



Π Ο Λ Υ Τ Ε Χ Ν Ε Ι Ο Κ Ρ Η Τ Η Σ
Τ Μ Η Μ Α Μ Η Χ Α Ν Ι Κ Ω Ν Ο Ρ Υ Κ Τ Ω Ν
Π Ο Ρ Ω Ν

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συμβολή Των Σεισμικών Μεθόδων Στον Γεωτεχνικό
Χαρακτηρισμό Των Γεωλογικών Σχηματισμών Για Την
Κατασκευή Της Β΄ Φάσης κτιρίων ΜΗ.ΠΕΡ. Του
Πολυτεχνείου Κρήτης

ΑΒΑΓΙΑΝΟΣ Δ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

Εξεταστική Επιτροπή:

Αντώνιος Βαφείδης, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Ζαχαρίας Γ. Αγιουτάντης, Καθηγητής

Εμμανουήλ Στειακάκης, Λέκτορας

ΧΑΝΙΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι ένα κομμάτι μόνο ενός μεγάλου έργου, που έχει ως σκοπό το χαρακτηρισμό του υπεδάφους της περιοχής ΝΑ των κτηρίων του τμήματος ΜΗΠΕΡ όπου εκεί θα εδρασθούν τα καινούρια κτήρια του τμήματος. Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι σε μια μόνο μικρή περιοχή της περιοχής έδρασε των καινούριων κτηρίων να υπολογιστούν ο αριθμός των στρωμάτων, οι ταχύτητες των κυμάτων και επέκταση το μέτρο ελαστικότητας και να γίνει σύγκριση με τα γεωτρητικά δεδομένα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα κύριο Αντώνη Βαφείδη για την υποστήριξη και τη βοήθεια του καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα. Θερμές ευχαριστίες επίσης οφείλονται και στα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, Καθ. Ζαχαρία Αγιουτάντη και τον Λέκτορα Εμμανουήλ Στειακάκη για τις πολύτιμες διορθώσεις τους στην παρούσα εργασία.

Επίσης, ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα κύριο Γεώργιο Κρητικάκη για τις πολύτιμες γνώσεις και τη σημαντική προσφορά του κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ αξίζει στην οικογένεια μου που με την αμέριστη συμπαράσταση τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου υπήρξαν η κινητήρια δύναμη από το πρώτο έτος μέχρι την αποφοίτηση μου από το Πολυτεχνείο Κρήτης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο συμβολή των σεισμικών μεθόδων στον γεωτεχνικό χαρακτηρισμό των γεωλογικών σχηματισμών για την κατασκευή της Β' φάσης κτιρίων ΜΗ.ΠΕΡ του Πολυτεχνείου Κρήτης έχει ως στόχο τον γεωτεχνικό χαρακτηρισμό του υπεδάφους της περιοχής που βρίσκεται ΝΑ των κτιρίων του τμήματος ΜΗ.ΠΕΡ με την εφαρμογή δύο γεωφυσικών μεθόδων: α) της σεισμικής διάθλασης και β) της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh. Η συγκεκριμένη θέση επιλέχθηκε γιατί στη συγκεκριμένη περιοχή θα εδρασθούν 3 καινούρια κτήρια του τμήματος ΜΗ.ΠΕΡ.

Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε διασκόπηση κατά μήκος μιας γραμμής μελέτης που επιλέχθηκε στην περιοχή μελέτης και συλλέχθηκαν σεισμικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία.

Από την επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων με τη μέθοδο της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh, προσδιορίστηκε σεισμική τομή ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων, ενώ από την μέθοδο της σεισμικής διάθλασης και τομογραφίας προέκυψε αντίστοιχα τομή ταχύτητας των διαμηκών σεισμικών κυμάτων.

Ο προσδιορισμός των σεισμικών αυτών ταχυτήτων οδήγησε στη χαρτογράφηση του υπεδάφους της περιοχής μελέτης, το οποίο αποτελείται από δύο κατηγορίες σχηματισμών. Ένα επιφανειακό στρώμα καστανοκόκκινης αργίλου με πάχος που δεν υπερβαίνει το 1 m και τον υποκείμενο βιογενή μαργαϊκό ασβεστόλιθο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δύο μεθόδους εντοπισμού συγκρίθηκαν και συμπεραίνεται ότι συμφωνούν ως προς το βάθος εντοπισμού του ασβεστολιθικού σχηματισμού.

Επιπλέον από τις ταχύτητες των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων στο εκάστοτε στρώμα υπολογίσθηκε το μέτρο ελαστικότητας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σε γεωτεχνικές εφαρμογές	2
1.2	Περιγραφή διπλωματικής εργασίας	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗ ΚΑΙ ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ RAYLEIGH.....	8
3.1	ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ	9
3.1.1	Βασικές αρχές της σεισμικής διάθλασης	9
3.1.2	Περιορισμοί μεθόδου σεισμικής διάθλασης	11
3.2	ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ RAYLEIGH.....	12
3.2.1	Απόκτηση σεισμικών καταγραφών	14
3.2.2	Μετασχηματισμός του κυματικού πεδίου	14
3.2.3	Προσδιορισμός του αρχικού εδαφικού μοντέλου	16
3.2.4	Επίλυση του ευθέως προβλήματος	17
3.2.5	Αντιστροφή των καμπύλων διασποράς	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΥΛΛΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΤΡΗΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	
4.1	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	20
4.1.1	Γεωλογία περιοχής μελέτης	21
4.2	ΓΕΩΤΡΗΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	22
4.3	ΣΥΛΛΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	25
4.3.1	Εξοπλισμός	25
4.3.2	Πραγματοποίηση των μετρήσεων	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	30
5.1	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SeisImager.....	31
5.2	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ RAYLEIGH	36
5.2.1	Προσδιορισμός των βέλτιστων παραμέτρων αντιστροφής.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	49
6.1	ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	50
6.2	ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ RAYLEIGH	51
6.3	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	56
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	58

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1. Μία τομή με δεδομένα που συλλέχθηκαν με τη μέθοδο MASW για την περιοχή μελέτης του συγκεκριμένου άρθρου. (Campbell, 2008)	6
Σχήμα 2.2. Εικόνα από τα στοιχεία και την ερμηνεία τομέων Stellatron (α) γραμμή ερευνών 100 μέτρων που επεκτείνεται καλύπτοντας τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα, (β) τομή με τη μέθοδο MASW σύμφωνα με τη γραμμή ερευνών (Xu et al, 2008).	7
Σχήμα 3.1. Σχηματική παράσταση των τριών περιπτώσεων πρόσπτωσης μιας σεισμικής ακτίνας σε μια διεπιφάνεια. Κατά την πρόσπτωση υπό γωνία α) μικρότερη της οριζικής δημιουργούνται ανακλώμενα και διαθλώμενα κύματα, b) ίση με την οριζική γωνία δημιουργούνται ανακλώμενα και μετωπικά κύματα και c) με γωνία μεγαλύτερη της οριζικής παρατηρείται ολική ανάκλαση (Βαρδιδάκη 2005).	10
Σχήμα 3.2. Σχηματική παράσταση της δημιουργίας των μετωπικών κυμάτων. (Reynolds, 1997).....	10
Σχήμα 3.3. Διάγραμμα ροής της μεθόδου πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων. (Κρητικάκης, 2010)	13
Σχήμα 3.4. Χαρακτηρίστηκες καμπύλες διασποράς (Τροποποιημένο από Παπακωνσταντίνου, 2004, Park et al., 1998).	15
Σχήμα 4.1. Φωτογραφία από Google Earth της περιοχής μελέτης.....	20
Σχήμα 4.2. Τοπογραφική αποτύπωση του οικοπέδου όπου απεικονίζονται οι θέσεις των μελλοντικών κτιρίων του Τμήματος ΜΗΠΕΡ καθώς και των γεωφυσικών μετρήσεων (Αγιουτάντης 2009).	21
Σχήμα 5.1: Επιλογή των πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων με το πρόγραμμα PickWin για την καταγραφή με αριθμό αρχείου πεδίου 19. Η πηγή βρίσκεται στα 32 m της γραμμής μελέτης. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την απόσταση (σε m) κατά μήκος της γραμμής μελέτης και ο κατακόρυφος το χρόνο καταγραφής (σε ms) των σεισμικών κυμάτων. Οι σκιασμένες (ή μη) περιοχές αντιστοιχούν σε θετικά (ή αρνητικά) πλάτη ταλάντωσης.	32
Σχήμα 5.2. Δρομοχρονικό διάγραμμα. Τα δύο διαφορετικά εδαφικά στρώματα διακρίνονται με δύο ξεχωριστά χρώματα (πράσινο και κόκκινο). Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την οριζόντια απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης και ο κατακόρυφος, το χρόνο πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων.	33
Σχήμα 5.3. Σεισμική τομή που προέκυψε από την επεξεργασία των πρώτων αφίξεων με την μέθοδο αντιστροφής των χρόνων καθυστέρησης. Η μέση ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων στο πρώτο στρώμα είναι 322 m/s, ενώ στο δεύτερο, 1639 m/s.	34
Σχήμα 5.4. Ή σεισμική τομή που προέκυψε από τη μέθοδο αντιστροφής των χρόνων καθυστέρησης χωρισμένη σε κελιά.....	35

Σχήμα 5.5. Σχεδιασμός κανάβου στο αρχικό μοντέλο ταχυτήτων. Κάθε κελί χαρακτηρίζεται από σταθερή ταχύτητα, ενώ η σεισμική ακτίνα διαδίδεται από την πηγή προς τα γεώφωνα μέσω των κομβικών σημείων (Παπαθανασίου, 2007).	36
Σχήμα 5.6. Σεισμική τομή που προέκυψε από την επεξεργασία των πρώτων αφίξεων με την μέθοδο της Σεισμικής Τομογραφίας και απεικόνιση των διαδρομών των σεισμικών ακτίνων για τη γραμμή μελέτης.	36
Σχήμα 5.7. Απεικόνιση της ενοποιημένης καταγραφής 1221-1222 κατά την εισαγωγή των σεισμικών δεδομένων στο λογισμικό kriSIS – auto. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει τον αριθμό των σεισμικών ιχνών και ο κατακόρυφος τον χρόνο σε ms.	37
Σχήμα 5.8. Παράμετροι μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου για τα σεισμικά δεδομένα 1221-1222.	39
Σχήμα 5.9. Οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (τετράγωνο), κατά την απεικόνιση της σεισμικής ενέργειας (χρωματική κλίμακα) της καταγραφής 1221-1222 στο χώρο συχνότητας (οριζόντιος άξονας) – ταχύτητας φάσης (κατακόρυφος άξονας). Οι λευκοί σταυροί αντιστοιχούν στα τοπικά ενεργειακά μέγιστα, ενώ οι λευκές διακεκομμένες γραμμές οριοθετούν το ελάχιστο (δεξιά) και το μέγιστο (αριστερά) μήκος κύματος.	40
Σχήμα 5.10. Επιλογή των παραμέτρων του αρχικού μοντέλου οριζόντιων στρωμάτων, των παραμέτρων της αντιστροφής (<i>Inversion parameters</i>) και των κριτηρίων σύγκλισης του αλγόριθμου αντιστροφής για την αντιστροφή της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς της ενοποιημένης καταγραφής 1221-1222.	42
Σχήμα 5.11. Μέσο εκατοστιαίο τετραγωνικό σφάλμα (RMS %) μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής καμπύλης διασποράς κατά τη διαδικασία αντιστροφής της καμπύλης διασποράς του Σχήματος 5.9. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει τον αριθμό των επαναλήψεων.	43
Σχήμα 5.12. Προσαρμογή της θεωρητικής (<i>final curve</i>) στην πειραματική (<i>measured curve</i>) θεμελιώδη καμπύλη διασποράς (αριστερά), για την γραμμή μελέτης V2. Κατανομή της ταχύτητας Vs με το βάθος για το αρχικό (<i>initial model</i>) και το βέλτιστο (<i>final model</i>) μοντέλο (δεξιά). Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η τυπική απόκλιση των τιμών της πειραματικής καμπύλης διασποράς (αριστερά) και της ταχύτητας Vs του μοντέλου (δεξιά).	44
Σχήμα 5.13. Καταγραφή 1221-1222. Διάγραμμα βάθους συναρτήσεως της Vs για τις δοκιμές επεξεργασίας a,b,c,d και e (βλ. Πίνακα 5.1) και σύγκριση με Vr (η οποία για λόγους κλίμακας έχει διαιρεθεί με 3). Το σφάλμα μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής καμπύλης διασποράς αναγράφεται σε παρένθεση δίπλα στο υπόμνημα της εκάστοτε δοκιμής.	46
Σχήμα 5.14. Καταγραφή 1221-1222. Διάγραμμα βάθους συναρτήσεως της Vs για τις δοκιμές επεξεργασίας f,g,h,i και k (βλ. Πίνακα 5.1) και σύγκριση με Vr (η οποία για λόγους κλίμακας έχει διαιρεθεί με 3). Το σφάλμα μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής καμπύλης	

διασποράς αναγράφεται σε παρένθεση δίπλα στο υπόμνημα της εκάστοτε δοκιμής.	47
Σχήμα 5.15. Καταγραφή 1221-1222. Διάγραμμα βάθους συναρτήσει της V_s για τις δοκιμές επεξεργασίας l, o, p, m και n (βλ. Πίνακα 5.1) και σύγκριση με V_p (η οποία για λόγους κλίμακας έχει διαιρεθεί με 3). Το σφάλμα μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής καμπύλης διασποράς αναγράφεται σε παρένθεση δίπλα στο υπόμνημα της εκάστοτε δοκιμής.	48
Σχήμα 6.1. Σεισμική τομή που προέκυψε από την επεξεργασία των πρώτων αφίξεων με την μέθοδο της Σεισμικής Τομογραφίας και απεικόνιση των διαδρομών των σεισμικών ακτινών για τη γραμμή μελέτης. Στην τομή αυτή έχει υπερτεθεί σχηματικά τμήμα της γεώτρησης MP-5, καθώς επίσης και το περίγραμμα της ψευδοτομής της ταχύτητας V_s (βλ. Σχήμα 6.2). Ο προσανατολισμός της τομής είναι Ανατολή – Δύση.	50
Σχήμα 6.2. Σεισμική τομή που προέκυψε από την επεξεργασία των μετρήσεων με τη μέθοδο της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και απεικονίστηκε στο transform. Στην τομή αυτή έχει υπερτεθεί σχηματικά τμήμα της γεώτρησης MP-5. Ο προσανατολισμός της τομής είναι Ανατολή – Δύση.	51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΕ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Στη παρούσα διπλωματική χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης για τη χαρτογράφηση του υπεδάφους. Όμως αυτή η διπλωματική αποτελεί ένα κομμάτι μόνο ενός μεγάλου έργου της κατασκευής δηλαδή της Β φάσης των κτηρίων ΜΗΠΕΡ και όπως είναι αναμενόμενο έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλες γεωφυσικές μέθοδοι. Παρακάτω θα αναφερθούν επιγραμματικά οι γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το έργο αλλά και σε άλλες γεωτεχνικές εφαρμογές (U.S. Army Corps of Engineers, 1995).

Σεισμικές μέθοδοι που είναι από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται συχνότερα όπως η σεισμική διάθλαση η οποία υπολογίζει την ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Υπάρχουν βεβαίως και άλλες σεισμικές μέθοδοι όπως η πολυκάναλη ανάλυση σεισμικών κυμάτων (MASW) και η φασματική ανάλυση σεισμικών κυμάτων (SASW).

Ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι οι οποίες υπολογίζουν την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Βαρυτικές μέθοδοι που υπολογίζουν της οριζόντια μεταβολή της πυκνότητας του υπεδάφους.

Μαγνητικές μέθοδοι που υπολογίζουν την μεταβολή της μαγνητικής επιδεκτικότητας.

Γεωφυσικές μέθοδοι που μετράνε και αναλύουν δεδομένα σε πηγάδια ή γεωτρήσεις και προσδιορίζουν φυσικές και χημικές ιδιότητες των εδαφών και πετρωμάτων.

1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ξεκινώντας την διπλωματική εργασία, γίνεται αναφορά σε όλες της γεωφυσικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται σε γεωτεχνικές εφαρμογές και ιδιαίτερα στην μέθοδο της πολυκάναλης ανάλυσης σεισμικών κυμάτων Rayleigh.

Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι δύο μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική, δηλαδή η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης και η μέθοδος της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων.

Ακόμα περιγράφονται η θέση μελέτης, τα υπάρχοντα γεωτρητικά δεδομένα, η συλλογή των γεωφυσικών δεδομένων και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.

Επίσης περιγράφεται η διαδικασία επεξεργασίας των σεισμικών δεδομένων με την κάθε μέθοδο ξεχωριστά.

Οι σεισμικές τομές που προκύπτουν από την επεξεργασία παρουσιάζονται και αξιολογούνται. Γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων και παρατίθενται τα συμπεράσματα για την δομή του υπεδάφους.

Επιπροσθέτως γίνεται προσδιορισμός γεωτεχνικών παραμέτρων και σύγκριση με γεωτρητικά δεδομένα.

Τέλος, προκύπτει ότι α)Οι κλίσεις, ο αριθμός και τα πάχη των στρωμάτων είναι ίδια συγκρίνοντας τα αποτελέσματα και των δύο γεωφυσικών μετρήσεων β)Τα πάχη και ο αριθμός των στρωμάτων είναι επίσης ίδιος συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των γεωφυσικών μετρήσεων με τις γεωτρήσεις και γ)Το μέτρο ελαστικότητας που υπολογίστηκε από τα γεωφυσικά έχει μια διαφοροποίηση από εκείνο που υπολογίστηκε εργαστηριακά, καθώς επίσης γίνονται προτάσεις για περαιτέρω γεωφυσική έρευνα και για το πώς θα βγουν καλύτερα συμπεράσματα συγκρίνοντας τα E αλλά και τις V_p και V_s των εργαστηριακών δοκιμών με αυτά των γεωφυσικών μεθόδων.

Στο τέλος της εργασίας, παρατίθεται παράρτημα που περιέχει όλα τα σχήματα και τους πίνακες που προέκυψαν κατά τη διεξαγωγή της επεξεργασίας των γεωφυσικών δεδομένων και έχουν παραληφθεί από το βασικό κορμό της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗΣ
ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΕ
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Η μέθοδος MASW (multichannel analysis of surface waves) δηλαδή πολυκάναλη ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων είναι μια μέθοδος σεισμικής αξιολόγησης που αποτιμά τη σκληρότητα του εδάφους για γεωτεχνικές εφαρμογές. Η MASW πρώτα μετρά τα σεισμικά επιφανειακά κύματα που παράγονται από διάφορους τύπους σεισμικών πηγών όπως η βαριοπούλα και αναλύει τη ταχύτητα διάδοσης αυτών των κυμάτων υπολογίζοντας έτσι τον αριθμό των στρωμάτων του εδάφους αλλά και το μέτρο ελαστικότητας του.

Παρακάτω παραθέτονται μερικές εφαρμογές που αφορούν τη χρησιμοποίηση της μεθόδου MASW στις γεωτεχνικές εφαρμογές.

. Οι Miller et al το 1999a σε κατασκευή μιας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Αλαμπάμα χρησιμοποίησαν τη μέθοδο MASW για να κάνουν πιο αποτελεσματικό ένα πρόγραμμα διάτρησης με σκοπό να εντοπίσει τους καρστικοποιημένους ασβεστόλιθους, οι οποίοι σε ορισμένα σημεία ήταν αρκετά καρστικοποιημένοι και θα έθεταν την ακεραιότητα του εξοπλισμού, αλλά και ολόκληρη τη κατασκευή σε κίνδυνο.

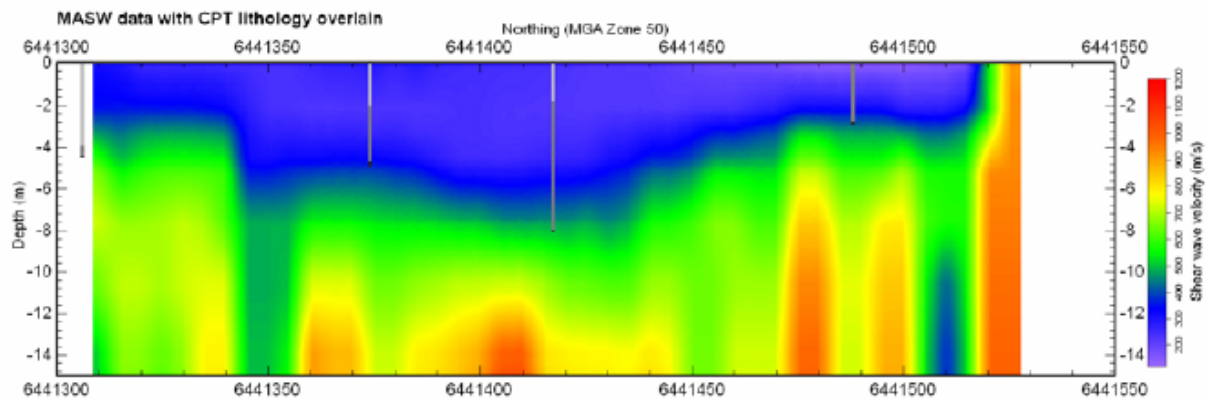
Οι Miller et al το 1999b χρησιμοποίησαν τη μέθοδο MASW για να χαρτογραφήσουν το υπέδαφος σε βάθος 2 με 7 m και να αναγνωρίσουν τυχόν ζώνες όπου το έδαφος δεν είναι σταθερό στο Olathe του Kansas.

Οι Xia et al το 2001 χρησιμοποίησαν τη μέθοδο MASW για να εντοπίσουν «τούνελ» στις εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας απότομων βράχων στο Calvert του Maryland. Η ταχύτητα των κυμάτων S που υπολογίστηκε από τα δεδομένα των επιφανειακών κυμάτων έδειξε ανωμαλίες χαμηλής ταχύτητας σε σχήμα καμινάδας που κατευθείαν συσχετίστηκε με το «τούνελ».

Οι Nasser-Moghadam et al το 2007 χρησιμοποίησαν τη μέθοδο MASW σε μία γνωστή περιοχή κοντά στην επιφάνεια για την ανασκαφή ενός ορυχείου. Το αντικείμενο της γεωφυσικής διασκόπησης ήταν να αξιολογήσει των στηλών πετρώματος που δημιουργήθηκαν από τη μέθοδο θαλάμων και στύλων.

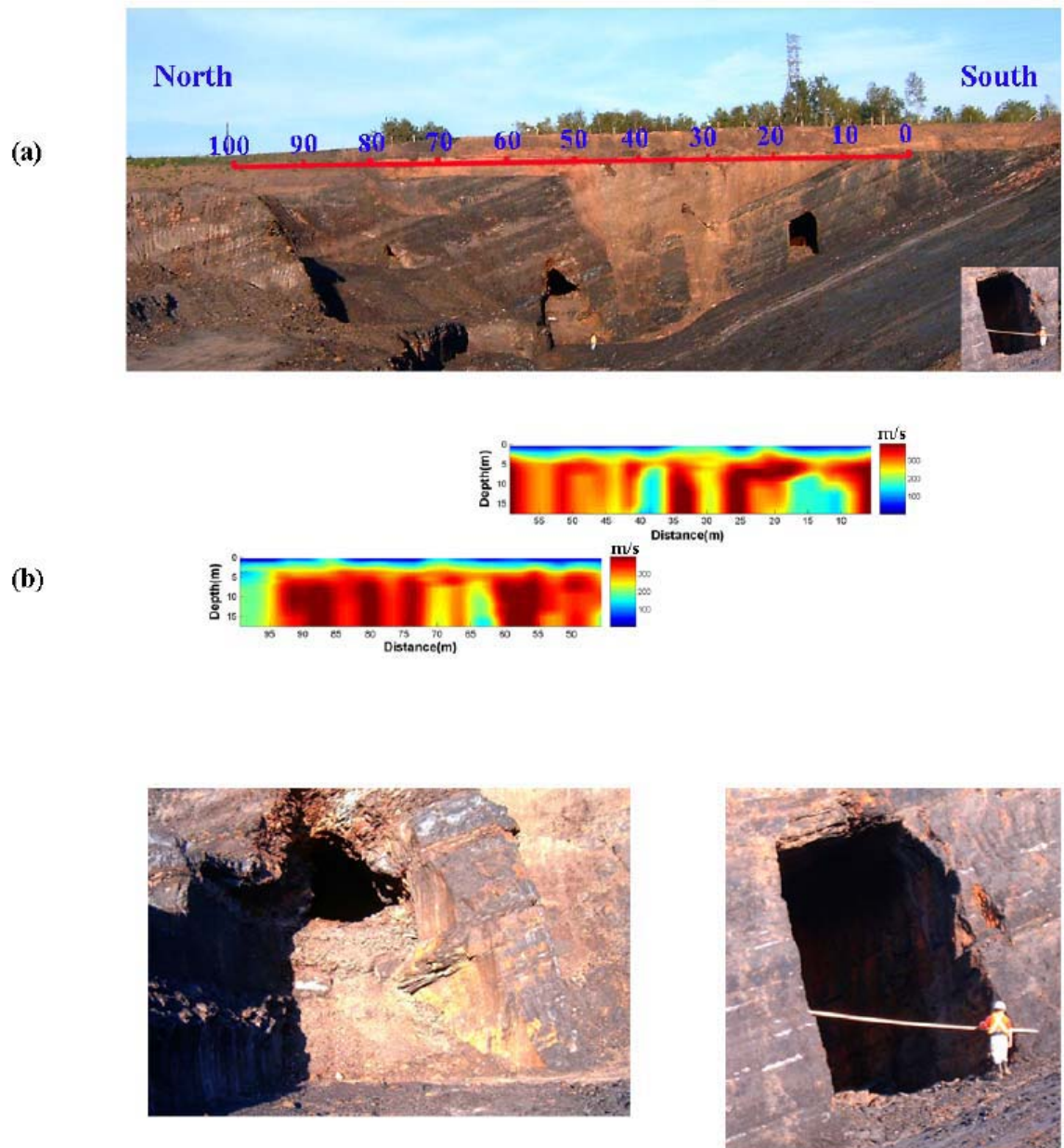
Ο Campbell το 2008 βρήκε ότι η ετερογένεια λόγω καρστ στους ασβεστόλιθους δημιουργούν σημαντικούς γεωτεχνικούς κινδύνους για γεωτεχνικές κατασκευές σε ορισμένες περιοχές της δυτικής Αυστραλίας (WA). Κατά τη διάρκεια των προηγούμενων 4 ετών, η Geoforce διεξήγαγε μια σειρά γεωφυσικών ερευνών στην WA για να βοηθήσει στο γεωτεχνική εξυγίανση του κινδύνου τέτοιων περιοχών. Μια από αυτές τις έρευνες έγινε με τη μέθοδο της MASW. Η

πολυκάναλη ανάλυση των σεισμικών κυμάτων (MASW) είναι συνήθως ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την γεωτεχνική απεικόνιση (Σχ.2.1)



Σχήμα 2.1. Μία τομή με δεδομένα που συλλέχθηκαν με τη μέθοδο MASW για την περιοχή μελέτης του συγκεκριμένου άρθρου. (Campbell, 2008) .

Οι Xu et al το 2008 πραγματοποίησαν σεισμικές έρευνες σε τρεις περιοχές στην επαρχία της Νέας Σκοτίας, Καναδά. Αυτό το άρθρο παρουσιάζει τις πρόσφατες εξελίξεις χρησιμοποιώντας τα σεισμικά κύματα Rayleigh που ανιχνεύουν και απεικονίζουν δεδομένα για τις υπόγειες ανωμαλίες (Σχ. 2.2).



Σχήμα 2.2. Εικόνες από τα στοιχεία και την ερμηνεία τομέων Stellatron (α) γραμμή ερευνών 100 μέτρων που επεκτείνεται καλύπτοντας τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα, (β) τομή με τη μέθοδο MASW σύμφωνα με τη γραμμή ερευνών (Xu et al, 2008).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗ ΚΑΙ ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗ
ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ
RAYLEIGH

3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

3.1.1 Βασικές αρχές της σεισμικής διάθλασης

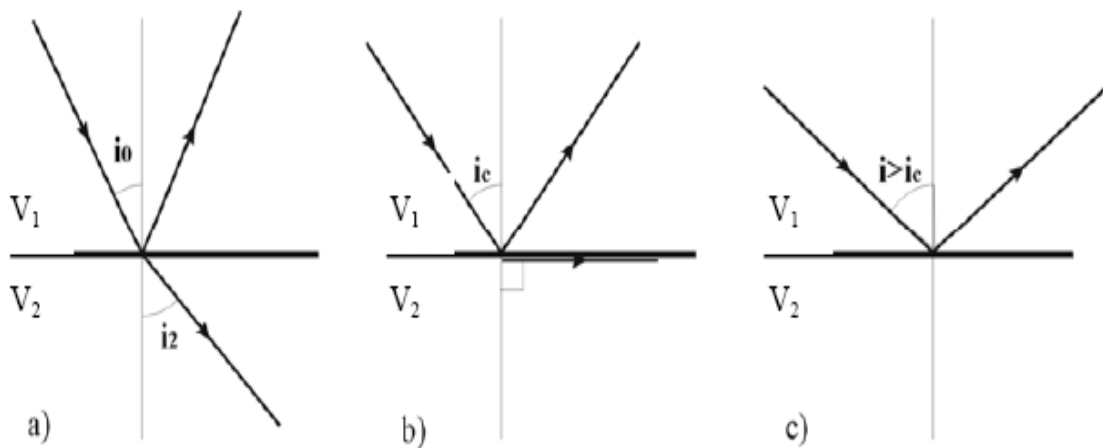
Τα σεισμικά κύματα κατά την διάδοσή τους στο υπέδαφος υφίστανται διαδοχικές διαθλάσεις στις διαχωριστικές επιφάνειες των στρωμάτων, με αποτέλεσμα την αλλαγή της πορείας της σεισμικής ακτίνας. Η γωνία πρόσπτωσης, i_o , η γωνία διάθλασης i_2 , και οι ταχύτητες V_1 και V_2 στα δύο επιφανειακά στρώματα συνδέονται μέσω του νόμου του Snell (Βαφείδης, 1993,):

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

όπου p είναι η παράμετρος της σεισμικής ακτίνας. Η σεισμική ακτίνα προσπίπτει στην διαχωριστική επιφάνεια υπό οριακή γωνία, όταν ισχύει $V_2 > V_1$ και η διαθλώμενη ακτίνα έχει διεύθυνση παράλληλη προς τη διαχωριστική επιφάνεια (Σχήμα 3.1b). Σε μια τέτοια περίπτωση ο νόμος του Snell τροποποιείται ως εξής:

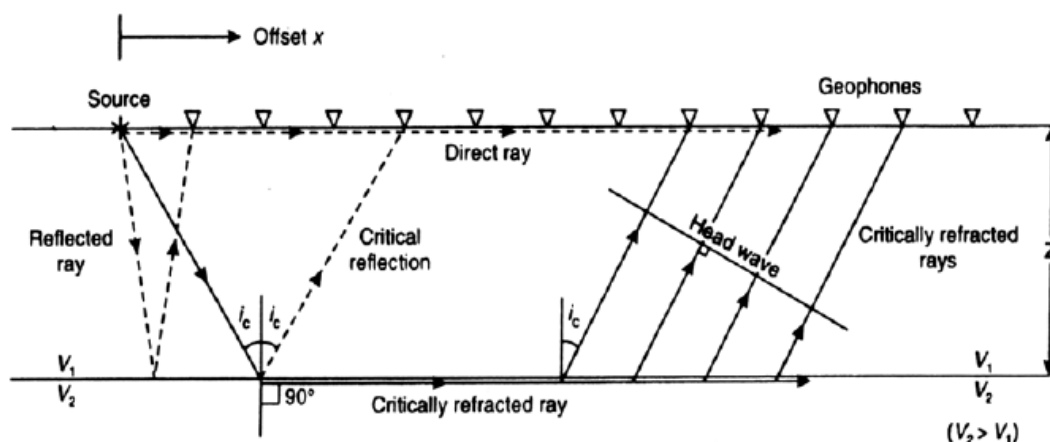
$$\sin(i_c) = \frac{V_1}{V_2}$$

Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της οριακής γωνίας, παρατηρείται ολική ανάκλαση (Σχήμα 3.1c). Βέβαια, θα πρέπει να σημειωθεί ότι βασική προϋπόθεση δημιουργίας οριακά διαθλώμενων κυμάτων είναι ότι οι ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων θα πρέπει να αυξάνουν από τους ρηχότερους προς στους βαθύτερους σχηματισμούς.



Σχήμα 3.1. Σχηματική παράσταση των τριών περιπτώσεων πρόσπτωσης μιας σεισμικής ακτίνας σε μια 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 (Βαρδιδάκη 2005).

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 3.2).



Σχήμα 3.2. Σχηματική παράσταση της δημιουργίας των μετωπικών κυμάτων. (Reynolds, 1997)

Η γωνία των αναδιδόμενων προς την επιφάνεια σεισμικών ακτινών με την κάθετο στην διαχωριστική επιφάνεια είναι ίση με την ορική γωνία. Αυτά τα αναδιδόμενα σεισμικά κύματα ονομάζονται μετωπικά κύματα. Τα σεισμικά κύματα που καταγράφονται πρώτα στις θέσεις των γεωφώνων είναι τα απευθείας και τα μετωπικά κύματα (Σχήμα 3.2). Τα απευθείας κύματα καταγράφονται πρώτα στα γεώφωνα (πρώτες αφίξεις), που βρίσκονται μέχρι ορισμένη απόσταση από το σημείο δημιουργίας της σεισμικής δόνησης, ενώ τα μετωπικά κύματα καταγράφονται ως πρώτες αφίξεις στα μακρινότερα γεώφωνα. Μελετώντας τις πρώτες αφίξεις (απευθείας και μετωπικά κύματα) είναι δυνατό να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με το πάχος και την ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στους σχηματισμούς του υπεδάφους. (Σαζιώνη, 2009)

3.1.2 Περιορισμοί μεθόδου σεισμικής διάθλασης

Με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης, το πάχος και η σεισμική ταχύτητα του κάθε στρώματος είναι θεωρητικά απλό να υπολογιστούν για απλές δομές (π.χ. οριζόντια στρώματα). Κατά τη πρακτική εφαρμογή, όμως, της μεθόδου εντοπίζονται διάφορες πηγές σημαντικών σφαλμάτων. Γενικότερα, όταν η σεισμική ταχύτητα του κάθε στρώματος είναι σημαντικά μεγαλύτερη της ταχύτητας του υπερκειμένου του και όταν το πάχος των στρωμάτων είναι μεγάλο, έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης. Οι βασικές πηγές σφαλμάτων εντοπίζονται κυρίως σε φαινόμενα τυφλής ζώνης, δηλαδή στην αδυναμία της μεθόδου να εντοπίσει ένα ενδιάμεσο στρώμα. Σε μια τέτοια περίπτωση σφάλματος είναι πιθανό να υπερεκτιμηθεί το πάχος κάποιου στρώματος, καθώς και να υπολογιστεί λανθασμένα και η σεισμική του ταχύτητα (Σαγκίωτη, 2010).

Τα φαινόμενα τυφλής ζώνης διακρίνονται στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Η ταχύτητα κάποιου στρώματος είναι μικρότερη ή περίπου ίδια με αυτή του υπερκειμένου του. Έτσι, στην διεπιφάνεια μεταξύ των δύο αυτών στρωμάτων δεν δημιουργούνται μετωπικά κύματα.
- Κάποιο ενδιάμεσο στρώμα έχει πολύ μικρό πάχος σχετικά με το υπερκείμενο και υποκείμενο του στρώμα. Σε αυτήν την περίπτωση τα

μετωπικά κύματα του λεπτού στρώματος φτάνουν αργότερα από αυτά υποκείμενός του.

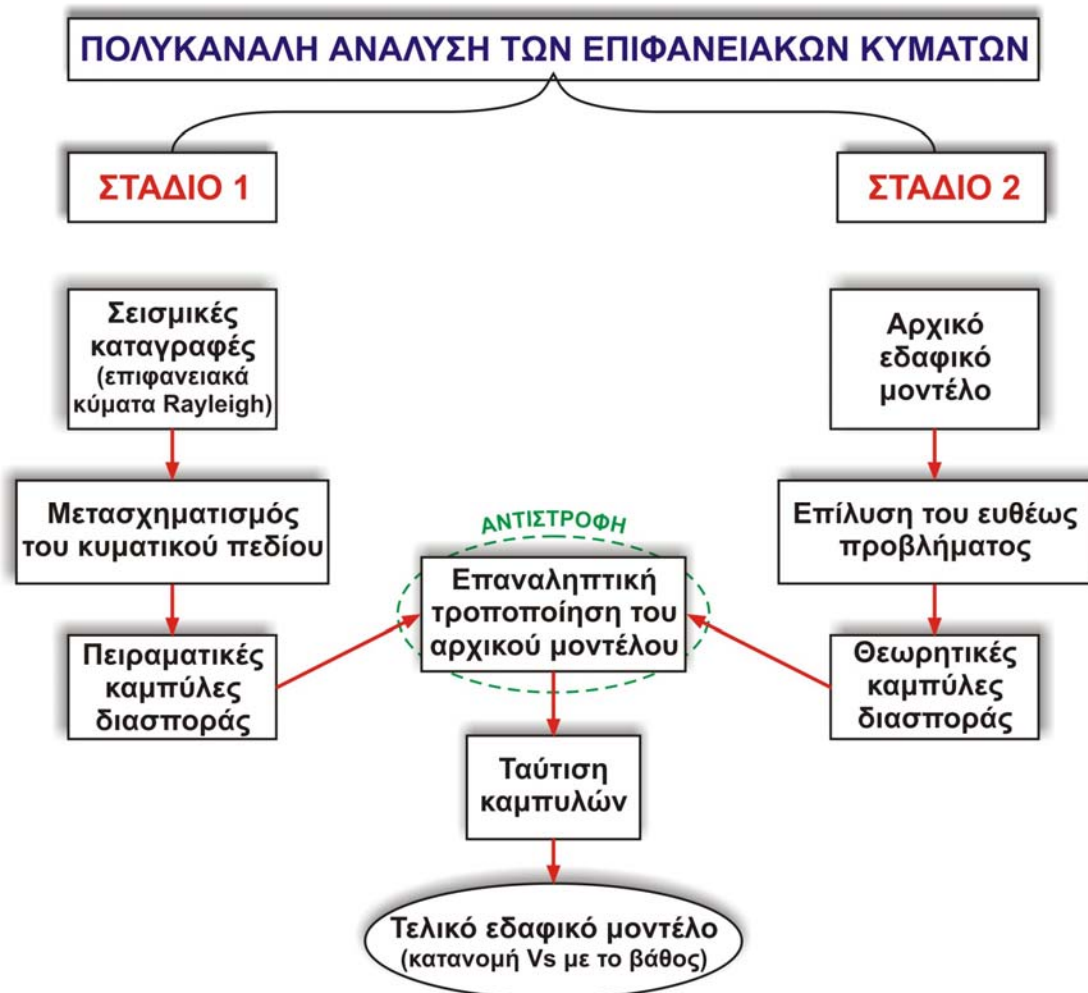
- Όταν τα γεώφωνα είναι τοποθετημένα μακριά από τη σεισμική πηγή, υπάρχει πιθανότητα οι αφίξεις των μετωπικών κυμάτων βαθύτερων σχηματισμών να καταγράφονται στα γεώφωνα νωρίτερα από τις αφίξεις των αντιστοίχων κυμάτων υπερκειμένων στρωμάτων.

3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ RAYLEIGH.

Η ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων περιλαμβάνει τη λήψη καταγραφών πλούσιων σε επιφανειακά κύματα Rayleigh και την αντιστροφή των χαρακτηριστικών καμπύλων διασποράς τους, για τον καθορισμό της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων κατανεμημένης με το βάθος. 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 (Σχήμα 3.3). Κατά το πρώτο στάδιο, από τις σεισμικές καταγραφές κοινής πηγής, οι οποίες θα πρέπει να περιλαμβάνουν σημαντική σεισμική ενέργεια κατανεμημένη στα επιφανειακά κύματα, προκύπτουν οι πειραματικές καμπύλες διασποράς. Στο δεύτερο στάδιο προσδιορίζονται οι θεωρητικές καμπύλες διασποράς για οριζόντια στρωματωμένο εδαφικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας την τεχνική Thomson-Haskell (Haskell, 1953, Schwab and Knoroff, 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 (V_s) με το

βάθος). Η κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας Vs αντιστοιχείται στο κέντρο της διάταξης των γεωφώνων.



Σχήμα 3.3. Διάγραμμα ροής της μεθόδου πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων.(Κρητικάκης, 2010)

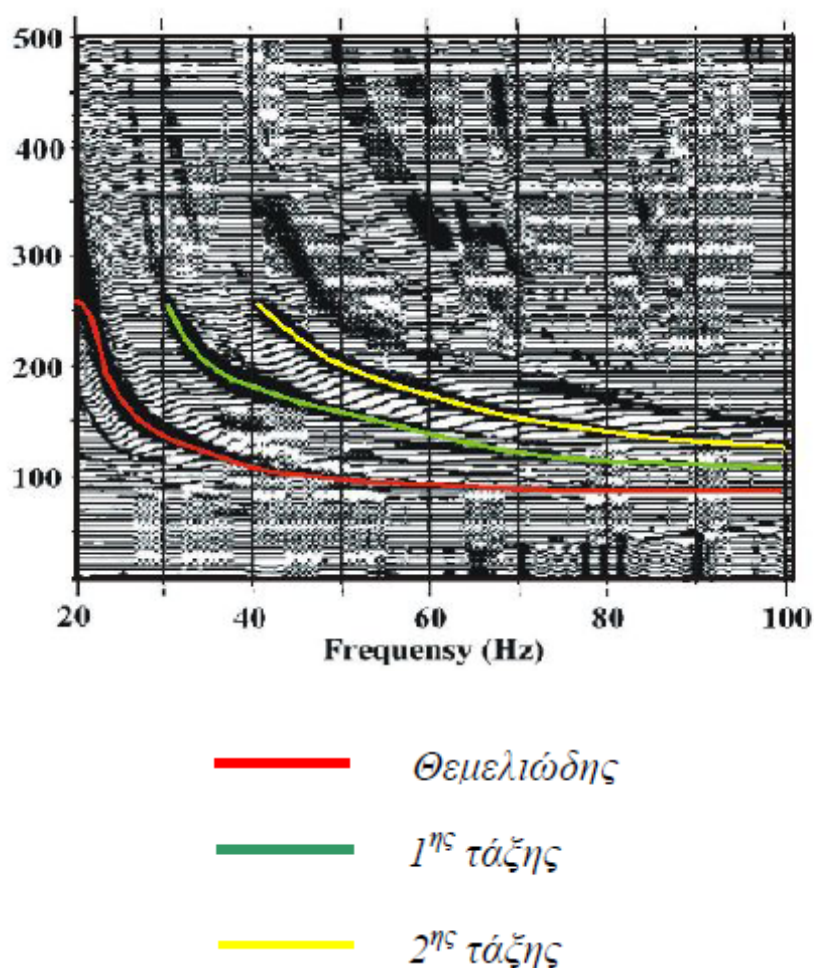
3.2.1 Απόκτηση σεισμικών καταγραφών

Στα πειράματα σεισμικών διασκοπήσεων, τα επιφανειακά κύματα εμφανίζονται στα σειсмоγράμματα μετά τα κύματα χώρου και αναγνωρίζονται από το μεγάλο πλάτος και τη σχετικά χαμηλή συχνότητά τους. Η απόκτηση των σεισμικών καταγραφών, στις οποίες θα πρέπει να δεσπόζουν τα επιφανειακά κύματα, απαιτεί ορισμένες ρυθμίσεις, όπως είναι η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού (γεώφωνα κατάλληλης ιδιοσυχνότητας και σεισμική πηγή με ευρύ φασματικό περιεχόμενο), η ρύθμιση της απόστασης πηγής – γεωφώνου και της ισάποστασης των γεωφώνων, η ρύθμιση του διαστήματος δειγματοληψίας και της διάρκειας καταγραφής. Η διάταξη πηγής - γεωφώνων συνήθως είναι ίδια με εκείνη που εφαρμόζεται στις εργασίες της σεισμικής ανάκλασης (διάταξη κοινής πηγής) με κύλιση (roll along) του αναπτύγματος πηγής γεωφώνων. Εκτενέστερες αναφορές σχετικά με τις βέλτιστες παραμέτρους απόκτησης των σεισμικών καταγραφών έχουν παρουσιαστεί από τους Park et al (1999).

3.2.2 Μετασχηματισμός του κυματικού πεδίου

Τα επιφανειακά κύματα που καταγράφονται από διάταξη κοινής πηγής είναι δυνατό να αναλυθούν στις χαρακτηριστικές καμπύλες διασποράς τους που προκύπτουν μετά την εφαρμογή ενός μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου (McMechan and Yedlin, 1981). Έτσι, σεισμικές καταγραφές μετασχηματίζονται γραμμικά από το χώρο απόστασης – χρόνου ($x - t$) στο πεδίο της βραδύτητας ($=1/\text{ταχύτητα}$) – συχνότητας ($p - f$). Οι καμπύλες διασποράς οριοθετούνται στο πεδίο $p - f$ από τα τοπικά ενεργειακά μέγιστα (χρωματισμένες γραμμές - Σχήμα 3.4) της κυματικής ενέργειας που παρατηρούνται στο πεδίο αυτό και ουσιαστικά απεικονίζουν την μεταβολή της ταχύτητας φάσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh συναρτήσει της συχνότητας. Οι διαφορετικές (θεμελιώδης και ανώτερης) τάξεις (Σχήμα 3.4) των χαρακτηριστικών καμπυλών διασποράς υποδηλώνουν ότι τα επιφανειακά κύματα Rayleigh μιας συγκεκριμένης συχνότητας διαδίδονται με διαφορετική ταχύτητα φάσης. Η ανάλυση των καμπυλών σκέδασης συνήθως επικεντρώνεται στη θεμελιώδη χαρακτηριστική καμπύλη, αφού οι υπόλοιπες είναι συνήθως ενεργειακά ασθενείς. Το βασικό πλεονέκτημα που προσφέρει η ανάλυση της θεμελιώδους χαρακτηριστικής καμπύλης είναι ότι εμπεριέχει πληροφορίες από

ένα σχετικά μεγάλο εύρος μηκών κύματος (περιοδούς), αναγκαίο για τη συλλογή πληροφοριών από τα επιφανειακά στρώματα μέχρι και τα πλέον βαθύτερα, με αποτέλεσμα τον ακριβέστερο προσδιορισμό των εδαφικών παραμέτρων. Μεγαλύτερα μήκη κύματος διεισδύουν βαθύτερα στους εδαφικούς σχηματισμούς και περιέχουν 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 (Παπακωνσταντίνου, 2004).



Σχήμα 3.4. Χαρακτηρίστηκες καμπύλες διασποράς (Τροποποιημένο από Παπακωνσταντίνου, 2004, Park et al., 1998).

3.2.3 Προσδιορισμός του αρχικού εδαφικού μοντέλου

Οι μέθοδοι αντιστροφής κατά τις οποίες οι μη γραμμικές αναλυτικές σχέσεις προσομοιάζονται από γραμμικά συστήματα με την χρήση του αναπτύγματος Taylor έχουν το μειονέκτημα ότι για την επιτυχή σύγκλισή τους απαιτείται το αρχικό μοντέλο να βρίσκεται «σχετικά» κοντά στη «γειτονιά» της λύσης. Επομένως, για την ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh είναι πολύ σημαντικός ο προσδιορισμός ενός αρχικού εδαφικού μοντέλου το οποίο να παρέχει θεωρητικές καμπύλες διασποράς που να μην απέχουν πολύ από αυτές που έχουν προσδιοριστεί πειραματικά. Έτσι, για τον προσδιορισμό του αρχικού εδαφικού μοντέλου λαμβάνονται υπόψη τα εξής (Κρητικάκης et al, 2004a):

- Από τις καμπύλες διασποράς (τιμές της ταχύτητας φάσης συναρτήσει της συχνότητας) είναι δυνατό να προσδιοριστούν τα μήκη κύματος των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh που έχουν καταγραφεί σύμφωνα με την θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής:

$$c_R = \lambda_R * f_R$$

όπου c_R είναι η ταχύτητα φάσης, f_R η συχνότητα διάδοσης και λ_R το μήκος κύματος των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh .

- Το πλάτος ταλάντωσης των σωματιδίων κατά τη διάδοση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh σε βάθος ίσο με το μήκος κύματός τους ισούται περίπου με το 15 % του πλάτους ταλάντωσης στην επιφάνεια (Nazarian, 1984). Άρα, τα επιφανειακά κύματα Rayleigh διεισδύουν πρακτικά σε μέγιστο βάθος περίπου ίσο με το μήκος κύματός τους και επομένως οι πληροφορίες που εμπεριέχουν για τους εδαφικούς σχηματισμούς συνοψίζονται μέχρι το βάθος αυτό.

Η ταχύτητα των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh που διαδίδονται σε ομογενή ημιχώρο συνδέεται με την ταχύτητα των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (V_s) με τη σχέση:

$$c_R(f_i) = a * V_s(f_i)$$

όπου α αριθμητικός συντελεστής που λαμβάνει τιμές από 0.874 έως 0.955 για αντίστοιχες τιμές του λόγου Poisson από 0.0 έως 0.5 (Xia et al, 1999, Stokoe et al, 1994).

Εν κατακλείδι, αντιστοιχώντας το μήκος κύματος των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh που προσδιορίζονται από την εξ. 2.1 σε κάποιο βάθος, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το κύμα αυτό δεν έχει διεισδύσει σε μεγαλύτερο βάθος (d) από αυτό που ισούται με το μήκος κύματος του (συνήθως το $d=\lambda/2$ είναι μια καλή προσέγγιση) και εκτιμώντας την ταχύτητα V_s από την Εξ. 2.2, προσδιορίζεται μια ικανοποιητική αρχική εκτίμηση της κατανομής της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων με το βάθος. Ακολούθως, θεωρώντας ένα σταθερό λόγο του Poisson (ν) για κάθε εδαφικό στρώμα είναι δυνατό να εκτιμηθεί η ταχύτητα των διαμηκών κυμάτων (V_p) και τέλος, με την χρήση εμπειρικών σχέσεων εκτιμάται και η πυκνότητα για κάθε εδαφικό στρώμα.

3.2.4 Επίλυση του ευθέως προβλήματος

Η ταχύτητα φάσης των κυμάτων Rayleigh c_{Rj} για οριζοντια στρωματωμένο μέσο, προσδιορίζεται από την συνάρτηση διασποράς F στην μη γραμμική και πεπλεγμένη της μορφή (Schwab and Knopoff, 1972):

$$F(f_i, c_{Ri}, V_s, V_p, \rho, d) = 0 \quad (i=1,2,3,\dots,n)$$

όπου f_i είναι η συχνότητα σε Hz, c_{Ri} είναι η ταχύτητα φάσης των κυμάτων Rayleigh για τη συχνότητα f_i , $V_s = (V_{s1}, V_{s2}, \dots, V_{sm})^T$ είναι το διάνυσμα των ταχυτήτων των S – κυμάτων, με V_{sj} την ταχύτητα των S – κυμάτων του j στρώματος ($j = 1, 2, \dots, m$), m είναι ο αριθμός των στρωμάτων, $V_p = (V_{p1}, V_{p2}, \dots, V_{pm})^T$ είναι το διάνυσμα των ταχυτήτων των P – κυμάτων, με V_{pj} την ταχύτητα των P – κυμάτων του j στρώματος, $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m)^T$ είναι το διάνυσμα των πυκνοτήτων, με ρ_j την πυκνότητα του j στρώματος και $d = (d_1, d_2, \dots, d_{m-1})^T$ είναι το διάνυσμα των παχών, με d_j το πάχος του j στρώματος. Οι ρίζες της αναλυτικής σχέσης της συνάρτησης διασποράς για συγκεκριμένες παραμέτρους του μοντέλου (V_s , V_p , ρ , και d) και για συχνότητα (f_i) αντιστοιχούν στις ταχύτητες φάσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh στη συγκεκριμένη συχνότητα. Σε αυτή την εργασία, εξετάζεται μόνο η θεμελιώδης χαρακτηριστική καμπύλη η οποία, σε χαμηλές συχνότητες, αποτελείται

από τις μικρότερες θετικές ρίζες της συνάρτησης διασποράς για διάφορες συχνότητες

3.2.5 Αντιστροφή των καμπύλων διασποράς

Η διαδικασία της αντιστροφής αποτελεί το πρόβλημα προσδιορισμού των παραμέτρων του εδαφικού μοντέλου από τις καμπύλες διασποράς.

Ο ακριβής προσδιορισμός των πειραματικών και θεωρητικών καμπυλών διασποράς αποτελεί σημαντικό κομμάτι στην ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων, ωστόσο, η αντιστροφή τους είναι η διαδικασία εκείνη που θα επηρεάσει κατά κύριο λόγο την ορθότητα της τελικής λύσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο μεγάλο πλήθος των πιθανών μοντέλων που αναπαράγουν τις πειραματικές καμπύλες διασποράς.

Θεωρώντας ότι οι μετρήσεις (πειραματικές καμπύλες διασποράς) συμπεριλαμβάνουν τυχαία ή συναφή σφάλματα ορίζεται ως αντικειμενική συνάρτηση η διαφορά μεταξύ υπολογισμένων και πειραματικών τιμών των καμπυλών διασποράς

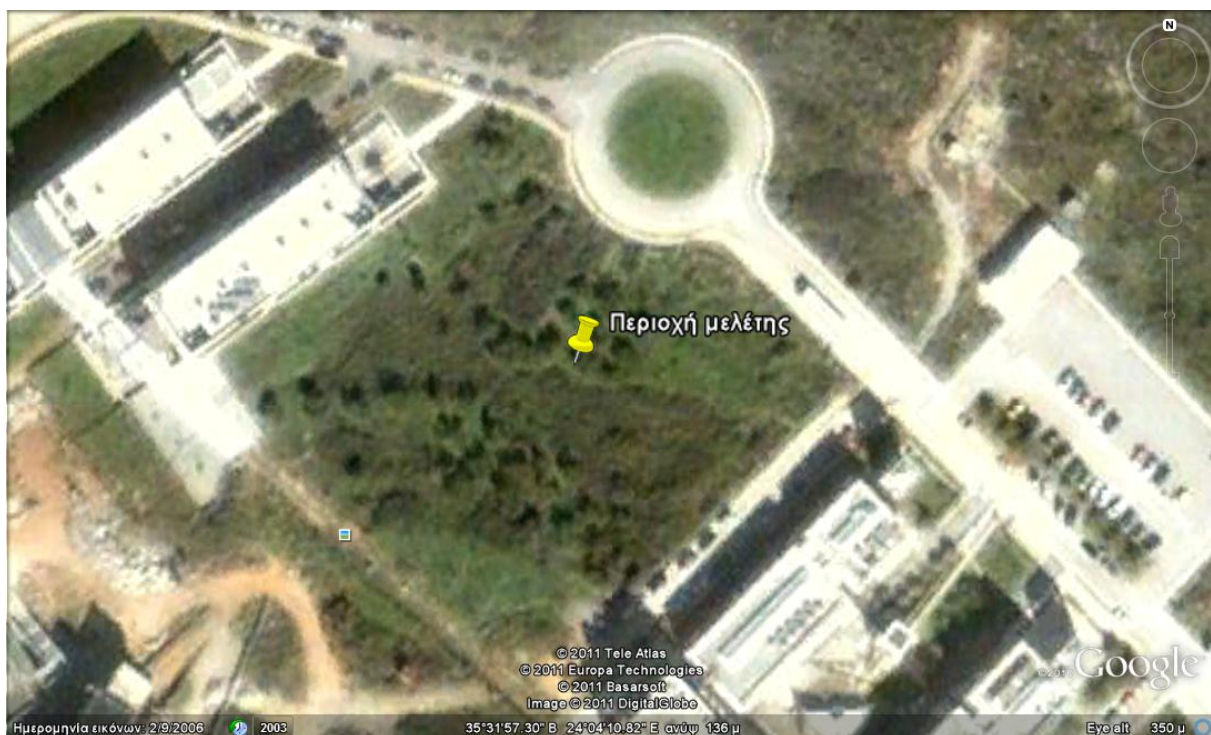
Βρίσκεται το ελάχιστο της αντικειμενικής συνάρτησης και βρίσκεται ο γενικευμένος αντίστροφος πίνακας που ουσιαστικά συσχετίζει γραμμικά τις παραμέτρους του μοντέλου με τις πειραματικές μετρήσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4
ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΥΛΛΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΓΕΩΤΡΗΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο χώρο της πολυτεχνειούπολης, νοτιοανατολικά των κτιρίων που στεγάζεται το Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος (ΜΗΠΕΡ) (Σχήμα 4.1), και αποτελεί προτεινόμενη περιοχή έδρασης των κτιρίων της Β φάσης του εν λόγω Τμήματος (Σχήμα 4.2). Η θέση όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις σεισμικής διάθλασης και πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής συμπίπτει με την γραμμή της ηλεκτρικής τομογραφίας HT5 και διέρχεται πάνω από τη γεώτρηση MP5 (Σχήμα 4.2).

Στην ίδια περιοχή έχουν επίσης έχουν πραγματοποιηθεί γεωτρήσεις και άλλες γεωφυσικές μέθοδοι όπως ηλεκτρική τομογραφία και χαρτογράφηση με την H/M συσκευή CM-031.



Σχήμα 4.1. Φωτογραφία από Google Earth της περιοχής μελέτης.

4.1.1 Γεωλογία περιοχής μελέτης

21

σε περιοχές με μεγάλο ενεργό πορώδες, που κατά θέσεις δημιουργείται από την συσσώρευση απολιθωμάτων, τείνοντας εκεί να χαρακτηριστεί παρόμοιο του «κογχυλιάτη λίθου». Η συνεχής όμως δράση της, οδήγησε δευτερογενώς στην μερική πλήρωση των διακένων, που και η ίδια δημιούργησε, με terra rossa και στην οριζόντια διεύθυνση.

4.2 ΓΕΩΤΡΗΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Στα πλαίσια γεωτεχνικής έρευνας για την ανέγερση των καινούριων κτιρίων ΜΗΠΕΡ (Αγιουτάντης, 2009), εκτός από την γεωφυσική διασκόπηση στην περιοχή μελέτης διανοίχθηκαν 5 δειγματοληπτικές γεωτρήσεις (Σχήμα 4.2). Στοιχεία και οι ακριβείς θέσεις των γεωτρήσεων που πραγματοποιήθηκαν παρατίθενται στον Πίνακα 4.1. Η γεώτρηση που βρίσκεται επί της σεισμικής γραμμής μελέτης είναι η MP5 της οποίας η περιγραφή δίνεται στον Πίνακα 4.2.

Πιο συνοπτικά, σύμφωνα με τη γεώτρηση MP-5 βρέθηκαν:

- Ένα εδαφικό στρώμα καστανοκόκκινης αργίλου με μικρή παρουσία χαλίκων από τα 0 μέχρι τα 0,35 m
- Ένα στρώμα ιλυώδους άμμου μπεζ χρώματος με παρουσία ασβεστολιθικών χαλίκων από τα 0,35 μέχρι τα 1 m.
- Μαργαϊκός ασβεστόλιθος κατακερματισμένος ή/και αποσαθρωμένος καταθέσεις από τα 1 m μέχρι και τα 10 m (τέλος της γεώτρησης) .

Πίνακας 4-1. Στοιχεία και συντεταγμένες γεωτρήσεων (σε ΕΓΣΑ'87) που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή μελέτης (Αγιουτάντης 2009).

Γεώτρηση	X	Y	Z	Βάθος [m]	Όργανο	Ημερομηνία από – έως
MP-1	506040	3931801	136.0	10.10	-	06/08/09 07/08/09
MP-2	506049	3931809	135.8	10.35	-	07/08/09 07/08/09
MP-3	506125	3931825	134.2	13.50	-	02/08/09 03/08/09
MP-4	506175	3931832	134.6	10.00	-	04/08/09 05/08/09
MP-5	506159	3931808	135.6	10.00	-	03/08/09 04/08/09

* Οι συντεταγμένες X, Y έχουν προκύψει από τοπογραφική αποτύπωση ακριβείας με χρήση GPS

Πίνακας 4-2. Έντυπο Γεώτρησης MP5 (Αγιουτάντης 2009).

ΕΝΤΥΠΟ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

ΕΡΓΟ: ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ
Β ΦΑΣΗΣ ΜΗΠΕΡ

ΦΟΡΕΑΣ: ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΑΝΑΔΟΧΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ: ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΓΕΩΤΡΗΣΗ: MP5
ΒΑΘΟΣ: 10,00
Υψόμετρο:

ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ: Χ= ΕΓΣΑ
Ψ=

ΕΝΑΡΞΗ: 03/08/2009
ΛΗΞΗ: 04/08/2009

ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ: ΦΡΑΓΜΟΣ - ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΝΕΡΟΥ

ΓΕΩΤΡΥΠΑΝΟ: ΔΙΑΜΑΝΤΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡ. Π.
ΕΠΙΒΛΕΨΗ: ΕΡΓ. ΜΗΧ. ΠΕΤΡ. ΠΟΛ. ΚΡ.:

ΠΡΟΟΔΟΣ ΕΡΓΟΥ (Ημερήσια) στάθμη πριν/ βράδυ	ΒΑΘΟΣ (m)	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΣΥΜΒΟ- ΛΙΣΜΟΣ	ΔΙΑΤΡΗΣΗ	ΣΩΛΗ- ΝΟΣΗ εξ-εσ(διάμ)	ΔΕΙΓ- ΜΑΤΟ ΛΗΠΤ.	R.Q.D %	Recovery %	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Εναρξη 3/8/09	0,00	Αργίλος καστανο κόκκινου χρώματος με πολύ μικρό ποσοστό χαλίκων.Από 0 - 0,35m		Φ1	114/ 104			100	
				0,35 Φ2		10	0,00	100	
		Ιλυώδης άμμος μπλε χρώματος με παρουσία χαλίκων και ασβ/κών κροκάλων από 0,35 - 1,00m		0,60 Φ3	0,60	0,60		100	
	1,00			1,00					
		Μαργακός ασβεστόλιθος λευκός με απολιθώματα από 1,00 -2,30m και μία αποσπασμένη περιοχή απο 1,80 - 2,00m		Φ4	A		23,71	98	
					Σ				
	2,00			2,20	Ω				
		Ασυνέχεια 45° J,VWa,VII,Ds,C,Fi,II από 2,30 - 2,80m			Λ		38,95	99	
					H	T2-89 SD			
	3,00	Κερματισμένος & αποσπασμένος ασβεστόλιθος από 2,80 - 3,60m		Φ5	N				
					Ω				
				3,70	T		13,79		
Λήξη 3/8/09	4,00	Υγιής μαργακός ασβεστόλιθος μπλε χρώματος από 3,60 -4,30m			H				
		Κερματισμένος ασβεστόλιθος από 4,30 - 5,20m		Φ6			48,39	88	
	5,00			5,20					Στα 4,90m χάθηκε το νερό μέχρι και το τέλος της γεώτρησης
		Βιογενής μαργακός ασβεστόλιθος λευκού χρώματος με απολιθώματα από 5,20 - 6,10m		Φ7			32,29	99	
	6,00								
		Κερματισμένος ασβεστόλιθος από 6,10 - 7,30m		6,70			16,49		
	7,00							89	
		Βιογενής μαργακός ασβεστόλιθος λευκού χρώματος με πολλά απολιθώματα και μεγάλο πορώδες από 7,30 - 9,20m		Φ8			30,53		
	8,00			7,80					
				Φ9			84,89	100	
	9,00			9,20					Στα τελευταία μέτρα το πέτρωμα είναι πιο υγιές από ότι φαίνεται καθώς έσπασε όπως έβγαине η καροταρία.
		Κερματισμένος ασβεστόλιθος λευκού χρώματος με απολιθώματα από 9,20 - 10,00m		Φ10			33,33	66	
Λήξη 4/8/09	10,00	ΤΕΛΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ		10,00					

4.3 ΣΥΛΛΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στα πλαίσια γεωτεχνικής έρευνας για την ανέγερση των καινούριων κτιρίων ΜΗΠΕΡ (Αγιουτάντης, 2009), στην ευρύτερη περιοχή μελέτης συλλέχθηκαν δεδομένα ηλεκτρικής τομογραφίας και ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης. Επιπρόσθετα στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής συλλέχθηκαν δεδομένα σεισμικής διάθλασης και πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh. Ακολουθώς περιγράφεται ο εξοπλισμός και ο τρόπος συλλογής των σεισμικών δεδομένων.

4.3.1 Εξοπλισμός

Τα απαραίτητα όργανα για την πραγματοποίηση διασκόπησης με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης και της μεθόδου MASW είναι τα γεώφωνα, η σεισμική πηγή και το καταγραφικό. Στη γεωφυσική η απαιτούμενη σεισμική δόνηση επιτυγχάνεται κυρίως με την τοποθέτηση εκρηκτικών μέσα σε γεωτρήσεις, την εκπυρσοκρότηση πυροβόλου όπλου στραμμένου προς το έδαφος ή μηχανικού κτυπήματος στην επιφάνεια του εδάφους. Τα κτυπήματα αυτά πραγματοποιούνται με τη κρούση βάρους (πίπτων βάρος ή βαριοπούλα) επί μεταλλικής πλάκας στην επιφάνεια του εδάφους όπως έγινε και στην παρούσα διπλωματική.

Τα γεώφωνα είναι τα όργανα από τα οποία γίνεται αισθητή η εδαφική κίνηση και αποτελούνται από ένα πηνίο συνδεδεμένο σταθερά στο όργανο και ένα κινούμενο μαγνήτη. Τα σεισμικά κύματα που φτάνουν στο πηνίο, το αναγκάζουν σε ταλάντωση ίδια με αυτή του εδάφους ενώ ο μαγνήτης πραγματοποιεί ταλάντωση διαφορετική από το πηνίο λόγω αδράνειας. Λόγω της διαφορετικής κίνησης μαγνήτη – πηνίου δημιουργείται στο πηνίο μία μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή, η οποία προκαλεί διαφορά δυναμικού στα άκρα του πηνίου. Για την συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν 24 γεώφωνα ευαίσθητα στις κατακόρυφες ταλαντώσεις του εδάφους (κατακόρυφης συνιστώσας) που έχουν την δυνατότητα να καταγράφουν συχνότητες ταλάντωσης (ιδιοσυχνότητα) μεγαλύτερες από 4.5 Hz (Σαγκιώτη, 2010).

Τέλος, το καταγραφικό όργανο που χρησιμοποιήθηκε είναι ο 12-κάναλος σειсмоγράφος Geode της Geometrics, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί με

οποιονδήποτε υπολογιστή μέσω τοπικής θύρας δικτύου. Τα αναλυτικά του χαρακτηριστικά καθώς και τα επιμέρους καθώς και τα επιμέρους τμήματα από τα οποία αποτελείται παρατίθενται στο Παράρτημα της εργασίας (www.geometrics.com).

4.3.2 Πραγματοποίηση των μετρήσεων

Για την απόκτηση των δεδομένων σεισμικής διάθλασης και της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh οριοθετήθηκε γραμμή μελέτης (η οποία συμπίπτει με την γραμμή της ηλεκτρικής τομογραφίας HT5 - Σχήμα 4.2) συνολικού μήκους 23.5 m. Τα γεώφωνα τοποθετήθηκαν από τα 20 m της γραμμής αυτής σε ισαποστάσεις 0.5 m και συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 2 αναπτύγματα 24 γεωφώνων.

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων με την μέθοδο της σεισμικής διάθλασης ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Οριοθετείται το 1ο ανάπτυγμα της γραμμής μελέτης με μετροταινίες.
2. Τοποθετείται ο σειсмоγράφος στο τέλος του αναπτύγματος των γεωφώνων και απλώνεται το καλώδιο των γεωφώνων, προσέχοντας να υπάρχει μία υποδοχή για γεώφωνο κάθε 0.5 m (ισαπόσταση γεωφώνων).
3. Καρφώνονται προσεκτικά τα 24 γεώφωνα κατακόρυφης συνιστώσας ιδιοσυχνότητας 4.5 Hz στο έδαφος, ακριβώς δίπλα στην μετροταινία σε ισαποστάσεις των 0.5 m ξεκινώντας από τα 20 m της γραμμής μελέτης.
4. Τοποθετείται η πηγή (σιδερένια πλάκα και σφυρί) σε μία προκαθορισμένη θέση πηγής (βλ. Πίνακα 4.4).
5. Δημιουργείται δόνηση και λαμβάνονται καταγραφές. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση, όπου το ανάπτυγμα των γεωφώνων αποτελείται από 24 γεώφωνα, ενώ το καταγραφικό όργανο έχει μόνο 12 κανάλια, για κάθε θέση σεισμικής πηγής πραγματοποιήθηκαν 2 καταγραφές, με την μια φορά το καταγραφικό να είναι συνδεδεμένο με τα γεώφωνα 1-12 και την δεύτερη με τα γεώφωνα 13-24. Για την απόκτηση των καταγραφών

της σεισμικής διάθλασης ορίστηκε χρονικό διάστημα δειγματοληψίας και διάρκεια καταγραφής 62,5μs και 250ms, αντίστοιχα.

6. Τοποθετείται η πηγή σε άλλη θέση και επαναλαμβάνεται το βήμα 5.

Ειδικότερα, πρώτα εφαρμόσθηκε η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης για το πρώτο ανάπτυσμα γεωφώνων. Αρχικά, η πηγή τοποθετήθηκε στα 19,5 m Ως όνομα αρχείου καταγραφής πεδίου (Field File Identification Number - FFID) ορίστηκε ο αριθμός «11» για την καταγραφή στα γεώφωνα 1-12 και ο αριθμός «12» για την καταγραφή στα γεώφωνα 13-24 (βλ. Πίνακα 4.3). Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε όταν η πηγή τοποθετήθηκε στα 22,75 m, στα 25,75 m, στα 28,75 m και στα 32 m.

Όταν ολοκληρώθηκαν οι καταγραφές για όλες τις θέσεις των πηγών του 1^{ου} αναπτύγματος γεωφώνων, τότε πραγματοποιήθηκε η συλλογή των δεδομένων για την πολυκάναλη ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh.

Ειδικότερα, τροποποιήθηκε η διάρκεια και το διάστημα δειγματοληψίας (σε 0.125ms και 1000ms, αντίστοιχα) και η πηγή τοποθετήθηκε στα 19 m της γραμμής μελέτης. Πραγματοποιήθηκε μια καταγραφή για τα γεώφωνα 1-12 και μια για τα 13-24. Ακολούθως, η πηγή μεταφέρθηκε 1 m μετά το τελευταίο γεώφωνο για να πραγματοποιηθεί η ίδια διαδικασία. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια ενός εφεδρικού καλωδίου γεωφώνων, τα πρώτα δύο γεώφωνα (που ήταν τοποθετημένα στα 20 και 20,5 m της γραμμής μελέτης) τοποθετήθηκαν μετά το τέλος των γεωφώνων, δηλαδή στα 32 και 32,5 m, αντίστοιχα. Πραγματοποιήθηκαν καταγραφές με την πηγή να βρίσκεται στα 20 και τα 33,5 m. Η διαδικασία μετακίνησης 2 γεωφώνων κάθε φορά πραγματοποιήθηκε συνολικά 13 φορές, μέχρι το πρώτο και το τελευταίο γεώφωνο να βρίσκεται στα 32 m και 42,5 m αντίστοιχα. Στη θέση αυτή, τα γεώφωνα οριοθετούν το δεύτερο ανάπτυσμα γεωφώνων της διάθλασης. Για την απόκτηση των καταγραφών της σεισμικής διάθλασης ορίστηκε ως διάστημα δειγματοληψίας και διάρκεια καταγραφής 62,5 μs και 250 ms, αντίστοιχα, και πραγματοποιήθηκαν καταγραφές με τις πηγές να βρίσκονται στα 31.5 , 34.75 , 37.75 , 40.75 και 44 m της γραμμής μελέτης. Οι θέσεις των πηγών και τον γεωφώνων για κάθε καταγραφή περιγράφεται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4-3. Παράμετροι συλλογής γεωφυσικών δεδομένων

Περιοχή ΜΗΠΕΡ - Γραμμή 1 (Μήκος σεισμικής τομής: 12 m για MASW, 23.5 m για διάθλαση)													
α/α καταγραφής MASW	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Θέση πηγής MASW (m)	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Όνομα αρχείου MASW	111 -112	211 – 212	311-312	411–412	511–512	611–612	711-712	811–812	911–912	1011-1012	1111-1112	1211-1212	1311-1312
Διάθλ. Πηγή 1	19,5	Όνομα αρχ.: 11- 12										Όνομα αρχ.: 21-22	31,5
Κανάλι	Δύση												
1	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0	25,0	26,0	27,0	28,0	29,0	30,0	31,0	32,0
2	20,5	21,5	22,5	23,5	24,5	25,5	26,5	27,5	28,5	29,5	30,5	31,5	32,5
3	21,0	22,0	23,0	24,0	25,0	26,0	27,0	28,0	29,0	30,0	31,0	32,0	33,0
4	21,5	22,5	23,5	24,5	25,5	26,5	27,5	28,5	29,5	30,5	31,5	32,5	33,5
5	22,0	23,0	24,0	25,0	26,0	27,0	28,0	29,0	30,0	31,0	32,0	33,0	34,0
6	22,5	23,5	24,5	25,5	26,5	27,5	28,5	29,5	30,5	31,5	32,5	33,5	34,5
Διάθλ. Πηγή 2	22,75	Όνομα αρχ.: 13 14										Όνομα αρχ.: 23-24	34,75
7	23,0	24,0	25,0	26,0	27,0	28,0	29,0	30,0	31,0	32,0	33,0	34,0	35,0
8	23,5	24,5	25,5	26,5	27,5	28,5	29,5	30,5	31,5	32,5	33,5	34,5	35,5
9	24,0	25,0	26,0	27,0	28,0	29,0	30,0	31,0	32,0	33,0	34,0	35,0	36,0
10	24,5	25,5	26,5	27,5	28,5	29,5	30,5	31,5	32,5	33,5	34,5	35,5	36,5
11	25,0	26,0	27,0	28,0	29,0	30,0	31,0	32,0	33,0	34,0	35,0	36,0	37,0
12	25,5	26,5	27,5	28,5	29,5	30,5	31,5	32,5	33,5	34,5	35,5	36,5	37,5
\	25,75	Όνομα										Όνομα αρχ.: 25-26	37,75

Διάθλ. Πηγή 3		αρχ.: 15 - 16											
13	26,0	27,0	28,0	29,0	30,0	31,0	32,0	33,0	34,0	35,0	36,0	37,0	38,0
14	26,5	27,5	28,5	29,5	30,5	31,5	32,5	33,5	34,5	35,5	36,5	37,5	38,5
15	27,0	28,0	29,0	30,0	31,0	32,0	33,0	34,0	35,0	36,0	37,0	38,0	39,0
16	27,5	28,5	29,5	30,5	31,5	32,5	33,5	34,5	35,5	36,5	37,5	38,5	39,5
17	28,0	29,0	30,0	31,0	32,0	33,0	34,0	35,0	36,0	37,0	38,0	39,0	40,0
18	28,5	29,5	30,5	31,5	32,5	33,5	34,5	35,5	36,5	37,5	38,5	39,5	40,5
Διάθλ. Πηγή 4	28,75	Όνομα αρχ.: 17 18										Όνομα αρχ.: 27-28	40,75
19	29,0	30,0	31,0	32,0	33,0	34,0	35,0	36,0	37,0	38,0	39,0	40,0	41,0
20	29,5	30,5	31,5	32,5	33,5	34,5	35,5	36,5	37,5	38,5	39,5	40,5	41,5
21	30,0	31,0	32,0	33,0	34,0	35,0	36,0	37,0	38,0	39,0	40,0	41,0	42,0
22	30,5	31,5	32,5	33,5	34,5	35,5	36,5	37,5	38,5	39,5	40,5	41,5	42,5
23	31,0	32,0	33,0	34,0	35,0	36,0	37,0	38,0	39,0	40,0	41,0	42,0	43,0
24	31,5	32,5	33,5	34,5	35,5	36,5	37,5	38,5	39,5	40,5	41,5	42,5	43,5
Διάθλ. Πηγή 5	32,0	Όνομα αρχ.: 19 - 20										Όνομα αρχ: 29-30	44,0
Θέση πηγής MASW (m)	32,5	33,5	34,5	35,5	36,5	37,5	38,5	39,5	40,5	41,5	42,5	43,5	44,5
Όνομα αρχείου MASW	121-122	221-222	321-322	421-422	521-522	621-622	721-722	821-822	921-922	1021-1022	1121-1122	1221-1222	1321-1322
ΔΙΑΘΛΑΣΗ		Διάρκεια Καταγραφής : 250 msec			Διάστημα δείγματος : 62.5 msec								Ανατολή
MASW		Διάρκεια Καταγραφής: 1000 msec			Διάστημα δείγματος : 0.125 msec								

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

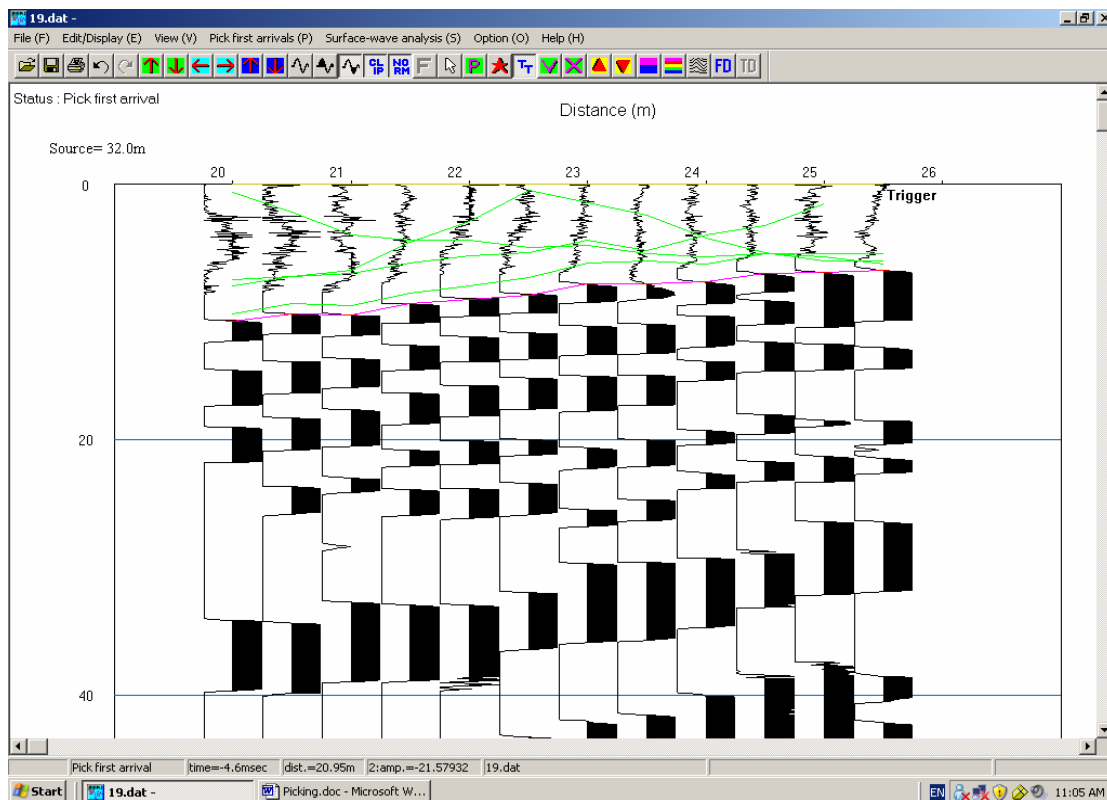
5.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SEISIMAGER

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.
- Απεικόνιση των δρομοχρονικών διαγραμμάτων.
- Αντιστοίχιση των πρώτων αφίξεων στα εδαφικά στρώματα (layer assignment).
- Προσδιορισμός της σεισμικής ταχύτητας για διακριτό αριθμό στρωμάτων του μοντέλου βάθους.
- Επεξεργασία των πρώτων αφίξεων με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας.

Τα δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα επεξεργασίας PickWin (μέρος του λογισμικού SeisImager) (SeisImager2D Manual 2005). Μετά την εισαγωγή των δεδομένων, ο χρήστης μπορεί να επέμβει διορθώνοντας 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, πραγματοποιείται ενίσχυση του πλάτους των κυμάτων και μεγέθυνση της απεικόνισης στην οριζόντια ή στην κατακόρυφη διεύθυνση. Το πρόγραμμα επιλέγει αυτόματα τις πρώτες αφίξεις των σεισμικών κυμάτων, ενώ παρέχει δυνατότητα ελεύθερης επιλογής στο χρήστη (Σχήμα 5.1 - Παράρτημα). Η διαδικασία της εισαγωγής και επεξεργασίας των δεδομένων, ολοκληρώνεται όταν χρησιμοποιηθούν όλα τα αρχεία που

αντιστοιχούν στο ίδιο ανάπτυγμα γεωφώνων (spread). Ακολουθεί η αποθήκευση του αρχείου, το οποίο συμπεριλαμβάνει τις πρώτες αφίξεις από όλες τις καταγραφές του αναπτύγματος γεωφώνων.

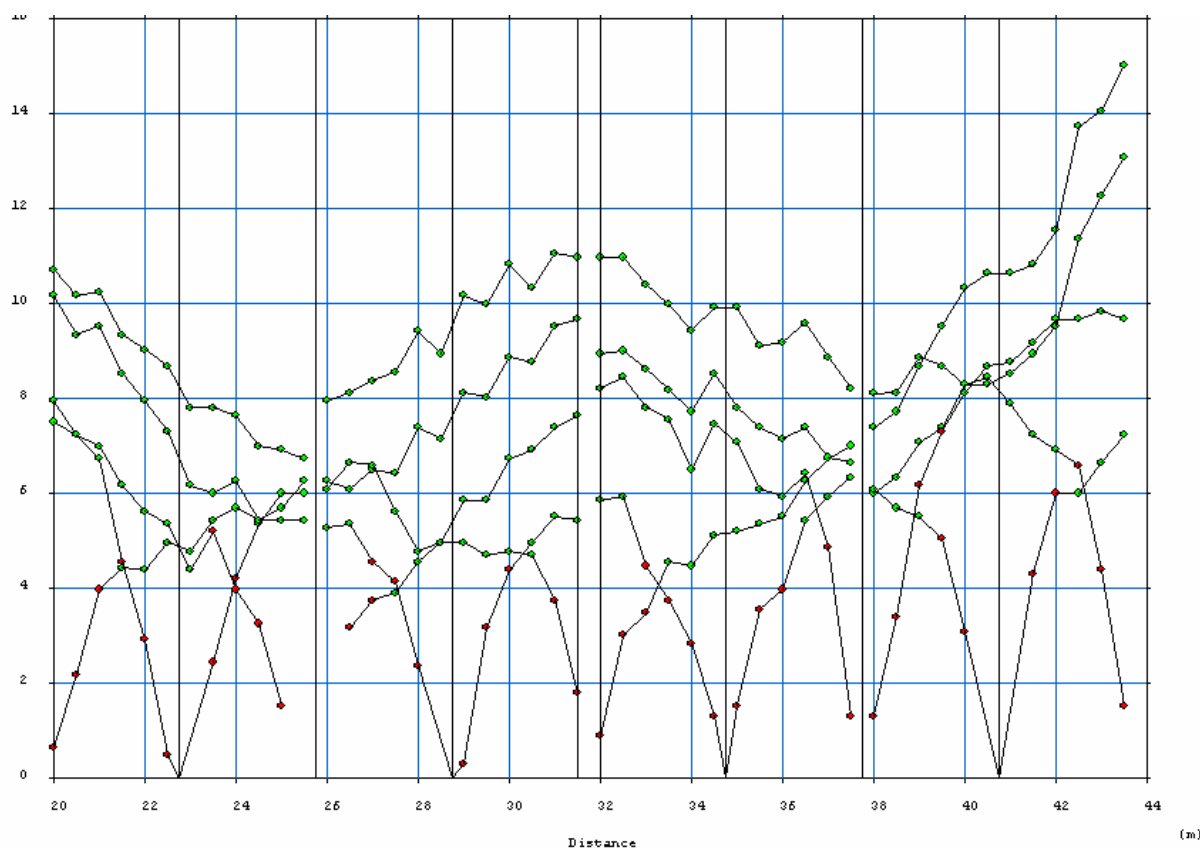


Σχήμα 5.1: Επιλογή των πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων με το πρόγραμμα PickWin για την καταγραφή με αριθμό αρχείου πεδίου 19. Η πηγή βρίσκεται στα 32 m της γραμμής μελέτης. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την απόσταση (σε m) κατά μήκος της γραμμής μελέτης και ο κατακόρυφος το χρόνο καταγραφής (σε ms) των σεισμικών κυμάτων. Οι σκιασμένες (ή μη) περιοχές αντιστοιχούν σε θετικά (ή αρνητικά) πλάτη ταλάντωσης.

Με το κύριο πρόγραμμα ανάλυσης και ερμηνείας (PlotRefa) πραγματοποιείται ο προσδιορισμός της σεισμικής τομής, α) είτε με την μέθοδο αντιστροφής των χρόνων καθυστέρησης, ή β) με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας. Το πρόγραμμα λαμβάνει ως αρχείο εισόδου, το αρχείο εξόδου του προγράμματος PickWin, δηλαδή τις πρώτες αφίξεις των σεισμικών κυμάτων και παρέχει τη δυνατότητα κοινής επεξεργασίας περισσότερων του ενός αναπτύγματος γεωφώνων (spreads), τα οποία απαρτίζουν μια κοινή γραμμή μελέτης.

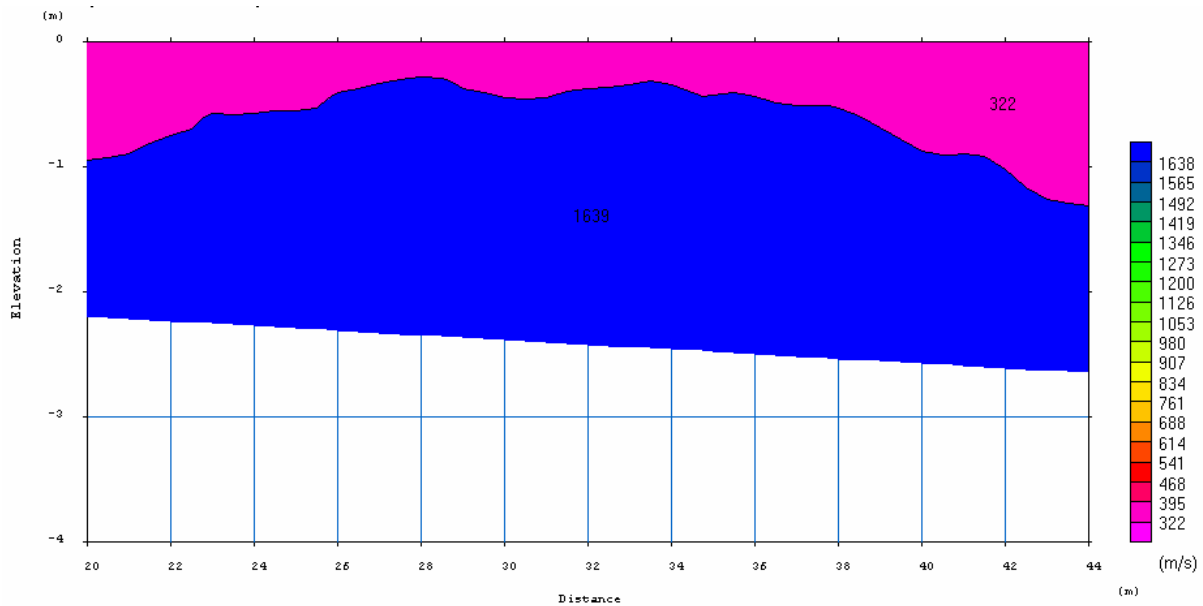
Για την επεξεργασία με την μέθοδο της αντιστροφής των πρώτων αφίξεων, μετά την εισαγωγή των δεδομένων, απεικονίζεται το δρομοχρονικό διάγραμμα και

επιλέγεται ο αριθμός των στρωμάτων με βάση το πλήθος των ευθύγραμμων τμημάτων του διαγράμματος, των οποίων η κλίση αντιστοιχεί σε διαφορετική ταχύτητα (Σχήμα 5.2). Ο χρήστης καλείται να αντιστοιχίσει κάθε πρώτη άφιξη στα απευθείας ή τα μετωπικά κύματα.



Σχήμα 5.2. Δρομοχρονικό διάγραμμα. Τα δύο διαφορετικά εδαφικά στρώματα διακρίνονται με δύο ξεχωριστά χρώματα (πράσινο και κόκκινο). Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την οριζόντια απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης και ο κατακόρυφος, το χρόνο πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται η αντιστροφή των χρόνων καθυστέρησης (Time – Term Inversion) (Παπαθανασίου, 2007). Με την εντολή “Time – Term Inversion”, οι χρόνοι καθυστέρησης (delay times) υπολογίζονται αυτόματα (μέσω της γραμμικής μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων) και προσδιορίζονται οι μέσες ταχύτητες των στρωμάτων (Σχήμα 5.3).

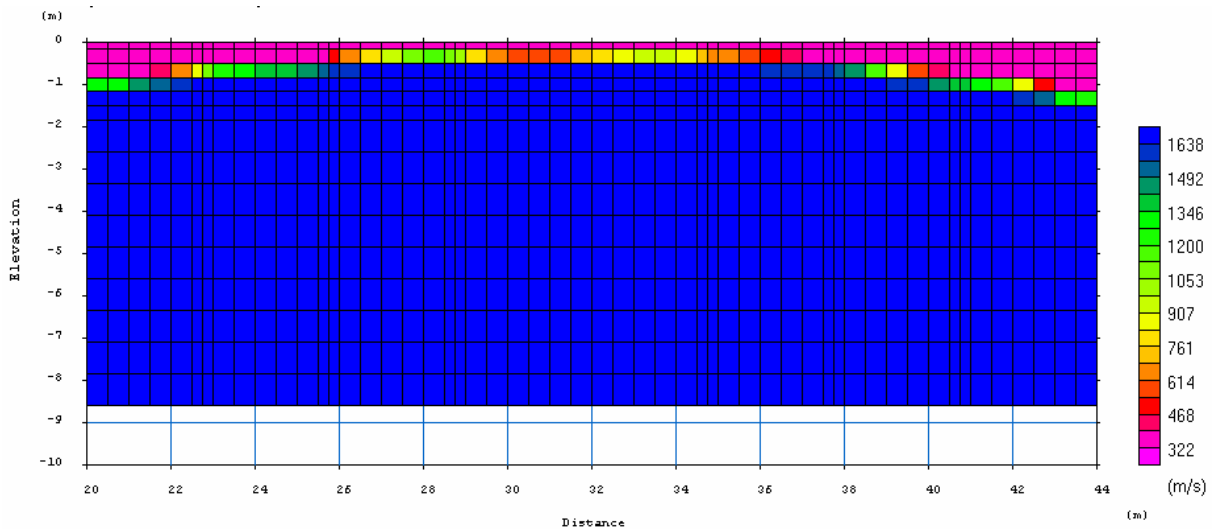


Σχήμα 5.3. Σεισμική τομή που προέκυψε από την επεξεργασία των πρώτων αφίξεων με την μέθοδο αντιστροφής των χρόνων καθυστέρησης. Η μέση ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων στο πρώτο στρώμα είναι 322 m/s, ενώ στο δεύτερο, 1639 m/s.

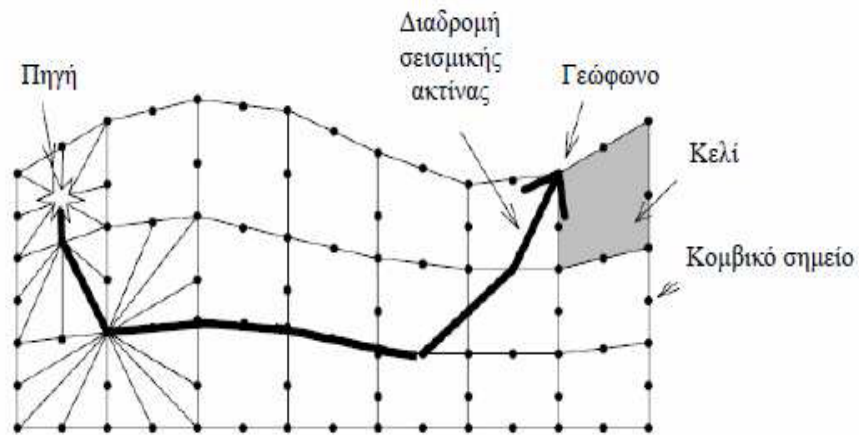
Η μέθοδος της σεισμικής τομογραφίας προϋποθέτει την ύπαρξη αρχικού μοντέλου ταχυτήτων, το οποίο είτε δημιουργείται με τη μέθοδο αντιστροφής των χρόνων καθυστέρησης, είτε κατασκευάζεται ως οριζόντιο στρωματωμένο μέσο βάσει ορισμένων παραμέτρων (ελάχιστη και μέγιστη σεισμική ταχύτητα, αριθμός στρωμάτων, βάθος, υψόμετρο). Αυτή η μέθοδος επεξεργασίας ενδείκνυται όταν η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων μεταβάλλεται βαθμιαία, όταν παρατηρείται πλευρική μεταβολή της ταχύτητας και σε περιπτώσεις έντονου ανάγλυφου. Με βάση το 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 των χρόνων διαδρομής που παρατηρούνται και αυτών που υπολογίζονται. Η διαδικασία εύρεσης του ελάχιστου χρόνου διαδρομής της σεισμικής ακτίνας που διαδίδεται από την πηγή στο γεώφωνο, για κάθε ζεύγος πηγής – γεωφώνου (ευθύ πρόβλημα) ακολουθεί τα εξής βήματα:

- Το αρχικό μοντέλο ταχυτήτων χωρίζεται σε περιοχές – κελιά (cells) σταθερής ταχύτητας (Σχήμα 5.4 & 5.5).

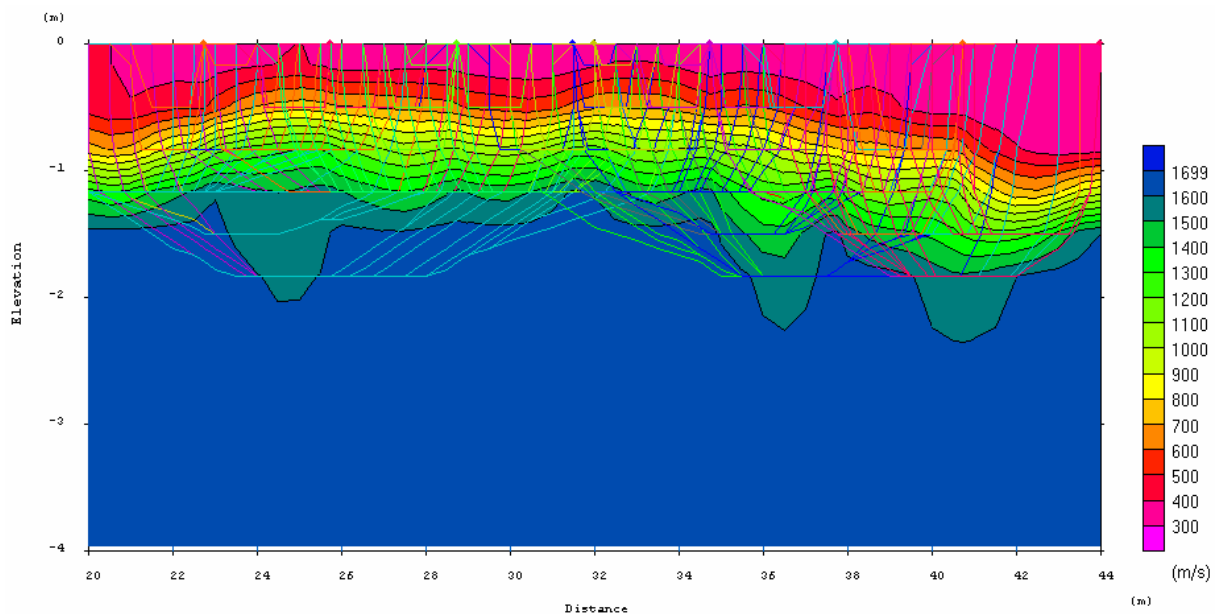
- Καθορίζεται η τιμή των παρακάτω παραμέτρων: αριθμός των επαναλήψεων, αριθμός των κομβικών σημείων (nodes) που τοποθετούνται κατά μήκος των πλευρών κάθε κελιού (χωρίς τις γωνίες), εξομάλυνση κατά την οριζόντια και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, μέγιστη και ελάχιστη ταχύτητα.
- Σχεδιάζονται οι πιθανές διαδρομές των σεισμικών ακτίνων από την πηγή στα γεώφωνα μέσω των κομβικών σημείων (Σχήμα 5.5).
- Δημιουργείται το τελικό μοντέλο ταχυτήτων (Σχήμα 5.6). Όσο περισσότερες είναι οι επαναλήψεις, τόσο πιο μικρό σφάλμα επιτυγχάνεται. Οι υπολογιζόμενοι χρόνοι διαδρομής, απεικονίζονται στο δρομοχρονικό διάγραμμα και συγκρίνονται με αυτούς που παρατηρήθηκαν. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποθηκεύονται για περαιτέρω επεξεργασία.



Σχήμα 5.4. Η σεισμική τομή που προέκυψε από τη μέθοδο αντιστροφής των χρόνων καθυστέρησης χωρισμένη σε κελιά



Σχήμα 5.5. Σχεδιασμός κανάβου στο αρχικό μοντέλο ταχυτήτων. Κάθε κελί χαρακτηρίζεται από σταθερή ταχύτητα, ενώ η σεισμική ακτίνα διαδίδεται από την πηγή προς τα γεώφωνα μέσω των κομβικών σημείων (Παπαθανασίου, 2007).



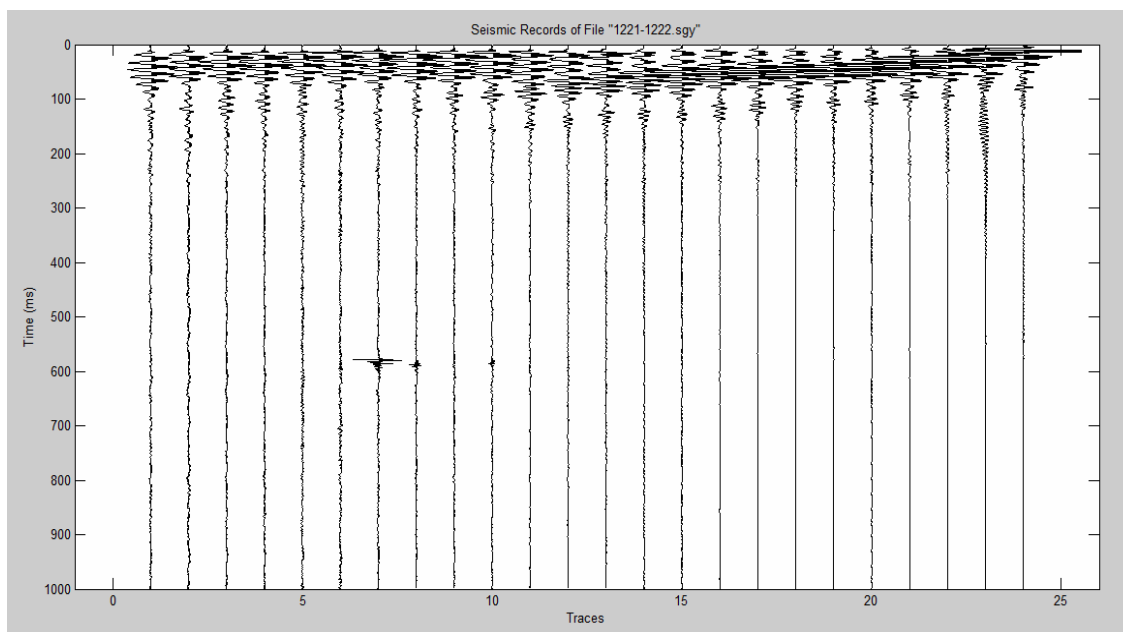
Σχήμα 5.6. Σεισμική τομή που προέκυψε από την επεξεργασία των πρώτων αφίξεων με την μέθοδο της Σεισμικής Τομογραφίας και απεικόνιση των διαδρομών των σεισμικών ακτίνων για τη γραμμή μελέτης.

5.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ RAYLEIGH

Το kriSIS – auto αποτελείται από ένα πλήθος αλγορίθμων που

αναπτύχθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής από τον διδάκτορα Κρητικάκη Γιώργο, στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής (Κρητικάκης, 2010) για την επεξεργασία των δεδομένων επιφανειακών κυμάτων Rayleigh με τη μέθοδο της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων.

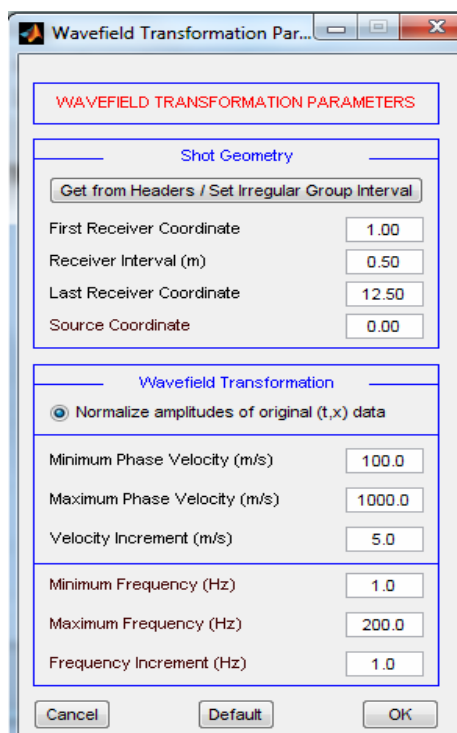
Τα σεισμικά δεδομένα εισάγονται στο λογισμικό kriSIS όπου πραγματοποιείται η ανάγνωση και η απεικόνισή τους (Σχήμα 5.7). Το kriSIS – αυτο έχει τη δυνατότητα ανάγνωσης αρχείων SEG – Y, σε αντίθεση με τα αρχεία καταγραφών που επεξεργάστηκαν, τα οποία έχουν αποθηκευτεί από το καταγραφικό όργανο σε μορφή SEG – 2. Συνεπώς προηγείται η μετατροπή των σεισμικών δεδομένων από αρχεία SEG – 2 σε αρχεία SEG – Y, μέσω του ελεύθερου λογισμικού IXSeg2Segy (www.interpex.com/ixseg2seg/ixseg2seg.htm). Στη συνέχεια ενοποιήθηκαν οι καταγραφές που λήφθηκαν για τα γεώφωνα 1-12 και 13-24 με την πηγή να βρίσκεται στην ίδια θέση, για να δημιουργηθεί καταγραφή που να αποτελείται από 24 σεισμικά ίχνη (π.χ η καταγραφή 1221 αντιστοιχεί στα γεώφωνα 1-12, η καταγραφή 1222 στα 13-24, ενώ η ενοποιημένη καταγραφή 1221-1222 περιλαμβάνει και τα 24 σεισμικά ίχνη).



Σχήμα 5.7. Απεικόνιση της ενοποιημένης καταγραφής 1221-1222 κατά την εισαγωγή των σεισμικών δεδομένων στο λογισμικό kriSIS – αυτο. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει τον αριθμό των σεισμικών ιχνών και ο κατακόρυφος τον χρόνο σε ms.

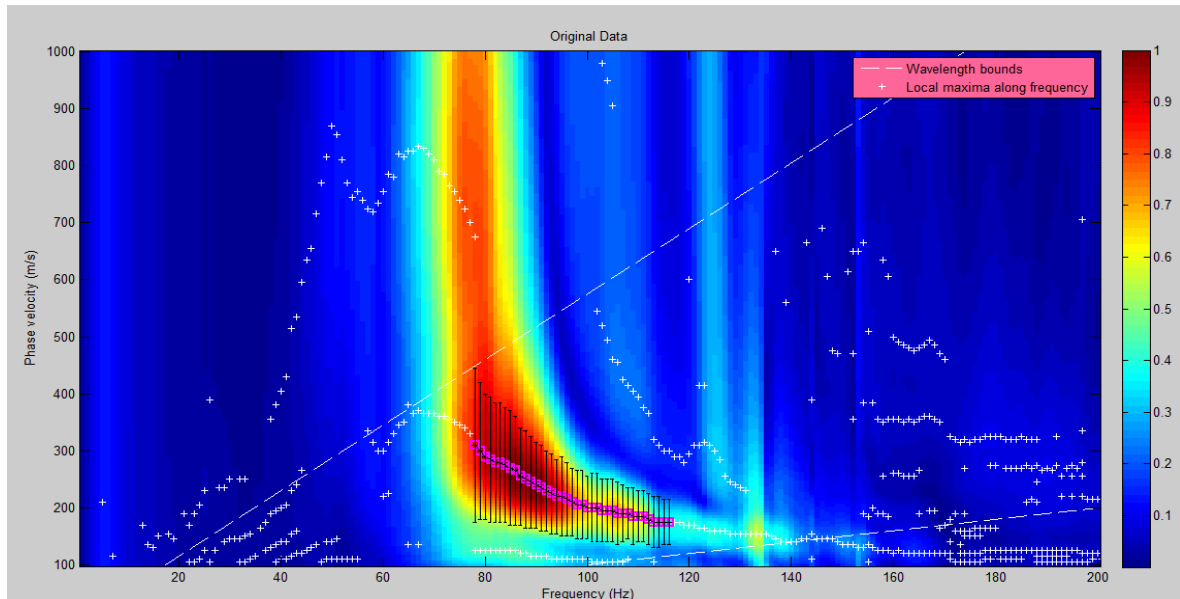
Στο επόμενο στάδιο πραγματοποιείται μετασχηματισμός του κυματικού πεδίου, όπου εισάγονται παράμετροι που αφορούν στη γεωμετρία του πειράματος και του μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου από τον χώρο απόστασης – χρόνου ($x - t$) στον χώρο ταχύτητας φάσης – συχνότητας ($c - f$) (McMechan and Yedlin, 1981) Οι καμπύλες διασποράς αντιστοιχούν σε τοπικά ενεργειακά μέγιστα της σεισμικής ενέργειας που απεικονίζονται στο πεδίο ταχύτητας φάσης – συχνότητας ($c - f$) και ουσιαστικά απεικονίζουν τη μεταβολή της ταχύτητας φάσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh συναρτήσει της συχνότητας. (Σχήμα 5.9). Οι παράμετροι είναι οι εξής (Σχήμα 5.8):

- Η συντεταγμένη του πρώτου γεωφώνου στην σεισμική γραμμή μελέτης (First Receiver Coordinate).
- Η ισαπόσταση των γεωφώνων (Receiver Interval).
- Η συντεταγμένη του τελευταίου γεωφώνου στην σεισμική γραμμή μελέτης (Last Receiver Coordinate).
- Η συντεταγμένη της πηγής (Source Coordinate).
- Επιλογή (ή όχι) της κανονικοποίησης του πλάτους των σεισμικών ιχνών (Normalize amplitudes of original (t,x) data).
- Η ελάχιστη ταχύτητα φάσης (Minimum Phase Velocity (m/s) – V_{Rmin}).
- Η μέγιστη ταχύτητα φάσης (Maximum Phase Velocity (m/s) – V_{Rmax}).
- Το βήμα διακριτοποίησης του άξονα της ταχύτητας φάσης (Velocity Increment (m/s))
- Η ελάχιστη συχνότητα (Minimum Frequency (Hz) – f_{min}).
- Η μέγιστη συχνότητα (Maximum Frequency (Hz) – f_{max}).
- Το βήμα διακριτοποίησης του άξονα της συχνότητας (Frequency Increment (Hz)).



Σχήμα 5.8. Παράμετροι μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου για τα σεισμικά δεδομένα 1221-1222.

Αφού λοιπόν απεικονιστεί η θεμελιώδης καμπύλη διασποράς στη συνέχεια πραγματοποιείται η επιλογή της. Με το ποντίκι του υπολογιστή ορίζεται πολύγωνο, περικλείοντας τα τοπικά ενεργειακά μέγιστα που αντιστοιχούν στην θεμελιώδη καμπύλη διασποράς (παράρτημα). Στο Σχήμα 5.9 παρατίθεται ενδεικτικά η οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς για την καταγραφή 1221-1222.



Σχήμα 5.9. Οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (τετράγωνο), κατά την απεικόνιση της σεισμικής ενέργειας (χρωματική κλίμακα) της καταγραφής 1221-1222 στο χώρο συχνότητας (οριζόντιος άξονας) – ταχύτητας φάσης (κατακόρυφος άξονας). Οι λευκοί σταυροί αντιστοιχούν στα τοπικά ενεργειακά μέγιστα, ενώ οι λευκές διακεκομμένες γραμμές οριοθετούν το ελάχιστο (δεξιά) και το μέγιστο (αριστερά) μήκος κύματος.

Στο τελευταίο στάδιο, ορίζεται το αρχικό μοντέλο οριζόντιων στρωμάτων ενώ παράλληλα, ορίζονται οι παράμετροι της αντιστροφής (Inversion parameters) και τα κριτήρια σύγκλισης του αλγόριθμου αντιστροφής (Convergence criteria) (Σχήμα 5.10).

Οι παράμετροι για το αρχικό μοντέλο οριζόντιων στρωμάτων που καθορίζονται είναι οι εξής:

- 1) Ο αριθμός των στρωμάτων, ορίζεται αυτόματα από την θεμελιώδη καμπύλη διασποράς.
- 2) Λόγος μήκους κύματος ως προς τη διείδυση του, ορίστηκε 2
- 3) Το πάχος των στρωμάτων υπολογίστηκε αυτόματα από την θεμελιώδη καμπύλη διασποράς χρησιμοποιώντας ενδιάμεσο βαθμό (medium) στρωμάτωσης

Οι παράμετροι αντιστροφής που καθορίζονται είναι οι εξής:

- Επιλογή ανάμεσα στον υπολογισμό του Ιακωβιανού πίνακα (Jacobian) με την μέθοδο Thomson – Haskell (T – H) και την Quasi – Newton. Επιλέχθηκε η Thomson– Haskell.
- Επιλογή (καμίας, μιας ή/και συνδυασμού) σταθμισμένης αντιστροφής (Weighting) ανάμεσα στις: (α) στάθμιση με τη τυπική απόκλιση της καμπύλης διασποράς (DC error), (β) στάθμιση με το άθροισμα των απόλυτων τιμών των γραμμών της Ιακωβιανής (Jacobian Values) και (γ) στάθμιση με τις διαφορές μεταξύ της πειραματικής και θεωρητικής καμπύλης διασποράς (Robust Inversion). Επιλέχθηκε το (γ)
- Επιλογή περιορισμού αντιστροφής (Constraint) ανάμεσα στους περιορισμούς: 1) εξομάλυνσης (Smoothing), 2) απόσβεσης (Damping), 3) Τραχύτητας (Blocky), 4) συνδυασμού του «1» και «2» και 5) συνδυασμού του «2» και «3». Από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν (βλέπε §5.2.1), επιλέχθηκε ο συνδυασμός εξομάλυνσης και απόσβεσης.

Οι παράμετροι των κριτηρίων σύγκλισης που επιλέγονται είναι:

- Επιλογή υπολογισμού του βέλτιστου βάρους περιορισμού (Optimizing RMS).
- Ο μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων (Max Iterations) να είναι 30.
- Το ελάχιστο εκατοστιαίο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Min %RMS error) ίσο με 1%.
- Η μέγιστη τροποποίηση του μοντέλου όταν το κριτήριο του σφάλματος ικανοποιείται (προαιρετική επιλογή – Max Vs correction for RMS satisfied (m/s)) απενεργοποιήθηκε.
- Η ελάχιστη τροποποίηση του μοντέλου όταν το κριτήριο του σφάλματος δεν ικανοποιείται (Min Vs correction for RMS NOT satisfied (m/s)) είναι 0.010 m/s.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αντιστροφής, σε κάθε επανάληψη το σφάλμα μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής καμπύλης διασποράς ελαττώνεται (Σχήμα 5.11). Μετά το τέλος της αντιστροφής, επιλέγεται και απεικονίζεται το βέλτιστο μοντέλο, δηλαδή το μοντέλο για το οποίο παρατηρείται το μικρότερο μέσο εκατοστιαίο τετραγωνικό σφάλμα (RMS %) μεταξύ της πειραματικής και της θεωρητικής καμπύλης διασποράς (Σχήμα 5.12 - παράρτημα).

Dispersion Curve Inversion

MODEL PARAMETERS

No of Layers: 6

λ / depth ratio: 2.0

max depth: 1.62

Layer thickness

☐ Variable ☐ Equal

Calculate from DC

☐ Coarse ☒ Medium ☐ Fine

INVERSION PARAMETERS

Jacobian: ☒ T - H ☐ Quasi-Newton

Weighting: ☐ DC error ☐ Jacobian Values ☒ Robust Inversion

Constraint: ☐ Smoothing ☐ Damping ☒ Blocky

CONVERGENCE CRITERIA

Optimizing RMS: ☒

Max Iterations: 30

Min % RMS Error: 1.0

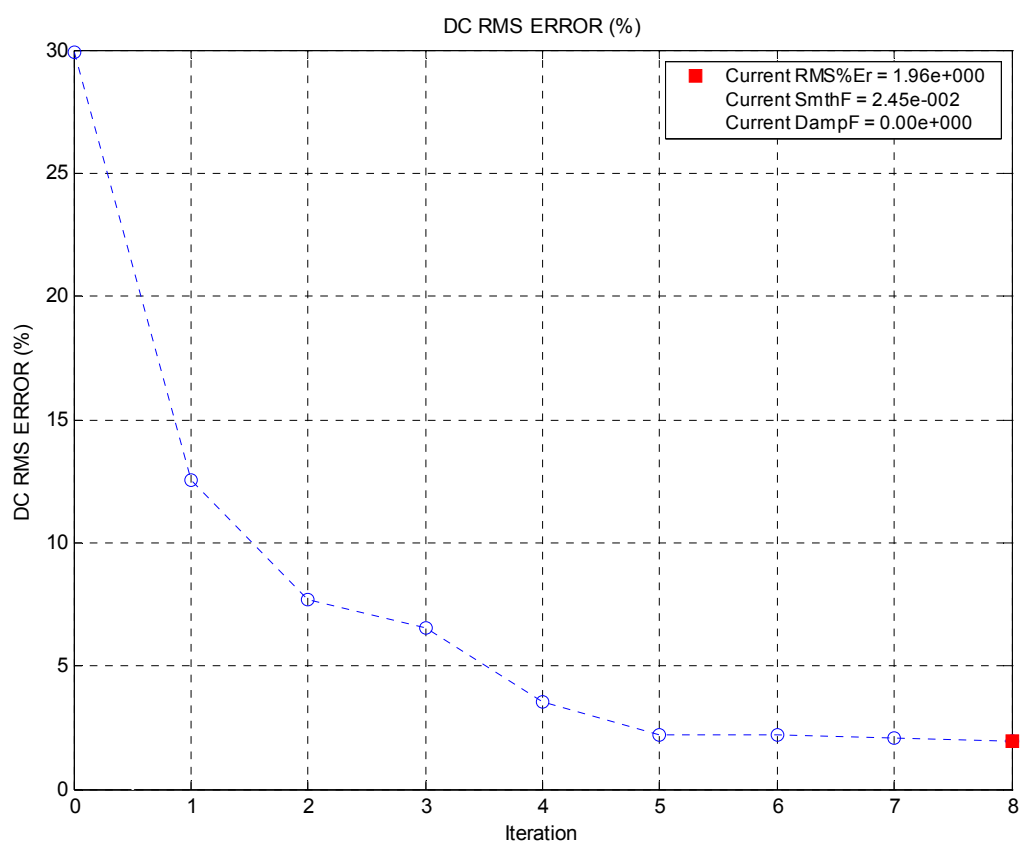
AND

Max Vs correction for RMS satisfied (m/s): 1.0

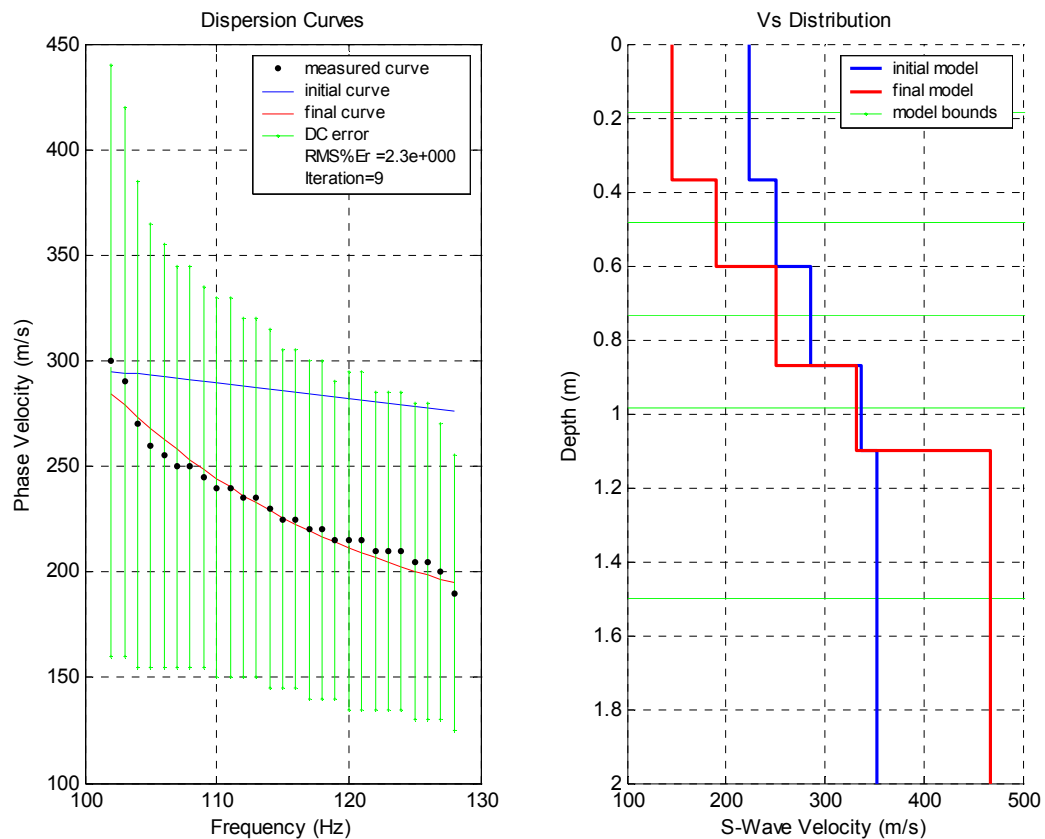
Min Vs correction for RMS NOT satisfied (m/s): 0.010

	Z (m)	Thickness (m)	Vp (m/s)	fixed Vp	Vs (m/s)	fixed Vs	Poisson	fixed Pois	ρ (g/cc)	fixed ρ
1	0.38	0.38	504.3	1	205.9	1	0.400	0	1.801	1
2	0.61	0.23	538.2	1	219.7	1	0.400	0	1.808	1
3	0.88	0.27	613.8	1	250.6	1	0.400	0	1.823	1
4	1.22	0.34	724.6	1	295.8	1	0.400	0	1.845	1
5	1.62	0.40	831.6	1	339.5	1	0.400	0	1.866	1
6	1.62	0.00	893.3	1	364.7	1	0.400	0	1.879	1

Σχήμα 5.10. Επιλογή των παραμέτρων του αρχικού μοντέλου οριζόντιων στρωμάτων, των παραμέτρων της αντιστροφής (Inversion parameters) και των κριτηρίων σύγκλισης του αλγόριθμου αντιστροφής για την αντιστροφή της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς της ενοποιημένης καταγραφής 1221-1222.



Σχήμα 5.11. Μέσο εκατοστιαίο τετραγωνικό σφάλμα (RMS %) μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής καμπύλης διασποράς κατά τη διαδικασία αντιστροφής της καμπύλης διασποράς του Σχήματος 5.9. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει τον αριθμό των επαναλήψεων.



Σχήμα 5.12. Προσαρμογή της θεωρητικής (final curve) στην πειραματική (measured curve) θεμελιώδη καμπύλη διασποράς (αριστερά), για την γραμμή μελέτης V2. Κατανομή της ταχύτητας Vs με το βάθος για το αρχικό (initial model) και το βέλτιστο (final model) μοντέλο (δεξιά). Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η τυπική απόκλιση των τιμών της πειραματικής καμπύλης διασποράς (αριστερά) και της ταχύτητας Vs του μοντέλου (δεξιά).

Αφού όλες οι καταγραφές επεξεργαστήκαν με τον τρόπο που προαναφέρθηκε, η απεικόνιση της ψευδοτομής της ταχύτητας Vs κατά μήκος της γραμμής μελέτης πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα Transform.

5.2.1 Προσδιορισμός των βέλτιστων παραμέτρων αντιστροφής

Για τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων αντιστροφής πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στις καταγραφές 111-112, 921-922 και 1221-1222 με όλες τις παράμετρος αντιστροφής επιλεγμένες (μία κάθε φορά) με σκοπό να προσδιοριστεί η βέλτιστη παράμετρος αντιστροφής. Οι καταγραφές αυτές επιλέχθηκαν γιατί φαινόταν να έχουν τις «καλύτερες» καμπύλες διασποράς.

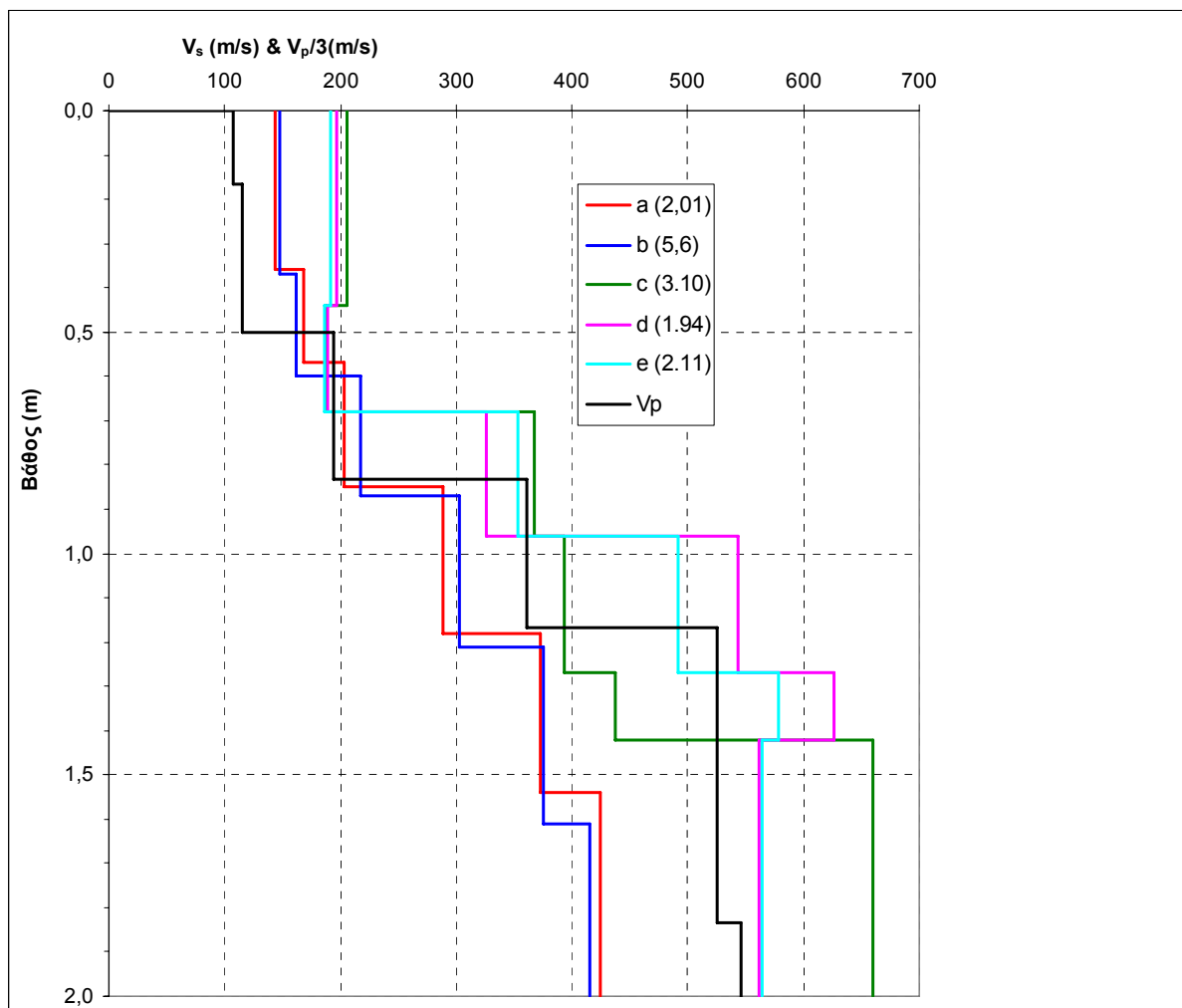
Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλες τις καταγραφές σε κάθε

ανάπτυγμα γεωφώνων. Τα δεδομένα κάθε γραμμής μελέτης υφίστανται περαιτέρω επεξεργασία με βάση την καμπύλη διασποράς που επιλέχθηκε.

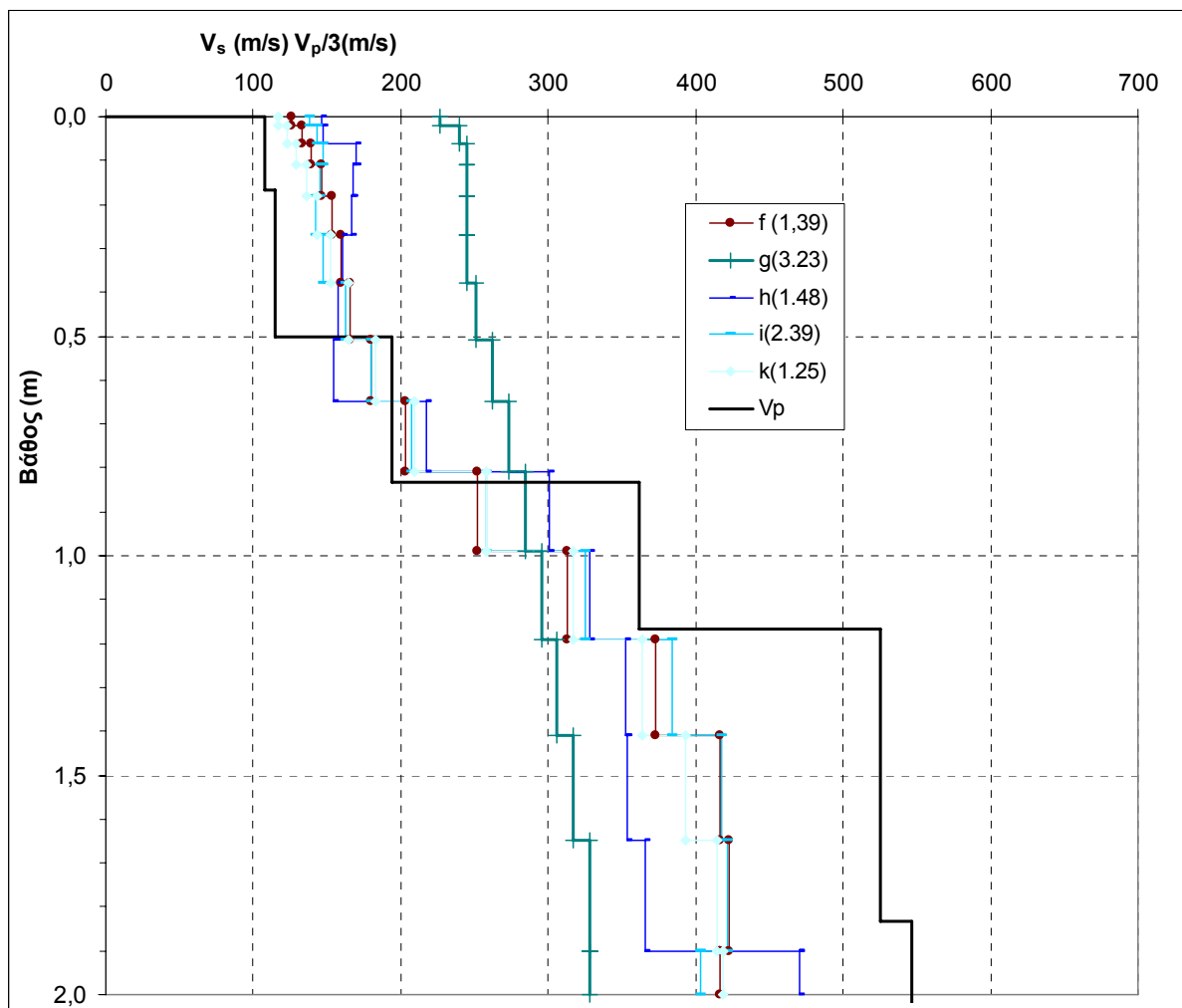
Από τις δοκιμές βρέθηκε ότι αν επιλεγούν ταυτόχρονα οι περιορισμοί απόσβεσης και εξομάλυνσης, τα αποτελέσματα προσεγγίζουν περισσότερο αυτά που προέκυψαν από την σεισμική διάθλαση. Αυτό βρέθηκε δημιουργώντας διάγραμμα βάθους συναρτήσει της V_s για κάθε μία από τις 3 καταγραφές που επιλέχθηκαν (επιλέχθηκαν 3 καμπύλες διασποράς από όλες για να επεξεργασθούν κάθε φορά με μία διαφορετική παράμετρο ενεργοποιημένη βλ. Πίνακα 5.1) και για κάθε μια επεξεργασία αυτών των καταγραφών με ορισμένες παραμέτρους και συγκρίνοντας τις με την ταχύτητα V_p που βρέθηκε από τη διάθλαση (Σχήματα 5.10-5.12). Επιλέχθηκε η δοκιμή δ (πίνακας 5.1) γιατί αφενός δίνει μικρό σφάλμα μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής καμπύλης διασποράς και αφετέρου, βρέθηκε ότι οι ταχύτητες V_s που προκύπτουν με την συνδυασμένη χρήση περιορισμού απόσβεσης και εξομάλυνσης, με προκαθορισμένη (default) στρωμάτωση και με το μέγιστο βάθος να φθάνει στα 2 m ταιριάζουν πιο πολύ με τη στρωμάτωση που βρέθηκε από τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης για την ίδια θέση.

Πίνακας 5.1: Παράμετροι δοκιμών που ελέγχθηκαν για την εύρεση των βέλτιστων αποτελεσμάτων.

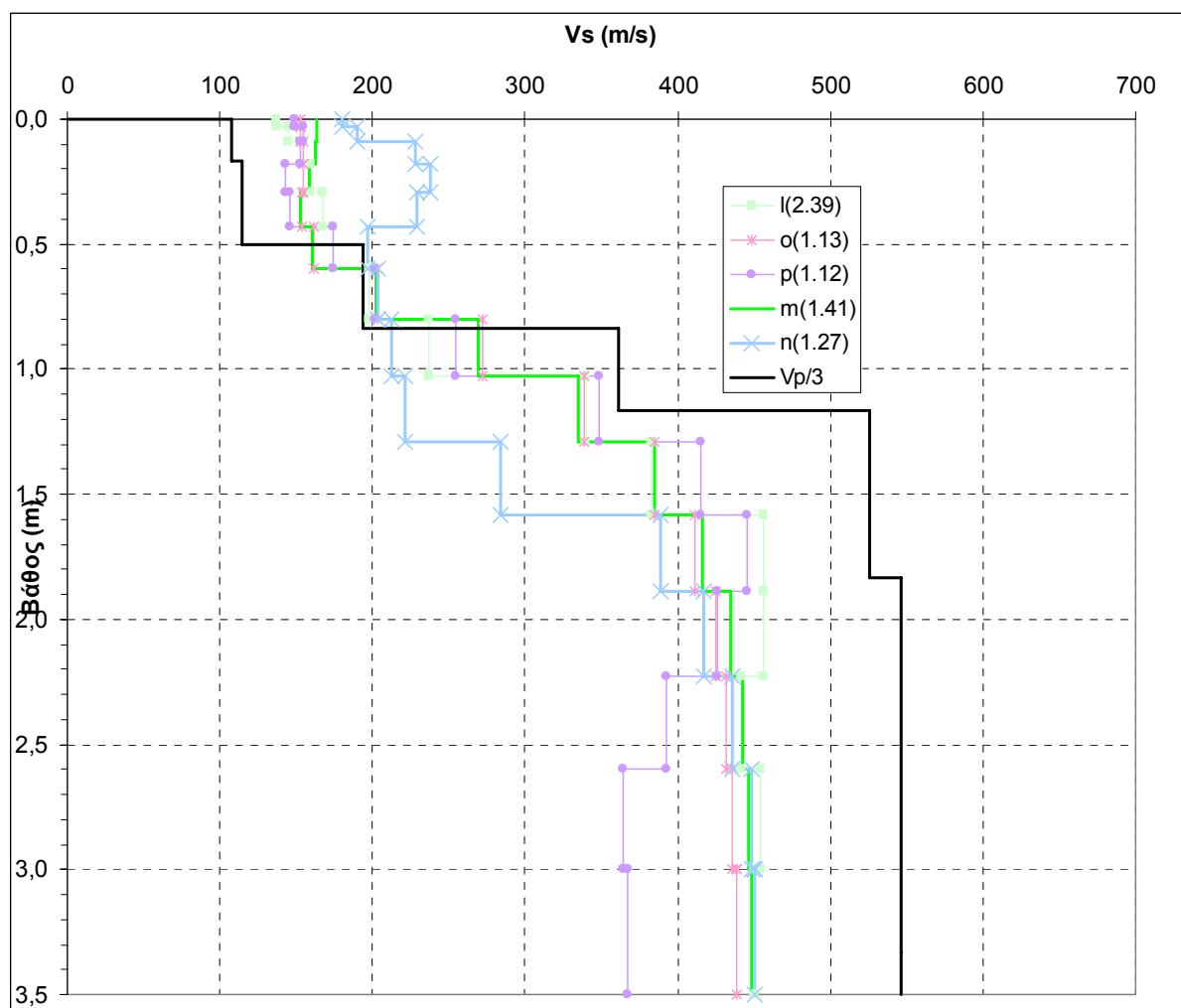
Δοκιμή επεξεργασίας	Περιορισμός Αντιστροφής	Στρωμάτωση	Αριθμός Στρωμάτων v	Μέγιστο Βάθος
A	Τραχύτητας	Προκαθορισμένη	Αυτόματο	Αυτόματο
B	Εξομάλυνσης	Προκαθορισμένη	Αυτόματο	Αυτόματο
C	Απόσβεσης	Προκαθορισμένη	Αυτόματο	Αυτόματο
D	Εξομάλυνσης + Απόσβεσης	Προκαθορισμένη	Αυτόματο	Αυτόματο
E	Απόσβεσης + Τραχύτητας	Προκαθορισμένη	Αυτόματο	Αυτόματο
F	Τραχύτητας	Αυξανόμενου πάχους	15	Αυτόματο
G	Εξομάλυνσης	Αυξανόμενου πάχους	15	Αυτόματο
H	Απόσβεσης	Αυξανόμενου πάχους	15	Αυτόματο
I	Εξομάλυνσης + Απόσβεσης	Αυξανόμενου πάχους	15	Αυτόματο
K	Απόσβεσης + Τραχύτητας	Αυξανόμενου πάχους	15	Αυτόματο
L	Τραχύτητας	Αυξανόμενου πάχους	15	3 m
M	Εξομάλυνσης	Αυξανόμενου πάχους	15	3 m
N	Απόσβεσης	Αυξανόμενου πάχους	15	3 m
O	Εξομάλυνσης + Απόσβεσης	Αυξανόμενου πάχους	15	3 m
P	Απόσβεσης + Τραχύτητας	Αυξανόμενου πάχους	15	3 m



Σχήμα 5.13. Καταγραφή 1221-1222. Διάγραμμα βάθους συναρτήσεως της V_s για τις δοκιμές επεξεργασίας a, b, c, d και e (βλ. Πίνακα 5.1) και σύγκριση με V_p (η οποία για λόγους κλίμακας έχει διαιρεθεί με 3). Το σφάλμα μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής καμπύλης διασποράς αναγράφεται σε παρένθεση δίπλα στο υπόμνημα της εκάστοτε δοκιμής.



Σχήμα 5.14. Καταγραφή 1221-1222. Διάγραμμα βάθους συναρτήσει της V_s για τις δοκιμές επεξεργασίας f, g, h, i και k (βλ. Πίνακα 5.1) και σύγκριση με V_p (η οποία για λόγους κλίμακας έχει διαιρεθεί με 3). Το σφάλμα μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής καμπύλης διασποράς αναγράφεται σε παρένθεση δίπλα στο υπόμνημα της εκάστοτε δοκιμής.



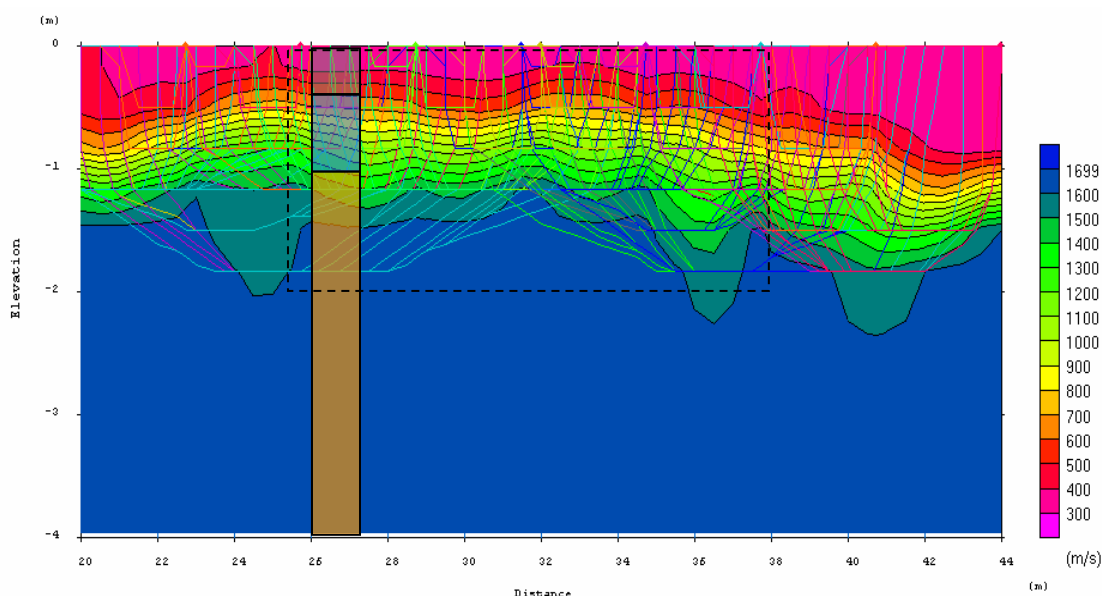
Σχήμα 5.15. Καταγραφή 1221-1222. Διάγραμμα βάθους συναρτήσει της V_s για τις δοκιμές επεξεργασίας l, o, p, m και n (βλ. Πίνακα 5.1) και σύγκριση με V_p (η οποία για λόγους κλίμακας έχει διαιρεθεί με 3). Το σφάλμα μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής καμπύλης διασποράς αναγράφεται σε παρένθεση δίπλα στο υπόμνημα της εκάστοτε δοκιμής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

6.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Κατά τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης όπως ειπώθηκε στη παράγραφο 4.3.2 συλλέχθηκαν δεδομένα στη γραμμή μελέτης, κι αφού επεξεργάστηκαν με το λογισμικό SeisImager (παράγραφος 5.1) παραθέτονται τα αποτελέσματα.

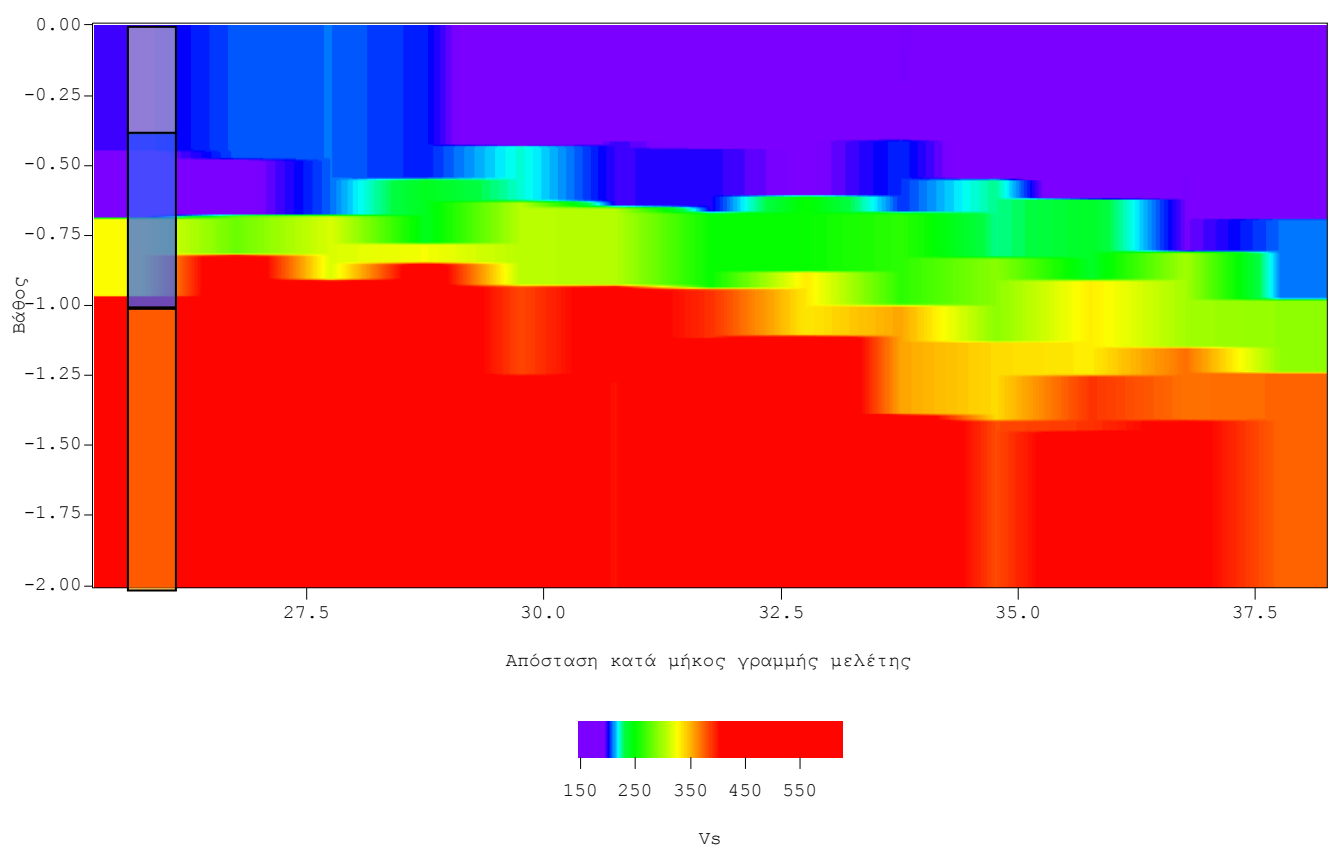


Σχήμα 6.1. Σεισμική τομή που προέκυψε από την επεξεργασία των πρώτων αφίξεων με την μέθοδο της Σεισμικής Τομογραφίας και απεικόνιση των διαδρομών των σεισμικών ακτινών για τη γραμμή μελέτης. Στην τομή αυτή έχει υπερτεθεί σχηματικά τμήμα της γεώτρησης MP-5, καθώς επίσης και το περίγραμμα της ψευδοτομής της ταχύτητας V_s (βλ. Σχήμα 6.2). Ο προσανατολισμός της τομής είναι Ανατολή – Δύση.

Οι άξονες του σχήματος είναι το βάθος (y) και η απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης(x)(Σχ.6.1). Στο σχήμα φαίνονται οι ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων με διάφορα χρώματα και οι διαδρομές των σεισμικών ακτινών. Σύμφωνα με τη γεώτρηση η οποία φαίνεται και στο σχήμα παρατηρούνται, ένα στρώμα από τα 0 μέχρι τα 0,35 m με ταχύτητα V_p που κυμαίνεται από 300 m/s έως 600 m/s και αντιστοιχεί στο στρώμα της καστανοκόκκινης αργίλου, ένα δεύτερο στρώμα από τα 0,35 μέχρι το 1 m με ταχύτητα V_p που κυμαίνεται από 600 m/s έως 1100 m/s και αντιστοιχεί στο στρώμα της ιλυώδους άμμου με χαλίκια και τέλος το τρίτο στρώμα, απαντάται σε βάθος μεγαλύτερο από 1 m, έχει ταχύτητα V_p 1100 – 1700 m/s και αντιστοιχεί στον μαργαϊκό ασβεστόλιθο.

6.2 ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ RAYLEIGH

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν επεξεργάστηκαν και με τη μέθοδο της πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων Rayleigh βλέπε παράγραφο 5.2 και μετά μέσω ενός λογισμικού του Transform έγινε η απεικόνιση αυτής της επεξεργασίας(Σχ.6.2).



Σχήμα 6.2. Σεισμική τομή που προέκυψε από την επεξεργασία των μετρήσεων με τη μέθοδο της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και απεικονίστηκε στο transform. Στην τομή αυτή έχει υπερτεθεί σχηματικά τμήμα της γεώτρησης MP-5. Ο προσανατολισμός της τομής είναι Ανατολή – Δύση.

Το διάγραμμα αυτό απεικονίζει τις ταχύτητες που αναπτύσσουν τα σεισμικά κύματα συναρτήσει του βάθους και της απόστασης κατά μήκος της γραμμής μελέτης και παράθεση με τη γεώτρηση MP-5. Σύμφωνα με το σχήμα λοιπόν

υπάρχει ένα στρώμα (πρώτο στρώμα) σε βάθος από την επιφάνεια μέχρι τα 0,35 m και με ταχύτητα V_s που κυμαίνεται από 150 έως 200 m/s. Το δεύτερο στρώμα απαντάται σε βάθος από τα 0,35 μέχρι τα 1 m και έχει ταχύτητα εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων 200-350 m/s. Και το τρίτο και τελευταίο στρώμα απαντάται σε βάθος μεγαλύτερο από 1 m, έχει ταχύτητα V_s 350 – 650 m/s και αντιστοιχεί στον μαργαϊκό ασβεστόλιθο.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων δηλαδή της τομής που προέκυψε από τη σεισμική διάθλαση και της τομής που προκύπτει από την πολυκάναλη ανάλυση επιφανειακών κυμάτων Rayleigh τα συμπεράσματα που βγαίνουν είναι σχεδόν παρόμοια. Και στις δύο τομές φαίνεται ότι υπάρχουν τρία στρώματα και οι κλίσεις και το πάχος των στρωμάτων είναι σχεδόν ίδια. Πιο συγκεκριμένα το πρώτο και το τρίτο στρώμα είναι σχεδόν οριζόντια δηλαδή δεν βαθαινούν σε κάποιο σημείο, όμως το δεύτερο στρώμα-ενδιάμεσο(ιλυώδης άμμος με χαλίκες) φαίνεται και στις δύο τομές ότι βαθαίνει.

6.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6.1) για δεδομένες θέσεις κατά μήκος της γραμμής μελέτης έχουν υπολογιστεί το V_s (m/s), το V_p (m/s), η ρ (πυκνότητα) (kg/m^3), ο ν (λόγος Poisson) και το E (μέτρο ελαστικότητας) για ορισμένα βάθη (0.16 m, 0.83 m και 1.5 m) που αντιστοιχούν και στα τρία στρώματα της συγκεκριμένης περιοχής.

Το V_s (m/s) υπολογίστηκε από την επεξεργασία με τη μέθοδο των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh ενώ το V_p (m/s) από την επεξεργασία με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης.

Η πυκνότητα (ρ σε kg/m^3) για το στρώμα της αργίλου βρέθηκε βιβλιογραφικά (Κρητικάκης κ.α., 2004), για τον μαργαϊκό ασβεστόλιθο προέκυψε εργαστηριακά (Αγιουτάντης, 2009), ενώ για το ενδιάμεσο στρώμα της ιλιώδους άμμου με χαλίκια, υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι από το υπερκείμενο και το υποκείμενο στρώμα. Ο λόγος του Poisson (ν) για το στρώμα της αργίλου και του μαργαϊκού ασβεστολίθου βρέθηκε βιβλιογραφικά (Κρητικάκης κ.α., 2004α), ενώ για το ενδιάμεσο στρώμα της ιλυώδους άμμου με χαλίκια, υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι από το υπερκείμενο και το υποκείμενο στρώμα.

Το μέτρο ελαστικότητας (E) έχει υπολογιστεί από τη σχέση (Sheriff and Geldart, 1995):

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

Ο μέσος όρος του μέτρου ελαστικότητας για τον μαργαϊκό ασβεστόλιθο που προέκυψε από τα γεωφυσικά δεδομένα και ειδικότερα από την επεξεργασία με την μέθοδο πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh είναι 1.08 GPa.

Πίνακας 6.1: V_s , V_p , ρ , ν και E για τα τρία στρώματα σε δεδομένες θέσεις της γραμμής μελέτης.

Θέση κατά μήκος της γραμμής μελέτης(m)		25.75	27.75	29.75	31.75	33.75	35.75	37.75
Βάθος 0.16 m	V_s (m/s)	196	206	202	187	193	184	169
	V_p (m/s)	377	427	321	461	399	327	336
	P (πυκνότητα) (kg/m ³)	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620
	ν (λόγος Poisson)	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
	E (μέτρο ελαστικότητας MPa)	180	197	190	163	174	158	133
Βάθος 0.83 m	V_s (m/s)	326	280	323	250	261	224	164
	V_p (m/s)	1428	1303	1309	1498	1394	1126	1074
	P (πυκνότητα) (kg/m ³)	1760	1760	1760	1760	1760	1760	1760
	ν (λόγος Poisson)	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
	E (μέτρο ελαστικότητας MPa)	527	390	517	310	338	249	133

Θέση κατά μήκος της γραμμής μελέτης(m)		25.75	27.75	29.75	31.75	33.75	35.75	37.75
Βάθος 1.5 m	V_s (m/s)	580	443	430	500	441	381	372
	V_p (m/s)	1620	1635	1638	1638	1639	1459	1379
	P (πυκνότητα) (kg/m ³)	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900
	V (λόγος Poisson)	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
	E(μέτρο ελαστικότητας MPa)	1777	1036	976	1320	1027	767	731

Ακολούθως, παραθέτονται τα μέτρα ελαστικότητας που έχουν υπολογιστεί από τα γεωτρητικά δεδομένα για κάθε μία από τις γεωτρήσεις (Πίνακας 6.2).

Πίνακας 6.2: Μέτρο ελαστικότητας (E σε GPa) του μαργαϊκού ασβεστόλιθου για κάθε γεώτρηση ξεχωριστά καθώς και μέσοι όροι για κάθε γεώτρηση ξεχωριστά αλλά και στο σύνολο (Αγιουτάντης, 2009).

Δείγμα	MP-1	MP-2	MP-3	MP-4	MP-5	
A	14.0	9.6	11.3	16.2	10.2	
B	5.0	8.6	9.1	11.3	9.5	
Γ	8.6	3.6	8.1		2.6	M.T
M.T	9.2	7.3	9.5	13.8	7.4	9.44

Όπως παρατηρείται το μέτρο ελαστικότητας (E) έχει μια διαφοροποίηση . Ενώ στα γεωφυσικά υπολογίζεται E = 1.08 GPa στις εργαστηριακές δοκιμές υπολογίζεται E = 9.44.

Οι διαφορές στο M.T του E μεταξύ των γεωφυσικών και των εργαστηριακών δεδομένων οφείλονται: 1) στο ότι στα γεωφυσικά μετρίεται η ταχύτητα (και κατά συνέπεια το E σε ολόκληρο τον γεωλογικό σχηματισμό σε αντίθεση με τις εργαστηριακές δοκιμές που εξετάζει ένα ακέραιο τμήμα αυτού και 2) στο ότι το E εξαρτάται από τη παραμόρφωση που

δέχεται το εξεταζόμενο γεωυλικό που στα μεν εργαστηριακά είναι αρκετά μεγάλη, ενώ στα γεωφυσικά πολύ μικρότερη (Αγιουτάντης 1999).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν να συλλεχθούν σεισμικά δεδομένα και να επεξεργαστούν με τις μεθόδους της σεισμικής διάθλασης και της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh. Επίσης, μέσω των ταχυτήτων που προκύψαν να υπολογιστεί ο αριθμός των στρωμάτων και να υπολογιστεί το μέτρο ελαστικότητας.

Ο αριθμός, η κλίση και το πάχος των στρωμάτων που επεξεργάστηκαν με τις δύο μεθόδους δηλαδή της σεισμικής διάθλασης και της πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων Rayleigh συμπίπτουν μεταξύ τους.

Από την εκπόνηση της εργασίας αυτής προκύπτει ότι ο αριθμός και τα πάχη των στρωμάτων που προσδιορίστηκαν από τις σεισμικές τομές συμπίπτουν αντίστοιχα με τα γεωλογικά στρώματα που βρέθηκαν στις γεωτρήσεις .

Επίσης, προκύπτει ότι το μέτρο ελαστικότητας (E) που έχει υπολογιστεί από τις γεωφυσικές μετρήσεις έχει μία διαφοροποίηση σε σχέση με το μέσο όρο του E όλων των γεωτρήσεων.

Σύμφωνα με αυτά λοιπόν τα συμπεράσματα οι προτάσεις που προκύπτουν είναι οι εξής:

- Να γίνει περαιτέρω γεωφυσική έρευνα με τη μέθοδο MASW στις θέσεις των υπόλοιπων γεωτρήσεων.
- Προκειμένου να εξεταστεί ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος υπό τις ίδιες συνθήκες παραμόρφωσης, προτείνεται η μέτρηση της ταχύτητας V_p και της ταχύτητας V_s στο εργαστήριο σε δείγμα με τη χρήση υπερήχων (<http://sideris-konstantinos.blogspot.com/p/blog-page.html>) και να συγκριθούν με τις αντίστοιχες ταχύτητες που θα προκύψουν από τις γεωφυσικές μεθόδους στο ύπαιθρο.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Αγιουτάντης Ζ., 2009** Γεωτεχνική έρευνα και αξιολόγηση για την κατασκευή των κτιρίων της Β φάσης ΜΗΠΕΡ του Πολυτεχνείου Κρήτης Πολυτεχνείο Κρήτης, Εργαστήριο Μηχ.Πετρωμάτων, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, σελ. 107.
2. **Αγιουτάντης Ζ., 1999**, *Μηχανική Πετρωμάτων*, Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
3. **Βαφείδης, Α. 1993**, *Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Ι, Σεισμικές Μέθοδοι*, Σημειώσεις Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
4. **Βαρδιδάκη Α., 2005**, *Σεισμική διασκόπηση για τον εντοπισμό καρστικών δομών στο οροπέδιο του Ομαλού Ν. Χανίων Κρήτης*, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
5. **Campbell, W., T., 2008**, Multi-faceted characterization of variable limestone terrains, Proceedings of SAGEEP, pp. 643 –661..
6. **Haskell N. A., 1953**, *The dispersion of surface waves in multi – layered media*, Bulletin of Seismological Society of America, vol. 43, p. 17 – 34
7. **Κρητικάκης Σ. Γ , Βαφείδης Α , Gourry J. C. 2004a** Ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και Εφαρμογή στη Β.Ιταλία και στη Βιομηχανική περιοχή Porto Petroli, Genoa, Δελτίο της Ελληνικής Γεολογικής εταιρίας τομ. xxxvi p.10
8. **Κρητικάκης Γ., Βαφείδης Α., Λουής Ι. , 2004b**, *Εκτίμηση ταχυτήτων διάδοσης κύματος από τις καταγραφές επιφανειακών κυμάτων Rayleigh*, Τεχνικά Χρονικά, Τόμος 24, Σειρά 1, Τεύχος 2-3, σελ.101-111
9. **Κρητικάκης, Γ., 2010**, *Επιφανειακά Κύματα :Εφαρμογές σε Περιβαλλοντικά και Γεωτεχνικά Προβλήματα*, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, σελ. 340.
10. **McMechan G. A. & Yedlin M. J., 1981**, Analysis of dispersive waves by wave field transformation, Geophysics, vol. 46, p. 869 – 874.

11. **Miller R., Xia J., Park C. B., and Davis C. J. 1999a** *Seismic techniques to delineate dissolution features in the upper 1000 ft at a power plant site*, SEG 1999, Expanded Abstracts, p. 492-495 p.4
12. . **Miller R., Xia J. Park C. B., and Ivanov J. 1999b**, *Using MASW to map bedrock in Olathe, Kansas* SEG 1999 Expanded Abstracts. p.4
13. **Nazarian S., 1984**, *In situ determination of elastic moduli of soil deposits and pavement system by spectral analysis of surface waves method*, Ph. D. Thesis (unpubl.), University of Texas
14. **Nasseri-Moghaddam A., G. Cascante, C. Phillips, D.J. Hutchinson 2007** Effects of underground cavities on Rayleigh waves—Field and numerical experiments, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 27 (2007) 300–313
15. **Παπακωνσταντίνου Κ. 2004** *Μελέτη των Μηχανικών Παραμέτρων του Εδάφους με τη Χρήση Σεισμικών Μεθόδων και Εργαστηριακών Μετρήσεων*, Διπλωματική εργασία , Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά. p.95
16. **Παπαθανασίου Χ. 2007**, *Γεωφυσική έρευνα με τη μέθοδο της Σεισμικής Τομογραφίας στο Μοχό Ηρακλείου*, Διπλωματική εργασία , Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά p.134
17. **Park, C., B., Miller, R., D., and Xia, J., 1999**, *Multichannel analysis of surface waves*, *Geophysics*, Vol. 64, p. 800 – 808
18. **Park, C., B., Xia, J., and Miller, R., D., 1998**, *Imaging dispersion curves of surface waves on multichannel record*, SEG Expanded Abstracts, p. 1377 – 1380.
19. **Reynolds M. J., 1997**, *An introduction to applied and environmental geophysics*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester.

20. **Σαγκιώτη Κυριακή 2010**, Συμβολή της ηλεκτρικής και σεισμικής τομογραφίας στη μελέτη του φαινομένου της υπαλμύρωσης στα Φαλάσαρνα Χανίων, Διπλωματική εργασία , Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά p.130

21. **Σαξιώνη Σέβη 2009**, Απεικόνιση καρστικών δομών στο οροπέδιο του Ομαλού με τις μεθόδους σεισμικής τομογραφίας και ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων, Διπλωματική εργασία , Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά. p.105

22. **Σπανουδάκης, Ν.**, 2005, Πιλοτική εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων σε χώρο ανέγερσης κτιρίου στην Πολυτεχνειούπολη του Πολυτεχνείου Κρήτης, Φυτώριο Ιδεών, σελ.11

23. **Schwab, F., and Knopoff, L., 1972**, *Fast surface wave and free mode computations*, in Bolt, B. A., Edition, *Methods in computational physics*, Academic Press, p. 87 – 180.

24. **SeisImager2D Manual, 2003** , Εγχειρίδιο χρήσης Λογισμικού, Manual, Version 3.0, OYO Corporation

25. **Sheriff, R. E., and Geldart, L. P., 1995**, *Exploration Seismology*, 2nd Edition, Cambridge University Press.

26. **Stokoe II K. H., Wright G. H., Bay J. A. & Roesset J. M., 1994**, *Characterization of geotechnical sites by SASW method*, in Woods R. D. Edition, *Geophysical characterization of sites*, Oxford Publishers.

27. **U.S. Army Corps of Engineers, Department of the Army 1995**, *Geophysical exploration for engineering and environmental investigations* National Technical Information Service pp.208

28. **Xia, J., Miller, R., and Park, C., 1999**, *Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves*, *Geophysics* 64, No 3, p. 691 – 700

28. **Xia, J., Miller, R., and Park, C., 1999**, *Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves*, Geophysics 64, No 3, p. 691 – 700
29. **Xia J., . Miller R. D., Park B. C., 2001**, *Feasibility of Using the MASW Method to Define a Sinkhole Impact Area at Calvert Cliffs Nuclear Power Plant, Maryland Earth Resources Technology, Inc. p.16*
30. **Xu C.Q. Jon, Butt D. S., Ryall J. C. P., 2008**, *Seismic Rayleigh Wave Method For Localizing and Imaging Subsurface Cavities in Extensively Exploited Districts p.17*

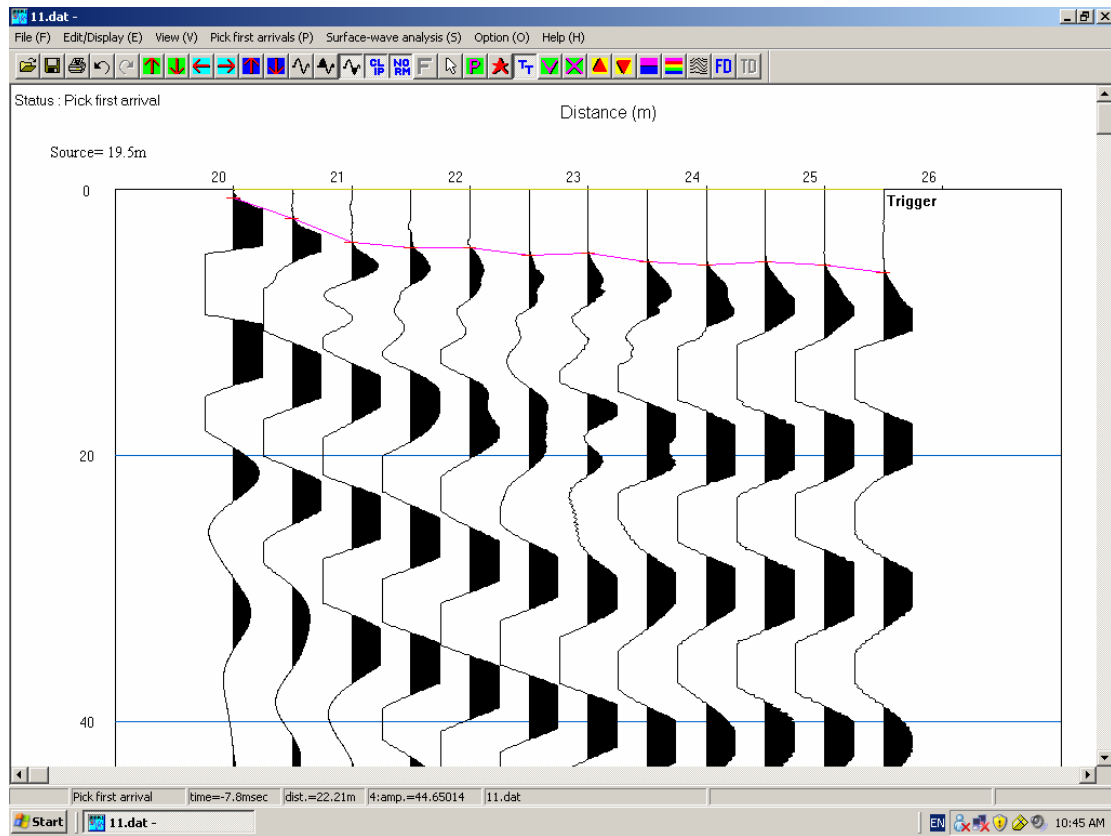
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ GEODE

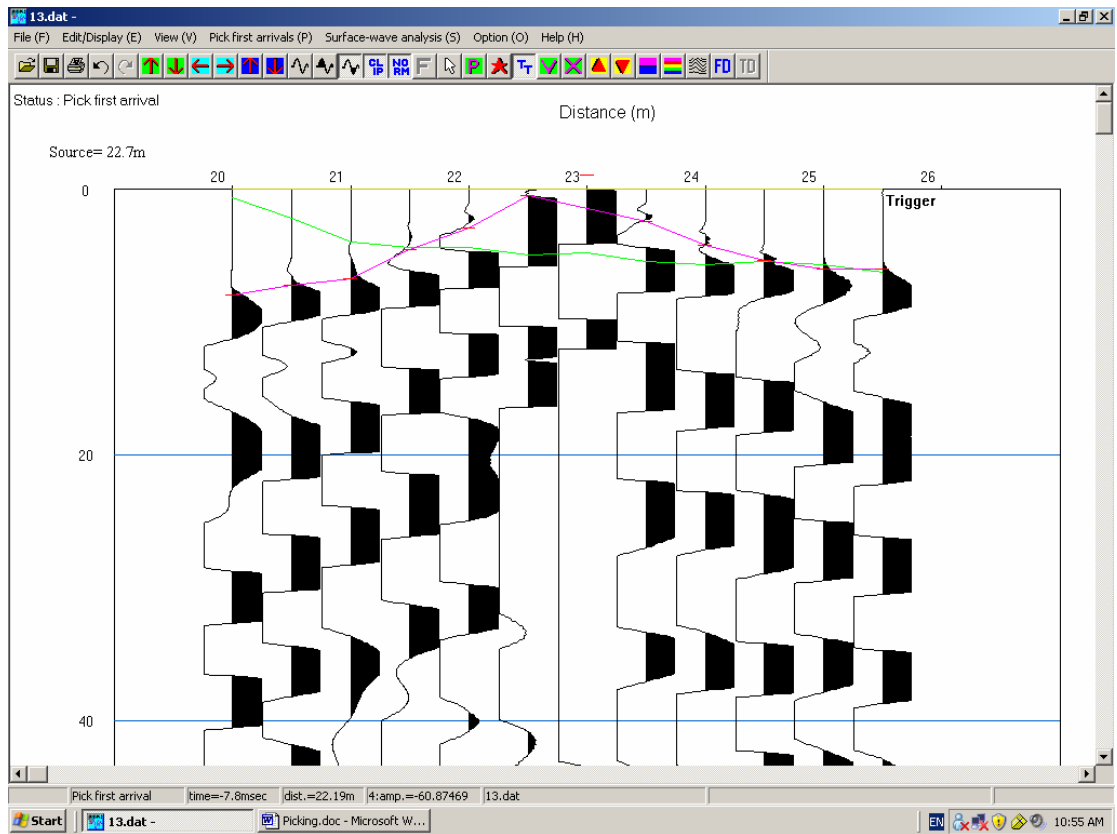
Πίνακας : Χαρακτηριστικά του σειсмоγράφου “Geode Ultra-light exploration seismograph” της εταιρίας Geometrics.

Αριθμός ενεργών καναλιών	: 12
Εύρος μετατροπέα Αναλογικού σε Ψηφιακό σήμα (A/D)	: 24 bit χρησιμοποιώντας ως μετατροπέα κρυσταλλικό ημιαγωγό τύπου sigma-delta
Δυναμικό εύρος	: 144 dB
Φασματικό εύρος	: Από 1.75 Hz έως 20 kHz
Προενίσχυση σήματος	: Εργοστασιακή ρύθμιση στα 24 και 36 dB με δυνατότητα επιλογής από το λογισμικό
Φίλτρο αποκοπής δίπλωσης συχνοτήτων	: - 3 dB στο 83% της συχνότητας Nyquist
Ψηφιακά φίλτρα	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <u>Υψηπερατό</u>: OUT, 10, 15, 25, 35, 50, 70, 100, 200, 280 και 400 Hz με εξασθένιση 24 ή 48 dB/οκτάβα, τύπου Butterworth ➤ <u>Ζώνης</u>: OUT, 50, 60, 150 και 180 Hz με εξασθένιση 50 dB σε φασματικό εύρος 2 % της κεντρικής συχνότητας αποκοπής ➤ <u>Χαμηλοπερατό</u>: OUT, 32, 64, 125, 250, 500 και 1000 Hz με εξασθένιση 24 ή 48 dB/οκτάβα, τύπου Butterworth
Διάστημα δειγματοληψίας	: 0.02, 0.03125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 msec
Διάρκεια καταγραφής	: 16.384 δείγματα
Μεταφορά δεδομένων	: Μέσω θύρας Ethernet
Format δεδομένων	: SEG-2
Λογισμικό διαχείρισης του καταγραφικού	: Περιλαμβάνει εργαλεία για την απόκτηση, απεικόνιση, εκτύπωση, εφαρμογή φίλτρων και την αποθήκευση των σεισμικών καταγραφών
Αποθήκευση δεδομένων	: Τα δεδομένα αποθηκεύονται στο σκληρό δίσκο PC ή Laptop με format SEG-2
Έναρξη καταγραφής	: Ηλεκτρικό ρεύμα ή κλείσιμο κυκλώματος με ρύθμιση του επιπέδου ενεργοποίησης
Ενέργεια	: Απαιτείται εξωτερική μπαταρία 12 volt

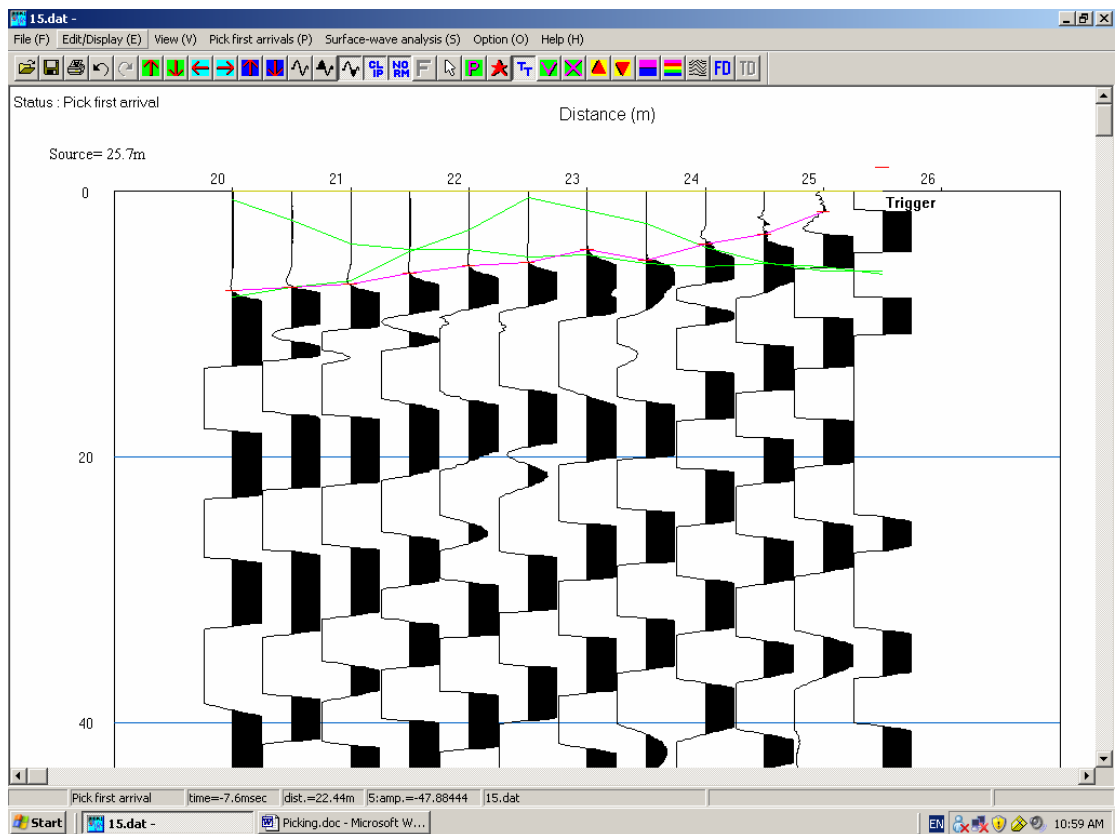
ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΡΩΤΩΝ ΑΦΙΞΕΩΝ



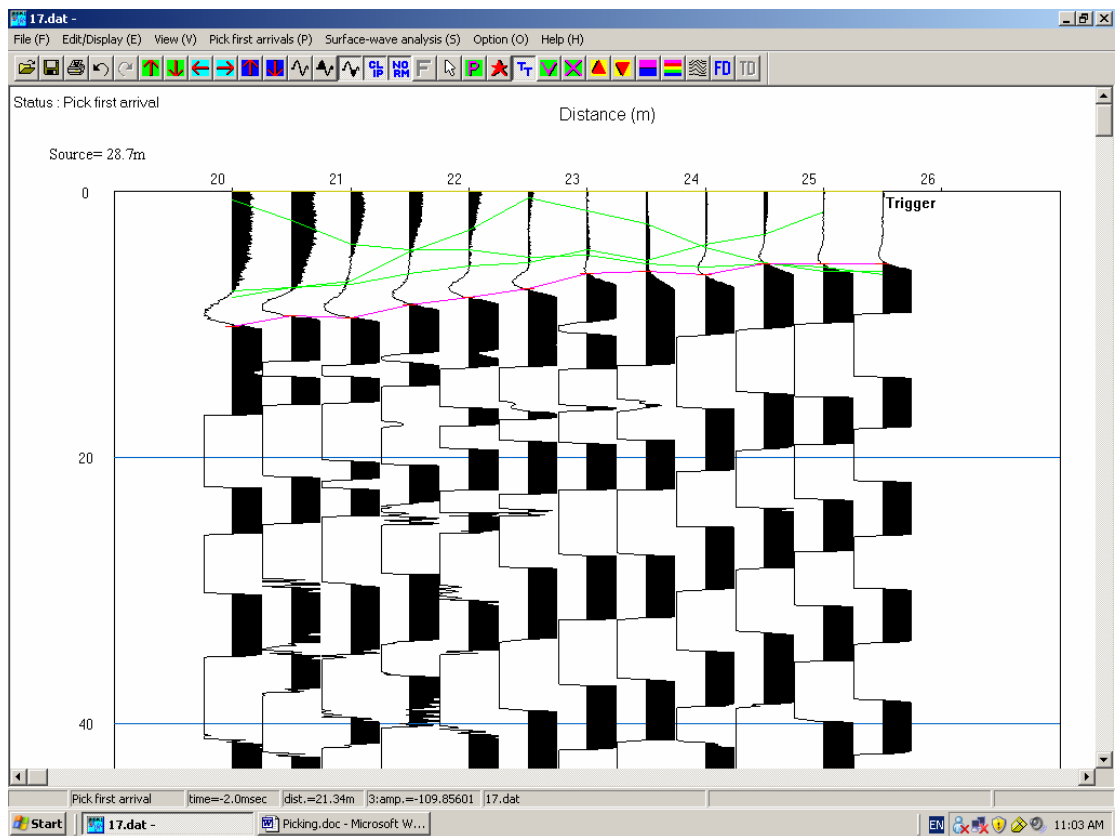
Καταγραφή 11



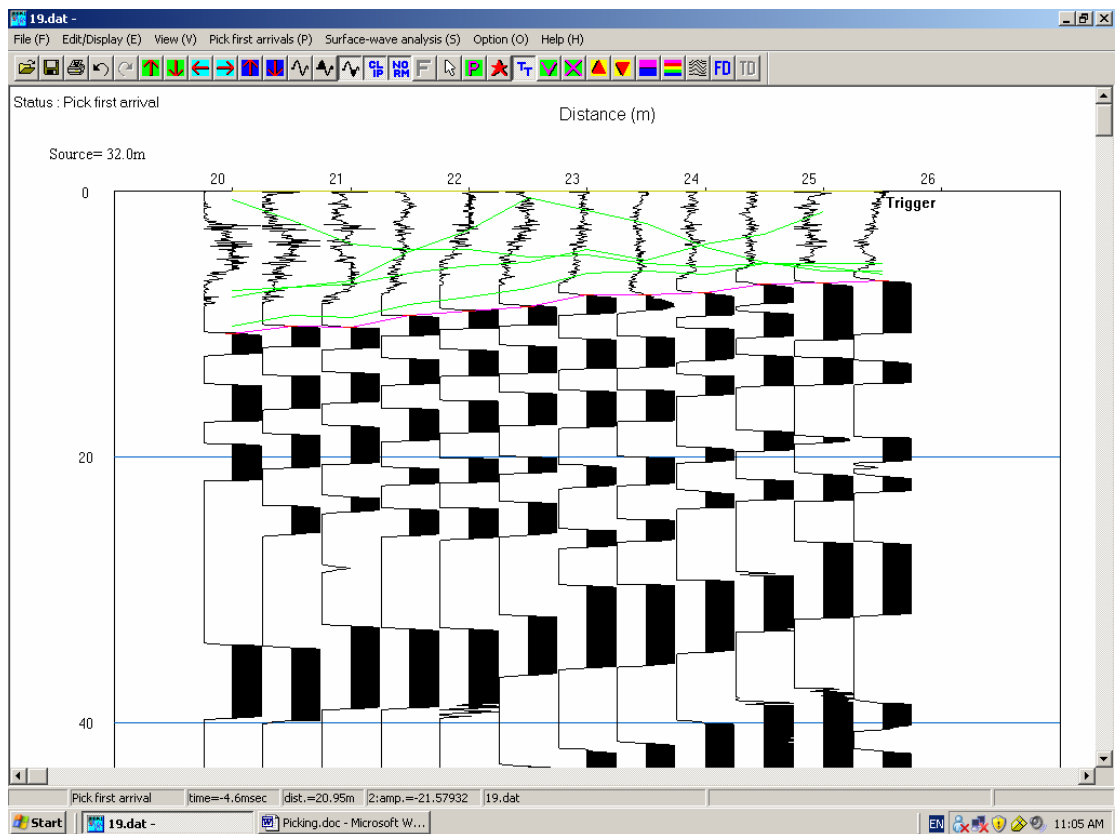
Καταγραφή 13



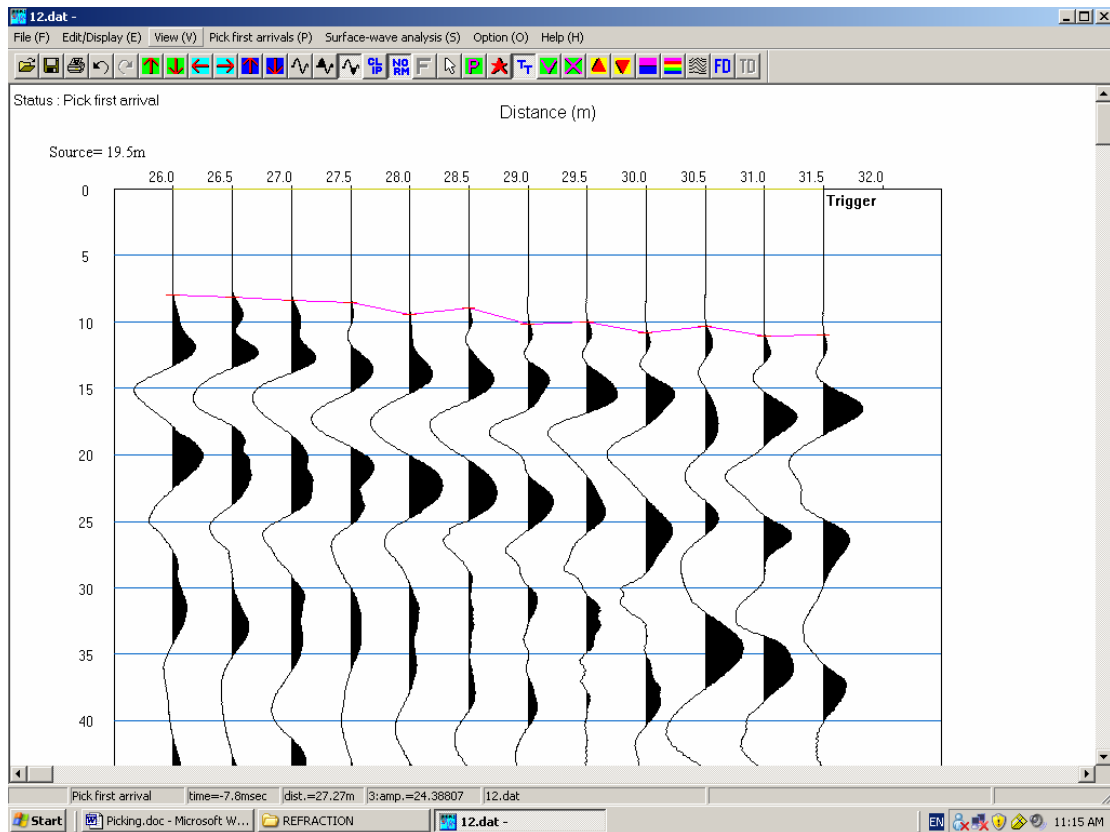
Καταγραφή 15



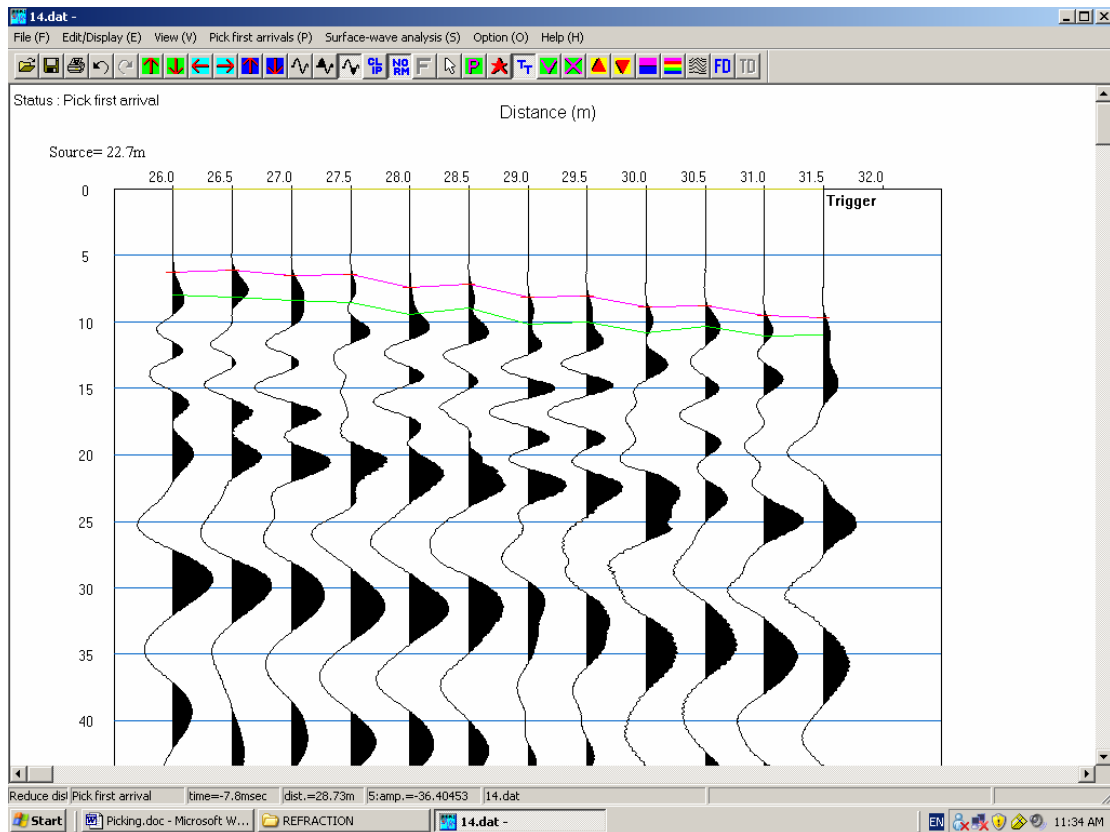
Καταγραφή 17



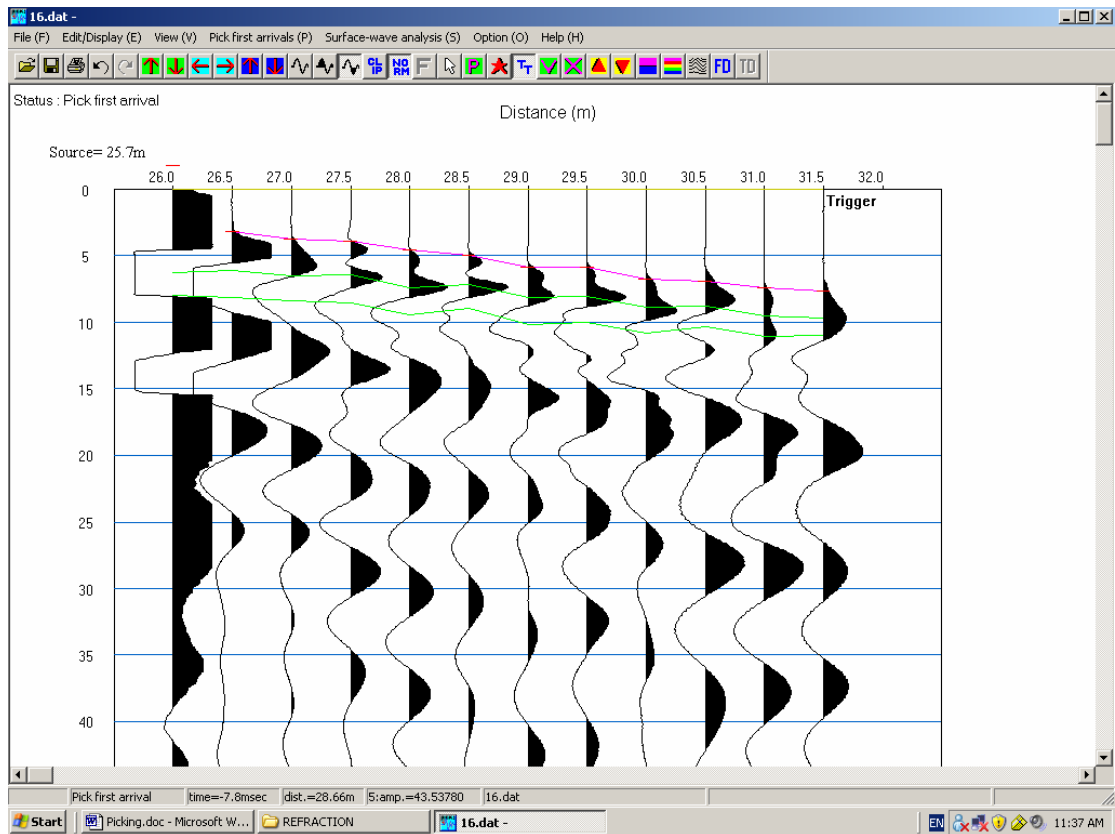
Καταγραφή 19



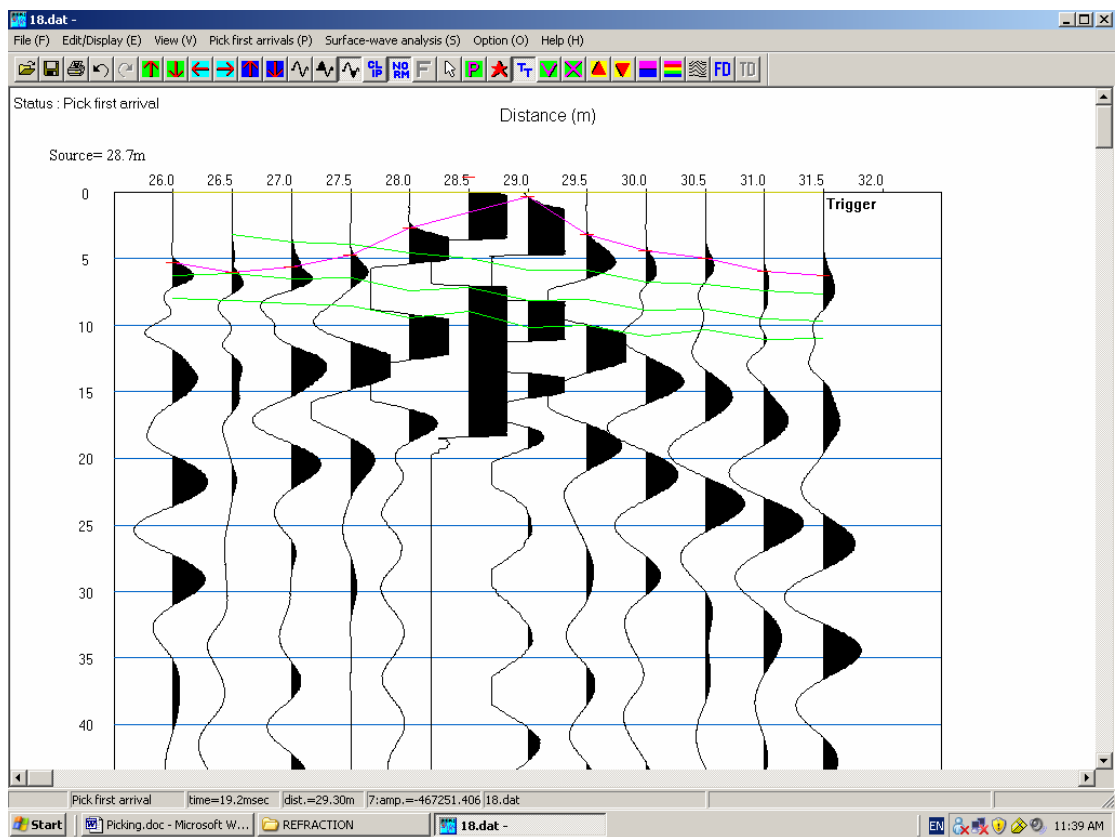
Καταγραφή 12



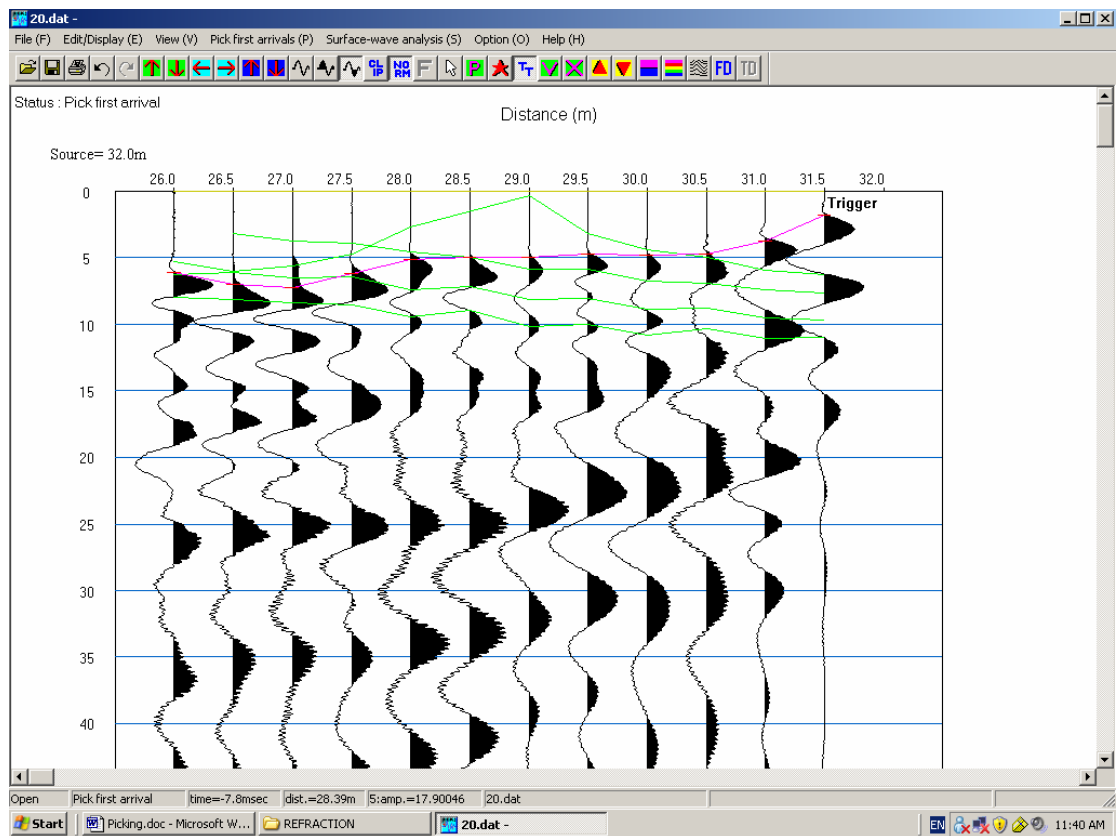
Καταγραφή 14



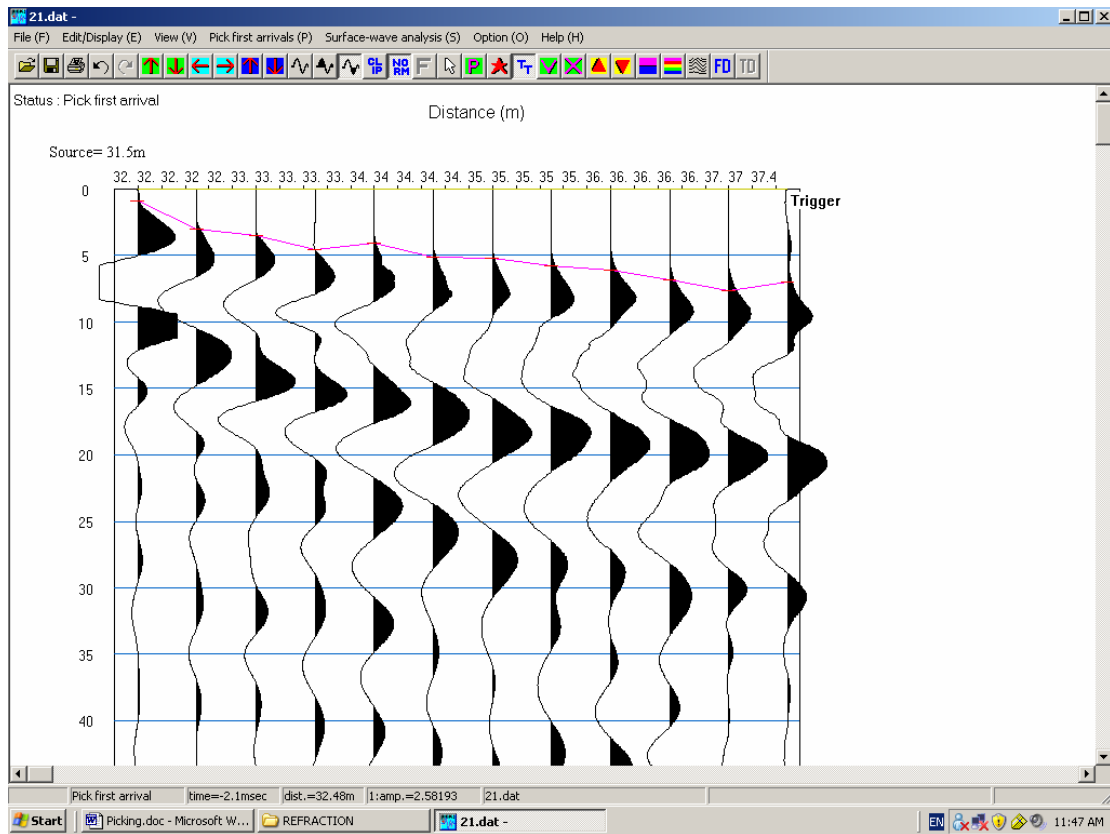
Καταγραφή 16



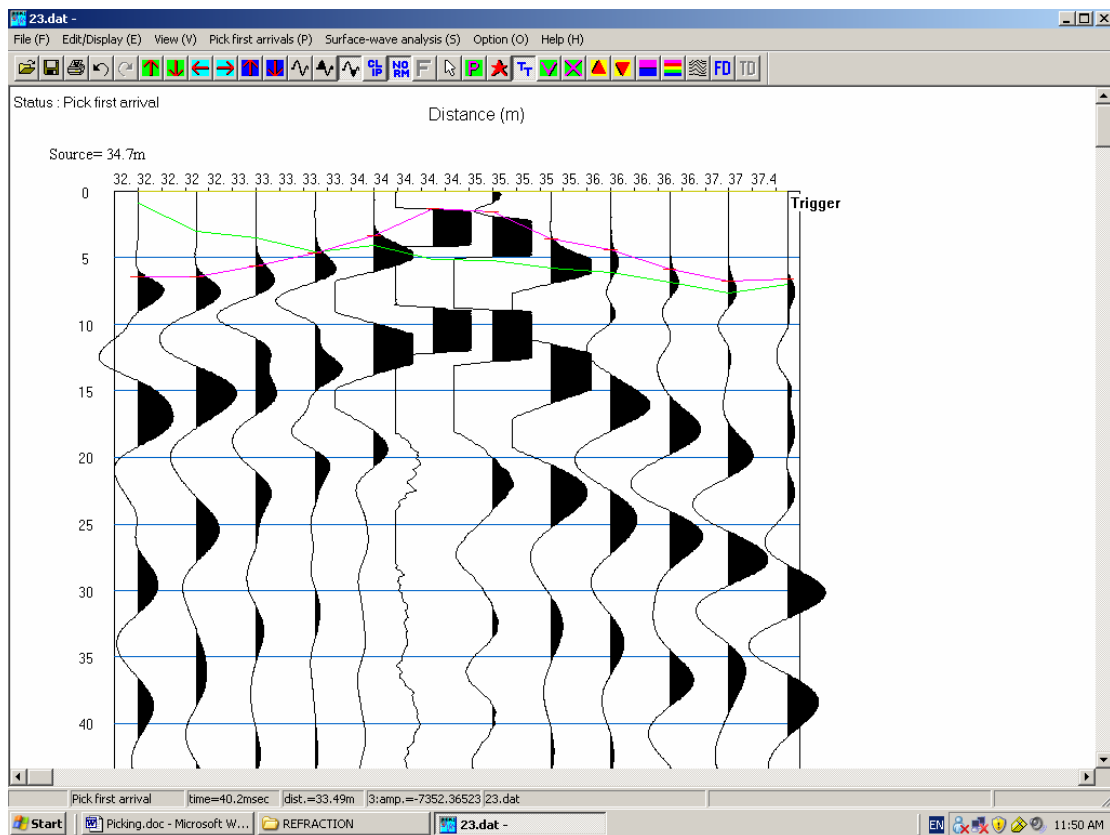
Καταγραφή 18



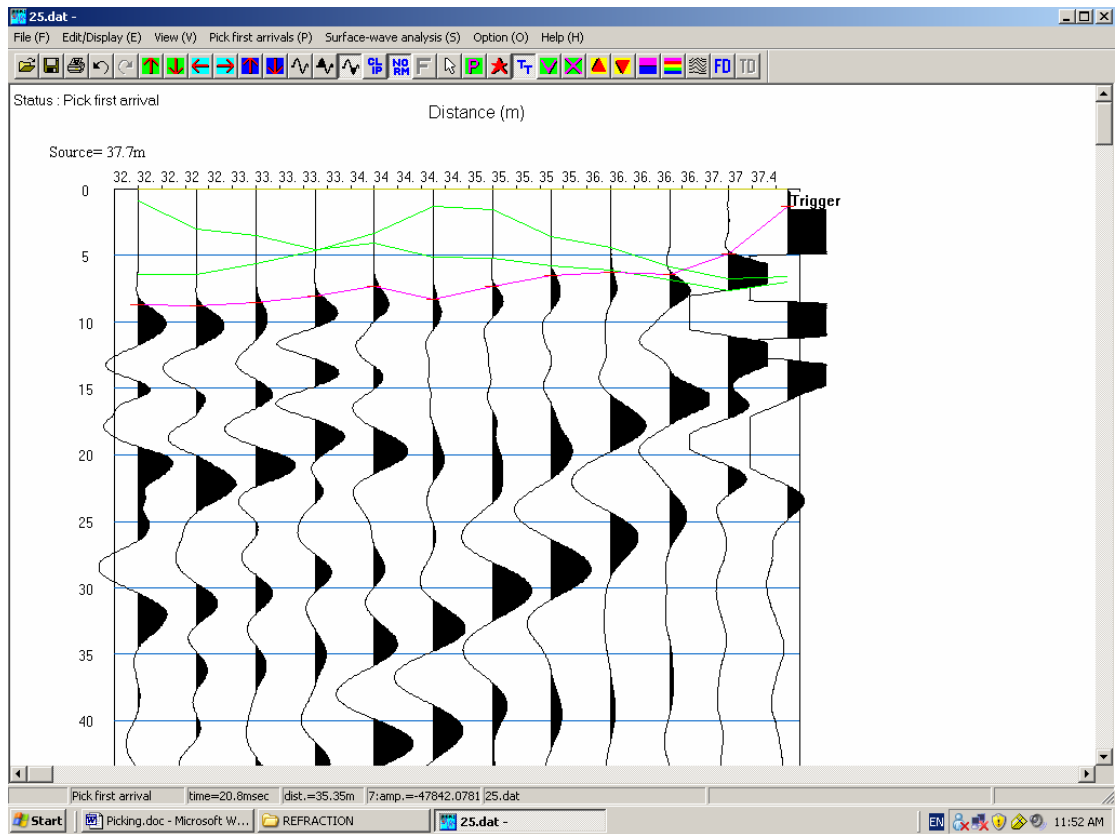
Καταγραφή 20



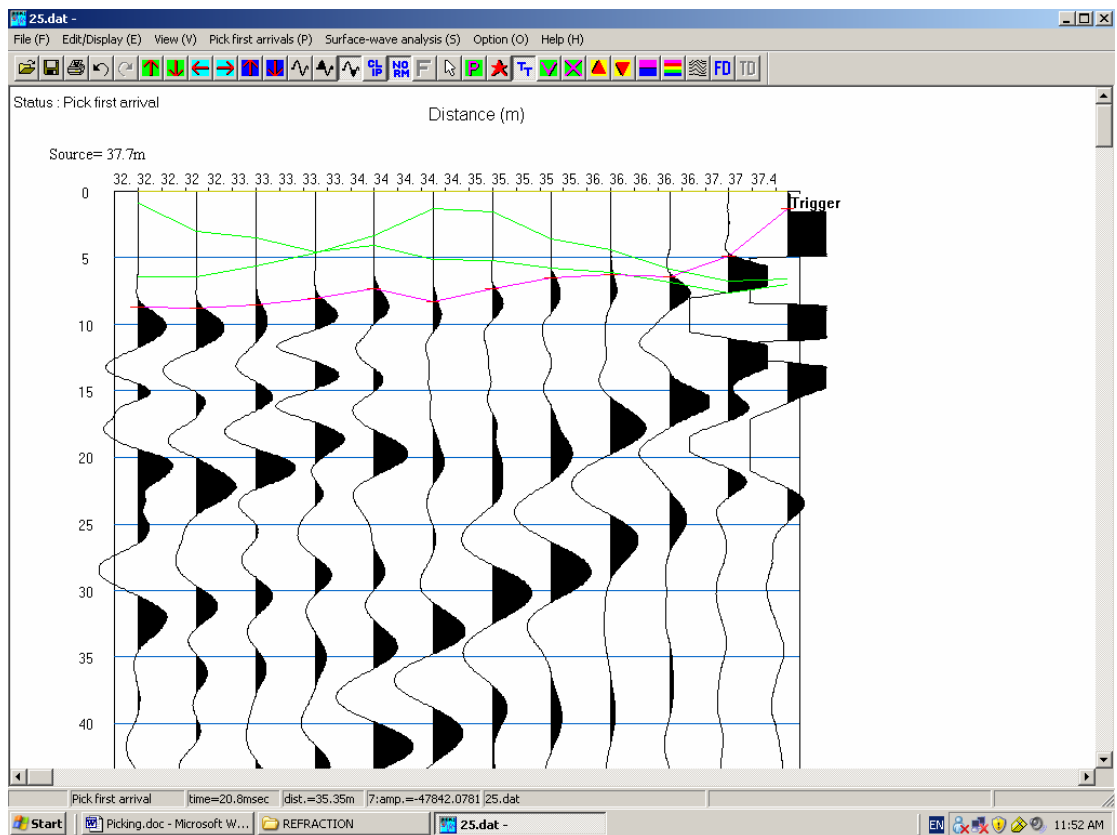
Καταγραφή 21



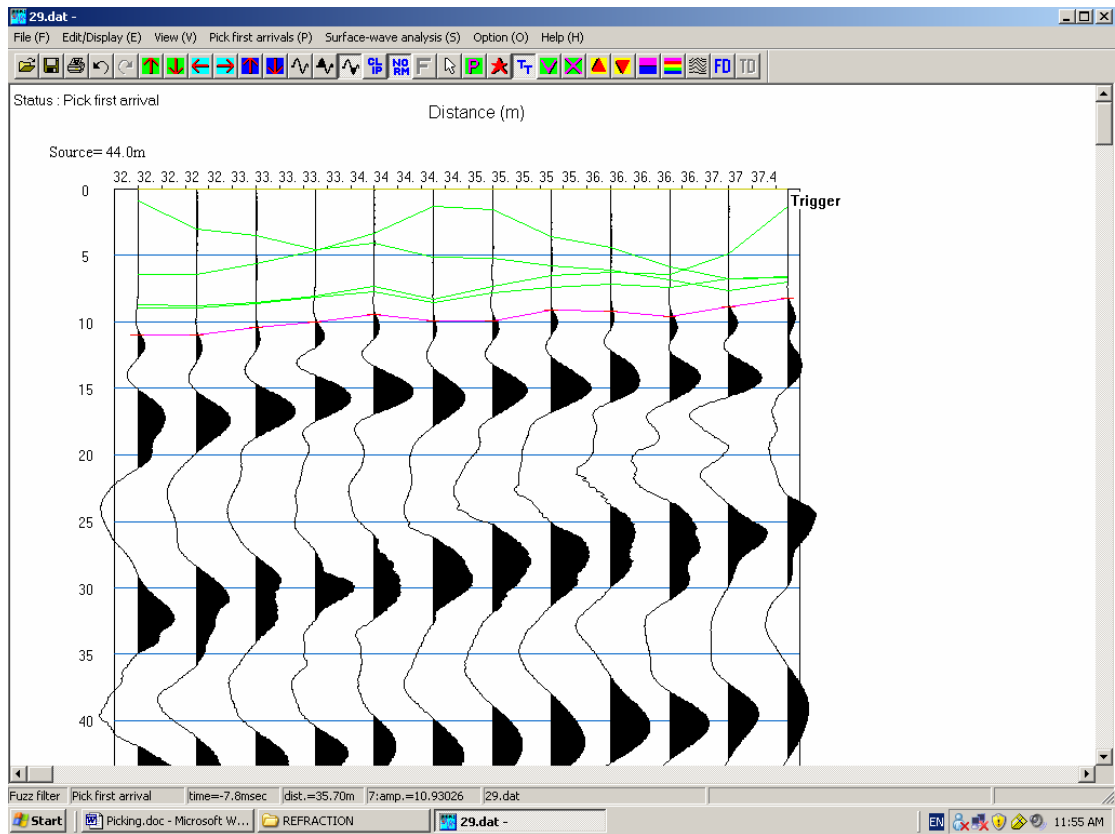
Καταγραφή 23



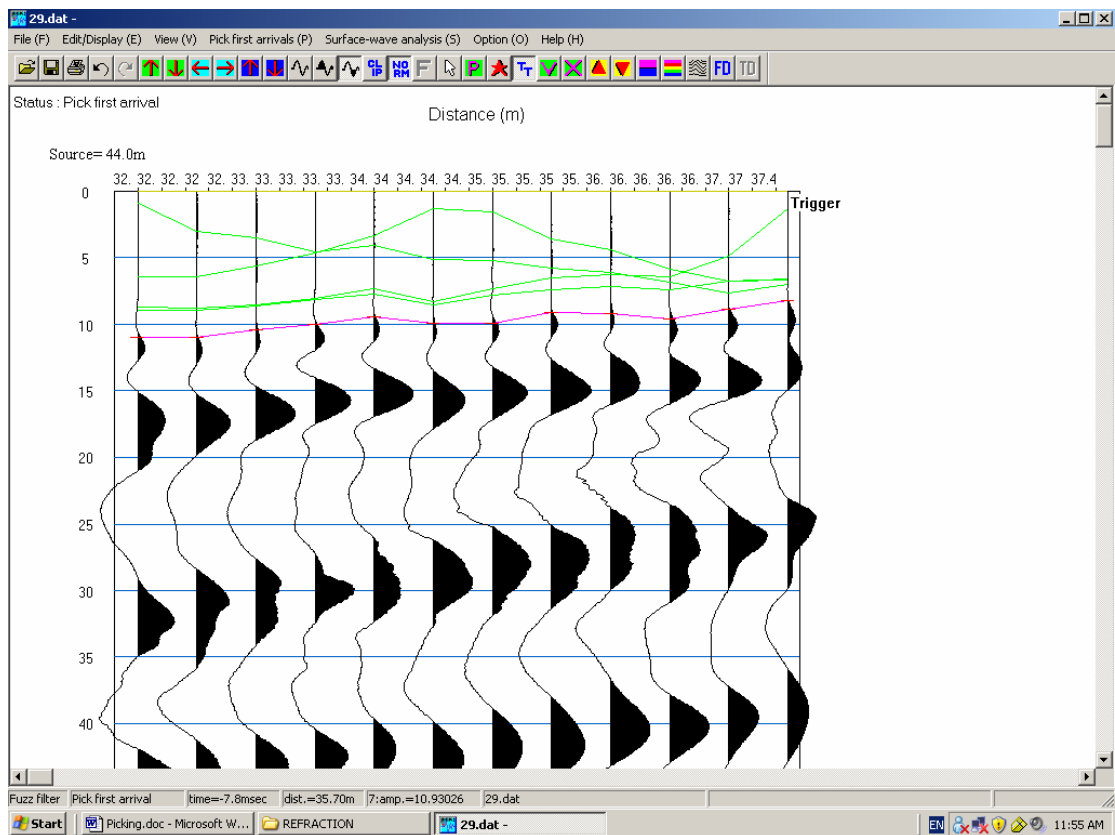
Καταγραφή 25



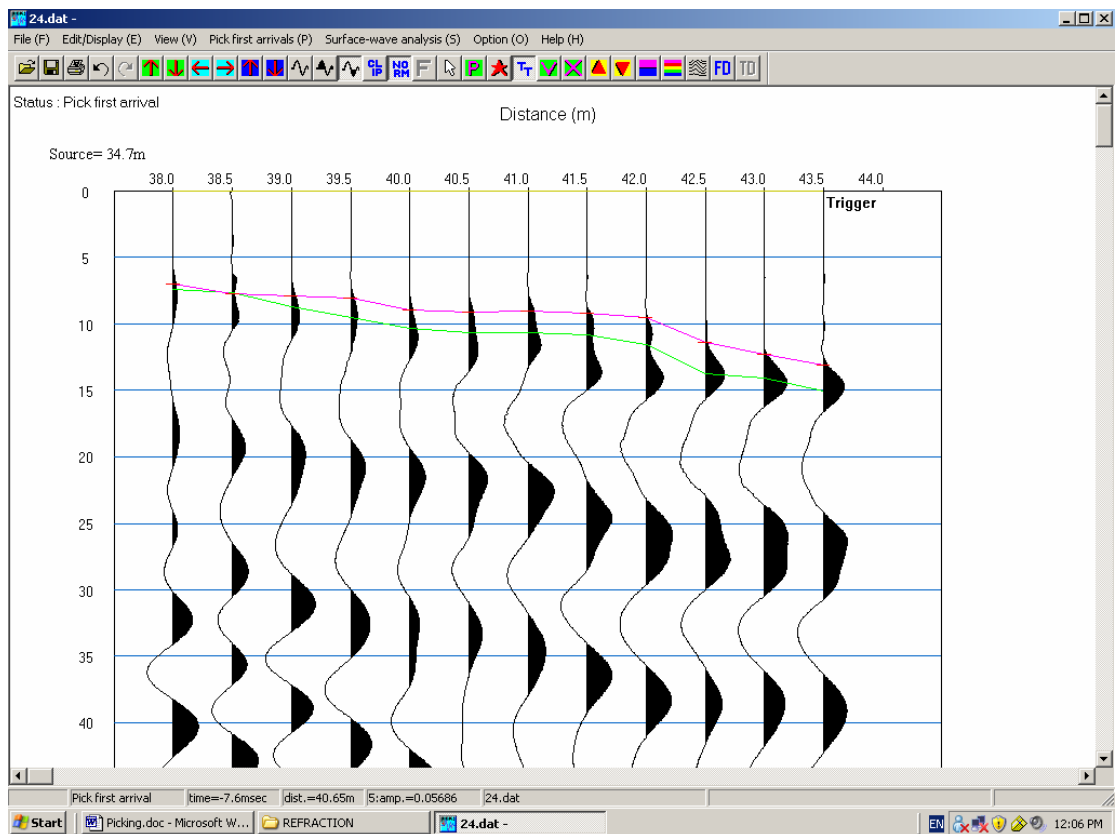
Καταγραφή 27



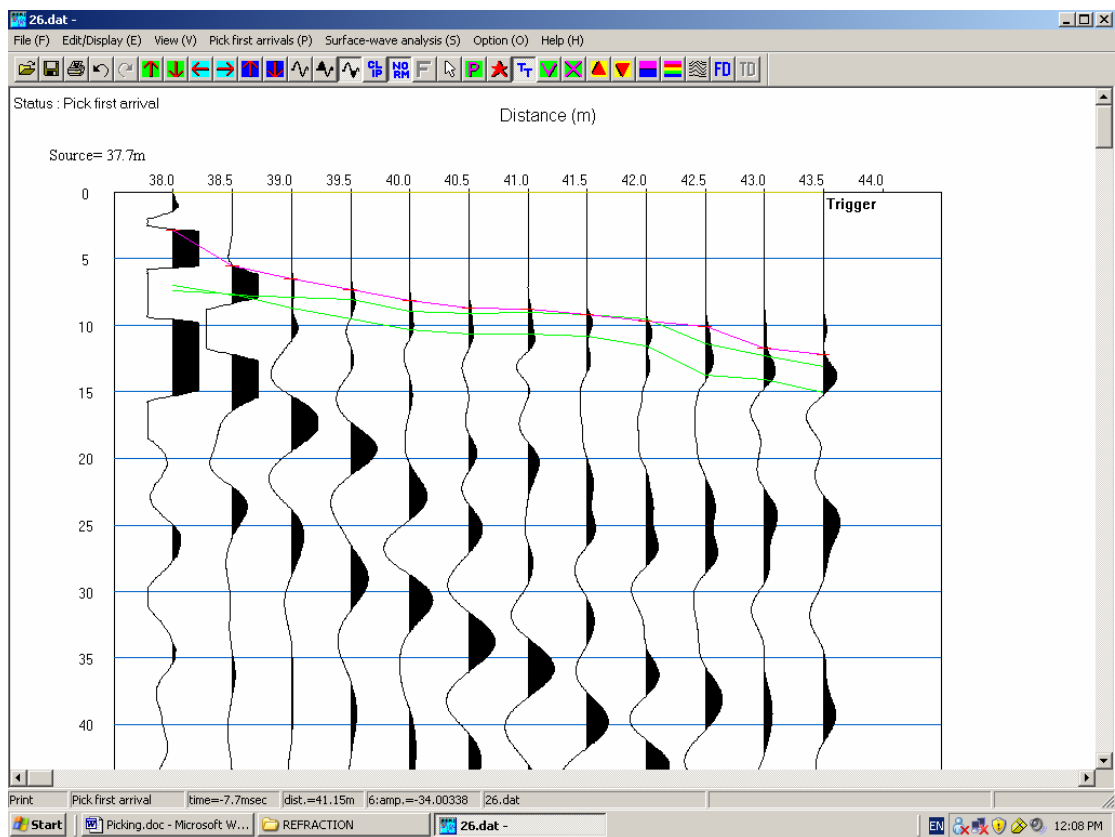
Καταγραφή 29



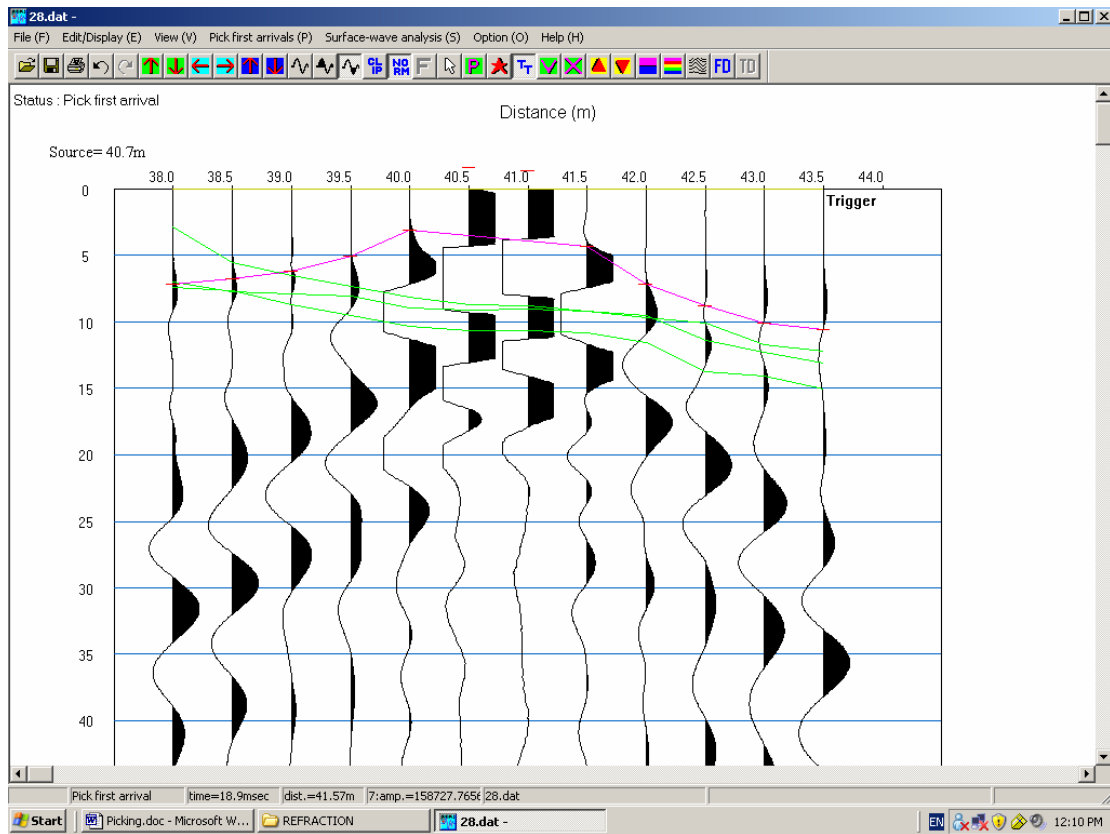
Καταγραφή 22



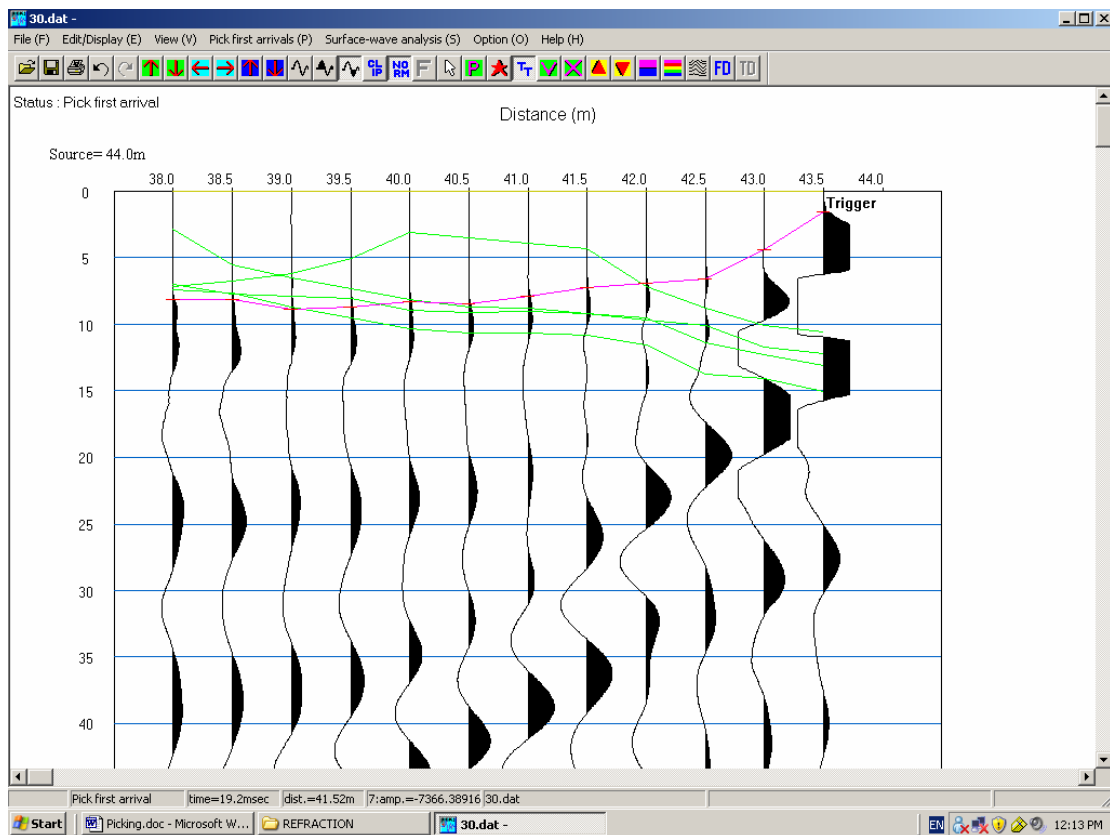
Καταγραφή 24



Καταγραφή 26

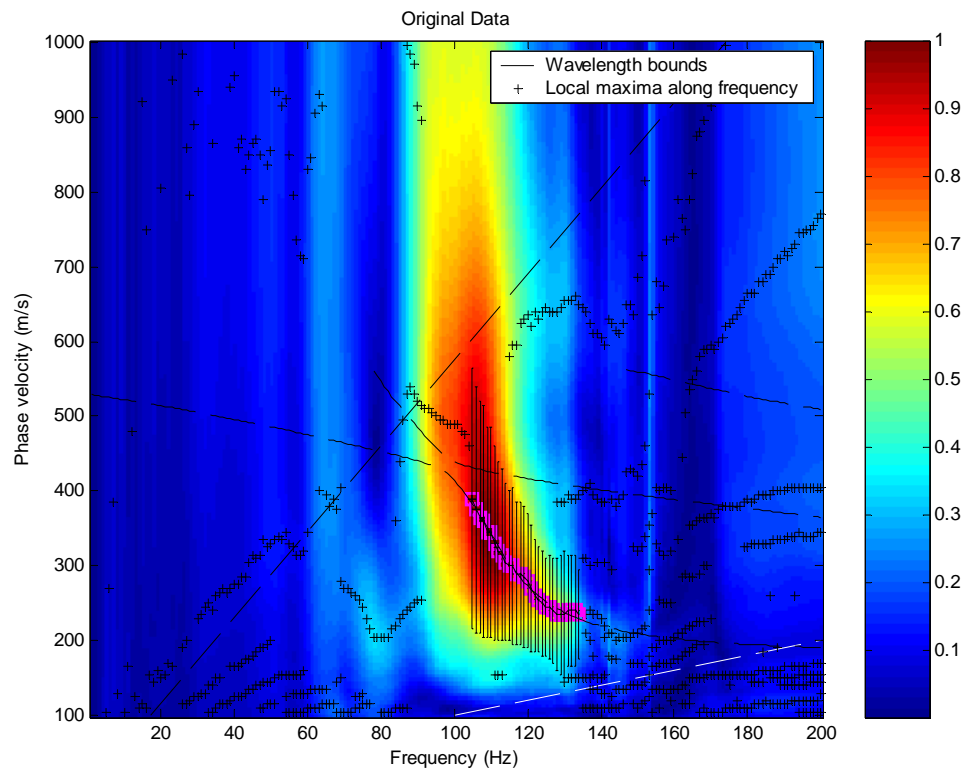


Καταγραφή 28

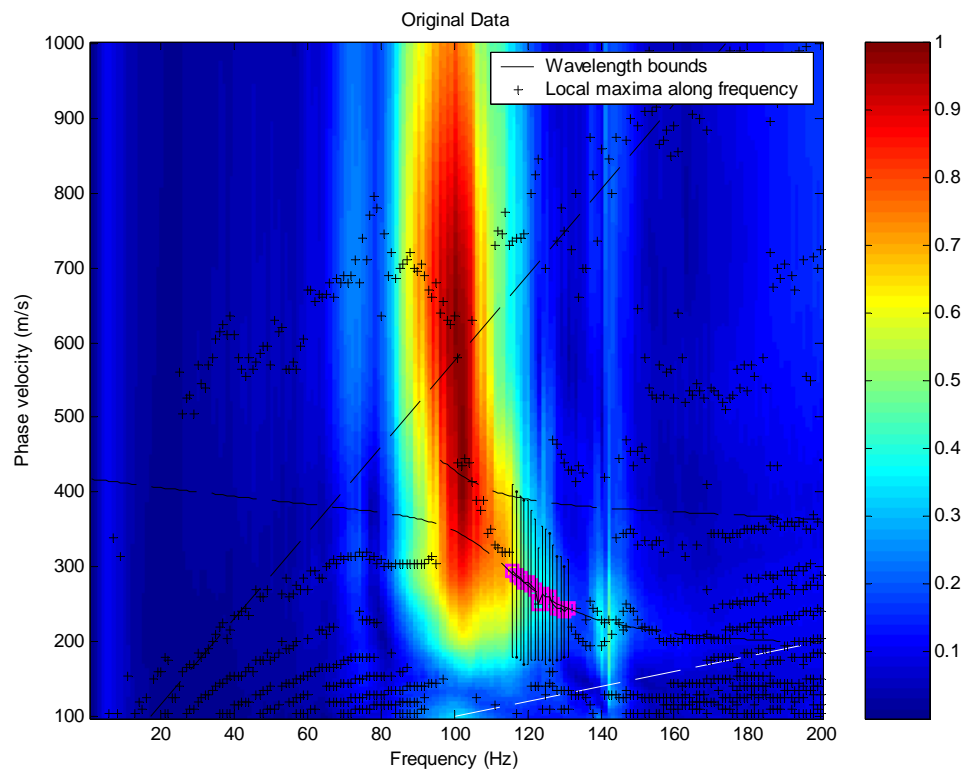


Καταγραφή 30

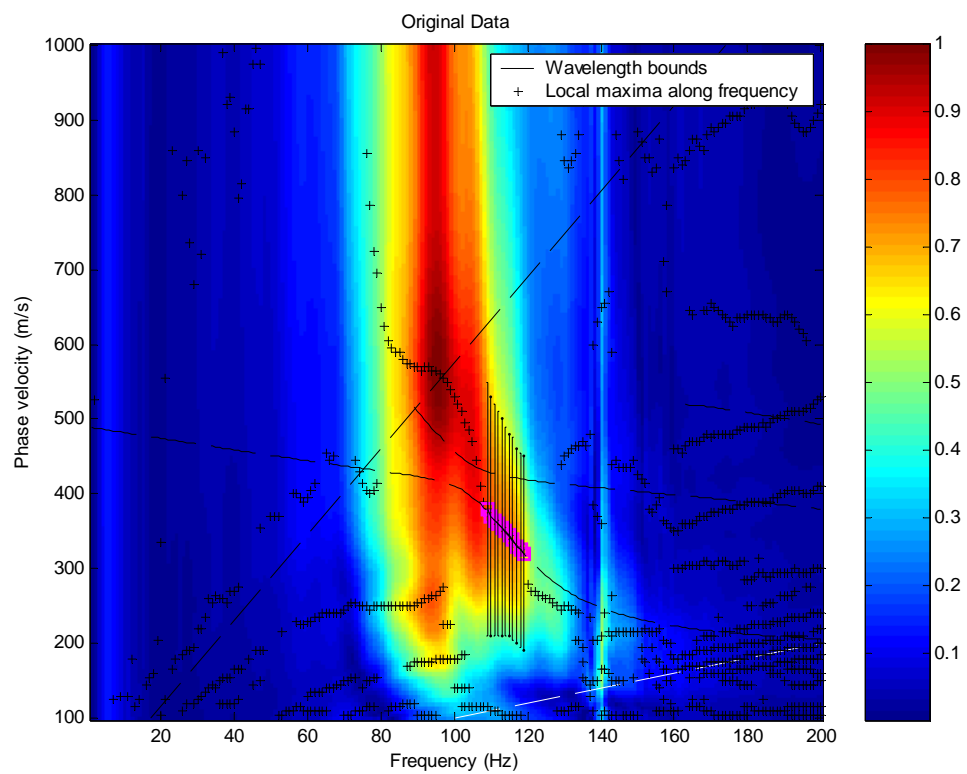
ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ



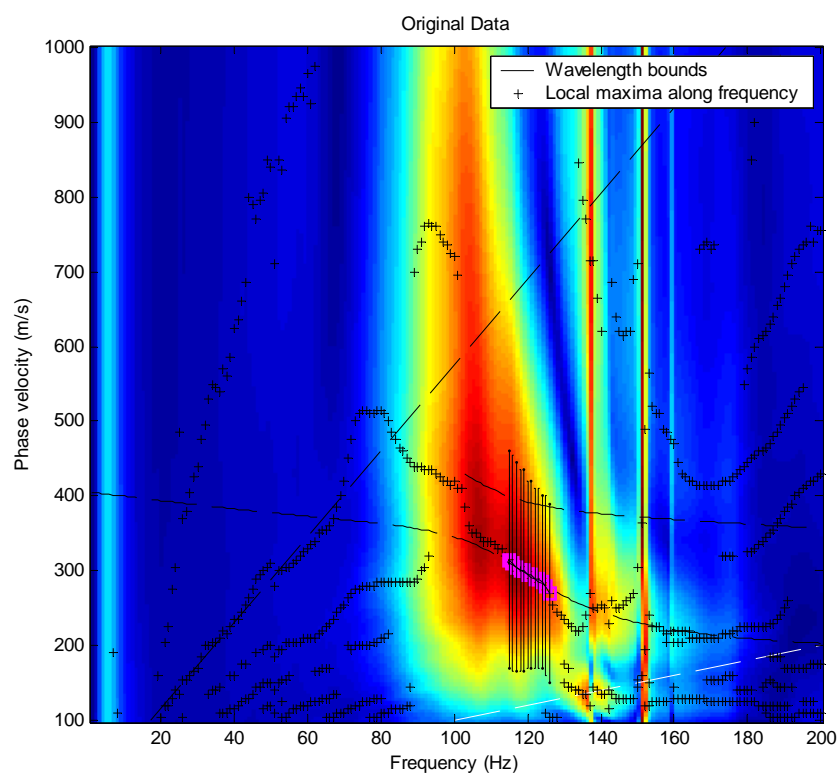
καμπύλη διασποράς 111-112



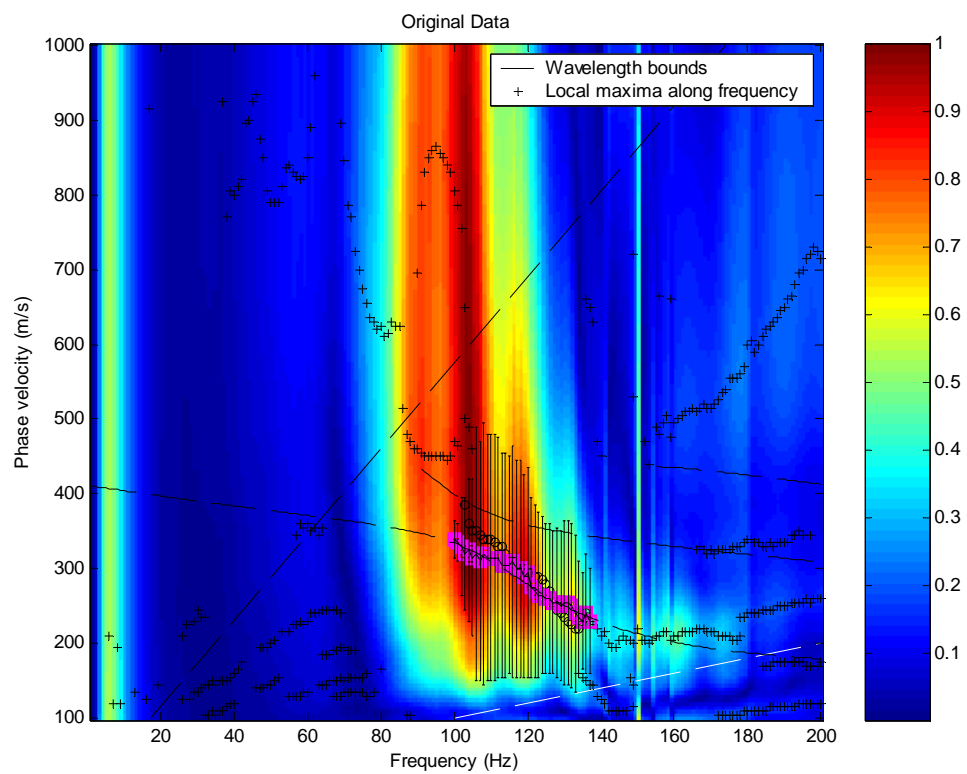
καμπύλη διασποράς 211-212



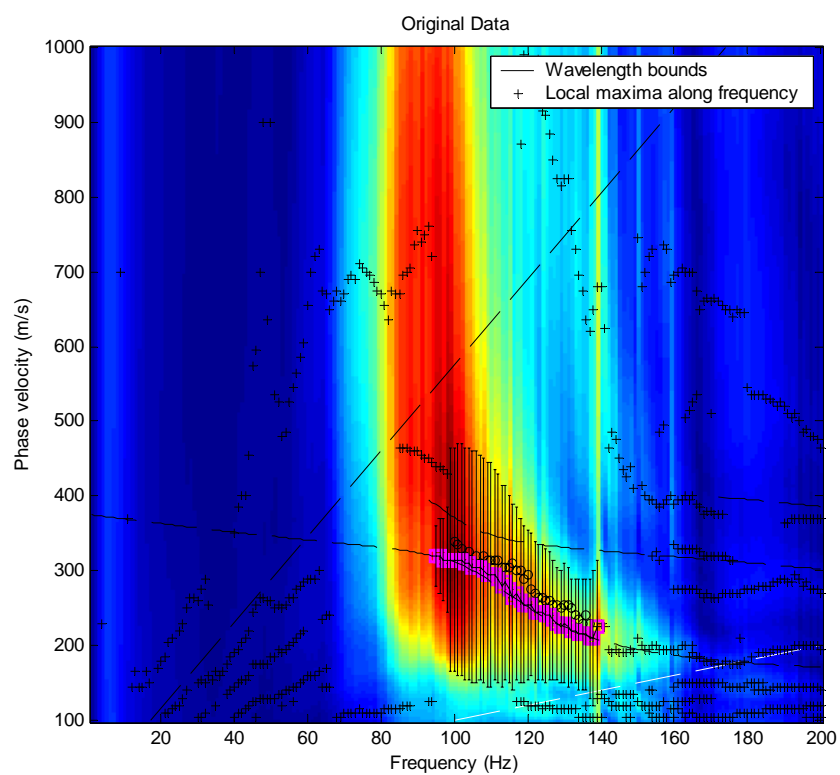
καμπύλη διασποράς 311-312



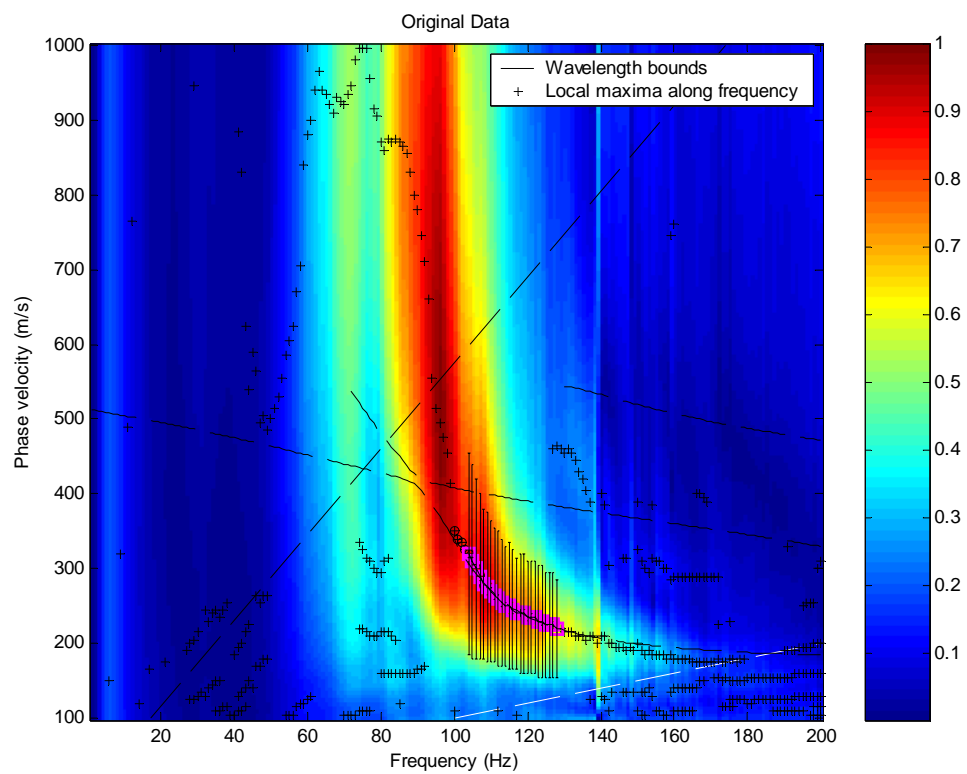
καμπύλη διασποράς 411-412



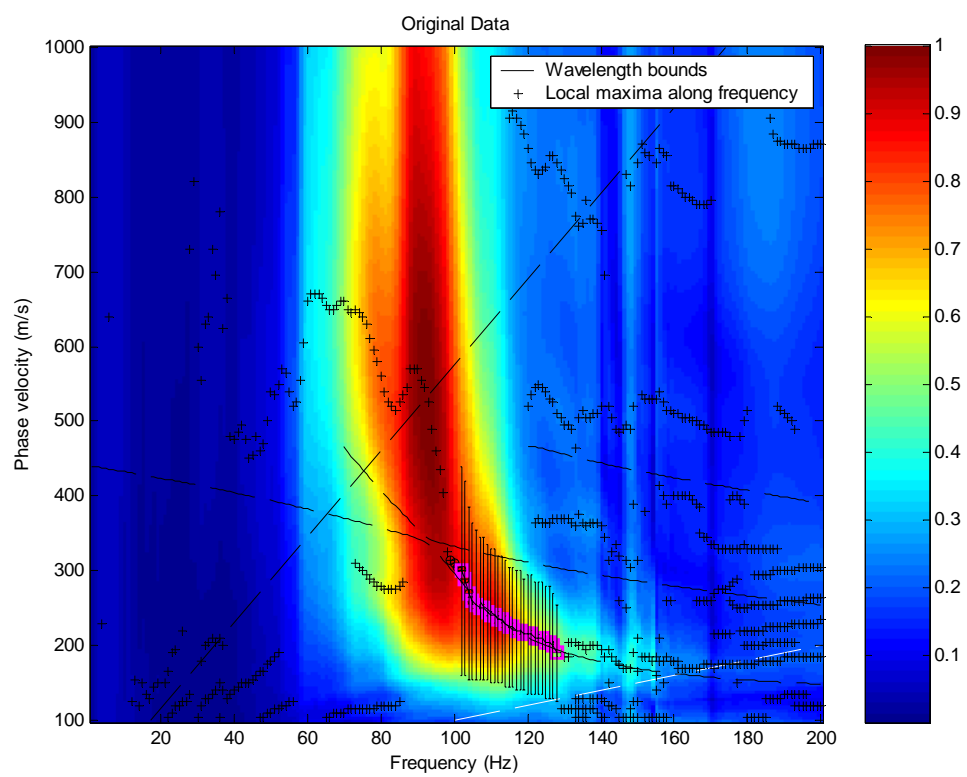
καμπύλη διασποράς 521-522



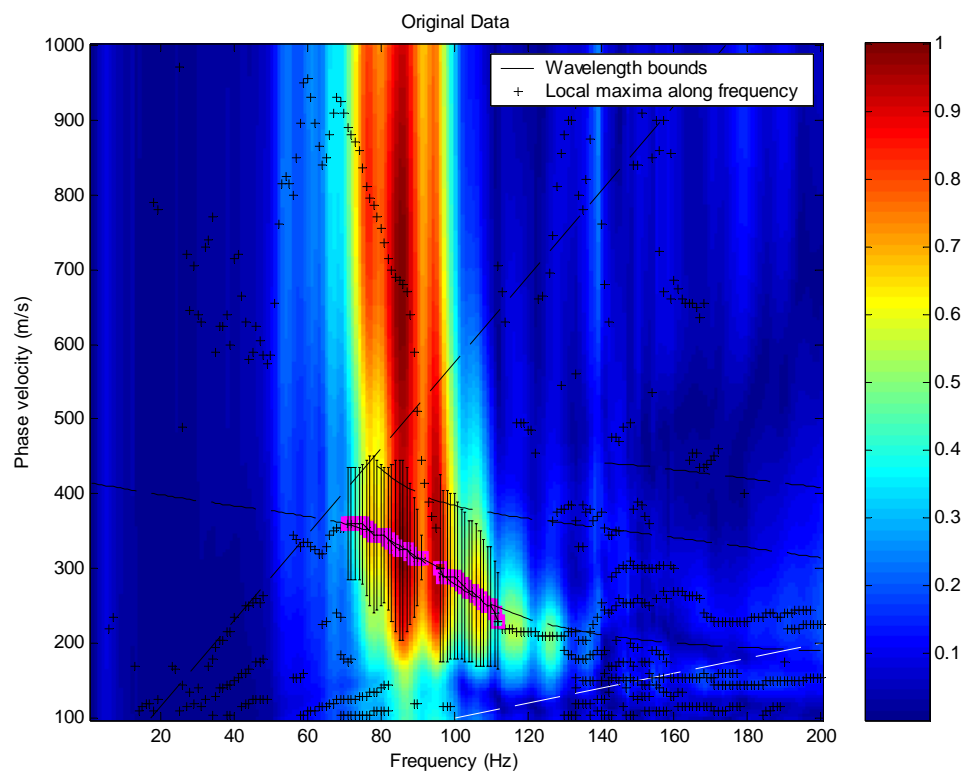
καμπύλη διασποράς 621-622



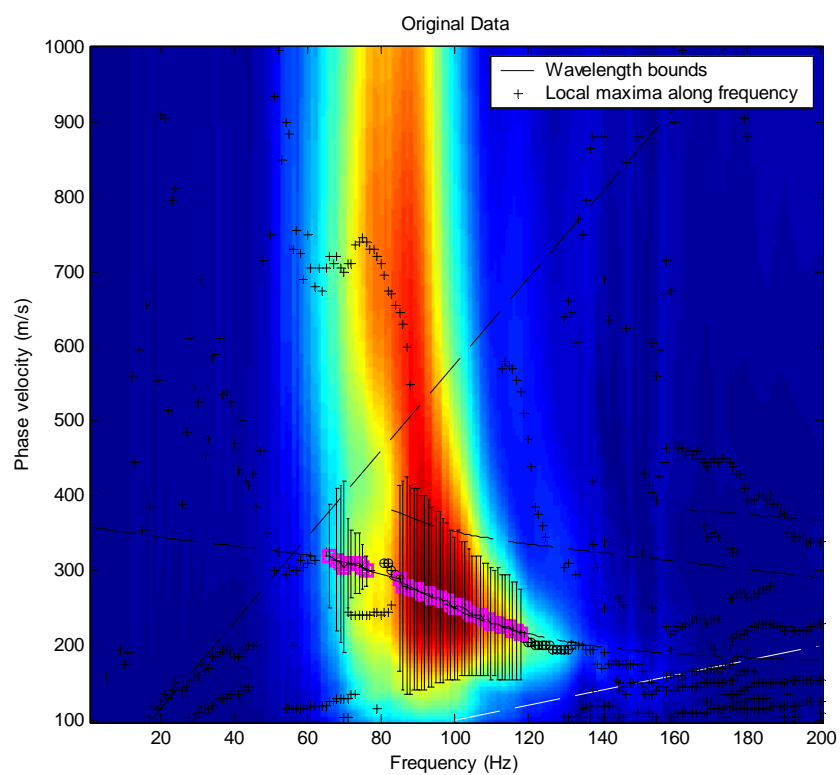
καμπύλη διασποράς 721-722



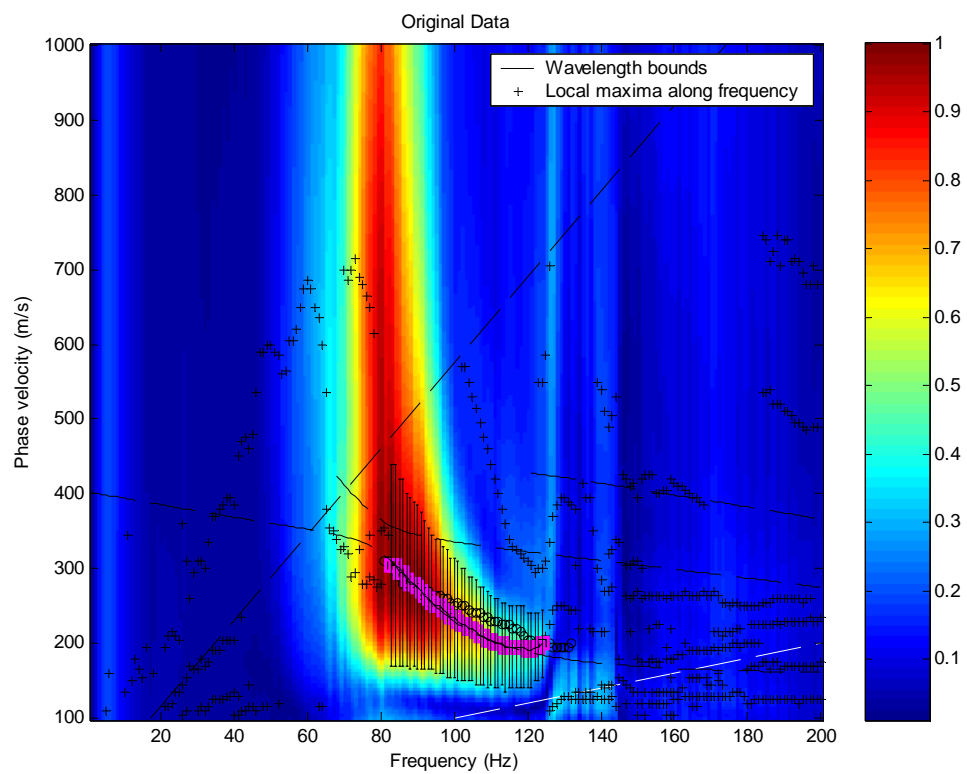
καμπύλη διασποράς 821-822



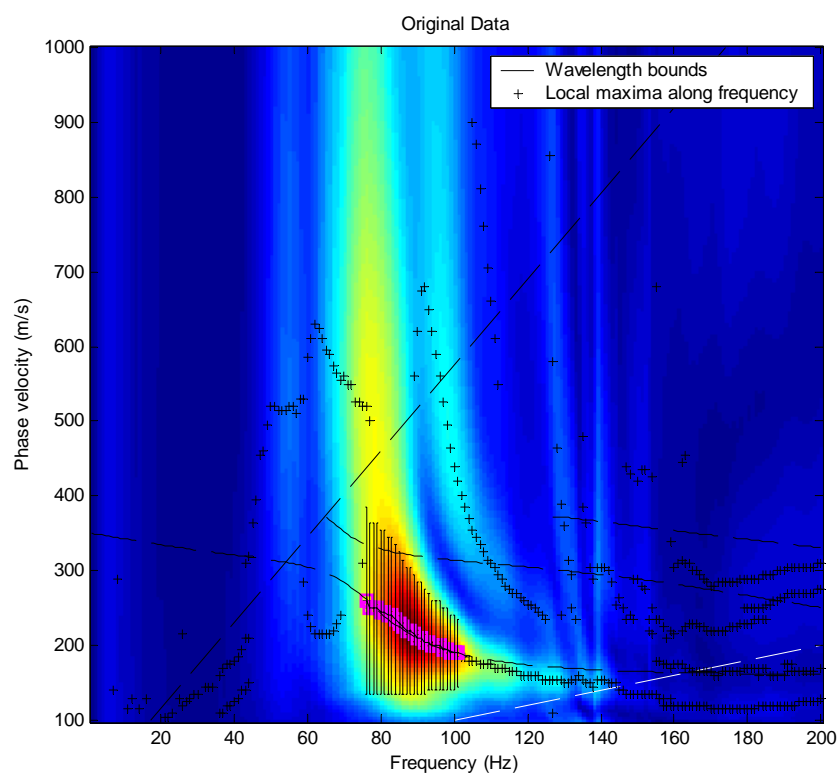
καμπύλη διασποράς 921-922



καμπύλη διασποράς 1021-1022

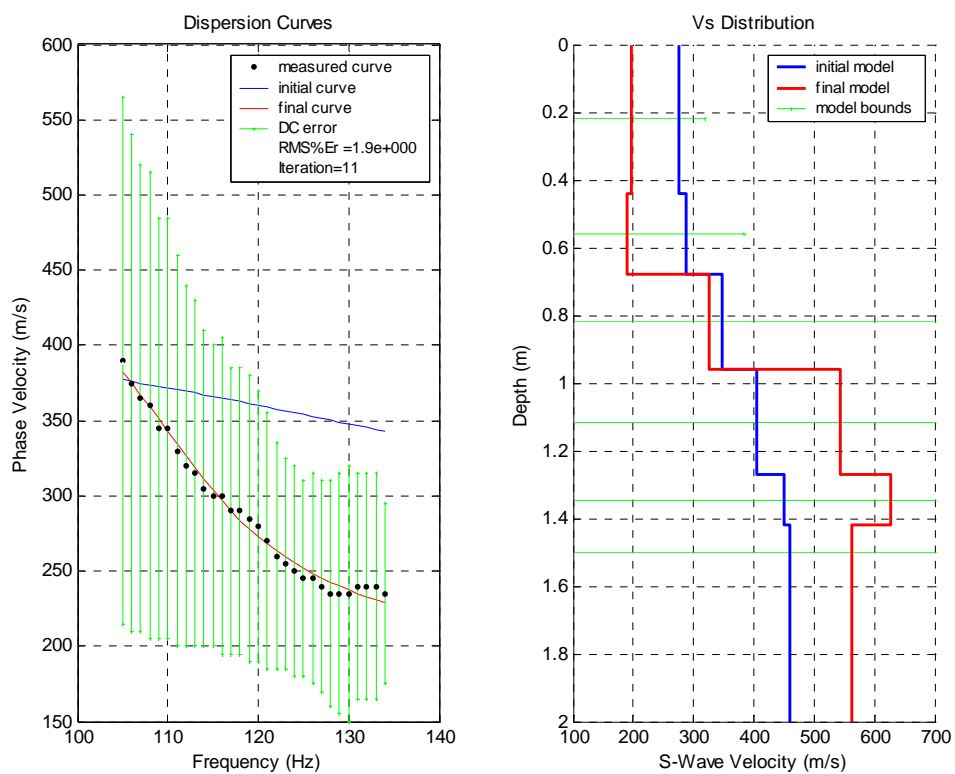


καμπύλη διασποράς 1121-1122

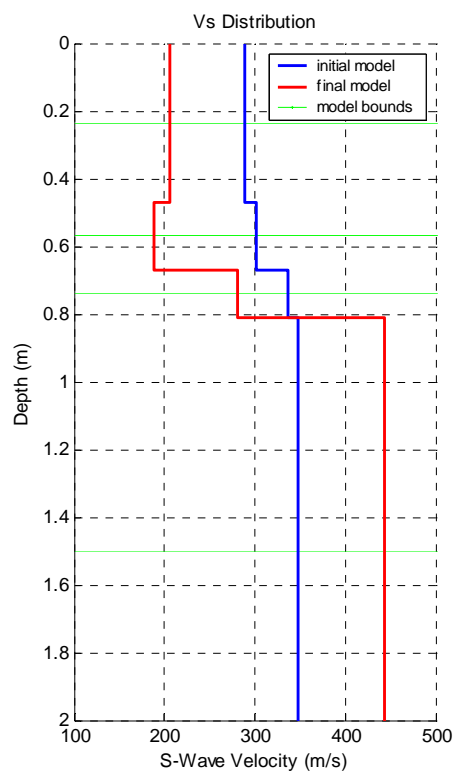
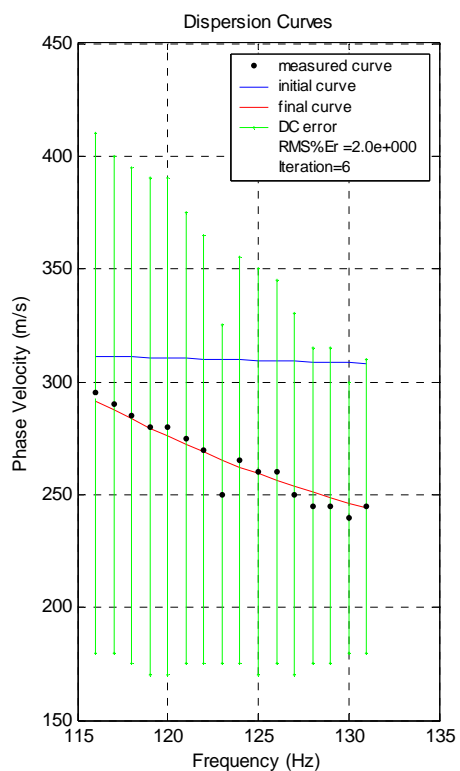


καμπύλη διασποράς 1321-1322

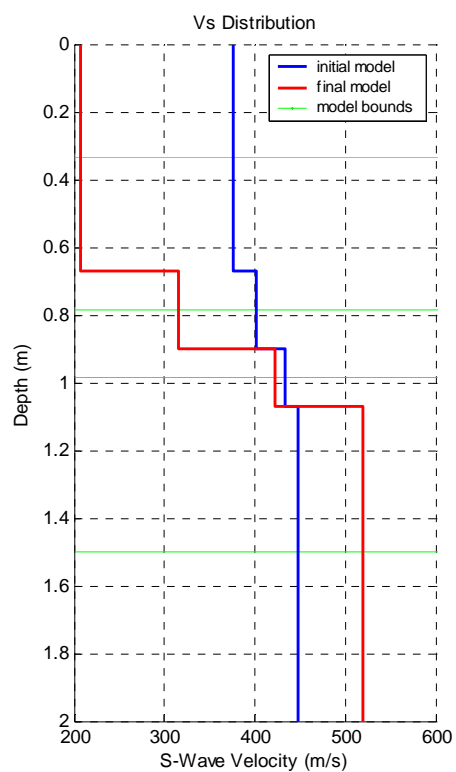
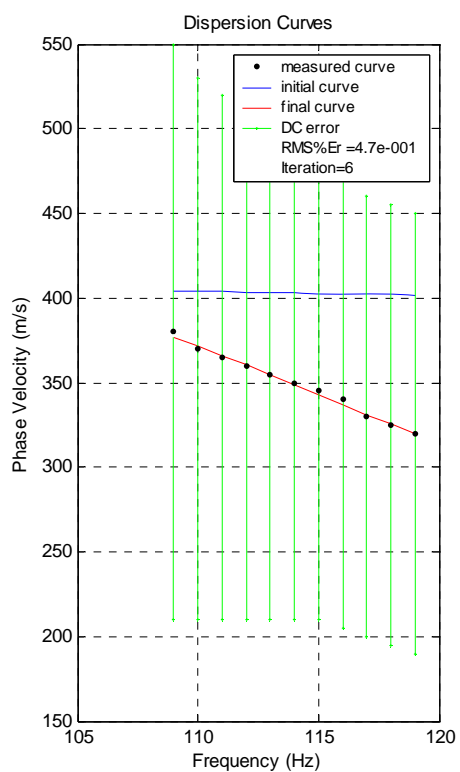
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ



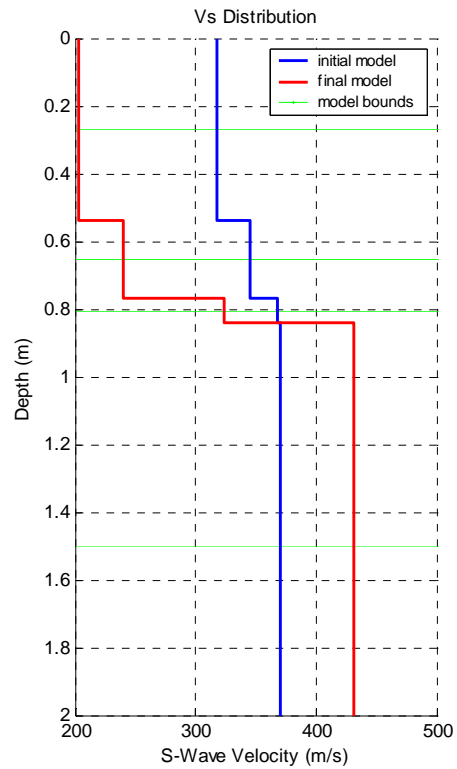
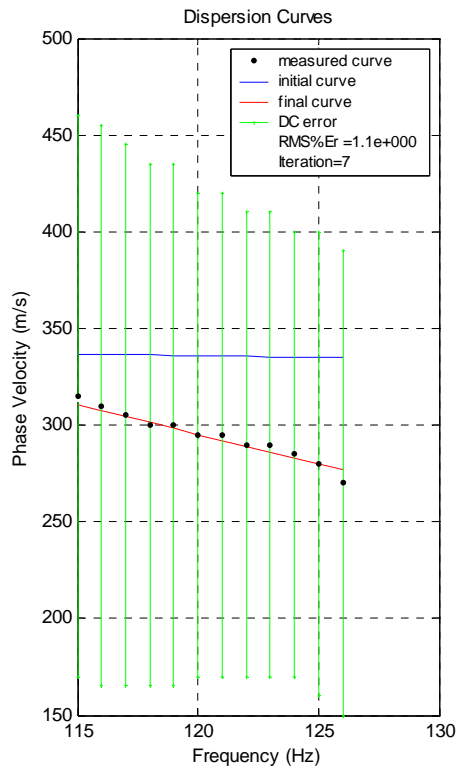
αποτελέσματα αντιστροφής καταγραφής 111-112



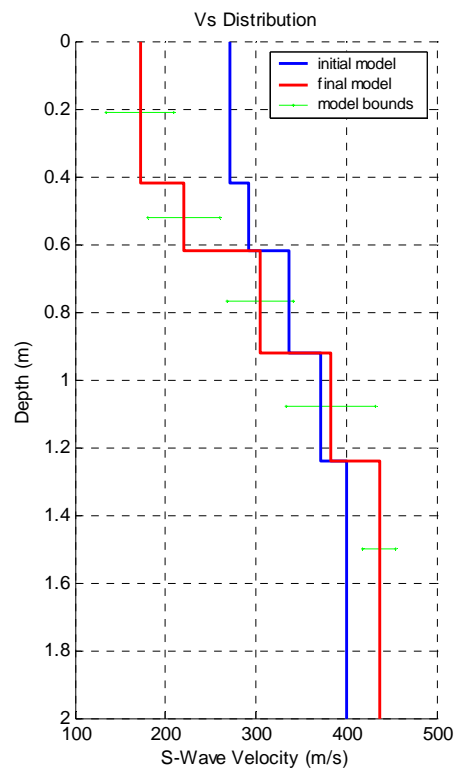
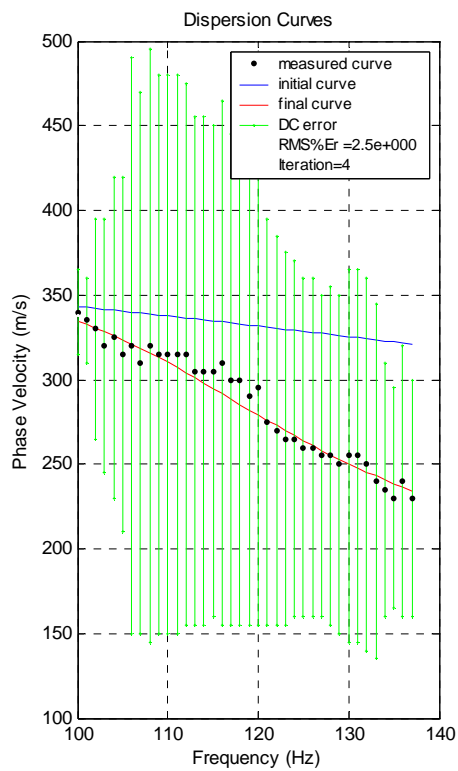
αποτελέσματα αντιστροφής καταγραφής 211-212



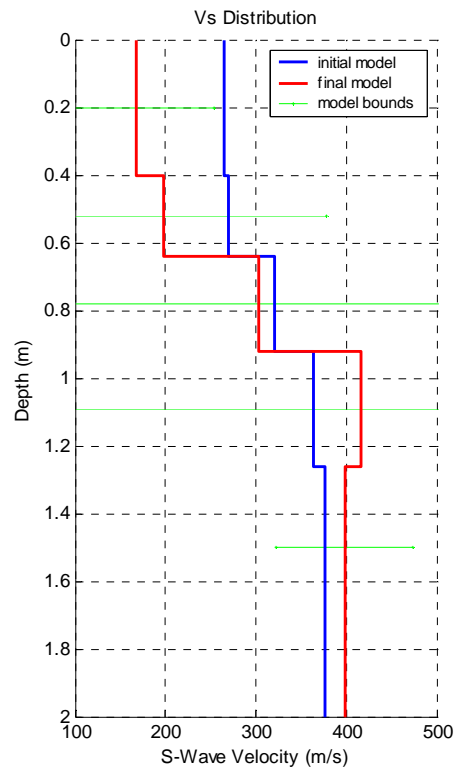
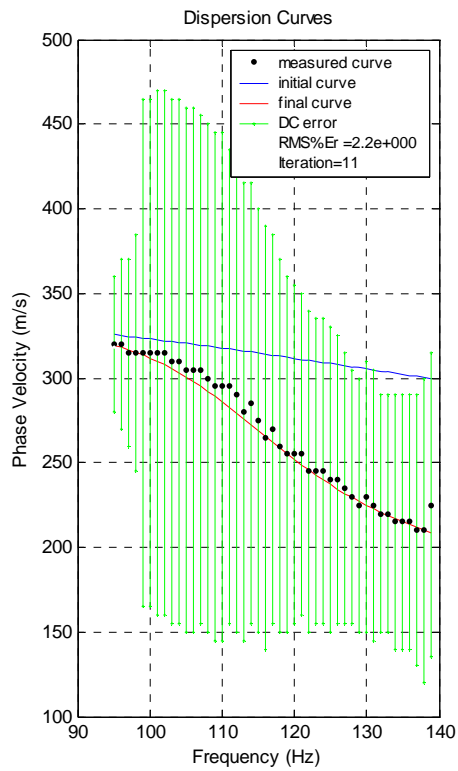
αποτελέσματα αντιστροφής καταγραφής 311-312



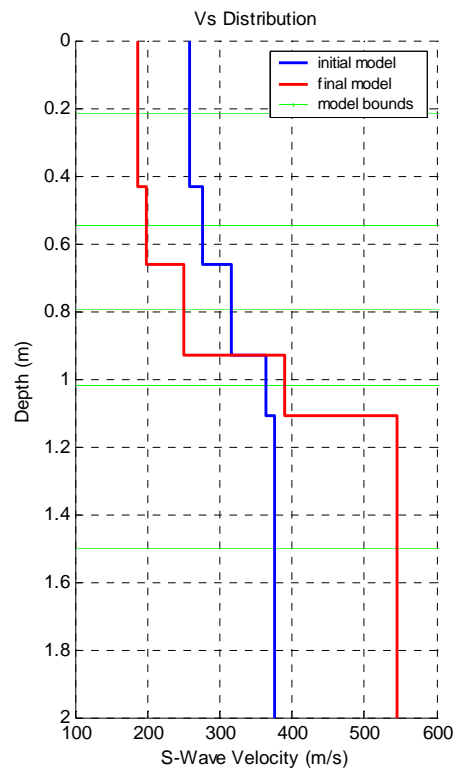
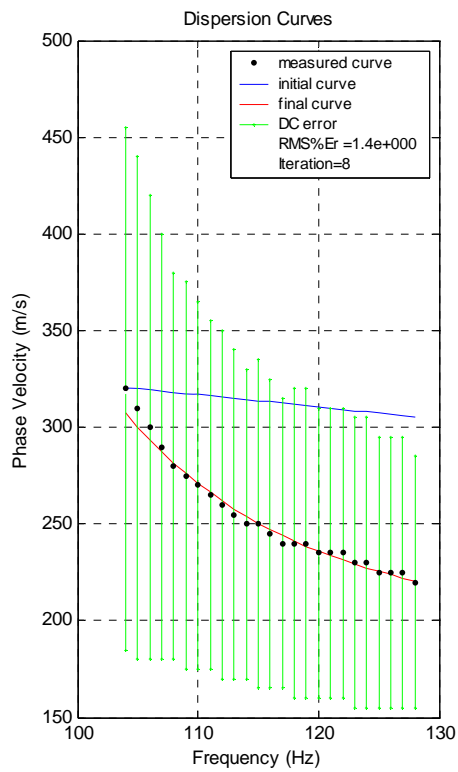
αποτελέσματα αντιστροφής καταγραφής 411-412



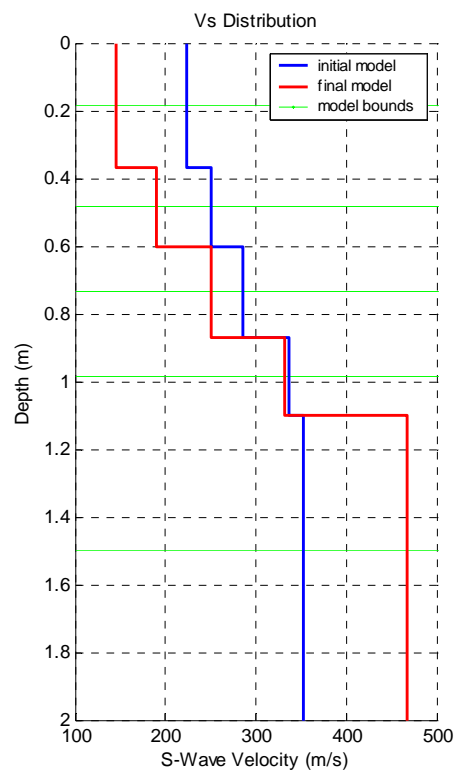
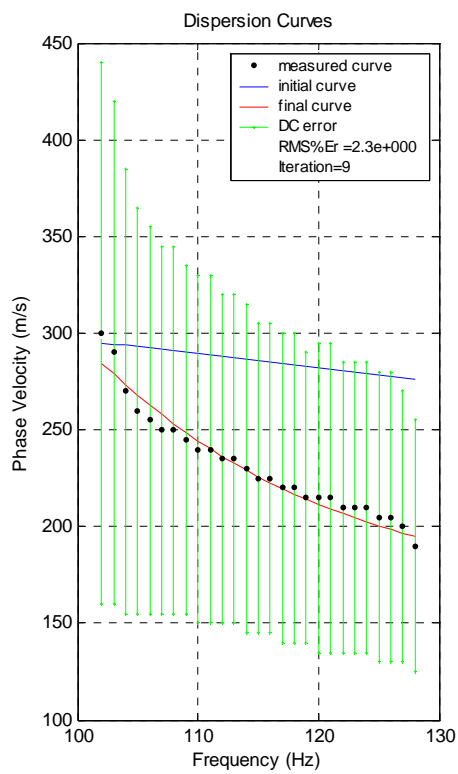
αποτελέσματα αντιστροφής καταγραφής 521-522



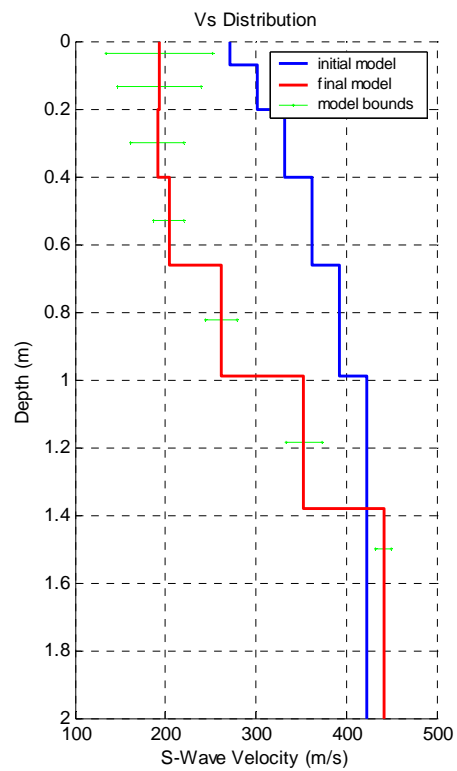
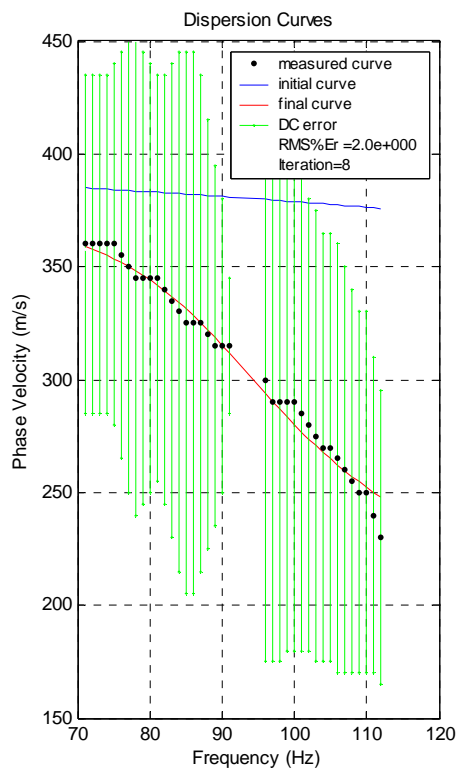
αποτελέσματα αντιστροφής καταγραφής 621-622



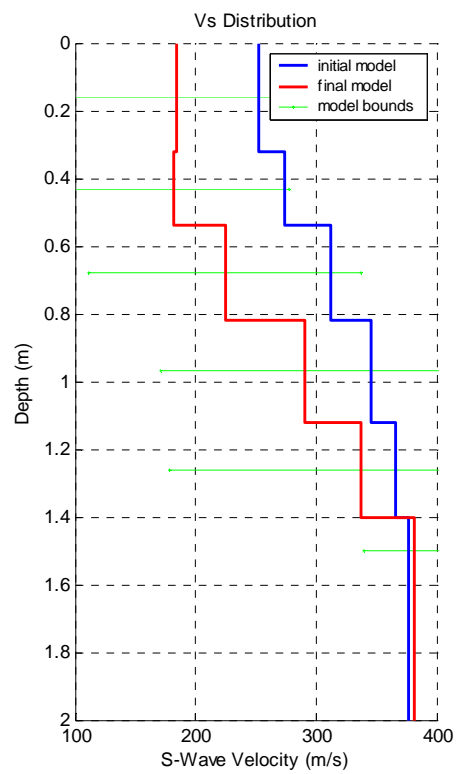
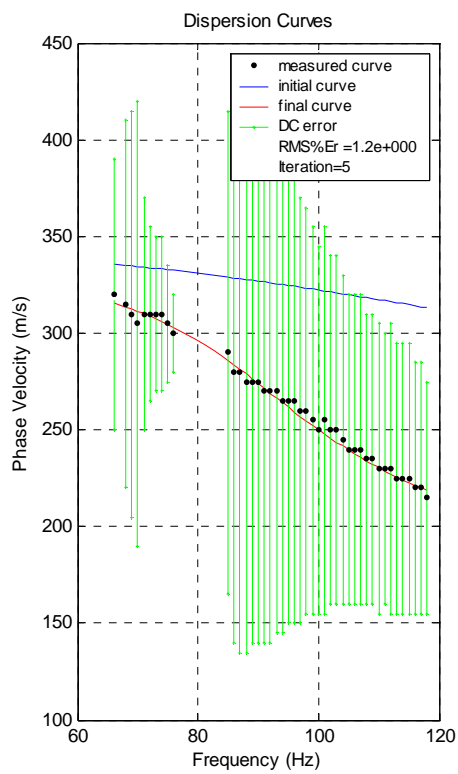
αποτελέσματα αντιστροφής καταγραφής 721-722



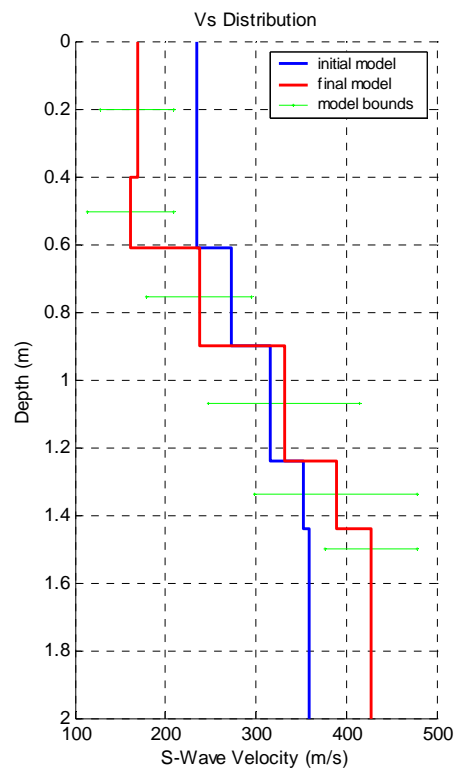
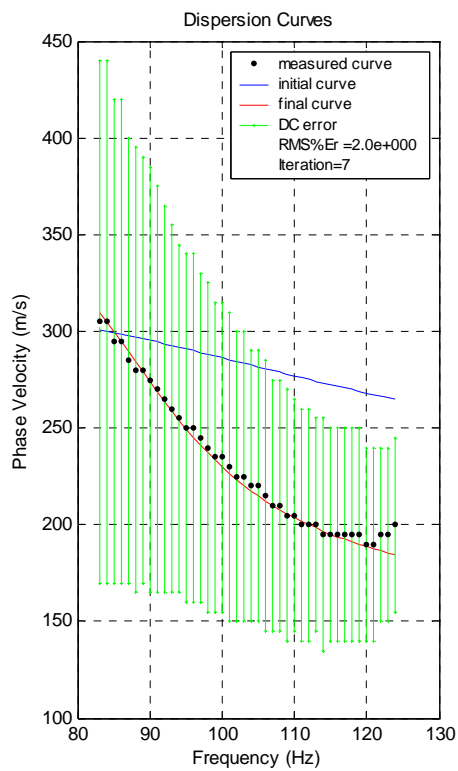
αποτελέσματα αντιστροφής καταγραφής 821-822



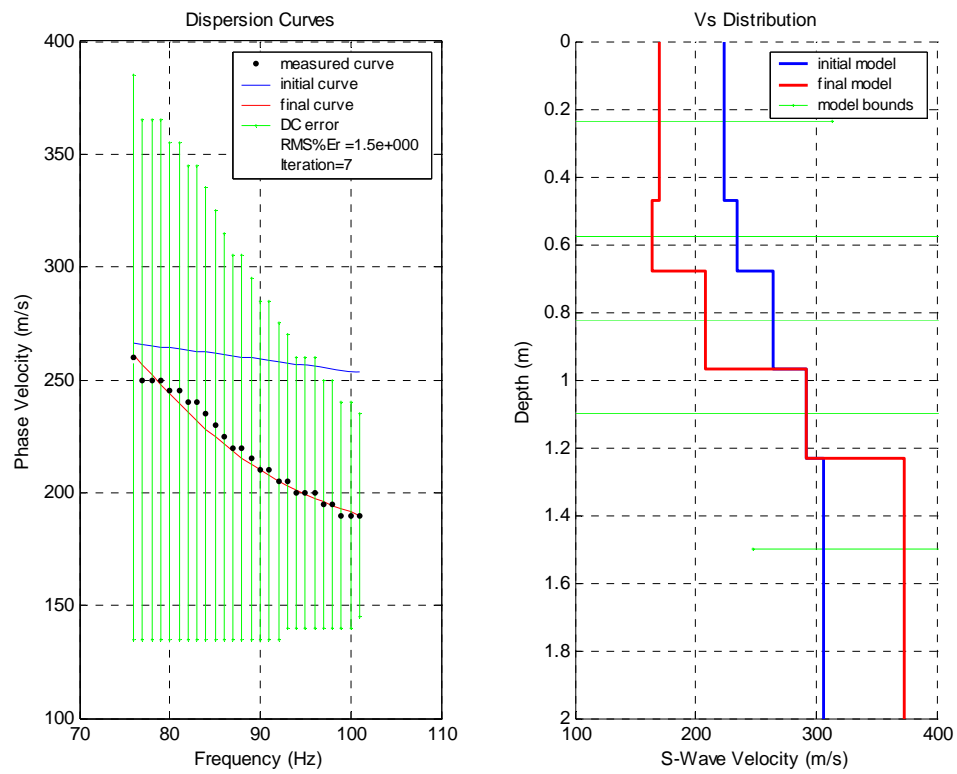
αποτελέσματα αντιστροφής καταγραφής 921-922



αποτελέσματα αντιστροφής καταγραφής 1021-1022



αποτελέσματα αντιστροφής καταγραφής 1121-1122



αποτελέσματα αντιστροφής καταγραφής 1321-1322