

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε χώρο του Πολυτεχνείου Κρήτης και σε οικόπεδο της εταιρείας Χαλκιάδάκης, έναντι της ανατολικής πύλης του Πολυτεχνείου, στα πλαίσια της μελέτης του υπεδάφους με την μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας και της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων.

Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη της εναλλαγής των στρωμάτων του υπεδάφους και ο προσδιορισμός της ταχύτητας των διαμήκων (P-Waves) και εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (S-Waves).

Ο κύριος στόχος εντοπίζεται στον προσδιορισμό της ταχύτητας και του πάχους των επιφανειακών στρωμάτων. Παρατίθενται το θεωρητικό υπόβαθρο των μεθόδων επεξεργασίας των σεισμικών δεδομένων που εφαρμόστηκαν στην εργασία αυτή, οι βασικές αρχές της σεισμικής διάθλασης, γίνεται αναφορά στον πειραματικό εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε και αναφέρονται οι μεθοδολογίες εκτίμησης μηχανικών ιδιοτήτων (λόγος Poisson και μέτρο ελαστικότητας Young) από σεισμικά δεδομένα.

Πραγματοποιήθηκε πείραμα διάθλασης εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων (S-Waves), το οποίο δεν απέδωσε τα αναμενόμενα, πιθανότατα εξαιτίας του μικρού πάχους του επιφανειακού στρώματος, που είχε ως συνέπεια να μην διακρίνονται οι αφίξεις των διαμήκων και εγκαρσίων κυμάτων μεταξύ τους.

Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων, από τα οποία προκύπτει ότι η περιοχή του Πολυτεχνείου και το οικόπεδο της εταιρείας Χαλκιάδάκη κατατάσσονται στις κατηγορίες Γ και Β αντίστοιχα σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	iii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Γενικά.....	1
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	3
2.1 Περιγραφή της περιοχής μελέτης.....	3
3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ.....	9
3.1 Βασικές αρχές της μεθόδου.....	9
3.1.1 Περιορισμοί της μεθόδου της σεισμικής διάθλασης.....	14
3.2 Εκτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων.....	16
3.3 Μέθοδοι επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων.....	19
3.3.1 Μέθοδος Ray-tracing.....	19
3.3.2 Μέθοδος της σεισμικής τομογραφίας.....	20
4. ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ.....	27
4.1 Βασικές αρχές.....	27
4.2 Διατάξεις Πεδίου.....	30
4.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες διασποράς.....	31
5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΥΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	33
5.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	33
5.1.1 Εισαγωγή.....	33
5.1.2 Συλλογή σεισμικών δεδομένων.....	33
5.1.3 Πειραματικός εξοπλισμός	35
5.1.3.1 Σεισμική πηγή.....	35
5.1.3.2 Γεώφωνα.....	36
5.1.3.3 Καταγραφικά όργανα.....	36
5.1.4 Επιλογή των πρώτων αφίξεων με το πρόγραμμα Pickwin.....	37

5.1.5 Επεξεργασία δεδομένων με την μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας.....	38
5.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων με την μέθοδο της πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων.....	43
5.2.1 Μετασχηματισμός του κυματικού πεδίου.....	46
5.3 Σύγκριση - Υπέρθεση αποτελεσμάτων.....	49
5.4 Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων (Λόγος Poisson και μέτρο ελαστικότητας Young.....	53
5.4.1 Κατηγορίες εδαφικών σχηματισμών ως προς την σεισμική τους απόκριση, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8.....	54
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	58
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	59
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Σεισμικές καταγραφές.....	62

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η σεισμική τομογραφία έχει αποδειχθεί ένα πολύ αποτελεσματικό εργαλείο απεικόνισης του υπεδάφους σε πολλές εφαρμογές όπως τα τεχνικά έργα, η αρχαιολογία, οι υδάτινοι πόροι κτλ. Η ερμηνεία απαιτεί κάποια κατανόηση των περιορισμών αυτής της μεθόδου εξερεύνησης.

Υπάρχουν τρεις ουσιαστικές απαιτήσεις, για μια επιτυχή σεισμική τομογραφική έρευνα:

- Δεδομένα υψηλής συχνότητας (μικρού μήκους κύματος) για να απεικονισθούν δομές μικρού σχετικά βάθους.
- Καλή αναλογία του σήματος σε σχέση με το θόρυβο.

Πρωταρχικό ρόλο στις γεωφυσικές μελέτες έχουν κάποιες φυσικές ιδιότητες όπως η πυκνότητα, η αγωγιμότητα και η σεισμική ταχύτητα οι οποίες χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν το πάχος και τον βαθμό κορεσμού των γεωλογικών σχηματισμών.

Απο την χρήση των σεισμικών μεθόδων δημιουργούνται γεωφυσικές τομές, χρήσιμες στην λεπτομερή απεικόνιση των εδαφικών σχηματισμών.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την κατάλληλη εφαρμογή της γεωφυσικής μεθόδου είναι η γνώση των γεωλογικών συνθηκών στην περιοχή μελέτης. Παρακάτω παρατίθενται κάποιες εφαρμογές της σεισμικής τομογραφίας.

Εφαρμογή της σεισμικής διάθλασης στην επιλογή θέσης για την δημιουργία λιμνοδεξαμενής στην Κουντούρα, Δήμος Πελεκάνου, Νομός Χανίων, Βαφείδης Α, Ανδρονικίδης Ν, Κρητικάκης Γ, Hamdam Η, Μανούτσογλου Ε, Οικονόμου Ν, Δασύρας Α, Κουκαδάκη Μ, Κουμάκης Ν, Λαμπαθάκης Σ, Παπακωνσταντίνου Κ, Σπανουδάκης Ν (www.geo.auth.gr/ege2004/articles_vol_3.htm)

Εφαρμογή σεισμικής τομογραφίας κατά την διαδικασία κατασκευής του ΜΕΤΡΟ στην περιοχή Κεραμικού, 1996, Καθηγητής Τσόκας, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ (http://soupios.chania.teicrete.gr/research_projects.htm).

Σεισμικά διάθλασης μικρού βάθους και μεγάλης διακριτικής ικανότητας στην περιοχή της Νίκαιας στα πλαίσια κατασκευής Ολυμπιακών εγκαταστάσεων (ΑΘΗΝΑ 2004), ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Τ.Ε, Νοέμβριος 1999.

Σεισμικά διάθλασης μικρού βάθους και μεγάλης διακριτικής ικανότητας στην περιοχή του Βύρωνα στην Αθήνα στα πλαίσια κατασζευής υπαίθριου κολυμβητηρίου, ΥΔΡΟΕΡΕΥΝΑ Α.Ε, Μάρτιος 2000.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Περιγραφή της περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης λαμβάνει χώρα στη περιοχή Ακρωτηρίου στον νομό Χανίων και πιο συγκεκριμένα απέναντι απο την ανατολική πύλη της Πολυτεχνειούπολης (σε οικόπεδο της εταιρείας Χαλκιάδακη) και πλησίον του Γενικού Τμήματος. Στην περιοχή μελέτης εμφανίζεται μαργαϊκός ασβεστόλιθος. Απο την Γεωλογική Χαρτογράφηση κλίμακας 1:50.000 του ΙΓΜΕ φύλλο ΧΑΝΙΑ εμφανίζονται οι παρακάτω σχηματισμοί:

ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ (ΟΛΟΚΑΙΝΟ)

- **Αλλουβιακές προσχώσεις (Qal1):** Πηλοί, άργιλλοι, άμμοι και χαλίκια. Οι αποθέσεις αυτές είναι χαλαρές και μικρού πάχους (πάχος μικρότερο του ενός μέχρι και μερικά μέτρα).
- **Προσχωματικές αποθέσεις ερυθρογής (Qtr):** Παρατηρούνται εντός καρστικών εγκοίλων.

ΜΕΙΟΚΑΙΝΟ

- **Μάργες (Mim):** Κιτρινόφαιες έως λευκοκίτρινες, πολλές φορές εναλλασσόμενες με στρώματα μαργαϊκών ψαμμιτών και πλακώδων μαργαϊκών ασβεστολίθων ενώ εγκλείουν απολιθώματα θαλάσσιων μαλακίων.
- **Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος (Mik):** Συμπαγής, λευκοκίτρινος έως λευκότεφρος, με θαλάσσια απολιθώματα (ελασματοβράχια, εχινόδερμα, βρυόζωα, εχίνους, θραύσματα οστρακόδερμων και πλούσια μικροπανίδα).
- **Ψαμμιτομαργαϊκόν κροκαλοπαγές :** συμπαγές εγκλείσματα κροκάλας κυρίως μεσοζωικών ασβεστολίθων, πυριτολίθων και κρυσταλλικών πετρωμάτων (σχιστολίθων, χαλαζιτών κ.τ.λ).

ΤΡΙΑΔΙΚΟ – ΚΡΗΤΙΔΙΚΟ

- **Ζώνη Τρίπολης**
- **Ασβεστόλιθοι (T_{R-kk}):** Συμπαγείς, λευκόφαιοι έως υποκύανοι, μικροκρυσταλλικοί έως στιφροί συνήθως με θραύσματα ρουδιστών, ενίοτε λατυποπαγείς, κατά τόπους δολομιτιωμένοι και ισχυρά καρστικοποιημένοι.

Ενδεχομένως να περιλαμβάνονται και κατώτερα μέλη, ιουρασικής έως τριαδικής ηλικίας, χωρίς αυτό να επιβεβαιώνεται παλαιοντολογικά.

➤ **Ερυθροκάστανος κερατόλιθος.**



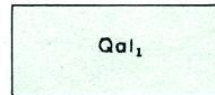
Σχήμα 2.1. Απόσπασμα του γεωλογικού χάρτη «Φύλλο Χανιά» όπου σε πλαίσιο απεικονίζεται η περιοχή μελέτης (πηγή Ι.Γ.Μ.Ε.), στα σχήματα 2.1α και 2.1β παρατίθενται τα υπομνήματα του γεωλογικού χάρτη).

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

ΟΛΟΚΑΙΝΟΝ

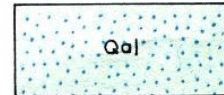
Άλλουβιακά προσχώσεις : πηλοί, άργιλλοι, άμμοι και χάλικες. Χαλαρά, μικρού πάχους (άπό εκατοστών τινών του μέτρου μέχρι και ολίγων μέτρων).



Προσχωματικά αποθέσεις έρυθρογής : έντός καρστικών έγκοίλων.



Θαλάσσιαι αποθέσεις : άμμώδης πηλός και χάλικες.



Πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων : αποθέσεις μικρού πάχους, όχι μεγαλύτερου των 2 μέτρων. Συνήθως ασύνδετα ή χαλαρώς συνδεδεμένα δι' άμμώδους πηλού.



ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟΝ

Παλαιότερα διλουβιακή άναβαθμής : χαλαράι αποθέσεις έρυθροκαστανοχρόων άμμωδών άργίλλων, εις τάς όποιás έγκλείονται, εις πολύ μεγάλην άναλογία, ψηφίδες και κροκάλοι, κυρίως μεσοζωϊκών άσβεστολίθων, πυριτολίθων, σπανιώτερον δέ έκρηξιγενών πετρωμάτων.

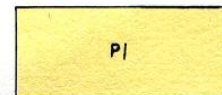


Παλαιότερα θαλασσία άναβαθμής : ύψους 2-3 μέτρων, έκ συνεκτικού ψαμμίτου.



ΠΛΕΙΟΚΑΙΝΟΝ

Μαργαϊκός ψαμμίτης : σαθρός έγκλείων θαλάσσια άπολιθώματα μαλακίων, (*Ostrea crassissima* κλπ.)



Μικροπανις :

Σχήμα 2.1α: Υπόμνημα του γεωλογικού χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε.

ΜΕΙΟΚΑΙΝΟΝ

Μάργαι: κιτρινόφαιαι έως λευκοκίτριναι, πολλάκις εἰς ἐναλλασσόμενα στρώματα μετὰ μαργαϊκῶν ψαμιτιῶν καὶ πλακωδῶν μαργαϊκῶν ἀσβεστολίθων, ἐγκλείουσai ἀπολιθώματα θαλασσίων μαλακίων, (*Ostrea crassissima* κλπ.)

Mim

Μαργαϊκὸς ἀσβεστόλιθος: συμπαγὴς λευκοκίτρινος ἕως λευκό-τεφρος, ἐγκλείων θαλάσσια ἀπολιθώματα, Ἐλασματοβραχίων, Ἐχινόδερμων, Βρυζῶων, Ἐχίνων καὶ θραύσματα ὀστρακοδέρμων καθὼς ἐπίσης καὶ τὴν κατωτέρω μικροπανίδα.

Mik

Ψαμιτομαργαϊκὸν κροκαλοπαγὲς: συμπαγὲς, ἐγκλείων κροκάλας κυρίως μεσοζωϊκῶν ἀσβεστολίθων, πυριτολίθων καὶ κρυσταλλικῶν πετρωμάτων (σχιστολίθων, χαλαζιτῶν κλπ.)

Mic

ΤΡΙΑΔΙΚΟΝ (:) - ΚΡΗΤΙΔΙΚΟΝ

ΖΩΝΗ ΤΡΙΠΟΛΕΩΣ

Ἀσβεστόλιθοι: συμπαγεῖς, λευκοφαιοὶ ἕως ὑποκύανοι, μικροκρυσταλλικοί ἕως στιφοὶ συνήθως μεθ' θραύσματα ρουδιστῶν, ἐνίοτε λατυποπαγεῖς, κατὰ τόπους δολομιτιωμένοι, ἰσχυρῶς ἀποκαρστιωμένοι. Ἐνδεχομένως οὗτοι νὰ περιλαμβάνουν καὶ κατώτερα μέλη, ἰουρασικῆς ἕως τριαδικῆς ἡλικίας μὴ ἀποδειχθείσης πάντως, παλαιοντολογικῶς.

R-kk

Ἐρυθροκαστανόχρους κερατόλιθος.

R-kch

ΠΑΛΑΙΟΖΩΪΚΟΝ — ΜΕΣΟΖΩΪΚΟΝ (:)

ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟΝ ΥΠΟΒΑΘΡΟΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΣΧΙΣΤΩΔΟΥΣ ΚΡΗΤΗΣ

Ἀσβεστόλιθοι: συμπαγεῖς, κρυσταλλικοί, λευκοὶ ἕως λευκοφαιοί, κατὰ τόπους ὑπομέλανες, κυανόφαιοι, λεπτοπλακώδεις, ἐνίοτε δολομιτικοὶ ἢ καὶ κατὰ τόπους δολομιτῶν τοῦ αὐτοχθόνου συστήματος τῆς νήσου Κρήτης, μὴ προσδιορισθείσης ἡλικίας, πιθανόν παλαιοζωϊκῆς ἢ ἕως καὶ μεσοζωϊκῆς.

Pz-Mzk

Κρυσταλλικοὶ σχιστόλιθοι τοῦ αὐτοχθόνου συστήματος τῆς νήσου Κρήτης (φυλλίται, μαρμαρυγιοί, γραφιτικοί, σερικιτικοί, χαλαζιτικοί, χλωριτικοί καὶ λαμπυρίζοντες σχιστόλιθοι), κατὰ τόπους ἐγκλείοντες πλακώδεις μέλανας ἀσβεστολίθους. Ὑποπράσινοι περιδοτῆται (π), ἐξαλλοιωμένοι εἰς σερπεντίνην, ἐνίοτε μεθ' φλεβίδια ἀμιάντου. Συμπαγὴς ὑποπρασινίζων διαβάσης (δ)

Pz-Mzsh

Σχήμα 2.1β: Υπόμνημα του γεωλογικού χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι γραμμές μελέτης για την περιοχή της Πολυτεχνειούπολης και της περιοχής του οικοπέδου Χαλκιαδάκη.



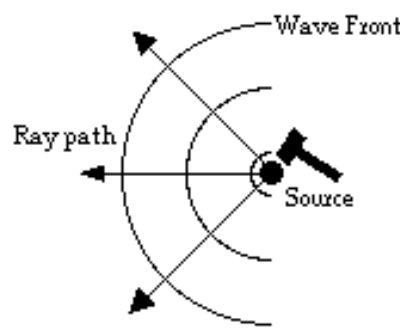
Σχήμα 2.2 : Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής μελέτης στον χώρο της Πολυτεχνειούπολης και στο οικόπεδο καταστήματος Χαλκιαδάκη.

3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

3.1 Βασικές αρχές της μεθόδου

Η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης δίνει ακριβή αποτελέσματα όταν αυξάνεται η σεισμική ταχύτητα με το βάθος.

Παράγονται τεχνητά σεισμικά κύματα με την βοήθεια μίας τεχνητής πηγής (πίπτων βάρος, πρόσκρουση σφύρας στο έδαφος κτλ.), τα οποία ταξιδεύουν μέσα στο έδαφος (σχήμα 3.1) και καταγράφονται στην επιφάνεια από ειδικά σεισμόμετρα (γεώφωνα).



Σχήμα 3.1: Δημιουργία τεχνητά παραγόμενων σεισμικών κυμάτων και διάδοση αυτών στο μέσο.

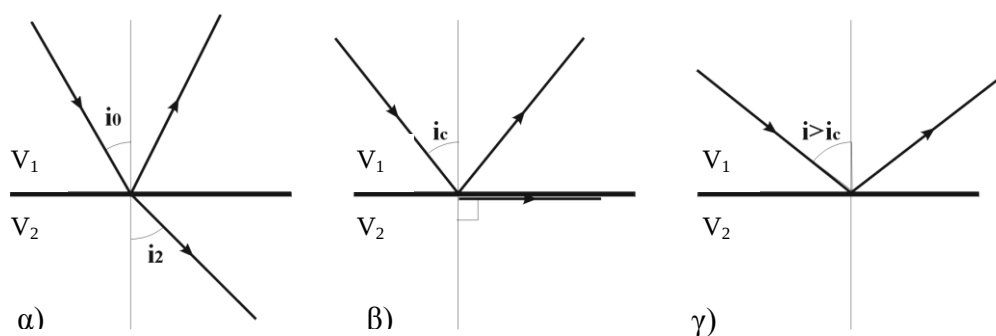
Τα σεισμικά κύματα υφίστανται διαδοχικές διαθλάσεις στις διαχωριστικές επιφάνειες ή σε μέσο όπου η ταχύτητα μεταβάλλεται με το βάθος, με αποτέλεσμα την αλλαγή της πορείας της σεισμικής ακτίνας. Η γωνία πρόσπτωσης, i_0 , η γωνία διάθλασης i_2 , και οι ταχύτητες V_1 και V_2 στα δύο επιφανειακά στρώματα συνδέονται μέσω του νόμου του Snell (σχήμα 3.2α) :

$$p = \frac{\sin(i_0)}{V_1} = \frac{\sin(i_2)}{V_2} \quad (3.1)$$

όπου p είναι η παράμετρος της σεισμικής ακτίνας. Η σεισμική ακτίνα προσπίπτει στην διαχωριστική επιφάνεια υπό ορική γωνία, όταν ισχύει $V_2 > V_1$ και η διαθλώμενη ακτίνα έχει διεύθυνση παράλληλη προς τη διαχωριστική επιφάνεια (Σχήμα 3.2β). Σε μια τέτοια περίπτωση ο νόμος του Snell τροποποιείται ως εξής:

$$\sin(i_c) = \frac{V_1}{V_2} \quad (3.2)$$

Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της ορικής γωνίας, παρατηρείται ολική ανάκλαση (Σχήμα 3.2γ). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι βασική προϋπόθεση δημιουργίας ορικά διαθλώμενων κυμάτων είναι οι ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων να αυξάνουν από τους ρηχότερους στους βαθύτερους σχηματισμούς.

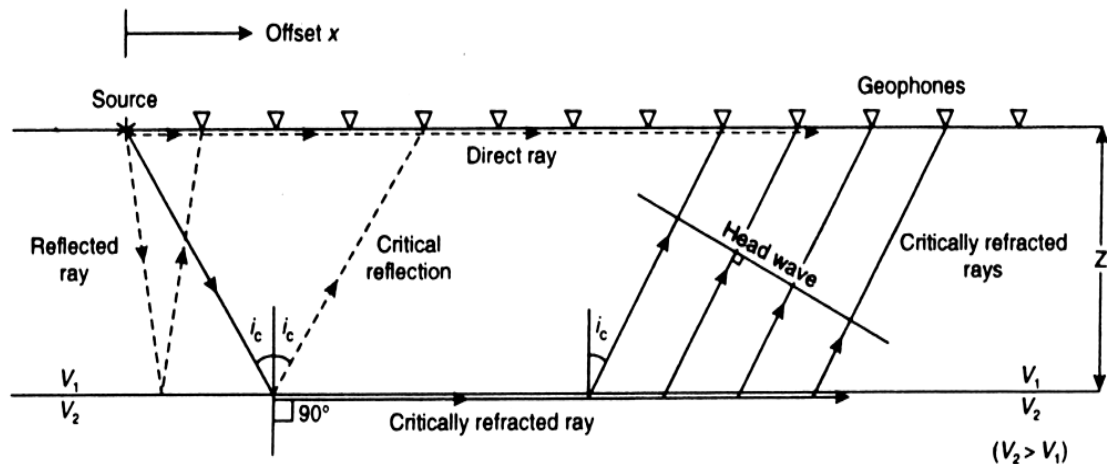


Σχήμα 3.2: Σχηματική παράσταση των τριών περιπτώσεων πρόσπτωσης σεισμικής ακτίνας σε διεπιφάνεια. Κατά την πρόσπτωση υπό γωνία α) μικρότερη της ορικής δημιουργούνται ανακλώμενα και διαθλώμενα κύματα, β) ίση με την ορική δημιουργούνται ανακλώμενα και μετωπικά κύματα και γ) με γωνία μεγαλύτερη της ορικής παρατηρείται ολική ανάκλαση.

Έστω σεισμική ακτίνα η οποία προσπίπτει σε διαχωριστική επιφάνεια υπό ορική γωνία. Τότε το διαθλώμενο κύμα διαδίδεται στο δεύτερο στρώμα παράλληλα προς τη διαχωριστική επιφάνεια.

Σύμφωνα με την αρχή του Huygens, κάθε σημείο του διαθλώμενου μετώπου κύματος αποτελεί δευτερεύουσα πηγή σεισμικών κυμάτων.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα σεισμικά κύματα τα οποία προέρχονται από τις δευτερεύουσες αυτές πηγές και αναδύονται στο πρώτο στρώμα (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3: Σχηματική παράσταση της δημιουργίας των μετωπικών κυμάτων (Reynolds, 1997).

Η γωνία των αναδύομένων προς την επιφάνεια σεισμικών ακτίνων με την κάθετο στην διαχωριστική επιφάνεια είναι ίση με την ορική γωνία. Αυτά τα αναδύομενα σεισμικά κύματα ονομάζονται μετωπικά κύματα.

Τα σεισμικά κύματα που καταγράφονται πρώτα στις θέσεις των γεωφώνων είναι τα απευθείας και τα μετωπικά κύματα (Σχήμα 3.3).

Τα απευθείας κύματα καταγράφονται πρώτα στα γεώφωνα, που βρίσκονται μέχρι ορισμένη απόσταση x_c από το σημείο της έκρηξης. Η απόσταση αυτή ονομάζεται *ορική απόσταση* και δίνεται από τη σχέση (Βαφείδης, 1993):

$$x_c = 2 \cdot z_1 \cdot \sqrt{\frac{V_2 + V_1}{V_2 - V_1}} \quad (3.3)$$

όπου z_1 είναι το πάχος του πρώτου στρώματος. Αν x είναι η απόσταση κάποιου γεωφώνου από την πηγή, ο χρόνος διαδρομής, t_1 , των απευθείας κυμάτων θα είναι :

$$t_1 = \frac{x}{V_1} \quad (3.4)$$

Ο χρόνος διαδρομής των μετωπικών κυμάτων, δίνεται από την σχέση:

$$t = \frac{x}{V_2} + \frac{2z_1 \sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 V_2} \quad (3.5)$$

η οποία στο διάγραμμα $x-t$ ευθεία γραμμή της οποίας η κλίση είναι $1/V_2$ και η τομή της με τον άξονα των χρόνων δίνεται από τον δεύτερο όρο της παραπάνω σχέσης.

Στην περίπτωση δύο οριζόντιων στρωμάτων, οι καταγραφές που θα προκύψουν από τη σεισμική διάθλαση θα έχουν τη μορφή του Σχήματος 3.4.

Παρατηρείται ότι ο χρόνος διαδρομής των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων είναι ανάλογος της απόστασης. Συνεπώς, η καμπύλη χρόνων διαδρομής των κυμάτων αυτών θα είναι ευθεία γραμμή. Οι καμπύλες των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων παριστάνονται με την OC και την CD αντίστοιχα στο Σχήμα 3.4.

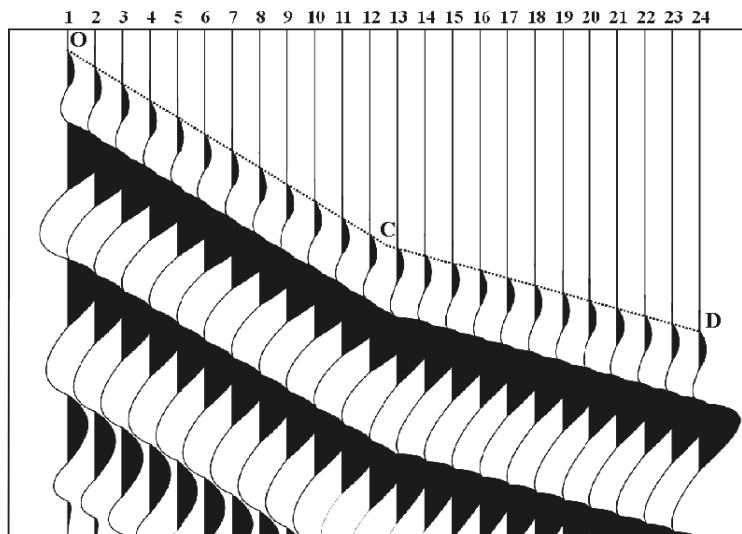
Γενικά, η διαδικασία υπολογισμού του πάχους και της σεισμικής ταχύτητας των στρωμάτων από τις πρώτες αφίξεις των σεισμικών κυμάτων, για δομή δύο οριζόντιων στρωμάτων ακολουθεί τα εξής βήματα (Βαφείδης, 1993) :

- Σε διάγραμμα $t - x$ τοποθετούνται οι μετρήσεις του χρόνου διαδρομής (πρώτες αφίξεις) και της απόστασης πηγής – γεωφώνου.
- Επιλέγονται τα σημεία που βρίσκονται σε ευθεία η οποία ξεκινά από την αρχή των αξόνων (ευθεία OC). Από την κλίση αυτής της ευθείας υπολογίζεται η σεισμική ταχύτητα στο επιφανειακό στρώμα ($V_1 = 1 / \text{κλίση ευθείας απευθείας κυμάτων}$).
- Προσδιορίζεται η κλίση της ευθείας η οποία περνά από τα υπόλοιπα σημεία (μετωπικά κύματα) αλλά και η τομή της με τον άξονα των χρόνων (χρόνος συνάντησης $T_2(0)$, σχήμα 3.5). Από την κλίση της ευθείας των μετωπικών κυμάτων, υπολογίζεται η σεισμική ταχύτητα στο δεύτερο στρώμα ($V_2 = 1 / \text{κλίση ευθείας μετωπικών κυμάτων}$).
- Προσδιορίζεται η ορική γωνία i_c από τη σχέση (3.2) : $\sin(i_c) = \frac{V_1}{V_2}$
- Υπολογίζεται το πάχος του επιφανειακού στρώματος z_1 από τη σχέση :

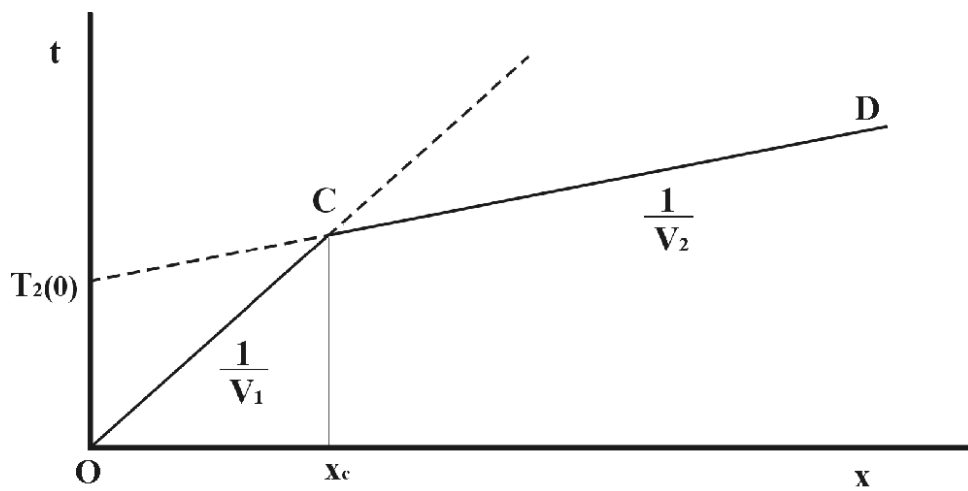
$$z_1 = \frac{T_2(0) \cdot V_1}{2 \cos(i_c)} \quad (3.6)$$

όπου $T_2(0)$ είναι ο χρόνος συνάντησης και ισούται με το άθροισμα των χρόνων καθυστέρησης του σεισμικού κύματος στους κλάδους της σεισμικής ακτίνας που διαδίδονται στο επιφανειακό στρώμα.

CHAN



Σχήμα 3.4: Σεισμική καταγραφή των όπου οι πρώτες αφίξεις (διακεκομμένη γραμμή) αντιστοιχούν σε απευθείας (OC) και μετωπικά κύματα (CD).



Σχήμα 3.5: Καμπύλες χρόνου διαδρομής των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων.

3.1.1 Περιορισμοί της μεθόδου σεισμικής διάθλασης

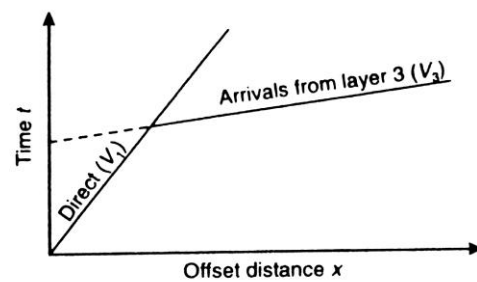
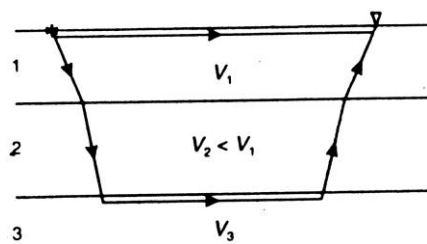
Θεωρητικά η εύρεση του πάχους των στρωμάτων και της ταχύτητας με την μέθοδο της σεισμικής διάθλασης είναι εύκολη. Η δυσκολία όμως που υπάρχει πρακτικά έγκειται στο γεγονός ότι η μέθοδος αυτή αδυναμεί να εντοπίσει ενδιάμεσο στρώμα μικρού πάχους.

Συνέπεια της αδυναμίας αυτής είναι ο εσφαλμένος προσδιορισμός της ταχύτητας και η λανθασμένη εκτίμηση του πάχους ορισμένων στρωμάτων.

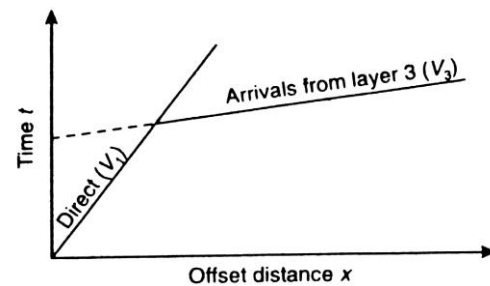
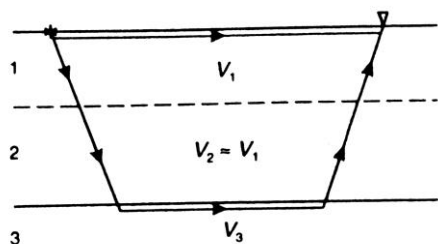
Κάποιοι παράγοντες που οδηγούν σε λάθος εκτιμήσεις αναφέρονται παρακάτω:

- Όταν η ταχύτητα στο υπερκείμενο στρώμα είναι μεγαλύτερη από αυτή στο υποκείμενο (Σχήμα 3.6), τότε η σεισμική ακτίνα (σύμφωνα με το νόμο του Snell) αποκλίνει από την διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των δύο στρωμάτων, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η δημιουργία μετωπικών κυμάτων.
- Όταν κάποιο στρώμα έχει ταχύτητα περίπου ίδια με την ταχύτητα στο αμέσως υπερκείμενο στρώμα (Σχήμα 3.7), τότε στην περίπτωση αυτή δεν είναι δυνατή η δημιουργία μετωπικών κυμάτων λόγω μικρής αντίθεσης της ταχύτητας στα δύο στρώματα.
- Όταν κάποιο στρώμα έχει πολύ μικρό πάχος συγκριτικά με το υποκείμενο και το υπερκείμενό του (Σχήμα 3.8), συνεπάγεται ότι τα μετωπικά κύματα από το υποκείμενο στρώμα καταγράφονται πριν από τα αντίστοιχα κύματα του λεπτού στρώματος.

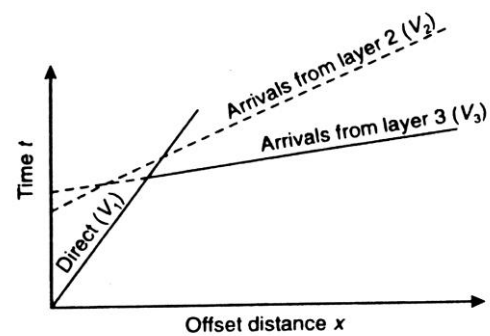
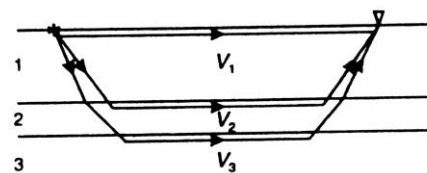
Λόγω των παραπάνω η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης δίνει έγκυρα αποτελέσματα μόνο όταν η ταχύτητα σε κάθε στρώμα είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την ταχύτητα στο υπερκείμενο στρώμα και όταν το πάχος των στρωμάτων είναι αρκετά μεγάλο.



Σχήμα 3.6 : Απουσία μετωπικού κύματος στο δεύτερο στρώμα ($V_2 < V_1$) (Raynolds, 1997).



Σχήμα 3.7 : Απουσία μετωπικού κύματος στο δεύτερο στρώμα ($V_2 \approx V_1$) (Raynolds, 1997).



Σχήμα 3.8 : Μεταγενέστερη άφιξη μετωπικού κύματος από το δεύτερο στρώμα λόγω μικρού πάχους (Raynolds, 1997).

3.2 Εκτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων

Οι παραμορφώσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την διάδοση των σεισμικών κυμάτων είναι της τάξεως των $10^{-6} - 10^{-4} \%$, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα γεωυλικά συμπεριφέρονται ως ελαστικά σώματα. Εφαρμόζοντας τον νόμο του Hooke και λαμβάνοντας υπόψη τις σταθερές του Lamé (Sheriff and Geldart, 1995) προκύπτουν οι ελαστικές σταθερές των γεωυλικών.

Οι βασικές σχέσεις που συνδέουν τις ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων χώρου με τις σταθερές του Lamé, αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για τον μετέπειτα προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών. Οι σχέσεις αυτές εκφράζονται ως εξής (Sheriff and Geldart, 1995) :

$$\alpha = V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (3.7)$$

$$\beta = V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3.8)$$

όπου ρ η πυκνότητα, V_p η ταχύτητα των διαμήκων σεισμικών κυμάτων, V_s η ταχύτητα των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων και λ, μ είναι οι σταθερές του Lamé.

Στην πράξη, εκτός από τις βασικές σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης, σταθερών Lamé και ελαστικών παραμέτρων με τις ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, υπάρχει πληθώρα παράγωγων σχέσεων με τις οποίες, συνδυάζοντας τις γνωστές παραμέτρους υπολογίζονται οι άγνωστες.

Οι ταχύτητες των κυμάτων χώρου V_p, V_s ως απ' ευθείας ένδειξη της ακαμψίας (υψηλές ταχύτητες αντιστοιχούν σε σχηματισμούς με μεγάλες ακαμψίες), καθώς και άλλων ιδιοτήτων του υλικού, μπορούν συνδυαζόμενες μεταξύ τους, να δώσουν τα μέτρα γνωστών – στη γεωτεχνική μηχανική – παραμέτρων. Οι πλέον χρήσιμες από αυτές είναι ο λόγος Poisson ν , το μέγιστο μέτρο διάτμησης G_0 , το μέτρο ελαστικότητας του Young E , το μέτρο περιορισμένης συμπίεσης M και το μέτρο ελαστικότητας όγκου (bulk modulus) k .

Συνδυάζοντας την σχέση

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (3.9)$$

με τις (3.7) και (3.8) προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις :

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{1-\nu}{\frac{1}{2}-\nu}} \quad (3.10)$$

ή

$$\nu = \frac{\left[\frac{1}{2} \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]}{\left[\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]} \quad (3.11)$$

Οι σχέσεις αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ν , όταν οι V_p και V_s είναι γνωστές από επιτόπου μετρήσεις, συσχετίσεις με γεωτεχνικές παραμέτρους ή εργαστηριακές δοκιμές.

Το μέτρο διάτμησης G_0 (ή μ) και η μεταβολή του με την παραμόρφωση συνδέεται άμεσα με τον προσδιορισμό της V_s (από επιτόπου ή εργαστηριακές δοκιμές):

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (3.12)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα και ισούται με γ_t/g , όπου γ_t και g είναι το ειδικό βάρος του υλικού και η επιτάχυνση της βαρύτητας αντίστοιχα. Η τιμή του G_0 χρησιμοποιείται άμεσα από τους μηχανικούς, στις σχέσεις υπολογισμού των ελαστικών σταθερών που χρησιμεύουν στη μελέτη θεμελίωσης των κατασκευών.

Εφόσον η τιμή του λόγου Poisson είναι γνωστή, τότε μπορεί να υπολογισθεί και το μέτρο ελαστικότητας:

$$E = 2G_0(1 + \nu) \quad (3.13)$$

ή σε συνδυασμό με την εξίσωση (3.12) γράφεται:

$$E = 2\rho V_s^2 (1 + \nu) \quad (3.14)$$

Η γνώση του μέτρου E , κρίνεται απαραίτητη για τον υπολογισμό των ελατηριακών σταθερών, στα έργα πολιτικού μηχανικού.

Σε μέσο, όπου η ύλη συμπιέζεται σε δύο πλευρικές διευθύνσεις, ο λόγος της

διαμήκους τάσης προς τη διαμήκη παραμόρφωση, καλείται *μέτρο περιορισμένης συμπίεσης* και ορίζεται με τη σχέση (Ραπτάκης, 1995) :

$$M = \rho Vp^2 \quad (3.15)$$

Το μέτρο M , ορίζεται σε σχέση με το μέτρο Young και το λόγο Poisson, οπότε η (3.15) γράφεται με τη μορφή:

$$M = \frac{(1 - \nu)E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (3.16)$$

Επίσης, ο λόγος της υδροστατικής τάσης προς την ογκομετρική παραμόρφωση, καλείται *μέτρο ελαστικότητας όγκου (bulk modulus)* και ορίζεται με τη σχέση:

$$k = M - \frac{4}{3} G_0 \quad (3.17)$$

Η χωρική μεταβολή (σε κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση) των μέτρων των ελαστικών παραμέτρων (λόγος Poisson ν , μέτρο διάτμησης G_0 , μέτρο ελαστικότητας E κ.ά), σε σχέση με τη μεταβολή των ταχυτήτων διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, έχει μεγάλη σημασία, στη γεωτεχνική μηχανική για την εδαφοδυναμική μελέτη (του εδάφους θεμελίωσης) και για τη διερεύνηση της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών.

Η μεταβολή του λόγου Vs/Vp , για τον οποίο ισχύει η σχέση:

$$\frac{Vs^2}{Vp^2} = \frac{\mu}{\lambda + 2\mu} = \frac{0,5 - \nu}{(1 - \nu)} \quad (3.18)$$

μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για το είδος του γεωλογικού σχηματισμού. Ενώ το ν μειώνεται από 0,5 σε 0, η τιμή του λόγου Vs/Vp αυξάνει από 0 μέχρι και $1/\sqrt{2}$ και η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων κυμαίνεται από 0 ως 70 %, αυτής των διαμήκων (Sheriff and Geldart, 1995).

Για σταθερή Vs , με αυξανόμενη Vp , αυξάνει και ο λόγος Poisson ν (εξίσωση 3.10). Όταν το ν είναι ίσο με 0, ο λόγος Vs/Vp παίρνει την ακρότατη τιμή $1/\sqrt{2}$. Για ν ίσο με 0,5 που ισχύει για τα ασυμπίεστα υλικά, ο λόγος των ταχυτήτων απειρίζεται.

3.3 Μέθοδοι επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων

3.3.1 Μέθοδος Ray-Tracing

Για την ερμηνεία των δεδομένων της σεισμικής διάθλασης με τη μέθοδο Ray – Tracing χρησιμοποιείται αλγόριθμος αντιστροφής (Haeni et al., 1987), ο οποίος αρχικά προσδιορίζει ένα σεισμικό μοντέλο από τις κλίσεις των δρομοχρονικών καμπύλων και τους χρόνους καθυστέρησης (delay-time method). Στη συνέχεια εφαρμόζει επαναληπτική διαδικασία αντιστροφής των πρώτων αφίξεων. Η επαναληπτική διαδικασία περιλαμβάνει σχεδίαση των σεισμικών ακτίνων για το μοντέλο και προσαρμογή του μοντέλου αυτού προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι διαφορές μεταξύ υπολογισμένων και μετρούμενων πρώτων αφίξεων.

Η μέθοδος Ray – Tracing όταν εφαρμοστεί για δύο εδαφικά στρώματα περιγράφεται συνοπτικά από τα εξής βήματα (Haeni et al., 1987) :

1. Προσδιορισμός της σεισμικής ταχύτητας στα στρώματα με την εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων για τις δρομοχρονικές καμπύλες των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων.
2. Εκτίμηση του βάθους της διαχωριστικής διεπιφάνειας με τη μέθοδο των χρόνων καθυστέρησης (delay time method).
3. Σχεδίαση των σεισμικών ακτίνων για κάθε πηγή και γεώφωνο που κατέγραψε μετωπικά κύματα και υπολογισμός του χρόνου διαδρομής κάθε σεισμικής ακτίνας.
4. Τροποποίηση του βάθους της διεπιφάνειας έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι διαφορές μεταξύ των υπολογισμένων χρόνων διαδρομής και των καταγεγραμμένων πρώτων αφίξεων.

Η διαδικασία του προσδιορισμού των διαθλώμενων σεισμικών ακτίνων και η τροποποίηση του βάθους της διεπιφάνειας επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ υπολογισμένων και μετρούμενων χρόνων διαδρομής.

Σε περιπτώσεις όπου το εδαφικό μοντέλο αποτελείται από περισσότερα των δύο στρώματα, για τον προσδιορισμό του βάθους της δεύτερης διεπιφάνειας, αφαιρείται από τους υπολογισμούς το επιφανειακό στρώμα θέτοντας τα γεώφωνα και τις πηγές στην διεπιφάνεια μεταξύ του επιφανειακού και του υποκείμενου του στρώματος.

Έτσι, η προαναφερθείσα διαδικασία επαναλαμβάνεται για τον προσδιορισμό του βάθους της δεύτερης διαχωριστικής επιφάνειας, ενώ για την νιοστή διαχωριστική επιφάνεια η διαδικασία απομάκρυνσης των εδαφικών στρωμάτων πραγματοποιείται για τα $n-2$ επιφανειακά στρώματα.

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων σεισμικής διάθλασης στην εργασία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σύνθετες γεωλογικές συνθήκες, χρησιμοποιεί την τεχνική του χρόνου καθυστέρησης για την κατασκευή αρχικού προσεγγιστικού μοντέλου στρωμάτων και στη συνέχεια το βελτιώνει με την επαναληπτική δράση της τεχνικής Ray – Tracing.

Αποτελείται από τρία στάδια:

- A :** Πραγματοποιείται αυτόματος καθορισμός των πρώτων αφίξεων (picking) στα σειсмоγράμματα με δυνατότητα επέμβασης και από τον χρήστη.
- B :** Καθορίζεται η γεωμετρία της διάταξης των πηγών και των γεωφώνων και σχεδιάζονται οι δρομοχρονικές καμπύλες των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων για κάθε εδαφικό στρώμα. Οι πρώτες αφίξεις που αντιστοιχούν στα απευθείας κύματα συμβολίζονται με τον αριθμό '1', ενώ αυτές που αντιστοιχούν σε μετωπικά κύματα με τον αριθμό '2' κ.ο.κ.
- C :** Από τις δρομοχρονικές καμπύλες κατασκευάζεται μοντέλο ταχύτητας και βάθους της συγκεκριμένης γραμμής μελέτης.

3.3.2 Μέθοδος της σεισμικής τομογραφίας

Για την επεξεργασία των δεδομένων της σεισμικής διάθλασης ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Εισαγωγή των δεδομένων της σεισμικής διάθλασης.
- Διαμόρφωση της γεωμετρίας των δεδομένων.
- Επιλογή των πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων (picking) και αποθήκευση αυτών.
- Επεξεργασία των πρώτων αφίξεων.
- Δημιουργία δρομοχρονικών διαγραμμάτων.
- Αντιστροφή.
- Προσδιορισμός των σεισμικών ταχυτήτων και του μοντέλου βάθους (σεισμικές τομές).

Τα δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα επεξεργασίας (PickWin), σε μορφή SEG-2. Μετά την εισαγωγή των δεδομένων, ο χρήστης μπορεί να επέμβει και να διορθώσει τη γεωμετρία του πειράματος, αν είναι απαραίτητο (θέση πηγής, ισαπόσταση γεωφώνων κ.τ.λ.). Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης της εμφάνισης των δεδομένων, προκειμένου να διακρίνονται πιο εύκολα οι πρώτες αφίξεις. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται φίλτρα απομάκρυνσης θορύβου και ενίσχυσης του πλάτους των κυμάτων.

Το πρόγραμμα επιλέγει αυτόματα τις πρώτες αφίξεις των σεισμικών κυμάτων, ενώ παρέχει δυνατότητα ελεύθερης επιλογής στο χρήστη. Η διαδικασία της εισαγωγής και επεξεργασίας των δεδομένων, ολοκληρώνεται όταν χρησιμοποιηθούν όλα ή μέρος των αρχείων (σύμφωνα με την κρίση του χρήστη) που αντιστοιχούν στην ίδια γραμμή μελέτης (spread). Ακολουθεί η αποθήκευση του αρχείου (επέκταση .vs), το οποίο συμπεριλαμβάνει τα αρχεία που επιλέχθηκαν από την ίδια γραμμής μελέτης.

Με το κύριο πρόγραμμα ανάλυσης και ερμηνείας (PlotRefa) πραγματοποιείται η αντιστροφή των πρώτων αφίξεων με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας. Το πρόγραμμα λαμβάνει ως αρχείο εισόδου, το αρχείο εξόδου του προγράμματος Pickwin (αρχεία με επέκταση .vs) και παρέχει τη δυνατότητα της κοινής επεξεργασίας περισσότερων του ενός αναπτύγματος (spreads), που σχηματίζουν ευθεία γραμμή μελέτης. Μετά την εισαγωγή των δεδομένων, δημιουργείται το δρομοχρονικό διάγραμμα (διάγραμμα χρόνου διαδρομής συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης πηγής - γεωφώνου). Ο χρήστης μπορεί να κάνει διορθώσεις, να διαγράψει δεδομένα και να μεταβάλει την κλίμακα. Επιλέγεται ο αριθμός των στρωμάτων. Το σημείο που εμφανίζει αλλαγή κλίσης στην καμπύλη των πρώτων αφίξεων, αποτελεί ένδειξη αλλαγής στρώματος. Τα σεισμικά στρώματα τονίζονται με διαφορετικό χρώμα.

Η μέθοδος της σεισμικής τομογραφίας (Tomography) χρησιμοποιεί αρχικό μοντέλο ταχυτήτων, το οποίο είτε δημιουργείται με τη μέθοδο Ray- Tracing, είτε κατασκευάζεται εκ νέου. Για τη δημιουργία του απαιτείται η γνώση παραμέτρων όπως η ελάχιστη και μέγιστη σεισμική ταχύτητα, ο αριθμός στρωμάτων, το βάθος, το υψόμετρο κ.λ.π.

Στο αρχικό μοντέλο ταχυτήτων, σχεδιάζονται οι διαθλώμενες σεισμικές ακτίνες και υπολογίζεται ο χρόνος διαδρομής κάθε τέτοιας ακτίνας, από την πηγή στο γεώφωνο, για κάθε ζεύγος πηγής – γεωφώνου.

Στη συνέχεια εφαρμόζονται δύο μέθοδοι αντιστροφής: η μέθοδος της Σεισμικής Τομογραφίας (Tomography) και η μέθοδος Αντιστροφής των Χρόνων Καθυστέρησης (Time-Term).

Στη δεύτερη μέθοδο, με την εντολή “Time-Term Inversion”, οι χρόνοι καθυστέρησης (delay times) υπολογίζονται αυτόματα, ενώ μπορούν να εισαχθούν τα υψόμετρα στις θέσεις των γεωφώνων και προκύπτει το αρχικό μοντέλο βάθους. Σε κάθε στρώμα αντιστοιχεί μία μέση ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Πιο αναλυτικά:

- Ορίζεται ως βραδύτητα S , το αντίστροφο της ταχύτητας:

$$S_1 = \frac{1}{V_1} \quad (3.19)$$

$$S_2 = \frac{1}{V_2} \quad (3.20)$$

όπου V_1 και V_2 είναι οι ταχύτητες του πρώτου και δεύτερου στρώματος αντίστοιχα (σχήμα 3.9).

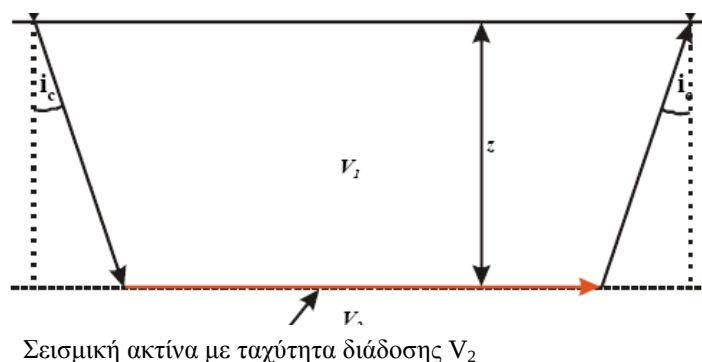
- Προσδιορίζεται η ορική γωνία i_c (Νόμος Snell):

$$\sin(i_c) = \frac{S_2}{S_1} \quad (3.21)$$

- Ο ολικός χρόνος διαδρομής t του μετωπικού κύματος, από την πηγή στο γεώφωνο δίνεται από τη σχέση:

$$t = 2S_1 \cos(i_c)z + xS_2 = cz + xS_2$$

όπου x η γνωστή απόσταση μεταξύ της πηγής και του γεωφώνου και z το πάχος του πρώτου στρώματος. Με το συνδυασμό των παραπάνω σχέσεων, υπολογίζεται η βραδύτητα S_2 και το πάχος z .



Σχήμα 3.9: Σεισμική ακτίνα μετωπικού κύματος

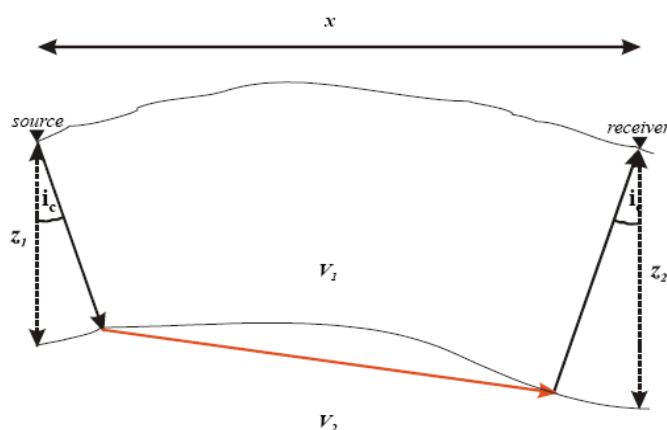
Όταν η διαχωριστική επιφάνεια παρουσιάζει καμπυλότητα (σχήμα 3.10), το πάχος του πρώτου στρώματος και η βραδύτητα του δεύτερου στρώματος S_2 υπολογίζονται από τη σχέση:

$$t = c_1 z_1 + c_2 z_2 + x S_2 \quad (3.22)$$

Για περισσότερα στρώματα ισχύει:

$$t_j = \sum_{k=1}^n c_{jk} z_k + x_j S_2 \quad (3.23)$$

όπου j είναι ο αριθμός των χρόνων διαδρομής, n ο αριθμός των γεωφώνων και z_k το εκάστοτε πάχος.



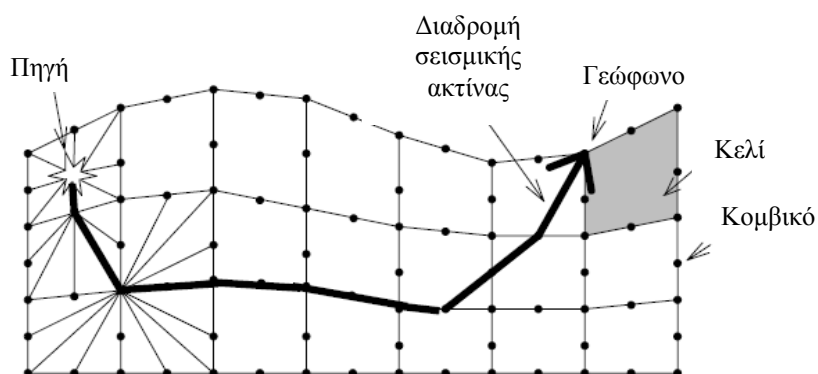
Σχήμα 3.10: Πορεία σεισμικής ακτίνας.

Η μέθοδος της σεισμικής τομογραφίας βασίζεται σε αρχικό μοντέλο ταχυτήτων, το οποίο είτε δημιουργείται με τη μέθοδο αντιστροφής των χρόνων καθυστέρησης, είτε κατασκευάζεται βάσει ορισμένων παραμέτρων (ελάχιστη και μέγιστη σεισμική ταχύτητα, αριθμός στρωμάτων, βάθος, υψόμετρο). Χρησιμοποιείται όταν η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων μεταβάλλεται βαθμιαία, όταν είναι γνωστή η ύπαρξη πλευρικής μεταβολής της ταχύτητας και σε περιπτώσεις έντονου ανάγλυφου.

Πάνω στο αρχικό μοντέλο ταχυτήτων, σχεδιάζονται επαναληπτικά οι διαθλώμενες σεισμικές ακτίνες και υπολογίζεται ο χρόνος διαδρομής για κάθε τέτοια ακτίνα, με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα που προκύπτει, μεταξύ του χρόνου διαδρομής που παρατηρούνται και αυτού που υπολογίζεται.

Η διαδικασία υπολογισμού του ελάχιστου χρόνου διαδρομής ακολουθεί τα εξής βήματα:

- Το αρχικό μοντέλο ταχυτήτων χωρίζεται σε περιοχές-κελιά (cells) σταθερής ταχύτητας (Σχήμα 3.11).



Σχήμα 3.11: Σχεδιασμός κανάβου στο αρχικό μοντέλο ταχυτήτων.

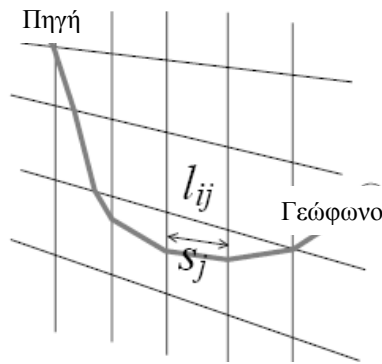
- Καθορίζεται η τιμή των παρακάτω παραμέτρων: ο αριθμός των επαναλήψεων, ο αριθμός των κομβικών σημείων (nodes) που βρίσκονται κατά μήκος των πλευρών του κελιού, η παράμετρος εξομάλυνσης κατά την οριζόντια και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, η μέγιστη και η ελάχιστη ταχύτητα.
- Σχεδιάζονται οι πιθανές διαδρομές των σεισμικών ακτίνων από την πηγή στο γεώφωνο. Τα σημεία τομής της ακτίνας με το κελί, ονομάζονται κομβικά σημεία.

Ακολουθούν τα εξής βήματα:

- Ο χρόνος διαδρομής t για κάθε πιθανή διαδρομή της σεισμικής ακτίνας δίνεται από τη σχέση:

$$t_i = \sum_{j=1}^N S_j l_{ij} \quad (3.24)$$

όπου i και j είναι ο αριθμός των σεισμικών ακτίνων και των κελιών αντίστοιχα, S είναι η βραδύτητα ($S=1/V$) και l είναι το μήκος της σεισμικής ακτίνας σε κάθε κελί (Σχήμα 3.12). Επιλέγεται η διαδρομή με τον ελάχιστο χρόνο (βέλτιστη διαδρομή).



Σχήμα 3.12: Απεικόνιση της διαδρομής της σεισμικής ακτίνας από την πηγή στο γεώφωνο.

- Υπολογίζεται η διαφορά ΔT μεταξύ των χρόνων διαδρομής που υπολογίσθηκαν (T^C) και αυτών που παρατηρήθηκαν (T^0) :

$$\Delta T_K = T^0 - T_K^C, \quad (3.25)$$

όπου K είναι ο αριθμός των επαναλήψεων.

- Προσδιορίζονται οι διορθωμένες τιμές της βραδύτητας επιλύοντας το σύστημα εξισώσεων ως προς ΔS .

$$L \Delta S = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1N} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2N} \\ l_{31} & l_{32} & \dots & l_{3N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{M1} & l_{M2} & \dots & l_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta S_1 \\ \Delta S_2 \\ \vdots \\ \Delta S_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \\ \vdots \\ \Delta t_M \end{bmatrix} = T^0 - T^C \quad (3.26)$$

ή

$$L_k \Delta S_k = \Delta T_k \quad (3.27)$$

όπου k είναι ο αριθμός των επαναλήψεων

και το αρχικό μοντέλο τροποποιείται

$$S_{k+1} = S_k + \Delta S_k \quad (3.28)$$

όπου τα στοιχεία του πίνακα L (Ιακωβιανός πίνακας) υπολογίζονται από τη σχέση:

$$l_{ij} = \frac{\partial t_i}{\partial s_j} \quad (3.29)$$

Το γραμμικό σύστημα (3.28) τροποποιείται:

$$L^T L \Delta S = L^T \Delta T \quad (3.30)$$

και επιλύεται με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων.

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS error) υπολογίζεται από τη σχέση: $E = LS - T$.

4. ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

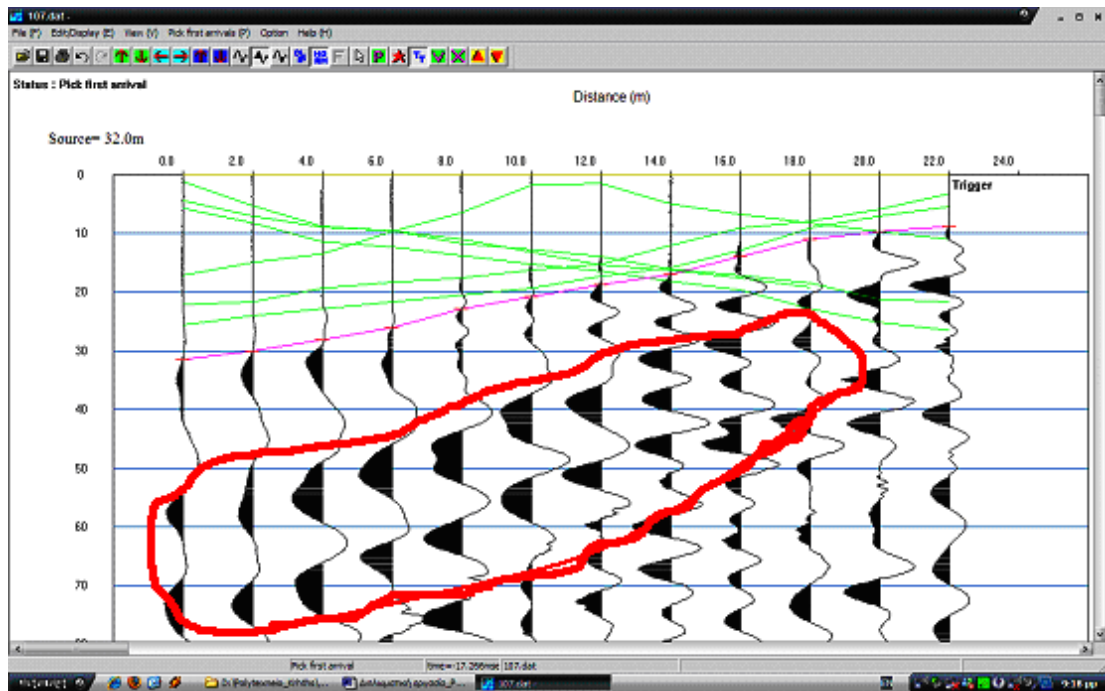
4.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Τα επιφανειακά κύματα περιέχουν πληροφορίες για τους σχηματισμούς στους οποίους διαδίδονται. Ωστόσο γενικά θεωρούνται ως θόρυβος που δυσχεραίνει την ανάγνωση των ανακλώμενων κυμάτων που προέρχονται από βαθύτερους σχηματισμούς.

Η αναγνώριση των επιφανειακών κυμάτων κατά την πραγματοποίηση των σεισμικών διασκοπήσεων γίνεται από το μεγάλο πλάτος. Στα σειсмоγράμματα εμφανίζονται στο τέλος της καταγραφής (σχήμα 4.1). Τα επιφανειακά κύματα Love (L) δημιουργούνται από τη συμβολή πολλαπλά ανακλώμενων SH κυμάτων σε λεπτό επιφανειακό στρώμα, ενώ τα κύματα Rayleigh (R) προέρχονται από τη συμβολή πολλαπλά ανακλώμενων P και SV κυμάτων (Gegersen, 1976).

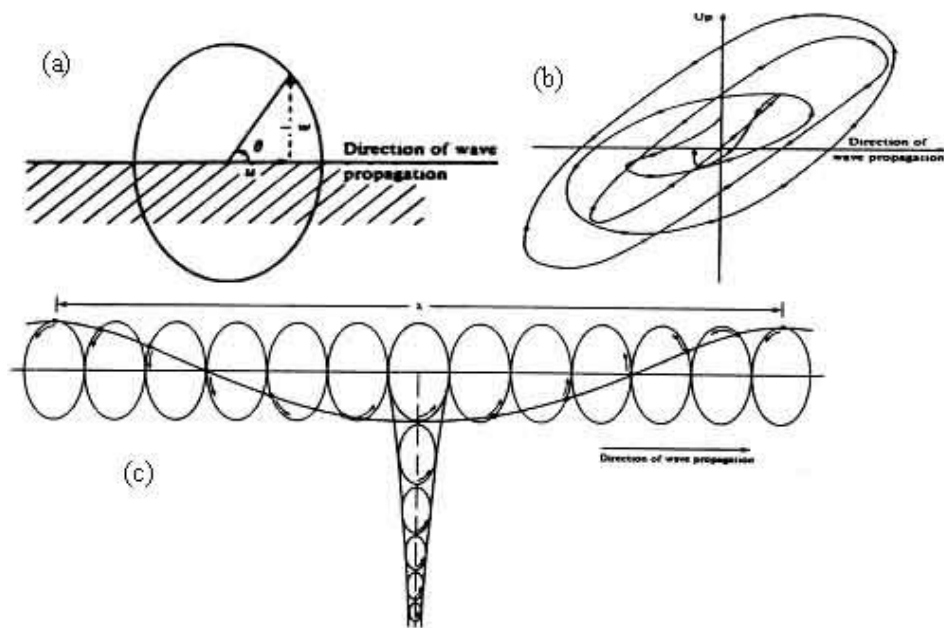
Για να μπορεί να πραγματοποιηθεί η ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων πρέπει να γίνει λήψη καταγραφής πλούσια σε κύματα επιφανείας R ή L. Η ανάλυση αυτή γίνεται με την αντιστροφή των χαρακτηριστικών καμπυλών σκέδασης. Σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι ο καθορισμός της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων σε σχέση με το βάθος.

Η μέθοδος θεωρείται από τις πλέον προνομιακές όσον αφορά στην αξιοπιστία του αποτελέσματος σε συνδυασμό με το μικρό κόστος, καθώς υπερτερεί της σεισμικής διάθλασης S – κυμάτων ως προς την απεικόνιση των εδαφικών στρώσεων με ταχύτητες μικρότερες των υπερκείμενων, όπως επίσης και έναντι της διασκόπησης διαμέσου γεωτρήσεων, όσον αφορά στο κόστος, αφού η τελευταία προαπαιτεί γεωτρήσεις.

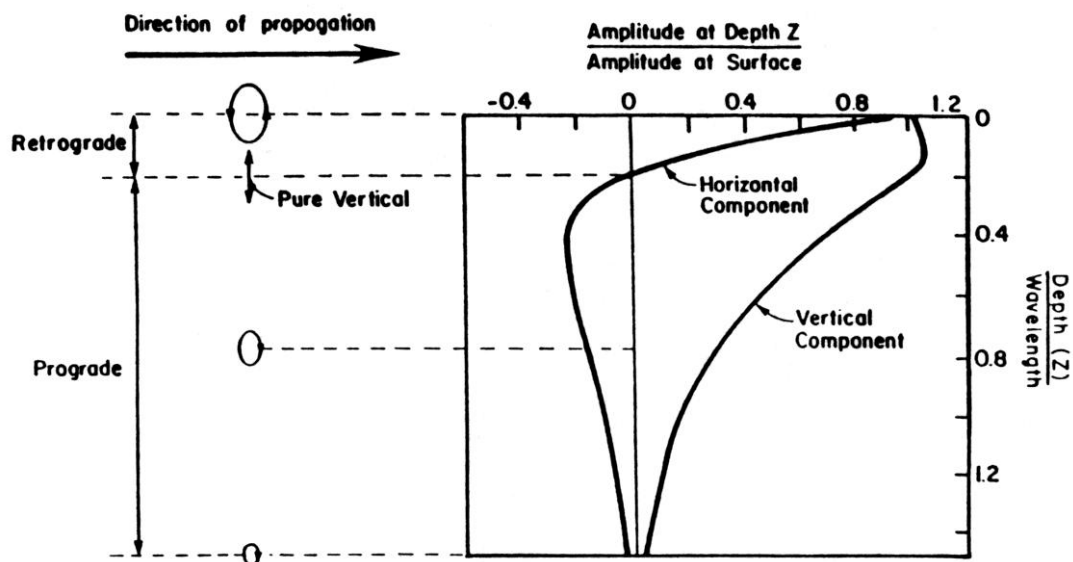


Σχήμα 4.1: Χαρακτηριστικές εμφανίσεις επιφανειακών κυμάτων σε σεισμόγραμμα (καταγραφή 107 της γραμμής μελέτης 2) .

Τα κύματα Rayleigh διαδίδονται κοντά στην επιφάνεια, με φορά κίνησης αντίθετη με τη φορά των δεικτών του ρολογιού (Σχήμα 4.2) και προκαλούν μια σύνθετη κίνηση των σωματιδίων της ύλης (Σχήμα 4.2α). Με το βάθος όμως, η ελλειπτική κίνηση των σωματιδίων, μεταβάλλεται προοδευτικά μέχρι να γίνει κατακόρυφη γραμμική και στη συνέχεια πάλι ελλειπτική με ορθή φορά ενώ το πλάτος της κίνησης αποσβένεται απότομα. Έτσι, σε βάθος ίσο περίπου με 1,5 φορά το μήκος κύματος, η κατακόρυφη συνιστώσα του πλάτους γίνεται ίση με το 10% του αρχικού πλάτους, στην ελεύθερη επιφάνεια (Σχήμα 4.3). Η ταχύτητα διάδοσής τους, V_R , είναι συνάρτηση της ταχύτητας των διαμηκών και των εγκάρσιων κυμάτων.



Σχήμα 4.2: Σχηματική παράσταση της διάδοσης των κυμάτων Rayleigh. (a) η προβλεπόμενη κίνηση στην επιφάνεια ενός ισότροπου ημιχώρου, (b) η πραγματική κίνηση στο έδαφος και (c) μια τομή της κίνησης των σωματιδίων από την επιφάνεια έως και κάποιο βάθος στον ημιχώρο (Sheriff and Geldart, 1995).



Σχήμα 4.3: Το πλάτος και η κατανομή της σωματιδιακής κίνησης με το βάθος κατά τη διάδοση των κυμάτων Rayleigh (Nazarian, 1984).

Τα κύματα Rayleigh παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον, τόσο στη σεισμολογία όσο και στην εφαρμοσμένη γεωφυσική, καθώς αξιοποιούνται οι ιδιαίτερες ιδιότητες όπως σκέδαση, εξασθένηση, χαρακτηριστικές καμπύλες που τα χαρακτηρίζουν.

4.2 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ

Η πιο συνιθησμένη διάταξη πεδίου που χρησιμοποιείται είναι η διάταξη κοινής πηγής. Το γεγονός ότι ο προσδιορισμός των πειραματικών καμπυλών σκέδασης βασίζεται στην ανάλυση των σειсмоγραμμάτων σημαίνει ότι η καταγραφή των επιφανειακών κυμάτων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ευκρινής (Κρητικάκης, 2010).

Η λήψη των σημάτων γίνεται ταυτόχρονα από πολλά γεωφώνω (12, 24, 48 ...), γεγονός που δίνει τη δυνατότητα κάλυψης μεγάλων αποστάσεων διασκόπησης και δραστηκής μείωσης των εργασιών πεδίου.

Η τεχνική λήψης απαιτεί κάποιες ρυθμίσεις. Βασική προϋπόθεση είναι η ρύθμιση της απόστασης πηγής – γεωφώνων, της ισαπόστασης των γεωφώνων και του συνολικού χρόνου καταγραφής.

Τα κριτήρια για την επιλογή των διαστημάτων d μεταξύ των γεωφώνων διαμορφώνονται ανάλογα με τους επιδιωκόμενους σκοπούς. Το μήκος της διάταξης, παίζει ρόλο και στο βάθος της διασκόπησης αλλά κυρίως στο βαθμό ανάλυσης των γεωλογικών σχηματισμών, καθώς η αποτελεσματικότητα της μεθόδου σε σχέση με το βάθος περιορίζεται από $\lambda/3$ έως λ (Ραπτάκης, 1995). Ένα σχετικά μικρό μεσοδιάστημα δίνει τη δυνατότητα της λεπτομερέστερης διασκόπησης των επιφανειακών σχηματισμών κυρίως, ενώ με μεγάλο μήκος χάνεται η λεπτομερής ανάλυση των επιφανειακών και μικρού πάχους στρωμάτων αλλά επιτυγχάνεται η διερεύνησή τους σε μεγάλα βάθη.

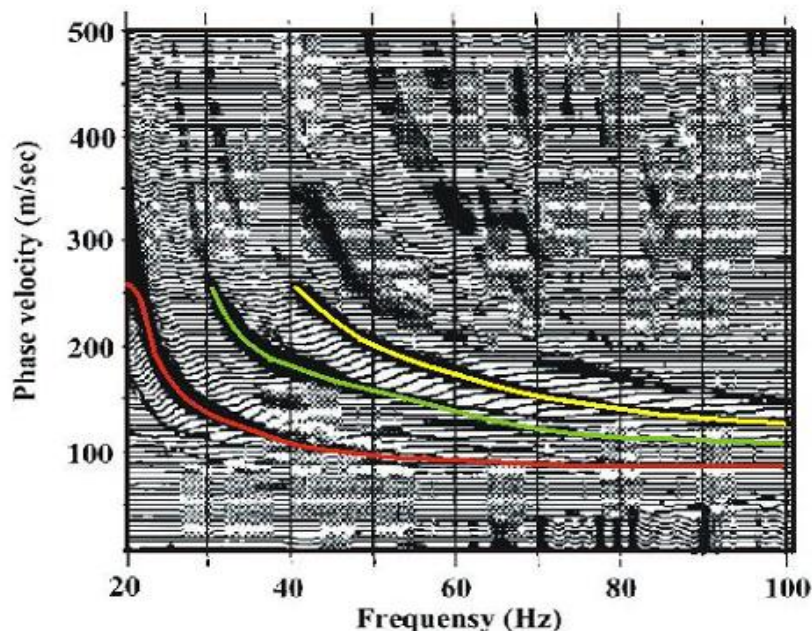
Η σεισμική πηγή παίζει σημαντικό ρόλο για τη λήψη των δεδομένων, καθώς όσο πιο πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο παρέχει, τόσο περισσότερα μήκη κύματος παράγονται με αποτέλεσμα την καλύτερη διάκριση των εδαφικών στρώσεων. Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται φανερό ότι η γεωμετρία της διάταξης στο πεδίο καθώς και τα χαρακτηριστικά της πηγής και των γεωφώνων, έχουν μεγάλη σημασία για τον προσδιορισμό των πειραματικών καμπυλών σκέδασης, που βασίζονται στην ταχύτητα φάσης C , όπως επίσης και στο τελικό αποτέλεσμα της κατανομής της ταχύτητας V_s με το βάθος.

Ανακεφαλαιώνοντας, όπως διαπιστώθηκε από τα παραπάνω, μεγάλης σημασίας αποτελεί η απόκτηση των σεισμικών δεδομένων έτσι ώστε να

περιέχουν όσο το δυνατόν περισσότερες καταγραφές από επιφανειακά κύματα (κυρίως Rayleigh) και λιγότερες από κύματα χώρου. Αυτό, επιτυγχάνεται τόσο με κατάλληλη επιλογή πηγής, όσο και με κατάλληλη διάταξη πηγής – γεωφώνων.

4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες διασποράς διαφορετικών τάξεων, αντιστοιχούν στην μέγιστη σεισμική ενέργεια του κυματικού πεδίου στο χώρο ταχύτητας και συχνότητας, διαχωρίζονται στην θεμελιώδη και στις δευτερεύοντες ή ανώτερης τάξης (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4: Χαρακτηριστικές καμπύλες διασποράς (Park et al, 1998). Με κίτρινο χρώμα απεικονίζεται η καμπύλη διασποράς δεύτερης τάξης, με πράσινο η πρώτης τάξης και με κόκκινο η θεμελιώδης καμπύλη διασποράς.

Οι μορφές καμπύλων διασποράς είναι χαρακτηριστικές του τρόπου με τον οποίο διαδίδονται τα επιφανειακά κύματα και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να είναι και χαρακτηριστικές των ιδιοτήτων των σχηματισμών. Όλες οι τάξεις των χαρακτηριστικών καμπύλων διασποράς αντιστοιχούν σε διαφορετικές ταχύτητες φάσης.

Η πρώτη χαρακτηριστική καμπύλη διασποράς, η θεμελιώδης,

αναγνωρίζεται κυρίως από δύο χαρακτηριστικά, όταν η στρωματογραφία είναι σχετικά απλή. Το ένα είναι ότι συνήθως το σύνολο τιμών των ταχυτήτων (που ανήκουν σε αυτήν την χαρακτηριστική καμπύλη σκέδασης) έχει τις μικρότερες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες χαρακτηριστικές καμπύλες και το δεύτερο ότι εκτείνεται σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων από ότι οι καμπύλες ανώτερης τάξης. Οι τελευταίες, αναγνωρίζονται από τη διαδοχική αύξηση της ταχύτητας και τη μείωση του εύρους των συχνοτήτων για κάθε μία από αυτές. Η ανάλυση των καμπυλών σκέδασης συνήθως επικεντρώνεται στη θεμελιώδη χαρακτηριστική καμπύλη.

Συμπερασματικά, ενδέχεται λοιπόν σε ένα σχετικά μικρό εύρος συχνοτήτων να εμφανίζονται δύο ή / και τρεις χαρακτηριστικές καμπύλες διασποράς, ανάλογα με το ποσό της σεισμικής ενέργειας που καταλαμβάνουν οι καμπύλες ανώτερης τάξης. Το βασικό πλεονέκτημα που προσφέρει η ανάλυση της θεμελιώδους χαρακτηριστικής καμπύλης είναι ότι εμπεριέχει πληροφορίες από ένα σχετικά μεγάλο εύρος μηκών κύματος (περιόδους), αναγκαίο για τη συλλογή πληροφοριών από τα επιφανειακά στρώματα μέχρι και τα πλέον βαθύτερα, με αποτέλεσμα τον ακριβέστερο προσδιορισμό του εδαφικού προτύπου.

Στα μεγαλύτερα μήκη κύματος περιέχονται πληροφορίες από βαθύτερα στρώματα. Αντίθετα, μικρότερα μήκη κύματος περιέχουν πληροφορίες από επιφανειακούς σχηματισμούς. Επομένως, όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος των παραγόμενων μηκών κύματος, τόσο επηρεάζεται θετικά η ανάλυση για τα εδαφικά στρώματα και άρα συλλέγονται περισσότερες πληροφορίες για τους γεωλογικούς σχηματισμούς.

5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

5.1.1 Εισαγωγή

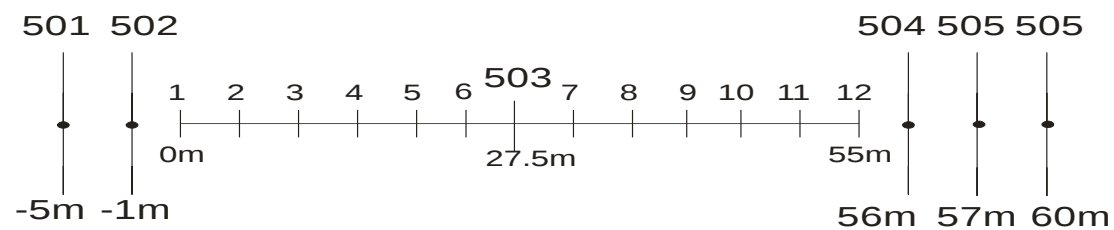
Για την επεξεργασία των δεδομένων σεισμικής διάθλασης χρησιμοποιήθηκαν δύο μεθοδολογίες επεξεργασίας. Η μέθοδος Raytracing και η μέθοδος της σεισμικής τομογραφίας. Οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν τις πρώτες αφίξεις των σεισμικών κυμάτων (απευθείας και μετωπικά κύματα) για τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσής τους και του μοντέλου βάθους.

Για την επιλογή των πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Pickwin του λογισμικού πακέτου Seisimager. Για την επεξεργασία των δεδομένων με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο Plotrefa.

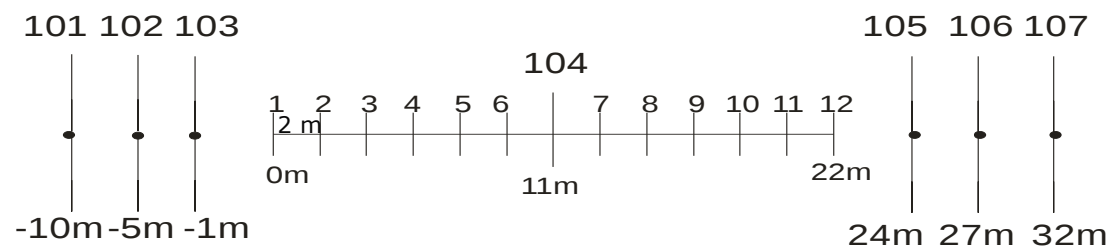
5.1.2 Συλλογή σεισμικών δεδομένων

Στα πλαίσια της εργασίας πραγματοποιήθηκαν 2 γραμμές σεισμικής διασκόπησης, σε οικόπεδο της εταιρείας Χαλκιάδακη και σε περιοχή πλησίον του Τμήματος Επιστημών, με την μέθοδο της σεισμικής διάθλασης των P κυμάτων για την πρώτη περιοχή και P και S για τη δεύτερη περιοχή. Για την καταγραφή των σεισμικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ο δωδεκακάναλος σειсмоγράφος GEODE της Geometrics^(TM) και γεώφωνα κατακόρυφης και οριζόντιας συνιστώσας χαρακτηριστικής συχνότητας 4,5 και 14 Hz, αντίστοιχα. Η διάρκεια κάθε καταγραφής ήταν 0,5 s, ενώ το διάστημα δειγματοληψίας είχε οριστεί στα 0,125 ms. Η γραμμή μελέτης στην πρώτη περιοχή είχε μήκος 55 m με ισαπόσταση γεωφώνων 5 m, ενώ για την δεύτερη ήταν 22 m και 2 m αντίστοιχα. Για την παραγωγή σεισμικών κυμάτων στο ανάπτυγμα χρησιμοποιήθηκε η κρούση βαριοπούλας 6 Kg σε μεταλλική πλάκα. Η γεωμετρία των γραμμών μελέτης παρουσιάζεται στα σχήματα 5.1, 5.2, 5.3. Στην περιοχή πλησίον του Τμήματος Επιστημών πραγματοποιήθηκε επιπρόσθετα πείραμα

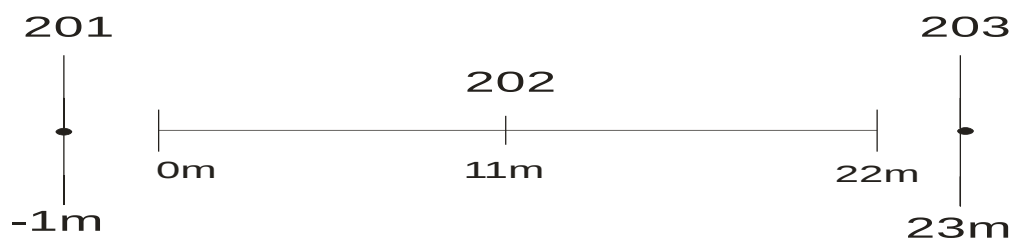
σεισμικής διάθλασης εγκαρσίων κυμάτων (S-Waves) με τη χρήση γεωφώνων οριζόντιας συνιστώσας. Η παραγωγή των σεισμικών κυμάτων σ' αυτή την περίπτωση πραγματοποιήθηκε με την κρούση βαριοπούλας σε πακτωμένη οριζόντια δοκό. Η φορά κρούσης της βαριοπούλας ήταν παράλληλη με την οριζόντια συνιστώσα των γεωφώνων. Η διάρκεια καταγραφής και το διάστημα δειγματοληψίας είναι ίδια με το πείραμα της σεισμικής διάθλασης διαμήκων κυμάτων (P-Waves).



Σχήμα 5.1: Γεωμετρία της γραμμής μελέτης 1 στην περιοχή του οικοπέδου της εταιρείας Χαλκιαδάκη (Line – 1).



Σχήμα 5.2: Γεωμετρία της γραμμής μελέτης 2 στην περιοχή της Πολυτεχνειούπολης (Line – 2).

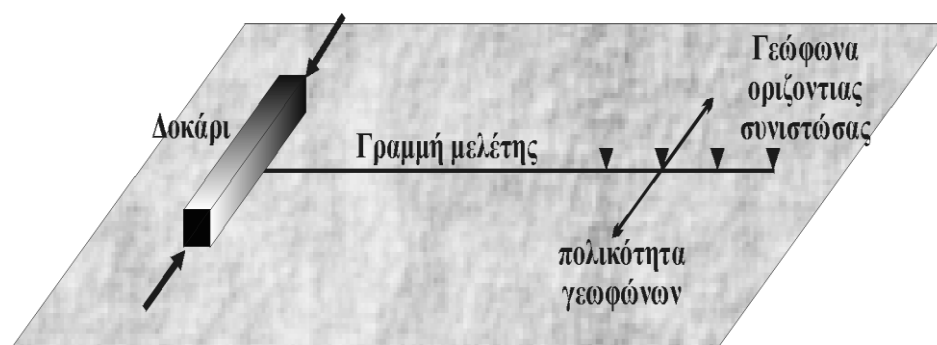


Σχήμα 5.3: Γεωμετρία της γραμμής μελέτης πειράματος για τα S κύματα (Line – 2).

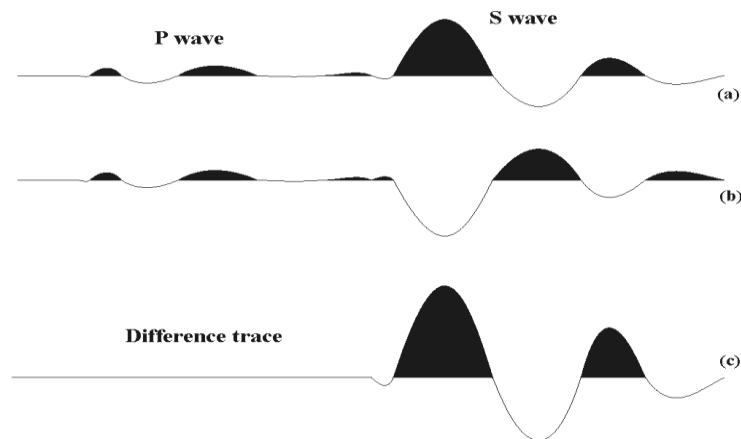
5.1.3 Πειραματικός εξοπλισμός

5.1.3.1 Σεισμική πηγή

Για την παραγωγή σεισμικών κυμάτων πραγματοποιήθηκε κρούση βαριοπούλας 6 Kg σε μεταλλική πλάκα. Αντίστοιχα, ως σεισμική πηγή για την καταγραφή εγκάρσιων κυμάτων (SH) χρησιμοποιήθηκε ξύλινο δοκάρι και βαριοπούλα. Το δοκάρι τοποθετήθηκε κάθετα στη γραμμή μελέτης, στη θέση όπου έχει επιλεγεί να τοποθετηθεί η σεισμική πηγή (Σχήμα 5.4). Αρχικά, πραγματοποιείται οριζόντια κρούση της βαριοπούλας στο ένα άκρο του δοκαριού, οπότε τα γεώφωνα θα καταγράψουν σεισμικά ίχνη (traces), όμοια με αυτό του Σχήματος 5.5α. Ακολούθως, πραγματοποιείται οριζόντια κρούση στο αντίθετο άκρο του δοκαριού και καταγράφονται σεισμικά ίχνη όμοια με αυτό του Σχήματος 5.5β. Τα κύματα S στις δύο περιπτώσεις καταγράφονται με διαφορά φάσης 180° , ενώ αντίθετα τα κύματα P καταγράφονται με ίδια φάση. Έτσι, αφαιρώντας αυτά τα δύο ίχνη μεταξύ τους είναι δυνατό να εξαλειφθούν οι καταγραφές των P-κυμάτων (Σχήμα 5.5γ) και να μετρηθεί ευκολότερα ο χρόνος άφιξης των διαθλώμενων εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων.



Σχήμα 5.4 : Σχηματική παράσταση της δημιουργίας και καταγραφής των διαθλώμενων S-κυμάτων.



Σχήμα 5.5: Σχηματική παράσταση της υπέρθεσης των πολωμένων καταγραφών των διαθλώμενων S-κυμάτων

5.1.3.2 Γεώφωνα

Στο πείραμα για τη σεισμική διάθλαση διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων χρησιμοποιήθηκαν γεώφωνα κατακόρυφης και οριζόντιας συνιστώσας αντίστοιχα.

Τα γεώφωνα κατακόρυφης συνιστώσας είναι ιδιοσυχνότητας 4.5 Hz και είναι ευαίσθητα στην κατακόρυφη ταλάντωση του εδάφους. Τα γεώφωνα οριζόντιας συνιστώσας, είναι ευαίσθητα σε οριζόντιες ταλαντώσεις του εδάφους (Σχήμα 5.4).

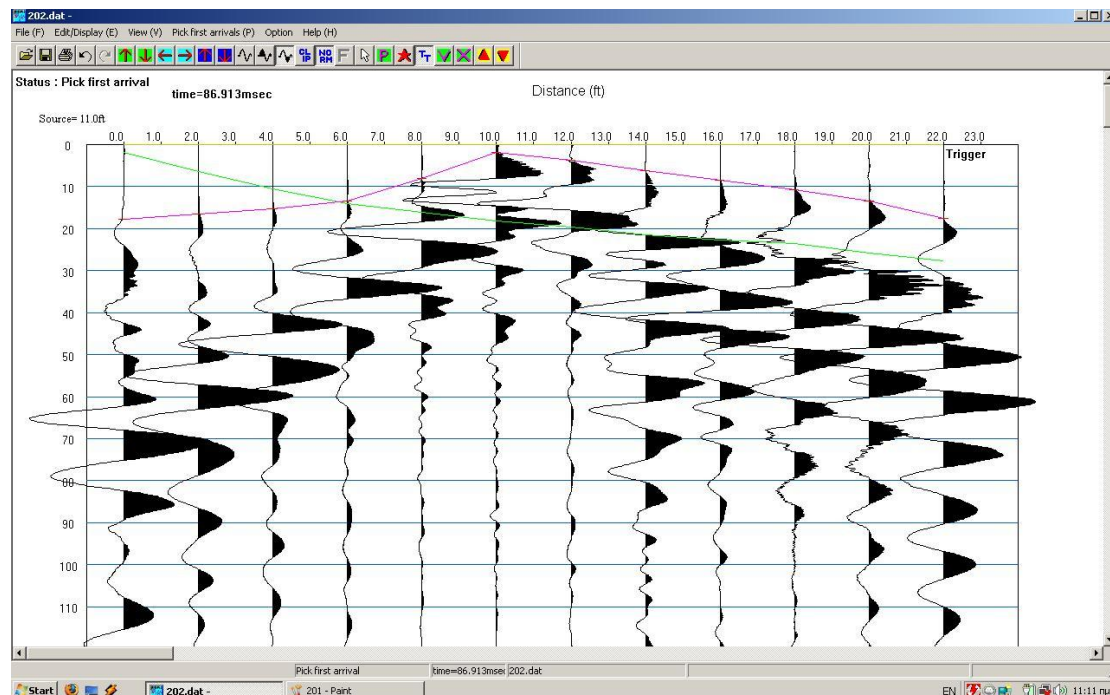
5.1.3.3 Καταγραφικά όργανα

Ως καταγραφικό χρησιμοποιήθηκε ο 12κάναλος σειсмоγράφος GEODE της Geometrics. Ο σειсмоγράφος συνδέεται με Η/Υ μέσω λογισμικού προγράμματος και παρέχεται η δυνατότητα προενίσχυσης του σήματος, εφαρμογής φίλτρων αποκοπής συχνοτήτων, υπέρθεσης σεισμικών δεδομένων, απεικόνισής τους στην οθόνη του Η/Υ καθώς και αποθήκευσής τους.

5.1.4 Επιλογή των πρώτων αφίξεων με το πρόγραμμα Pickwin

Το πρόγραμμα Pickwin έχει τη δυνατότητα να εισάγει, να αποθηκεύει και να εκτυπώνει αρχεία που έχει καταγράψει ο σειсмоγράφος. Επιπρόσθετα, μπορεί να διαμορφώσει την καταγραφή ως προς την γεωμετρία της, την ενίσχυση του σήματος, τη φάση των κυματομορφών, την εφαρμογή ψηφιακών φίλτρων, το μέγεθος του παράθυρου απεικόνισης κ.α.

Επιπλέον, διαθέτει εντολές επιλογής των πρώτων αφίξεων και βοηθητικά εργαλεία για τον πρόχειρο προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Ένα παράδειγμα δίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.6: Γραφική απεικόνιση των πρώτων αφίξεων της σεισμικής καταγραφής 202 (Line-2).

5.1.5 Επεξεργασία των δεδομένων με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας.

Η διαδικασία της σεισμικής τομογραφίας στο Plotrefa περιλαμβάνει δύο στάδια:

1. Ορισμός των παραμέτρων του μοντέλου
2. Ορισμός των παραμέτρων αντιστροφής και υπολογισμός των πρώτων αφίξεων.
3. Το αρχικό μοντέλο είναι δυνατόν να αποτελείται από οριζόντια σεισμικά στρώματα ή να προέρχεται από την κλασσική μέθοδο σεισμικής διάθλασης.

Αρχικά τα δρομοχρονικά διαγράμματα εισάγονται στο λογισμικό Plotrefa και ορίζονται οι ακόλουθοι παράμετροι δημιουργίας ενός οριζόντια στρωματωμένου μέσου (Σχήμα 5.7). Οι παράμετροι αυτοί είναι οι ακόλουθοι:

- Βάθος της οροφής του βαθύτερου στρώματος
- Μέγιστη ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων
- Ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων
- Αριθμός των στρωμάτων
- Υψόμετρο στο αριστερό άκρο του μοντέλου βάθους σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς
- Υψόμετρο στο δεξιό άκρο του μοντέλου βάθους σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς

Initial model for tomography (smooth velocity model)

☐ Use layered model as initial model

Depth to top of lowest layer m

Minimum velocity m /sec

Maximum velocity m /sec

of layers

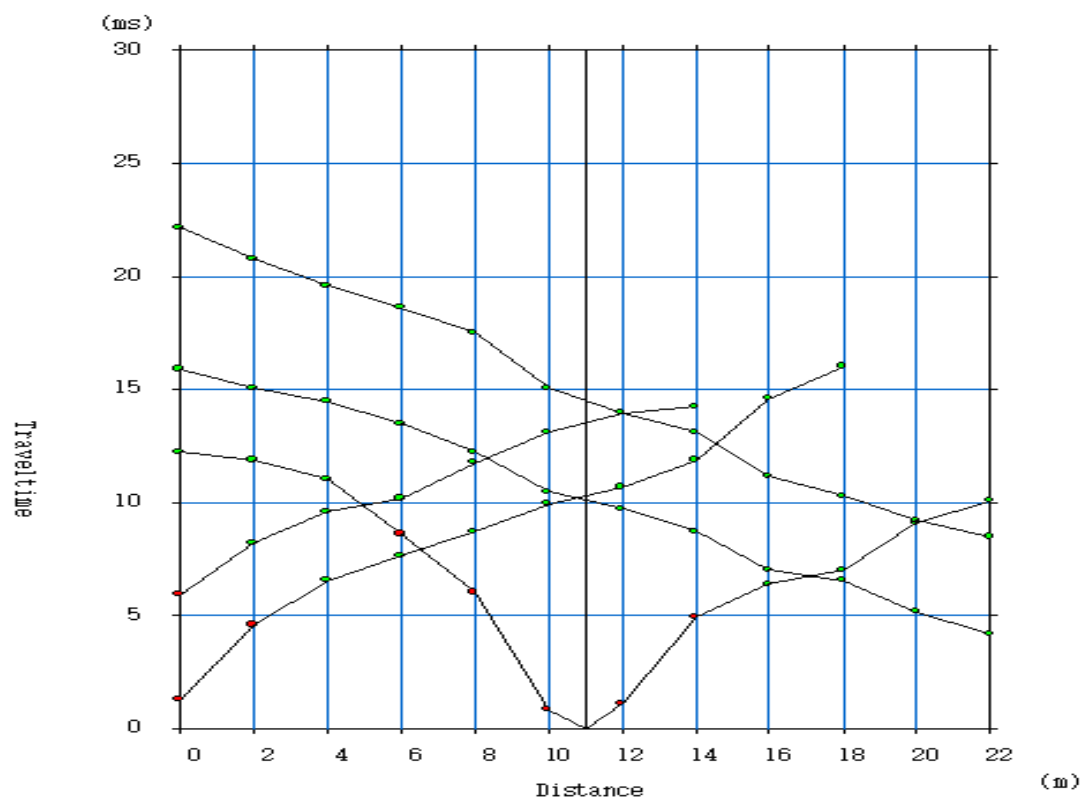
Elevation at the bottom left of the model m

Elevation at the bottom right of the model m

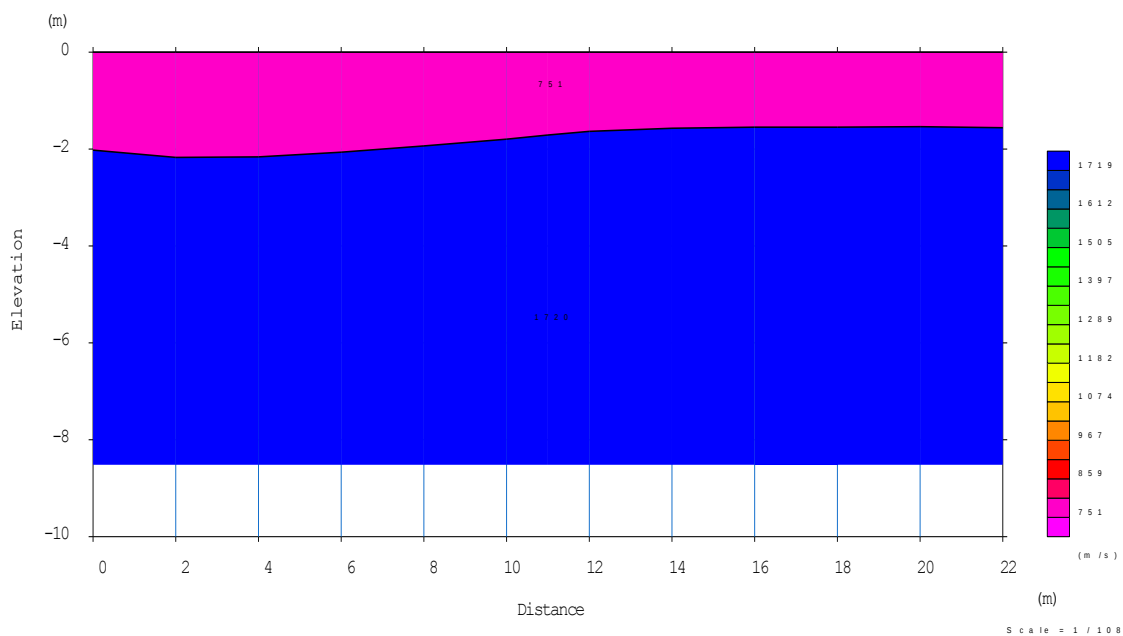
OK

Cancel

Σχήμα 5.7: Ορισμός των παραμέτρων για τη δημιουργία του αρχικού οριζόντια στρωματομένου μέσου.

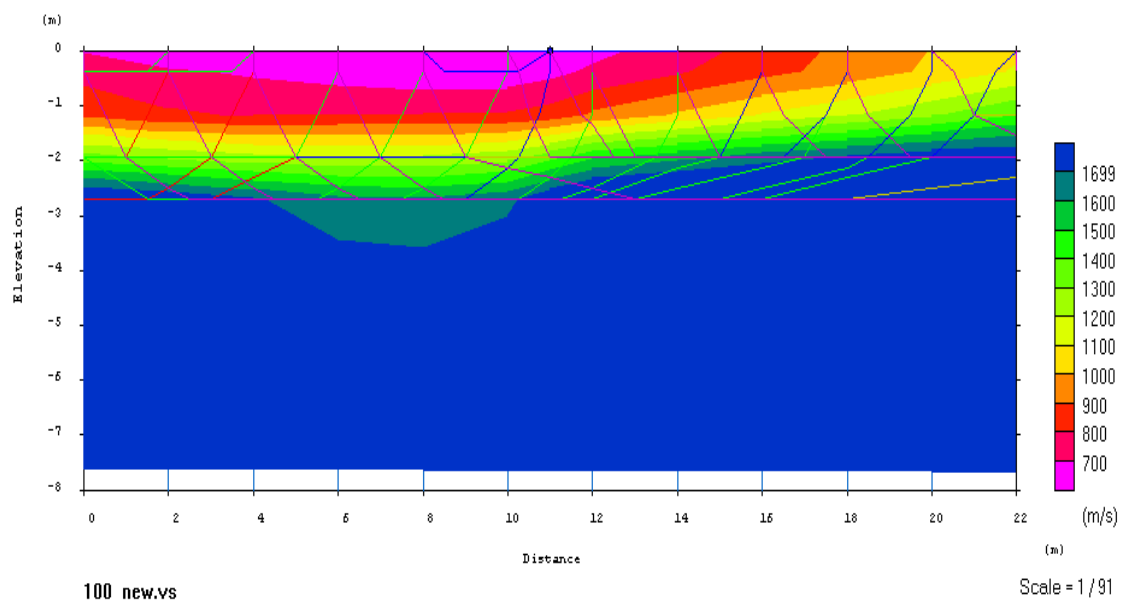


Σχήμα 5.8: Δρομοχρονικό διάγραμμα των P κυμάτων της γραμμής Line-2. Οι κόκκινες κουκίδες αντιστοιχούν στα απευθείας κύματα, ενώ οι πράσινες αντιστοιχούν στα αντίστοιχα μετωπικά.

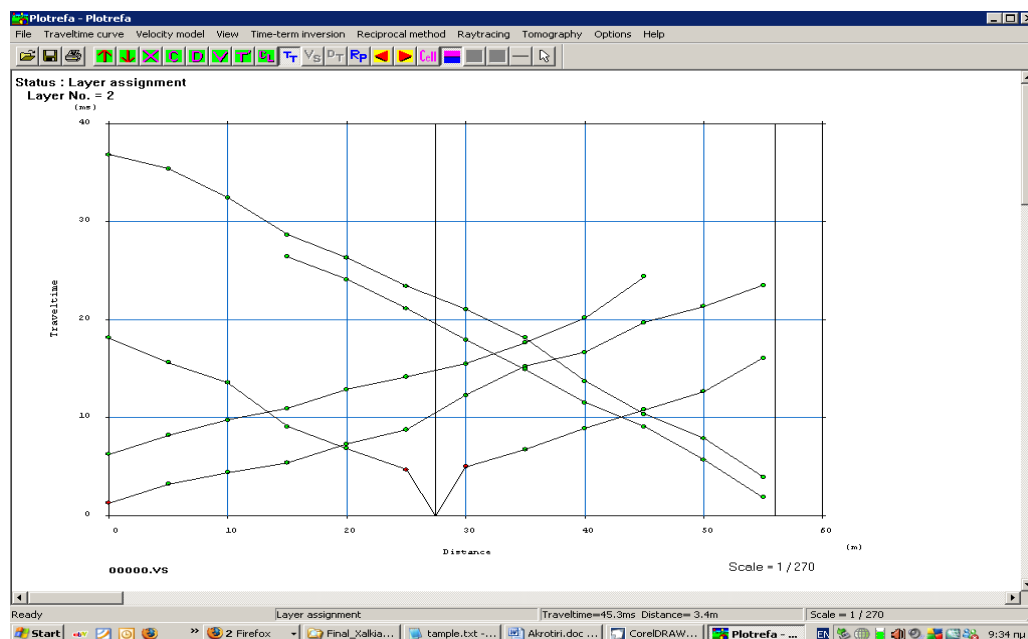


Σχήμα 5.9: Αρχικό μοντέλο βάθους 2 στρωμάτων για τη γραμμή μελέτης Line – 2 με την μέθοδο Ray – Tracing.

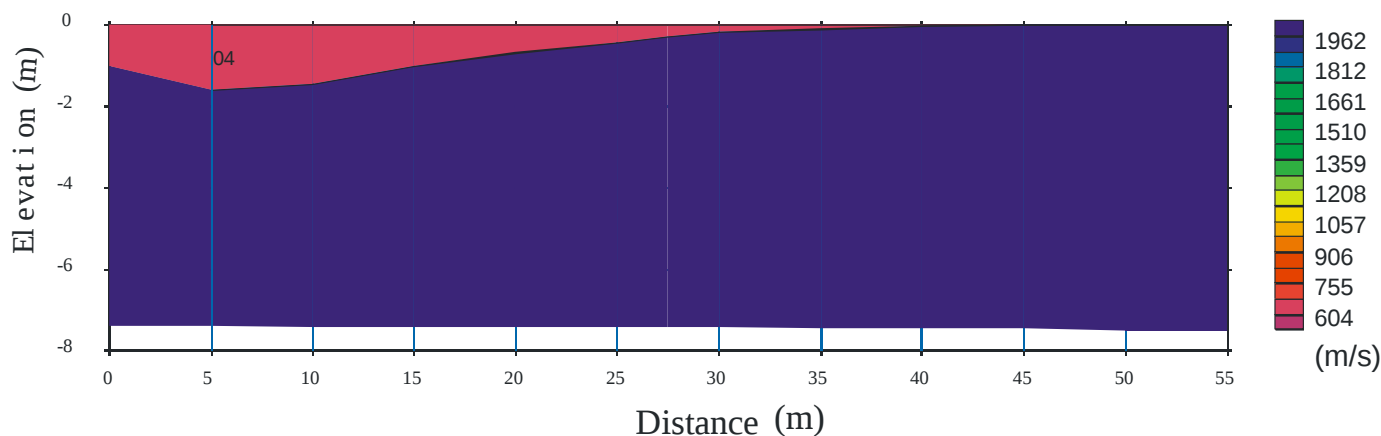
Στο σχήμα 5.10 απεικονίζεται το τελικό μοντέλο βάθους των P κυμάτων για την γραμμή μελέτης 2, του οποίου αρχικό ήταν το μοντέλο του σχήματος 5.9. Κάθε χρώμα αντιπροσωπεύει και έναν σχηματισμό. Το πρώτο στρώμα εκτείνεται σε βάθος μισού μέτρου. Κατόπιν ξεκινάει το δεύτερο στρώμα, το οποίο εκτείνεται σε βάθος 1.5 m. Στην συνέχεια ακολουθεί και το τρίτο στρώμα, το οποίο εκτείνεται σε βάθος 3 m. Παρατηρούνται επίσης οι σεισμικές ακτίνες. Στα αρχικά στρώματα η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων είναι μικρή και καθώς αυξάνει το βάθος αυτή αυξάνεται.



Σχήμα 5.10: Τελικό μοντέλο βάθους των P κυμάτων στο οποίο απεικονίζεται η πορεία των σεισμικών κυμάτων από τις πηγές στα γεώφωνα για τη γραμμή μελέτης 2.

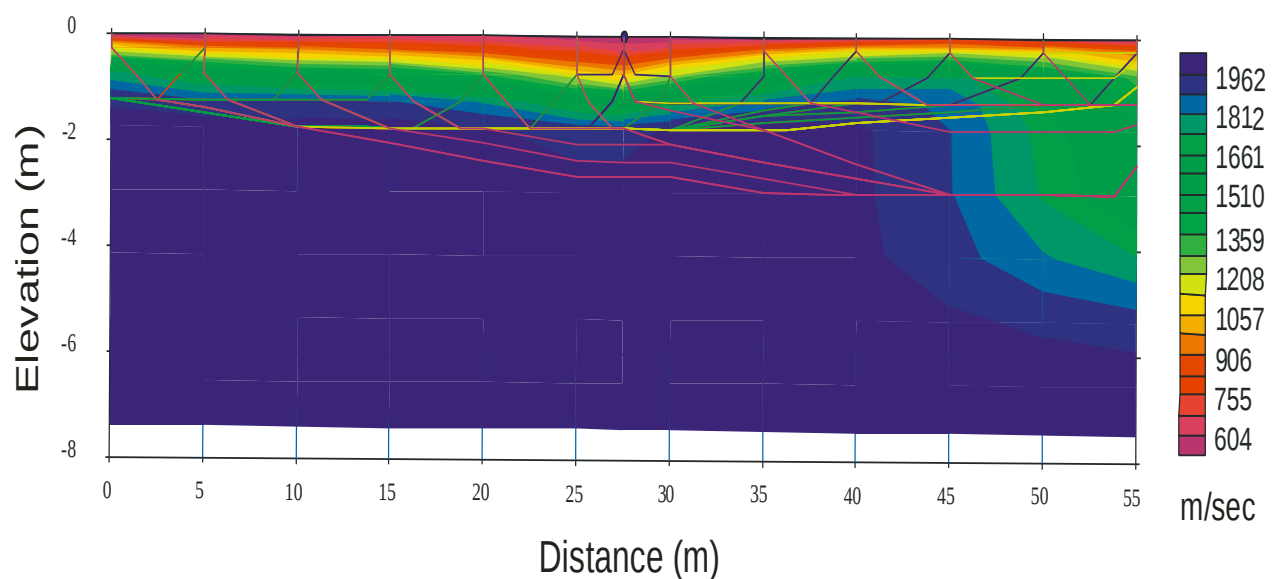


Σχήμα 5.11 Δρομοχρονικό διάγραμμα της γραμμής μελέτης 1 (οι κόκκινες κουκίδες αντιστοιχούν στις πρώτες αφίξεις από το πρώτο στρώμα ενώ οι πράσινες αντιστοιχούν στα διαθλωμένα κύματα από το δεύτερο στρώμα).



Σχήμα 5.12 Αρχικό μοντέλο βάθους 2 στρωμάτων για τη γραμμή μελέτης Line – 1 με την μέθοδο Ray – Tracing.

Στο σχήμα 5.13 παρίσταται το τελικό μοντέλο βάθους των σεισμικών κυμάτων για την γραμμή μελέτης 1. Σε βάθος 5.5 m η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων είναι μεγαλύτερη απο τις προηγούμενες, πράγμα το οποίο είναι λογικό. Γίνεται αναπαράσταση των στρωμάτων (αντίστοιχα χρώματα). Η μέγιστη ταχύτητα φτάνει τα 1960 m/s.



Σχήμα 5.13 Τελικό μοντέλο βάθους των P κυμάτων στο οποίο απεικονίζεται η πορεία των σεισμικών κυμάτων από τις πηγές στα γεώφωνα για τη γραμμή μελέτης 1.

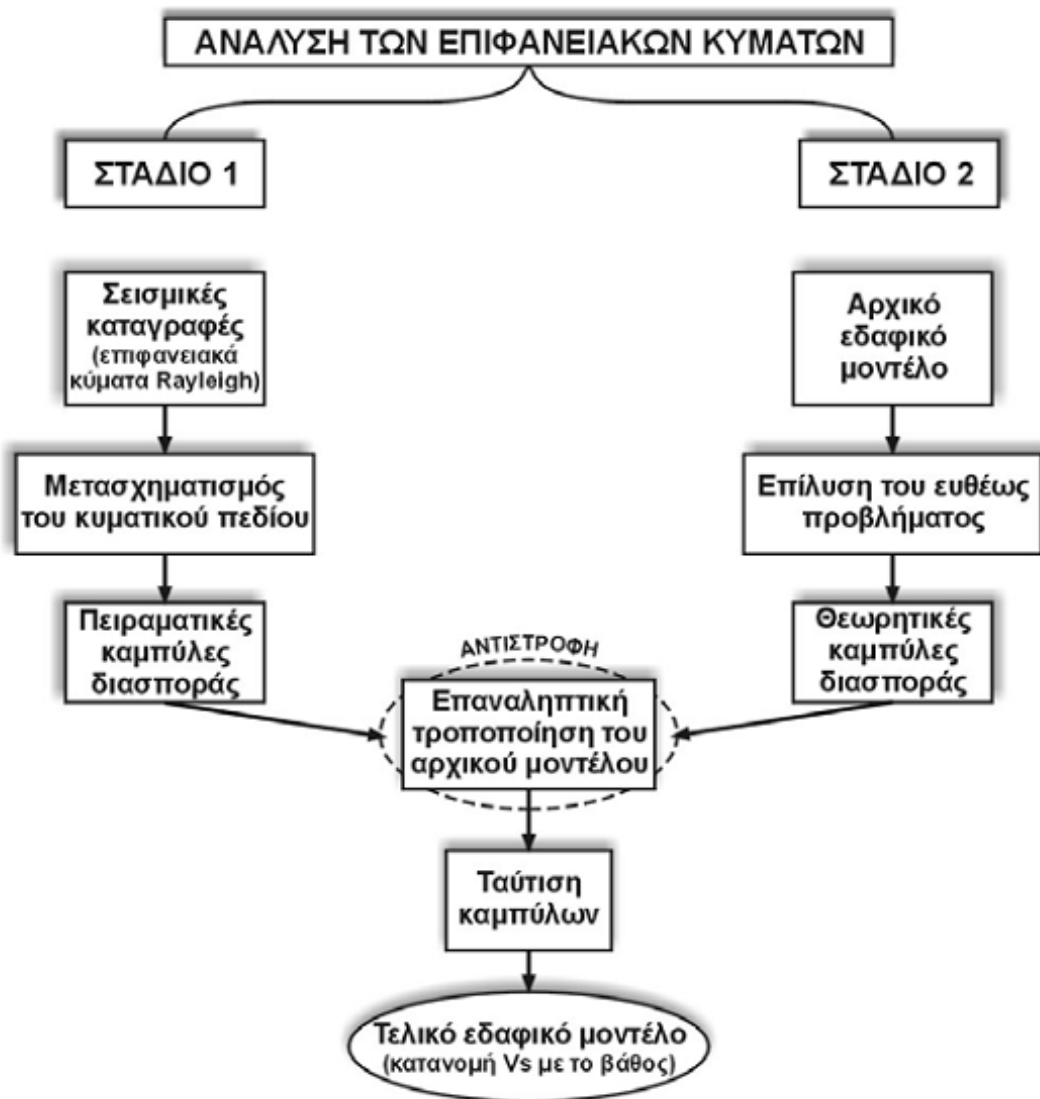
5.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων με την μέθοδο της πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων.

Η επεξεργασία των επιφανειακών κυμάτων με την μέθοδο της Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών κυμάτων (Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW) επικεντρώνεται στον προσδιορισμό των καμπύλων διασποράς και στην αντιστροφή τους για τον προσδιορισμό της μεταβολής της ταχύτητας των S κυμάτων με το βάθος.

Η ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων περιλαμβάνει τη λήψη καταγραφών πλούσιων σε επιφανειακά κύματα Rayleigh και την αντιστροφή των χαρακτηριστικών καμπύλων διασποράς τους. Μια από τις κυριότερες διαδικασίες για την ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων είναι ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών καμπύλων διασποράς από τις καταγραφές. Η αντιστροφή των χαρακτηριστικών καμπύλων διασποράς αποτελεί τη δεύτερη σημαντικότερη φάση της επεξεργασίας.

Από τη διαδικασία της αντιστροφής προσδιορίζονται οι παράμετροι του εδαφικού μοντέλου. Η μεθοδολογία της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh είναι δυνατό να χωριστεί σε δύο διακριτά στάδια (Σχ. 5.14). Κατά το πρώτο στάδιο, από τις σεισμικές καταγραφές κοινής πηγής, προκύπτουν οι πειραματικές καμπύλες διασποράς. Ενώ στο δεύτερο στάδιο προσδιορίζονται οι θεωρητικές καμπύλες διασποράς για οριζόντια στρωματωμένο εδαφικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας την τεχνική Thomson-Haskell (Haskell, 1953, Schwab and Knopoff, 1972).

Τροποποιώντας επαναληπτικά το εδαφικό μοντέλο επιτυγχάνεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης διασποράς στην πειραματική (διαδικασία που ονομάζεται αντιστροφή). Έτσι, εφόσον πραγματοποιηθεί ταύτιση των καμπύλων, προσδιορίζεται το τελικό εδαφικό μοντέλο (κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων με το βάθος). Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται αναλυτικά όλα τα βήματα που ακολουθούνται κατά τη διαδικασία της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι χρησιμοποιήθηκε λογισμικό (S/Wave) που αναπτύχθηκε στο Πολυτεχνείο Κρήτης (Κρητικάκης, Γ., 2010).



Σχήμα 5.14 Rayleigh διάγραμμα ροής που περιγράφει την μεθοδολογία ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων (Κρητικάκης, Γ., 2010).

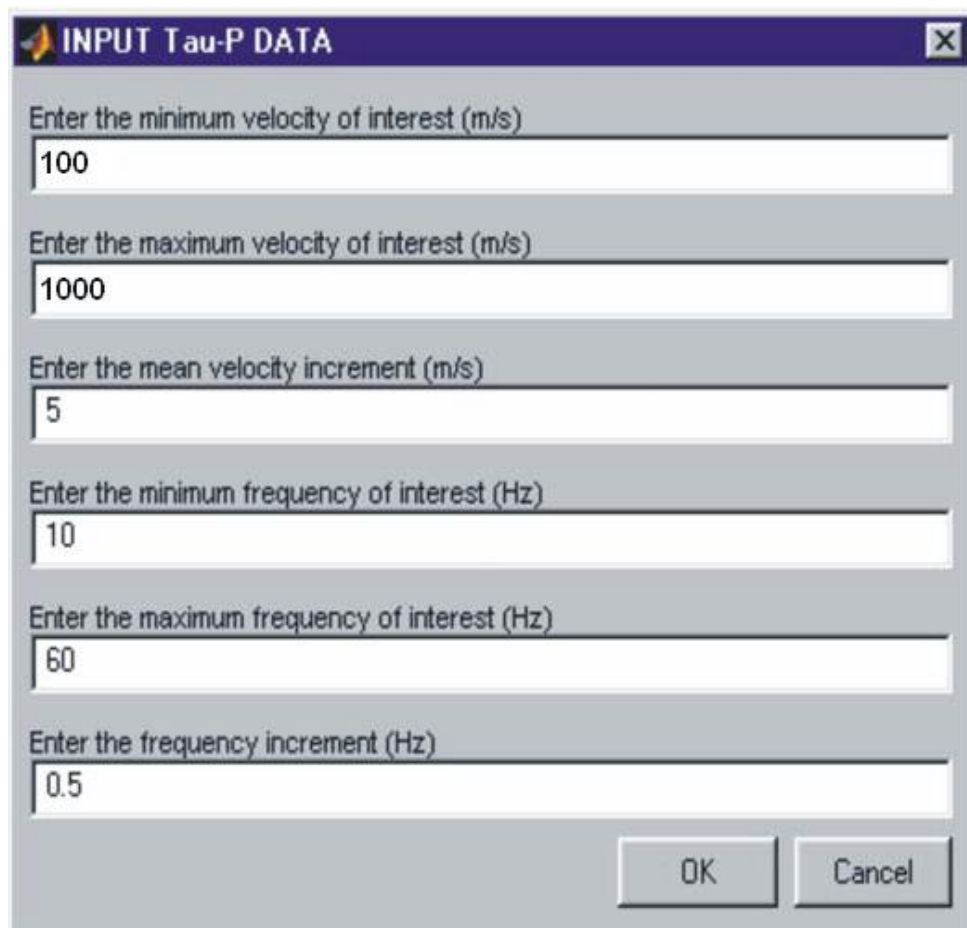
5.2.1. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες διασποράς των επιφανειακών κυμάτων που καταγράφονται από διάταξη κοινής πηγής προκύπτουν μετά από την εφαρμογή ενός μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου από τον χώρο $x-t$ στον χώρο $p-\omega$ (McMechan and Yedlin, 1981). Αρχικά εφαρμόζεται γραμμική χρονική απόκλιση (Linear MoveOut – LMO) στα σεισμικά δεδομένα.

Οι καμπύλες διασποράς αντιστοιχούν σε τοπικά ενεργειακά μέγιστα της κυματικής ενέργειας που παρατηρούνται στο πεδίο $p - f$ και ουσιαστικά απεικονίζουν τη μεταβολή της ταχύτητας φάσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh συναρτήσει της συχνότητας. Το ενδιαφέρον της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων στη συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται στη θεμελιώδη χαρακτηριστική καμπύλη, ενώ καμπύλες διασποράς ανώτερης τάξης εμφανίζουν υψηλότερες ταχύτητες από αυτήν της θεμελιώδους για συγκεκριμένη συχνότητα.

Αρχικά εισάγονται πληροφορίες για την γεωμετρία της διάταξης πηγής – γεωφώνων αλλά και για το εύρος των συχνοτήτων και των ταχυτήτων του διαγράμματος της καμπύλης διασποράς. Ορίζονται τα εξής:

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά
- Ελάχιστη ταχύτητα
- Μέγιστη ταχύτητα
- Διάστημα δειγματοληψίας ταχύτητας
- Ελάχιστη συχνότητα
- Μέγιστη συχνότητα
- Διάστημα δειγματοληψίας συχνότητας



INPUT Tau-P DATA

Enter the minimum velocity of interest (m/s)
100

Enter the maximum velocity of interest (m/s)
1000

Enter the mean velocity increment (m/s)
5

Enter the minimum frequency of interest (Hz)
10

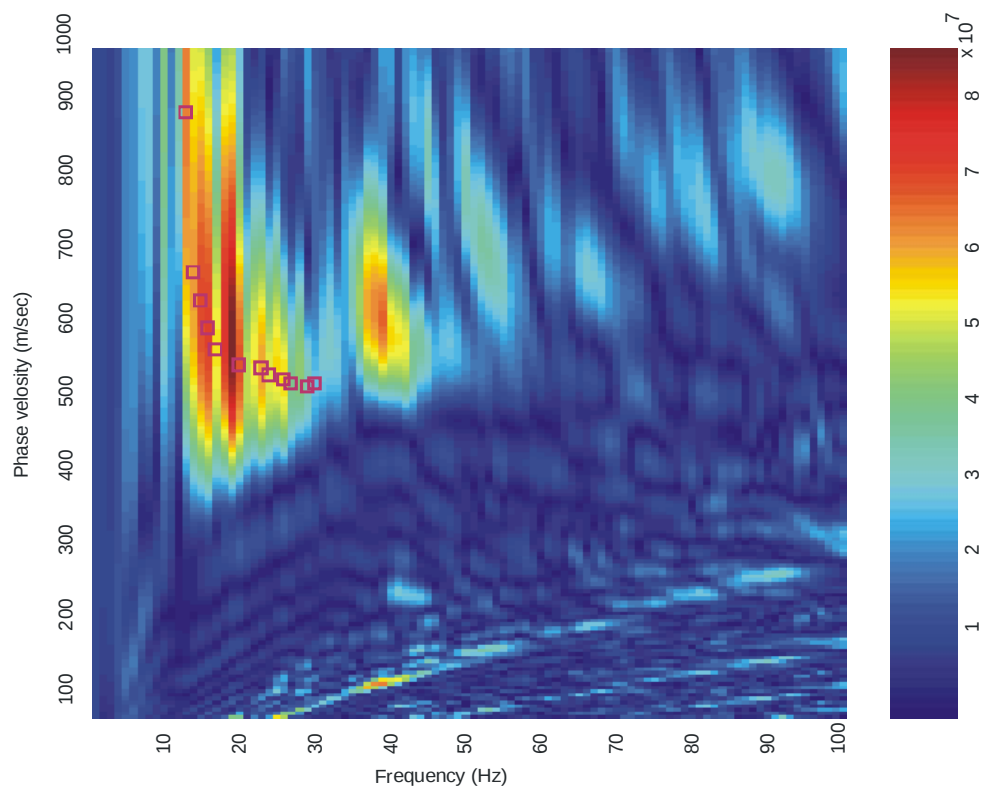
Enter the maximum frequency of interest (Hz)
60

Enter the frequency increment (Hz)
0.5

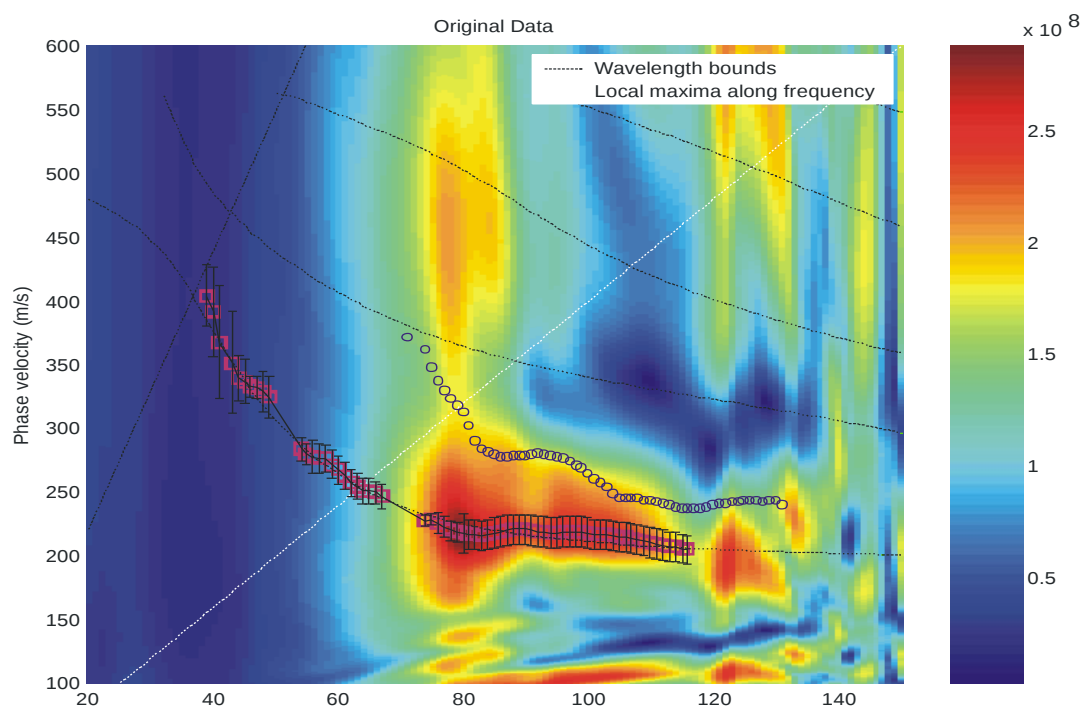
OK Cancel

Σχήμα 5.15 Εισαγωγή πληροφοριών για την γεωμετρία της διάταξης.

Κατόπιν υπολογίζονται οι καμπύλες διασποράς:



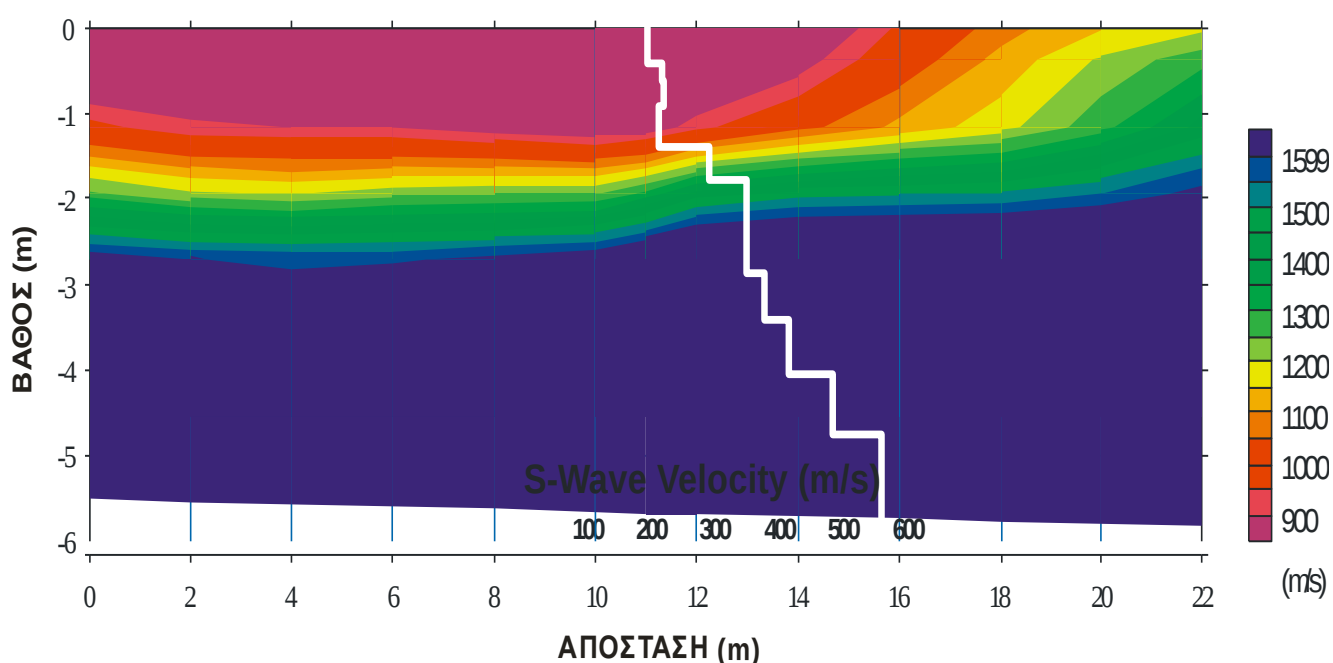
Σχήμα 5.16: Καμπύλη διασποράς για την γραμμή μελέτης 1 (καταγραφή 504).



Σχήμα 5.17: Καμπύλη διασποράς για την γραμμή μελέτης 2 (καταγραφή 103).

5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ – ΥΠΕΡΘΕΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο σχήμα 5.18 απεικονίζεται η υπέρθεση της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων στο μοντέλο βάθους των P κυμάτων για την γραμμή μελέτης 2. Παρατηρείται ότι η ταχύτητα των P κυμάτων σε βάθος 1 m είναι περίπου 900 m/s ενώ η ταχύτητα των S κυμάτων είναι περίπου 200 m/s. Στην συνέχεια η ταχύτητα των P κυμάτων αυξάνεται και φθάνει την τιμή των 1600 m/s περίπου ενώ η ταχύτητα των S κυμάτων φθάνει στα 570 m/s σε βάθος μεγαλύτερο των 5 m.



Σχήμα 5.18 Υπέρθεση της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων S στο μοντέλο βάθους P κυμάτων της γραμμής μελέτης 2.

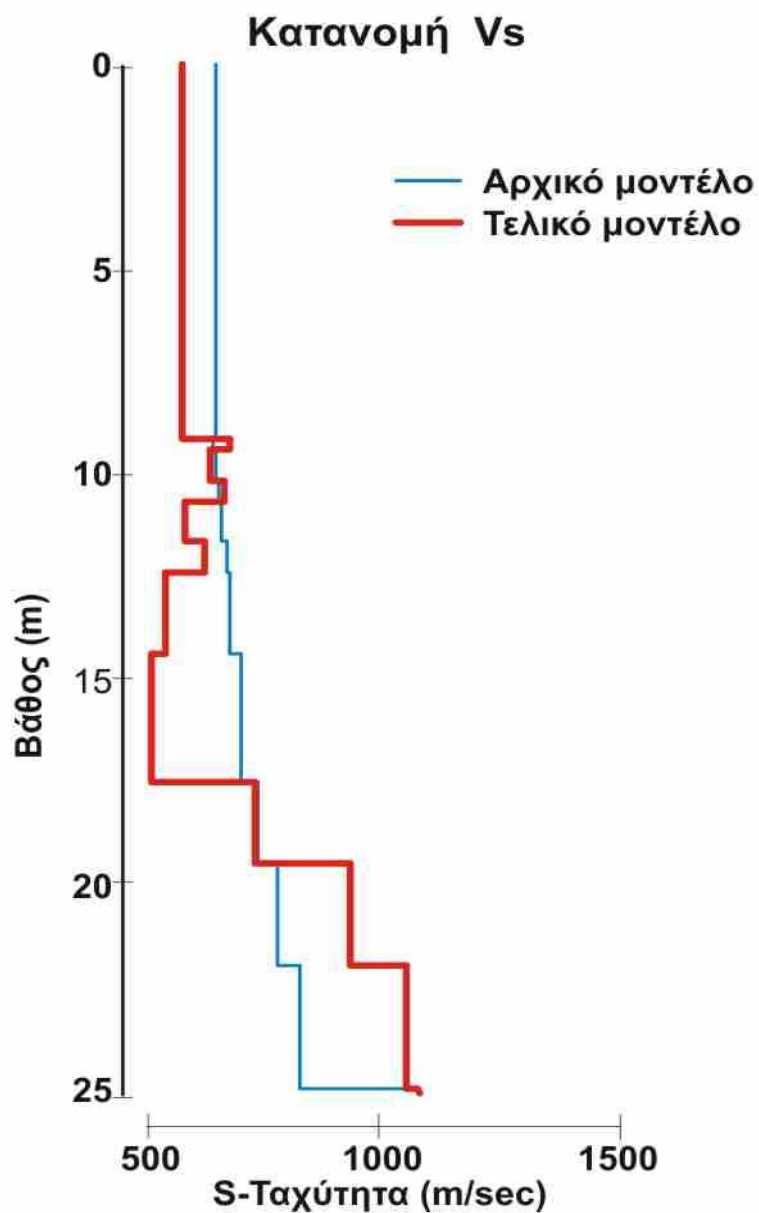
Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας ταχυτήτων των V_p κυμάτων (σεισμική τομογραφία) και των V_s κυμάτων (καμπύλες διασποράς) συναρτήσει του βάθους.

Πίνακας 5.1 Πίνακας που προκύπτει από τις ταχύτητες V_p (σεισμική τομογραφία) και V_s (καμπύλες διασποράς) για την γραμμή μελέτης 2 (καταγραφή 103) .

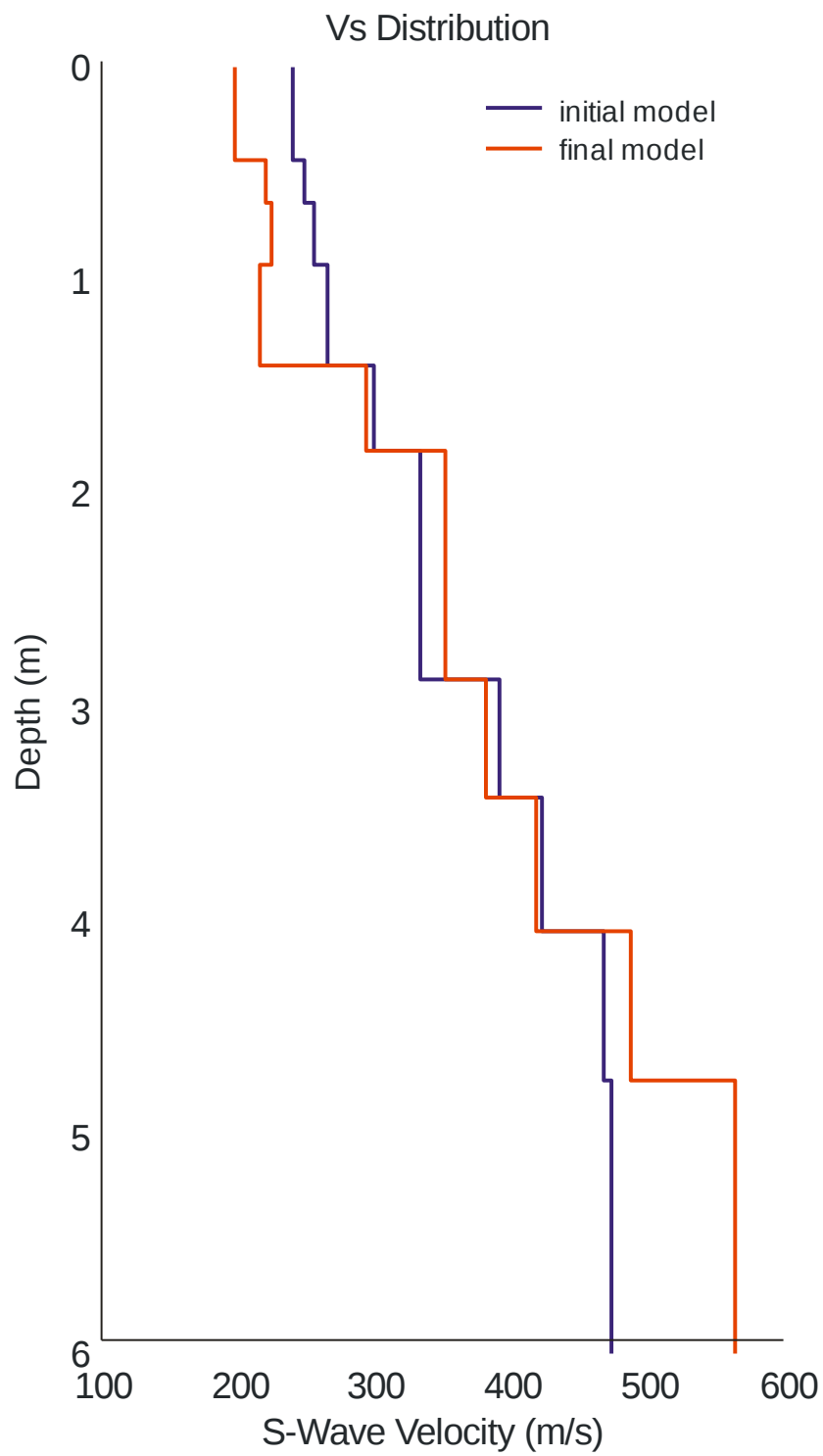
Depth (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)
0,44	487	198
0,65	542	221
0,92	552	225
1,4	528	215
1,79	721	294
2,87	861	351
3,42	934	381
4,04	1.025	418
4,73	1.194	487
4,73	1.379	562

Στο σχήμα 5.19 παρουσιάζεται η κατανομή V_s κυμάτων για την περιοχή της εταιρείας Χαλκιάδακη. Παρατηρείται η διάκριση τριών στρωμάτων. Το πρώτο στρώμα εκτείνεται μέχρι τα 9 m διότι σε εκείνο το βάθος αυξάνει βαθμιαία η ταχύτητα των S κυμάτων πράγμα το οποίο αποτελεί την αρχή του δεύτερου στρώματος. Το δεύτερο στρώμα εκτείνεται μέχρι τα 17,5 m περίπου, όπου πάλι έχουμε βαθμιαία αύξηση ταχύτητας των S κυμάτων. Μετά τα 17,5 m έχουμε την ύπαρξη τρίτου στρώματος.

Αντίστοιχα στο σχήμα 5.20 παρουσιάζεται η κατανομή V_s για την περιοχή της Πολυτεχνειούπολης. Όπως και στο σχήμα 5.19 έτσι και εδώ παρατηρείται η ύπαρξη τριών στρωμάτων. Το πρώτο στρώμα εκτείνεται σε βάθος περίπου 1,5 m, το δεύτερο στρώμα από τα 1,5 m μέχρι τα 4,2 m περίπου και το τρίτο από τα 4 m και κάτω. Η διάκριση των στρωμάτων γίνεται πάντα με βάση την αύξηση της ταχύτητας των S κυμάτων.



Σχήμα 5.19 Κατανομή της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (V_s) συναρτήσει του βάθους που αντιστοιχεί στο κέντρο της διάταξης των γεωφώνων για την καταγραφή 504 (στα 27.5 m της σεισμικής γραμμής μελέτης Line 1).



Σχήμα 5.20 Κατανομή της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (V_s) συναρτήσει του βάθους για την γραμμή μελέτης Line 2 (καταγραφή 103).

5.4 Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων (Λόγος Poisson και μέτρο ελαστικότητας Young)

Ο λόγος Poisson υπολογίζεται από την εξίσωση
$$\nu = \frac{\left[\frac{1}{2} \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]}{\left[\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]}$$
 όπως

αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, γνωρίζοντας τις ταχύτητες V_p και V_s . Το μέτρο ελαστικότητας του Young υπολογίζεται από την εξίσωση $E = 2\rho V_s^2 (1 + \nu)$.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό του λόγου Poisson και του μέτρου ελαστικότητας Young για την περιοχή της εταιρείας Χαλκιάδακη χρησιμοποιήθηκε ταχύτητα διαμήκων κυμάτων $V_p = 2000$ m/s (όπως προκύπτει από το τελικό μοντέλο του σχήματος 5.13 που έχει αναφερθεί παραπάνω), ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων $V_s = 530$ m/s και πυκνότητα $\rho = 1,87$ gr/cm³. Με αντικατάσταση των τιμών αυτών στους παραπάνω τύπους προκύπτει ότι ο λόγος Poisson (ν) = 0,46 και το μέτρο ελαστικότητας του Young (E) = 1,536 GPa. Αυτό γίνεται διότι η ταχύτητα των V_s κυμάτων, όπως προκύπτει από την αντίστοιχη υπέρθεση, μέχρι και τα 9,17 m είναι σταθερή.

Για τους αντίστοιχους υπολογισμούς στην περιοχή της Πολυτεχνειούπολης χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2 Ταχύτητες V_p και V_s , λόγος Poisson και μέτρο ελαστικότητας του Young για την γραμμή μελέτης 2 (περιοχή Πολυτεχνειούπολης).

Βάθος (m)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Πυκνότητα (gr/cm ³)	Μέτρο Ελαστικότητας Young (GPa)	Λόγος Poisson
0-1,5	211	882	1,81	0,237	0,46
1,5-2,97	294	1388	1,83	0,414	0,48

5.4.1 Κατηγορίες εδαφικών σχηματισμών ως προς την σεισμική τους απόκριση, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8, για τον προσδιορισμό των εδαφικών συνθηκών που επικρατούν σε μία περιοχή, όπου πρόκειται να αναγερθεί μια οικοδομή θα πρέπει να εκτελεστούν κατάλληλες έρευνες. Στην περιοχή κατασκευής και ειδικότερα στο έδαφος έδρασης της οικοδομής πρέπει να μην υπάρχουν ρήγματα, αστάθεια πρανών και μόνιμες παραμορφώσεις που προέρχονται από φαινόμενα υγροποίησης ή συμπύκνωσης κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Οι εδαφικές έρευνες ή οι γεωλογικές μελέτες που πρέπει να πραγματοποιηθούν για τον προσδιορισμό της σεισμικής απόκρισης της υπό μελέτης περιοχής, εξαρτώνται από την σπουδαιότητα της κατασκευής.

Στον Πίνακα 5.5 παρατίθενται οι κατηγορίες των εδαφών όπως αυτές αναφέρονται στον Ευρωκώδικα 8. Οι κατηγορίες αυτές προσδιορίζονται από την λιθολογία, την στρωματογραφική τους διάταξη και τον βαθμό τεκτονισμού που καθορίζουν τις γεωτεχνικές παραμέτρους $V_{s,30}$, N_{SPT} και c_u . Οι παράμετροι αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εκτίμηση της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών σε περίπτωση σεισμού και επεξηγούνται στη συνέχεια.

Πίνακας 5.3: Κατηγορίες εδαφών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8

Κατηγορία εδάφους	Στρωματογραφική σύσταση	Παράμετροι		
		$V_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (blows/30cm)	C_u (Kpa)
A	Βραχώδης ή σχεδόν βραχώδης γεωλογικός σχηματισμός συμπεριλαμβανομένου το πολύ 5 m επιφανειακού εδαφικού υλικού.	>800	-	-
B	Μεγάλες αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλικιών ή συμπαγούς αργίλου με τουλάχιστον μερικών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων τους με το βάθος.	360-800	>50	>250
C	Αποθέσεις πυκνής ή μέσης πυκνότητας άμμου, χαλικιών ή συμπαγούς αργίλου με πάχος από μερικές δεκάδες μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα.	180-360	15-50	70-250
D	Αποθέσεις από μικρής εως μέτριας συνεκτικότητας εδάφη (με ή χωρίς ενστρώσεις μαλακών συνεκτικών σχηματισμών) ή από επικρατούντα μαλακά πύρς συνεκτικά εδάφη.	<180	<15	<70
E	Σχηματισμός εδαφικής σύστασης που αποτελείται από ένα επιφανειακό αλλουβιακό στρώμα με τιμές $V_{s,30}$ του τύπου C ή D με πάχος μεταξύ 5 και 20 m, υπερκείμενο από συμπαγές γεωυλικό ταχύτητας $V_{s,30}>800$ m/s.			
S_1	Αποθέσεις που αποτελούνται -ή περιέχουν ένα στρώμα τουλάχιστον 10 m πάχος- από μαλακή άργιλο/ίλο με υψηλό δείκτη πλαστικότητας ($PI>40$) και υψηλή περιεκτικότητα σε νερό	<100	-	10-20
S_2	Αποθέσεις από επιδεκτικά σε ρευστοποιήση εδάφη, από ευπαθείς αργίλους ή άλλο γεωυλικό που δεν περιλαμβάνεται στους τύπους A-E ή S_1			

Όπου η παράμετρος c_u είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους (undrained shear strength of soil), ενώ η παράμετρος N_{SPT} εκφράζει τον αριθμό των κτύπων στην δοκιμή SPT (standar penetration test).

Η ταξινόμηση των εδαφών γίνεται σύμφωνα με τη παραμέτρου $V_{s,30}$ που υπολογίζεται από την σχέση:

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

όπου h_i και v_i είναι αντίστοιχα το πάχος (σε m) και η ταχύτητα των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (μέγιστη διατμητική παραμόρφωση των γεωϋλικών 10^{-5} ή μικρότερη) του i σχηματισμού ή στρώματος, σ' ένα σύνολο N στρωμάτων, που εμφανίζονται στα πρώτα 30 m από την επιφάνεια του εδάφους.

Για εδαφικές συνθήκες τύπων S_1 και S_2 απαιτούνται ειδικές μελέτες για τον προσδιορισμό της σεισμικής απόκρισης. Για αυτούς τους τύπους εδαφών και ειδικότερα για τον S_2 η πιθανότητα εδαφικής αστοχίας κατά την σεισμική δόνηση πρέπει να εξεταστεί σοβαρά.

Ο προσδιορισμός της σεισμικής απόκρισης των προαναφερθέντων κατηγοριών εδάφους περιλαμβάνεται στον Ευρωκώδικα 8, αλλά ξεφεύγει από το πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Βάσει των προαναφερθέντων και των αποτελεσμάτων από την επεξεργασία των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (S-Waves) προκύπτει ότι $V_{s,5} = 294$ m/s που σύμφωνα με τον πίνακα 5.3 το έδαφος που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις (περιοχή Πολυτεχνειούπολης) ανήκει στην κατηγορία Γ για την γραμμή μελέτης 2, ενώ για την γραμμή μελέτης Line – 1 προκύπτει ότι $V_{s,22} = 579$ m/s πράγμα που σημαίνει ότι ανήκει στην κατηγορία Β (περιοχή καταστήματος Χαλκιαδάκη). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο προσδιορισμός των κατηγοριών των εδαφών των γραμμών μελέτης 1 και 2 έγινε με βάσει τα μεγέθη V_{s5} και V_{s22} για την περιοχή της Πολυτεχνειούπολης και Χαλκιαδάκη αντίστοιχα. Το μέγεθος V_{s30} είναι μία εκτίμηση και για τις δύο γραμμές μελέτης διότι σε καμία από τις δύο, οι σεισμικές καταγραφές δεν έφτασαν τα 30 m.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες τιμών από τους οποίους προκύπτουν τα προαναφερθείσα αποτελέσματα.

Πίνακας 5.4: Πίνακας αποτελεσμάτων απο τα οποία προκύπτουν τα μεγέθη Vs5 και Vs30 για την γραμμή μελέτης 2 (περιοχή Πολυτεχνειούπολης).

Πάχος (m)	Vs (m/s)	Λόγος Πάχους/Vs	Vs5 (m/s)	Vs30 (m/s)
1,5	211	0,00710	294	439
3,5	342	0,01023		

Πίνακας 5.5: Πίνακας αποτελεσμάτων απο τα οποία προκύπτουν τα μεγέθη Vs22 και Vs30 για την γραμμή μελέτης 1 (οικόπεδο εταιρείας Χαλκιαδάκη).

Πάχος (m)	Vs (m/s)	Λόγος Πάχους/Vs	Vs22 (m/s)	Vs30 (m/s)
9,17	535	0,00980	579	617
12,83	703	0,01825		

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η επεξεργασία με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας μας παρέχει περισσότερες πληροφορίες για την κατανομή των ταχυτήτων στις δύο διαστάσεις και κυρίως για την πλευρική μεταβολή τους. Ωστόσο, η επεξεργασία με την μέθοδο της σεισμικής διάθλασης πριν την επεξεργασία με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας θεωρείται απαραίτητη για τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων αντιστροφής.

Πλησίον των κτιρίων του τμήματος των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων έχει γίνει μελέτη από το Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων (στα πλαίσια του προγράμματος ΚΡΙΝΟΣ), από την οποία προέκυψε ότι το μέτρο ελαστικότητας του Young κυμαίνεται από 1,5 έως 11 GPa. Στην παρούσα εργασία οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας του Young που υπολογίστηκαν είναι μια τάξη μικρότερη. Η διαφορά αυτή αποδίδεται στους παρακάτω γενικούς και μη λόγους:

- Η παραμόρφωση που υφίσταται το δοκίμιο στο εργαστήριο είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των σχηματισμών όταν διαδίδονται σεισμικά κύματα. Έχει παρατηρηθεί εμπειρικά ότι το μέτρο ελαστικότητας του Young εξαρτάται από την παραμόρφωση.
- Κατά την μετάδοση των σεισμικών κυμάτων στο υπέδαφος οι σχηματισμοί υφίστανται δυναμική παραμόρφωση ενώ στο δοκίμιο δεν συμβαίνει αυτό.
- Το εργαστήριο εξετάζει δοκίμια από μια γεώτρηση (σημειακή δειγματοληψία) ενώ στη γεωφυσική διασκόπηση το αποτέλεσμα αντιστοιχεί σε όγκο.

Από τον χαρακτηρισμό του υπαδάφους βάσει του Ευρωκώδικα 8, προέκυψε ότι οι περιοχές μελέτης 1 και 2 ανήκουν στην κατηγορία Β και Γ αντίστοιχα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής:

1. Carr, James R., 1995, Numerical Analysis for the Geological SciencesQ Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 592 pp
2. Eurocode 8, 2003, Design of structures for earthquake resistance, Brussels
3. Gelhar, Lynn W., Gutjahr, Allan L., and Naff, Richard L., 1979, Stochastic Analysis of Macrodispersion in a Stratified Aquifer: Water Resources Research, 15, 6, pp. 1387-1397
4. Haeni, F.P., Grantham, D.G., and Ellefsen, K., 1987, Microcomputer- based version of sipt-. A program for the interpretation of seismic- refraction data. Open file report 87-103-A. Harford, Connecticut
5. Hamdan, H., Kritikakis, G., Vafidis, A., and Manoutsoglou, E., 2007, The role of geophysical methods in salt- water intrusion mapping for strongly karst formations, 13th European Meeting of Enviromntal and Engineering Geophysics, Department of Mineral Resources Engineering, Technical University of Crete, Chania, Greece
6. Lankston, W.R., 1990, High –Resolution Refraction Seismic Data Acquisition and Interpretation, Geotechnical and Enviromental Geophysics, Vol 1, Ward, S., ed., Society of Exploration Geophysicists
7. Levander, Alan R., Hobbs, R.W., Smith, S.K., England, R.W., Snyder, D.B., and Hollinger, K., 1994, The Crust as a Heterogeneous ‘‘Otical’’ Medium, or ‘‘Crocodiles in the Mist’’: Tectonophysics, 232, pp. 281-297
8. Lindseth, Roy O., 1979, Synthetic Sonic Logs- A Process for Stratigraphic Interpretation: Geophysics, 44, pp 3-26
9. Mela, K., 1997 Viability of Using Seismic Data to Predict Hydrogeological Parameters, Proc. SAGEEP’ 97, Reno/Sparks, Truckee Meadows Community College, Nevada
10. Michalakakis, I., Economou, N., Hamdan, H., Vafidis, A., Manoutsoglou, E., Panagopoulos, G., Roubedakis, S., Vozinakis, C., Lampathakis, S., and Dassyra, E., 2006, Geological and Geophysical study of saltwater in intrusion at Stylos, Crete
11. Pullammanappallil, S.K., Levander, A., and Larkin, Steven, P., 1996, Estimation of Crustal Stochastic Parameters from Seismic Exploration Data: submitted to Jour. og Geophys. Research- July 1996
12. Reynolds, M.J., 1997, An introduction to applied and enviromental geophysics, John Wiley & Sons Ltd, Chichester
13. Schlumberger, Inc., 1972a, Log Interpretation, Charts: Houston
14. Schlumberger, Inc., 1972b, Log Interpretation, Vol. 1- Principles: Houston
15. SeisImager, 2003, Εγχειρίδιο Χρήσης Λογισμικού, Manual, Version 3.0, OYO Corporation
16. Sheriff, R.E., Geldart, L.P., 1995, Exploration Seismology 2nd Edition, Cambridge Univercity Press, ISBN 0-521-46282-7
17. Varsek, J.L., Lawton, D.C., 1985, The Seisgun- Part I: Field Tests, Journal of the Canadian Society of Exploration Geophysicists, Vol 21, No 1, P 64-76
18. Wylie, M.R.J., and Rose, W.D., 1950, Some Theoretical Considerations Related to the Quantitative Evaluation of the Physical Characteristics of

- Reservoir Rock from Electrical Log Data: Jour. Petrol. Technol., 2, pp. 105-118
19. Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., 1999, Estimation of near- surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves, Geophysics 64, No 3, p.691-700
 20. Yasar, E., Erdogan, Y., 2004 Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young' s modulus of carbonate rocks, Department of Mining Engineering, Cukurova University, Adana Turkey

Ελληνική:

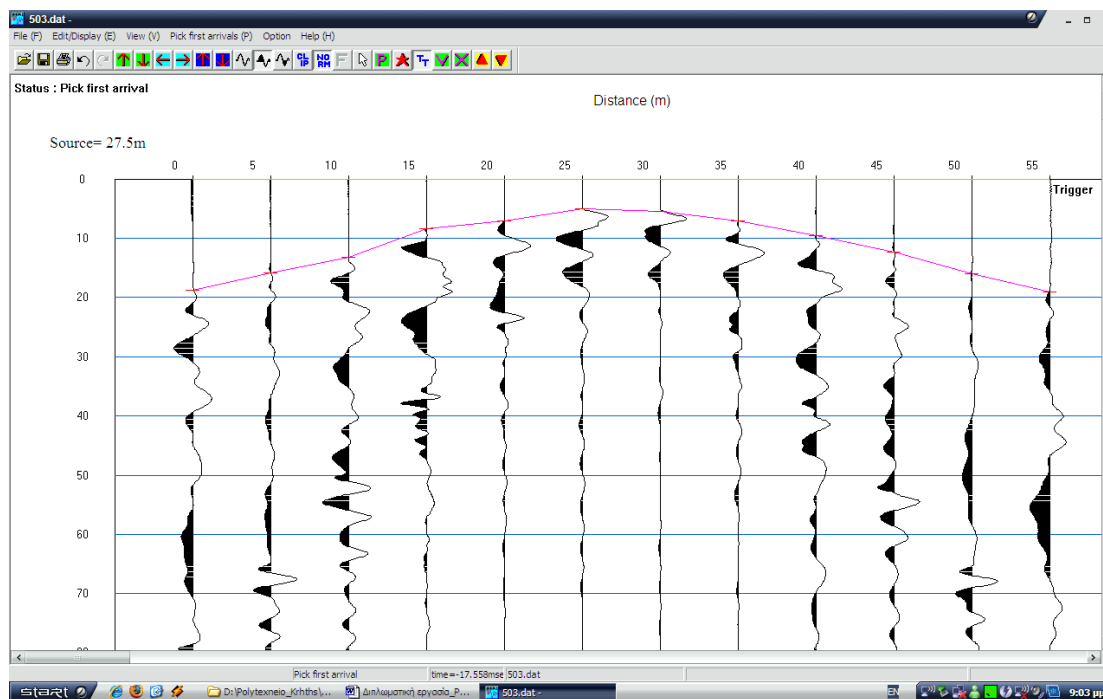
1. Αγιουτάντης, Ζ., και Σ.Π., Μερτίκας, 2003, Ένας πρακτικός οδηγός για την συγγραφή τεχνικών εκθέσεων, Αθήνα
2. Βαφείδης, Α., 1993, Εφαρμοσμένη Γεωφυσική- 1: Σεισμικές Μέθοδοι, Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά
3. Βογανάτσης, Δ., 2000, Σεισμική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο της αρχαίας Ιτάνου, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών πόρων, Χανιά
4. Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, 2006, Συνδυασμένη γεωφυσική έρευνα για την ανίχνευση του μετώπου υφαλμύρωσης και την διαχείριση των υπόγειων νερών στην περιοχή Στύλος-Χανίων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά
5. Κρητικάκης, Γ., 2000, Συμβολή των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh στην εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υπεδάφους, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά
6. Κρητικάκης, Γ., 2001, Προσδιορισμός της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων από καταστροφές επιφανειακών κυμάτων Rayleigh, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά
7. Κρητικάκης, Γ., Βαφείδης, Α, Α, Gourry, C, 2004, Ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και εφαρμογή σε χώρο απόθεσης απορριμμάτων στην Β. Ιταλία και στην βιομηχανική περιοχή Porto Petroli, Genoa
8. Ραπτάκης, Δ., 1995, Συμβολή στον προσδιορισμό της γεωμετρίας και των δυναμικών ιδιοτήτων των εδαφικών σχηματισμών και στη σεισμική απόκρισή τους, Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνική σχολή Α.Π.Θ., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
9. Παπαθανασίου, Χριστίνα, 2007, Γεωφυσική έρευνα με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας στο Μοχό- Ηρακλείου, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά
10. Τσούσης, Νίκος, 2007, Σεισμική διασκόπηση στο τμήμα Λυγαριά- Περιβόλι του οδικού άξονα Ε65, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά
11. Κρητικάκης, Γ., 2004, Επιφανειακά κύματα : Εφαρμογές σε περιβαλλοντικά και γεωτεχνικά προβλήματα, Διαδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης,

Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων,
Χανιά

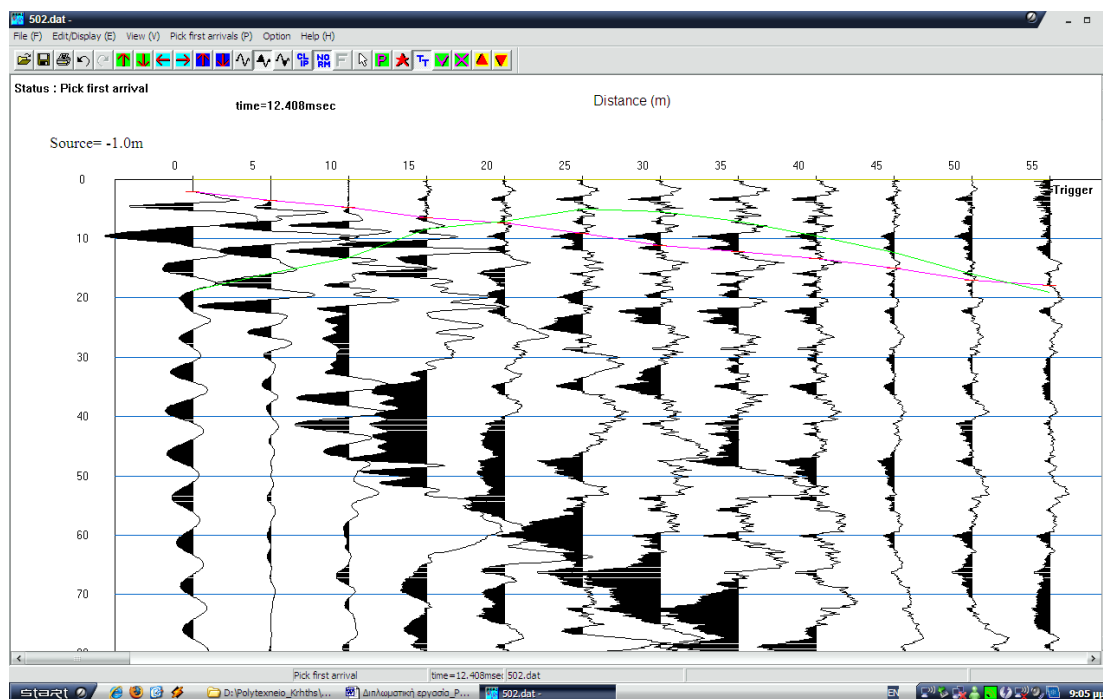
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ

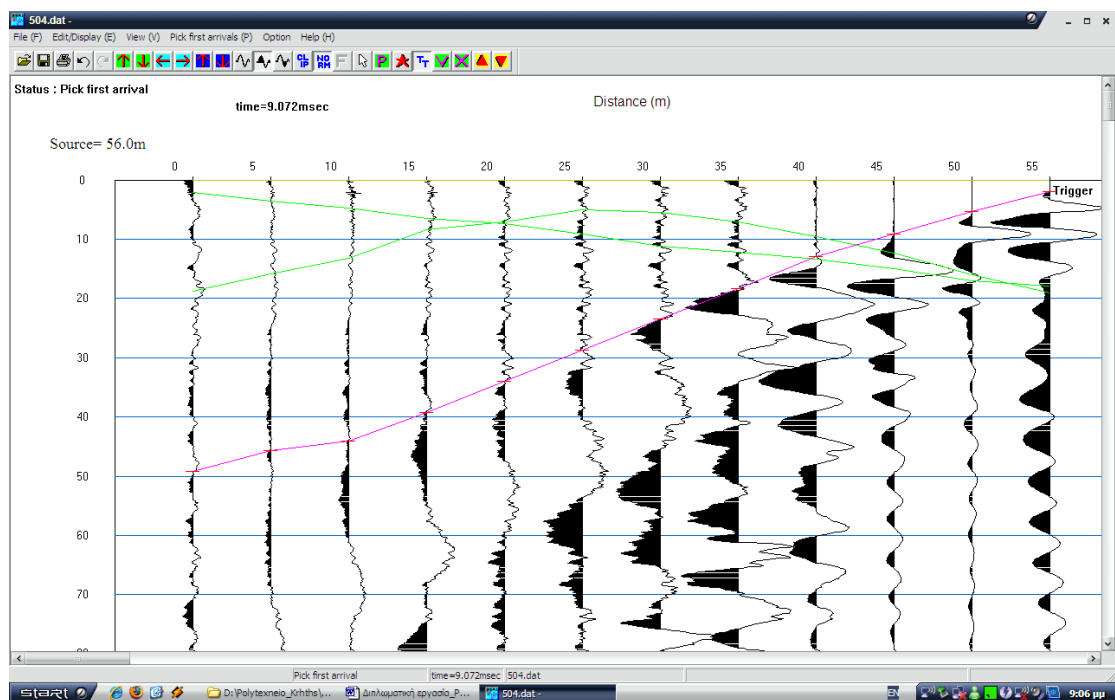
ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ 1 (Line - 1)



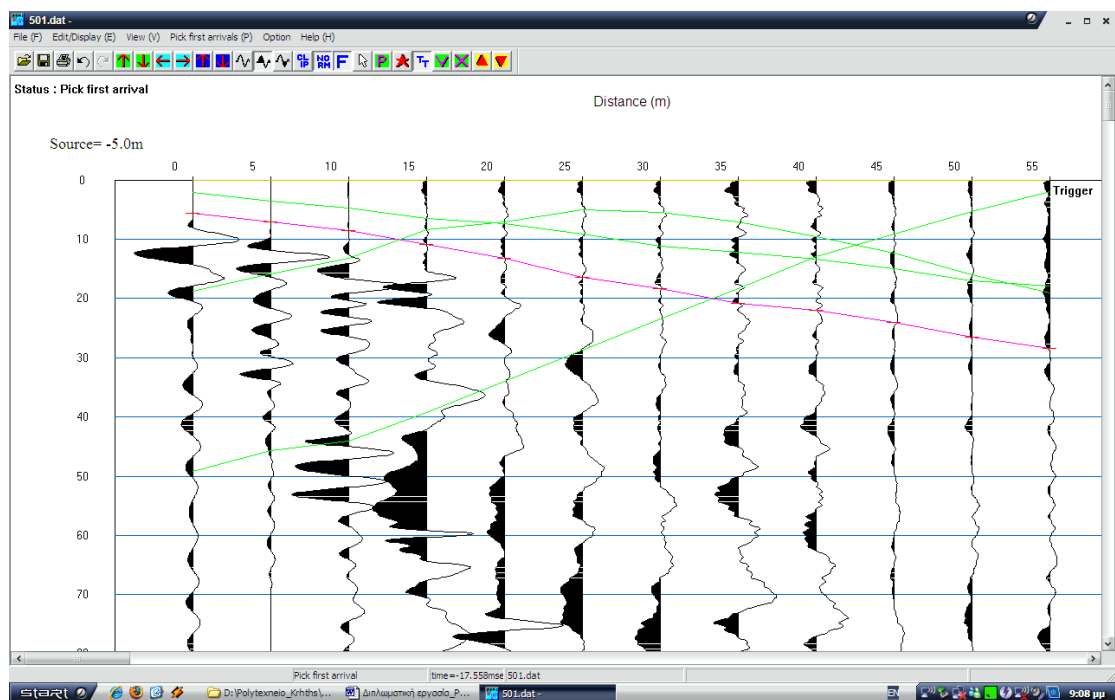
Σχήμα 1: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις για την καταγραφή 503 της γραμμής μελέτης 1 (Line-1).



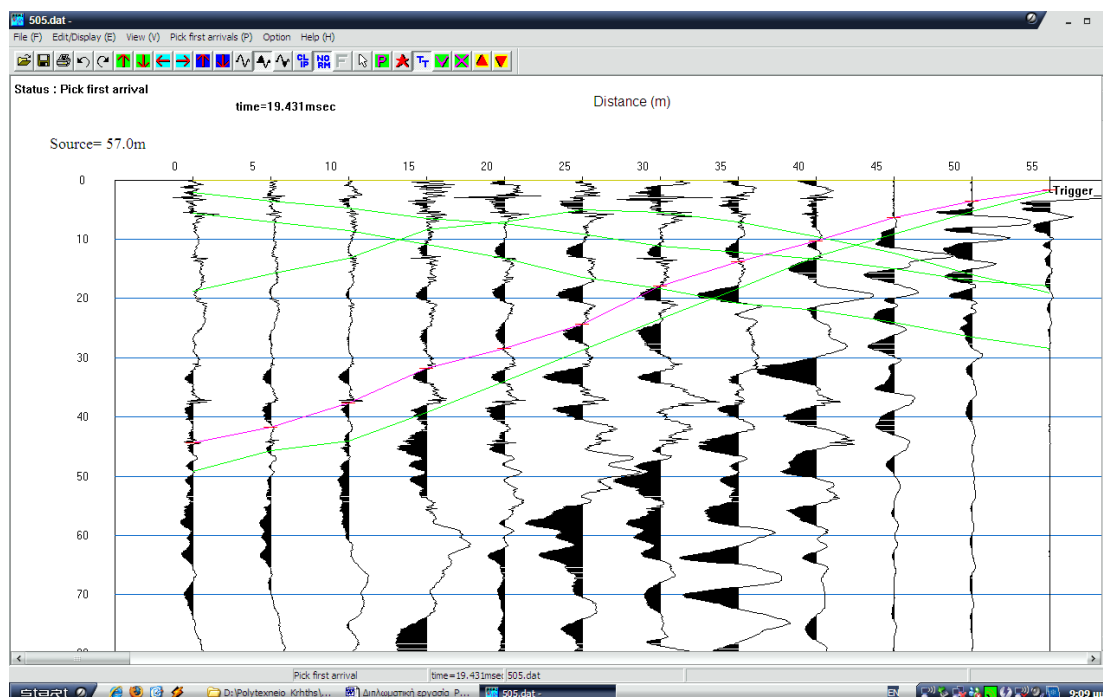
Σχήμα 2: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις για την καταγραφή 502 της γραμμής μελέτης 1 (Line-1).



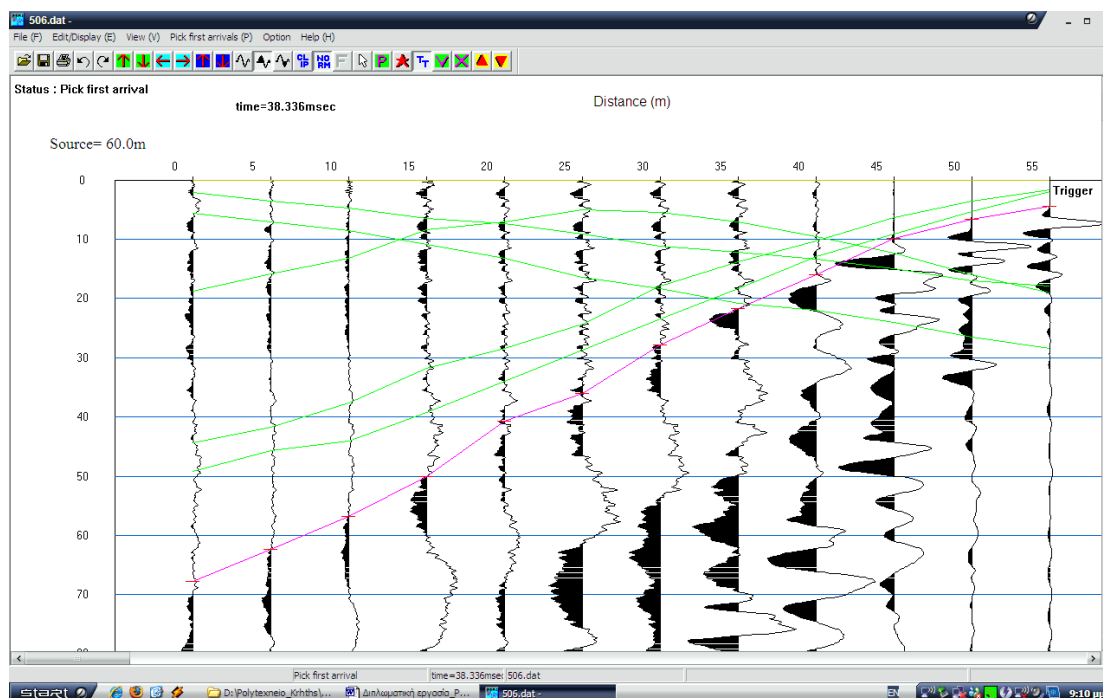
Σχήμα 3: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις για την καταγραφή 504 της γραμμής μελέτης 1 (Line-1).



Σχήμα 4: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις για την καταγραφή 501 της γραμμής μελέτης 1 (Line-1).

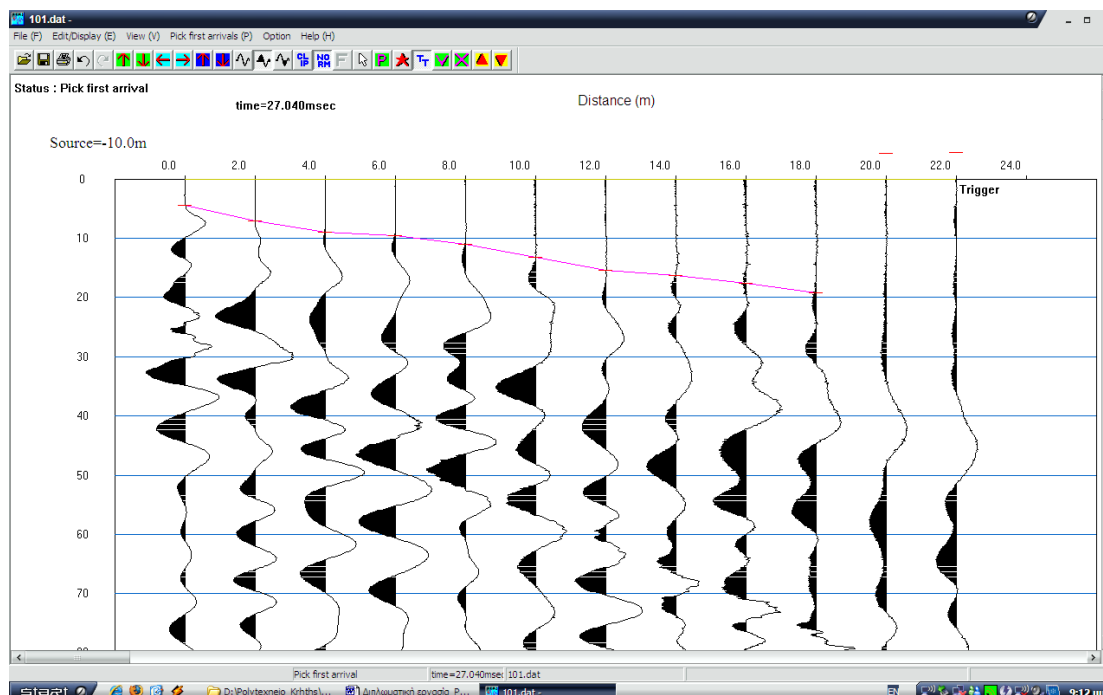


Σχήμα 5: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις για την καταγραφή 505 της γραμμής μελέτης 1 (Line-1).

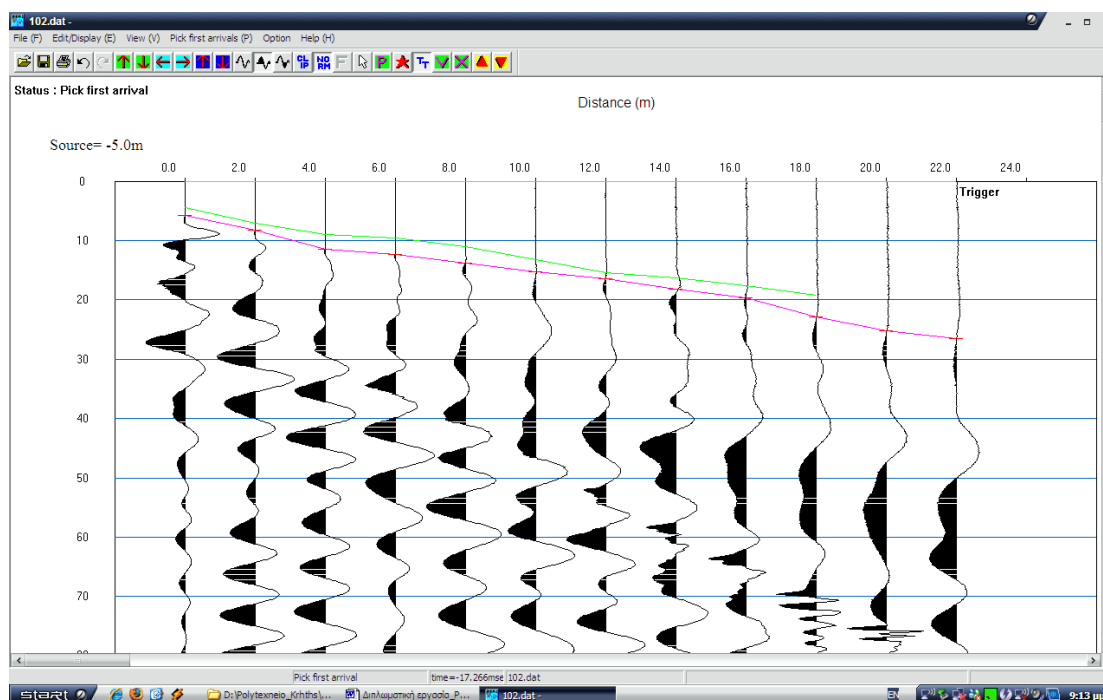


Σχήμα 6: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις για την καταγραφή 506 της γραμμής μελέτης 1 (Line-1).

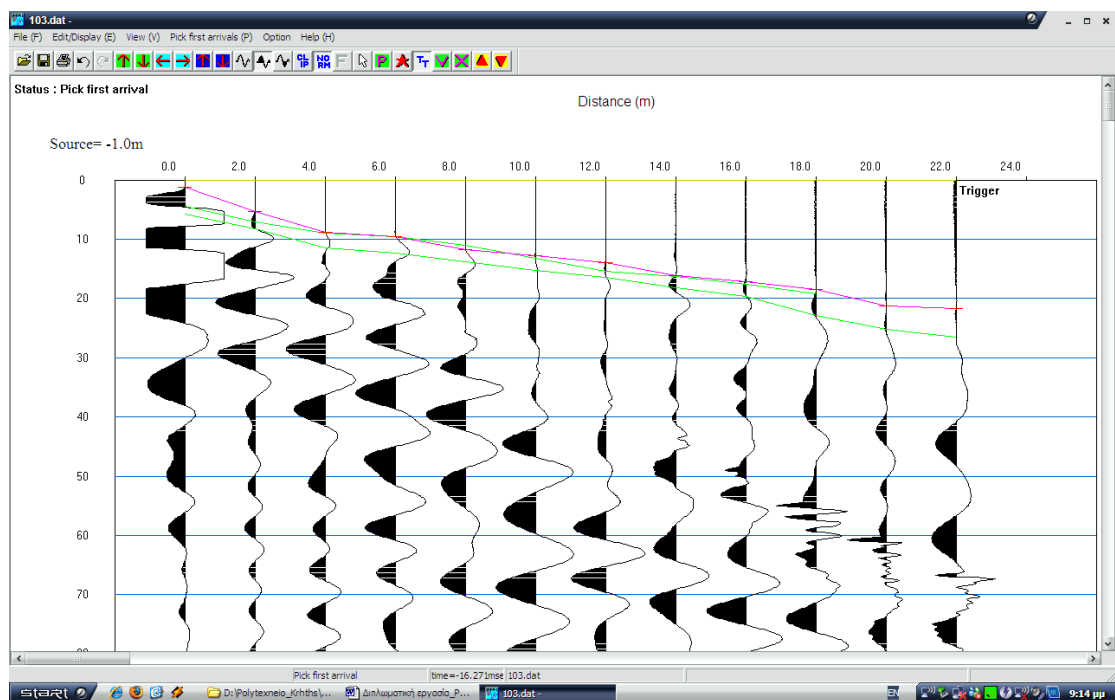
ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ 2 (Line - 2)



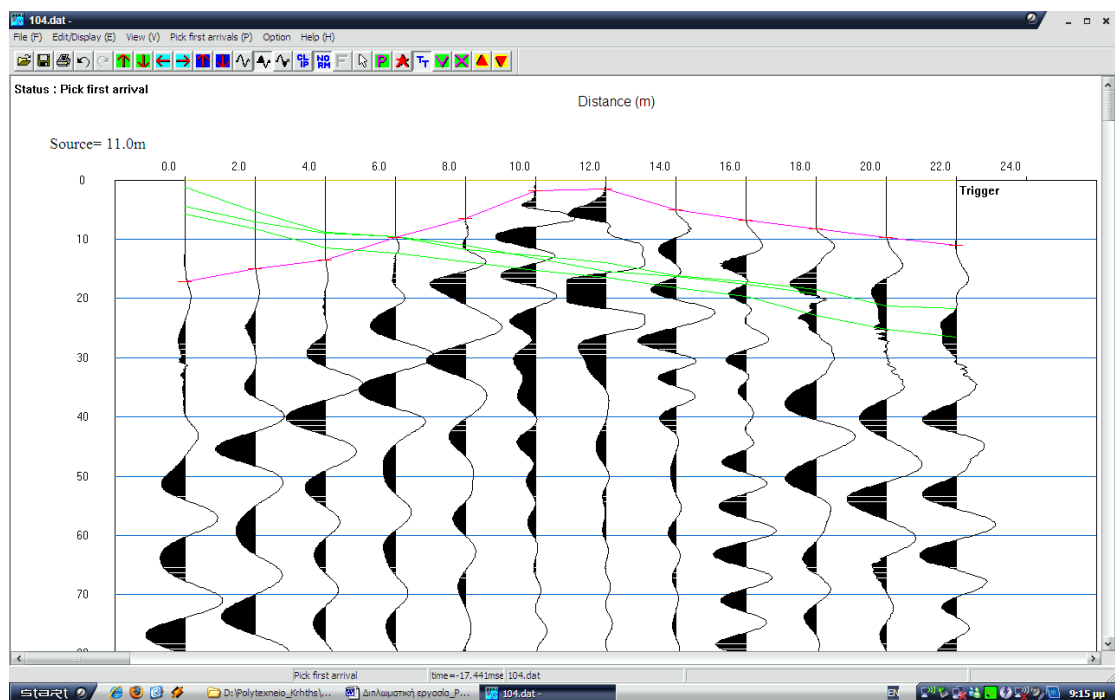
Σχήμα 7: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις για την καταγραφή 101 της γραμμής μελέτης 2 (Line-2).



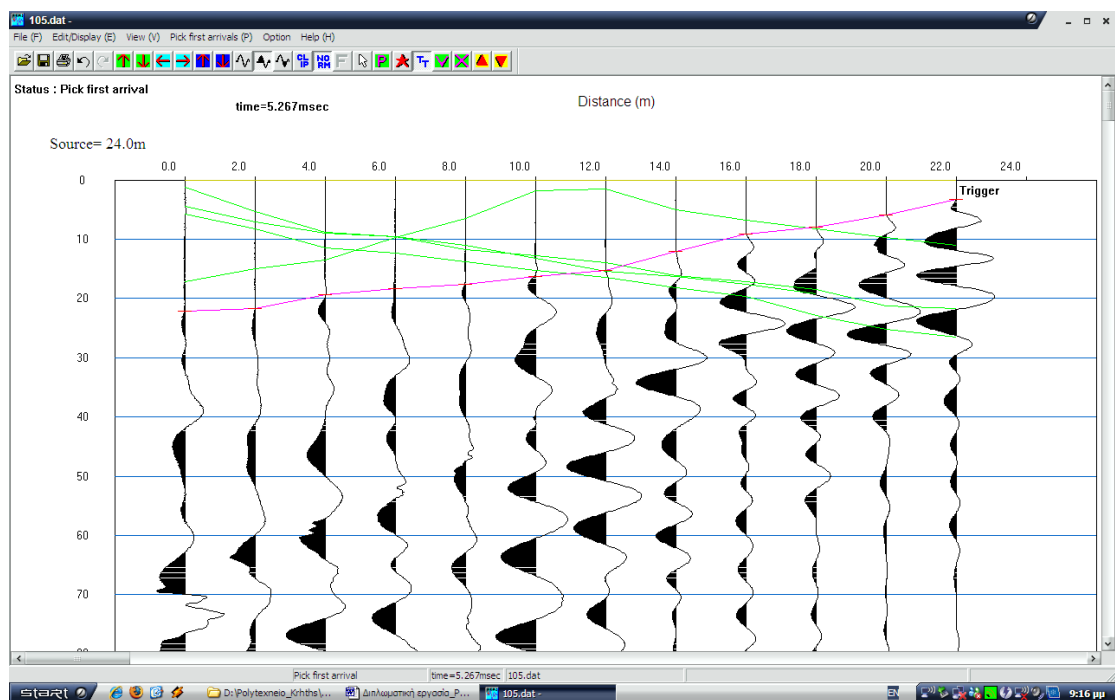
Σχήμα 8: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις για την καταγραφή 102 της γραμμής μελέτης 2 (Line-2).



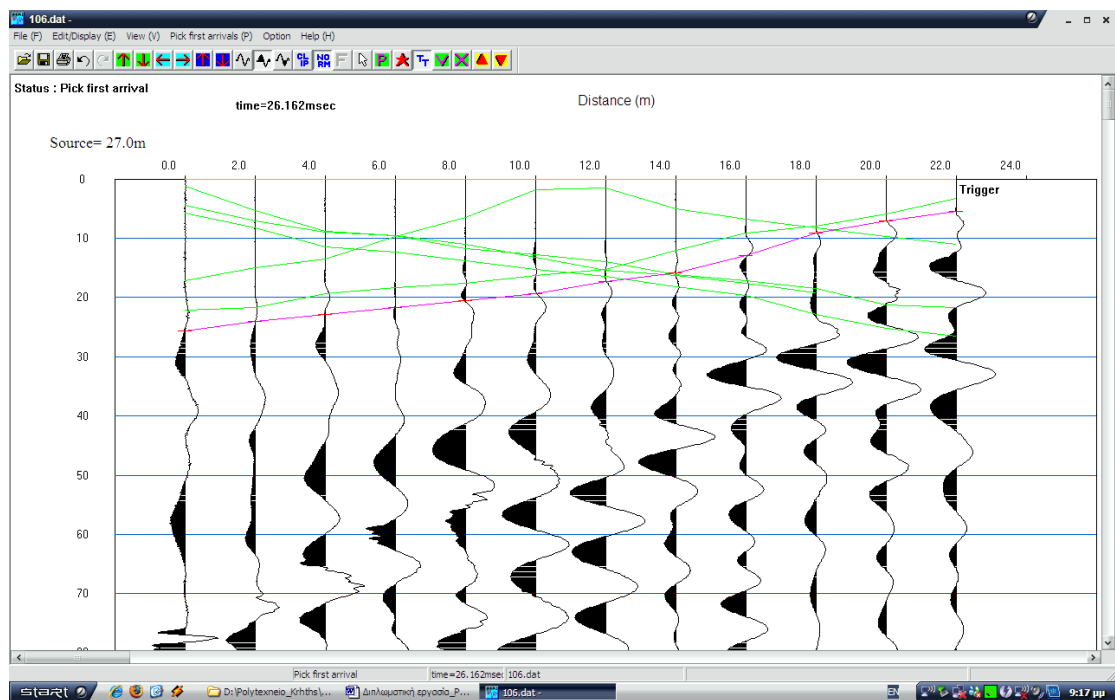
Σχήμα 9: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις για την καταγραφή 103 της γραμμής μελέτης 2 (Line-2).



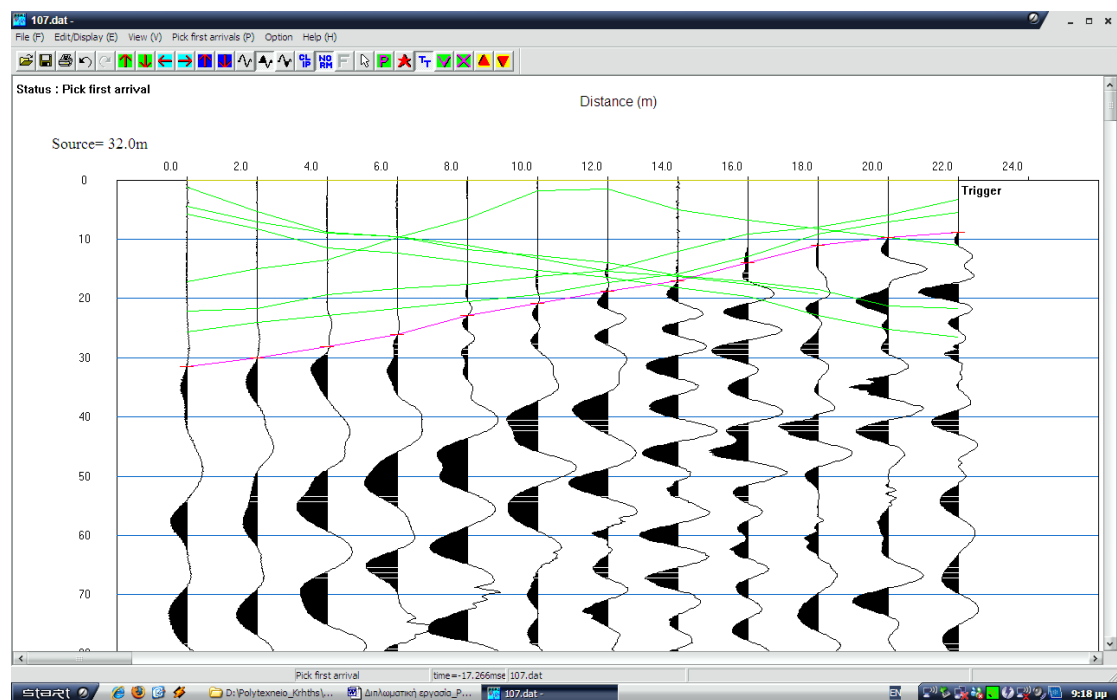
Σχήμα 10: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις για την καταγραφή 104 της γραμμής μελέτης 2 (Line-2).



Σχήμα 11: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις για την καταγραφή 105 της γραμμής μελέτης 2 (Line-2).



Σχήμα 12: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις για την καταγραφή 106 της γραμμής μελέτης 2 (Line-2).



Σχήμα 13: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις για την καταγραφή 107 της γραμμής μελέτης 2 (Line-2).