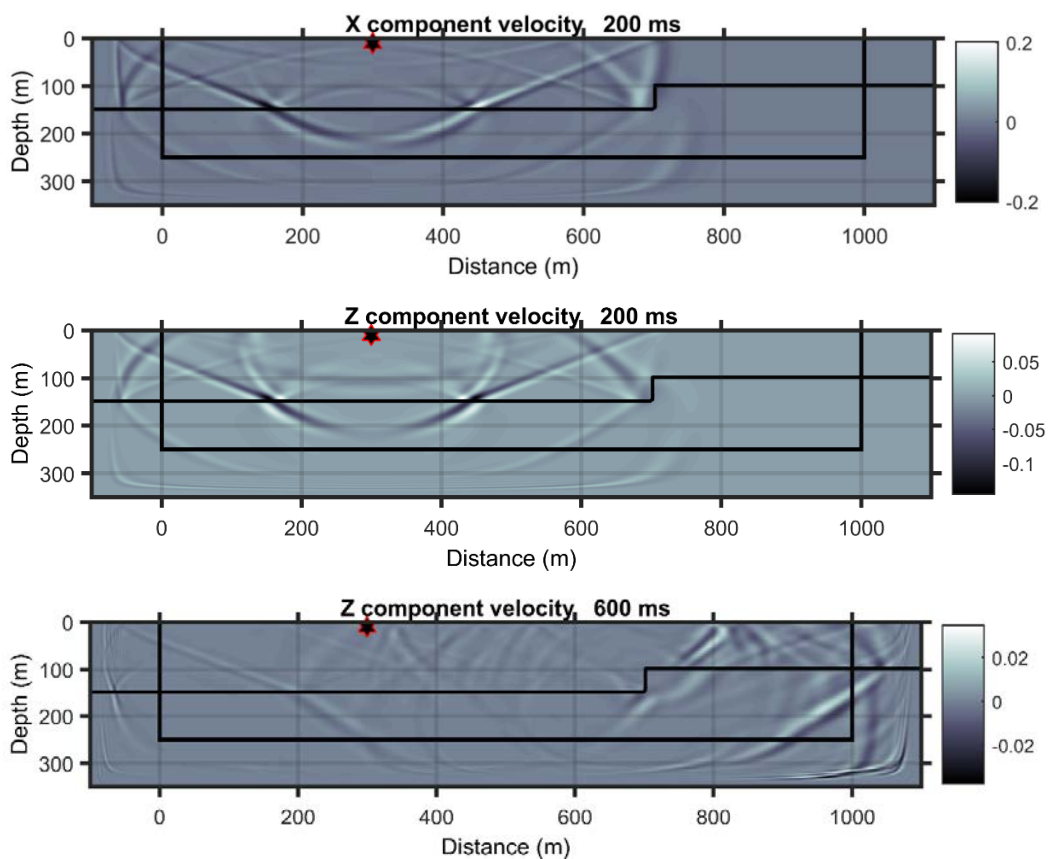


Σχήμα 2.5: Παράδειγμα τοποθέτησης 2 πηγών (★) και σταθερού αναπτύγματος δεκτών στην επιφάνεια ($Z=0m$) (κίτρινα τρίγωνα - ▼) σε ισαποστάσεις των 10m κατά μήκος όλου του μοντέλου (1000m). Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στον α/α των στρωμάτων. Τα απορροφητικά όρια εμφανίζονται με διαβάθμιση των χρωμάτων.

Το τελευταίο βήμα είναι ο ορισμός του συνολικού χρόνου καταγραφής και των στιγμιότυπων που θα αποθηκευτούν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, από τα οποία προκύπτει η απεικόνιση της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στο χώρο (Σχήμα 2.7). Ο χρόνος καταγραφής πρέπει να υπολογιστεί εκ των προτέρων υπολογίζοντας τον χρόνο που θα χρειαστούν τα μελετώμενα σεισμικά κύματα (υπό την μορφή σεισμικής ακτίνας) να διανύσουν την διαδρομή από την πηγή στην βαθύτερη ανακλαστική επιφάνεια μέχρι να φτάσουν στο μακρινότερο γεώφωνο. Για να γίνει αυτό, αρχικά υπολογίζεται κατά προσέγγιση η διαδρομή της σεισμικής

ακτίνας και στη συνέχεια, μια μέση (τετραγωνική) ταχύτητα των διαφόρων σεισμικών στρωμάτων από τα οποία διέρχεται η μελετώμενη σεισμική ακτίνα. Η υποεκτίμηση του συνολικού χρόνου καταγραφής έχει ως συνέπεια να μην καταγραφούν τα μελετώμενα σεισμικά κύματα, ενώ η υπερεκτίμηση του συνολικού χρόνου καταγραφής επιφέρει μεγαλύτερη διάρκεια προσομοίωσης (Σχήμα 2.6).

Σχήμα 2.6: Παράδειγμα ορισμού του συνολικού χρόνου καταγραφής και των στιγμιότυπων διάδοσης των σεισμικών κυμάτων.



Σχήμα 2.7: Στιγμιότυπα διάδοσης των κυμάτων στα 200, 400, 600 ms για το μοντέλο του Σχήματος 2.5

Στα πλαϊνά και κάτω όρια του μοντέλου, ο προσομοιωτής εισάγει επιπρόσθετες περιοχές, πέρα από τα όρια του μοντέλου, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως απορροφητικές ζώνες. Οι ζώνες αυτές χρησιμοποιούνται για την απόσβεση των σεισμικών κυμάτων που καταφθάνουν στα όρια του μοντέλου και την αποφυγή τεχνητών και ανεπιθύμητων ανακλάσεων από αυτά. Οι ζώνες αυτές υλοποιώντας την τεχνική του ανισότροπου φίλτρου διάδοσης των κυμάτων (anisotropic filter method) στο σώμα των απορροφητικών ζωνών (Dai et al, 1994) εξαναγκάζουν σταδιακά τα σεισμικά κύματα να διαδοθούν κάθετα στο εκάστοτε όριο του μοντέλου. Στο τέλος της κάθε απορροφητικής ζώνης τα σεισμικά κύματα εξαναγκάζονται να διαδοθούν μόνο προς την εξωτερική κατεύθυνση του έτσι ώστε να μην επιστρέφει καθόλου σεισμική ενέργεια προς το εσωτερικό του.

2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ PSV SYNTHETICS

Στο τέλος της προσομοίωσης ο αλγόριθμος δημιουργεί και αποθηκεύει αρχεία τύπου *.fig και *.jpg που απεικονίζουν το μοντέλο και τα απορροφητικά του όρια υπό μορφή των στρωμάτων του μοντέλου και τις θέσεις των πηγών και των γεωφώνων καθώς και πληροφορίες για την κεντρική συχνότητα της πηγής, για το GRID και το διάστημα δειγματοληψίας.

Επίσης δημιουργούνται τα (matlab) αρχεία κατάληξης *.SMP, *.SRC και *.RCV που περιέχουν πληροφορίες για τις παραμέτρους του μοντέλου, των πηγών και των δεκτών αντίστοιχα.

Τέλος δημιουργεί ένα αρχείο τύπου *_V.mat όπου αποθηκεύει της μεταβλητές κελιά Vx, Vz. Κάθε κελί περιλαμβάνει πίνακες με τις χρονοσειρές της κατακόρυφης (Vz) και της οριζόντιας (Vx) συνιστώσας της ταχύτητας ταλάντωσης των σωματιδίων σε κάθε δέκτη. Το πλήθος των στηλών και των γραμμών κάθε πίνακα χρονοσειρών ισούται με το πλήθος των δεκτών και των δειγμάτων στο χρόνο, αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

3.1 ΔΙΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΙΑ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Με σκοπό την δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης για την αξιολόγηση της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε δημιουργήθηκαν διάφορα πειραματικά μοντέλα, ξεκινώντας από απλά μοντέλα και καταλήγοντας σε πιο σύνθετα. Οι προσομοιώσεις αυτές είναι διερευνητικές με σκοπό την παρατήρηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την διακριτική ικανότητα της προσομοίωσης. Για το λόγο αυτό, τροποποιήθηκαν οι παράμετροι της προσομοίωσης, όπως οι θέσεις των πηγών, των γεωφώνων, η ισαπόσταση τους, η στρωματογραφία, η συχνότητα και ο αριθμός των πηγών, καθώς και άλλοι παράμετροι, ώστε να σχεδιαστεί η ιδανική διάταξη για την ακριβή αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Στις ακόλουθες παραγράφους θα περιγραφούν τα μοντέλα και οι λόγοι που τροποποιήθηκε η κάθε παράμετρος.

3.1.1 Προσομοίωση 1: Μοντέλο με 2 πηγές ,2 στρώματα και επιφανειακά γεώφωνα

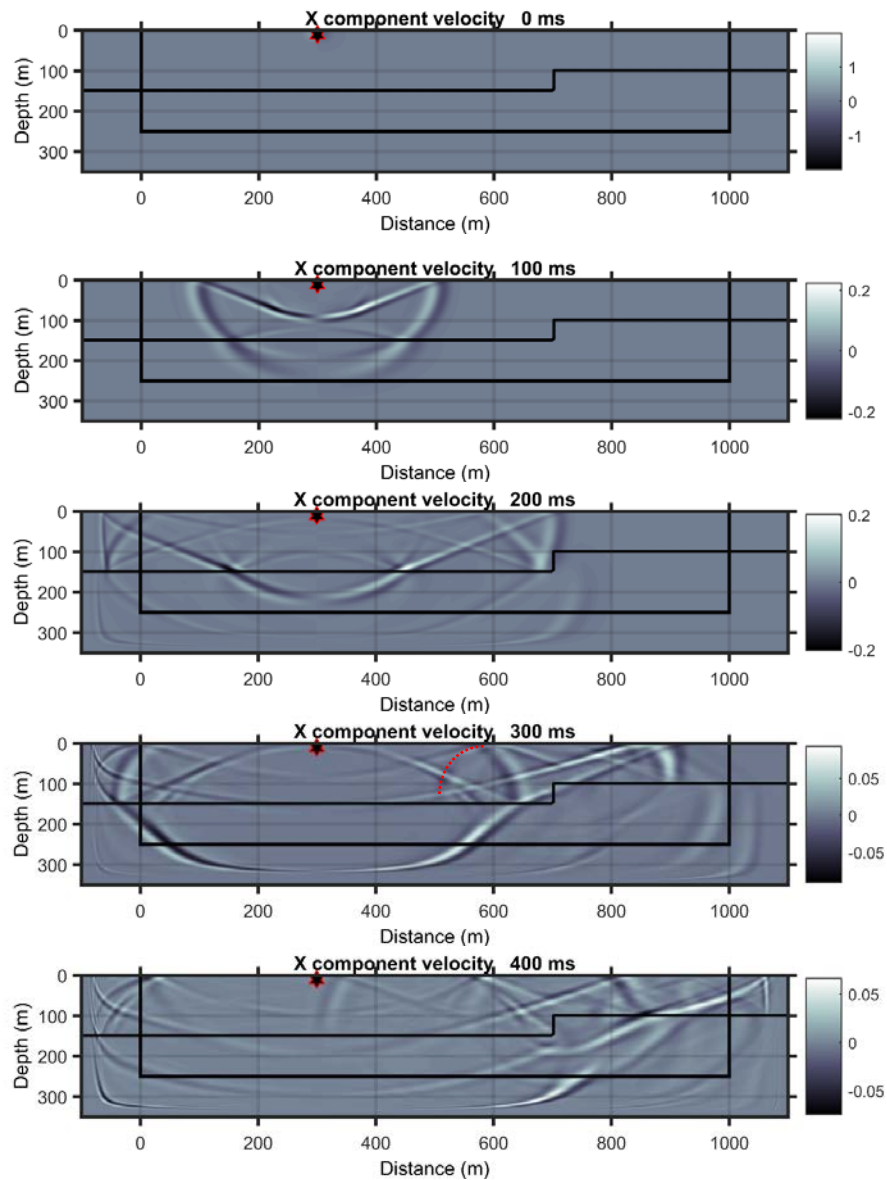
Το μοντέλο που δημιουργήθηκε είχε βάθος (Z) = 250m και μήκος (X) = 1000m. Το μέγεθος των κελιών ορίστηκε (GRID)=2m και το διάστημα δειγματοληψίας (Sampling Interval)= 0.8 ms (Σχήμα 2.5).

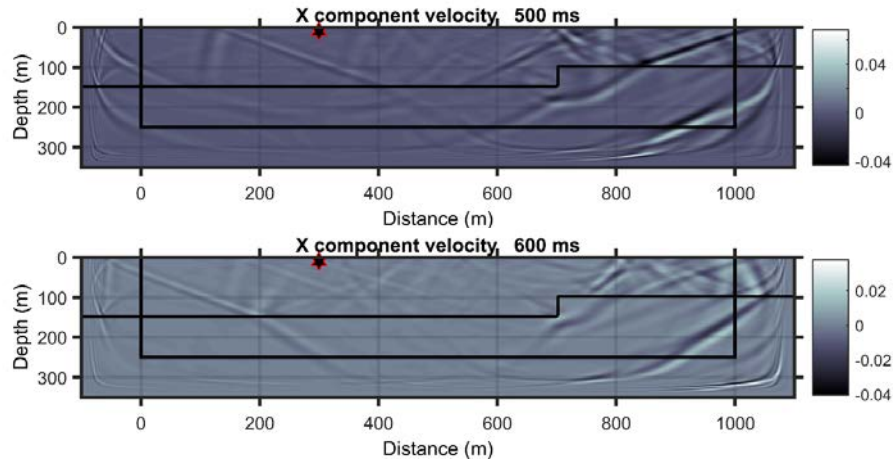
Αποτελούνταν από 2 σεισμικά στρώματα. Το υπερκείμενο στρώμα με πυκνότητα (ρ_1)= 1.7 gr/cm³ και ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων (V_{p1})=2000 m/s και (V_{s1})=1000 m/s. Το υποκείμενο στρώμα με πυκνότητα του σχηματισμού (ρ_2)= 2.5 gr/cm³ και ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων (V_{p2})=3000 m/s και (V_{s2})=1500 m/s. Οι πηγές τοποθετήθηκαν κοντά στην επιφάνεια του εδάφους στις θέσεις (Z,X = 10,200) και (Z,X = 10,300) με κυρίαρχη συχνότητα f_{dom} = 30 Hz .

Χρησιμοποιήθηκαν 101 δέκτες (γεώφωνα οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας) τα οποία τοποθετήθηκαν στην επιφάνεια του μοντέλου με ισαπόσταση 10 m (Σχήμα 2.5). Μελετήθηκε πώς επηρεάζει η θέση της πηγής, σε σχέση με την απόστασή της από μια κατακόρυφη μεταβολή των ιδιοτήτων του μέσου (π.χ. ρήγμα), την διάδοση των κυμάτων. Έγινε σύγκριση των πρώτων αφίξεων με τους υπολογιζόμενους χρόνους άφιξης.

Στο μοντέλο αυτό δεν έχουν εισαχθεί απορροφητικά όρια στην επιφάνεια με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν και επιφανειακά κύματα Rayleigh. Η προσομοίωση αυτή έγινε για διερευνητικούς σκοπούς προκειμένου να μελετηθεί η διάδοση των οπισθοσκεδαζόμενων

σεισμικών κυμάτων από επιφάνεια σώματος που προσομοιάζει κατακόρυφη μετάπτωση (π.χ. ρήγμα). Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζονται τα στιγμιότυπα της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων ανά 100ms για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου. Στο στιγμιότυπο των 300 ms του Σχήματος 3.1, με κόκκινη στικτή γραμμή σημειώνονται τα οπισθοσκεδαζόμενα από την κατακόρυφη διαφάνεια σεισμικά κύματα.





Σχήμα 3.1: Οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας ταλάντωσης των σωματιδίων. Στιγμιότυπα κύματος μεταξύ 0ms και 600ms ανά 100ms.

3.1.2 Προσομοίωση 2: Μοντέλο με 2 πηγές σε οριζόντια προχώρηση, σώμα και γεώφωνα σε γεώτρηση.

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε είχε βάθος (Z) = 50m και μήκος (X) = 120m. Το μέγεθος των κελιών ορίστηκε ($GRID$)=0.25m και το διάστημα δειγματοληψίας ($Sampling\ Interval$)= 0.08 ms .

Αποτελούνταν από ένα σχηματισμό με πυκνότητα $\{\rho_1\}= 2\text{ gr/cm}^3$ και ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων (V_{p1})=3000 m/s και (V_{s1})=1500 m/s . Στο μέσο του σχηματισμού (X)=60 ορίστηκε ένα σώμα με διαστάσεις ($Z,X = 20,10$), πυκνότητα του σχηματισμού $\{\rho_2\}= 2.5\text{ gr/cm}^3$ και ταχύτητες διάδοσης (V_{p2})=4000 m/s και (V_{s2})=2000 m/s. Η πηγή τοποθετήθηκε σε μια γεώτρηση στην θέση ($Z,X = 25,18$) με συχνότητα ταλάντωσης της πηγής $f_{dom}= 100\text{ Hz}$. Τα γεώφωνα τοποθετήθηκαν σε μια κατακόρυφη γεώτρηση από την επιφάνεια μέχρι το μέγιστο βάθος του μοντέλου με ισαπόσταση 5 m και απόσταση 92 m από την πηγή (Σχήμα 3.2).

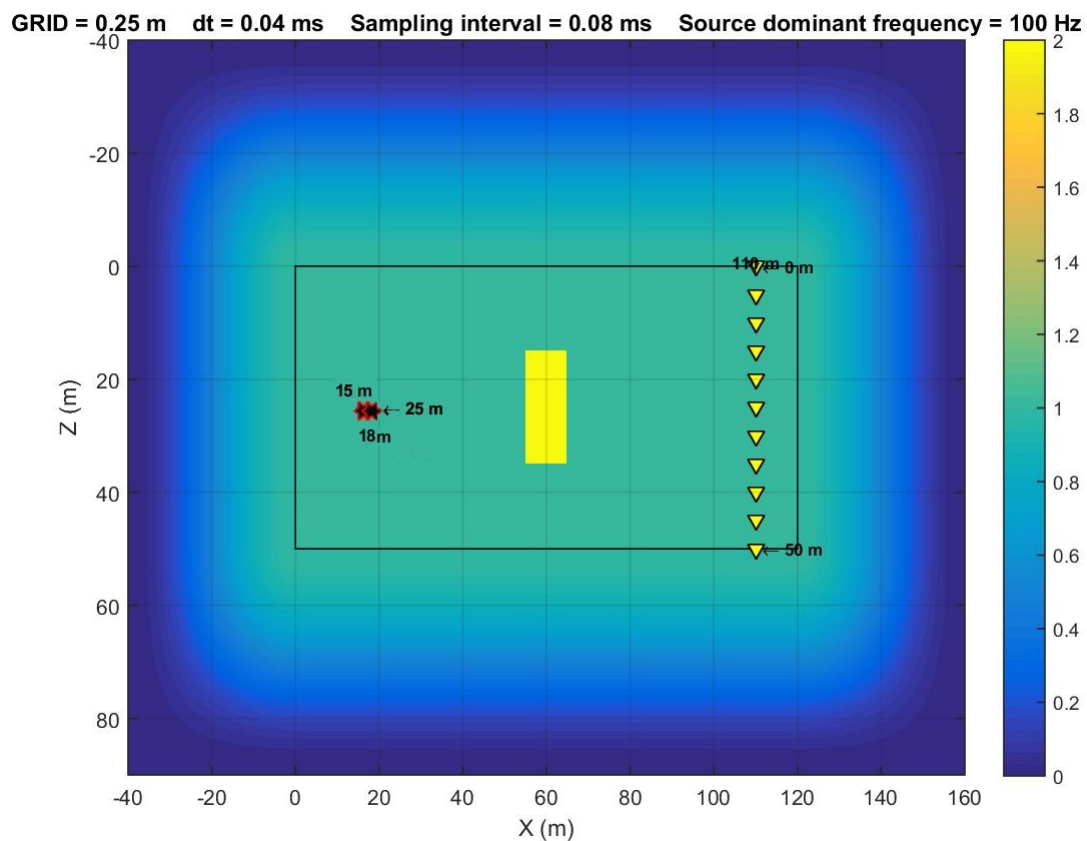
Στο μοντέλο αυτό εισήχθησαν απορροφητικά όρια και στην ανώτερη επιφάνεια του μοντέλου για την απόσβεση των σεισμικών κυμάτων που καταφθάνουν στα όρια του μοντέλου και την αποφυγή τεχνητών και ανεπιθύμητων ανακλάσεων και από την επιφάνεια.

Ο στόχος της εν λόγω προσομοίωσης ήταν να διαπιστωθεί κατά πόσο ένα σώμα υψηλής ταχύτητας μέσα σε ομοιογενή σχηματισμό επηρεάζει τους χρόνους άφιξης στις συνθετικές καταγραφές. Ο αναλυτικός χρόνος άφιξης στο γεώφωνο που βρίσκεται στο ίδιο βάθος με την πηγή ($Z=25m$) είναι ίσος με 29.83 ms και συμπίπτει με τον υπολογιζόμενο χρόνο της πρώτης άφιξης.. Αν δεν υπήρχε το σώμα υψηλής ταχύτητας, ο αντίστοιχος χρόνος θα ήταν 30.67ms.

Δηλαδή, η διαφορά στους υπολογισμένους χρόνους άφιξης είναι μικρότερη από 3% κάτι που καθιστά τον εντοπισμό του σώματος επισφαλές στην περίπτωση οποιουδήποτε πειραματικού σφάλματος.

Διαπιστώθηκε επίσης, ότι ακόμα και σε αυτό το απλό μοντέλο, δεν είναι εύκολος ο υπολογισμός των αναλυτικών χρόνων διαδρομής για τις αφίξεις στα γεώφωνα που δεν βρίσκονται στο ίδιο βάθος με την πηγή (απαιτείται η τεχνική σκόπευσης – shooting technique).

Στην συνέχεια έγινε επανάληψη της προσομοίωσης με την πηγή στην θέση (Z,X = 25 ,15) με σκοπό την μελέτη κατά την προχώρηση της πηγής οριζόντια και ο υπολογιζόμενος χρόνος άφιξης βρέθηκε ίσος με 30.83 ms για το γεώφωνο που βρίσκεται στο ίδιο βάθος με την πηγή.



Σχήμα 3.2: Μοντέλο 2 σεισμικών στρωμάτων και θέσεις πηγών (★)-γεωφώνων (▼) που χρησιμοποιήθηκαν κατά την 2^η προσομοίωση. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στον αύξοντα αριθμό του κάθε στρώματος. Η χρωματική διαβάθμιση αντιστοιχεί στις ζώνες των απορροφητικών ορίων.

3.1.3 Προσομοίωση 3: Μοντέλο με 5 πηγές σε γεώτρηση, σώμα και γεώφωνα σε κατακόρυφη γεώτρηση

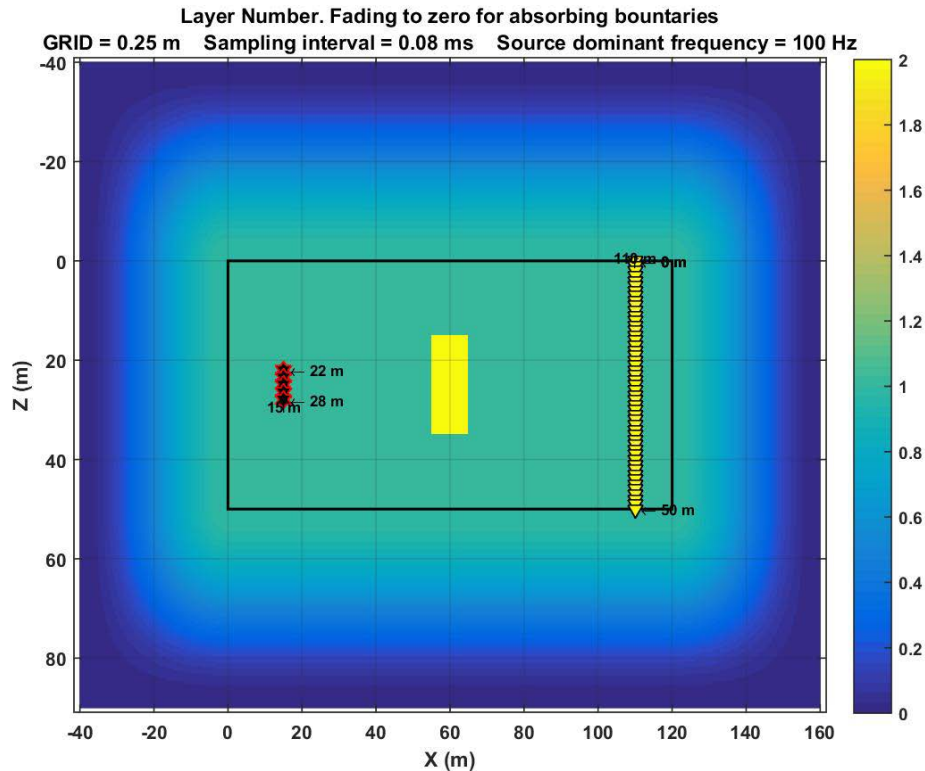
Το μοντέλο που δημιουργήθηκε είχε τις ίδιες παραμέτρους με αυτό της προηγούμενης προσομοίωσης αλλά διαφορετική διάταξη και πλήθος πηγών και δεκτών. Ειδικότερα, πέντε πηγές τοποθετήθηκαν σε κατακόρυφη γεώτρηση στις θέσεις:

- $(Z,X)_1=(22,15)$
- $(Z,X)_2=(23.5,15)$
- $(Z,X)_3=(25,15)$
- $(Z,X)_4=(26.5,15)$
- $(Z,X)_5=(28,15)$

Η κυρίαρχη συχνότητα των πηγών ήταν $f_{dom}=100\text{ Hz}$.

Τα γεώφωνα τοποθετήθηκαν σε μια κατακόρυφη γεώτρηση από την επιφάνεια μέχρι το μέγιστο βάθος του μοντέλου σε ισαποστάσεις 0.5 m (Σχήμα 3.3).

Η προσομοίωση αυτή έγινε με σκοπό να μελετηθεί πως επηρεάζονται οι πρώτες αφίξεις με μετακίνηση της πηγής στον κάθετο άξονα. Οι υπολογιζόμενοι χρόνοι άφιξης στα γεώφωνα στο ίδιο βάθος με τις πηγές είναι ίσοι με 30.83 και συμπίπτουν με τους χρόνους που προκύπτουν από την προσομοίωση. Διαπιστώθηκε ότι η αύξηση του αριθμού των πηγών και των δεκτών αυξάνει μεν την κάλυψη του σώματος υψηλής ταχύτητας από σεισμικές ακτίνες, αλλά δεν παρέχει σημαντική βελτίωση στην ακρίβεια υπολογισμού των χρόνων άφιξης, ειδικότερα στους δέκτες που βρίσκονται κοντά στο πάνω και κάτω όριο του μοντέλου.



Σχήμα 3.3: Μοντέλο 2 σεισμικών στρωμάτων και θέσεις πηγών (★)-γεωφώνων(▼) που χρησιμοποιήθηκαν κατά την 3^η προσομοίωση. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στον αύξοντα αριθμό του κάθε στρώματος. Η χρωματική διαβάθμιση αντιστοιχεί στις ζώνες των απορροφητικών ορίων.

3.1.6 Προσομοίωση 4: Μοντέλο με 3 πηγές, σώμα και γεώφωνα σε γεώτρηση και στην επιφάνεια.

Απώτερος σκοπός της εν λόγω προσομοίωσης είναι ο έλεγχος των παραμέτρων για τον σχεδιασμό μιας διάταξης γεωφώνων για την βελτιστοποίηση της χρήσης της μεθόδου υπολογισμού των χρόνων πρώτων αφίξεων με τη μέθοδο της ετεροσυσχέτισης.

Έτσι, το μοντέλο που δημιουργήθηκε είχε βάθος (Z) = 40m και μήκος (X) = 300m. Το μέγεθος των κελιών ορίστηκε (GRID)= 1 m και το διάστημα δειγματοληψίας (Sampling Interval)= 0.4 ms.

Αποτελούνταν από ένα σχηματισμό με πυκνότητα (ρ_1)= 2 gr/cm³ και ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων (V_{p1})=2000 m/s και (V_{s1})=1000 m/s. Ορίστηκε ένας χώρος ανάμεσα σε 2 γεωτρήσεις με απόσταση 100m και στο μέσο του (X)=200m τοποθετήθηκε ένα σώμα με διαστάσεις (Z,X = 20,10), πυκνότητα σχηματισμού (ρ_2)= 2.2 gr/cm³ και ταχύτητες διάδοσης (V_{p2})=3000 m/s και (V_{s2})=1500 m/s. Οι πηγές τοποθετήθηκαν στην αριστερή κατακόρυφη γεώτρηση στις θέσεις (Z,X)₁ =(2,150), (Z,X)₂ =(20,150), (Z,X)₃ =(38,150)

Η συχνότητα ταλάντωσης των πηγών είναι f_{dom} = 50 Hz. Τα γεώφωνα τοποθετήθηκαν στην δεξιά κατακόρυφη γεώτρηση (η οποία απέχει κατά τον άξονα X 100 m από τη γεώτρηση των πηγών)

από την επιφάνεια μέχρι το μέγιστο βάθος του μοντέλου σε ισαποστάσεις 1 m. Σε αυτή την προσομοίωση δεν ορίστηκαν απορροφητικά όρια στην επιφάνεια. Αντίθετα, τοποθετήθηκε ανάπτυσμα γεωφώνων στην επιφάνεια με στόχο να συμβάλει στην καλύτερη κάλυψη του σώματος υψηλής ταχύτητας από σεισμικές ακτίνες και να περιοριστεί η αβεβαιότητα προσδιορισμού της θέσης του κατακόρυφου σώματος ως προς τον οριζόντιο άξονα.

Η σεισμική τομογραφία με την μέθοδο Cross-hole έχει κάποιους περιορισμούς καθώς η διακριτική της ικανότητα εξαρτάται από την συχνότητα της σεισμικής πηγής και την θέση του κελιού στην σεισμική τομή και είναι ανάλογη της συχνότητας (f) και αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων (v). Για ένα συγκεκριμένο μέσο (v), υψηλή συχνότητα αντιστοιχεί σύμφωνα με την θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής ($v = \lambda f$), σε μικρό μήκος κύματος (λ). Όταν ένα σεισμικό κύμα διασχίζει λεπτό στρώμα πάχους d , μικρότερου από το $\frac{1}{4}$ του μήκους κύματος λ , τα ανακλώμενα (αλλά και τα διαθλώμενα) σεισμικά κύματα από την άνω και κάτω διεπιφάνεια του στρώματος συμβάλλουν μεταξύ τους, με αποτέλεσμα το κύμα να συμπεριφέρεται σαν να πέρασε από ομοιογενές μέσο (Ivansson, 1986).

Όταν από κελί δεν περνάει καμία ακτίνα, τότε αυτό δεν θα αντιπροσωπεύεται στο σύστημα των εξισώσεων $T=D*S$, άρα δεν θα είναι δυνατός ο υπολογισμός της σεισμικής του ταχύτητας.

Ο Ivansson (1986) αναφέρει δύο προβλήματα συναφή με την αρχή του Fermat (σύμφωνα με την οποία τα σεισμικά κύματα διαδίδονται μέσω της διαδρομής ελάχιστου χρόνου. Το πρώτο εμφανίζεται σε περιοχές μικρής σεισμικής ταχύτητας τις οποίες οι ακτίνες τείνουν να αποφύγουν. Το πεδίο των ταχυτήτων στην περιοχή αυτή δεν έχει μονοσήμαντη λύση καθώς δεν επηρεάζει τους χρόνους διαδρομής (δεδομένα) ή τους επηρεάζει πολύ λίγο.

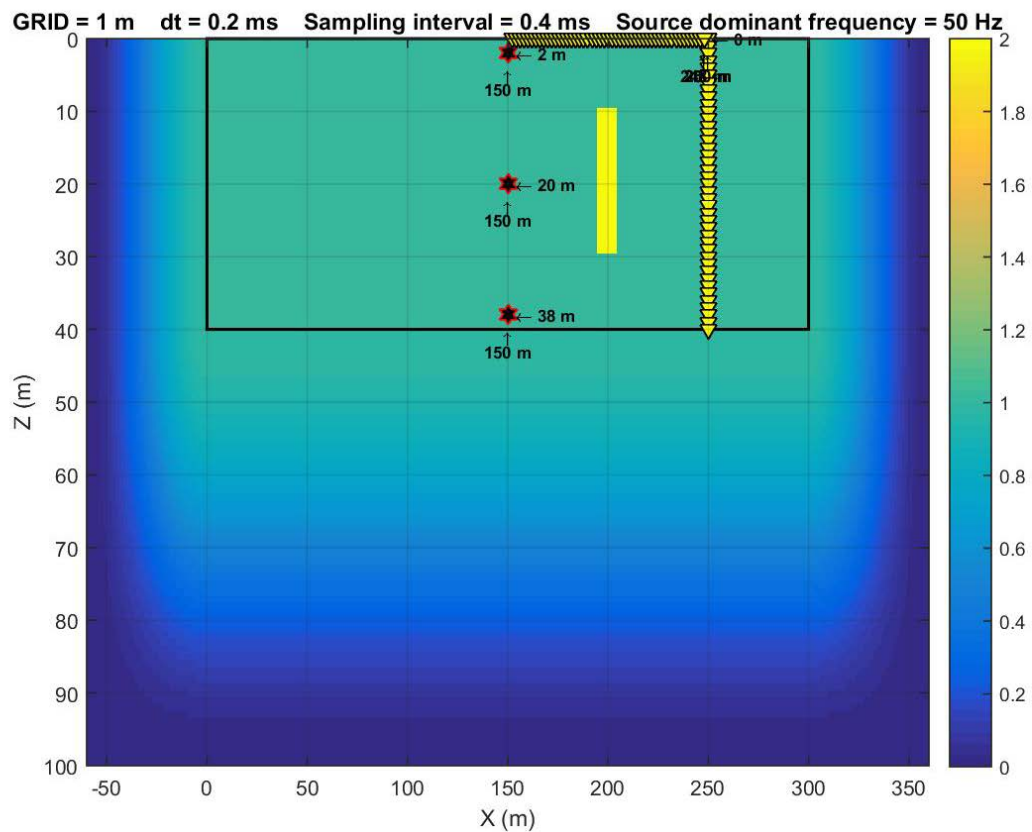
Το δεύτερο πρόβλημα σχετίζεται με το μονοσήμαντο της θέσης λεπτής λωρίδας μικρής ή μεγάλης ταχύτητας που διασχίζεται κατά πλάτος από τις σεισμικές ακτίνες. Αν για παράδειγμα η ταχύτητας της λωρίδας είναι μικρότερη από αυτή του μέσου που το περιβάλλει, δεν είναι εύκολο να απεικονιστεί, μια και όλοι οι χρόνοι διαδρομής θα αυξηθούν κατά την ίδια αναλογία. Η δε περιοχή ανάμεσα στις γεωτρήσεις θα φανεί ομοιογενής με μειωμένη μέση ταχύτητα. Σύμφωνα με τον Ivansson (1986), το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την τοποθέτηση συμπληρωματικών γεωφώνων στην επιφάνεια της γης.

Ειδικότερα, τοποθετήθηκαν 49 γεώφωνα κατά μήκος της ελεύθερης επιφάνειας του μοντέλου από την μια έως την άλλη γεώτρηση (200m) σε ισαποστάσεις των 2 m. Συνολικά τοποθετήθηκαν 90 γεώφωνα (41 κατακόρυφα και 49 οριζόντια), ενώ ο χρόνος καταγραφής ορίστηκε στα 150 ms (Σχήμα 3.4).

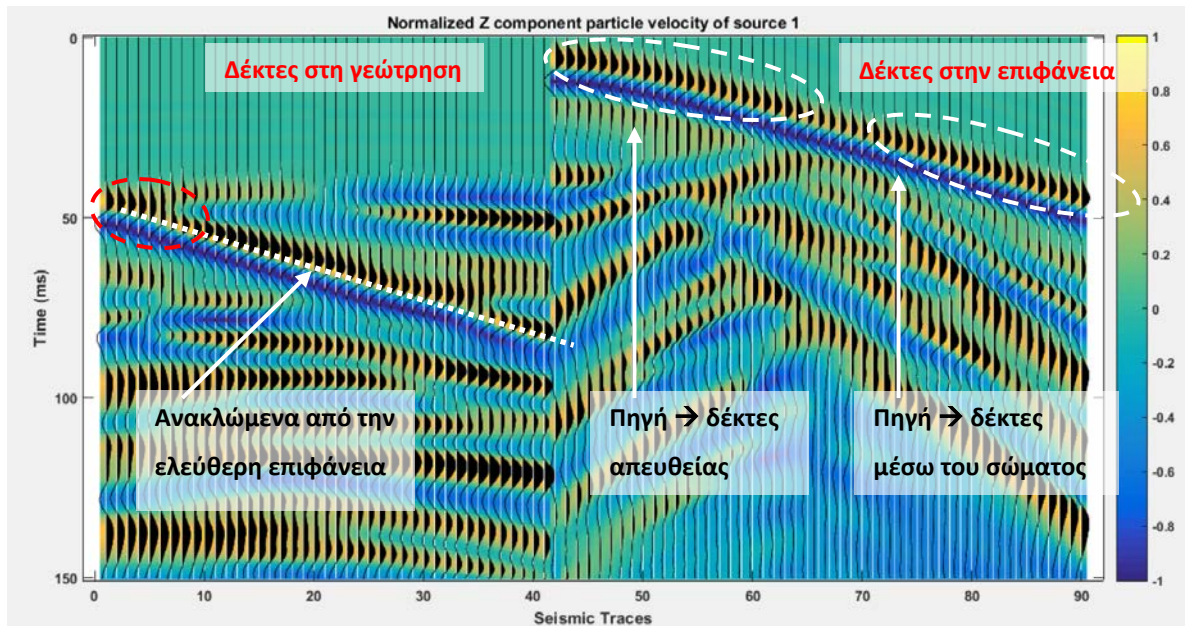
Η αύξηση του διαστήματος δειγματοληψίας της προσομοίωσης (σε 0.4ms) επιδρά αρνητικά ως προς τα σφάλματα υπολογισμού των χρόνων πρώτων αφίξεων στις συνθετικές καταγραφές και κατ' επέκταση στην απεικόνιση του σχηματισμού υψηλότερης ταχύτητα διάδοσης.

Για τα γεώφωνα που βρίσκονται στο ίδιο βάθος με τις πηγές οι αναμενόμενοι υπολογιζόμενοι χρόνοι άφιξης των απευθείας κυμάτων είναι 50 ms για την πρώτη ($Z=2\text{m}$) και την τελευταία ($Z=38\text{m}$) πηγή και 48.33 ms για την δεύτερη ($Z=20\text{m}$). Παρατηρείται ότι οι υπολογιζόμενοι χρόνοι δεν ταυτίζονται με τους αντίστοιχους χρόνους από την προσομοίωση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι σεισμικές ακτίνες, σύμφωνα με την αρχή του Fermat, ακολουθούν την πιο εύκολη διαδρομή, δηλαδή το μέσο με την μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης.

Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζονται οι καταγραφές στους δέκτες της γεώτρησης (ίχνη 1-41) και της επιφάνειας (δέκτες 42-90) της κατακόρυφης (Z) συνιστώσας της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων που προέρχονται από την πηγή σε βάθος 20m για το μοντέλο του Σχήματος 3.6. Παρατηρείται ότι η επίδραση του σώματος υψηλής ταχύτητας είναι πιο εμφανής στις καταγραφές των επιφανειακών δεκτών από τις αντίστοιχες καταγραφές στους δέκτες της γεώτρησης. Η ύπαρξη επίσης της ελεύθερης επιφάνειας αλλοιώνει την κυματομορφή των απευθείας κυμάτων στους δέκτες της γεώτρησης που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια (βλ. κόκκινη έλλειψη στο Σχήμα 3.5), λόγω της άφιξης σε παραπλήσιους χρόνους των ανακλώμενων από την ελεύθερη επιφάνεια σεισμικών κυμάτων.



Σχήμα 3.4: Μοντέλο 2 σεισμικών στρωμάτων και θέσεις πηγών(★)-γεωφώνων(▼) που χρησιμοποιήθηκαν κατά την 4^η προσομοίωση. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στον αύξοντα αριθμό του κάθε στρώματος. Η χρωματική διαβάθμιση αντιστοιχεί στις ζώνες των απορροφητικών ορίων.



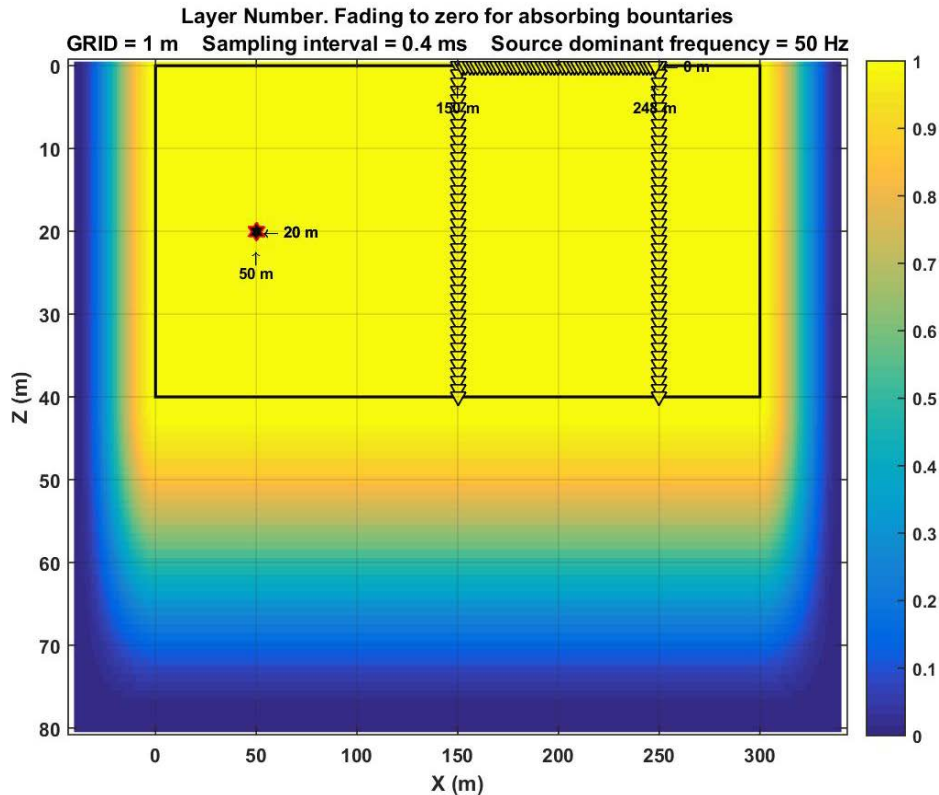
Σχήμα 3.5: Καταγραφές στους δέκτες της γεώτρησης (ίχνη 1-41) και της επιφάνειας (δέκτες 42-90) της κατακόρυφης (Z) συνιστώσας της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων που προέρχονται από την πηγή σε βάθος 20m για το μοντέλο του Σχήματος 3.4.

3.1.5 Προσομοίωση 5: Μοντέλο με 1 πηγή και διάταξη με γεώφωνα στις γεωτρήσεις και στην επιφάνεια.

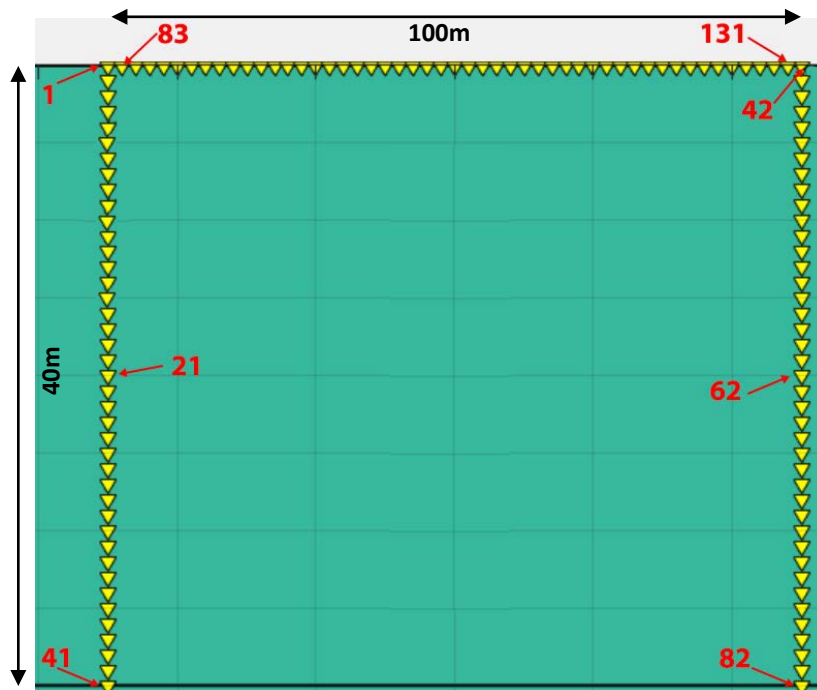
Το μοντέλο που δημιουργήθηκε είχε βάθος (Z) = 40m και μήκος (X) = 300m (Σχήμα 3.6). Το μέγεθος των κελιών ορίστηκε (GRID)= 1 m και το διάστημα δειγματοληψίας (Sampling Interval)= 0.4 ms .

Αποτελούνταν από ένα σχηματισμό με πυκνότητα (ρ_1)= 2 gr/cm³ και ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων (V_{p1})=2000 m/s και (V_{s1})=1000 m/s. Ορίσαμε τον υπό μελέτη χώρο ανάμεσα σε 2 γεωτρήσεις με απόσταση 100m. Η πηγή τοποθετήθηκε στην θέση (Z,X)=(20, 50). Η συχνότητα ταλάντωσης της πηγής είναι f_{dom} = 50 Hz. Τα γεώφωνα τοποθετήθηκαν σε 2 κατακόρυφες γεωτρήσεις που απέχουν 100m μεταξύ τους και από την επιφάνεια μέχρι το μέγιστο βάθος του μοντέλου (40m) σε ισαποστάσεις του 1 m και απόσταση της αριστερής γεώτρησης 100 m από την πηγή. Επίσης οριζόντιο ανάπτυγμα γεωφώνων στην επιφάνεια από την μια έως την άλλη γεώτρηση με ισαπόσταση γεωφώνων 2 m. Συνολικά τοποθετήθηκαν 131 γεώφωνα (41 γεώφωνα σε κάθε γεώτρηση και 49 στην ελεύθερη επιφάνεια) (Σχήμα 3.8). Ο χρόνος καταγραφής ορίστηκε στα 150 ms.

Στο Σχήμα 3.7 απεικονίζεται σε μεγέθυνση η περιοχή μεταξύ των δεκτών όπου αναγράφεται ενδεικτικά ο αριθμός θέσης (Position No) ορισμένων δεκτών. Ο αριθμός αυτός χρησιμοποιείται στα επόμενα εδάφια της εργασίας αυτής για να υποδηλώσει κάθε φορά τη θέση του δέκτη που χρησιμοποιήθηκε είτε ως εικονική πηγή είτε ως δέκτης στην μελέτη της μεθοδολογίας προσδιορισμού των χρόνων άφιξης των σεισμικών κυμάτων με τη μέθοδο της ετεροσυσχέτισης. Τα γεώφωνα με α/α 3 έως 39 της 1^{ης} γεώτρησης (αριστερή-κοντινότερη ως προς την πηγή) χρησιμοποιούνται ως εικονικές πηγές, ενώ αυτά στην επιφάνεια, αλλά και της 2^{ης} (δεξιά-μακρινότερη ως προς την πηγή), ως δέκτες.



Σχήμα 3.6: Μοντέλο ενός σεισμικού στρώματος (ομοιογενής ημιχώρος) και θέσεις πηγών(★)-γεωφώνων(▼) που χρησιμοποιήθηκαν κατά την 5^η προσομοίωση. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στον αύξοντα αριθμό του κάθε στρώματος. Η χρωματική διαβάθμιση αντιστοιχεί στις ζώνες των απορροφητικών ορίων.



Σχήμα 3.7: Ονομασία (α/α) γεωφώνων για την διάταξη με αναπτύγματα γεωφώνων σε κατακόρυφες γεωτρήσεις αλλά και στην επιφάνεια. Συνολικά τοποθετήθηκαν 131 γεώφωνα (41 γεώφωνα σε κάθε γεώτρηση σε ισαποστάσεις του 1m και 49 στην ελεύθερη επιφάνεια σε ισαποστάσεις των 2m)

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι θέσεις των ζευγών πηγών (Source Pos No , Receiver Pos No) και η μεταξύ τους απόσταση (Distance). Η στήλη Component αναφέρεται στην συνιστώσα που γίνεται η ταλάντωση. Οι υπολογιζόμενοι χρόνοι άφιξης των κυμάτων στα γεώφωνα της 2ης γεώτρησης αν η πηγή βρίσκονταν στις θέσεις των γεωφώνων της πρώτης γεώτρησης αλλά και οι χρόνοι άφιξης σε κάποια ενδεικτικά γεώφωνα της επιφάνειας (Analytical). Παρουσιάζονται οι χρόνοι που παράγονται από την ετεροσυσχέτιση (Xcorr) σε ms καθώς και η χρονική διαφορά του υπολογιζόμενου χρόνου από τον χρόνο που δίνει η ετεροσυσχέτιση σε ms (Diff) αλλά και το ποσοστιαίο σφάλμα (Error%).

Τα μικρά σφάλματα οφείλονται στην πολυπλοκότητα της διάδοσης του κύματος και στο διάστημα δειγματοληψίας. Όσο μικρότερο είναι το διάστημα δειγματοληψίας, τόσο μικρότερα θα ήταν και τα σφάλματα για τα ζεύγη πηγών-δεκτών που βρίσκονται στο ίδιο βάθος.

Έχει παρατηρηθεί ότι σε μη οριζόντια διάταξη παρατηρούνται μεγάλα σφάλματα άρα η μεθοδολογία της ετεροσυσχέτισης δεν λειτουργεί σωστά. Ως αποτέλεσμα οι τιμές που δίνει η ετεροσυσχέτιση δεν αντιστοιχούν στις πρώτες αφίξεις που μας ενδιαφέρουν και πιθανότητα αντιστοιχούν σε τεχνητές και ανεπιθύμητες ανακλάσεις μιας και δεν έχουν τοποθετηθεί απορροφητικά όρια στην επιφάνεια. Όσο πιο κοντά βρίσκονται οι εικονικές πηγές στα γεώφωνα τις επιφάνειας τόσο μεγαλύτερο το σφάλμα.

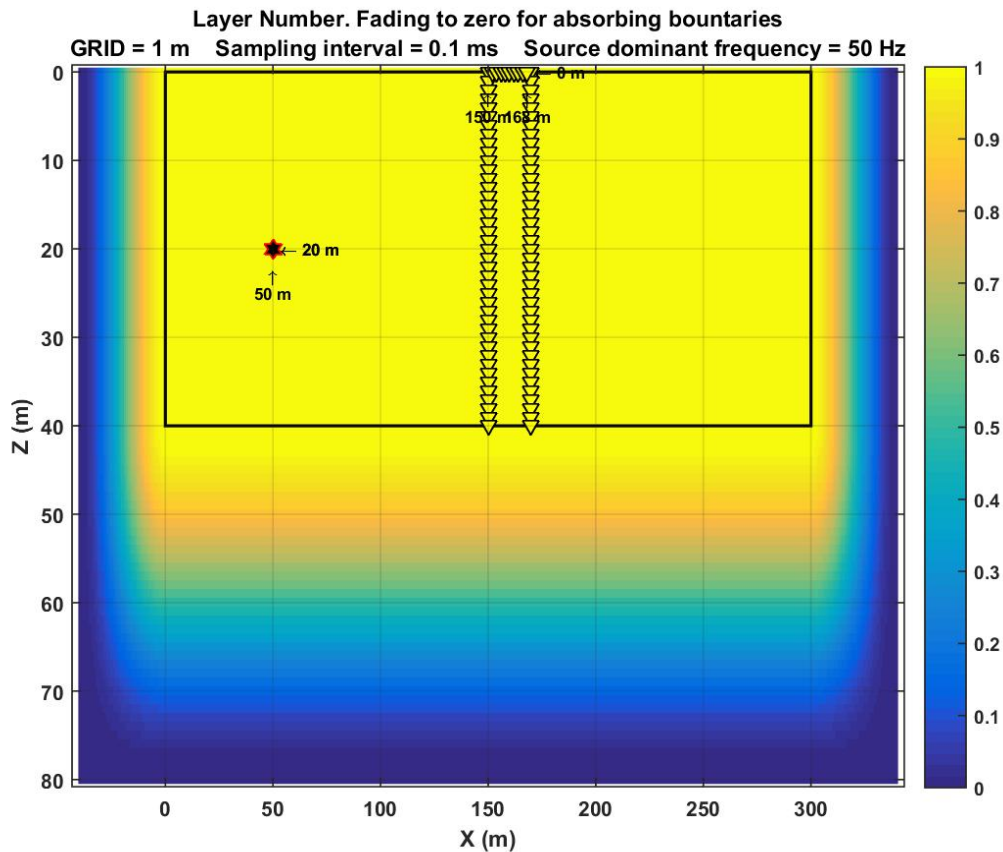
Πίνακας 3.1: Σύγκριση υπολογιζόμενων χρόνων άφιξης και χρόνων από την συσχέτιση Xcorr από γεώφωνα σε οριζόντια απόσταση αλλά και διαγώνια, για το μοντέλο του Σχήματος 3.6

Η πηγή απέχει 100m από την 1η γεώτρηση και 100m απόσταση μεταξύ γεωτρήσεων

Source Pos No	Receiver Pos No	Component	Distance	Analytical (ms)	Xcorr (ms)	Diff (ms)	Error %
21	62	X	100	50	49.8	0.2	0.4
21	62	Z	100	50	49.5	0.5	1
39	80	X	100	50	49.6	0.4	0.8
39	80	Z	100	50	49.4	0.6	1.2
3	44	X	100	50	49.6	0.4	0.8
3	44	Z	100	50	49.8	0.2	0.4
1	87	X	10	5	4.9	0.1	2
1	87	Z	10	5	5	0	0
1	42	X	100	50	49.6	0.4	0.8
1	42	Z	100	50	49.7	0.3	0.6
11	42	X	100.50	50.2	40.3	9.9	19.8
11	42	Z	100.50	50.2	41.1	9.1	18.2
6	42	X	100.12	50.1	47.2	2.9	5.7
6	42	Z	100.12	50.1	46.2	3.9	7.7
6	107	X	50.25	25.1	22.2	2.92	11.64
6	107	Z	50.25	25.1	21.2	3.92	15.62
6	87	X	14.14	7.1	2.3	4.77	67.47
6	87	Z	14.14	7.1	1.4	5.67	80.20

3.1.6 Προσομοίωση 6: Μοντέλο με 1 πηγή και διάταξη με γεώφωνα στις γεωτρήσεις και στην επιφάνεια.

Το μοντέλο αυτό έχει τις ίδιες παραμέτρους και διαστάσεις με το μοντέλο της προσομοίωσης 5 με την διαφορά ότι το διάστημα δειγματοληψίας ορίστηκε με τροποποίηση του κώδικα σε 0.1ms για την μείωση των σφαλμάτων που οφείλονται στο διάστημα δειγματοληψίας και επηρεάζουν την διακριτική ικανότητα της μεθοδολογίας. Όσο μεγαλύτερο το διάστημα δειγματοληψίας τόσο μεγαλύτερα και τα σφάλματα. Τα γεώφωνα είναι τοποθετημένα σε γεωτρήσεις που απέχουν 20m μεταξύ τους (Σχήμα 3.8), με σκοπό να μελετηθεί αν η διαφοροποίηση της απόστασης επηρεάζει την ακρίβεια των χρόνων από την ετεροσυσχέτιση, σε σχέση με τους υπολογιζόμενους (Πίνακας 3.2)



Σχήμα 3.8 Διάταξη των στοιχείων στο μοντέλο για την 6η προσομοίωση.

Πίνακας 3.2: Σύγκριση υπολογιζόμενων χρόνων άφιξης και χρόνων από την συσχέτιση (X_{corr}) , για το μοντέλο του Σχήματος 3.8.

Η πηγή απέχει 100m από την 1η γεώτρηση και 20m απόσταση μεταξύ γεωτρήσεων							
Source Pos No	Receiver Pos No	Component	Distance	Analytical (ms)	X_{corr} (ms)	Diff (ms)	Error %
21	62	X	20	10	9.9	0.1	1
21	62	Z	20	10	9.7	0.3	3
39	80	X	20	10	9.8	0.2	2
39	80	Z	20	10	9.7	0.3	3
3	44	X	20	10	9.8	0.2	2
3	44	Z	20	10	9.9	0.1	1
1	42	X	20	10	9.8	0.2	2
1	42	Z	20	10	9.9	0.1	1
11	42	X	22.36	11.18	0.6	10.6	94.6
11	42	Z	22.36	11.18	1.3	9.9	88.4
6	42	X	20.62	10.31	7.3	3.0	29.2
6	42	Z	20.62	10.31	6.6	3.7	36.0
6	87	X	11.18	5.59	2.3	3.3	58.9
6	87	Z	11.18	5.59	1.4	4.2	75.0

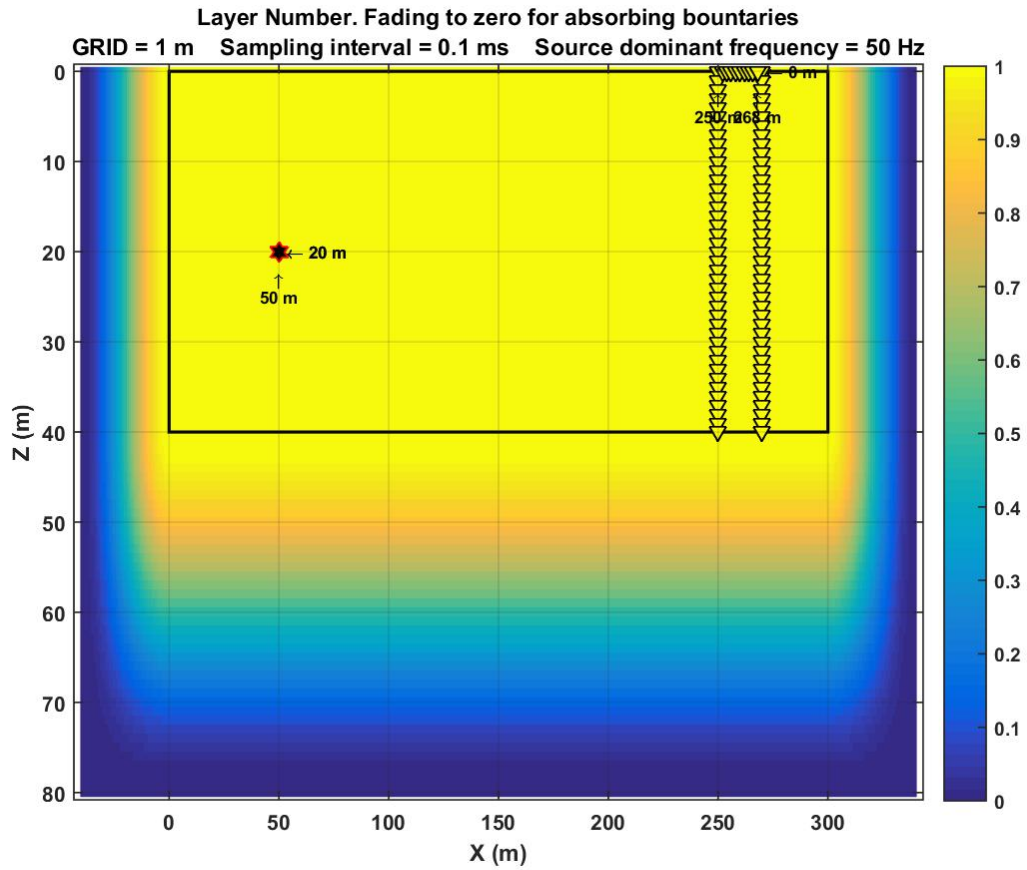
Στον παραπάνω Πίνακα (3.2) παρατηρείται ότι σε μη οριζόντια διάταξη παρατηρούνται μεγάλα σφάλματα που οφείλονται στο ότι η μεθοδολογία της ετεροσυσχέτισης επιλέγει μέγιστα που δεν ταυτίζονται με τις πρώτες αφίξεις στα γεώφωνα.

Παρατηρείται επίσης με τη μείωση του διαστήματος δειγματοληψίας μειώθηκαν και οι απόλυτες τιμές της διαφοράς (Diff) μεταξύ των αναλυτικών και των υπολογιζόμενων από την ετεροσυσχέτιση χρόνων. Ωστόσο, τα εκατοστιαία σφάλματα αυξήθηκαν αισθητά, γεγονός που οφείλεται στην μικρή απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων και κατ' επέκταση στον μικρότερο χρόνο άφιξης των σεισμικών κυμάτων από τις εικονικές πηγές έως τους δέκτες.

3.1.7 Προσομοίωση 7: Μοντέλο με 1 πηγή και διάταξη με γεώφωνα στις γεωτρήσεις και στην επιφάνεια.

Η εν λόγω προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με τις ίδιες παραμέτρους με το μοντέλο της προσομοίωσης 6 αλλά με το ανάπτυγμα των γεωφώνων της πλησιέστερης στην πηγή γεώτρησης να απέχει 200m από την πηγή (Σχήμα 3.9). Η απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων διατηρήθηκε 20m. Η απομάκρυνση της φυσικής πηγής από την πρώτη γεώτρηση (εικονικές πηγές) πραγματοποιήθηκε για να μελετηθεί αν υπάρχει επίδραση της καμπυλότητας του μετώπου κύματος, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη από την απόσταση του μετώπου κύματος από την

πηγή. Δηλαδή, το μέτωπο διάδοσης των σεισμικών κυμάτων είναι σφαιρικό κοντά στην πηγή, ενώ μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν επίπεδο μακριά της.



Σχήμα 3.9: Διάταξη των στοιχείων στο μοντέλο για την 7η προσομοίωση.

Πίνακας 3.3: Σύγκριση υπολογιζόμενων χρόνων άφιξης και χρόνων από την συσχέτιση(X_{corr}), για το μοντέλο του Σχήματος 3.9.

Η πηγή απέχει 200m από την 1η γεώτρηση και 20m απόσταση μεταξύ γεωτρήσεων							
Source Pos No	Receiver Pos No	Component	Distance	Analytical (ms)	X_{corr} (ms)	Diff (ms)	Error %
21	62	X	20	10	10	0	0
21	62	Z	20	10	10	0	0
39	80	X	20	10	10	0	0
39	80	Z	20	10	9.9	0.1	1
3	44	X	20	10	10	0	0
3	44	Z	20	10	10	0	0
1	42	X	20	10	10	0	0
1	42	Z	20	10	10	0	0
11	42	X	22.36	11.18	10.8	0.4	3.4
11	42	Z	22.36	11.18	1.6	9.6	85.7
6	42	X	20.62	10.31	7.8	2.5	24.3
6	42	Z	20.62	10.31	6.6	3.7	36.0
6	87	X	11.18	5.59	2.8	2.8	49.9
6	87	Z	11.18	5.59	1.6	4.0	71.4

Στον παραπάνω Πίνακα (3.3) παρατηρείται ότι με την αύξηση της απόστασης της σεισμικής πηγής από την διάταξη και την μείωση του διαστήματος δειγματοληψίας μειώνονται σημαντικά τα σφάλματα στα ενδεικτικά ζεύγη εικονικών πηγών-γεωφώνων που βρίσκονται στο ίδιο βάθος, αλλά και για τα ζεύγη με μη οριζόντια διάταξη, παρόλο που δεν είναι αποδεκτά τα σφάλματα σε αυτές τις περιπτώσεις.

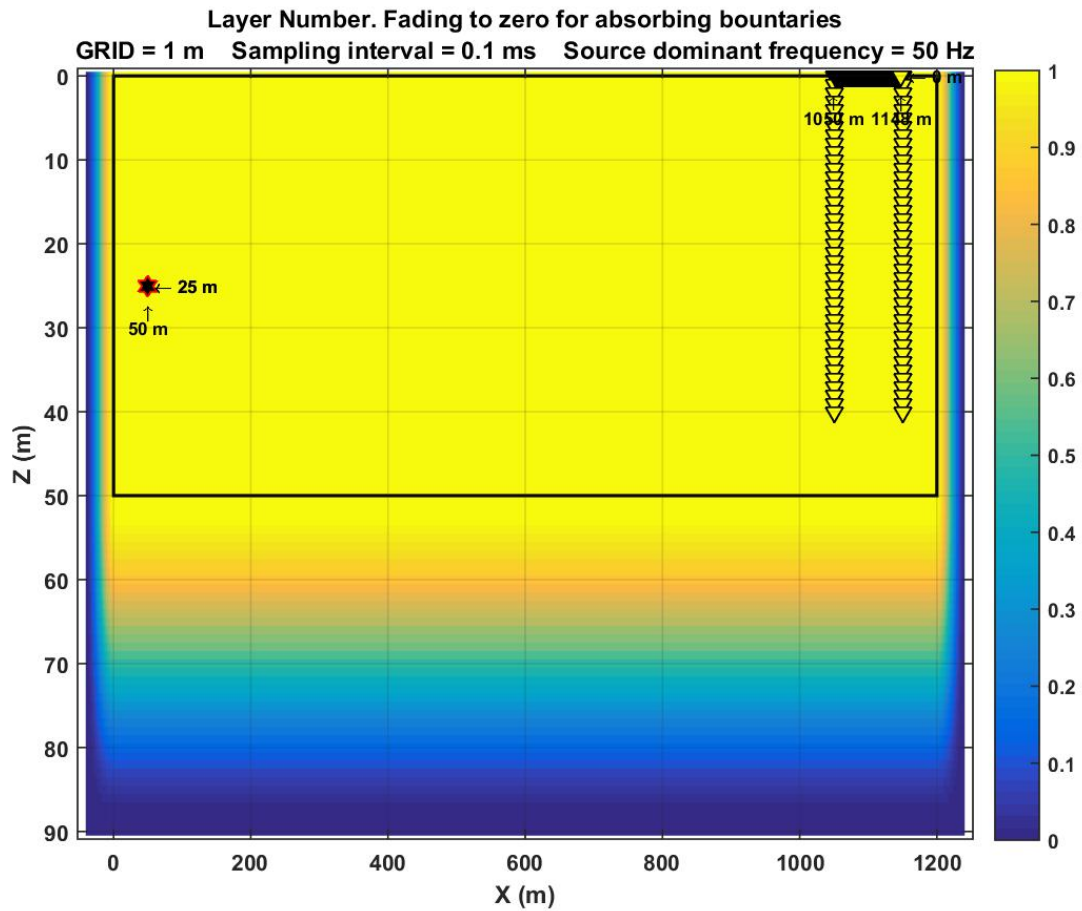
Παρατηρείται επίσης ότι, κατά κανόνα, τα σφάλματα στην κατακόρυφη (Z) συνιστώσα ταλάντωσης είναι μεγαλύτερα από αυτά στην οριζόντια συνιστώσα. Για το λόγο αυτό, παρακάτω θα μελετηθούν οι χρόνοι μόνο για τα ίχνη της οριζόντιας (X) συνιστώσας.

3.1.10 Προσομοίωση 8: Μοντέλο με 1 πηγή και διάταξη με γεώφωνα στις γεωτρήσεις και στην επιφάνεια.

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε είχε βάθος (Z) = 50m και μήκος (X) = 1200m. Το μέγεθος των κελιών ορίστηκε (GRID)= 1 m και το διάστημα δειγματοληψίας (Sampling Interval)= 0.1 ms .

Αποτελούταν από ένα σχηματισμό με πυκνότητα (ρ_1)= 2 gr/cm³ και ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων (V_{p1})=2000 m/s και (V_{s1})=1000 m/s. Ορίσαμε τον υπό μελέτη χώρο ανάμεσα σε 2 γεωτρήσεις με απόσταση 100m. Η πηγή τοποθετήθηκε στην θέση (Z,X) =(25, 50). Η κυρίαρχη συχνότητα ταλάντωσης της πηγής είναι f_{dom} = 50 Hz. Τα γεώφωνα τοποθετήθηκαν σε 2 κατακόρυφες γεωτρήσεις από την επιφάνεια μέχρι τα 40m βάθος με ισαπόσταση 1 m. Η απόσταση της πλησιέστερης γεώτρησης από την πηγή ορίστηκε στα 1000 m. Επίσης οριζόντιο ανάπτυσμα γεωφώνων τοποθετήθηκε κατά μήκος της ελεύθερης επιφάνειας από την μια έως την άλλη γεώτρηση με ισαπόσταση γεωφώνων 2 m. Συνολικά τοποθετήθηκαν 131 γεώφωνα. Ο χρόνος καταγραφής ορίστηκε στα 600 ms (Σχήμα 3.10).

Σε αυτό το μοντέλο, μετακινείται η διάταξη των δεκτών σε μεγάλη απόσταση από την πηγή για να είναι σχεδόν επίπεδα τα σεισμικά κύματα που φτάνουν, τόσο στα γεώφωνα-εικονικές πηγές, όσο και στα γεώφωνα δέκτες. Σκοπός επίσης ήταν να δημιουργηθεί ένα μοντέλο που να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, δηλαδή στις διαστάσεις ενός τεχνικού έργου, αλλά και να εξεταστεί η επίδραση της απόστασης μεταξύ των γεωτρήσεων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, χωρίς την ύπαρξη μεγάλων σφαλμάτων.



Σχήμα 3.10: Διάταξη των στοιχείων στο μοντέλο για την 8η προσομοίωση.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.4) παρουσιάζονται οι αναλυτικοί χρόνοι άφιξης των κυμάτων στα γεώφωνα της 2ης γεώτρησης αν η πηγή βρίσκονταν στις θέσεις των γεωφώνων της πρώτης γεώτρησης και συγκρίνεται με τον χρόνο που βρέθηκε από την ετεροσυσχέτιση των ιχνών στις αντίστοιχες θέσεις των γεωφώνων. Σε αυτή την περίπτωση, εκτός από τα γεώφωνα που βρίσκονται στο ίδιο βάθος με την εικονική πηγή (RSz), χρησιμοποιήθηκαν επίσης δέκτες που βρίσκονται τοποθετημένοι ± 1 m σε σχέση με το βάθος της εικονικής πηγής. Γενικότερα, η σχέση που περιγράφει την θέση των δεκτών στην 2^η γεώτρηση (RR) σε σχέση με την θέση των γεωφώνων-εικονικών πηγών (RS) της πρώτης γεώτρησης μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση:

$$RRx = RSx + bd \quad (3.1a)$$

$$RRz = RSz + Ri \quad (3.1b)$$

Όπου RRx και RSx η X συντεταγμένη του δέκτη και της εικονικής πηγής, αντίστοιχα, bd η απόσταση των γεωτρήσεων, RRz και RSz η Z συντεταγμένη του δέκτη και της εικονικής πηγής,

αντίστοιχα και $R_i = -2, -1, 0, +1, +2$. Αν δηλαδή το γεώφωνο-εικονική πηγή στην 1^η γεώτρηση βρίσκεται στη θέση $(R_{Sz}, R_{Sx}) = (20, 100)$ $b_d = 100$ και $R_i = [-1, 0, +1]$ τότε, για την εν λόγω εικονική πηγή αντιστοιχούνται 3 δέκτες στην 2^η γεώτρηση με συντεταγμένες $RR_x = [200, 200, 200]$ και $RR_z = [19, 20, 21]$.

Όπως παρατηρήθηκε σε προηγούμενες προσομοιώσεις, ζεύγη δεκτών που δεν βρίσκονται στο ίδιο βάθος παρουσιάζουν μεγάλα σφάλματα. Σκοπός του πειράματος αυτού ήταν να διαπιστωθεί αν σε μικρές γωνίες από τον οριζόντιο άξονα της θέσης της πηγής ($R_i = [-1, 0, +1]$), τα σφάλματα είναι μικρά και οι χρόνοι άφιξης είναι κοντά στις αναμενόμενες πρώτες αφίξεις.

Πίνακας 3.4: Σύγκριση υπολογιζόμενων χρόνων άφιξης και χρόνων από την συσχέτιση (X_{corr}), για το μοντέλο του Σχήματος 3.10.

Η πηγή απέχει 1000m από την 1η γεώτρηση και 100m απόσταση μεταξύ γεωτρήσεων							
Source Pos No	Receiver Pos No	Component	Distance	Analytical (ms)	Xcorr (ms)	Diff (ms)	Error %
21	61	X	100.005	50.0025	49.8	0.203	0.405
21	62	X	100	50	50	0.000	0.000
21	63	X	100.005	50.0025	50.2	-0.198	-0.395
39	79	X	100.005	50.0025	49.6	0.402	0.805
39	80	X	100	50	49.6	0.400	0.800
39	81	X	100.005	50.0025	49.6	0.402	0.805
3	43	X	100.005	50.0025	49.9	0.102	0.205
3	44	X	100	50	50.6	-0.600	-1.200
3	45	X	100.005	50.0025	49.8	0.203	0.405
1	87	X	10	5	4.9	0.100	2.000
1	42	X	100	50	49.6	0.400	0.800
11	42	X	100.50	50.2	40.3	9.949	19.800
6	42	X	100.12	50.1	47.2	2.862	5.718
6	107	X	50.25	25.1	22.2	2.925	11.641
6	87	X	14.14	7.1	2.3	4.770	67.468

3.3 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΣΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Η μέθοδος της Σεισμικής Τομογραφίας βασίζεται στην σύγκριση των πειραματικών χρόνων πρώτων αφίξεων (που προέκυψαν από τις πρώτες αφίξεις των καταγραφών ή αντίστοιχα από την ετεροσυσχέτιση) και των θεωρητικά υπολογισμένων χρόνων πρώτων αφίξεων που προκύπτουν από ένα αρχικό δισδιάστατο εδαφικό μοντέλο. Τροποποιώντας επαναληπτικά το αρχικό εδαφικό μοντέλο, πραγματοποιείται η «ταύτιση» (στα όρια κάποιου αποδεκτού σφάλματος) των συγκρινόμενων χρόνων πρώτων αφίξεων (δρομοχρονικά διαγράμματα). Το τελικό εδαφικό μοντέλο που προκύπτει (δισδιάστατη κατανομή της σεισμικής ταχύτητας στο υπέδαφος), θεωρείται ότι απεικονίζει την πραγματική κατανομή της σεισμικής ταχύτητας στο υπέδαφος, κάτω από την σεισμική γραμμή μελέτης. Έτσι, απαραίτητη προϋπόθεση για την λειτουργία της

μεθόδου είναι η εισαγωγή από το χρήστη ενός αρχικού μοντέλου βάθους και των αντίστοιχων σεισμικών ταχυτήτων των στρωμάτων. Στο λογισμικό Plotrefa κατά την επεξεργασία των πρώτων αφίξεων με τη μέθοδο της Σεισμικής Τομογραφίας, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσει ως αρχικό μοντέλο, το μοντέλο βάθους και τις σεισμικές ταχύτητες που προέκυψαν από προγενέστερη επεξεργασία ή κάποιο οριζόντια στρωματωμένο μέσο του οποίου η ταχύτητα αυξάνεται με το βάθος.

Για να είναι δυνατή η εισαγωγή των δεδομένων (πρώτων αφίξεων) στο λογισμικό Plotrefa, δημιουργήθηκε σε περιβάλλον Matlab ο αλγόριθμος **PSV2vsTOM(VX,Receivers,Sn,Rn)**. Ο αλγόριθμος αυτός έχει ως δεδομένα εισόδου τις παραμέτρους:

- **VX:** (Είναι μια μεταβλητή κελί (cell) που περιλαμβάνει τόσα κελιά όσα και το πλήθος των πηγών και κάθε κελί περιλαμβάνει πίνακες με τις χρονοσειρές της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας ταλάντωσης των σωματιδίων σε κάθε δέκτη. Το πλήθος των στηλών και των γραμμών κάθε πίνακα ισούται με το πλήθος των δεκτών και το δειγμάτων στον χρόνο)
- **Receivers:** (Είναι μια μεταβλητή δομής (structure) που περιέχει δεδομένα για την διάταξη των δεκτών μεταξύ τους αλλά και ως προς το εδαφικό μοντέλο και πίνακες κελιά που περιλαμβάνουν τόσα κελιά όσα και το πλήθος των πηγών, που περιέχουν τις συντεταγμένες των δεκτών σε μέτρα αλλά και ως προς τους κόμβους του μοντέλου)
- **Sn:** (Θέσεις εικονικών πηγών σύμφωνα με το Σχήμα 3.7, στον αλγόριθμο επιλέχθηκαν οι δέκτες-εικονικές πηγές 3 ως 39)
- **Rn:** (Θέσεις δεκτών που επιλέχθηκαν για ετεροσυσχέτιση με τις εικονικές πηγές, επιλέγοντας τους δέκτες σε θέσεις σε οριζόντια απόσταση από τις πηγές και σε ± 2 θέσεις στον κάθετο άξονα ή και στην επιφάνεια, θέσεις 43 ως 131 όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 3.7)

και ως δεδομένα εξόδου, αποθηκεύει αρχείο συγκεκριμένης διαμόρφωσης (format *.vs), το οποίο αποτελεί το αρχείο εισόδου στο λογισμικό Plotrefa. Ο εν λόγω αλγόριθμος πραγματοποιεί ετεροσυσχέτιση μεταξύ των σεισμικών ιχνών που ορίζονται (στη μεταβλητή Sn) ως εικονικές πηγές με τα αντίστοιχα ίχνη που ορίζονται (στη μεταβλητή Rn) ως δέκτες. Ως χρόνος πρώτης άφιξης θεωρείται ο χρόνος που αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή ετεροσυσχέτισης αυτών των σεισμικών ιχνών.

Επειδή το εν λογισμικό Plotrefa μπορεί να διαχειριστεί μόνο επιφανειακές μετρήσεις (δέκτες μόνο στην επιφάνεια και πηγές στην επιφάνεια ή/και σε κάποιο βάθος), όλοι οι δέκτες τοποθετήθηκαν στην επιφάνεια του μοντέλου ενώ όλες οι πηγές σε συγκεκριμένο βάθος, το

οποίο αντιστοιχεί στην απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το τελικό αποτέλεσμα (μοντέλο ταχυτήτων) να εμφανίζεται περιστραμμένο αριστερόστροφα κατά 90 μοίρες).

Αρχικά, ορίστηκαν οι παράμετροι του αρχικού μοντέλου βάθους (Σχήμα 3.11). Η δημιουργία του αρχικού μοντέλου βάθους πραγματοποιείται ακολουθώντας τα βήματα: Tomography → Generate initial model.

- Use layered model as initial model: Η επιλογή αυτή πρέπει να είναι ενεργοποιημένη εφόσον υπάρχει ήδη κάποιο μοντέλο ταχύτητας (π.χ. από άλλης μορφής επεξεργασία) και επιθυμούμε το μοντέλο αυτό να χρησιμοποιηθεί ως αρχικό μοντέλο.
- Minimum velocity: Αν η προηγούμενη επιλογή είναι ενεργοποιημένη τότε το λογισμικό θα αντικαταστήσει αυτόματα την αναγραφόμενη στο κελί τιμή με την μικρότερη ταχύτητα του μοντέλου βάθους. Διαφορετικά, θα λάβει υπόψη του την ορισμένη από το χρήστη τιμή.

Initial model for tomography (smooth velocity model)

☒ Use layered model as initial model

OK

Cancel

Depth to top of lowest layer 95 m

Minimum velocity 1000 m /sec

Maximum velocity 1000 m /sec

of layers 20

Elevation at the bottom left of the model -100 m

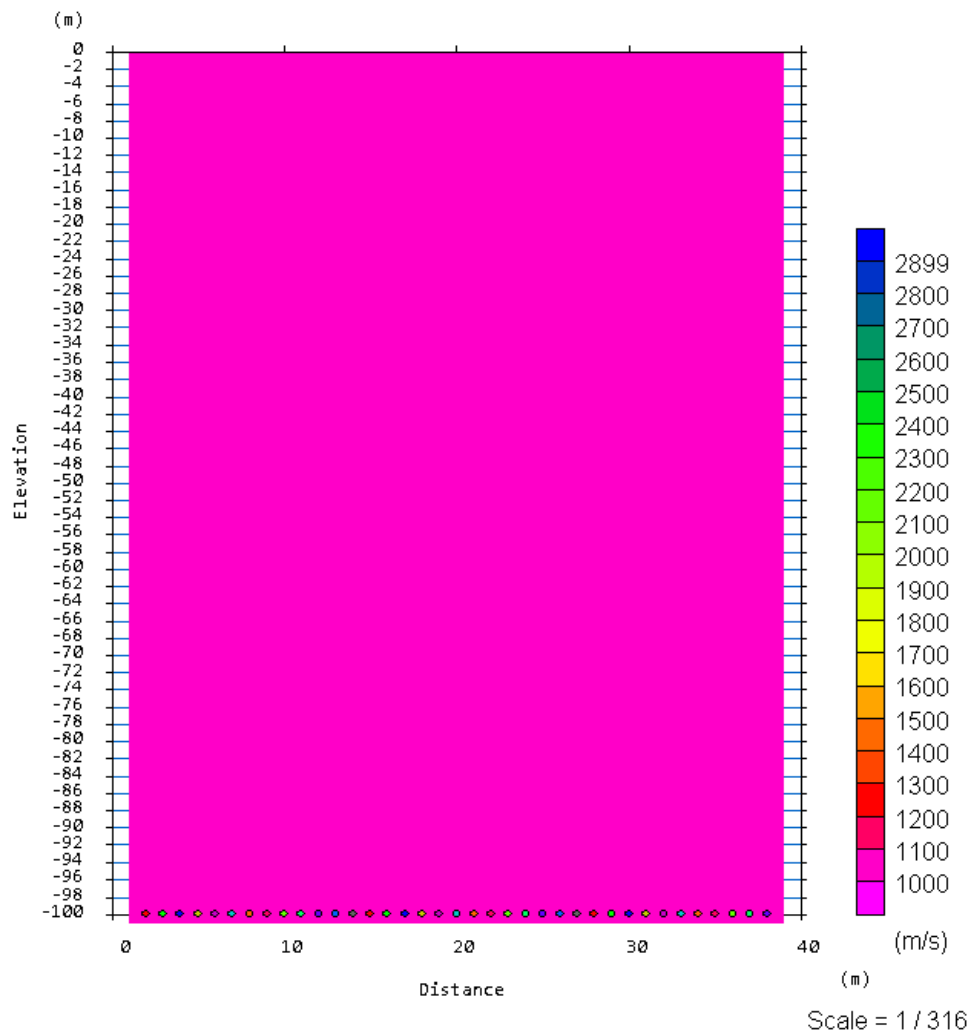
Elevation at the bottom right of the model -100 m

Σχήμα 3.11 : Ορισμός των παραμέτρων του αρχικού εδαφικού μοντέλου.

- Maximum velocity: Αντίστοιχο με την επιλογή «Minimum velocity» για την μέγιστη παρατηρούμενη ταχύτητα. Αν η Min και η Max ταχύτητα είναι ίδιες το μέσο θεωρείται ομοιογενές.

- # of layers: Αριθμός των οριζόντιων στρωμάτων στα οποία θα χωρίσει (αυτόματα) το λογισμικό το αρχικό μοντέλο. Επιλέχθηκαν 20 στρώματα.
- Elevation at the bottom left of the model: Ορίζεται το υψόμετρο της κάτω αριστερής πλευράς του μοντέλου.
- Elevation at the bottom right of the model: Αντίστοιχα, ορίζεται το υψόμετρο της κάτω δεξιάς πλευράς του μοντέλου.
- Depth to top of lowest layer: Ορίζεται το βάθος (από την επιφάνεια του μοντέλου) στο οποίο απαντάται το τελευταίο στρώμα.

Στο Σχήμα 3.12 απεικονίζεται το αρχικό μοντέλο (ομοιογενές μέσο με ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών σεισμικών κυμάτων ίση με 1000 m/s)



Σχήμα 3.12: Αρχικό μοντέλο ταχυτήτων (ομοιογενές μέσο με ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών σεισμικών κυμάτων ίση με 1000 m/s). Ο οριζόντιος άξονας (Distance) αντιστοιχεί στην πραγματικότητα στο βάθος από την επιφάνεια, ενώ ο κατακόρυφος (Elevation), στην απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων. Με χρωματιστούς κύκλους απεικονίζονται οι θέσεις των εικονικών πηγών.

Για να πραγματοποιήσουμε την αντιστροφή των σεισμικών δεδομένων με την μέθοδο της Σεισμικής Τομογραφίας επιλέγουμε: Tomography → Inversion (set parameters manually). Οι παράμετροι ορίζονται όπως στο Σχήμα 3.13.

The image shows a software window titled "Automatic reconstruction" with a close button (X) in the top right corner. The window contains several input fields and checkboxes for configuring the inversion process. On the right side of the window, there are "OK" and "Cancel" buttons.

- Number of iterations:** A text box containing the value "10".
- Option:** A large rectangular area containing several sub-sections:
 - Number of nodes:** A text box containing the value "8".
 - Horizontal smoothing:** A sub-section containing:
 - Number of smoothing passes:** A text box containing the value "0".
 - Smoothing weight:** A text box containing the value "0.5", followed by the range "(0.3 to 1.00)".
 - Vertical smoothing:** A sub-section containing:
 - Number of smoothing passes:** A text box containing the value "0".
 - Smoothing weight:** A text box containing the value "0.5", followed by the range "(0.3 to 1.00)".
 - Number of layers to be smoothed:** A text box containing the value "5".
 - Minimum velocity:** A text box containing "1000" followed by the unit "m /sec".
 - Maximum velocity:** A text box containing "3000" followed by the unit "m /sec".
 - Velocity does not increase with depth:** A checked checkbox.
 - With constraint:** An unchecked checkbox.

Σχήμα 3.13: Επιλογή των παραμέτρων αντιστροφής.

- **Number of iterations:** Αριθμός των επαναλήψεων για την τροποποίηση του αρχικού μοντέλου. Επιλέχθηκαν 10 επαναλήψεις που θεωρούνται ικανοποιητικές.
- **Number of nodes:** Αριθμός των κόμβων κάθε κελιού. Κάθε πλευρά ενός κελιού του αρχικού μοντέλου διαιρείται με την χρήση κόμβων προκειμένου να διέρχονται από αυτούς οι υπολογισμένες σεισμικές ακτίνες, κατά την επίλυση του ευθέως προβλήματος.

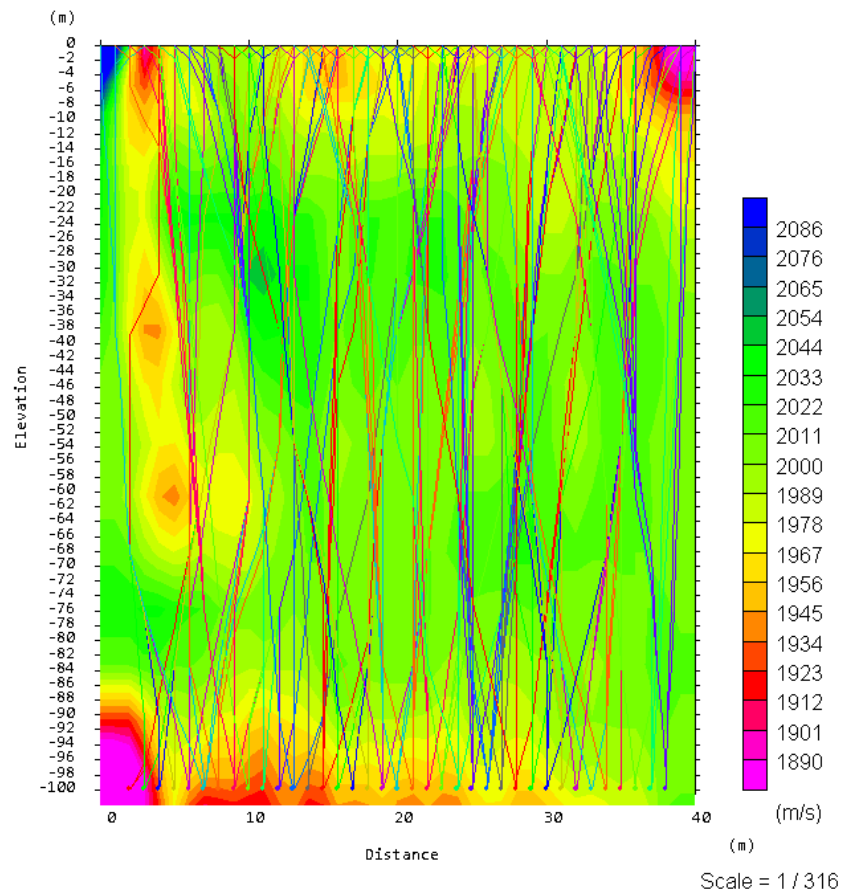
Όσο περισσότεροι κόμβοι χρησιμοποιηθούν, τόσο πιο αξιόπιστα θα είναι τα αποτελέσματα της αντιστροφής, σε βάρος βέβαια του υπολογιστικού χρόνου. Επιλέχθηκαν 8 κόμβοι.

- Horizontal smoothing: Μετά από κάθε επανάληψη, το λογισμικό εφαρμόζει κατά την οριζόντια διεύθυνση φίλτρα στις υπολογισμένες ταχύτητες, προκειμένου να εξομαλύνει τυχόν πολύ μεγάλες διαφορές ταχυτήτων σε γειτονικά κελιά.
- Vertical smoothing: Ορισμός παραμέτρων φίλτρου εξομάλυνσης για την κατακόρυφη διεύθυνση
- Minimum velocity: Εισαγωγή της μικρότερης ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων που παρατηρείται στην περιοχή μελέτης (1000 m/s).
- Maximum velocity: Εισαγωγή της μεγαλύτερης ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων που παρατηρείται στην περιοχή μελέτης (3000 m/s).
- Velocity does not increase with depth: Χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όταν η ταχύτητα δεν αυξάνει με το βάθος. Κατά την επεξεργασία η επιλογή αυτή ήταν ενεργοποιημένη.
- With constraint: Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει περιορισμούς στην διαδικασία αντιστροφής για τον προσδιορισμό του μοντέλου σε κάθε επανάληψη. Στην περίπτωση αυτή, η επιλογή παραμένει απενεργοποιημένη.

Μετά το τέλος της διαδικασίας αντιστροφής εμφανίζεται στην οθόνη το τελικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα ($RMSE=0,295907$ ms), το δρομοχρονικό διάγραμμα μεταξύ πειραματικών και υπολογισμένων χρόνων διαδρομής των πρώτων αφίξεων, καθώς επίσης απεικονίζεται και το τελικό εδαφικό μοντέλο. (Σχήμα 3.14)

No editing

Smooth model : # of layers = 18



Σχήμα 3.14: Τελικό μοντέλο ταχύτητας για τα δεδομένα της προσομοίωσης 8. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 0,295907 ms. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος από την επιφάνεια ενώ ο κατακόρυφος στην απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων. Οι χρωματισμένες τεθλασμένες γραμμές αντιστοιχούν στις σεισμικές ακτίνες. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων.

Στο Σχήμα 3.17 απεικονίζεται το τελικό μοντέλο ταχύτητας που προέκυψε από την μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας, με τις πρώτες αφίξεις που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο της ετεροσυσχέτισης για την 8^η προσομοίωση, δηλαδή για ομοιογενές σχηματισμό με ταχύτητα διάδοσης 2000 m/s (Σχήμα 3.10). Στο μοντέλο αυτό, τα σφάλματα υπολογισμού της ταχύτητας κυμαίνονται από 1 έως 5%, με τα μεγαλύτερα από αυτά να παρατηρούνται κοντά στις πηγές και τους δέκτες, αλλά και πλησίον της ελεύθερης επιφάνειας (αριστερή πλευρά του μοντέλου). Οι μικρές διακυμάνσεις στην ταχύτητες πιθανόν οφείλονται στην διακριτοποίηση του μοντέλου αλλά και σε τυχόν ανακλάσεις στην ελεύθερη επιφάνεια του μοντέλου, καθώς δεν έχουν εισαχθεί απορροφητικά όρια στην επιφάνεια αυτή.

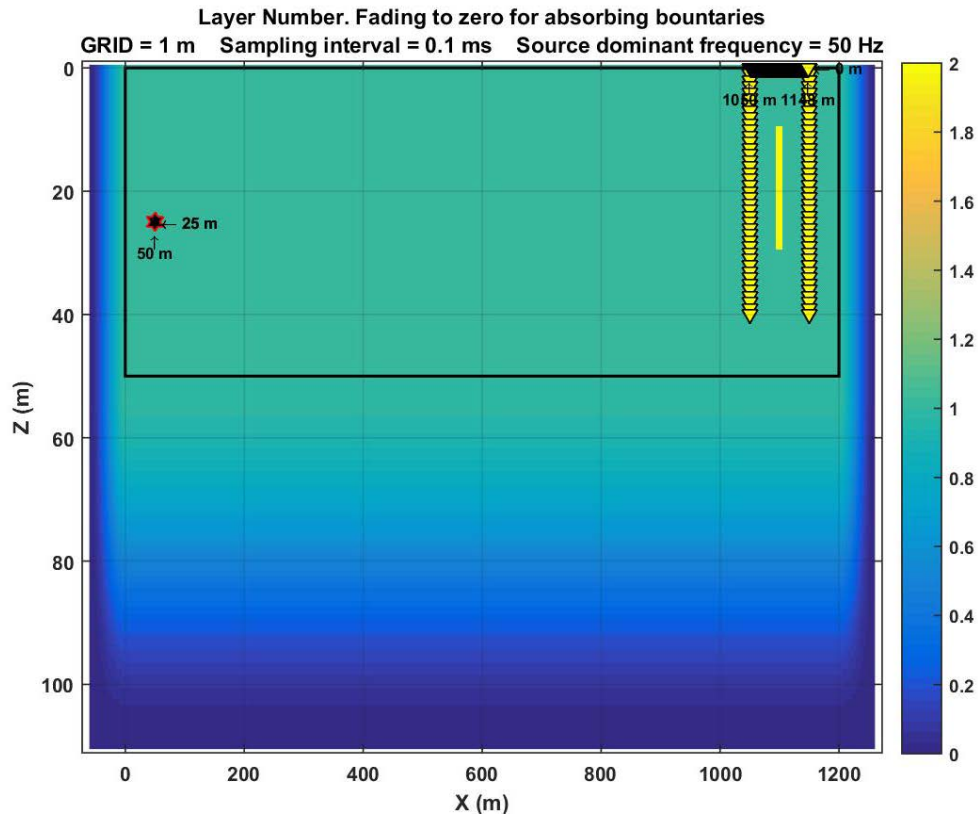
ΚΕΦΑΛΙΟ 4: ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕ ΔΕΚΤΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

4.1 ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΤΕΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Σε αυτό το υποκεφάλαιο περιγράφονται οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν σε μοντέλα που η διάταξη των δεκτών ήταν μεταξύ δύο γεωτρήσεων και χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της ετεροσυσχέτισης των σεισμικών ιχνών, με αλλαγές στην διαστρωμάτωση και τις διαστάσεις του μοντέλου ώστε να δοκιμαστεί η μέθοδος που αναπτύχθηκε.

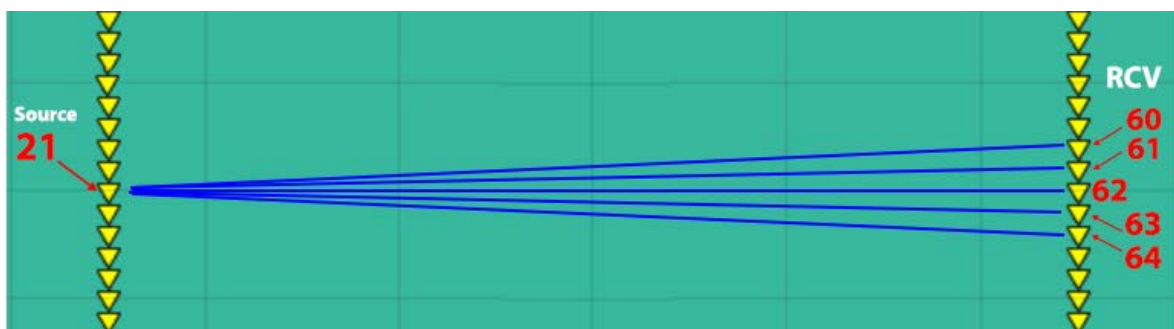
4.1.1 Προσομοίωση 9: Μοντέλο με 1 πηγή και διάταξη με γεώφωνα στις γεωτρήσεις και στην επιφάνεια και ορθογώνιο σώμα

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε είχε βάθος (Z) = 50m και μήκος (X) = 1200m. Το μέγεθος των κελιών ορίστηκε (GRID)= 1 m και το διάστημα δειγματοληψίας (Sampling Interval)= 0.1 ms . Αποτελούταν από ένα σχηματισμό με πυκνότητα (ρ_1)= 2 gr/cm³ και ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων (V_{p1})=2000 m/s και (V_{s1})=1000 m/s. Ορίσαμε τον υπό μελέτη χώρο ανάμεσα σε 2 γεωτρήσεις με απόσταση 100m και ένα σώμα με διαστάσεις (Z,X = 20,10), πυκνότητα του σχηματισμού (ρ_2)= 2.2 gr/cm³ και ταχύτητες διάδοσης (V_{p2})=3000 m/s και (V_{s2})=1500 m/s. (Σχήμα 4.1). Η πηγή τοποθετήθηκε στην θέση (Z,X) =(25, 50). Η κυρίαρχη συχνότητα της πηγής είναι f_{dom} = 50 Hz. Τα γεώφωνα τοποθετήθηκαν στις κατακόρυφες γεωτρήσεις από την επιφάνεια μέχρι τα 40m βάθος με ισαπόσταση 1 m και απόσταση της αριστερής γεώτρησης 1000 m από την πηγή. Επίσης τοποθετήθηκε οριζόντιο ανάπτυγμα γεωφώνων στην επιφάνεια από την μια έως την άλλη γεώτρηση με ισαπόσταση γεωφώνων 2 m. Συνολικά τοποθετήθηκαν 131 γεώφωνα και ο χρόνος καταγραφής ήταν 600 ms.



Σχήμα 4.1: Διάταξη των στοιχείων στο μοντέλο για την 9^η προσομοίωση

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.1) παρουσιάζονται οι υπολογιζόμενοι χρόνοι άφιξης των κυμάτων στα γεώφωνα της 2ης γεώτρησης αν η πηγή βρίσκονταν στις θέσεις των γεωφώνων της πρώτης γεώτρησης και συγκρίνεται με τον αντίστοιχο χρόνο που βρέθηκε από την ετεροσυσχέτιση των ιχνών στις αντίστοιχες θέσεις των γεωφώνων. Επίσης γίνεται υπολογισμός και σύγκριση των χρόνων άφιξης και για τα γεώφωνα της δεξιάς γεώτρησης που βρίσκονται ± 1 θέση ($R_i = [-1, 0, +1]$) (Σχήμα 4.3, Πίνακας 4.1), αλλά και ± 2 θέσεις ($R_i = [-2, -1, 0, +1, +2]$) σε σχέση με την κατακόρυφη θέση της εικονικής πηγής (Σχήμα 4.4, Πίνακας 4.2).



Σχήμα 4.2: Παράδειγμα επιλογής θέσης εικονικής πηγής και γεωφώνων που επιλέγονται για ετεροσυσχέτιση.

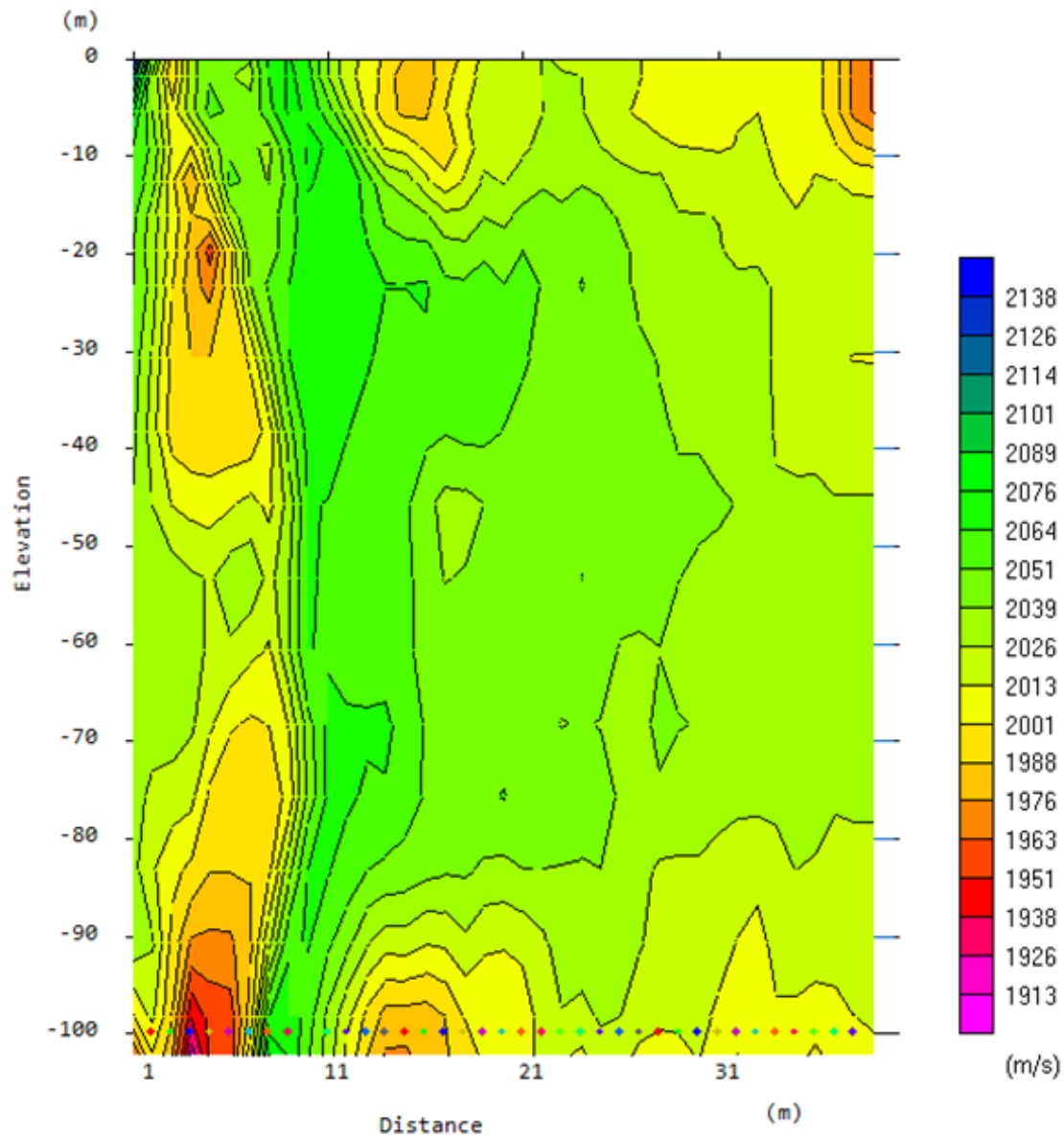
Πίνακας 4.1: Σύγκριση αναλυτικών χρόνων άφιξης και υπολογισμένων χρόνων από την ετεροσυσχέτιση (X_{corr}) για το μοντέλο του Σχήματος 4.1. Παρατίθενται ενδεικτικά 3 γεώφωνα-εικονικές πηγές (αριστερή γεώτρηση) με τους αντίστοιχους δέκτες (δεξιά γεώτρηση) για $R_i = [-1, 0, +1]$.

Η πηγή απέχει 1000m από την 1η γεώτρηση και 100m απόσταση μεταξύ γεωτρήσεων, Με 2ο σώμα RN +1 -1							
Source Pos No	Receiver Pos No	Component	Distance	Analytical (ms)	Xcorr (ms)	Diff (ms)	Error %
3	43	X	100.005	50.0025	48.8	1.203	2.405
	44	X	100	50.0000	48.9	1.100	2.200
	45	X	100.005	50.0025	49.7	0.302	0.605
21	61	X	100.005	48.3358	48.7	-0.364	-0.753
	62	X	100	48.3333	49.1	-0.767	-1.586
	63	X	100.005	48.3358	49.4	-1.064	-2.202
39	79	X	100.005	50.0025	49.3	0.703	1.405
	80	X	100	50.0000	49.5	0.500	1.000
	81	X	100.005	50.0025	49.7	0.302	0.605

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι αναλυτικοί και οι υπολογιζόμενοι από την ετεροσυσχέτιση χρόνοι άφιξης των κυμάτων στα γεώφωνα με $R_i = [-1, 0, +1]$ (Εξ. 3.1) της 2ης γεώτρησης. Το μοντέλο της προσομοίωσης 9 έχει την ίδια διάταξη και διαστάσεις με αυτό της προσομοίωσης 8, με τη διαφορά ότι στο μοντέλο του Σχήματος 4.1 έχει προστεθεί ένα σώμα (μεγαλύτερης ταχύτητας από αυτήν του ομοιογενή ημιχώρου) ανάμεσα στις γεωτρήσεις παρατήρησης. Παρατηρούνται μεγαλύτερα σφάλματα με την εισαγωγή του σχηματισμού λόγω του ότι οι σεισμικές ακτίνες περνούν από ένα σχηματισμό μεγαλύτερης ταχύτητας. Στα γεώφωνα κοντά στην επιφάνεια παρατηρούνται μεγαλύτερα σφάλματα καθώς δεν έχουν προστεθεί απορροφητικά όρια στην επιφάνεια του μοντέλου και στα γεώφωνα σε μεγάλο βάθος μικρότερα καθώς οι σεισμικές ακτίνες δεν διασχίζουν τον σχηματισμό με την μεγαλύτερη ταχύτητα.

Στο Σχήμα 4.3 απεικονίζεται η σεισμική τομή που προέκυψε από την επεξεργασία των χρόνων άφιξης, οι οποίοι υπολογίστηκαν από την ετεροσυσχέτιση των σεισμικών ιχνών, με την μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας και το λογισμικό Plotrefa. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα δεν είναι τα αναμενόμενα, καθώς το σώμα με την ταχύτητα των 3000m/s δεν απεικονίζεται στην σεισμική τομή. Οι κυριότεροι λόγοι για την αδυναμία της μεθοδολογίας να απεικονίσει το εν λόγω σώμα είναι: 1) Τα σχετικά υψηλά σφάλματα υπολογισμού των χρόνων άφιξης των κυμάτων με την μέθοδο της ετεροσυσχέτισης είναι στην ίδια τάξη μεγέθους με την διαφοροποίηση του χρόνου άφιξης λόγω του σώματος. Δηλαδή, οι αναλυτικοί χρόνοι άφιξης με και χωρίς το σώμα είναι 48.33ms και 50ms, αντίστοιχα (διαφορά 1.67ms), ενώ οι προσδιοριζόμενοι χρόνοι άφιξης από την ετεροσυσχέτιση έχουν σφάλματα που κυμαίνονται από 0.3 έως 1.2ms. 2) Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.1.6, υπάρχει εγγενής αδυναμία της μεθοδολογίας της σεισμικής τομογραφίας στον εντοπισμό της θέσης λεπτής λωρίδας μικρής ή μεγάλης ταχύτητας που διασχίζεται κατά πλάτος από τις σεισμικές ακτίνες. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την τοποθέτηση συμπληρωματικών γεωφώνων στην επιφάνεια της γης (Ivansson, 1986).

Στον Πίνακα 4.2 απεικονίζονται οι αναλυτικοί και οι υπολογιζόμενοι από την ετεροσυσχέτιση χρόνοι άφιξης των κυμάτων στα γεώφωνα με $Ri = [-2, -1, 0, +1, +2]$ (Εξ. 3.1) της 2ης γεώτρησης.. Τα μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται, κατά κανόνα, στα γεώφωνα με μεγαλύτερη γωνία, όπως παρατηρήθηκε και σε προηγούμενα μοντέλα.



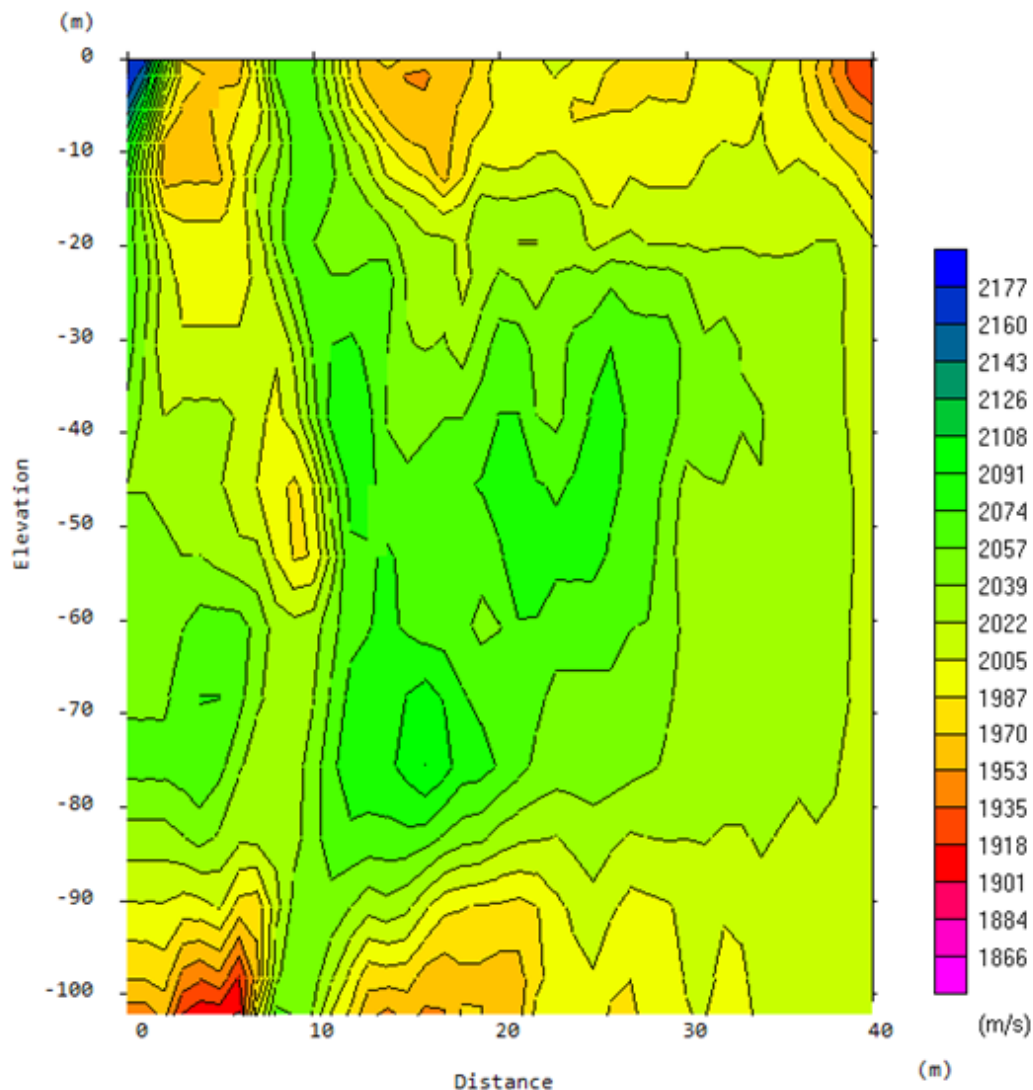
Σχήμα 4.3: Τελικό μοντέλο ταχύτητας για τα δεδομένα την προσομοίωσης 9 ($Ri = [-1, 0, +1]$). Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος από την επιφάνεια ενώ ο κατακόρυφος στην απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων.

Πίνακας 4.2: Σύγκριση αναλυτικών χρόνων άφιξης και υπολογισμένων χρόνων από την ετεροσυσχέτιση (X_{corr}) για το μοντέλο του Σχήματος 4.1. Παρατίθενται ενδεικτικά 3 γεωφωνα-εικονικές πηγές (αριστερή γεώτρηση) με τους δέκτες με $Ri = [-2, -1, 0, +1, +2]$ (Εξ. 3.1) της 2ης γεώτρησης.

Η πηγή απέχει 1000m από την 1η γεώτρηση και 100m απόσταση μεταξύ γεωτρήσεων, Με 2ο σώμα RN +2 -2							
Source Pos No	Receiver Pos No	Component	Distance	Analytical (ms)	Xcorr (ms)	Diff (ms)	Error %
	60	X	100.02	48.3433	48.5	-0.157	-0.324
	61	X	100.005	48.3358	48.7	-0.364	-0.753
21	62	X	100	48.3333	49.1	-0.767	-1.586
	63	X	100.005	48.3358	49.4	-1.064	-2.202
	64	X	100.02	48.3433	49.7	-1.357	-2.806
	78	X	100.02	50.0100	49.1	0.910	1.820
	79	X	100.005	50.0025	49.3	0.703	1.405
39	80	X	100	50.0000	49.5	0.500	1.000
	81	X	100.005	50.0025	49.7	0.302	0.605
	82	X	100.02	50.0100	49.9	0.110	0.220
	40	X	100.02	50.0100	48.1	1.910	3.819
	43	X	100.005	50.0025	48.8	1.203	2.405
3	44	X	100	50.0000	48.9	1.100	2.200
	45	X	100.005	50.0025	49.7	0.302	0.605
	46	X	100.02	50.0100	49.8	0.210	0.420

Παρόλο που στην σεισμική τομογραφία χρησιμοποιήθηκαν περισσότερα δεδομένα με την ετεροσυσχέτιση γεωφώνων σε περισσότερες θέσεις τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στο τελικό μοντέλο του Σχήματος 4.4 δεν είναι ικανοποιητικά καθώς και σε αυτή την περίπτωση δεν είναι εμφανής στην σεισμική τομή η ύπαρξη του σώματος με ταχύτητα 3000 m/s.

Λόγω του ότι ο συνδυασμός του υπολογισμού των χρόνων άφιξης των σεισμικών κυμάτων μέσω της ετεροσυσχέτισης των ιχνών και της επεξεργασίας των χρόνων αυτών με την μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας δεν δίνει αναμενόμενα αποτελέσματα στα μοντέλα με λεπτό σώμα ανάμεσα στις γεωτρήσεις παρατήρησης, για την περαιτέρω μελέτη της μεθοδολογίας θα ακολουθήσουν μοντέλα με οριζόντια στρωματογραφία.



Σχήμα 4.4: Τελικό μοντέλο ταχύτητας για τα δεδομένα την προσομοίωσης $9(Ri = [-2, -1, 0, +1, +2])$. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος από την επιφάνεια ενώ ο κατακόρυφος στην απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων.

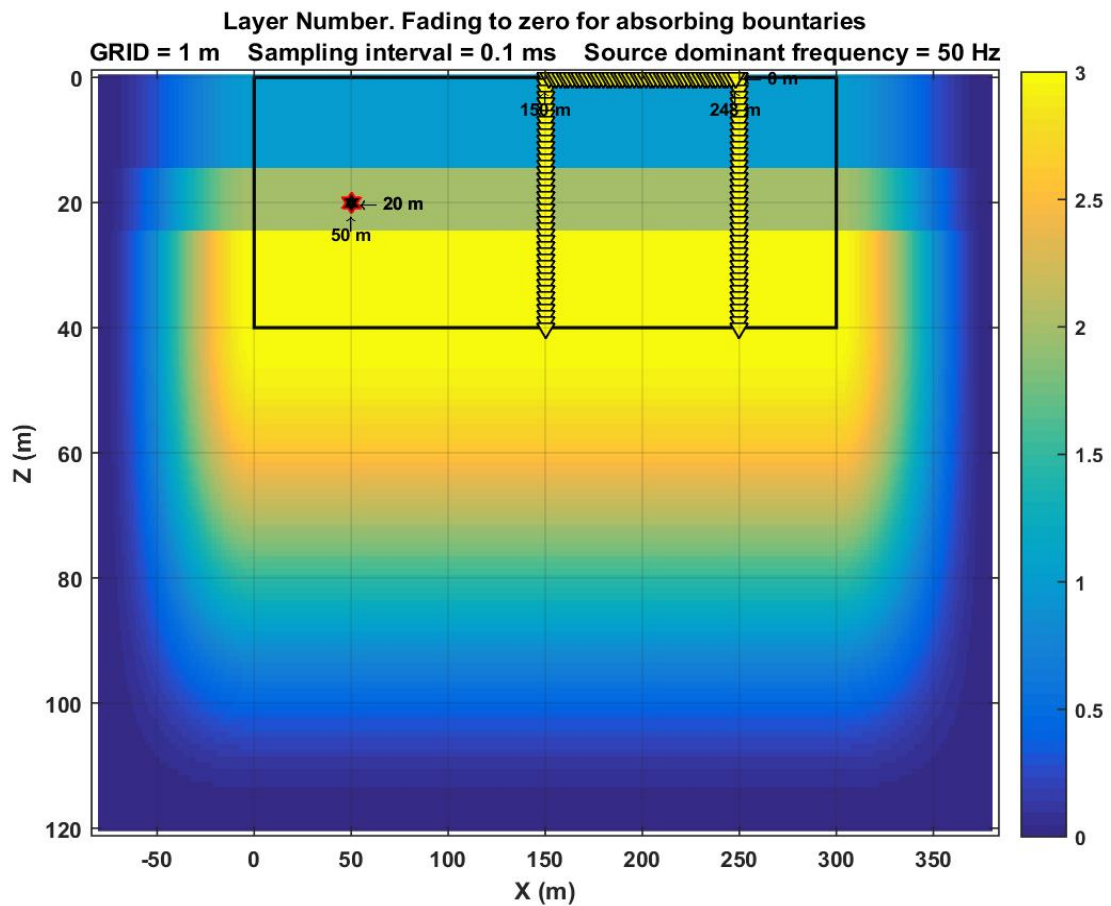
4.1.2 Προσομοίωση 10: Μοντέλο 300 x 40m με οριζόντια στρώματα, 1 πηγή και διάταξη με γεώφωνα στις γεώτρησεις και στην επιφάνεια.

Σε αυτή την προσομοίωση αποφασίστηκε η αλλαγή του εδαφικού μοντέλου και η δοκιμή της μεθοδολογίας σε μοντέλο με 3 οριζόντια στρώματα. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε είχε βάθος (Z) = 40m και μήκος (X) = 300m. Το μέγεθος των κελιών ορίστηκε (GRID)=1m και το διάστημα δειγματοληψίας (Sampling Interval)= 0.1 ms .

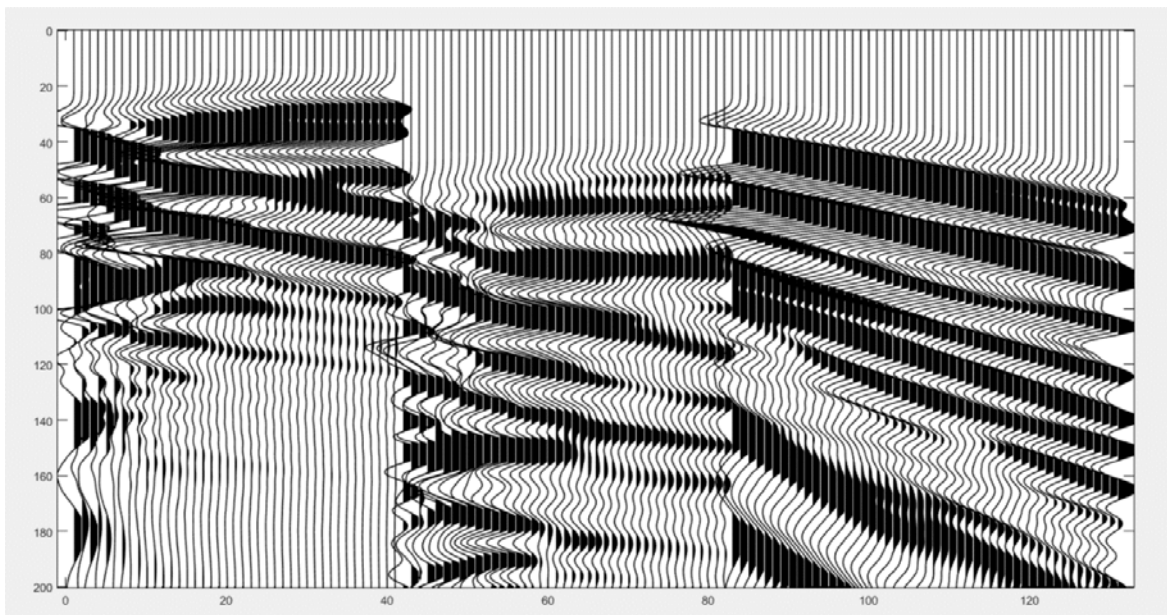
Αποτελούνταν από τρία στρώματα όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 4.5. Το επιφανειακό στρώμα έχει πυκνότητα (ρ_1)= 2 gr/cm³ και ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων (V_{p1})=2000 m/s και (V_{s1})=1000 m/s. Το ενδιάμεσο στρώμα, έχει πυκνότητα σχηματισμού (ρ_2)= 2.3 gr/cm³ και

ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων (V_{p2})=3000 m/s και (V_{s2})=1500 m/s. Τέλος, το βαθύτερο στρώμα έχει πυκνότητα (ρ_3)= 2.5 gr/cm³ και ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων (V_{p3})=4000 m/s και (V_{s3})=2000 m/s. Οι πηγή τοποθετήθηκε στη θέση (Z,X = 20,50) με κυρίαρχη συχνότητα f_{dom} = 50 Hz (Σχήμα 4.5), ενώ ορίστηκαν επίσης 2 κατακόρυφες γεωτρήσεις με την πλησιέστερη να απέχει 100 m από την πηγή και την μεταξύ τους απόσταση ίση με 100m.

Τα γεώφωνα τοποθετήθηκαν, τόσο στις 2 κατακόρυφες γεωτρήσεις από την επιφάνεια μέχρι τα 40m βάθος σε ισαποστάσεις του 1 m, όσο στην επιφάνεια από την μια έως την άλλη γεώτρηση με ισαπόσταση γεωφώνων 2 m. Συνολικά τοποθετήθηκαν 131 γεώφωνα, ενώ ο χρόνος καταγραφής ορίστηκε στα 200 ms.



Σχήμα 4.5: Διάταξη των στοιχείων και των στρωμάτων στο μοντέλο για την 10^η προσομοίωση.



Σχήμα 4.6: Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη Χ-συνιστώσα για τον οριοθετημένο χώρο μελέτης για το μοντέλο του Σχήματος 4.5. Στον κάθετο άξονα Ζ ο χρόνος καταγραφής και στον οριζόντιο (Χ) ο α/α/ των γεωφώνων.

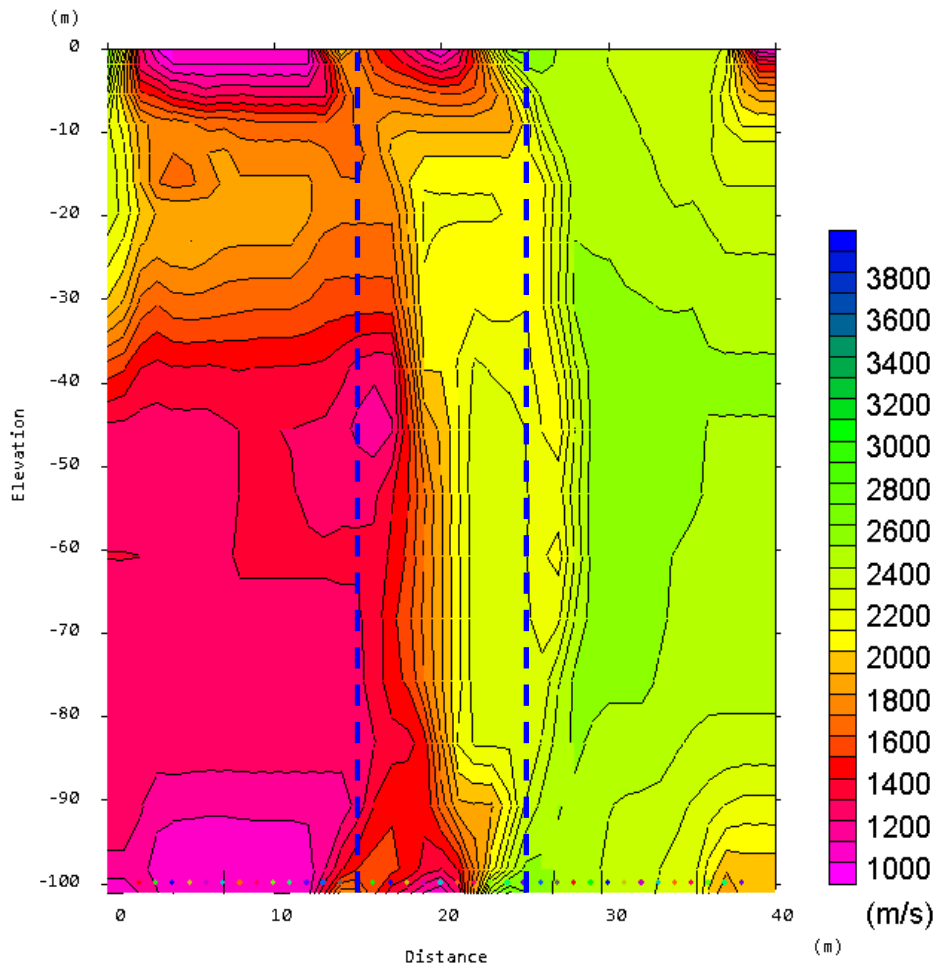
Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζονται οι καταγραφές της οριζόντιας (Χ) συνιστώσας της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στους δέκτες της πρώτης γεώτρησης (ίχνη 1-41), της δεύτερης γεώτρησης (42-82) και της επιφάνειας (δέκτες 83-131) για το μοντέλο του Σχήματος 4.5. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε επεξεργασία με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας και το λογισμικό Plotrefa.

Τα δεδομένα για την σεισμική τομογραφία παράχθηκαν από την ετεροσυσχέτιση ιχνών από την 1^η (κοντινότερη ως προς την πηγή) γεώτρηση με γεώφωνα στην 2^η γεώτρηση και $R_i = [-2, -1, 0, +1, +2]$ (Εξ. 3.1). Δεν χρησιμοποιήθηκαν δέκτες στην επιφάνεια καθώς το λογισμικό Plotrefa δεν μπορεί να υποστηρίξει ταυτόχρονη τοποθέτηση γεωφώνων στην ελεύθερη επιφάνεια και σε κάποιο βάθος (π.χ. γεώτρηση).

Οι ταχύτητες διάδοσης για τα στρώματα του μοντέλου που δημιουργήθηκε ήταν 2000 m/s για το επιφανειακό στρώμα, 3000 m/s για το ενδιαμεσο και 4000 m/s για το βαθύτερο. Ως αρχικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε ομοιογενές μέσο με ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων 1000m/s. Στο τομόγραμμα του Σχήματος 4.8 παρατηρείται μια απότομη μετάβαση των τιμών της ταχύτητας (πυκνότερες ισότιμες καμπύλες) κοντά στις διεπιφάνειες των στρωμάτων ωστόσο, οι προσδιοριζόμενες τιμές της ταχύτητας είναι αρκετά μικρότερες από τις πραγματικές. Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται η πορεία των σεισμικών ακτινών όπως αυτή προσδιορίστηκε από την σεισμική τομογραφία.

No editing

Smooth model : # of layers = 18

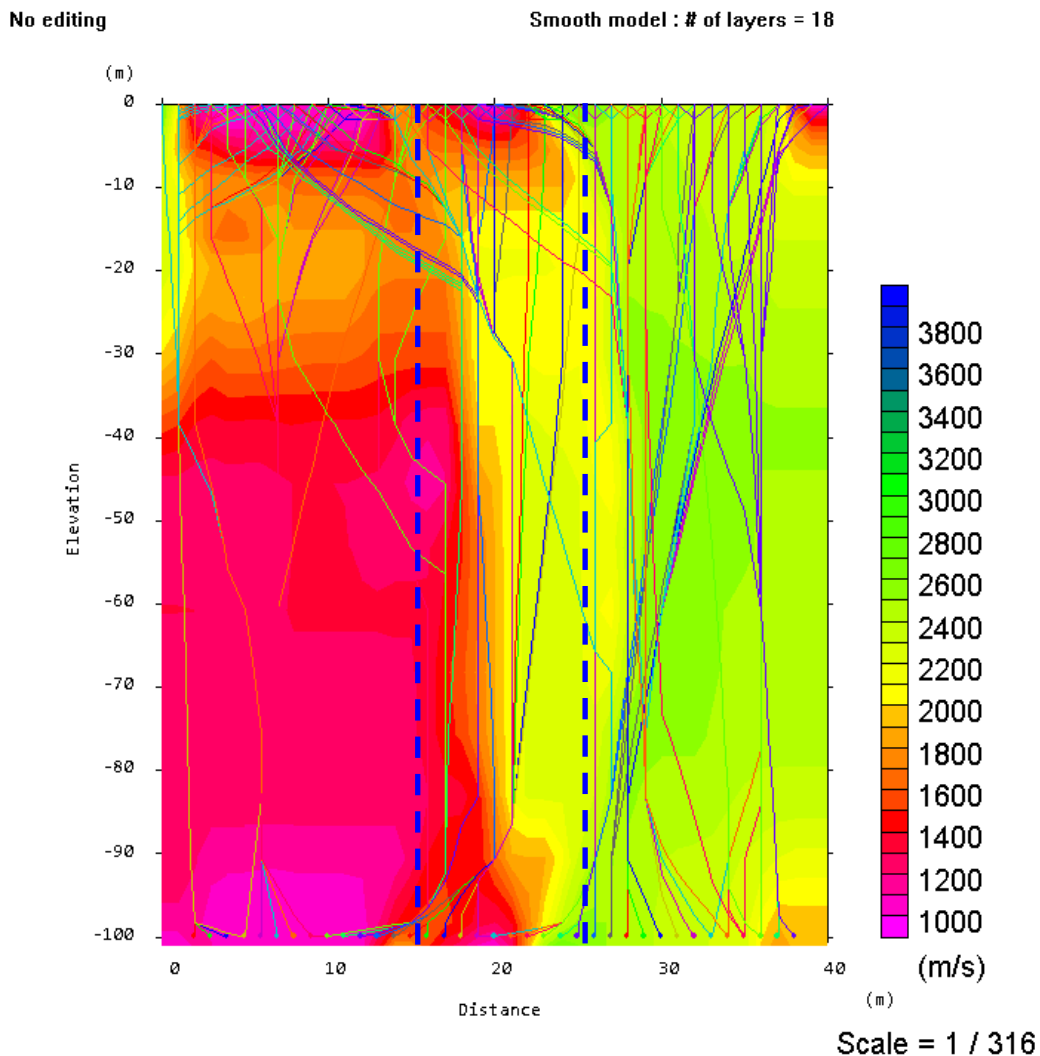


Scale = 1 / 316

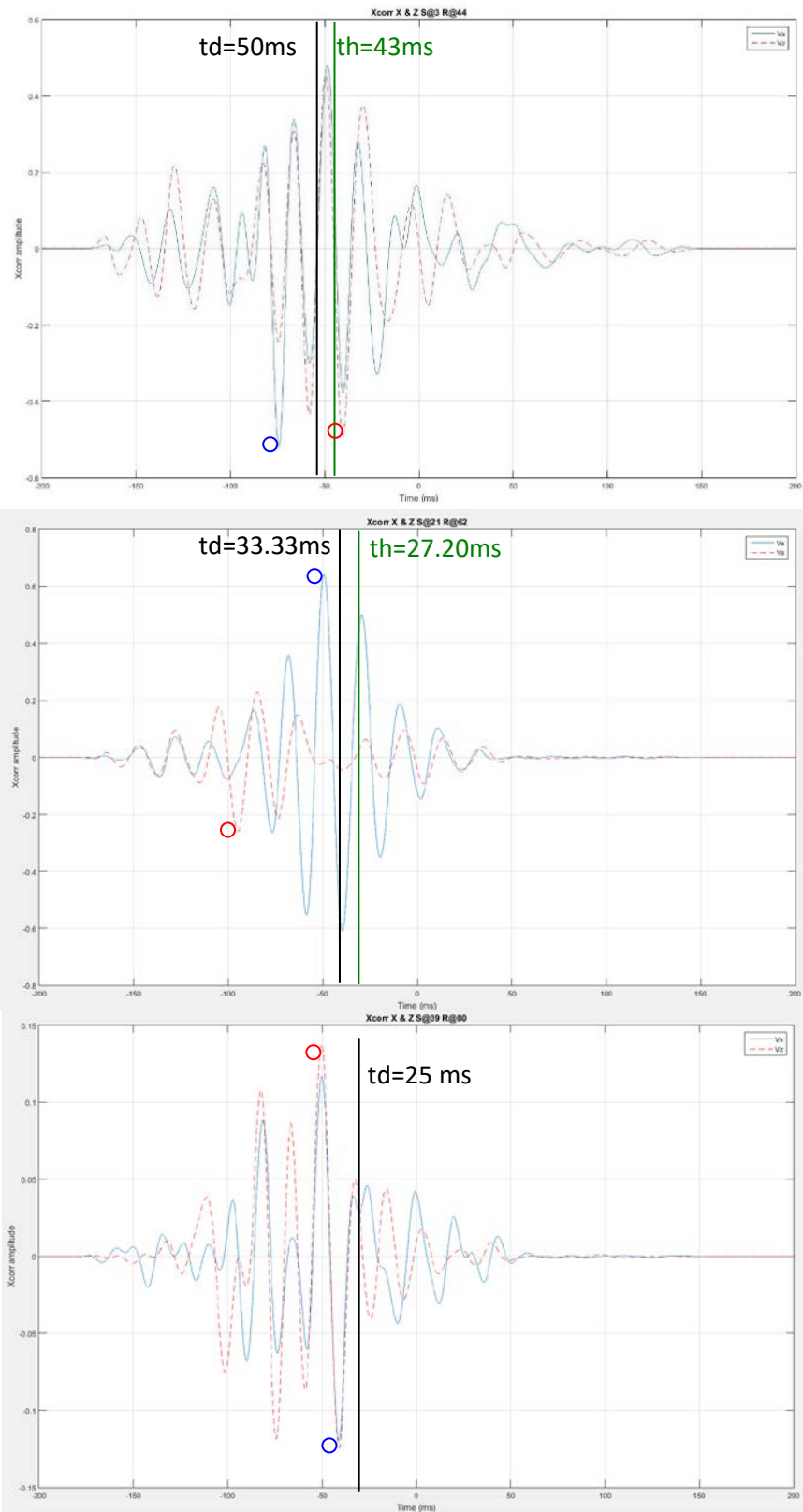
Σχήμα 4.7: Τελικό μοντέλο ταχύτητας για τα δεδομένα την προσομοίωσης 10($Ri = [-2, -1, 0, +1, +2]$). Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος από την επιφάνεια ενώ ο κατακόρυφος στην απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων. Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται τα όρια των στρωμάτων

Λόγω της μεγάλης απόκλισης των προσδιοριζόμενων από την σεισμική τομογραφία ταχυτήτων πραγματοποιήθηκε έλεγχος των χρόνων άφιξης των σεισμικών κυμάτων μέσω της ετεροσυσχέτισης συγκριτικά με τους αντίστοιχους χρόνους των απευθείας (διαδίδονται σε ευθεία από την εικονική πηγή έως τον δέκτη) και των μετωπικών (διαθλώνται ορικά και αναδύονται προς τον δέκτη από το στρώμα με την μεγαλύτερη ταχύτητα) σεισμικών κυμάτων, τόσο στην οριζόντια, όσο και στην κατακόρυφη συνιστώσα ταλάντωσης. Στο Σχήμα 4.9 απεικονίζονται οι τιμές της ετεροσυσχέτισης των σεισμικών ιχνών για τρία ενδεικτικά ζεύγη γεωφώνων που βρίσκονται αντιδιαμετρικά στις 2 γεωτρήσεις ($Ri = [0]$). Στα σχήματα αυτά παρατίθενται επίσης (με μαύρες και πράσινες κατακόρυφες γραμμές) οι αναμενόμενοι χρόνοι των απευθείας (t_d) και των μετωπικών (t_h) σεισμικών κυμάτων. Παρατηρείται ότι οι χρόνοι που προκύπτουν από τις (κατά

απόλυτο) μέγιστες τιμές της ετεροσυσχέτισης (κόκκινοι και μπλε κύκλοι για V_z και V_x συνιστώσα, αντίστοιχα) στις περισσότερες περιπτώσεις δεν συμπίπτουν με τους χρόνους των απευθείας ή των μετωπικών σεισμικών κυμάτων. Επίσης, οι υπολογιζόμενοι από την ετεροσυσχέτιση χρόνοι είναι συνήθως μεγαλύτεροι από τους αναμενόμενους, γεγονός που δικαιολογεί τις μικρότερες ταχύτητες που προέκυψαν από τη σεισμική τομογραφία.



Σχήμα 4.8: Τελικό μοντέλο ταχύτητας για τα δεδομένα την προσομοίωσης 10 ($R_i = [-2, -1, 0, +1, +2]$). Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος από την επιφάνεια ενώ ο κατακόρυφος στην απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων. Οι χρωματισμένες τεθλασμένες γραμμές αντιστοιχούν στις σεισμικές ακτίνες. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων. Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται τα όρια των στρωμάτων

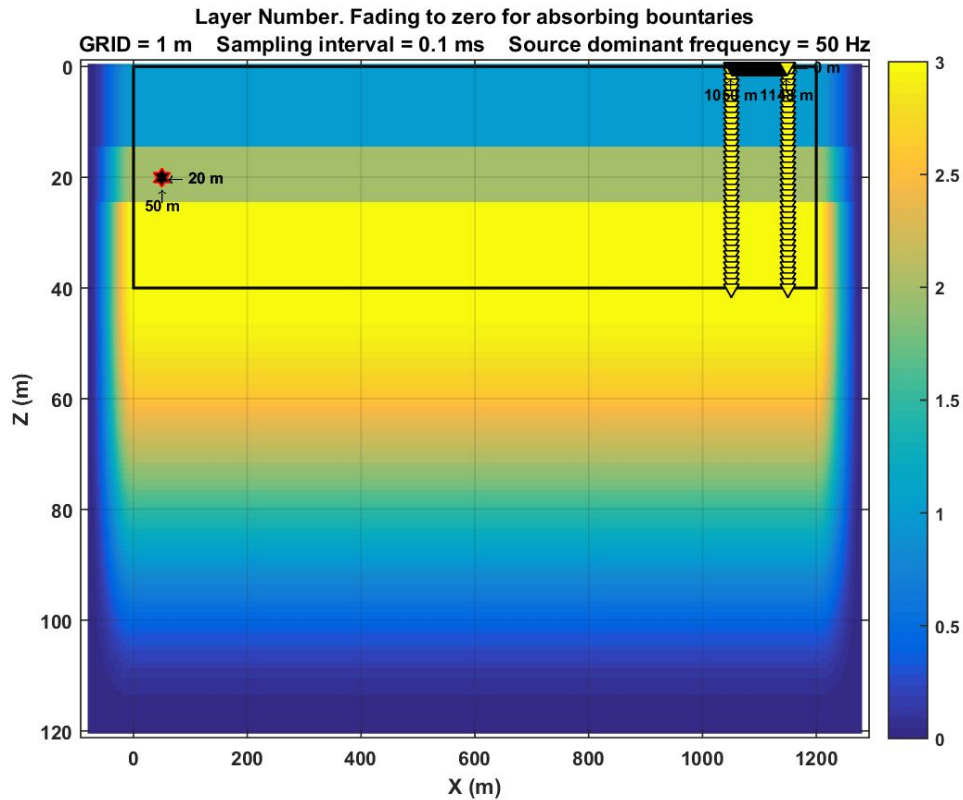


Σχήμα 4.9: Τιμές ετεροσυσχέτισης ζεύγους σεισμικών ιχνών για τα ζεύγη δεκτών (3,44) (πάνω), (21,62) (ενδιάμεσα) και (39,80) (κάτω) για την X (V_x) και την Z (V_z) συνιστώσα ταλάντωσης των σωματιδίων. Οι υπολογισμένοι χρόνοι των απευθείας (td) και των μετωπικών (th) κυμάτων για τα ζεύγη αυτά είναι 50ms και 43ms, 33.33ms και 27.20ms καθώς και 25ms (δεν υφίστανται μετωπικά), αντίστοιχα.

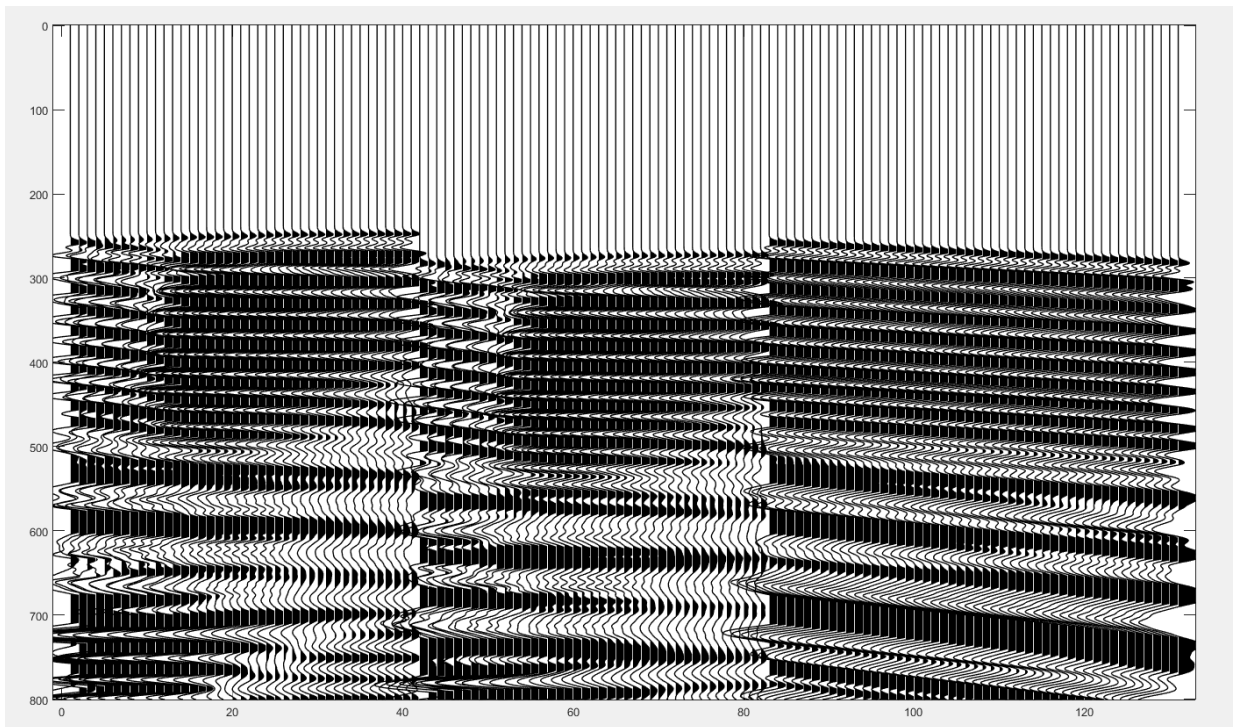
Σε επόμενη παράγραφο θα μελετηθεί αν υπάρχει διαφοροποίηση στα αποτελέσματα με την αύξηση του μήκους του μοντέλου με σκοπό, οι πρώτες αφίξεις που καταφθάνουν στα γεώφωνα να προέρχονται από σχεδόν επίπεδα κύματα.

4.1.3 Προσομοίωση 11: Μοντέλο 1200 x 40 με 1 πηγή και διάταξη με γεώφωνα στις γεώτρησεις και στην επιφάνεια.

Σε αυτήν την προσομοίωση το μοντέλο είχε τις ίδιες παραμέτρους , θέση πηγής και στρωματογραφία με το μοντέλο της προσομοίωσης 10. Η διαφορά ήταν το μέγεθος του μοντέλου και κατ' επέκταση η απόσταση της πηγής από το χώρο μελέτης με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της απόστασης διάδοσης των κυμάτων στα αποτελέσματα της σεισμικής τομογραφίας (Σχήμα 4.10). Τα κύματα που παράγονται από μια σεισμική πηγή είναι σφαιρικά κοντά στην πηγή, όμως ενώ διαδίδονται μακρύτερα συναντώνται σαν σχεδόν επίπεδα κύματα για αυτό και αποφασίστηκε η αύξηση του μήκους του μοντέλου. Οι διαστάσεις του μοντέλου ορίστηκαν, βάθος (Z) = 40m και μήκος (X) = 1200m με την πηγή να απέχει από το την διάταξη των γεωφώνων 1000m και δεν προστέθηκαν απορροφητικά όρια στην επιφάνεια του μοντέλου. Λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους του μοντέλου ο χρόνος καταγραφής ορίστηκε σε 800ms.



Σχήμα 4.10: Διάταξη των στοιχείων και των στρωμάτων στο μοντέλο για την 11^η προσομοίωση.



Σχήμα 4.11: Καταγραφές της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στη Χ-συνιστώσα για τον οριοθετημένο χώρο μελέτης για το μοντέλο του Σχήματος 4.10. Στον κάθετο άξονα Z ο χρόνος καταγραφής και στον οριζόντιο (X) ο α/α/ των γεωφώνων.

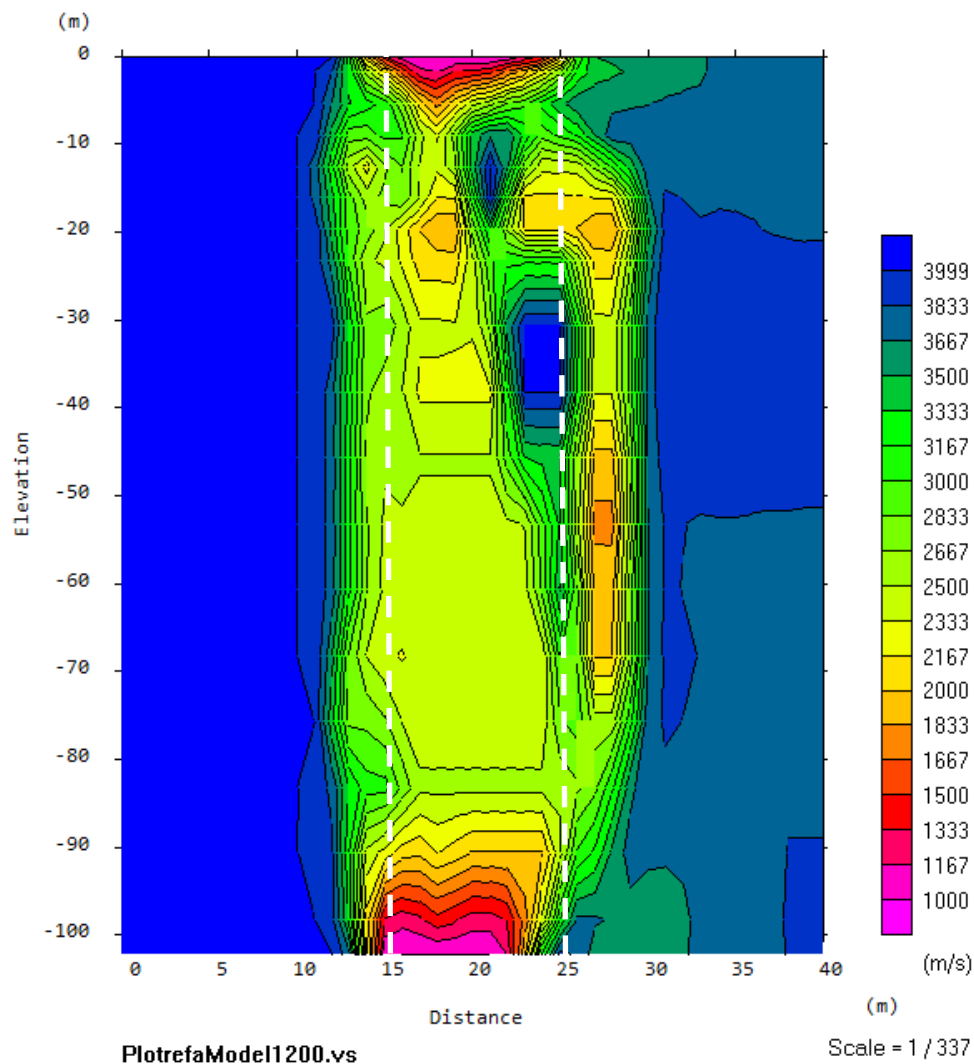
Στο Σχήμα 4.11 απεικονίζονται οι καταγραφές της οριζόντιας (X) συνιστώσας της ταχύτητας μετατόπισης των υλικών σημείων στους δέκτες της πρώτης γεώτρησης (ίχνη 1-41), της δεύτερης γεώτρησης (42-82) και της επιφάνειας (δέκτες 83-131) για το μοντέλο του Σχήματος 4.10. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε επεξεργασία με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας και το λογισμικό Plotrefa.

Τα δεδομένα για την σεισμική τομογραφία παράχθηκαν από την ετεροσυσχέτιση ιχνών από την 1^η (κοντινότερη ως προς την πηγή) γεώτρηση με γεωφώνια στην 2^η γεώτρηση και $Ri = [-2, -1, 0, +1, +2]$ (Εξ. 3.1). Δεν χρησιμοποιήθηκαν δέκτες στην επιφάνεια καθώς το λογισμικό Plotrefa δεν μπορεί να υποστηρίξει ταυτόχρονη τοποθέτηση γεωφώνων στην ελεύθερη επιφάνεια και σε κάποιο βάθος (π.χ. γεώτρηση).

Οι ταχύτητες διάδοσης για τα στρώματα του μοντέλου που δημιουργήθηκε ήταν 2000 m/s για το επιφανειακό στρώμα, 3000 m/s για το ενδιάμεσο και 4000 m/s για το βαθύτερο. Ως αρχικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε ομοιογενές μέσο με ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων 1000m/s. Στο τομόγραμμα του Σχήματος 4.13 παρατηρείται μια απότομη μετάβαση των τιμών της ταχύτητας (πυκνότερες ισότιμες καμπύλες) κοντά στις διεπιφάνειες των στρωμάτων ωστόσο, οι προσδιοριζόμενες τιμές της ταχύτητας είναι αρκετά μικρότερες από τις πραγματικές. Στο Σχήμα 4.13 απεικονίζεται η πορεία των σεισμικών ακτινών όπως αυτή προσδιορίστηκε από την σεισμική τομογραφία.

Λόγω της μεγάλης απόκλισης των προσδιοριζόμενων από την σεισμική τομογραφία ταχυτήτων πραγματοποιήθηκε έλεγχος των χρόνων άφιξης των σεισμικών κυμάτων μέσω της ετεροσυσχέτισης συγκριτικά με τους αντίστοιχους χρόνους των απευθείας (διαδίδονται σε ευθεία από την εικονική πηγή έως τον δέκτη) και των μετωπικών (διαθλώνται ορικά και αναδύονται προς τον δέκτη από το στρώμα με την μεγαλύτερη ταχύτητα) σεισμικών κυμάτων, τόσο στην οριζόντια, όσο και στην κατακόρυφη συνιστώσα ταλάντωσης. Στο Σχήμα 4.14 απεικονίζονται οι τιμές της ετεροσυσχέτισης των σεισμικών ιχνών για τρία ενδεικτικά ζεύγη γεωφώνων που βρίσκονται αντιδιαμετρικά στις 2 γεωτρήσεις ($Ri = [0]$).

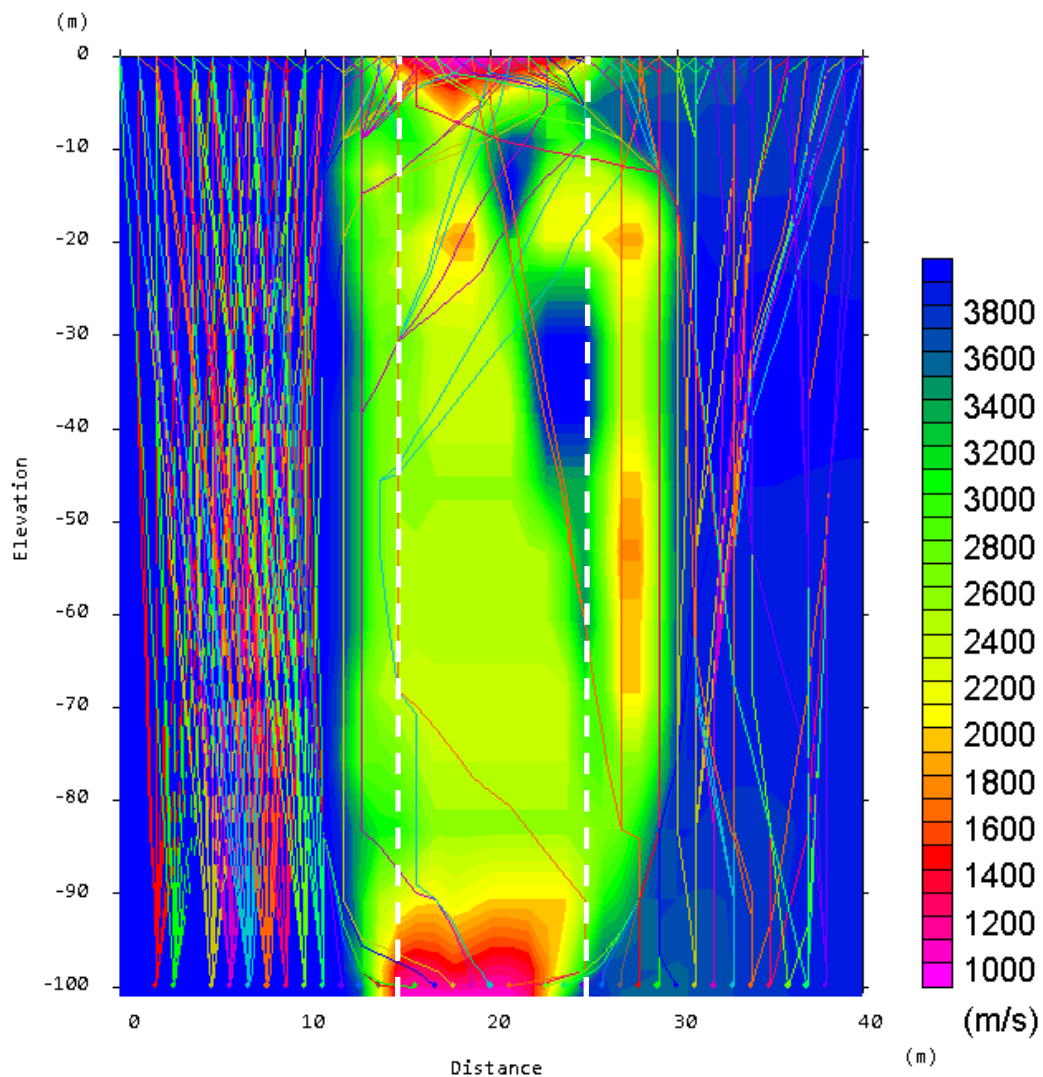
Παρατίθεται επίσης πίνακας (Πίνακας 4.3) με τους χρόνους της ετεροσυσχέτισης, τους αναμενόμενους χρόνους των απευθείας, μετωπικών και η απόκλιση τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν συμπίπτουν με τους χρόνους των απευθείας ή των μετωπικών σεισμικών κυμάτων. Επίσης, οι υπολογιζόμενοι από την ετεροσυσχέτιση χρόνοι είναι συνήθως μεγαλύτεροι από τους αναμενόμενους, γεγονός που δικαιολογεί τις μικρότερες ταχύτητες που προέκυψαν από τη σεισμική τομογραφία.



Σχήμα 4.12: Τελικό μοντέλο ταχύτητας για τα δεδομένα την προσομοίωσης 11 ($Ri = [-2, -1, 0, +1, +2]$). Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος από την επιφάνεια ενώ ο κατακόρυφος στην απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων. Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται τα όρια των στρωμάτων

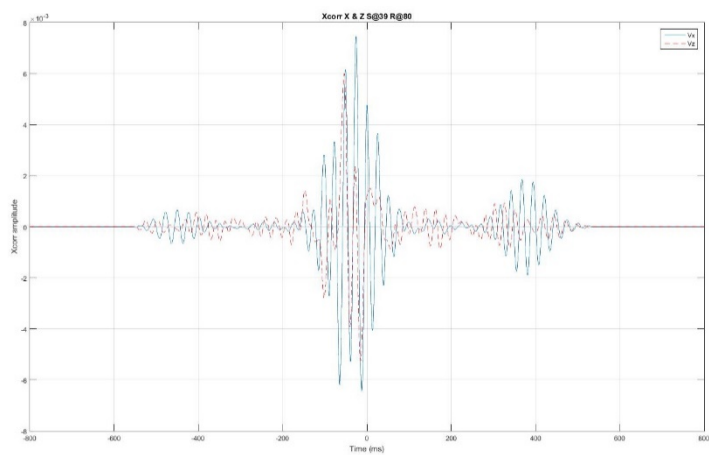
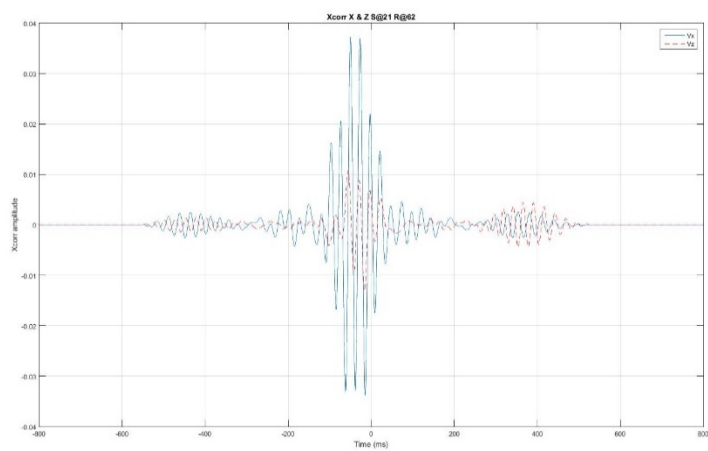
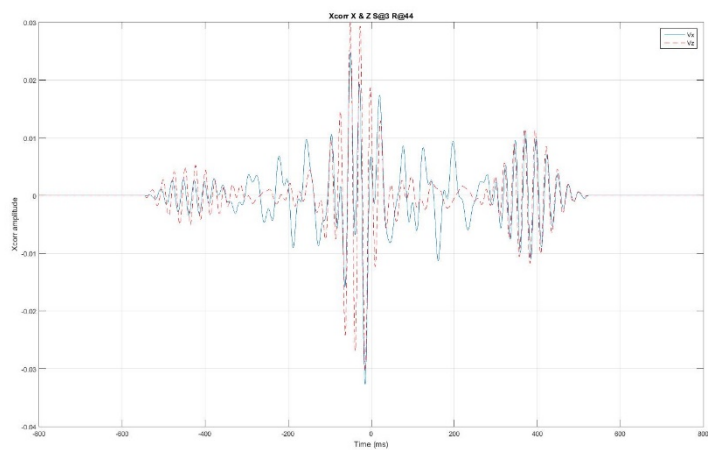
No editing

Smooth model : # of layers = 18



Scale = 1 / 316

Σχήμα 4.13: Τελικό μοντέλο ταχύτητας για τα δεδομένα την προσομοίωσης 11($Ri = [-2, -1, 0, +1, +2]$). Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος από την επιφάνεια ενώ ο κατακόρυφος στην απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων. Οι χρωματισμένες τεθλασμένες γραμμές αντιστοιχούν στις σεισμικές ακτίνες. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων. Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται τα όρια των στρωμάτων.



Σχήμα 4.14: Τιμές ετεροσυσχέτισης ζευγούς σεισμικών ιχνών για τα ζεύγη δεκτών (3,44) (πάνω), (21,62) (ενδιάμεσα) και (39,80) (κάτω) για την X (V_x) και την Z (V_z) συνιστώσα ταλάντωσης των σωματιδίων. Οι υπολογισμένοι χρόνοι των απευθείας (td) και των μετωπικών (th) κυμάτων για τα ζεύγη αυτά παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Πινάκας 4.3: Σύγκριση αναλυτικών, μετωπικών χρόνων άφιξης και υπολογισμένων χρόνων από την ετεροσυσχέτιση ($Xcorr$) για το μοντέλο του Σχήματος 4.10 για τα ζεύγη δεκτών (3,44), (21,62) και (39,80) (δεν υφίστανται μετωπικά), για την X (Vx) συνιστώσα ταλάντωσης των σωματιδίων

Source Pos No	Receiver Pos No	Component	Distance	Analytical (ms)	HeadWaves (ms)	Xcorr (ms)
3	44	X	100	50.00	43.02	50.30
21	62	X	100	33.33	48.33	50.10
39	80	X	100	25.00	-	26.00

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕ 2 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ

Οι ακόλουθες προσομοιώσεις δομήθηκαν με τις ιδανικές παραμέτρους για να εξετάσουμε την λειτουργικότητα της μεθοδολογίας και ήταν αποτέλεσμα των παραπάνω προσομοιώσεων που έγιναν με σκοπό να μελετήσουμε με ακρίβεια την λειτουργία της μεθόδου. Έγινε απλοποίηση του μοντέλου από τρία σε δύο στρώματα με σκοπό την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος.

Δημιουργήθηκαν δύο πανομοιότυπα μοντέλα με την μόνη διαφορά, ότι οι ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στα στρώματα ήταν ανεστραμμένες. Οι υπόλοιπες παράμετροι και αποτελέσματα περιγράφονται παρακάτω. Έγινε σεισμική τομογραφία με το λογισμικό Plotrefa με χρόνους άφιξης των κυμάτων από τις εικονικές πηγές προς όλα τα γεώφωνα τις 2^{ης}. Επίσης, έγινε προσπάθεια επεξεργασίας των χρόνων αφίξεων και από τα γεώφωνα της επιφάνειας με το λογισμικό ReflexW.

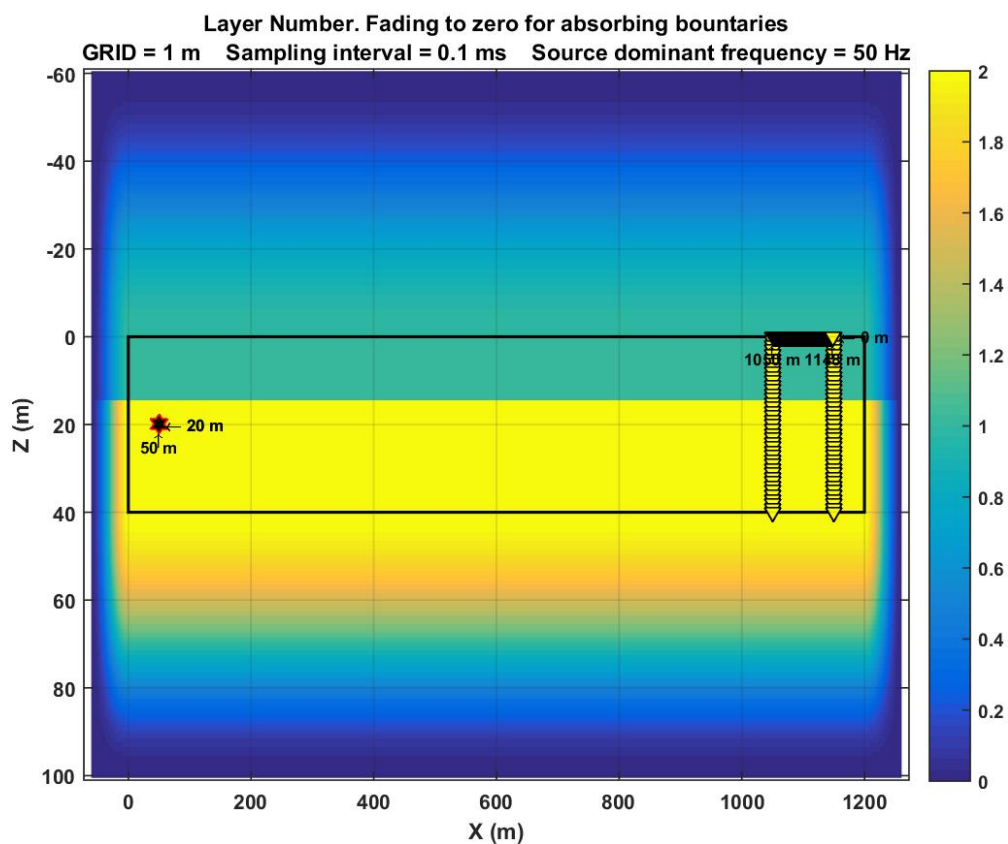
5.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 12: ΜΟΝΤΕΛΟ 1200X40 ΜΕ 2 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ 1 ΠΗΓΗ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕ ΓΕΩΦΩΝΑ ΣΤΙΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Σε αυτή την προσομοίωση αποφασίστηκε η αλλαγή του εδαφικού μοντέλου και η δοκιμή της μεθοδολογίας σε μοντέλο με 2 οριζόντια στρώματα. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε είχε βάθος (Z) = 40m και μήκος (X) = 1200m. Το μέγεθος των κελιών ορίστηκε ($GRID$)=1m και το διάστημα δειγματοληψίας ($Sampling\ Interval$)= 0.1 ms .

Αποτελούνταν από δύο εδαφικά στρώματα όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 5.1, με πυκνότητα (ρ_1)= 2 gr/cm³ στο επιφανειακό στρώμα και ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων (Vp_1)=2000 m/s και (Vs_1)=1000 m/s και πάχος 15m. Το υποκείμενο στρώμα με πυκνότητα του σχηματισμού (ρ_2)= 2.3 gr/cm³ και ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων (Vp_2)=3000 m/s και (Vs_2)=1500 m/s. Η πηγή τοποθετήθηκε στη θέση (Z,X = 20,50) με κυρίαρχη συχνότητα ταλάντωσης της πηγής f_{dom} = 50 Hz.

(Σχήμα 5.1), ενώ ορίστηκαν επίσης 2 κατακόρυφες γεωτρήσεις με την πλησιέστερη να απέχει 1000 m από την πηγή και την μεταξύ τους απόσταση ίση με 100m.

Τα γεώφωνα τοποθετήθηκαν, τόσο στις 2 κατακόρυφες γεωτρήσεις από την επιφάνεια μέχρι τα 40m βάθος σε ισαποστάσεις του 1 m, όσο στην επιφάνεια από την μια έως την άλλη γεώτρηση με ισαπόσταση γεωφώνων 2 m. Συνολικά τοποθετήθηκαν 131 γεώφωνα, ενώ ο χρόνος καταγραφής ορίστηκε στα 800 ms. Στο μοντέλο αυτό εισήχθησαν απορροφητικά όρια και στην επιφάνεια για την απόσβεση των σεισμικών κυμάτων που καταφθάνουν στα όρια του μοντέλου και την αποφυγή δημιουργίας επιφανειακών κυμάτων και ανεπιθύμητων ανακλάσεων και από την επιφάνεια.



Σχήμα 5.1: Διάταξη των στοιχείων και των στρωμάτων στο μοντέλο για την 12^η προσομοίωση, με προσθήκη απορροφητικών ορίων στην επιφάνεια του μοντέλου ($Z=0$).

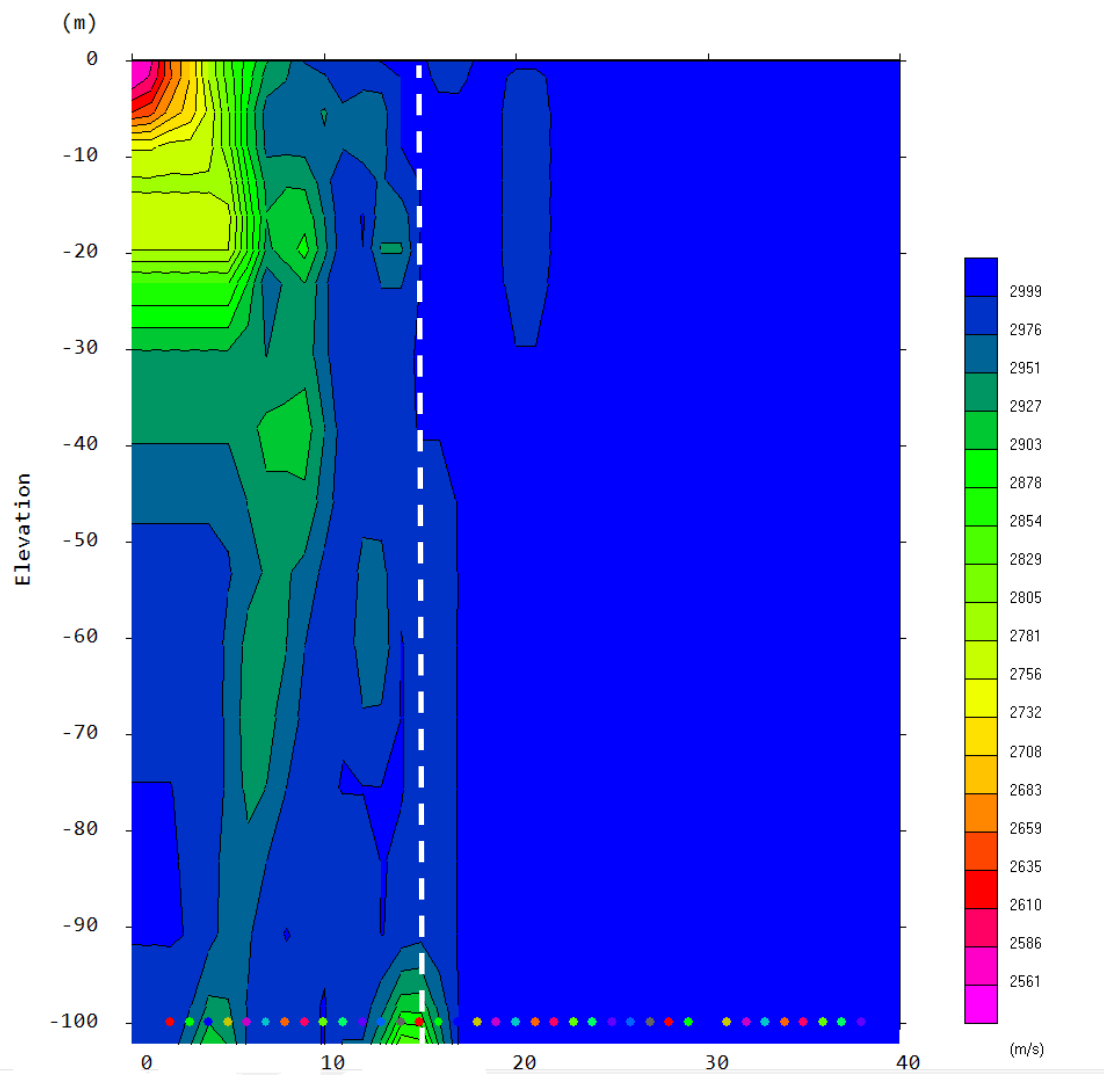
5.1.1 Σεισμική Τομογραφία με το λογισμικό Plotrefa

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε επεξεργασία με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας και το λογισμικό Plotrefa. Τα δεδομένα για την σεισμική τομογραφία παράχθηκαν από την ετεροσυσχέτιση ιχνών από την 1^η (κοντινότερη ως προς την πηγή) γεώτρηση, κάθε εικονική πηγή με όλα τα γεώφωνα στην 2^η γεώτρηση. Δεν χρησιμοποιήθηκαν δέκτες στην επιφάνεια καθώς το λογισμικό Plotrefa δεν μπορεί να υποστηρίξει ταυτόχρονη τοποθέτηση γεωφώνων στην ελεύθερη επιφάνεια και σε κάποιο βάθος (π.χ. γεώτρηση).

Οι ταχύτητες διάδοσης για τα στρώματα του μοντέλου που δημιουργήθηκε ήταν 2000 m/s για το επιφανειακό στρώμα και 3000 m/s για το βαθύτερο. Ως αρχικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε ομοιογενές μέσο με ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων 1000m/s. Στο τομόγραμμα του Σχήματος 5.3 παρατηρείται μια απότομη μετάβαση των τιμών της ταχύτητας (πυκνότερες ισότιμες καμπύλες) κοντά στις διεπιφάνειες των στρωμάτων ωστόσο, οι προσδιοριζόμενες τιμές της ταχύτητας είναι αρκετά μικρότερες από τις πραγματικές. Στο δεύτερο στρώμα η κατανομή των ταχυτήτων συνάδει με τις πραγματικές τιμές. Ωστόσο, δεν είναι εύκολος ο διαχωρισμός της στρωματογραφίας. Στο Σχήμα 5.3 απεικονίζεται η πορεία των σεισμικών ακτινών όπως αυτή προσδιορίστηκε από την σεισμική τομογραφία.

Λόγω της μεγάλης απόκλισης των προσδιοριζόμενων από την σεισμική τομογραφία ταχυτήτων πραγματοποιήθηκε έλεγχος των χρόνων άφιξης των σεισμικών κυμάτων μέσω της ετεροσυσχέτισης συγκριτικά με τους αντίστοιχους χρόνους των απευθείας (διαδίδονται σε ευθεία από την εικονική πηγή έως τον δέκτη) και των μετωπικών (διαθλώνται ορικά και αναδύονται προς τον δέκτη από το στρώμα με την μεγαλύτερη ταχύτητα) σεισμικών κυμάτων, τόσο στην οριζόντια, όσο και στην κατακόρυφη συνιστώσα ταλάντωσης. Στο Σχήμα 5.4 απεικονίζονται οι τιμές της ετεροσυσχέτισης των σεισμικών ιχνών για τρία ενδεικτικά ζεύγη γεωφώνων που βρίσκονται αντιδιαμετρικά στις 2 γεωτρήσεις ($Ri = [0]$).

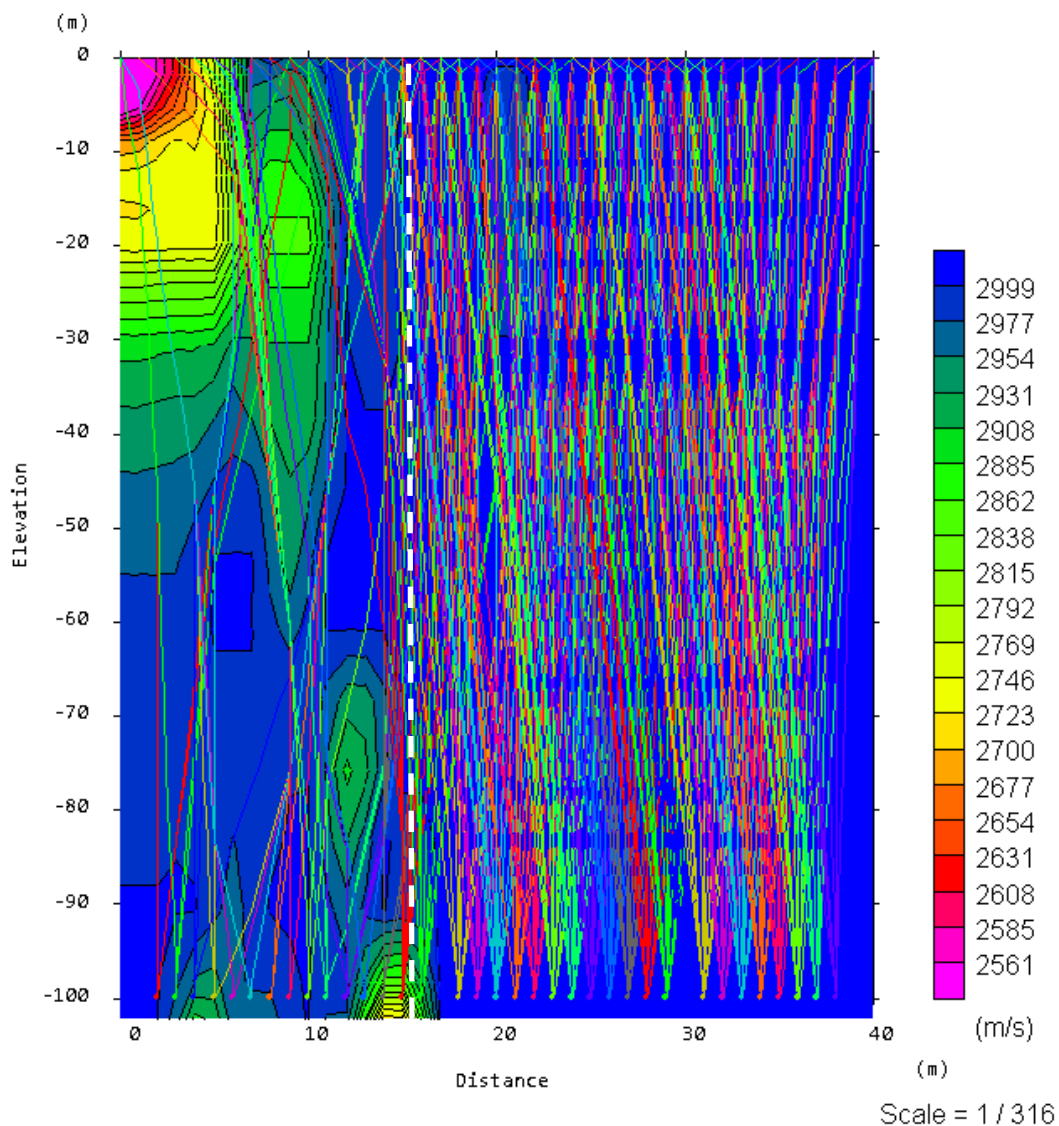
Παρατίθεται επίσης πίνακας (Πίνακας 5.1) με τους χρόνους της ετεροσυσχέτισης, τους αναμενόμενους χρόνους των απευθείας, μετωπικών και η απόκλιση τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν συμπίπτουν με τους χρόνους των απευθείας ή των μετωπικών σεισμικών κυμάτων. Επίσης, οι υπολογιζόμενοι από την ετεροσυσχέτιση χρόνοι είναι συνήθως μεγαλύτεροι από τους αναμενόμενους, γεγονός που δικαιολογεί τις μικρότερες ταχύτητες που προέκυψαν από τη σεισμική τομογραφία.



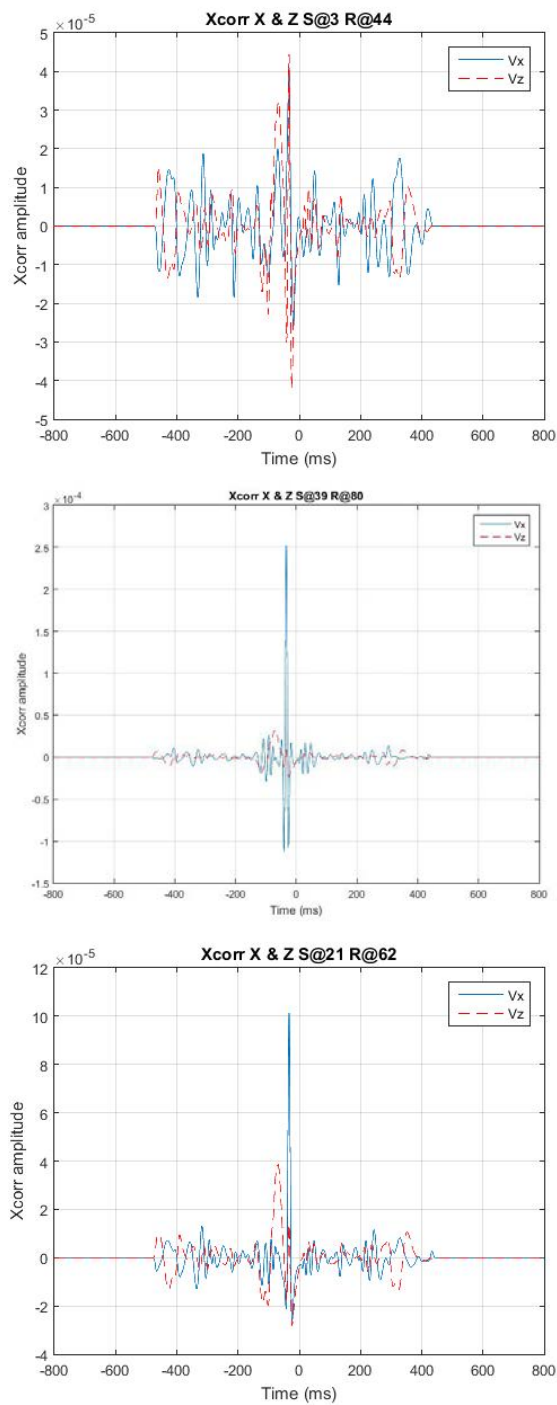
Σχήμα 5.2: Τελικό μοντέλο ταχύτητας για τα δεδομένα της προσομοίωσης 12 με ετεροσυσχέτιση κάθε δέκτη με α/α από 3 έως 39 (1^η γεώτρηση) με όλα τα γεώφωνα της 2^{ης} γεώτρησης. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος από την επιφάνεια ενώ ο κατακόρυφος στην απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων. Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται τα όρια των στρωμάτων

No editing

Smooth model : # of layers = 18



Σχήμα 5.3: Τελικό μοντέλο ταχύτητας για τα δεδομένα της προσομοίωσης 12 με ετεροσυσχέτιση κάθε δέκτη με α/α από 3 έως 39 (1^η γεώτρηση) με όλα τα γεώφωνα της 2^{ης} γεώτρησης. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος από την επιφάνεια ενώ ο κατακόρυφος στην απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων. Οι χρωματισμένες τεθλασμένες γραμμές αντιστοιχούν στις σεισμικές ακτίνες. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων. Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται τα όρια των στρωμάτων.



Σχήμα 5.4: Τιμές ετεροσυσχέτισης ζεύγους σεισμικών ιχνών για τα ζεύγη δεκτών (3,44) (πάνω), (21,62) (ενδιάμεσα) και (39,80) (κάτω) για την X (V_x) και την Z (V_z) συνιστώσα ταλάντωσης των σωματιδίων. Οι υπολογισμένοι χρόνοι των απευθείας (td) και των μετωπικών (th) κυμάτων για τα ζεύγη αυτά παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

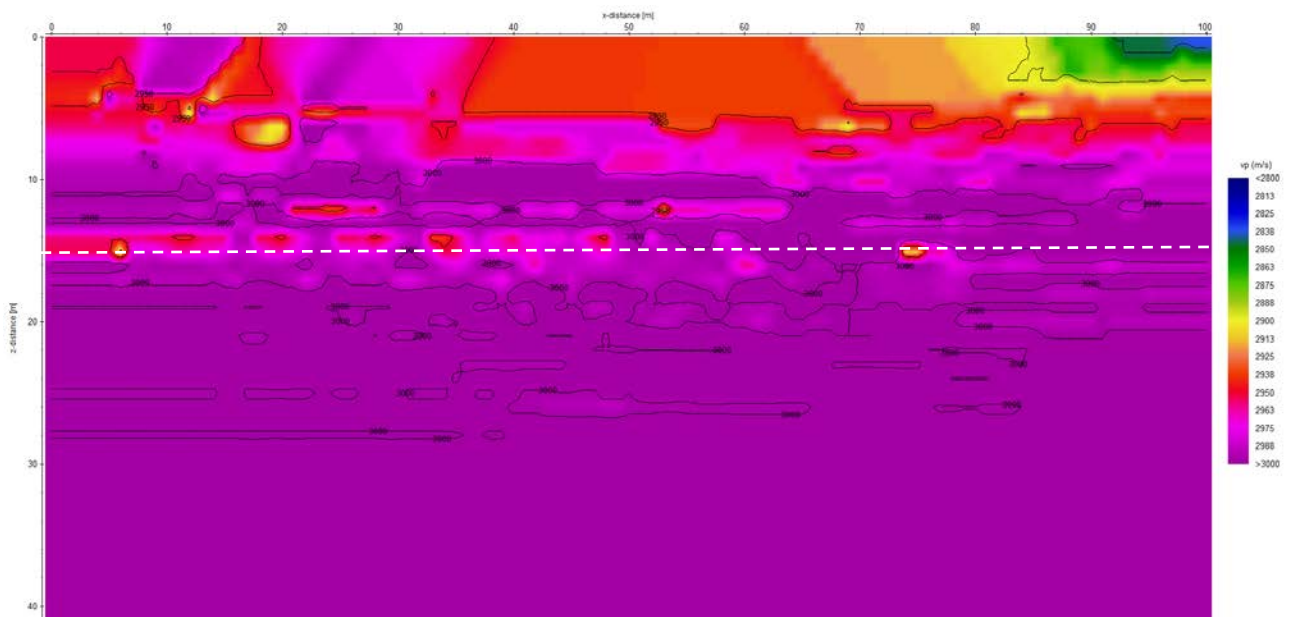
Πίνακας 5.1: Σύγκριση αναλυτικών, μετωπικών χρόνων άφιξης και υπολογισμένων χρόνων από την ετεροσυσχέτιση (X_{corr}) για το μοντέλο του Σχήματος 5.1 για τα ζεύγη δεκτών (3,44), (21,62) (δεν υφίστανται μετωπικά) και (39,80) (δεν υφίστανται μετωπικά), για την X (V_x) συνιστώσα ταλάντωσης των σωματιδίων.

Source Pos No	Receiver Pos No	Component	Distance	Analytical (ms)	HeadWaves (ms)	X_{corr} (ms)
3	44	X	100	50.00	43.02	33.9
21	62	X	100	33.33	-	33.3
39	80	X	100	33.33	-	33.3

Στη συνέχεια εξήχθησαν δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για σεισμική τομογραφία με το λογισμικό Plotrefa , για την δημιουργία πινάκων με χρόνους άφιξης από την ετεροσυσχέτιση συναρτήσει της θέσης των γεωφώνων και για έλεγχο αποτελεσμάτων με το SeisImager (ReflexW). Για να βελτιώσουμε την σεισμική τομογραφία αναζητάμε a-priori πληροφορίες που θα μπορούσαν να εισαχθούν στην αντίστροφη, π.χ. πάχη και ταχύτητες στρωμάτων.

5.1.2 Έλεγχος αποτελεσμάτων του SeisImager με το ReflexW

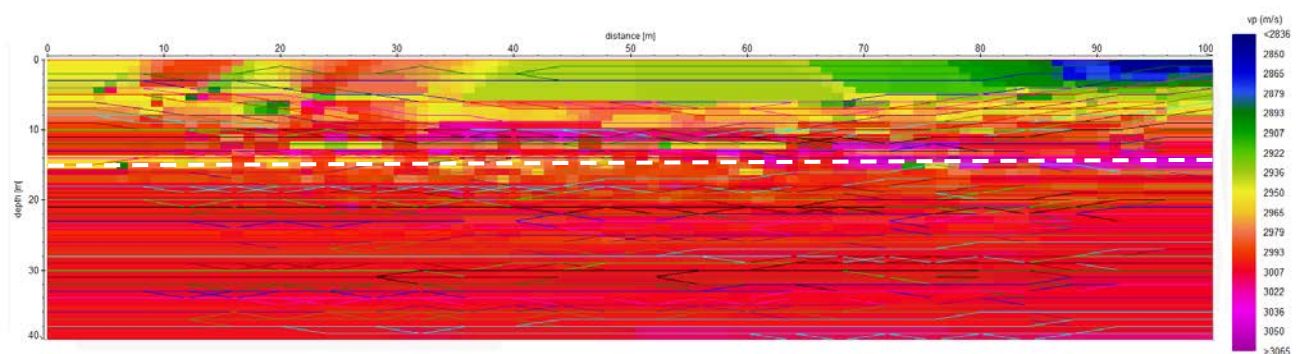
Σε αυτό το υποκεφάλαιο έγινε έλεγχος των αποτελεσμάτων της σεισμικής τομογραφίας που προέκυψαν από το λογισμικό SeisImager με το λογισμικό ReflexW με πληροφορίες για πρώτες αφίξεις και από τα γεώφωνα της επιφάνειας. Τα μοντέλα εδώ δεν είναι στραμμένα κατά 90° αριστερόστροφα σε αντίθεση με το Plotrefa.



Σχήμα 5.5: Τελικό εδαφικό μοντέλο ταχύτατων από το λογισμικό ReflexW, με δέκτες στην απέναντι γεώτρηση. Με διακεκομμένη γραμμή απεικονίζονται τα όρια των στρωμάτων.

Στο Σχήμα 5.5 απεικονίζεται η κατανομή των ταχυτήτων στο εδαφικό μοντέλο, με δεδομένα πρώτων αφίξεων από τα γεώφωνα μόνο από την απέναντι γεώτρηση. Και σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα στο πρώτο στρώμα δεν προσεγγίζει την πραγματική (2000 m/s), ενώ δεν είναι εύκολος ο διαχωρισμός της στρωματογραφίας. Γενικά, το τομόγραμμα που προέκυψε από το λογισμικό ReflexW είναι παρόμοιο με αυτό από το λογισμικό Plotrefa.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.6) απεικονίζεται η υπολογιζόμενη πορεία των σεισμικών ακτίνων όπως αυτές υπολογίστηκαν από το ReflexW για δέκτες μόνο στην απέναντι γεώτρηση.

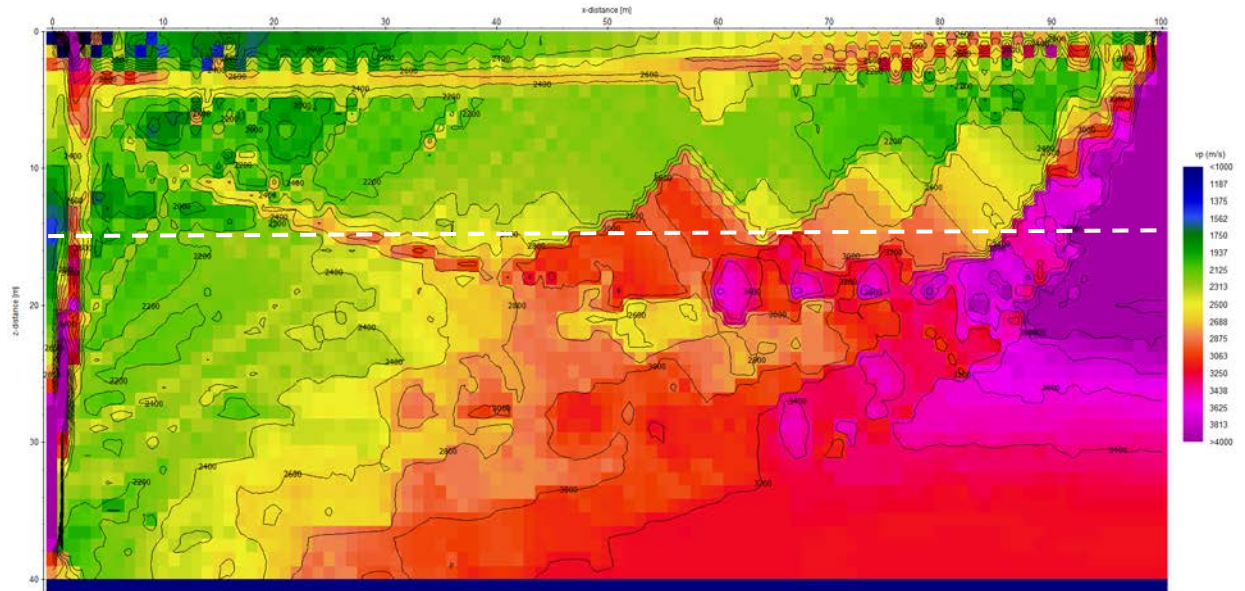


Σχήμα 5.6: Τελικό μοντέλο με την διαδρομή των σεισμικών ακτίνων όπως υπολογίστηκαν από το ReflexW με εικονικές πηγές στην 1^η γεώτρηση και δέκτες στην απέναντι γεώτρηση. Με διακεκομμένη γραμμή απεικονίζονται τα όρια των στρωμάτων

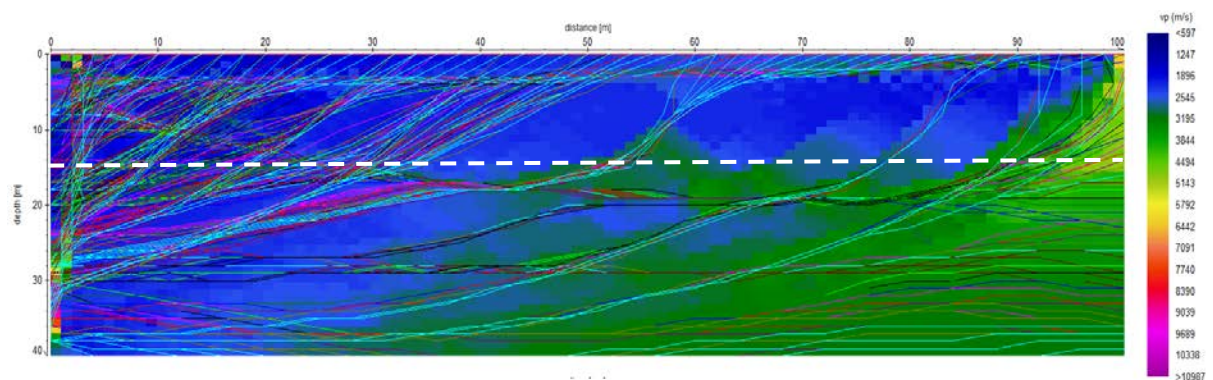
Στο Σχήμα 5.7 απεικονίζεται η κατανομή των ταχυτήτων στο εδαφικό μοντέλο, με δεδομένα πρώτων αφίξεων από τα γεώφωνα της απέναντι γεώτρησης αλλά και της επιφάνειας.

Τα δεδομένα για την σεισμική τομογραφία παράχθηκαν από την ετεροσυσχέτιση ιχνών από την 1^η (κοντινότερη ως προς την πηγή) γεώτρηση, κάθε εικονική πηγή (Sn=3:39), με όλα τα γεώφωνα τις 2^η γεώτρησης και τις επιφάνειας (Rn=43:131). Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μεγάλη απόκλιση των προσδιοριζόμενων ταχυτήτων από αυτές του μοντέλου, όπως επίσης είναι αδύνατος ο εντοπισμός της διεπιφάνειας των στρωμάτων. Αυτό πιθανόν οφείλεται στα μεγάλα σφάλματα προσδιορισμού των χρόνων άφιξης των σεισμικών κυμάτων με την μέθοδο της ετεροσυσχέτισης, κυρίως όταν η γωνία, που σχηματίζει το γεώφωνο – πηγή με τον δέκτη σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο, είναι μεγάλη. Δηλαδή, κατά την ετεροσυσχέτιση των δεκτών στην πρώτη γεώτρηση με αυτά στην επιφάνεια.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.8) απεικονίζεται η υπολογιζόμενη πορεία των σεισμικών ακτίνων όπως αυτές υπολογίστηκαν από το ReflexW για δέκτες στην απέναντι γεώτρηση και στην επιφάνεια.



Σχήμα 5.7: Τελικό εδαφικό μοντέλο ταχυτήτων από το λογισμικό ReflexW, με εικονικές πηγές στην 1^η γεώτρηση και δέκτες στην απέναντι γεώτρηση και στην επιφάνεια. Με διακεκομμένη γραμμή απεικονίζονται τα όρια των στρωμάτων



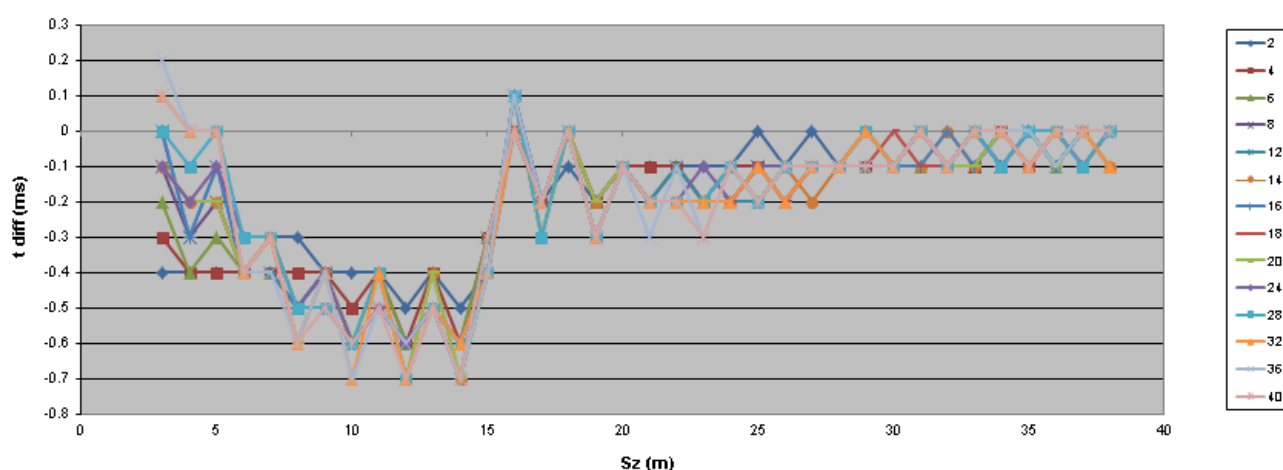
Σχήμα 5.8: Τελικό μοντέλο με την διαδρομή των σεισμικών ακτίνων όπως υπολογίστηκαν από το ReflexW με εικονικές πηγές στην 1^η γεώτρηση και δέκτες στην απέναντι γεώτρηση και στην επιφάνεια.. Με διακεκομμένη γραμμή απεικονίζονται τα όρια των στρωμάτων

5.1.3 Αναλυτική επεξεργασία και διαγράμματα

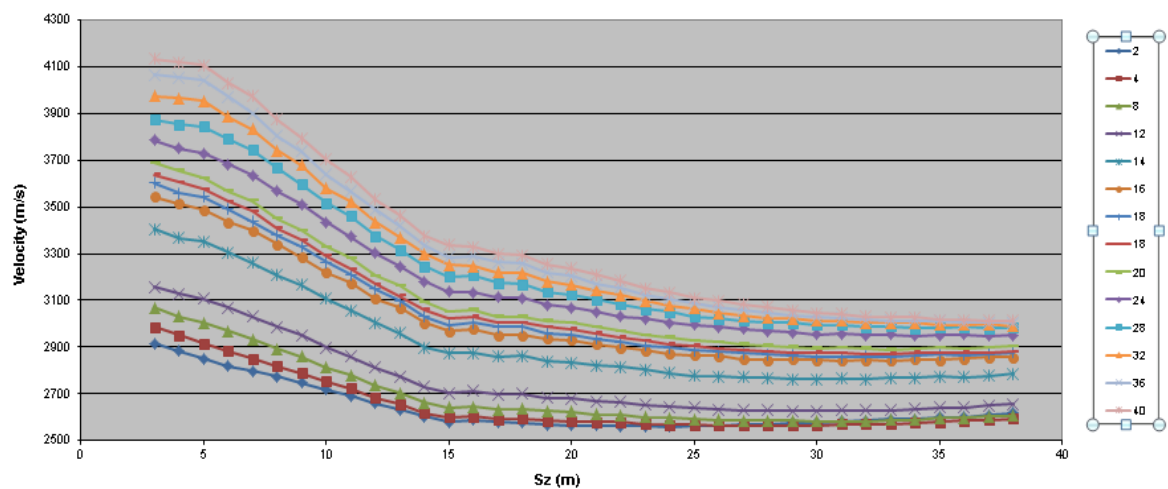
Εφόσον τα αποτελέσματα της σεισμικής τομογραφίας δεν ήταν και πολύ ενθαρρυντικά, αναζητήθηκε τρόπος να εξαχθούν επιπρόσθετες πληροφορίες από τους υπολογιζόμενους με την μέθοδο της ετεροσυσχέτισης χρόνων άφιξης των σεισμικών κυμάτων, οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν συμπληρωματικά κατά την αντιστροφή στη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας με στόχο να βελτιώσουν το τελικό αποτέλεσμα. Τέτοιου είδους πληροφορίες είναι, για παράδειγμα, τα πάχη των στρωμάτων ή/και η ταχύτητα κάποιου από τα στρώματα του μοντέλου.

Έτσι, για το μοντέλο του Σχήματος 5.1, πραγματοποιήθηκε ετεροσυσχέτιση κάθε δέκτη με α/α από 3 έως 39 (1^η γεώτρηση) με όλα τα γεώφωνα της 2^{ης} γεώτρησης και προσδιορίστηκε ο χρόνος άφιξης των σεισμικών κυμάτων. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν διαγράμματα με τον οριζόντιο άξονα να αντιστοιχεί στο RSz (βάθος πηγής σε m), συναρτήσει της χρονικής διαφοράς των αφίξεων μεταξύ του ν-οστού και του ν-1 δέκτη (t-difference) (Σχήμα 5.9). Επίσης υπολογίστηκε η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων υπό την θεώρηση ότι αυτά διαδίδονται ευθύγραμμα από την εικονική πηγή προς τον εκάστοτε δέκτη (Σχήμα 5.10).

Στο διάγραμμα του Σχήματος 5.9 παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη διακύμανση της διαφοράς των χρόνων εντοπίζεται στο βάθος των 15m, το οποίο αντιστοιχεί και στο πάχος του επιφανειακού στρώματος. Αντίθετα, από το διάγραμμα του Σχήματος 5.10, δεν διαφαίνεται να προκύπτουν πληροφορίες για τις ταχύτητες των 2 στρωμάτων (2000 & 3000m/s).



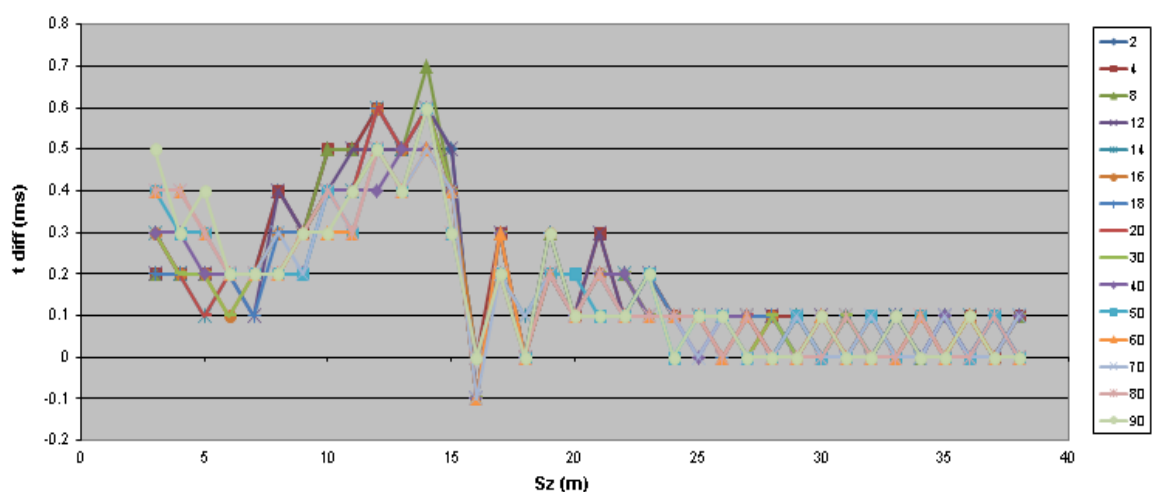
Σχήμα 5.9: Στον οριζόντιο άξονα το βάθος της πηγής και στον κάθετο η χρονική διαφορά των αφίξεων μεταξύ του ν-οστού και του ν-1 δέκτη (t-diff) για επιλεγμένους δέκτες στην 2^η γεώτρηση.



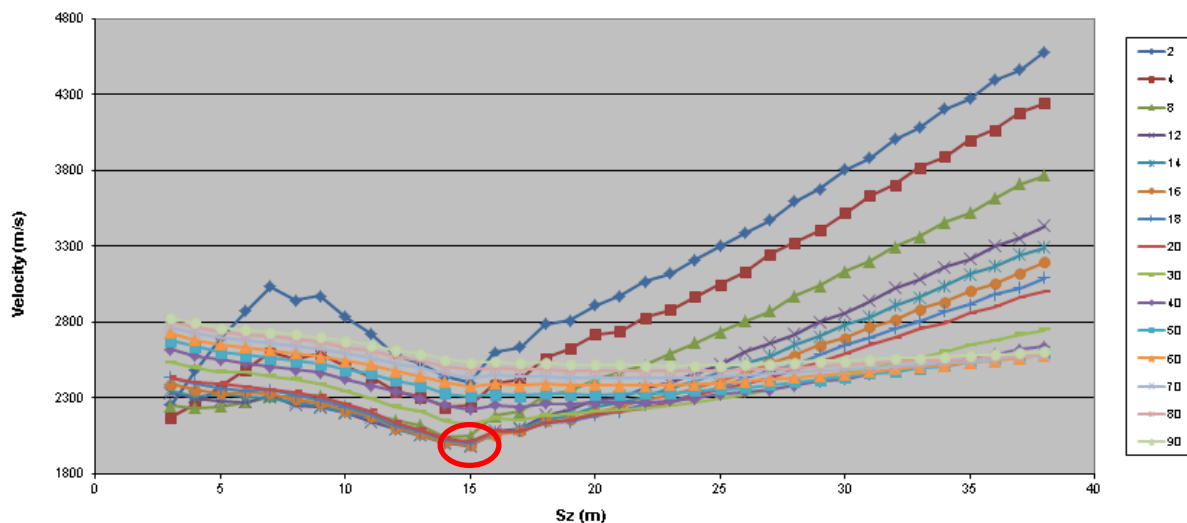
Σχήμα 5.10: Στον οριζόντιο άξονα το βάθος της πηγής και στον κάθετο η ταχύτητα, για επιλεγμένους δέκτες στην στην 2^η γεώτρηση. Ο αριθμός των σειρών αντιστοιχεί στο βάθος των δεκτών στην 2^η γεώτρηση.

Επιπλέον, δημιουργήθηκαν αντίστοιχα διαγράμματα αλλά με τα γεώφωνα που καταγράφουν τους χρόνους των πρώτων αφίξεων να βρίσκονται στην επιφάνεια (Σχήμα 5.11 και Σχήμα 5.12).

Στο διάγραμμα του Σχήματος 5.11 παρατηρείται επίσης ότι η μεγαλύτερη διακύμανση της διαφοράς των χρόνων εντοπίζεται στο βάθος των 15m, το οποίο αντιστοιχεί και στο πάχος του επιφανειακού στρώματος. Επιπρόσθετα, από το διάγραμμα του Σχήματος 5.12, η ελάχιστη υπολογιζόμενη τιμή της ταχύτητας (2002.63 m/s – κόκκινος κύκλος) εντοπίζεται για βάθος πηγής ίσο με 15 m (=πάχος 1^{ου} στρώματος) και προσεγγίζει ικανοποιητικά αυτήν του πρώτου στρώματος (2000m/s).



Σχήμα 5.11: Στον οριζόντιο άξονα το βάθος της πηγής και στον κάθετο η χρονική διαφορά των αφίξεων μεταξύ του ν-οστού και του ν-1 δέκτη (t-diff) για επιλεγμένους δέκτες στην επιφάνεια.



Σχήμα 5.12: Στον οριζόντιο άξονα το βάθος της πηγής και στον κάθετο η ταχύτητα, για επιλεγμένους δέκτες στην επιφάνεια. Ο αριθμός των σειρών αντιστοιχεί στο βάθος των δεκτών στην επιφάνεια.

5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 13: ΜΟΝΤΕΛΟ 1200X40 ΜΕ 2 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ ΜΕ ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ, 1 ΠΗΓΗ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕ ΓΕΩΦΩΝΑ ΣΤΙΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

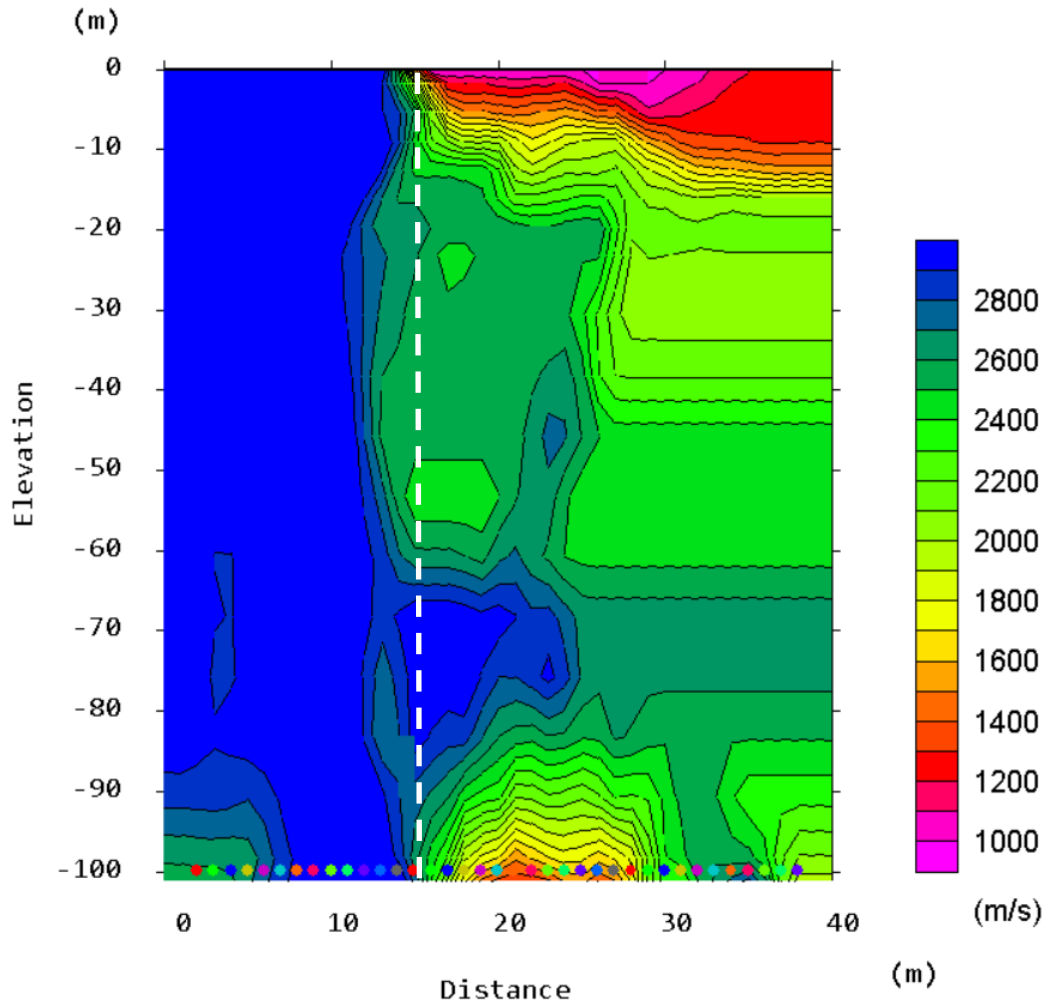
Το μοντέλο στην προσομοίωση 13 είναι αντίστοιχο με το μοντέλο της προσομοίωσης 12 (βλ. Σχήμα 5.1), αλλά οι ταχύτητες και η πυκνότητα των στρωμάτων είναι αντεστραμμένες. Δηλαδή το στρώμα με την μεγαλύτερη ταχύτητα είναι το υπερκείμενο (3000m/s). Αύτη η διάταξη έγινε με σκοπό να διερευνηθεί αν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα διαγράμματα της παραγράφου 5.1.3 ισχύουν και για την περίπτωση που το υπερκείμενο στρώμα έχει μεγαλύτερη ταχύτητα από το υποκείμενο.

Στη συνέχεια εξήχθησαν δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για σεισμική τομογραφία με το λογισμικό Plotrefa και για την δημιουργία πινάκων με χρόνους άφιξης από την ετεροσυσχέτιση συναρτήσεως της θέσης των γεωφώνων. Για να βελτιώσουμε την σεισμική τομογραφία αναζητάμε a-priori πληροφορίες που θα μπορούσαν να εισαχθούν στην αντίστροφη, π.χ. πάχη και ταχύτητες στρωμάτων.

5.2.1 Σεισμική Τομογραφία με το λογισμικό Plotrefa

No editing

Smooth model : # of layers = 18



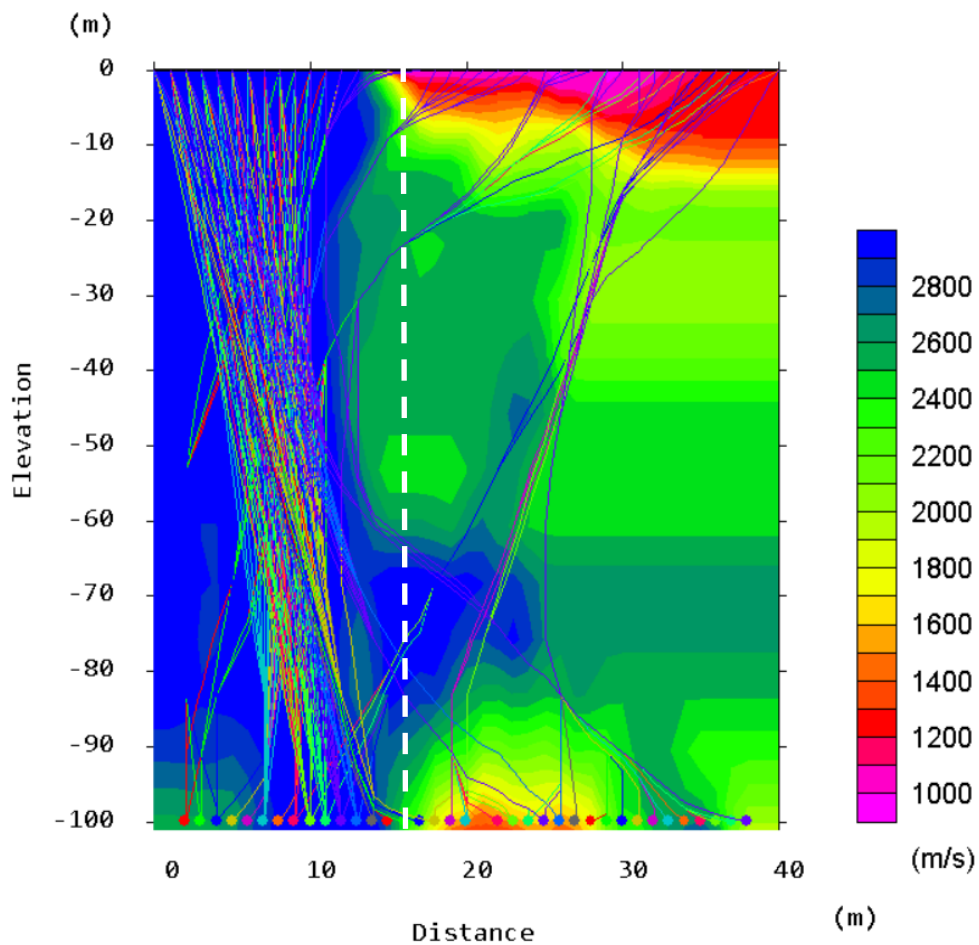
Σχήμα 5.15: Τελικό μοντέλο ταχύτητας για τα δεδομένα της προσομοίωσης 13 με ετεροσυσχέτιση κάθε δέκτη με α/α από 3 έως 39 (1^η γεώτρηση) με όλα τα γεώφωνα της 2^{ης} γεώτρησης. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος από την επιφάνεια ενώ ο κατακόρυφος στην απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων. Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται τα όρια των στρωμάτων

Οι ταχύτητες διάδοσης για τα στρώματα του μοντέλου που δημιουργήθηκε ήταν 3000 m/s για το πρώτο στρώμα, 2000 m/s για το βαθύτερο. Στα αποτελέσματα της σεισμικής τομογραφίας (Σχήμα 5.15) η ταχύτητα στο πρώτο στρώμα προσεγγίζει την πραγματική στο μεγαλύτερο μέρος του στρώματος αυτού.

Αντίθετα, η ταχύτητα στο δεύτερο στρώμα δεν προσεγγίζει την πραγματική (2000 m/s), ενώ δεν είναι εύκολος και ο διαχωρισμός της στρωματογραφίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι σεισμικές ακτίνες διαδίδονται από τα γεώφωνα-πηγές στα γεώφωνα-δέκτες μέσω του συντομότερου δρόμου, δηλαδή μέσω των στρωμάτων με τις μεγαλύτερες ταχύτητες (Σχήμα 5.16). Στο Σχήμα 5.16 απεικονίζεται η πορεία των σεισμικών ακτινών όπως αυτή προσδιορίστηκε από την σεισμική τομογραφία.

No editing

Smooth model : # of layers = 18

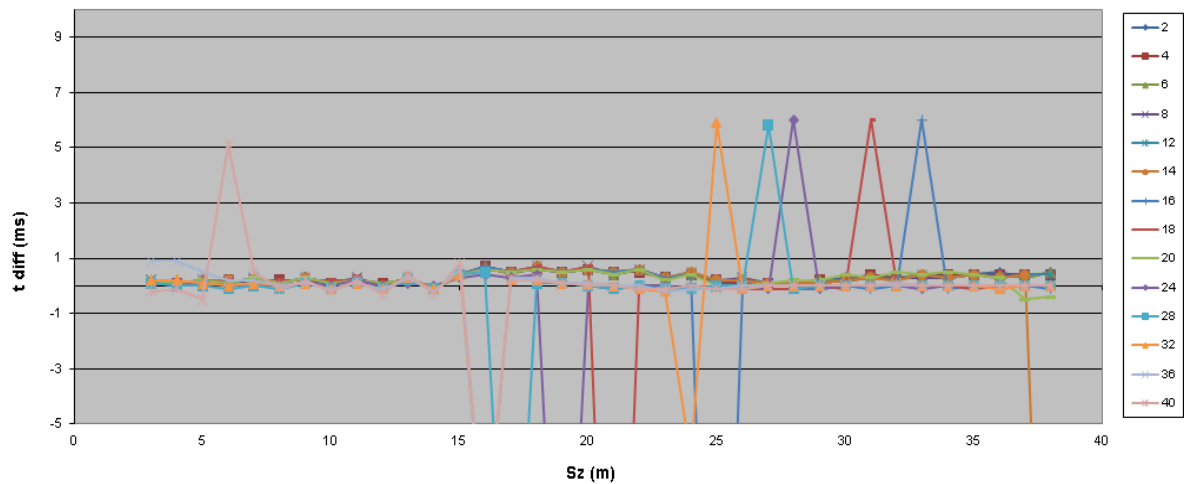


Σχήμα 5.16: Τελικό μοντέλο ταχύτητας για τα δεδομένα της προσομοίωσης 13 με ετεροσυσχέτιση κάθε δέκτη με α/α από 3 έως 39 (1^η γεώτρηση) με όλα τα γεώφωνα της 2^{ης} γεώτρησης. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος από την επιφάνεια ενώ ο κατακόρυφος στην απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων. Οι χρωματισμένες τεθλασμένες γραμμές αντιστοιχούν στις σεισμικές ακτίνες. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων. Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται τα όρια των στρωμάτων.

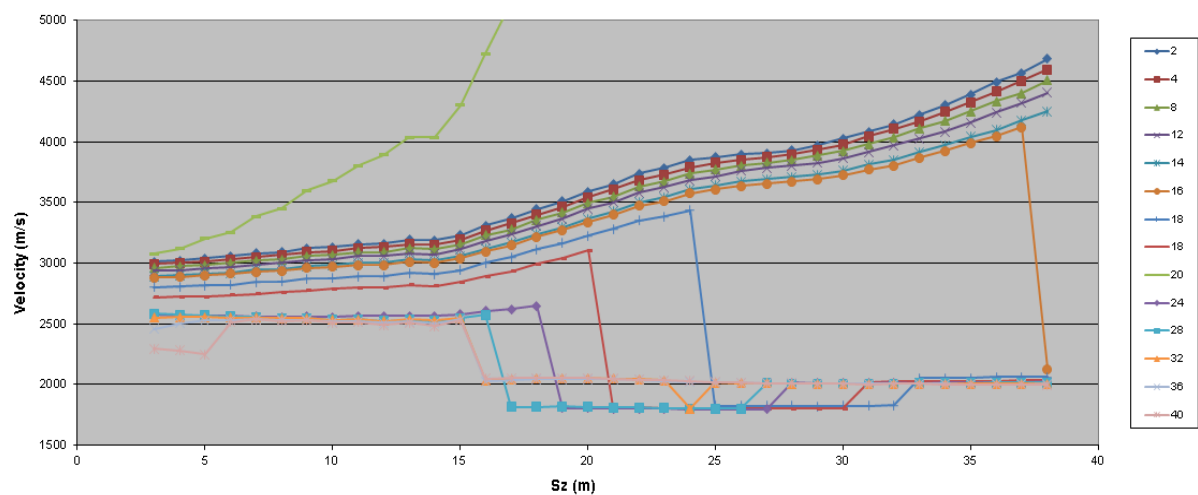
5.2.2 Αναλυτική Επεξεργασία και Διαγράμματα

Και σε αυτήν την προσομοίωση (13^η), δημιουργήθηκαν διαγράμματα με τον οριζόντιο άξονα να αντιστοιχεί στο RSz (βάθος πηγής σε m), συναρτήσει της χρονικής διαφοράς των αφίξεων μεταξύ του ν-οστού και του ν-1 δέκτη (t-difference) (Σχήμα 5.17). Επίσης υπολογίστηκε η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων υπό την θεώρηση ότι αυτά διαδίδονται ευθύγραμμα από την εικονική πηγή προς τον εκάστοτε δέκτη (Σχήμα 5.18).

Στο διάγραμμα του Σχήματος 5.17 δεν παρατηρείται κάποια ένδειξη που να αντιστοιχεί στο πάχος του επιφανειακού στρώματος (15m). Ομοίως, από το διάγραμμα του Σχήματος 5.18, δεν διαφαίνεται να προκύπτουν πληροφορίες για τις ταχύτητες των 2 στρωμάτων (2000 & 3000m/s).



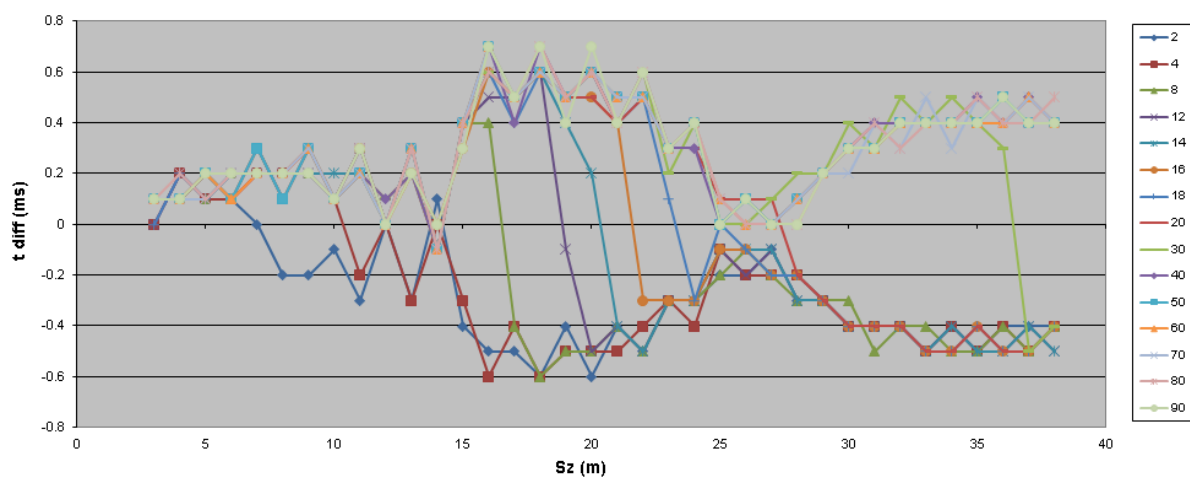
Σχήμα 5.17: Στον οριζόντιο άξονα το βάθος της πηγής και στον κάθετο η χρονική διαφορά των αφίξεων μεταξύ του ν-οστού και του ν-1 δέκτη (t-diff) για επιλεγμένους δέκτες στην 2^η γεώτρηση.



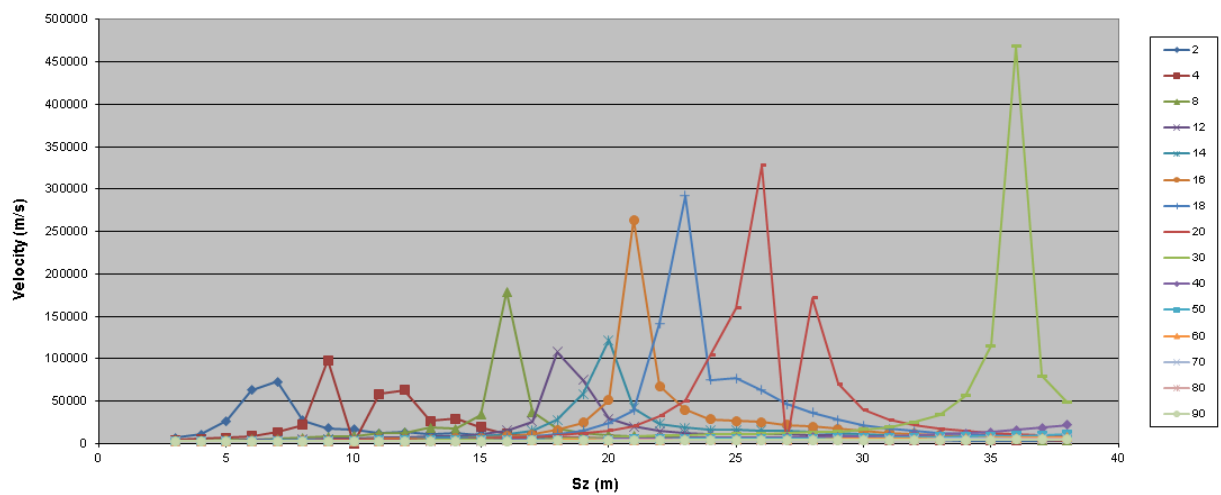
Σχήμα 5.18: Στον οριζόντιο άξονα το βάθος της πηγής και στον κάθετο η ταχύτητα, για επιλεγμένους δέκτες στην 2^η γεώτρηση. Ο αριθμός των σειρών αντιστοιχεί στο βάθος των δεκτών στην 2^η γεώτρηση.

Επιπλέον, δημιουργήθηκαν αντίστοιχα διαγράμματα αλλά με τα γεώφωνα που καταγράφουν τους χρόνους των πρώτων αφίξεων να βρίσκονται στην επιφάνεια (Σχήμα 5.19 και Σχήμα 5.20).

Στο διάγραμμα του Σχήματος 5.19 δεν παρατηρείται κάποια σαφής ένδειξη που να αντιστοιχεί στο πάχος του επιφανειακού στρώματος (15m). Ομοίως, από το διάγραμμα του Σχήματος 5.18, δεν διαφαίνεται να προκύπτουν πληροφορίες για τις ταχύτητες των 2 στρωμάτων (2000 & 3000m/s).



Σχήμα 5.19: Στον οριζόντιο άξονα το βάθος της πηγής και στον κάθετο η χρονική διαφορά των αφίξεων μεταξύ του ν-οστού και του ν-1 δέκτη (t-diff) για επιλεγμένους δέκτες στην επιφάνεια.



Σχήμα 5.20: Στον οριζόντιο άξονα το βάθος της πηγής και στον κάθετο η ταχύτητα, για επιλεγμένους δέκτες στην επιφάνεια. Ο αριθμός των σειρών αντιστοιχεί στο βάθος των δεκτών στην επιφάνεια.

Συμπερασματικά, στα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν για το μοντέλο των ανεστραμμένων ταχυτήτων δεν είναι διακριτή η αλλαγή της στρωματογραφίας (15m) και δεν προκύπτουν πληροφορίες για τις ταχύτητες των 2 στρωμάτων (2000 & 3000m/s).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ –ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την διεξαγωγή των προσομοιώσεων που έγιναν με σκοπό την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας σεισμικής τομογραφίας, προπορευόμενης της διάνοιξης σήραγγας. Με την ανάπτυξη μιας τέτοιας μεθοδολογίας θα είναι εφικτή η χαρτογράφηση των δομών του υπεδάφους ανάμεσα σε ερευνητικές γεωτρήσεις με την χρήση των δονήσεων που προκαλούνται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας ως σεισμικές πηγές.

Τα βασικότερα συμπεράσματα – παρατηρήσεις που προέκυψαν από την παρούσα εργασία συνοψίζονται ως εξής:

- Η μετακίνηση της σεισμικής πηγής προς οποιαδήποτε κατεύθυνση δεν φαίνεται να επηρεάζει τις πρώτες αφίξεις, καθώς τα γεώφωνα της κοντινότερης προς την πηγή γεώτρησης χρησιμοποιούνται σαν εικονικές σεισμικές πηγές. Ωστόσο, τα βέλτιστα αποτελέσματα προέκυψαν όταν θέση της πηγής να είναι αρκετά μακριά από τις γεωτρήσεις παρατήρησης, ώστε τα σεισμικά κύματα που παράγονται από την πηγή να καταφθάνουν σχεδόν επίπεδα στην διάταξη των γεωφώνων.
- Η προσθήκη απορροφητικών ορίων στην επιφάνεια του μοντέλου, μειώνει τα σφάλματα των πρώτων αφίξεων γιατί αποσβένουν ανεπιθύμητες τεχνητές ανακλάσεις και επιφανειακά κύματα. Αυτό όμως είναι κάτι που δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί σε πραγματικές συνθήκες πειράματος.
- Το διάστημα δειγματοληψίας της προσομοίωσης επηρεάζει την ακρίβεια υπολογισμού των πρώτων αφίξεων με την μέθοδο της ετεροσυσχέτισης. Ωστόσο, δεν είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας πηγής σφαλμάτων.
- Κατά τον υπολογισμό των χρόνων άφιξης των σεισμικών κυμάτων από τις μέγιστες (κατά απόλυτο) τιμές της ετεροσυσχέτισης (Cross Correlation), εισάγονται σημαντικά σφάλματα που οφείλονται κυρίως στην μεταβολή της κυματομορφής που υφίστανται τα σεισμικά κύματα κατά τη διάδοσή τους μεταξύ των σημείων παρατήρησης. Ειδικότερα, με την αυτόματη επιλογή των μέγιστων τιμών της ετεροσυσχέτισης, πολλές φορές προκύπτουν χρόνοι διαδρομής (π.χ. ανακλώμενων ή επιφανειακών κυμάτων) που δεν αντιστοιχούν στις ταχύτερες αφίξεις των σεισμικών κυμάτων. Η χειροκίνητη επιλογή των σωστών μέγιστων είναι αδύνατη λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων.

- Υπό προϋποθέσεις, η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να δώσει αποδεκτά αποτελέσματα μόνο για τμήματα του μοντέλου που εξετάστηκαν και όχι για το σύνολο αυτού.
- Στο μοντέλο 2 στρωμάτων αναδεικνύεται ο εντοπισμός της διεπιφάνειας για το ορθό μοντέλο όχι όμως για το ανάστροφο, καθώς τα σεισμικά κύματα επιλέγουν πάντα το μέσο με την μεγαλύτερη ταχύτητα

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα προτείνονται τα ακόλουθα:

- Μελέτη των παραμέτρων της ετεροσυσχέτισης (π.χ. ετεροσυσχέτιση τμημάτων των κυματομορφών) για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων υπολογισμού των χρόνων διαδρομής των σεισμικών κυμάτων.
- Να διερευνηθεί η χρήση διαφορετικών συνδυασμών θέσεων παρατήρησης, όπως για παράδειγμα εικονικές πηγές στην επιφάνεια και δέκτες σε γεώτρηση, για την βελτίωση της ακρίβειας υπολογισμού των χρόνων διαδρομής των σεισμικών κυμάτων και την ελαχιστοποίηση σφαλμάτων που προέρχονται από ετεροσυσχέτιση μεταξύ διαφορετικών ειδών σεισμικών κυμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Βαφείδης Α., 1996.** Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, “Σεισμική Τομογραφία Ανάκλασης”, Μονογραφία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
2. **Βαφείδης Α., 2011.** Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Ι: Σεισμικές Μέθοδοι, Σημειώσεις μαθήματος, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
3. **Brigham Oran E., 1974.** E-Systems, Inc., “The fast fourier transform” Prentice Hall; United States ed edition (1974)
4. **Bob Hardage, 2009.** Seismic-While-Drilling: Techniques using the Drill Bit as the Seismic Source Search and Discovery Article #40411 (2009) Posted May 6, 2009
5. **ΓΕΩΤΕΚ Α.Τ.Ε. 2018, NAB – ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ, ΙΛΙΟΝ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ,** τεχνική έκθεση.
6. **Dai N., Vafidis A., Kanasewich E., 1994.** Composite Absorbing Boundaries for the Numerical Simulation of Seismic Waves, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 1, pp. 185-191.
7. **Ivansson S., 1986** Seismic borehole tomography-theory and computational methods *Proc. IEEE*, 74, 328338, 1166.
8. **Jetschny S., 2010.** Seismic prediction and imaging of geological structures ahead of a tunnel using surface waves. Geophysical Prospecting, Volume 59, Issue Modeling Methods for Geophysical Imaging: Trends and Perspectives, Aug 2011, p. 934 - 946
9. **Κρητικάκης Γ., 2019.** Εγχειρίδιο χρήσης για την προσομοίωση της διάδοσης ελαστικών σεισμικών κυμάτων στις 2 διαστάσεις με τους αλγόριθμους PSV_SYNTHETICS, έκδοση 12.1, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
10. **Olivier G, Brenguier F, Campillo M., Lynch R, Roux P., 2015.** Body-wave reconstruction from ambient seismic noise correlations in an underground mine
11. **Παγιαλάκης Μ., 2014,** Προσομοίωση Δεδομένων Σεισμικής Ανάκλασης για το σχεδιασμό Διασκόπησης στο Θαλάσσιο Χώρο του Πατραϊκού Κόλπου, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
12. **Petronio L., Poletto F., 2002.** Seismic-while-drilling by using tunnel boring machine noise. Geophysics, vol. 67, no. 6 (November-December 2002); p. 1798–1809, 12 figs., 1 Table. 10.1190/1.1527080

13. **Petronio L., Poletto F., Schleifer, 2007.** *Interface prediction ahead of excavation front by the tunnel-seismic-while-drilling(TWSD) Method Geophysics*, vol. 72, no. 4 July-August 2007; p. g39–g44, 8 figs., 1 Table.10.1190/1.2740712
14. **Roux P., Sabra G.K., Gerstoft P.M., Kuperman W.A., Fehler C.M.,2005.** *P-waves from cross-correlation of seismic noise. Geophysical Research Letters*, vol. 32, l19303
15. **Σουπιός Π., 1997,** Διατριβή Ειδίκευσης, “Αντιστροφή των χρόνων άφιξης σε σεισμική τομογραφία μεταξύ γεωτρήσεων”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Εφαρμοσμένη Γεωφυσικής , Θεσσαλονίκη.
16. **Geometrics 2005 NAB, SeisImager/2DTM Manual, Version 3.1, Software Manual.**[20 May 2005]
17. **Yilmaz, Ö., 2001.** *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data (Investigations in Geophysics, No. 10)*
18. **Vafidis, A., 1988.** Supercomputer finite difference methods for seismic wave propagation, PhD thesis, University of Alberta.

Πηγές από διαδίκτυο:

1. Wikipedia contributors n.d., *Cross-correlation*. Available from:
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Cross-correlation&oldid=914175058\](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Cross-correlation&oldid=914175058)
[5 September 2019]
2. Wikipedia contributors n.d., *Snell's law*. Available from:
<https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Snell%27s law&oldid=914801702>
[4 September 2019]