ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ **ΟΡΥΚΤΩΝ** ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΔΙΠΔΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΟ ΟΙΚΟΠΕΔΟ ΤΟΥ ΠΑΛΑΙΟΥ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟΥ ΤΗΣ ΑΒΕΑ ΧΑΝΙΑ

ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ Σ. ΜΕΝΑΓΙΑΣ

<u>ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ :</u>

ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ, ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ ΖΑΧΑΡΙΑΣ, Καθηγητής ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ,

Καθηγητής (Επιβλέπων) Λέκτορας

Στην Οικογένειά μου,

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με κύριο σκοπό την μελέτη του υπεδάφους με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας στην περιοχή του παλαιού εργοστασίου της ABEA. Ο κύριος στόχος εντοπίζεται στη διερεύνηση της στρωματογραφίας του υπεδάφους μέσω της μέτρησης, τόσο της ταχύτητας των διαμήκων (P- Waves) όσο και των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (S-Waves).

Στην εργασία αρχικά περιγράφονται οι βασικές αρχές της μεθόδου της σεισμικής διάθλασης καθώς και η μέθοδος της σεισμικής τομογραφίας (λογισμικό SeisImager).

Παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης, η γεωλογία της περιοχής, τα διαθέσιμα αποτελέσματα γεωτρητικής έρευνας και η επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων.

Από τις ταχύτητες (V_p και V_s) εκτιμήθηκαν ο λόγος Poisson και το μέτρο ελαστικότητας του Young στους υπό μελέτη σχηματισμούς. Επίσης από τις μέσες ταχύτητες διάδοσης των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων, πραγματοποιήθηκε χαρακτηρισμός του υπεδάφους βάσει του Ευρωκώδικα 8.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ		
ПЕРІЛНΨН	iii	
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	iv	
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1	
2. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗ	3	
2.1 Βασικές αρχές διάδοσης σεισμικών κυμάτων	3	
2.2 Περιορισμοί της μεθόδου σεισμικής διάθλασης	7	
2.3 Απόκτηση καταγραφών και εξοπλισμός	8	
2.3.1 Σεισμική διάθλαση Ρ – κυμάτων	8	
2.3.2 Σεισμική διάθλαση S – κυμάτων	8	
2.4 Εκτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων και ταξινόμηση εδαφών σύμφωνα	με τον	
Ευρωκώδικα 8	11	
2.5 Μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων σεισμικής διάθλασης	15	
2.5.1 Μέθοδος Ray –Tracing 2.5.2 Μέθοδος σεισμικής τομογραφίας	15 16	
3.ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΤΡΗΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	23	
3.1 Περιγραφή της περιοχής μελέτης	23	
3.2 Περιγραφή γεωτρητικών δεδομένων	26	
4. ΣΥΛΛΟΓΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ, ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΥΓΙ	ΚΡΙΣΗ	
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	32	
4.1 Συλλογή σεισμικών δεδομένων	32	
4.2 Επεξεργασία δεδομένων με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης	34	
4.2.1 Επιλογή των πρώτων αφίξεων	34	
4.2.2 Δημιουργία δρομοχρονικού διαγράμματος	35	
4.2.3 Προσδιορισμός της σεισμικής ταχύτητας και του μοντέλου βάθους		
4.3 Επεξεργασία δεδομένων με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας	40	

4.3.2 Χρήση μη οριζόντια στρωματωμένου μέσου ως αρχικό μοντέλο	47
4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων	53
4.5 Μηχανικός χαρακτηρισμός των εδαφών	61

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ64

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	65
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Σεισμικές καταγραφές	66

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</u>

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γνώση της γεωλογίας μιας περιοχής και η απόκτηση πληροφοριών για το υπέδαφος, αποτελούν αναγκαία και σημαντικά βήματα για την εκπόνηση ερευνών επιστημονικού ενδιαφέροντος, για την κατασκευή τεχνικών έργων, για τη λύση γεωτεχνικών προβλημάτων κ.α. Η επιστήμη της γεωφυσικής, μέσω των γεωφυσικών ερευνών, στοχεύει στη συλλογή πληροφοριών γεωλογικού ενδιαφέροντος και στην αξιοποίησή τους για πρακτικούς σκοπούς. Οι γεωφυσικές μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί, αποσκοπούν στον προσδιορισμό των γεωλογικών σχηματισμών του υπεδάφους και στην εύρεση των ιδιοτήτων τους. Η σεισμική τομογραφία έχει αποδειχθεί ένα πολύ αποτελεσματικό εργαλείο απεικόνισης σεισμικών δεδομένων σε πολλές εφαρμογές. Εντούτοις, είναι πολύ σημαντικό, το γεγονός ότι οι σεισμικές εικόνες ταχύτητας πρέπει να ερμηνεύονται και όχι απλά να γίνονται αποδεκτές ως σαφή δεδομένα της δομής που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, αντλώντας στοιχεία από τα γεωτρητικά δεδομένα που υπάρχουν διαθέσιμα για την περιοχή του παλαιού εργοστασίου της ABEA αποσκοπεί στον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκων και εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων στους επιφανειακούς σχηματισμούς και τελικά στον υπολογισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υπεδάφους (λόγος Poisson και μέτρο ελαστικότητας του Young).

Η δομή της συγκεκριμένης εργασίας αρχίζει με την παράθεση των βασικών αρχών της σεισμικής διάθλασης και των περιορισμών της, και συνεχίζει με την απόκτηση των καταγραφών τον πειραματικό εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε καθώς και τη γεωμετρία των γραμμών μελέτης.

Κατόπιν αναφέρονται οι μεθοδολογίες εκτίμησης μηχανικών ιδιοτήτων από σεισμικά δεδομένα. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι μέθοδοι επεξεργασίας των σεισμικών δεδομένων που εφαρμόστηκαν στην εργασία αυτή. Στη συνέχεια γίνεται μια γενική αναφορά στην γεωλογία της περιοχής.

Ακολούθως περιγράφονται τα γεωτρητικά δεδομένα τα οποία συνδυαζόμενα με τα αποτελέσματα της διασκόπησης μας αποκαλύπτουν τη δομή του υποβάθρου του οικοπέδου της ABEA.

Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται η επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης και εν συνεχεία με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας. Ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων επεξεργασίας σε συνδυασμό με τα γεωτρητικά δεδομένα. Βάσει των ταχυτήτων της σεισμικής διάθλασης (V_p και V_s) πραγματοποιείται ο υπολογισμός των μηχανικών ιδιοτήτων (λόγος Poisson και μέτρο ελαστικότητας του Young) των υπό μελέτη σχηματισμών καθώς και χαρακτηρισμός του υπεδάφους βάσει του Ευρωκώδικα 8 σύμφωνα με την μέση ταχύτητα των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων.

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</u> ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗ

2.1. Βασικές αρχές διάδοσης σεισμικών κυμάτων

Η πορεία της σεισμικής ακτίνας αλλάζει όταν το κύμα διαδίδεται σε γεωλογικούς σχηματισμούς όπου η ταχύτητα μεταβάλλεται με το βάθος. Για σεισμική ακτίνα η οποία συναντά διαχωριστική επιφάνεια η γωνία πρόσπτωσης της σε αυτήν, i₀ και η γωνία διάθλασης, i₂, συνδέονται μέσω του νόμου του Snell:

$$p = \frac{\sin(i_0)}{V_1} = \frac{\sin(i_2)}{V_2}$$
(2.1)

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. Σε μια τέτοια περίπτωση ο νόμος του Snell τροποποιείται ως εξής:

$$\sin(i_c) = \frac{V_1}{V_2}$$
 (2.2)

Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της ορικής γωνίας, παρατηρείται ολική ανάκλαση. Βέβαια, 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. 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 2.1). Η γωνία των αναδυόμενων προς την επιφάνεια σεισμικών ακτίνων με την κάθετο στην διαχωριστική επιφάνεια είναι ίση με την ορική γωνία. Αυτά τα αναδυόμενα σεισμικά κύματα.



Σχήμα 2.1 : Σχηματική παράσταση της δημιουργίας των μετωπικών κυμάτων μεταξύ δύο γεωλογικών σχηματισμών διαφορετικής σεισμικής ταχύτητας (V₁,V₂ αντίστοιχα) (Reynolds, 1997).

Τα σεισμικά κύματα που καταγράφονται πρώτα στις θέσεις των γεωφώνων είναι τα απευθείας και τα μετωπικά κύματα. Τα απευθείας κύματα καταγράφονται πρώτα στα γεώφωνα, που βρίσκονται μέχρι ορισμένη απόσταση x_c από το σημείο της δημιουργίας σεισμικής δόνησης. Η απόσταση αυτή στην περίπτωση δύο οριζοντίων στρωμάτων δίνεται από τη σχέση (Βαφείδης, 1993):

$$x_{c} = 2 \cdot z_{1} \cdot \sqrt{\frac{V_{2} + V_{1}}{V_{2} - V_{1}}}$$
(2.3)

όπου z_1 είναι το πάχος του πρώτου στρώματος.

Στην περίπτωση δύο οριζόντιων στρωμάτων οι καταγραφές που θα προκύψουν από τη σεισμική διάθλαση θα έχουν τη μορφή του Σχήματος 2.2. Παρατηρείται ότι ο χρόνος διαδρομής των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων είναι γραμμική συνάρτηση της απόστασης πηγής γεωφώνου. Τα απευθείας κύματα αντιστοιχούν στο ευθύγραμμο τμήμα ΟC ενώ τα μετωπικά στο CD (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.2 : Σχηματική παράσταση σεισμικών καταγραφών διάθλασης των οποίων οι πρώτες αφίζεις (διακεκομμένη γραμμή) αντιστοιχούν σε καταγραφές απευθείας (OC) και μετωπικών κυμάτων (CD).



Σχήμα 2.3 : Καμπύλες διαδρομής των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων.

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

- Δημιουργείται το δρομοχρονικό διάγραμμα των πρώτων αφίξεων (x-t) δηλαδή το διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται οι χρόνοι των πρώτων αφίξεων σε συνάρτηση με την απόσταση πηγής-γεωφώνου (Σχήμα 2.3)
- Επιλέγονται τα σημεία που βρίσκονται σε ευθεία η οποία ξεκινά από την αρχή των αξόνων (OC Σχήμα 2.3). Από την κλίση αυτής της ευθείας (απευθείας κύματα) υπολογίζεται η σεισμική ταχύτητα στο επιφανειακό στρώμα (V₁ = 1 / κλίση ευθείας απευθείας κυμάτων).
- Προσδιορίζεται η κλίση της ευθείας η οποία περνά από τα υπόλοιπα σημεία (μετωπικά κύματα) αλλά και το σημείο τομής αυτής της ευθείας με τον άξονα των χρόνων (χρόνος συνάντησης T₂(0) Σχήμα 2.3). Από την κλίση της ευθείας των μετωπικών κυμάτων, υπολογίζεται η σεισμική ταχύτητα στο δεύτερο στρώμα (V₂ = 1 / κλίση ευθείας μετωπικών κυμάτων).
- Προσδιορίζεται η ορική γωνία i_c από τη σχέση (2.2): sin(i_c) = $\frac{V_1}{V_2}$
- Υπολογίζεται το πάχος του επιφανειακού στρώματος z₁ από τη σχέση:

$$z_{1} = \frac{T_{2}(0) \cdot V_{1}}{2\cos(i_{c})}$$
(2.4)

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. Ως χρόνος καθυστέρησης σε πλάγιο κλάδο της σεισμικής ακτίνας που περιγράφει μετωπικό κύμα ορίζεται ο πρόσθετος χρόνος που χρειάζεται το κύμα για να διατρέξει τον κλάδο αυτό, σε σχέση με το χρόνο που θα χρειαζόταν το κύμα για να διανύσει την οριζόντια προβολή του κλάδου με τη μέγιστη ταχύτητα που απόκτησε αυτό κατά τη διαδρομή του. Στην περίπτωση δύο στρωμάτων, ο χρόνος καθυστέρησης στον κλάδο της σεισμικής ακτίνας δίνεται από τη σχέση:

$$D_{12} = \frac{z_1 \cdot \cos(i_c)}{V_1}$$
(2.5)

2.2 Περιορισμοί της μεθόδου σεισμικής διάθλασης

Η εκτίμηση του πάχους και της σεισμικής ταχύτητας σε κάθε στρώμα με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης είναι θεωρητικά απλή. Στην πράξη, όμως, υπάρχουν διάφορες πηγές σοβαρών σφαλμάτων κατά την εφαρμογή της μεθόδου. Μόνο όταν η σεισμική ταχύτητα σε κάθε στρώμα είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την ταχύτητα στο υπερκείμενό του στρώμα και όταν το πάχος των στρωμάτων είναι αρκετά μεγάλο, η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Οι βασικές πηγές σφαλμάτων κατά την εφαρμογή της μεθόδου της σεισμικής διάθλασης εντοπίζονται κυρίως στην αδυναμία της μεθόδου να εντοπίσει ενδιάμεσο στρώμα. Πιο συγκεκριμένα:

- Το ενδιάμεσο στρώμα χαρακτηρίζεται από μικρότερη σεισμική ταχύτητα σε σχέση με αυτήν του υπερκείμενου στρώματος. Σε αυτή την περίπτωση δεν είναι δυνατή η δημιουργία μετωπικών κυμάτων που προέρχονται από τη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ αυτών των γεωλογικών στρωμάτων.
- 2) Η σεισμική ταχύτητα παραμένει ίδια σε δύο διαδοχικά στρώματα.
- Το πάχος του ενδιάμεσου στρώματος είναι πολύ μικρό. Σε αυτή την περίπτωση τα μετωπικά κύματα από το υποκείμενο στρώμα καταγράφονται πριν από τα αντίστοιχα κύματα από το λεπτό στρώμα.
- 4) Η σεισμική ταχύτητα στο υποκείμενο αυτού στρώμα είναι πολύ μεγαλύτερη. Σε αυτή την περίπτωση είναι πιθανό τα μετωπικά κύματα από το ρηχότεροενδιάμεσο στρώμα να καταγράφονται μετά από τα αντίστοιχα κύματα από το βαθύτερο στρώμα.

2.3 Απόκτηση καταγραφών και εξοπλισμός

2.3.1 Σεισμική διάθλαση Ρ – κυμάτων

Αρχικά, εφόσον έχει οριοθετηθεί η γραμμή μελέτης, τα γεώφωνα τοποθετούνται σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Χρησιμοποιούνται γεώφωνα ευαίσθητα στην κατακόρυφη ταλάντωση του εδάφους. Στη συνέχεια, σε προκαθορισμένο σημείο της γραμμής μελέτης, ενεργοποιείται η σεισμική πηγή που δημιουργεί διαμήκη κύματα (π.χ. έκρηξη, πίπτον βάρος, χτύπημα με βαριοπούλα σε μεταλλική πλάκα κ.α.) και καταγράφεται το πλάτος της εδαφικής κίνησης σε συνάρτηση με το χρόνο. Κρατώντας τα γεώφωνα, μετακινείται η σεισμική πηγή σε άλλο σημείο της γραμμής μελέτης και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία. Για κάθε γραμμή μελέτης διαφορετικές επιλέγονται τουλάγιστον τρεις θέσεις της σεισμικής πηγής. Πραγματοποιήθηκε κανονικό και αντίστροφο πείραμα, δηλαδή ελήφθησαν καταγραφές με τη θέση της σεισμικής πηγής τοποθετημένη α) κοντά στο πρώτο γεώφωνο (κανονικό πείραμα) και β) κοντά στο τελευταίο γεώφωνο (αντίστροφο πείραμα). Επίσης ελήφθησαν καταγραφές με την πηγή τοποθετημένη στο μέσον της γραμμής μελέτης.

2.3.2 Σεισμική διάθλαση S – κυμάτων

Όπως προκύπτει και από την ονομασία τους, για τα εγκάρσια σεισμικά κύματα (shear waves ή S-waves) η διεύθυνση ταλαντώσης των σωματιδίων του εδάφους είναι κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης του σεισμικού κύματος. Τα εγκάρσια κύματα που συνήθως καταγράφονται στη σεισμική διασκόπηση είναι τα οριζόντια πολωμένα S-κύματα (SH waves), (Lankston, 1990). Η ίδια διάταξη χρησιμοποιείται τόσο στην σεισμική διάθλαση των P όσο και των S – κυμάτων. Ωστόσο, ανάλογα με το είδος του πειράματος που διεξάγεται, επιλέγεται ο κατάλληλος εξοπλισμός (γεώφωνα,σεισμική πηγή). Έτσι, τα γεώφωνα που χρησιμοποιούνται στην διασκόπηση σεισμικής διάθλασης S-κυμάτων είναι οριζόντιας συνιστώσας. Τα γεώφωνα οριζόντιας συνιστώσας, σε αντίθεση με τα γεώφωνα κατακόρυφης συνιστώσας που χρησιμοποιούνται στη σεισμική ανάκλαση, είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε να είναι ευαίσθητα σε οριζόντιες ταλαντώσεις του εδάφους. Κατά τη διεξαγωγή της διασκόπησης, τα γεώφωνα αυτά τοποθετούνται συνήθως στη γραμμή μελέτης έτσι ώστε να καταγράφονται κύται κατά μήκος της γραμμής μελέτης (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4 : Σχηματική παράσταση της δημιουργίας και καταγραφής των διαθλώμενων S-κυμάτων.

Για την καταγραφή SH σεισμικών κυμάτων, χρησιμοποιείται η διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Σε μια τέτοια περίπτωση, ως σεισμική πηγή χρησιμοποιείται συνήθως ένα ξύλινο δοκάρι και ένα σφυρί (βαριοπούλα). Το δοκάρι τοποθετείται κάθετα στη γραμμή μελέτης και πακτώνεται. Αρχικά, πραγματοποιείται κρούση της βαριοπούλας στο ένα άκρο του δοκαριού, οπότε τα γεώφωνα θα καταγράψουν σεισμικά ίχνη (traces), όμοια με αυτό του Σχήματος 2.5a. Ακολούθως, πραγματοποιείται κρούση στο άλλο άκρο του δοκαριού και καταγράφονται σεισμικά ίχνη όμοια με αυτό του Σχήματος 2.5b. Τα διαμήκη (P) κύματα εμφανίζονται στις καταγραφές σε μικρότερους χρόνους, εφόσον αυτά είναι τα ταχύτερα κύματα, και με σημαντικά μικρότερο πλάτος απ' ότι τα S-κύματα, λόγω του ότι η πηγή δημιουργεί κυρίως SH-κύματα και τα γεώφωνα είναι ευαίσθητα στην καταγραφή των SH κυμάτων. Ένα άλλο χαρακτηριστικό που διακρίνει τις καταγραφές αυτές είναι το γεγονός ότι τα κύματα S στις δύο περιπτώσεις καταγράφονται με διαφορά φάσης 180° ενώ αντίθετα στα κύματα Ρ δεν εμφανίζεται διαφορά φάσης. Έτσι, αφαιρώντας αυτά τα δύο ίχνη μεταξύ τους είναι δυνατό να εξαλειφθούν οι καταγραφές των Ρ-κυμάτων (Σχήμα 2.5c) καθιστώντας πιο εύκολη την επιλογή του χρόνου άφιξης των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων. Η συνολική αυτή διαδικασία πραγματοποιείται με σκοπό να προσδιοριστεί ο χρόνος διαδρομής τόσο των απ' ευθείας όσο και των μετωπικών εγκαρσίων κυμάτων. Οι χρόνοι αυτοί χρησιμοποιούνται πλέον, σύμφωνα με τις μεθόδους επεξεργασίας των δεδομένων σεισμικής διάθλασης, για τον προσδιορισμό του αριθμού των εδαφικών στρωμάτων και της κατανομής της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων σε συνάρτηση με το βάθος.



Σχήμα 2.5: Σχηματική παράσταση υπέρθεσης καταγραφών των διαθλώμενων Sκυμάτων αντίστροφης πολικότητας

2.4 Εκτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων και ταξινόμηση εδαφών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8

Οι ταχύτητες των κυμάτων χώρου Vp, Vs 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 v, το μέγιστο μέτρο διάτμησης G_0 και το μέτρο ελαστικότητας του Young E. Παρακάτω παρατίθενται οι σχέσεις υπολογισμού του λόγου Poisson v (2.6) του μέγιστου μέτρου διάτμησης G_0 (2.7), καθώς και του μέτρου ελαστικότητας του Young E (2.8).

$$v = \frac{\left[\frac{1}{2}\left(\frac{Vp}{Vs}\right)^2 - 1\right]}{\left[\left(\frac{Vp}{Vs}\right)^2 - 1\right]}$$
(2.6)

όπου V_p η ταχύτητα των διαμήκων σεισμικών κυμάτων, V_s η ταχύτητα των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων.

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

$$G_0 = \rho \mathrm{Vs}^2 \tag{2.7}$$

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:

$$E = 2G_0(1+v)$$
(2.8)

ή σε συνδυασμό με την εξίσωση (2.7) γράφεται:

$$E = 2\rho V s^2 (1 + \nu)$$
 (2.9)

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 2.1 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 . 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). Οι παράμετροι αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εκτίμηση της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών σε περίπτωση σεισμού και επεξηγούνται στη συνέχεια.

Κατηγορία εδάφους	Στρωματογραφική σύσταση	Παράμετροι		
		V _{s,30} (m/s)	N _{SPT} (blows/30cm)	C _u (kPa)
А	Βραχώδης ή σχεδόν βραχώδης γεωλογικός σχηματισμός συμπεριλαμβανομένου το πολύ 5 m επιφανειακού εδαφικού υλικού.	>800	-	-
В	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
С	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 πρός συνεκτικά εδάφη.	<180	<15	<70
Е	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/ιλύ 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 γεωϋλικό που δεν περιλαμβάνεται στους τύπους Α-Ε ή S ₁	-	-	-

Πίνακας 2.1: Κατηγορίες εδαφών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8

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

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$
(2.10)

όπου h_i και V_i είναι αντίστοιχα το πάχος (σε m) και η ταχύτητα των εγκαρσίων 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 30m από την επιφάνεια του εδάφους.

2.5 Μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων σεισμικής διάθλασης

Στη σεισμική διάθλαση προσδιορίζονται πειραματικά οι χρόνοι διαδρομής των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται οι καμπύλες των χρόνων διαδρομής των κυμάτων αυτών, για τον καθορισμό της ταχυτήτας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στα επιφανειακά γεωλογικά στρώματα στρωμάτων και του πάχους με θεωρητικές σχέσεις.

2.5.1 Μέθοδος Ray - Tracing

Από την επεξεργασία των δεδομένων της σεισμικής διάθλασης με τη μέθοδο Ray – Tracing προκύπτει εδαφικό μοντέλο στο οποίο η σεισμική ταχύτητα μεταβάλλεται με το βάθος. Με τη μέθοδο Ray – Tracing σχεδιάζονται οι σεισμικές ακτίνες και χρησιμοποιούνται για να υπολογισθεί ο χρόνος των σεισμικών κυμάτων για γνωστό εδαφικό μοντέλο.

Γενικά, η μέθοδος αυτή όταν εφαρμοστεί για μοντέλο δύο εδαφικών στρωμάτων περιγράφεται συνοπτικά από τα εξής βήματα (Haeni et al., 1987):

- Προσδιορισμός της σεισμικής ταχύτητας για κάθε στρώμα από τις δρομοχρονικές καμπύλες των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων.
- Εκτίμηση του βάθους της διαχωριστικής επιφάνειας μεταξύ των δύο στρωμάτων με τη μέθοδο των χρόνων καθυστέρησης (delay time method).
- Σχεδιασμός των διαθλώμενων σεισμικών ακτίνων για κάθε πηγή και γεώφωνο και υπολογισμός του χρόνου διαδρομής για κάθε τέτοια σεισμική ακτίνα που περιγράφει μετωπικά κύματα.
- 4. Τροποποίηση του βάθους της διαχωριστικής επιφάνειας έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι διαφορές μεταξύ των υπολογισμένων χρόνων διαδρομής και των μετρούμενων πρώτων αφίξεων.

Η διαδικασία αυτή (Βήματα 3-4) επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ υπολογισμένων και μετρούμενων χρόνων διαδρομής. Σε περιπτώσεις όπου το εδαφικό μοντέλο αποτελείται από περισσότερα των δύο στρωμάτων, για τον προσδιορισμό της βαθύτερης επιφάνειας, το επιφανειακό στρώμα δεν λαμβάνεται υπ'όψιν στους υπολογισμούς. Αυτό επιτυγχάνεται μετακινώντας τα γεώφωνα και τη σεισμική πηγή από την επιφάνεια της Γης στην πρώτη διαχωριστική επιφάνεια. Έτσι, η προαναφερθείσα διαδικασία επαναλαμβάνεται για την βαθύτερη διαχωριστική επιφάνεια. Ανάλογα για την n-οστή διαχωριστική επιφάνεια είναι απαραίτητη η απομάκρυνση των n-1 επιφανειακών στρώματων. Το πρόγραμμα που υλοποιεί αυτή τη μέθοδο και χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων σεισμικής διάθλασης στην εργασία αυτή περιλαμβάνει τρία υποπρογράμματα, A, B και C:

To **A** : Επιλέγονται αυτόματα οι πρώτες αφίξεις (picking) στα σεισμογράμματα με δυνατότητα παρέμβασης και από τον χρήστη.

Το **B** : Το αρχείο των πρώτων αφίξεων που προκύπτει από το A και η γεωμετρία της διάταξης σεισμικής πηγής και γεωφώνων χρησιμοποιείται για την αντιστοίχιση των δρομοχρονικών καμπυλών των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων σε κάθε εδαφικό στρώμα. Οι πρώτες αφίξεις που αντιστοιχούν στο 1° στρώμα συμβολίζονται με τον αριθμό '1', του δεύτερου με τον αριθμό '2' κ.ο.κ.

To **C** : Κατασκεύαζεται το μοντέλο ταχύτητας και βάθους της συγκεκριμένης γραμμής μελέτης.

2.5.2 Μέθοδος σεισμικής τομογραφίας

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

- Εισαγωγή των καταγραφών της σεισμικής διάθλασης.
- Διαμόρφωση της γεωμετρίας.
- Επιλογή των πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων (picking) και αποθήκευση αυτών.
- Δημιουργία δρομοχρονικού διαγράμματος.
- Δημιουργία αρχικού σεισμικού μοντέλου
- Προσδιορισμός της σεισμικής ταχύτητας και του μοντέλου βάθους (αντιστροφή)

Εισαγωγή των καταγραφών και διαμόρφωση της γεωμετρίας του πειράματος σεισμικής διάθλασης

Τα δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα επεξεργασίας (PickWin), σε μορφή SEG-2. Μετά την εισαγωγή των καταγραφών, 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 ιχνών, προκειμένου να διακρίνονται πιο εύκολα οι πρώτες αφίξεις. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται φίλτρα απομάκρυνσης θορύβου, ενίσχυσης του πλάτους των κυμάτων και μεγέθυνσης στην οριζόντια ή στην κατακόρυφη διεύθυνση.

Επιλογή πρώτων αφίξεων

Το πρόγραμμα επιλέγει αυτόματα τις πρώτες αφίξεις των σεισμικών κυμάτων, ενώ παρέχει δυνατότητα ελεύθερης επιλογής στο χρήστη. Η διαδικασία αυτή, ολοκληρώνεται όταν χρησιμοποιηθούν όλα τα αρχεία που αντιστοιχούν στην ίδια γραμμή μελέτης (spread). Ακολουθεί η αποθήκευση του αρχείου (επέκταση .vs), το οποίο συμπεριλαμβάνει πρώτες αφίξεις της ίδιας γραμμής μελέτης (σχήμα 2.6).

Δημιουργία δρομοχρονικού διαγράμματος

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). Στη συνέχεια δημιουργείται το δρομοχρονικό διάγραμμα (διάγραμμα χρόνου διαδρομής συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης πηγής - γεωφώνου). Ο χρήστης μπορεί να κάνει διορθώσεις, να διαγράψει χρόνους και να μεταβάλει την κλίμακα.

Δημιουργία αρχικού σεισμικού μοντέλου

Αρχικά επιλέγεται ο αριθμός των στρωμάτων. Το σημείο που εμφανίζεται αλλαγή κλίσης στην καμπύλη των πρώτων αφίξεων, αποτελεί ένδειξη αλλαγής στρώματος. Τα σεισμικά στρώματα τονίζονται με διαφορετικό χρώμα.



Σχήμα 2.6: Διάγραμμα ροής του προγράμματος PickWin. Η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων επαναλαμβάνεται (loop) μέχρις ότου εισαχθούν όλα τα δεδομένα που αντιστοιχούν στην ίδια γραμμή μελέτης (spread)).

Με την εντολή "Time-Term Inversion", οι χρόνοι καθυστέρησης (delay times) υπολογίζονται αυτόματα, ενώ μπορούν να εισαχθούν τα υψόμετρα στις θέσεις των γεωφώνων. Έτσι προκύπτει το αρχικό μοντέλο βάθους που αποτελείται από διακριτά σεισμικά στρώματα. Κάθε σεισμικό στρώμα χαρακτηρίζεται από σταθερή ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Πιο αναλυτικά για αρχικό εδαφικό μοντέλο δύο στρωμάτων (Καστρινάκης, 2007):

Ορίζεται ως βραδύτητα S, το αντίστροφο της ταχύτητας:

$$S_1 = \frac{1}{V_1}$$
(2.11)

$$S_2 = \frac{1}{V_2}$$
(2.12)

όπου V_1 και V_2 είναι οι ταχύτητες στο πρώτο και δεύτερο στρώμα αντίστοιχα (Σχήμα2.7).

• Προσδιορίζεται η ορική γωνία ic (Νόμος Snell):

$$\sin(i_c) = \frac{S_2}{S_1}$$
(2.13)

 Ο χρόνος διαδρομής t του μετωπικού κύματος, από οριζόντια διαχωριστική επιφάνεια δίνεται από τη σχέση:

$$t = 2S_1 \cos(i_c)z + xS_2 = cz + xS_2 \tag{2.14}$$

όπου x η απόσταση μεταξύ της πηγής και του γεωφώνου και z το πάχος του πρώτου στρώματος. Από την εφαρμογή της σχέσης (2.8) για διαφορετικές θέσεις πηγής γεωφώνου υπολογίζεται η βραδύτητα S₂ και το πάχος z. Όταν η διαχωριστική επιφάνεια παρουσιάζει καμπυλότητα (σχήμα 2.8), η παρακάτω σχέση χρησιμοποιείται αντί της (2.14):

$$t = cz_1 + cz_2 + xS_2 \tag{2.15}$$

Όπου z₁,z₂ δηλώνουν πάχος του πρώτου στρώματος κάτω από την πηγή και το γεώφωνο αντίστοιχα.

Για εδαφικό μοντέλο με περισσότερα στρώματα ισχύει:

$$t_{j} = \sum_{k=1}^{n} c_{jk} z_{k} + x_{j} S_{2}$$
(2.16)

Όπου n ο αριθμός των γεωφώνων.



Σχήμα 2.7: Σεισμική ακτίνα μετωπικού κύματος.



Σχήμα 2.8: Πορεία σεισμικής ακτίνας.

Προσδιορισμός της σεισμικής ταχύτητας και του μοντέλου βάθους

Η μέθοδος της σεισμικής τομογραφίας χρησιμοποιεί αρχικό εδαφικό μοντέλο το οποίο είτε δημιουργείται με τη μέθοδο των χρόνων καθυστέρησης, είτε κατασκευάζεται βάσει ορισμένων παραμέτρων (ελάχιστη και μέγιστη σεισμική ταχύτητα, αριθμός στρωμάτων, βάθος, υψόμετρο). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όταν η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων μεταβάλλεται βαθμιαία, όταν είναι γνωστή η ύπαρξη πλευρικής μεταβολής της σεισμικής ταχύτητας και στην περίπτωση έντονου ανάγλυφου. Για το αρχικό εδαφικό μοντέλο, σχεδιάζεται η διαθλώμενη σεισμική ακτίνα και υπολογίζεται ο χρόνος διαδρομής για κάθε τέτοια ακτίνα. Η διαδικασία εύρεσης του ελάχιστου χρόνου διαδρομής του κύματος, από την πηγή στο γεώφωνο, για κάθε ζεύγος πηγής – γεωφώνου (ευθύ

- Το αρχικό μοντέλο χωρίζεται σε περιοχές-κελιά (cells) σταθερής ταχύτητας
- Καθορίζεται η τιμή των παρακάτω παραμέτρων: αριθμός των επαναλήψεων, αριθμός των κομβικών σημείων (nodes) στις πλευρές του κελιού εξομάλυνση κατά την οριζόντια και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, μέγιστη και ελάχιστη ταχύτητα.
- Σχεδιάζονται οι πιθανές διαδρομές της σεισμικής ακτίνας από την πηγή στο γεώφωνο. Τα σημεία τομής της ακτίνας με το κελί, ονομάζονται κομβικά σημεία.



Σχήμα 2.9: Σχεδιασμός κανάβου στο αρχικό μοντέλο ταχυτήτων.

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

$$t_{i} = \sum_{j=1}^{N} S_{j} l_{ij}$$
(2.17)

Όπου Ν είναι ο αριθμός των κελιών, S είναι η βραδύτητα (S=1/V) και l είναι το μήκος της σεισμικής ακτίνας σε κάθε κελί (Σχήμα 2.10). Επιλέγεται η διαδρομή με τον ελάχιστο χρόνο (βέλτιστη διαδρομή).



Σχήμα 2.10: Απεικόνιση της διαδρομής της σεισμικής ακτίνας από την πηγή στο γεώφωνο (Παπαθανασίου, 2007).

Η διαδικασία υπολογισμού της σεισμικής βραδύτητας (ή ταχύτητας) σε κάθε κελί (αντίστροφο πρόβλημα) επαναλαμβάνεται, μέχρι να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ των χρόνων διαδρομής που παρατηρήθηκαν και αυτών που υπολογίζονται. Ακολουθεί τα εξής βήματα:

Υπολογίζεται ο χρόνος διαδρομής t_i σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφηκε παραπάνω καθώς και η διαφορά ΔΤ μεταξύ των χρόνων διαδρομής που υπολογίστηκαν (T^C) και αυτών που παρατηρήθηκαν (T^O):

•
$$\Delta T_k = T^O - T_k^C \tag{2.18}$$

όπου k είναι ο αριθμός των επαναλήψεων.

 Προσδιορίζονται οι διορθωμένες τιμές της βραδύτητας και το αρχικό μοντέλο τροποποιείται:

$$S_{k+1} = S_k + \Delta S_k \tag{2.19}$$

Από τη (2.17) και για Μ μετρούμενους χρόνους διαδρομής προκύπτει το σύστημα:

$$L\Delta S = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & . & l_{1N} \\ l_{21} & l_{22} & . & l_{2N} \\ l_{31} & l_{32} & . & l_{3N} \\ . & . & . & . \\ l_{M1} & l_{M2} & . & l_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta s_1 \\ \Delta s_2 \\ . \\ \Delta s_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \\ . \\ \Delta t_M \end{bmatrix} = \mathbf{T}^o - \mathbf{T}^c$$

$$L_k \Delta S_k = \Delta T_k$$
(2.20)

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

$$l_{ij} = \frac{\partial t_i}{\partial s_j} \tag{2.21}$$

Το γραμμικό σύστημα (2.20) τροποποιείται:

$$L^T L \Delta S = L^T \Delta T \tag{2.22}$$

και επιλύεται με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων:

$$\Delta \mathbf{S} = (\mathbf{L}^{\mathrm{T}} \mathbf{L})^{-1} \mathbf{L}^{\mathrm{T}} \Delta \mathbf{T}$$
(2.23)

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ υπολογισμένων και μετρούμενων χρόνων διαδρομής.

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</u>

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΤΡΗΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

3.1 Περιγραφή της περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στη βόρεια ακτή δυτικά της παλαιάς πόλης των Χανίων (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Φωτογραφία από το Maps.live.com όπου απεικονίζεται η περιοχή μελέτης του παλαιού εργοστασίου της ABEA.

Σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ (Σχήμα 3.2) η περιοχή μελέτης συνίσταται από αποθέσεις μειοκαινικές που περιλαμβάνουν κυρίως μάργες σε εναλλασσόμενα στρώματα από μαργαικούς ψαμμίτες ή μαργαικούς ασβεστόλιθους, πλακώδεις απολιθωματοφόρους. Ο εν λόγω σχηματισμός εξελίσσεται βαθύτερα σε μαργαικό ασβεστόλιθο ή κροκαλοπαγή. Είναι σύνηθες στην ευρύτερη περιοχή να υπέρκειται ερυθρός αργιλικός σχηματισμός (Terra-Rosa) κυμαινόμενου πάχους 3-4 μέτρων.



Σχήμα 3.2: Τμήμα του γεωλογικού χάρτη «Φύλλο Χανίων, ΙΓΜΕ 1971» όπου απεικονίζεται η ευρύτερη περιοχή και η περιοχή μελέτης.

Στο Σχήμα 3.3 που ακολουθεί απεικονίζονται στο τοπογραφικό διάγραμμα της περιοχής μελέτης, οι γραμμές μελέτης καθώς και οι θέσεις των γεωτρήσεων.



Σχήμα 3.3: Απεικόνιση των θέσεων των γραμμών μελέτης και των γεωτρήσεων πάνω στο τοπογραφικό της περιοχής μελέτης (κλίμακα 1:1000).

Ειδικότερα σύμφωνα με τα αποτελέσματα δειγματοληπτικών γεωτρήσεων από την εταιρεία «Εδαφομηχανική Κρήτης» η ευρύτερη περιοχή του εργοστασίου της ABEA έχει την ακόλουθη στρωματογραφία μέχρι το μέγιστο βάθος μελέτης 30m:

Στρώμα Ι:Τεχνητές επιχώσεις και αμμώδης άργιλος έως αργιλώδης άμμος με χάλικες Στρώμα ΙΙ:Μέτρια έως ισχυρά εξαλλοιωμένος μαργαικός ασβεστόλιθος Στρώμα ΙΙΙ:Αμμώδης άργιλος έως αργιλώδης άμμος

3.2 Περιγραφή γεωτρητικών δεδομένων

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων (Γ1, Γ2, Γ3, Γ4, Γ5, Γ6 και Γ7) που πραγματοποιήθηκαν από την εταιρία «Εδαφομηχανική Κρήτης» στα πλαίσια εδαφοτεχνικής έρευνας για την περιοχή μελέτης, η αναλυτική στρωματογραφία του εδάφους μέχρι το μέγιστο βάθος έρευνας (30 m) περιγράφεται ως ακολούθως:

<u>ΣΤΡΩΜΑ Ι. Τεχνητές επιχώσεις και αμμώδης άργιλος έως αργιλώδης άμμος με</u> χάλικες

Μετά από μια στρώση τεχνητών επιχώσεων πάχους 0,80 έως 3,00m ακολουθεί το στρώμα της αμμώδους αργίλου έως αργιλώδους άμμου. Πρόκειται για αμμώδη άργιλο, μικρής πλαστικότητας, καστανέρυθρου χρώματος και αργιλώδη άμμο με χαλίκια χωρίς έως μικρής πλαστικότητας ερυθρού χρώματος. Η στρώση αυτή συναντάται στη γεώτρηση Γ3 μέχρι το βάθος των 5,70m, στη Γ4 μέχρι το βάθος 4,80m ,στη Γ5 μέχρι το βάθος των 1,90m και στη Γ6 και Γ7 μέχρι το βάθος των 8,00m. Η περιεκτικότητα του σχηματισμού σε χαλίκια είναι της τάξεως του 8,6%, σε άμμο του 37,80% και σε ιλύ και άργιλο του 53,60%. Ο μέσος δείκτης πλαστικότητας είναι Ιp=6%.

ΣΤΡΩΜΑ ΙΙ. Μέτρια έως ισχυρά εξαλλοιωμένος μαργαικός ασβεστόλιθος

Πρόκειται για μέτρια έως ισχυρά εξαλλοιωμένο μαργαικό ασβεστόλιθο που κοκκομετρικά χαρακτηρίζεται ως ιλυοαργιλώδης άμμος με χαλίκια, μικρής πλαστικότητας. Το στρώμα αυτό συναντάται στις εξής γεωτρήσεις:

Γεώτρηση Γ1: από 1,00 έως 11,50 m

Γεώτρηση Γ2: από 3,00 έως 4,80 m

Γεώτρηση Γ3: από 5,70 έως 13,50 m

Γεώτρηση Γ4: από 4,80 έως 7,80 m

Γεώτρηση Γ5: από 1,90 έως 6,50 m

Γεώτρηση Γ6: από 7,60 έως 9,50 m

Η περιεκτικότητα του σχηματισμού σε άμμο είναι της τάξεως του 40%, σε χαλίκια του 33%, σε ιλύ του 28% και σε άργιλο του 22%. Ο μέσος δείκτης πλαστικότητας είναι Ip=6%.

ΣΤΡΩΜΑ ΙΙΙ. Αμμώδης άργιλος έως αργιλώδης άμμος

Συναντάται σε όλες τις γεωτρήσεις μέχρι το τέλος της διάτρησης. Πρόκειται για αμμώδη άργιλο με χαλίκια έως αργιλώδη άμμο, μέσης πλαστικότητας. Η περιεκτικότητα του σχηματισμού σε χάλικες είναι της τάξεως του 9%, σε άμμο του 17%, σε ιλύ και άργιλο του 61%. Ο μέσος δείκτης πλαστικότητας είναι Ip=10%. Στα σχήματα 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 απεικονίζονται οι γεωλογικές τομές που προέκυψαν από τις γεωτρήσεις Γ1-Γ2, Γ1-Γ3-Γ5,Γ5-Γ4 και Γ7-Γ6, αντίστοιχα. Η κλίμακα απεικόνισης των γεωλογικών τόμων είναι 1:200. Όλες οι τομές έχουν ληφθεί από την εδαφοτεχνική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή από την εταιρεία «Εδαφομηχανική Κρήτης».







ų, Zyijна 3.5: Геолоуткіј ториј пог проёкные апо усютріјсек ГІ-ГЗ-Г5 "Едаюриудачкі Кріјтус"



ų Σχήμα 3.6: Γεωλογική τομή που προέκτυε από reorphiests IS-I-4 "Educoungerweit Kohrens"



4 -Хірна 3.": Геолоүнкіј торый поv проёкные апо "EOTPHEER FO-I" "Educoungurwh Konfris"

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</u>
ΣΥΛΛΟΓΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ KAI ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η συλλογή των σεισμικών δεδομένων, η γεωμετρία των γραμμών μελέτης καθώς και η επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων με τη χρήση δύο μεθόδων 1) της κλασσικής σεισμικής διάθλασης 2) της σεισμικής τομογραφίας.

4.1 Συλλογή σεισμικών δεδομένων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η απόκτηση και η επεξεργασία των γεωφυσικών δεδομένων είχε ως στόχο την απεικόνιση των γεωλογικών σχηματισμών του υπεδάφους και τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων και διαμήκων κυμάτων σ'αυτούς. Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής η γεωφυσική έρευνα περιελάμβανε τέσσερις γραμμές σεισμικής διάθλασης διαμήκων κυμάτων συνολικού μήκους 209 m. Κάθε ανάπτυγμα είχε μήκος 55 m, ενώ η ισαπόσταση των γεωφώνων ήταν 5m εξαιρουμένης της γραμμής μελέτης D (Σχήμα 4.1) η οποία είχε μήκος 44 m ενώ η ισαπόσταση των γεωφώνων ήταν 4 m. Επιπροσθέτως θα πρέπει να αναφερθεί ότι στην γραμμή μελέτης D πραγματοποιήθηκε σεισμική διάθλαση, διαμήκων και 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.

26m 44m 48m -4m Om 4 m 10 12 V Πηγή Πηγή Inyń

LINE D

Σχήμα 4.1: Θέσεις της σεισμικής πηγής και γεωφώνων κατά μήκος της γραμμής μελέτης D. Αποτελείται από 1 ανάπτυγμα 12 γεωφώνων, συνολικού μήκους 44 m και έχει διεύθυνση $\Delta - A$. Η ισαπόσταση των γεωφώνων είναι 4 m.

Ο βασικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στο ύπαιθρο περιελάμβανε τα εξής:

- Σεισμογράφο 12 καναλιών: geode ultra-light exploration seismograph της ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ GEOMETRICS
- > Γεώφωνα κατακόρυφης και οριζόντιας συνιστώσας ιδιοσυχνότητας 14Hz
- Μια βαριοπούλα 5kg για τη δημιουργία σεισμικών δονήσεων
- Μια σιδερένια πλάκα(πηγή) και ένα ξύλινο δοκάρι

Στο σχήμα (4.2) απεικονίζεται η γεωμετρία του πειράματος για τη γραμμή μελέτης Α.

LINE A



Σχήμα 4.2: Απεικόνιση της γεωμετρίας της γραμμής μελέτης Α

4.2 Επεξεργασία δεδομένων με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης

Οι σεισμικές καταγραφές (καταγραφές κοινής πηγής shot gather) αποτελούνται από σεισμογράμματα, στα οποία απεικονίζεται η εδαφική ταλάντωση σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων περιλαμβάνει τα εξής στάδια :

- 1. Επιλογή των πρώτων αφίξεων.
- 2. Δημιουργία δρομοχρονικού διαγράμματος.
- 3. Προσδιορισμός της σεισμικής ταχύτητας και του μοντέλου βάθους.

4.2.1 Επιλογή των πρώτων αφίξεων

Η επιλογή των πρώτων αφίξεων πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό PICKWIN και περιλαμβάνει τον καθορισμό της χρονικής στιγμής όπου το έδαφος αρχίζει να ταλαντώνεται σε κάποιο γεώφωνο. Η διαδικασία αυτή της επιλογής των πρώτων αφίξεων για τη γραμμή μελέτης Line_A και την καταγραφή 201 απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα.4.3: Επιλογή πρώτων αφίξεων για τη γραμμή μελέτης Line_A.

4.2.2 Δημιουργία δρομοχρονικού διαγράμματος

Γνωρίζοντας την απόσταση του κάθε γεωφώνου από την σεισμική πηγή είναι δυνατό να κατασκευαστεί διάγραμμα πρώτων αφίξεων συναρτήσει αυτής της απόστασης το οποίο ονομάζεται δρομοχρονικό διάγραμμα. Στο διάγραμμα αυτό ομαδοποιούνται χρόνοι που αντιστοιχούν σε απευθείας και σε μετωπικά κύματα με την βοήθεια του λογισμικού SIPIN της GEOMETRICS. Παράδειγμα δρομοχρονικού διαγράμματος για την γραμμή μελέτης Line A παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Παράδειγμα δρομοχρονικού διαγράμματος για την γραμμή μελέτης Line_A. Ο κατακόρυφος άζονας αντιστοιχεί σε χρόνο (ms), ενώ ο οριζόντιος άζονας παρουσιάζει τον αριθμό των γεωφώνων. Οι αριθμοί 1 και 2 αναφέρονται στον αριθμό των στρωμάτων (π.χ 1: πρώτο στρώμα κ.ο.κ). Οι πρώτες αφίζεις στις οποίες αποδίδεται ο αριθμός (0) δε συμμετέχουν στην περαιτέρω επεζεργασία

4.2.3 Προσδιορισμός της σεισμικής ταχύτητας και του μοντέλου βάθους (σεισμικής τομής).

Η σεισμική ταχύτητα σε κάθε στρώμα του μοντέλου βάθους υπολογίζεται από το λογισμικό SIPT 2 της GEOMETRICS ©. Στο Σχήμα 4.5 απεικονίζεται ο πίνακας της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκων κυμάτων (Vp) που προέκυψε για την γραμμή μελέτης Line_A. Όπως εμφανίζεται στο λογισμικό επεξεργασίας, η ταχύτητα για το πρώτο στρώμα βρέθηκε ίση με 512 m/s, ενώ για το δεύτερο 1080 m/s.



Σχήμα 4.5: Ταχύτητα Vp στο πρώτο και δεύτερο στρώμα για τη γραμμή μελέτης Line_A

Στο μοντέλο βάθους (Σχήμα 4.6) απεικονίζονται οι θέσεις της πηγής και των γεωφώνων στην επιφάνεια του εδάφους, καθώς επίσης και τα σεισμικά στρώματα. Βρέθηκαν 2 σεισμικά στρώματα με ταχύτητα διάδοσης των P-κυμάτων 512 m/s και 1080 m/s αντίστοιχα. Οι λατινικοί χαρακτήρες στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των δύο σεισμικών στρωμάτων υποδεικνύουν τη θέση της σεισμικής πηγής. Τα μετωπικά κύματα που αντιστοιχούν σε αυτή τη θέση της σεισμικής πηγής χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό αυτού του τμήματος της διαχωριστικής επιφάνειας. Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται το μοντέλο βάθους που προέκυψε για την γραμμή μελέτης Line_A, από το λογισμικό SIPT 2.



Σχήμα 4.6: Μοντέλο βάθους για τη γραμμή μελέτης Line_Α με τη χρήση του λογισμικού SIPT2.

Στα Σχήματα 4.7, 4.8, 4.9, απεικονίζονται τα μοντέλα βάθους που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων διάθλασης των P- κυμάτων με το λογισμικό SIP για τις γραμμές μελέτης B, C, D αντίστοιχα. Επιπρόσθετα στο Σχήμα 4.10 απεικονίζεται το μοντέλο βάθους που προέκυψε από την επεξεργασία των δεδομένων διάθλασης των S- κυμάτων για τη γραμμή D.



Σχήμα 4.7: Μοντέλο βάθους που προέκυψε από την διάθλαση των Ρ-κυμάτων για τη γραμμή μελέτης Line_B με τη χρήση του λογισμικού SIPT2.



Σχήμα 4.8: Μοντέλο βάθους που προέκυψε από την διάθλαση των *P*-κυμάτων για τη γραμμή μελέτης Line_C με τη χρήση του λογισμικού SIPT2.



Σχήμα 4.9: Μοντέλο βάθους που προέκυψε από την διάθλαση των Ρ-κυμάτων για τη γραμμή μελέτης Line_D με τη χρήση του λογισμικού SIPT2.



Σχήμα 4.10: Μοντέλο βάθους που προέκυψε από την διάθλαση των S-κυμάτων για τη γραμμή μελέτης Line_D με τη χρήση του λογισμικού SIPT2.

4.3 Επεξεργασία δεδομένων με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας

Η διαδικασία της σεισμικής τομογραφίας στο Plotrefa περιλαμβάνει δύο στάδια:

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

4.3.1 Χρήση οριζόντια στρωματωμένου μέσου ως αρχικού μοντέλου

Αρχικά τα δρομοχρονικά διαγράμματα εισάγονται στο λογισμικό Plotrefa και ορίζονται οι ακόλουθοι παράμετροι δημιουργίας ενός οριζόντια στρωματωμένου μέσου (Σχήμα 4.11). Οι παράμετροι αυτοί είναι οι ακόλουθοι:

Depth to top of lowest layer: Βάθος της οροφής του βαθύτερου στρώματος

Maximum velocity: Μέγιστη ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων

Minimum Velocity: Ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων

(number) of layers: Αριθμός των στρωμάτων

Elevation at the bottom left of the model: Υψόμετρο στο αριστερό άκρο του μοντέλου βάθους σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς

Elevation at the bottom right of the model: Υψόμετρο στο δεξιό άκρο του μοντέλου βάθους σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς



Σχήμα 4.11: Δρομοχρονικό διάγραμμα της γραμμής Line_A (Αριστερά). Ορισμός των παραμέτρων για τη δημιουργία του αρχικού οριζόντια στρωματωμένου μέσου (Δεζιά).



Σχήμα 4.12: Οριζόντια στρωματωμένο μέσο 15 στρωμάτων το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως αρχικό μοντέλο για την αντιστροφή των δεδομένων (πρώτες αφίζεις) της γραμμής Line _A. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται η οριζόντια απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης, ενώ στον κατακόρυφο το απόλυτο υψόμετρο από την επιφάνεια του εδάφους. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην ταχύτητα V_p.

Το αρχικό μοντέλο βάθους χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ελάχιστου χρόνου διαδρομής των σεισμικών ακτινών. Ακολούθως ορίζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία αντιστροφής (Σχήμα .4.13):

Automatic reconstruction	
Number of iterations 10	OK
Option Number of nodes 5 Horizontal smoothing Number of smoothing passes Smoothing weight 0.5 (0.3 to 1.00) Vertical smoothing Number of smoothing passes 0 Smoothing weight 0.5 (0.3 to 1.00) Number of layers to be smoothed	Cancel
Minimum velocity 300 m /sec Maximum velocity 3000 m /sec T Velocity does not increase with depth	
With constraint	

Σχήμα 4.13:Ορισμός των παραμέτρων αντιστροφής για τον προσδιορισμό του σεισμικού μοντέλου βάθους για τη γραμμή Line_A

Number of iterations: Αριθμός επαναλήψεων.

Number of nodes: Αριθμός κόμβων ανά στοιχείο διακριτοποίησης.

Horizontal/Vertical Smoothing: Η οριζόντια και κατακόρυφη εξομάλυνση της ταχύτητας

Number of smoothing passes: Αριθμός επαναλήψεων εξομάλυνσης.

Smoothing weight: Συντελεστής εξομάλυνσης.

Number of layers to be smoothed: Χρησιμοποιείται μόνο στην κατακόρυφη εξομάλυνση και αναφέρεται σε βαθύτερα στρώματα.

Minimum/maximum velocity: Ελάχιστη και μέγιστη ταχύτητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων.

Velocity does not increase with depth: Η επιλογή αυτή αναφέρεται στην περίπτωση που η ταχύτητα δεν αυξάνεται με το βάθος.

Μετά την ολοκλήρωση όλων των επαναλήψεων το λογισμικό απεικονίζει το τελικό μοντέλο βάθους (Σχήμα 4.14). Οι τεθλασμένες γραμμές αντιστοιχούν στις σεισμικές ακτίνες.



Σχήμα 4.14: Τελικό μοντέλο βάθους για τη γραμμή Line_A.

Από την επεξεργασία των πρώτων αφίξεων των Ρ- κυμάτων με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας, -χρησιμοποιώντας ως αρχικό μοντέλο βάθους ένα οριζόντια στρωματωμένο μέσο- στα σχήματα 4.15 έως 4.17 προσδιορίστηκαν τα τελικά μοντέλα βάθους για τις γραμμές μελέτης Β, C και D. Στο Σχήμα 4.18 απεικονίζεται το τελικό μοντέλο βάθους για τα S-κύματα (γραμμή D). Σε όλες τις περιπτώσεις το αρχικό μοντέλο βάθους αποτελείται από 15 οριζόντια στρώματα εκτός της γραμμής Α.

Οι τιμές των παραμέτρων αντιστροφής φαίνονται στο Σχήμα 4.13. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για τον ορισμό του εύρους της σεισμικής ταχύτητας καθώς και του βάθους διασκόπησης, λήφθηκαν υπόψιν οι πληροφορίες που προέκυψαν από την επεξεργασία των πρώτων αφίξεων με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης.



Σχήμα 4.15:Τελικό μοντέλο βάθους για τη γραμμή Line_B



Σχήμα 4.16:Τελικό μοντέλο βάθους για τη γραμμή Line_C



Σχήμα 4.17:Τελικό μοντέλο βάθους για τη γραμμή Line_D



Σχήμα 4.18:Τελικό μοντέλο βάθους για τη γραμμή Line_D όπως προέκυψε από την επεξεργασία των S- κυμάτων

4.3.2 Χρήση μη οριζόντια στρωματωμένου μέσου ως αρχικό μοντέλο

Στη διαδικασία επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας επιπρόσθετα χρησιμοποιήθηκε ως αρχικό μοντέλο βάθους αυτό που προσδιορίστηκε από τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο αυτό ως αρχικό μοντέλο επιτυγχάνεται η καλύτερη προσέγγιση του τελικού εδαφικού μοντέλου που προκύπτει από τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας. Εάν τα δύο τελικά μοντέλα βάθους που προκύπτουν από τη σεισμική τομογραφία με τη χρήση α) οριζόντια στρωματωμένου μέσου και β) μη οριζόντια στρωματωμένου μέσου είναι παρόμοια τότε γίνεται κατανοητό ότι τα αποτελέσματά μας θεωρούνται περισσότερο αξιόπιστα. Έτσι σε κάθε γραμμή μελέτης διατηρήθηκε αντιστοίχιση των πρώτων αφίξεων με τα σεισμικά στρώματα διατηρώντας ακριβώς την ίδια αντιστοίχιση που έχει πραγματοποιηθεί στο SIP (Σχήμα 4.19). Το αρχικό και τελικό μοντέλο βάθους για τη γραμμή μελέτης Β παρουσιάζονται στα σχήματα 4.20, 4.21 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.19: Δρομοχρονικό διάγραμμα της γραμμής Line_B (οι κόκκινες κουκίδες αντιστοιχούν στις πρώτες αφίζεις από το πρώτο στρώμα ενώ οι πράσινες αντιστοιχούν στις πρώτες αφίζεις από το δεύτερο στρώμα)



Σχήμα 4.20: Αρχικό μοντέλο βάθους 2 στρωμάτων για τη γραμμή μελέτης Line_ B.



Σχήμα4.21: Τελικό μοντέλο βάθους για τη γραμμή Line_ B

Η προαναφερθείσα διαδικασία ακολουθήθηκε για όλες τις γραμμές μελέτης εκτός από την γραμμή μελέτης Α λόγω αδυναμίας προσδιορισμού μοντέλου βάθους με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης. Στα Σχήματα 4.22 έως και 4.25 παρουσιάζονται τα αρχικά και τελικά μοντέλα βάθους για τις γραμμές μελέτης C και D, όπως προκύπτουν από την επεξεργασία των πρώτων αφίξεων των P-κυμάτων με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας χρησιμοποιώντας ως αρχικό μοντέλο βάθους ένα μη οριζόντια στρωματωμένο μέσο. Σε όλες τις περιπτώσεις το μοντέλο αποτελείται από 15 οριζόντια στρώματα.



Σχήμα 4.22: Αρχικό μοντέλο βάθους για τη γραμμή Line_ C



Σχήμα 4.23: Τελικό μοντέλο βάθους για τη γραμμή Line_ C



Σχήμα 4.24: Αρχικό μοντέλο βάθους για τη γραμμή Line_ D



Σχήμα 4.25: Τελικό μοντέλο βάθους για τη γραμμή Line_D

Στα Σχήματα 4.26 και 4.27 που ακολουθούν παρατίθενται (για τα S- κύματα) το αρχικό και τελικό μοντέλο βάθους για τη γραμμή μελέτης D όπως προέκυψαν από τη σεισμική τομογραφία.



Σχήμα 4.26: Αρχικό μοντέλο βάθους για τη γραμμή Line_ D όπως προέκυψε από την επεξεργασία των S- κυμάτων



Σχήμα 4.27: Τελικό μοντέλο βάθους για τη γραμμή Line_ D όπως προέκυψε από την επεξεργασία των S- κυμάτων

4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Με το πέρας της επεξεργασίας των σεισμικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των μοντέλων βάθους που προέκυψαν από τις διάφορες μεθοδολογίες επεξεργασίας σε συνδυασμό και με τα γεωτρητικά δεδομένα που υπάρχουν διαθέσιμα για την περιοχή μελέτης. Στο Σχήμα 4.28 παρατίθεται η υπέρθεση του μοντέλου βάθους της γραμμής μελέτης Line_A και της αντίστοιχης γεώτρησης Γ-3. Η γεώτρηση Γ-3 βρίσκεται στα 2.5m κατά μήκος της σεισμικής γραμμής A.



Σχήμα 4.28: Υπέρθεση των αποτελεσμάτων της σεισμικής διάθλασης, της σεισμικής τομογραφίας (οριζόντια στρωματωμένο μέσο) για την γραμμή μελέτης Line_A και της αντίστοιχης γεώτρησης Γ-3.

Στο Σχήμα 4.29 παρατίθεται η υπέρθεση του μοντέλου βάθους της γραμμής μελέτης Line_B και της αντίστοιχης γεώτρησης Γ-1. Η προβολή της γεώτρησης Γ-1 βρίσκεται στα 52.5 m κατά μήκος της γραμμή μελέτης ενώ η απόστασή της από τη γραμμή είναι 0.5 m.



Σχήμα 4.29: Υπέρθεση των αποτελεσμάτων της σεισμικής διάθλασης, της σεισμικής τομογραφίας (μη οριζόντια στρωματωμένο μέσο) για την γραμμή μελέτης Line_B και της αντίστοιχης γεώτρησης Γ-1.

Στο Σχήμα 4.30 παρατίθεται η υπέρθεση του μοντέλου βάθους της γραμμής μελέτης Line_C και της αντίστοιχης γεώτρησης Γ-2. Η προβολή της γεώτρησης Γ-2 βρίσκεται στα 28 m κατά μήκος της σεισμικής γραμμής Β ενώ η απόστασή της από τη γραμμή είναι 4.8 m.



Σχήμα 4.30: Υπέρθεση των αποτελεσμάτων της σεισμικής διάθλασης, της σεισμικής τομογραφίας (μη οριζόντια στρωματωμένο μέσο) για την γραμμή μελέτης Line_C και της αντίστοιχης γεώτρησης Γ-2.

Στο Σχήμα 4.31 παρατίθεται η υπέρθεση του μοντέλου βάθους της γραμμής μελέτης Line_D και της αντίστοιχης γεώτρησης Γ-4. Η προβολή της γεώτρησης Γ-4 βρίσκεται στα 44 m κατά μήκος της σεισμικής γραμμής D ενώ η απόστασή της από τη γραμμή είναι 2 m.



Σχήμα 4.31: Υπέρθεση των αποτελεσμάτων της σεισμικής διάθλασης, της σεισμικής τομογραφίας (μη οριζόντια στρωματωμένο μέσο) για την γραμμή μελέτης Line_D και της αντίστοιχης γεώτρησης Γ-4.



Σχήμα 4.32: Υπέρθεση των αποτελεσμάτων της σεισμικής διάθλασης για τα P (συνεχής γραμμή), της σεισμικής τομογραφίας (μη οριζόντια στρωματωμένο μέσο) των P κυμάτων της σεισμικής διάθλασης για τα S κύματα (διακεκομμένη γραμμή) για την γραμμή μελέτης Line_D και της αντίστοιχης γεώτρησης Γ-4.



Σχήμα 4.33: Υπέρθεση των αποτελεσμάτων της σεισμικής διάθλασης για τα P (συνεχής γραμμή),της σεισμικής τομογραφίας των S κυμάτων (μη οριζόντια στρωματωμένο μέσο) της σεισμικής διάθλασης για τα S κύματα (διακεκομμένη γραμμή) για την γραμμή μελέτης Line_D και της αντίστοιχης γεώτρησης Γ-4.

Η σεισμική διάθλαση δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα λόγω του ότι θεωρεί για κάθε στρώμα ότι η ταχύτητα διάδοσης παραμένει σταθερή, γεγονός που δεν ισχύει. Αντίθετα παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων συνάδουν ικανοποιητικά με αυτά της σεισμικής τομογραφίας. Ειδικότερα, προκύπτει ότι το στρώμα Ι χαρακτηρίζεται από ταχύτητες διαμήκων και εγκαρσίων κυμάτων που κυμαίνονται από 400 μέχρι 700 m/s και από 200 μέχρι 390 m/s αντίστοιχα. Ομοίως για το στρώμα ΙΙ οι ταχύτητες διαμήκων και εγκαρσίων κυμάτων που κυμαίνονται από 390 μέχρι 440 m/s αντίστοιχα. Τέλος, στο στρώμα ΙΙΙ οι ταχύτητες διαμήκων και εγκαρσίων κυμάτων και εγκαρσίων κυμάτων είναι μεγαλύτερες από 1250 m/s και 500 m/s αντίστοιχα.Στο Σχήμα 4.34 παρατίθεται η συνδυασμένη απεικόνιση των μοντέλων βάθους της γραμμής μελέτης Line_A και της γραμμής μελέτης Line_C. Το στρώμα ΙΙ εμφανίζει ελάχιστο πάχος στο σημείο τομής των παραπάνω γραμμών (< 2 m). Το πάχος του αυξάνει τόσο προς βορρά όσο και προς δυσμάς.



Σχήμα 4.34: Συνδυασμένη απεικόνιση των μοντέλων βάθους της γραμμής μελέτης Line_A και της γραμμής μελέτης Line_C

4.5 Μηχανικός χαρακτηρισμός των εδαφών

4.5.1 Υπολογισμός του λόγου Poisson και του μέτρου ελαστικότητας του Young από τις σεισμικές ταχύτητες

Ο υπολογισμός του λόγου Poisson και του μέτρου ελαστικότητας του Young πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των σχέσεων 2.6 και 2.8 που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Στον Πίνακα 4.1 παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων v και Ε. Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας χρησιμοποιήθηκαν οι ενδεικτικές τιμές της πυκνότητας ρ = 1,4-1,7 g/cm³(Τσότσος, 1991) για το επιφανειακό στρώμα της αμμώδης αργίλου ενώ για το στρώμα του μαργαϊκού ασβεστολίθου χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές ρ =1,7-2,2 g/cm³ (Εργαστηριακές μετρήσεις δοκιμίων γεωτρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο χώρο της Πολυτεχνειούπολης στα πλαίσια του προγράμματος Crinno-Unistep).

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα μηχανικών ιδιοτήτων.

Στρώματα	V _p (m/s) Ενδιάμεση τιμή	ρ(kg/m ³)	V _s (m/s) Ενδιάμεση τιμή	V	E(MPa)
Αμμώδης άργιλος 550	550	1400	. 300	0,288	324,5
Στρώμα Ι		1700			394,1
Μαργαικός		1700			813,3
ασβεστόλιθος Στρώμα ΙΙ	975	2200	415	0,389	1052,5

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή του μέτρου ελαστικότητας που χρησιμοποιείται στην πράξη (E_{op}) είναι μεταξύ 40% και 80%, της μέγιστης τιμής του μέτρου ελαστικότητας που υπολογίστηκε (E_o) από τις μετρήσεις των ταχυτήτων (Noel Simons et al, 2002) Πιο συγκεκριμένα:

 \blacktriangleright E_{op} ~ 0.50 E_o, για μαλακές αργίλους

 $E_{op \approx} 0.85 E_{o}$, για στιφρές αργίλους και μαλακούς βράχους

Σύμφωνα με τα παραπάνω δημιοιυργείται ο πίνακας 4.2

TT/	4.0	TT/	,	2	,
Πινακας	4.2:	Πινακας	UETOON	0.43	ιστικοτητας
110,0100		1100 0000	parpar	0,00	io theo theos

Στρώματα	E _o (MPa)	E _{op} (MPa)
Αμμώδης άργιλος Στρώμα Ι	324,5	162,2
	394,1	197
Μαργαικός ασβεστόλιθος Στρώμα ΙΙ	813,3	691,3
	1052,5	894,2

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

Στις μετρήσεις ακαμψίας χρησιμοποιούνται μόνο οι ταχύτητες διάδοσης των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων διότι δεν επηρεάζονται από τη συμπιεστότητα του νερού.

Στην παρούσα εργασία η ταξινόμηση των εδαφών γίνεται σύμφωνα με την παράμετρο $V_{s,30}$ που υπολογίζεται από την σχέση:

$$Vs^{30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$
(4.1)

όπου h_i και V_i είναι αντίστοιχα το πάχος, (σε m) και η ταχύτητα (σε m/s) των εγκαρσίων 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.

Εφ'όσον το μέγιστο βάθος διασκόπησης για τη γραμμή μελέτης D ήταν 10m υπολογίζουμε αρχικά το Vs¹⁰ από την ακόλουθη σχέση (4.2) :

$$V_{S}^{I0} = \frac{10}{\left(\frac{21}{V_{FE}} + \frac{20}{V_{SC}}\right)}$$
(4.2)

όπου z_1 το μέσο πάχος του πρώτου στρώματος και ίσο με 3m και z_2 το μέσο πάχος του δευτέρου στρώματος που είναι ίσο με 10 m. Άρα Vs¹⁰=344.75 m/s. Κατόπιν θεωρώντας ότι η ταχύτητα που υπολογίστηκε για το δεύτερο στρώμα παραμένει σταθερή μέχρι τα 30 m υπολογίζεται μια εκτίμηση του Vs³⁰ από τη σχέση (4.1) ίση με Vs³⁰=389.610 m/s. To Vs³⁰ όπως έχει προσδιοριστεί θεωρείται ότι αποτελεί μία συντηρητική εκτίμηση του πραγματικού διότι για το δεύτερο στρώμα οι πληροφορίες φτάνουν μέχρι τα 13m και θεωρητικά αναμένεται αύξηση της ταχύτητας όσο αυξάνεται το βάθος. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 (Πίνακας 2.1) το έδαφος ανήκει στην κατηγορία B η οποία περιλαμβάνει αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλικιών ή συμπαγούς αργίλου τουλάχιστον μερικών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων τους συναρτήσει του βάθους.

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</u> ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης και κατόπιν με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας. Η επεξεργασία με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας 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 τομογραφίας θεωρείται απαραίτητη για τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων αντιστροφής.

Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων παρατίθενται με τη μορφή τομών υπέρθεσης σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες γεωτρήσεις. Προκύπτει ότι τα αποτελέσματα της σεισμικής τομογραφίας συνάδουν με τα γεωτρητικά δεδομένα σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της σεισμικής διάθλασης.

Η επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων περιελάμβανε τη δημιουργία ενός αρχικού μοντέλου βάθους. Επιλέχθηκε η χρήση δύο διαφορετικών αρχικών μοντέλων (χρήση ορζόντια και μη οριζόντια στρωματωμένου μέσου). Παρατήρηθηκε κατά ένα βαθμό συμφωνία των αποτελεσμάτων γεγονός που επιτρέπει να θεωρηθούν τα αποτελέσματα αρκετά αξιόπιστα.

Από την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων το έδαφος των υπό μελέτη σχηματισμών από τον χαρακτηρισμό του βάσει του Ευρωκώδικα 8 ανήκει στην κατηγορία εδάφους B, με πάχος τουλάχιστον μερικών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζεται από βαθμιαία αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων του με το βάθος.

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>

<u>Διεθνής:</u>

- 1. Eurocode 8, 2003, «Design of structures for earthquake resistance, Brussels»
- 2. SeisImager, 2003, «Εγχειρίδιο Χρήσης Λογισμικού, Manual, Version 3.0, OYO Corporation»
- 3. 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
- 4. Lankston, W.R., 1990, High –Resolution Refraction Seismic Data Acquisition and Interpretation, Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol 1, Ward, S., ed., Society of Exploration Geophysicists
- 5. Reynolds, M.J., 1997, An introduction to applied and environmental geophysics, John Wiley & Sons Ltd, Chichester

<u>Ελληνική:</u>

- 1. Βαφείδης, Α., 1993, «Εφαρμοσμένη Γεωφυσική»- 1: Σεισμικές Μέθοδοι, Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά
- 2. Σ.Τσότσος «Εδαφομηχανική», 1991
- 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
- Καστρινάκης, Σταμάτης, 2007, Σεισμική τομγραφία για την εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης διαμήκων και εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων στην περιοχή Φαράγγι Αποκορώνου-Χανίων, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Σεισμικές καταγράφες



Σχήμα 1: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις. Συγκεκριμένα, έχουμε επιλογή των πρώτων αφίξεων για την καταγραφή 201. Στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται ο χρόνος σε msec και η απόσταση σε m αντίστοιχα.



Σχήμα 2: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις. Συγκεκριμένα, έχουμε επιλογή των πρώτων αφίξεων για την καταγραφή 202. Στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται ο χρόνος σε msec και η απόσταση σε m αντίστοιχα


Σχήμα 3: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις. Συγκεκριμένα, έχουμε επιλογή των πρώτων αφίξεων για την καταγραφή 203. Στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται ο χρόνος σε msec και η απόσταση σε m αντίστοιχα



Σχήμα 4: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις. Συγκεκριμένα, έχουμε επιλογή των πρώτων αφίξεων για την καταγραφή 204. Στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται ο χρόνος σε msec και η απόσταση σε m αντίστοιχα



Σχήμα 5: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις. Συγκεκριμένα, έχουμε επιλογή των πρώτων αφίξεων για την καταγραφή 206. Στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται ο χρόνος σε msec και η απόσταση σε m αντίστοιχα



Σχήμα 6: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις. Συγκεκριμένα, έχουμε επιλογή των πρώτων αφίξεων για την καταγραφή 207. Στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται ο χρόνος σε msec και η απόσταση σε m αντίστοιχα



Σχήμα 7: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις. Συγκεκριμένα, έχουμε επιλογή των πρώτων αφίξεων για την καταγραφή 208. Στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται ο χρόνος σε msec και η απόσταση σε m αντίστοιχα



Σχήμα 8: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις. Συγκεκριμένα, έχουμε επιλογή των πρώτων αφίξεων για την καταγραφή 209. Στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται ο χρόνος σε msec και η απόσταση σε m αντίστοιχα



Σχήμα 9: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις. Συγκεκριμένα, έχουμε επιλογή των πρώτων αφίξεων για την καταγραφή 210. Στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται ο χρόνος σε msec και η απόσταση σε m αντίστοιχα



Σχήμα 10: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις. Συγκεκριμένα, έχουμε επιλογή των πρώτων αφίξεων για την καταγραφή 702. Στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται ο χρόνος σε msec και η απόσταση σε m αντίστοιχα



Σχήμα 11: Καταγραφή της κατακόρυφης συνιστώσας της εδαφικής μετατόπισης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών διαμηκών κυμάτων σε δώδεκα θέσεις. Συγκεκριμένα, έχουμε επιλογή των πρώτων αφίξεων για την καταγραφή 704. Στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται ο χρόνος σε msec και η απόσταση σε m αντίστοιχα



Σχήμα 12: Καταγραφή της οριζόντιας συνιστώσας της εδαφικής κίνησης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών εγκάρσιων κυμάτων σε δώδεκα θέσεις. Συγκεκριμένα, έχουμε επιλογή των πρώτων αφίξεων για την καταγραφή 7021. Στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται ο χρόνος σε msec και η απόσταση σε m αντίστοιχα



Σχήμα 13: Καταγραφή της οριζόντιας συνιστώσας της εδαφικής κίνησης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών εγκάρσιων κυμάτων σε δώδεκα θέσεις.Συγκεκριμένα, έχουμε επιλογή των πρώτων αφίξεων για την καταγραφή 7023. Στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται ο χρόνος σε msec και η απόσταση σε m αντίστοιχα



Σχήμα 14: Καταγραφή της οριζόντιας συνιστώσας της εδαφικής κίνησης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών εγκάρσιων κυμάτων σε δώδεκα θέσεις. Συγκεκριμένα, έχουμε επιλογή των πρώτων αφίξεων για την καταγραφή 7041. Στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται ο χρόνος σε msec και η απόσταση σε m αντίστοιχα



Σχήμα 14: Καταγραφή της οριζόντιας συνιστώσας της εδαφικής κίνησης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών εγκάρσιων κυμάτων σε δώδεκα θέσεις.Συγκεκριμένα, έχουμε επιλογή των πρώτων αφίξεων για την καταγραφή 7042. Στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται ο χρόνος σε msec και η απόσταση σε m αντίστοιχα



Σχήμα 12: Καταγραφή της οριζόντιας συνιστώσας της εδαφικής κίνησης κατά τη διάδοση απευθείας και μετωπικών εγκάρσιων κυμάτων σε δώδεκα θέσεις.Συγκεκριμένα, έχουμε επιλογή των πρώτων αφίξεων για την καταγραφή 7043. Στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται ο χρόνος σε msec και η απόσταση σε m αντίστοιχα