

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	vi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γεωφυσική έρευνα και πρακτικές εφαρμογές της	1
1.2 Είδη σεισμικών κυμάτων	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	5
2.1 Θέση του πειράματος	5
2.2 Γεωμετρία των γραμμών μελέτης	6
2.3 Απόκτηση των σεισμικών δεδομένων	8
2.3.1 Σεισμική διάθλαση Ρ – κυμάτων	8
2.3.2 Επιφανειακά κύματα	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΎΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ 3.1 Μέθοδος πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων	12 12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ 3.1 Μέθοδος πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων 3.1.1 Βασικές αρχές της μεθόδου ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων	12 12 12
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	12 12 12 12
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	12 12 12 17 24
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	12 12 12 17 24 24
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	12 12 17 24 24
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	12 12 17 24 24 28
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	12 12 17 24 24 28 33
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	12 12 17 24 24 28 33
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	12 12 17 24 24 33 33
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	12 12 17 24 24 28 33 33
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	12 12 17 24 24 28 33 33 37
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	12 12 17 24 24 28 33 37 37 37
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	12 12 17 24 24 28 33 37 37 37

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

κυμάτων	63
4.4 Συμπεράσματα για τη δομή του υπεδάφους	63
4.4.1 Περιγραφή της δομής του υπεδάφους	63
4.4.2 Χαρακτηρισμός του εδάφους σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	69
Παράρτημα Α. Δρομοχρονικά διαγράμματα	71
Παράρτημα Β. Μοντέλα βάθους (Μέθοδος αντιστροφής των χρόνων	
καθυστέρησης)	77
Παράρτημα Γ. Καμπύλες διασποράς	83
Παράρτημα Δ. Παράμετροι τελικού μοντέλου (Κατανομή Vs)	91

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Απεικόνιση καρστικών δομών στο οροπέδιο του Ομαλού με τις μεθόδους της σεισμικής τομογραφίας και ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων» έχει ως στόχο τη χαρτογράφηση του υποβάθρου της περιοχής του οροπεδίου του Ομαλού για τον εντοπισμό καρστικών δομών με την εφαρμογή δύο γεωφυσικών μεθόδων: α) με τον προσδιορισμό των ταχυτήτων των διαμηκών κυμάτων με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης και τομογραφίας και β) με τον προσδιορισμό των ταχυτήτων των εγκάρσιων κυμάτων με τη μέθοδο της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh. Παράλληλα, με τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων, γίνεται σύγκριση των δύο μεθόδων σεισμικής διασκόπησης.

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.

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

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου που συμμετείχαν στις Ασκήσεις Υπαίθρου ΙV, στην περιοχή του Ομαλού, το Σεπτέμβριο του 2003, από όπου προήλθαν τα σεισμικά δεδομένα που επεξεργάστηκα στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές κυρίους Εμμανουήλ Μανούτσογλου και Κωνσταντίνο Προβιδάκη, οι οποίοι συμμετέχουν ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια του μαθήματος «Ασκήσεις Υπαίθρου ΙV, Σεισμική διασκόπηση στο οροπέδιο του Ομαλού», στην οποία έλαβαν μέρος οι φοιτητές του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων το έτος 2003, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τη συλλογή των σεισμικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Από την επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων, προσδιορίστηκαν οι ταχύτητες των εγκάρσιων κυμάτων με τη μέθοδο της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και οι ταχύτητες των διαμηκών κυμάτων με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης και τομογραφίας.

Ο προσδιορισμός των σεισμικών αυτών ταχυτήτων οδήγησε στη χαρτογράφηση του υποβάθρου της περιοχής μελέτης, το οποίο αποτελείται από δύο κατηγορίες σχηματισμών: επιφανειακούς σχηματισμούς, αλλούβια – διλούβια, πάχους από 4 έως 5 μέτρα και ασβεστόλιθο της ενότητας του Τρυπαλίου, ο οποίος συναντάται σε βάθος 10 μέτρων περίπου, κάτω από μια μεταβατική ζώνη καρστικοποιημένου ασβεστολίθου πάχους, κατά μέσο όρο, 5 μέτρων που παρεμβάλλεται ενδιάμεσα των δύο σχηματισμών. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δύο μεθόδους εντοπισμού συγκρίθηκαν και συμπεραίνεται ότι συμφωνούν ως προς το βάθος εντοπισμού του βραχώδους υποβάθρου.

Επιπλέον, υπολογίστηκε η μέση τιμή του παράγοντα Vs₁₀ για την περιοχή διασκόπησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και έγινε χαρακτηρισμός του εδάφους βάση του Ευρωκώδικα 8. Το έδαφος ανήκει στην κατηγορία C, η οποία περιλαμβάνει αποθέσεις πυκνής ή μέσης πυκνότητας άμμου, χαλικιών ή συμπαγούς αργίλου με πάχος από μερικές δεκάδες μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ξεκινώντας την διπλωματική εργασία, γίνεται αναφορά στη γεωφυσική έρευνα, τις γεωφυσικές μεθόδους και τις χρήσιμες εφαρμογές τους στους διάφορους τομείς. Ακολουθεί αναφορά στα είδη των σεισμικών κυμάτων, τα βασικά τους χαρακτηριστικά και τις ιδιότητές τους.

Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος συλλογής των σεισμικών δεδομένων που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία, παρουσιάζοντας τη θέση διασκόπησης στο οροπέδιο του Ομαλού και περιγράφοντας τη διάταξη και τη διαδικασία του πειράματος, καθώς και τις ιδιαίτερες παραμέτρους που ρυθμίστηκαν για τη συλλογή των διαφορετικού είδους σεισμικών κυμάτων.

Περιγράφονται αναλυτικά οι δύο μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων, δηλαδή η μέθοδος ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων και η μέθοδος σεισμικής διάθλασης και τομογραφίας και η διαδικασία επεξεργασίας των σεισμικών δεδομένων με την κάθε μέθοδο ξεχωριστά.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία παρουσιάζονται και γίνεται υπέρθεση των αποτελεσμάτων της μιας μεθόδου στα αποτελέσματα της άλλης, καθιστώντας ευκολότερη τη μεταξύ τους σύγκριση. Γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων και παρατίθενται τα συμπεράσματα για την δομή του υπεδάφους. Επιπλέον, γίνεται χαρακτηρισμός του εδάφους της περιοχής μελέτης βάση του Ευρωκώδικα 8.

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

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ

Η Γεωφυσική είναι η επιστήμη που εφαρμόζει τους νόμους της Φυσικής για να μελετήσει τη Γη. Η γεωφυσική έρευνα έχει ως στόχο την αξιοποίηση των γεωφυσικών γνώσεων για πρακτικούς σκοπούς. Οι σημαντικότερες πρακτικές εφαρμογές της γεωφυσικής έρευνας είναι α) η μελέτη της δομής και των γεωδυναμικών διαδικασιών στο φλοιό και στον πάνω μανδύα της Γης που καθορίζουν τις θέσεις πολλών δομών οικονομικής σημασίας, β) ο εντοπισμός δομών στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης που σχετίζονται με κοιτάσματα πετρελαίου ή φυσικού αερίου, με μεταλλεύματα, με πηγές γεωθερμικής ενέργειας, με ορυκτούς άνθρακες κ.α και γ) ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των επιφανειακών στρωμάτων της Γης που σχετίζονται με κοιτάσματα πειφανειακών στρωμάτων της κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων όπως θεμελιώσεις γεφυρών, φραγμάτων κ.λ.π.

Ο κλάδος της Γεωφυσικής που ασχολείται με την ανεύρεση δομών οικονομικής σημασίας, χρησιμοποιεί τις ακόλουθες μεθόδους: σεισμικές, βαρυτικές, μαγνητικές, ηλεκτρικές, ηλεκτρομαγνητικές, ραδιομετρική και θερμική. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήσαμε την σεισμική μέθοδο. Οι σεισμικές μέθοδοι θεωρούνται από τις πιο ακριβείς μεθόδους καθορισμού της δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Μπορούν να δώσουν πληροφορίες για το είδος των γεωλογικών σχηματισμών καθώς και για τα πάχη τους, μελετώντας τους χρόνους διαδρομής, την περίοδο και τα πλάτη των σεισμικών κυμάτων.

Επιπλέον, η γεωφυσικές μέθοδοι είναι μη καταστρεπτικές μέθοδοι μελέτης του υπεδάφους, γεγονός που τις καθιστά φιλικές προς το περιβάλλον αλλά και οικονομικές, καθώς το κόστος τους είναι σημαντικά μικρότερο από την διάνοιξη γεωτρήσεων.

1.2 ΕΙΔΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Τα σεισμικά κύματα διακρίνονται σε διαφορετικά είδη ανάλογα με τα χαρακτηριστικά διάδοσής τους. Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες σεισμικών κυμάτων: τα κύματα χώρου και τα επιφανειακά κύματα. Τα κύματα χώρου διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις στο εσωτερικό της γης, ενώ τα επιφανειακά διαδίδονται παράλληλα σε διαχωριστικές επιφάνειες, όπως η επιφάνεια της γης. Κατά την πραγματοποίηση σεισμικής διασκόπησης, τα επιφανειακά κύματα εμφανίζονται στα σεισμογράμματα μετά τα κύματα χώρου και αναγνωρίζονται από το μεγάλο πλάτος και τη σχετικά χαμηλή τους συχνότητα. Το κυριότερο χαρακτηριστικό των επιφανειακών κυμάτων είναι ότι το πλάτος τους ελαττώνεται όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια της γης και σε απόσταση λ, ίση με το μήκος κύματος, το πλάτος τους πρακτικά μηδενίζεται (Βαφείδης, 1993). Αν και φθάνουν μετά από τα κύματα χώρου, υπεύθυνα για τις καταστροφές που προκαλούνται από τους σεισμούς είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου τα επιφανειακά κύματα. Αυτή η ζημία και η δύναμη των επιφανειακών κυμάτων μειώνεται στους βαθύτερους σεισμούς. Κύματα χώρου είναι τα διαμήκη και τα εγκάρσια ενώ επιφανειακά κύματα είναι τα κύματα Rayleigh.

Όταν πραγματοποιείται μια σεισμική δόνηση, ο πρώτος παλμός της ενέργειας που δημιουργείται στο σημείο της εστίας περιλαμβάνει τα διαμήκη ή πρώτα κύματα P (P – waves) (Σχήμα 1.1). Το χαρακτηριστικό των διαμηκών κυμάτων είναι ότι η διεύθυνση ταλάντωσης των υλικών σημείων συμπίπτει με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Τα διαμήκη κύματα, λόγω του ότι διαδίδονται με τη μεγαλύτερη ταχύτητα, φθάνουν στους σταθμούς παρατήρησης πριν από τα άλλα είδη σεισμικών κυμάτων. Μπορούν να κινηθούν μέσω των συμπαγών σχηματισμών της γης αλλά και των ρευστών, όπως το νερό ή τα ρευστά στρώματα της γης. Τα κύματα P είναι ευκολότερο να αναγνωριστούν και γι' αυτό χρησιμοποιούνται κατά κόρο στις σεισμικές μεθόδους για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη δομή των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης.

Στα εγκάρσια κύματα, η διεύθυνση ταλάντωσης των υλικών σημείων είναι κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (Σχήμα 1.1). Μπορούν να διαδοθούν σε οποιοδήποτε μέσο αρκεί να παρουσιάζει έστω και την ελάχιστη αντίσταση στην κάμψη, δηλαδή ο συντελεστής ακαμψίας ή το μέτρο διατμητικής παραμόρφωσης μ, να είναι διάφορο του μηδενός. Στα ρευστά όμως ο συντελεστής ακαμψίας ισούται με το μηδέν και επομένως τα εγκάρσια κύματα δεν διαδίδονται μέσω αυτών. Η ταχύτητα διάδοσής τους είναι μικρότερη από την ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων, γι' αυτό τα εγκάρσια κύματα φθάνουν μετά τα διαμήκη και συμβολίζονται με το S (S – waves). Συνήθως, το διάνυσμα της μετατόπισης των υλικών σημείων αναλύεται σε δύο συνιστώσες. Η οριζόντια συνιστώσα συμβολίζεται με το SH και η κατακόρυφη με το SV, οι οποίες και βρίσκονται στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο που περιέχει το διάνυσμα της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος, αντίστοιχα.



Σχήμα 1.1: Διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων P και S σε σχέση με τη μετατόπιση των υλικών σημείων. Στο σχήμα απεικονίζεται η διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων με το κόκκινο βέλος, οι κινήσεις των υλικών σημείων με πυκνώματα (compressions) και αραιώματα (dilations), το μήκος κύματος (wavelength) και το πλάτος (double amplitude) των S κυμάτων (samjshah.files.wordpress.com/2008/07/pswaves_lrg.gif).

Τα κύματα Rayleigh είναι σύνθετα επιφανειακά κύματα αποτελούμενα από P και SV συνιστώσες με αναλογία πλατών στην επιφάνεια του εδάφους 1 : 1.4. Δηλαδή, οι ταλαντώσεις των υλικών σημείων πραγματοποιούνται τόσο στο κατακόρυφο όσο και στο οριζόντιο επίπεδο το οποίο περιέχει τη διεύθυνση διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων (Σχήμα 1.2). Οι ταλαντώσεις υλικού σημείου που αντιστοιχούν σε P και SV συνιστώσες της μετατόπισης είναι ίδιας συχνότητας αλλά διαφορετικής φάσης με αποτέλεσμα τα υλικά σημεία στην επιφάνεια του εδάφους να ακολουθούν ελλειπτική τροχιά με φορά αντίθετη της φοράς του ρολογιού. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων Rayleigh είναι μικρότερη από την ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων.

Τα κύματα Love και ψευδο – Rayleigh δημιουργούνται από τη συμβολή ολικά ανακλώμενων κυμάτων χώρου. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία αυτών των κυμάτων είναι η ύπαρξη λεπτού γεωλογικού στρώματος κοντά στην επιφάνεια της γης. Τα κύματα Love είναι κύματα συμβολής πολλαπλά ανακλώμενων κυμάτων – SH. Τα υλικά σημεία κατά τη διάδοση των κυμάτων Love πραγματοποιούν ταλαντώσεις οριζόντιας διεύθυνσης, κάθετης στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (Σχήμα 1.2). Η ταχύτητα των κυμάτων Love είναι συνήθως μικρότερη από την ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων. Αν και διαδίδονται με μικρή ταχύτητα, είναι πολύ καταστρεπτικά, καθώς είναι τα συχνότερο υπεύθυνα κύματα για την κατάρρευση κτιρίων κατά τη

διάρκεια ενός σεισμού. Τέλος τα κύματα ψευδο – Rayleigh δημιουργούνται από τη συμβολή πολλαπλά ανακλώμενων κυμάτων Ρ ή / και SV (Βαφείδης, 1993).



Σχήμα 1.2: Ταλαντώσεις των υλικών σημείων κατά τη διάδοση των επιφανειακών κυμάτων Love και Rayleigh. Η διεύθυνση διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων απεικονίζεται με το κόκκινο βέλος (www.exo.net/~pauld/summer_institute/summer_day10waves/rayleighlove_Irg.gif).

2. ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

2.1 ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Στην περιοχή του οροπεδίου του Ομαλού (Σχήμα 2.1) σχεδιάστηκαν και πραγματοποιήθηκαν 10 σεισμικές γραμμές, οι συντεταγμένες των οποίων απεικονίζονται στο Σχήμα 2.2. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του μαθήματος του 8^{ου} εξαμήνου Ασκήσεις Υπαίθρου ΙV, τον Σεπτέμβριο του 2003. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε σεισμική διασκόπηση σε τέσσερις γραμμές μελέτης προσανατολισμένες από A – BA προς Δ – NΔ (Line 1 – 4), καθώς επίσης και σε έξι γραμμές μελέτης προσανατολισμένες προσανατολισμένες από B – BΔ προς N – NA (V1 – V6).



Σχήμα 2.1: Περιοχή διασκόπησης στο οροπέδιο του Ομαλού (Google Earth).



Σχήμα 2.2: Συντεταγμένες των σεισμικών γραμμών μελέτης σε ΕΓΣΑ '87(Βαρδιδάκη, 2005).

Σύμφωνα με τη γεωλογία της περιοχής, οι σχηματισμοί μέσω των οποίων αναμένεται να διαδοθούν τα σεισμικά κύματα είναι:

- Επιφανειακά στρώματα Τεταρτογενών αποθέσεων (αλλούβια διλούβια) μεταβλητού πάχους (μικρότερο πάχος στις παρυφές του οροπεδίου και μεγαλύτερο στο κέντρο).
- Ασβεστόλιθοι της ζώνης Τρίπολης και πλακώδεις ασβεστόλιθοι στο υπόβαθρο της περιοχής.

2.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ

Οι γραμμές μελέτης Line1, Line2, Line3 και Line4 αποτελούνται από 2 αναπτύγματα 24 γεωφώνων το κάθε ένα (Σχήμα 2.3), ενώ οι γραμμές V1, V2, V3, V4, V5 και V6 αποτελούνται από 1 ανάπτυγμα 24 γεωφώνων (Σχήμα 2.4). Σε κάθε γραμμή μελέτης πραγματοποιήθηκαν καταγραφές με τη διάταξη κοινής πηγής, τόσο για την απόκτηση κυμάτων χώρου, όσο και για την απόκτηση επιφανειακών κυμάτων. Οι θέσεις των πηγών και των γεωφώνων απεικονίζονται ενδεικτικά για τη γραμμή μελέτης Line2 στο Σχήμα 2.3, το οποίο όμως περιγράφει κατ' αντιστοιχία τη γεωμετρία όλων των οριζόντιων γραμμών μελέτης. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 2.4 απεικονίζονται ενδεικτικά

οι θέσεις των πηγών και των γεωφώνων για τη γραμμή μελέτης V1, περιγράφοντας τη γεωμετρία όλων των κάθετων γραμμών μελέτης.

Ο ρυθμός δειγματοληψίας και η διάρκεια καταγραφής έχουν οριστεί για όλες τις καταγραφές σε 0.2 ms και 409.4 ms (2048 δείγματα ανά σεισμικό ίχνος), αντίστοιχα.



Σχήμα 2.3: Θέσεις πηγών και γεωφώνων για τη γραμμή μελέτης Line2. Η γραμμή αυτή αποτελείται από δύο αναπτύγματα γεωφώνων (spread A και spread B), με το πρώτο γεώφωνο του B αναπτύγματος τοποθετημένο 2 m δυτικότερα από το 24° γεώφωνο του A αναπτύγματος.



Σχήμα 2.4: Θέσεις πηγών και γεωφώνων για τη γραμμή μελέτης V. Η γραμμή αυτή αποτελείται από ένα ανάπτυγμα γεωφώνων (spread A).

Η συνολική διαδικασία απόκτησης των σεισμικών κυμάτων πραγματοποιήθηκε με τα εξής βήματα :

- Οριοθέτηση του πρώτου αναπτύγματος γεωφώνων με μετροταινίες.
- Τοποθέτηση του σεισμογράφου στο κέντρο της γραμμής μελέτης και άπλωμα των
 2 καλωδίων των γεωφώνων αντιδιαμετρικά από αυτόν με προσοχή έτσι ώστε να υπάρχει μια υποδοχή για γεώφωνο κάθε 2 m (ισαπόσταση γεωφώνων).
- Προσεκτικό κάρφωμα των γεωφώνων κατακόρυφης συνιστώσας (ιδιοσυχνότητας 14 Hz) στο έδαφος ακριβώς δίπλα στην μετροταινία σε ισαποστάσεις των 2m.

- Τοποθέτηση της πηγής (σιδερένιας πλάκας με σφυρί) σε μία θέση, σύμφωνα με το σχέδιο του Σχήματος 2.3 ή 2.4.
- Λήψη των καταγραφών των σεισμικών κυμάτων για την συγκεκριμένη θέση.
- Τοποθέτηση της πηγής σε επόμενη θέση και επανάληψη του παραπάνω βήματος.
- Αφού ολοκληρωθούν οι καταγραφές για το πρώτο ανάπτυγμα, η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για το δεύτερο ανάπτυγμα γεωφώνων της γραμμής μελέτης (όπως έχει σχεδιαστεί).

2.3 ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

2.3.1 Σεισμική διάθλαση Ρ – κυμάτων

Για τον καθορισμό της δομής του υπεδάφους με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης P - κυμάτων, χρησιμοποιούνται γεώφωνα κατακόρυφης συνιστώσας, τα οποία είναι ευαίσθητα στην κατακόρυφη ταλάντωση του εδάφους. Στη συνέχεια, σε ορισμένο σημείο το οποίο συνήθως βρίσκεται κατά μήκος της γραμμής μελέτης, πραγματοποιείται σεισμική διέγερση με πηγή που δημιουργεί σεισμικά κύματα με μεγάλη κατανομή της ενέργειας στα διαμήκη κύματα (π.χ. έκρηξη, πίπτον βάρος, χτύπημα με βαριοπούλα σε μεταλλική πλάκα κ.α.) και καταγράφονται οι μετρήσεις. Κρατώντας σταθερά τα γεώφωνα, μετακινείται η θέση της πηγής σε άλλο σημείο της γραμμής μελέτης και επαναλαμβάνεται η διαδικασία, όπως περιγράψαμε προηγουμένως.

2.3.2 Επιφανειακά κύματα

Στην περίπτωση των επιφανειακών κυμάτων, μεγάλη σημασία αποτελεί η απόκτηση των σεισμικών δεδομένων έτσι ώστε να περιέχουν όσο το δυνατόν περισσότερες καταγραφές από επιφανειακά κύματα (κυρίως Rayleigh) και λιγότερες από κύματα χώρου. Αυτό, επιτυγχάνεται τόσο με κατάλληλη επιλογή πηγής, όσο και με κατάλληλη διάταξη πηγής – γεωφώνων. Η λήψη των σημάτων με την ανάπτυξη των πολυκάναλων καταγραφικών οργάνων (ψηφιακών σεισμογράφων), γίνεται ταυτόχρονα από πολλά γεώφωνα, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα βελτίωσης του λόγου σήματος / θορύβου, κάλυψης μεγάλων αποστάσεων διασκόπησης και δραστικής μείωσης των εργασιών πεδίου.

Το ανάγλυφο της περιοχής επηρεάζει σημαντικά τη δημιουργία επιφανειακών κυμάτων. Σε σεισμική διασκόπηση που λαμβάνει χώρα σε σχεδόν οριζόντια επιφάνεια η δημιουργία επιφανειακών κυμάτων ευνοείται, σε αντίθεση με την περίπτωση όπου το ανάγλυφο της περιοχής είναι έντονο και συγκεκριμένα ξεπερνά το 10% του μήκους του αναπτύγματος των γεωφώνων.

Η πηγή παίζει σημαντικό ρόλο στη λήψη των δεδομένων, καθώς, όσο πιο πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο παρέχει, τόσο περισσότερα μήκη κύματος παράγονται, με αποτέλεσμα την καλύτερη διάκριση των εδαφικών στρώσεων.

Eπιπλέον, το μέγιστο βάθος διασκόπησης (Z_{max}) καθορίζεται από το μέγιστο μήκος κύματος (L_{max}) , σύμφωνα με τη σχέση (www.masw.com/DataAcquisition.html): $Z_{max} \approx 0.5 L_{max}$ (2.1)

Η άθροιση καταγραφών από πολλαπλές κρούσεις στο σημείο της πηγής, μειώνει σημαντικά το περιβάλλοντα θόρυβο και γι' αυτό συνιστάται ιδιαίτερα σε περιπτώσεις καταγραφών που γίνονται σε αστικές περιοχές. Ο συνήθης αριθμός καταγραφών είναι από τρεις έως πέντε. Ο αριθμός αυτός όμως πρέπει να αυξηθεί όταν αυξηθούν τα επίπεδα του περιβάλλοντος θορύβου ή/και όταν αυξηθεί το μήκος της γραμμής μελέτης.

Η θέση της πηγής επηρεάζει σημαντικά τις σεισμικές καταγραφές όσον αφορά την επίδραση του θορύβου. Η βέλτιστη θέση της σεισμικής πηγής υπολογίζεται σε ένα εύρος τιμών με ελάχιστο το 20% και μέγιστο το 100% του μήκους της γραμμής μελέτης (D). Επιπλέον η θέση της πηγής σε σχέση με τη διάταξη των γεωφώνων, παίζει σημαντικό ρόλο όσον αφορά στη λήψη των χαρακτηριστικών καμπύλων διασποράς. Έτσι έχει παρατηρηθεί (Ραπτάκης, 1995) ότι με τον ίδιο τύπο πηγής προκλήθηκαν, για τη μικρή απόσταση πηγής – γεωφώνου η θεμελιώδης χαρακτηριστική καμπύλη διασποράς, ενώ για την κατά πολύ μεγαλύτερη αντίστοιχη απόσταση, εκτός της θεμελιώδους, προκύπτει και μια χαρακτηριστική καμπύλη ανώτερης τάξης.

Εκτός από το συχνοτικό περιεχόμενο της πηγής, σημαντικό ρόλο στην "ποιότητα" του σήματος παίζει και η συχνοτική απόκριση των γεωφώνων. Τα γεώφωνα που χρησιμοποιούνται είναι χαμηλής ιδιοσυχνότητας της τάξεως από 1.0. έως 4.5 Hz, καθώς υποβοηθούν στην καταγραφή κυμάτων μεγάλης περιόδου και άρα και στην εξασφάλιση διασκόπησης σε μεγαλύτερα βάθη, απ' ότι σε σχέση με τα γεώφωνα υψηλότερων ιδιοσυχνοτήτων.

Τα κριτήρια για την επιλογή των διαστημάτων dx μεταξύ των γεωφώνων διαμορφώνονται ανάλογα με τους επιδιωκόμενους σκοπούς. Η ισαπόσταση των γεωφώνων συνδέεται με το ελάχιστο μήκος κύματος των καταγραφών (L_{min}) και συνεπώς καθορίζει το ελάχιστο βάθος της σεισμικής διασκόπησης (Z_{min}) (www.masw.com/DataAcquisition.html):

$$Z_{min} = kdx$$
 (0.3 $\le k \le 1.0$) (2.2)

9

Το μήκος της διάταξης (D), συνδέεται άμεσα με το μέγιστο μήκος κύματος (L_{max}) που παρατηρείται στις καταγραφές, συνεπώς και με το μέγιστο βάθος της διασκόπησης (Z_{max}) (www.masw.com/DataAcquisition.html):

$$D = mZ_{max}$$
 (1 ≤ m ≤ 3) (2.3)

Στην πράξη, το μέγιστο μήκος κύματος (L_{max}) και συνεπώς το μήκος της διάταξης (D) συνήθως περιορίζονται από τη σεισμική πηγή στα 50 με 100 m. Μια σχετικά μικρή ισαπόσταση γεωφώνων δίνει τη δυνατότητα κυρίως της λεπτομερέστερης διασκόπησης των επιφανειακών σχηματισμών, ενώ με μεγάλο μήκος επιτυγχάνεται η διείσδυση σε μεγάλα βάθη.

Σημαντική είναι και η ρύθμιση των παραμέτρων καταγραφής. Το διάστημα δειγματοληψίας που χρησιμοποιείται συνήθως είναι 1 ms με συνολικό χρόνο καταγραφής 1 s. Σε περίπτωση πολύ χαμηλών ταχυτήτων Vs (μικρότερες των 100 m/sec), ο συνολικός χρόνος καταγραφής αυξάνεται (π.χ. 2 s). Μεγαλύτερος χρόνος καταγραφής συνιστάται επίσης όταν η γραμμή μελέτης έχει μεγάλο μήκος (π.χ. μεγαλύτερο των 100 m). Όμως σε κάθε περίπτωση, ένας μεγάλος χρόνος καταγραφής (π.χ. μεγαλύτερος ή ίσος των 5 s) είναι ανεπιθύμητος καθώς αυξάνει την πιθανότητα καταγραφής θορύβου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται φανερό ότι η γεωμετρία της διάταξης στο πεδίο καθώς και τα χαρακτηριστικά της πηγής και των γεωφώνων, έχουν μεγάλη σημασία για τον προσδιορισμό των πειραματικών καμπυλών σκέδασης και επομένως επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα της κατανομής της ταχύτητας Vs με το βάθος.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.1) παρουσιάζονται περιληπτικά οι βέλτιστες παράμετροι που πρέπει να τηρούνται κατά τη λήψη των καταγραφών επιφανειακών κυμάτων, οι οποίες όμως ανανεώνονται συνεχώς από τους επιστήμονες.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, οι ίδιες καταγραφές που πραγματοποιήθηκαν για το πείραμα της σεισμικής διάθλασης χρησιμοποιήθηκαν και για την επεξεργασία των επιφανειακών κυμάτων με τη μέθοδο της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh.

10

Πίνακας 2.1: Παράμετροι καταγραφών επιφανειακών κυμάτων: 1) το μέγιστο βάθος διασκόπησης, 2) το βάρος του σφυριού σε λίμπρες, 3) η ιδιοσυχνότητα των γεωφώνων, 4) το μήκος της διάταξης των γεωφώνων (D), 5) x₁ η απόσταση της πηγής από το πλησιέστερο γεώφωνο, Receiver Spacing (dx): η ισαπόσταση των γεωφώνων για καταγραφές 24 (24 - ch) και 48 (48 - ch) καναλιών, 8) παράμετροι καταγραφών, 9) διάστημα δειγματοληψίας (ms), 10) συνολικός χρόνος καταγραφών σε δευτερόλεπτα (sec), 11) ο αριθμός δεδομένων που προστίθενται με την πηγή στην ίδια θέση υπό διαφορετικές συνθήκες θορύβου: με ηρεμία (C), θόρυβο (N) και έντονο θόρυβο (VN) (www.masw.com/DataAcquisition.html).

Depth				Receiver Spr	ead (RS) (n	1)		Reco	Recording ⁸			
(Z _{max}) ¹	Source (S) ²	Receiver (R) ³	Length ⁴	h ⁴ Source Offset ⁵ (X ₁)	Receiver S	pacing (dx)	dt ⁹	T ¹⁰	Vertical Stack ¹¹			
(m)	(lb)	(Hz)	(D)		24-ch*	48-ch	(ms)	(sec)	С	N	VN	
≤ 1.0	≤1	4.5-100	1-3	0.2-3.0	0.05-0.1	0.02-0.05	0.5-1.0	0.5-1.0	1-3	3–5	5–10	
	<u>(1)</u> **	(40)	(2.0)	<u>(0.4)</u>	(0.1)	(0.05)	(0.5)	(0.5)	<u>(3)</u>	<u>(5)</u>	(10)	
1-5	1–5	4.5-40	1-15	0.2-15	0.05-0.6	0.02-0.3	0.5-1.0	0.5-1.0	1-3	3–5	5-10	
	<u>(5)</u>	<u>(10)</u>	<u>(10)</u>	(2)	(0.5)	(0.25)	(0.5)	(0.5)	(3)	(5)	(10)	
5-10	5-10	≤ 10	5-30	1-30	0.2-1.2	0.1-0.6	0.5-1.0	0.5-1.0	1-3	3–5	5-10	
10000	(10)	(4.5)	(20)	(4)	(1.0)	(0.5)	<u>(0.5)</u>	<u>(1.0)</u>	(3)	<u>(5)</u>	(10)	
10-20	≥10	≤ 10	10-60	2-60	0.4-2.5	0.2-1.2	0.5-1.0	1.0-2.0	1-3	3-5	5-10	
	(20)	(4.5)	(30)	(10)	(1.5)	(1.0)	<u>(0.5)</u>	(1.0)	(3)	<u>(5)</u>	(10)	
20-30	≥10	≤ 4.5	20-90	4-90	0.8-3.8	0.4-1.9	0.5-1.0	1.0-2.0	1-3	3-5	5-10	
	(20)	(4.5)	(50)	(10)	(2.0)	(1.5)	(1.0)	(1.0)	(3)	(5)	(10)	
30-50	≥ 10 <u>(20)</u>	≤ 4.5	30-150	6-150	1.2-6.0	0.6-3.0	0.5-1.0	1.0-3.0	1-3	3–5	5-10	
	or passive	(4.5)	(70)	<u>(15)</u>	(3.0)	(2.0)	(1.0)	(1.0)	(3)	<u>(5)</u>	(10)	
> 50	≥ 10 <u>(20)</u>	≤ 4.5	> 50	> 10	> 2.0	> 1.0	0.5-1.0	≥ 1.0	1-3	3-5	5-10	
	or passive	(4.5)	(150)	(30)	(6.0)	(4.0)	(1.0)	<u>(2.0)</u>	(3)	<u>(5)</u>	<u>(10)</u>	

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ, ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

3.1.1 Βασικές αρχές της μεθόδου ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων

Το φαινόμενο της διασποράς των επιφανειακών κυμάτων και ειδικότερα των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh, δηλαδή της εξάρτησης της ταχύτητας φάσης από τη συχνότητα, έχει αποτελέσει τα τελευταία χρόνια εφαλτήριο για την εφαρμογή σύγχρονων τεχνικών της γεωτεχνικής και περιβαλλοντικής γεωφυσικής. Στις μέρες μας, η ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh χρησιμοποιείται ευρύτατα για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων.

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 από τις καταγραφές.

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 3.1). 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 Knopoff, 1972). Τροποποιώντας επαναληπτικά το εδαφικό μοντέλο επιτυγχάνεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης διασποράς στην πειραματική (διαδικασία που ονομάζεται αντιστροφή). Έτσι, εφόσον πραγματοποιηθεί ταύτιση των καμπύλων, προσδιορίζεται το τελικό εδαφικό μοντέλο (κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (Vs) με το βάθος). Η κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας Vs αντιστοιχείται στο κέντρο της διάταξης των γεωφώνων.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής που περιγράφει τη μεθοδολογία της ανάλυσης των κυμάτων Rayleigh (Κρητικάκης κ.α., 2004).

α) Στάδιο 1

i) Απόκτηση σεισμικών καταγραφών

Στα πειράματα σεισμικής διασκόπησης, τα επιφανειακά κύματα εμφανίζονται στα σεισμογράμματα μετά τα κύματα χώρου και αναγνωρίζονται από το μεγάλο πλάτος και τη σχετικά χαμηλή συχνότητά τους. Για την συλλογή των σεισμικών δεδομένων συνήθως χρησιμοποιείται διάταξη κοινής πηγής. Η σεισμική πηγή παίζει σημαντικό ρόλο για τη λήψη των δεδομένων, καθώς όσο πιο πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο παρέχει, τόσο καλύτερη ανάλυση επιτυγχάνεται. Επίσης, για τη διασκόπηση βαθύτερων γεωλογικών σχηματισμών απαιτείται η καταγραφή σημαντικής ενέργειας επιφανειακών κυμάτων Rayleigh σε χαμηλές συχνότητες.

ii) Μετασχηματισμός του κυματικού πεδίου

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες διασποράς των επιφανειακών κυμάτων που καταγράφονται από διάταξη κοινής πηγής προκύπτουν μετά την εφαρμογή ενός μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου από τον χώρο απόστασης – χρόνου (x – t) στον χώρο ταχύτητας φάσης – συχνότητας (c – f) (McMechan and Yedlin, 1981). Ο μετασχηματισμός αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση τη σχέση (Κρητικάκης κ.α., 2004):

$$\widetilde{S}(c,f) = \sum_{x} \widetilde{U}(x,f) \cdot e^{-i2\pi f \frac{1}{c}x}$$
(3.1)

όπου το Š εκφράζει το κυματικό πεδίο στο χώρο (c – f) και το Ũ εκφράζει την κατακόρυφη μετατόπιση των υλικών σημείων στο χώρο απόστασης – συχνότητας (x – f).

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 3.2: Απεικόνιση των καμπύλων διασποράς (σταυροί) των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh στο πεδίο ταχύτητας φάσης (κατακόρυφος άξονας) – συχνότητας (οριζόντιος άξονας) για τις καταγραφές στη γραμμή μελέτης V2. Η χρωματική κλίμακα (δεξιά) απεικονίζει τις τιμές της σεισμικής ενέργειας.

β) Στάδιο 2

i) Προσδιορισμός αρχικού εδαφικού μοντέλου

Κατά τη διαδικασία της αντιστροφής, για την επιτυχή σύγκλιση των θεωρητικών στις πειραματικές καμπύλες διασποράς, απαιτείται το αρχικό μοντέλο να βρίσκεται «σχετικά» κοντά στη γειτονιά της λύσης. Επομένως, για την ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh είναι πολύ σημαντική η επιλογή κατάλληλου αρχικού εδαφικού μοντέλου.

Έτσι, για τον προσδιορισμό του αρχικού εδαφικού μοντέλου λαμβάνονται υπόψη τα εξής: Από τις καμπύλες διασποράς και για κάθε τιμή της ταχύτητας φάσης και συχνότητας είναι δυνατό να προσδιοριστεί το αντίστοιχο μήκος κύματος των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh, σύμφωνα με τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής:

 $\mathbf{c}_{\mathsf{R}} = \boldsymbol{\lambda}_{\mathsf{R}} \cdot \mathbf{f}_{\mathsf{R}} \tag{3.2}$

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

- Κατά τη διάδοση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh σε ομοιογενή ημιχώρο, η κατακόρυφη μετατόπιση των υλικών σημείων σε βάθος ίσο με το μήκος κύματός τους ισούται περίπου με το 15 % της μετατόπισης 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 ομοιογενές μέσο συνδέεται με την ταχύτητα των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (Vs) με τη σχέση:

 $c_{R} = a \cdot Vs(f_{i})$

(3.3)

όπου ο αριθμητικός συντελεστής a 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).

 Το μήκος κύματος των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh υπολογίζεται από την εξίσωση 3.2.

Στη συνέχεια καθορίζεται το μέγιστο βάθος (h) διείσδυσης των επιφανειακών κυμάτων και το πάχος (d) των στρωμάτων του εδαφικού μοντέλου, το οποίο συνήθως αυξάνεται με το βάθος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ικανοποιητική εκτίμηση της κατανομής της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων με το βάθος. Ακολούθως, θεωρώντας σταθερό λόγο Poisson (v) για κάθε εδαφικό στρώμα είναι δυνατό να εκτιμηθεί η ταχύτητα των διαμηκών κυμάτων (Vp). Τέλος, με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων εκτιμάται και η πυκνότητα κάθε εδαφικού στρώματος. Πληροφορίες από άλλες μεθόδους που αφορούν την ταχύτητα των διαμηκών κυμάτων κυμάτων κυμάτων και την πυκνότητα των γεωλογικών σχηματισμών είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν απευθείας ως παράμετροι του αρχικού εδαφικού μοντέλου.

ii) Επίλυση του ευθέως προβλήματος

Η ταχύτητα φάσης των κυμάτων Rayleigh, c_{Ri}, προσδιορίζεται από τη συνάρτηση διασποράς F στη μη γραμμική και πεπλεγμένη της μορφή (Schwab and Knopoff, 1972):

 $F(f_i, c_{Ri}, Vs, Vp, \rho, d) = 0 \qquad (i = 1, 2, 3, ..., n)$ (3.4)

όπου f_i είναι η συχνότητα σε Hz, c_{Ri} είναι η ταχύτητα φάσης των κυμάτων Rayleigh για τη συχνότητα f_i, **Vs** = $[Vs_1, Vs_2, ..., Vs_m]$ είναι το διάνυσμα των ταχυτήτων των S – κυμάτων, με Vs_j την ταχύτητα των S – κυμάτων του j στρώματος (j = 1, 2, ..., m), m είναι ο αριθμός των στρωμάτων, **Vp** = $[Vp_1, Vp_2, ..., Vp_m]$ είναι το διάνυσμα των ταχυτήτων των P – κυμάτων, με Vp_j την ταχύτητα των P – κυμάτων και του j στρώματος, **p** = $[p_1, p_2, ..., p_m]$ είναι το διάνυσμα των πυκνοτήτων, με ρ_j την πυκνότητα του j στρώματος και **d** = $[d_1, d_2, ..., d_{m-1}]$ είναι το διάνυσμα του πάχους των στρωμάτων, με d_j το πάχος του j στρώματος. Οι ρίζες της αναλυτικής σχέσης της συνάρτησης διασποράς για συγκεκριμένες παραμέτρους του μοντέλου (**Vs**, **Vp**, **p** και **d**) και για συχνότητα (f_i) αντιστοιχούν στις ταχύτητες φάσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh στη συγκεκριμένη συχνότητα. Για να προσδιοριστεί η ταχύτητα φάσης c_{Ri} στις διάφορες συχνότητες f_i (i = 1, 2, ..., n) χρησιμοποιείται η μέθοδος της διχοτόμησης (bisection), η οποία προσδιορίζει τις ρίζες της συνάρτησης διασποράς (Press et al., 1992).

iii) Αντιστροφή των καμπύλων διασποράς

Εφόσον ο αντικειμενικός στόχος είναι ο μηδενισμός της συνάρτησης διασποράς (εξίσωση 3.4), η ταχύτητα φάσης, c_{Ri}, για μια δεδομένη συχνότητα f_i είναι δυνατό να εκφραστεί ως συνάρτηση των ταχυτήτων των S – κυμάτων σύμφωνα με τη σχέση (Κρητικάκης, 2001):

$$c_{Ri} = c_{Ri} \left(Vs_1, Vs_2, ..., Vs_m, \{ Vp_{1,2,...,m}, \rho_{1,2,...,m}, d_{1,2,...,m} \}, f_i \right)$$
(3.5)

Η συνάρτηση αυτή (εξίσωση 3.5) είναι δυνατό να αναπτυχθεί σε σειρά Taylor ως προς Vs διατηρώντας μόνο πρώτης τάξης όρους.

Έτσι προκύπτει η σχέση:

$$\mathbf{c}_{\mathsf{R}i} - \mathbf{c}_{\mathsf{R}i}^{0} = \sum_{j=1}^{m} \frac{\partial \mathbf{c}_{\mathsf{R}i}}{\partial \mathsf{V} \mathbf{s}_{j}} \bigg|_{\substack{\mathsf{V} \mathbf{s}_{1} = \mathsf{V} \mathbf{s}_{2}^{0} \\ \mathsf{V} \mathbf{s}_{2} = \mathsf{V} \mathbf{s}_{2}^{0}}} \cdot \left(\mathsf{V} \mathbf{s}_{j} - \mathsf{V} \mathbf{s}_{j}^{0}\right)$$
(3.6)

όπου το i = 1, 2, ..., n είναι ο αριθμός των μετρήσεων, ενώ ο εκθέτης 0 συμβολίζει το αρχικό μοντέλο, τόσο για τις Vs^0 , όσο και για τις υπολογισμένες τιμές της ταχύτητας φάσης c_{Ri}^0 .

Στη διανυσματική μορφή η ίδια σχέση γράφεται ως εξής:

$$\Delta c_{R} = J_{ij} \cdot \Delta Vs \tag{3.7}$$

όπου το διάνυσμα:

$$\Delta \mathbf{c}_{\mathbf{R}} = \mathbf{c}_{\mathbf{R}} - \mathbf{c}_{\mathbf{R}}^{0} \tag{3.8}$$

εκφράζει τη διαφορά ανάμεσα στα διανύσματα της πειραματικής και θεωρητικής ταχύτητας φάσης. Το διάνυσμα:

$$\Delta \mathbf{V}\mathbf{s} = \mathbf{V}\mathbf{s} - \mathbf{V}\mathbf{s}^{0} \tag{3.9}$$

περιέχει την άγνωστη ταχύτητα **Vs** αλλά και την αντίστοιχη **Vs**⁰ του αρχικού μοντέλου. Τέλος, η Ιακωβιανή **J** της συνάρτησης διασποράς, προσδιορίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{J}_{ij} = -\frac{\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{V} \mathbf{s}_{j}}}{\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{c}_{Ri}}} = -\frac{\partial \mathbf{c}_{Ri}}{\partial \mathbf{V} \mathbf{s}_{j}}$$
(3.10)

όπου το j = 1, 2, ..., m, συμβολίζει το πλήθος των εδαφικών στρωμάτων (συμπεριλαμβανομένου και του ημιχώρου). Ο προσδιορισμός των μερικών παραγώγων της Ιακωβιανής (εξίσωση 3.10) κατά τη διαδικασία της αντιστροφής, επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της πολυωνυμικής παρεμβολής (polynomial extrapolation) του Ridder (Press et al., 1992).

Για το σύστημα των γραμμικών εξισώσεων (εξίσωση 3.7), ορίζεται αντικειμενική συνάρτηση, έτσι ώστε η λύση του να προκύπτει μέσω της ελαχιστοποίησής της:

$$\varepsilon = \mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{V} \mathbf{s} - \Delta \mathbf{c}_{\mathbf{R}} \, .$$

(3.11)

Για τον περιορισμό του αριθμού των πιθανών λύσεων ή/και τον προσδιορισμό ενός λογικά αποδεκτού αποτελέσματος που να προσεγγίζει την πραγματική λύση, καθώς επίσης και για τη σταθεροποίηση της διαδικασίας αντιστροφής, συνήθως εισάγονται περιορισμοί στην ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της αντιστροφής με εξομάλυνση (SMOOTHING), η οποία επιτυγχάνει αφενός να σταθεροποιεί τη διαδικασία αντιστροφής και αφετέρου, να υπολογίζει τη βέλτιστη συντηρητική εκτίμηση του πραγματικού μοντέλου, ελλείψει αξιόπιστων a – priori πληροφοριών (Meju, 1994).

3.1.2 Επεξεργασία των δεδομένων με χρήση του λογισμικού kriSIS – auto

Το kriSIS – auto αποτελείται από ένα πλήθος αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής από τον υποψήφιο διδάκτορα Κρητικάκη Γιώργο, στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής 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 3.3). Το kriSIS – auto έχει τη δυνατότητα ανάγνωσης αρχείων SEG – Υ μορφής, 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 – Υ, μέσω του ελεύθερου λογισμικού IXSeg2Segy (www.interpex.com/ixseg2segy/ixseg2segy.htm).



Σχήμα 3.3: Απεικόνιση των επιφανειακών κυμάτων κατά την εισαγωγή των σεισμικών δεδομένων στο λογισμικό Krisis – auto για τη γραμμή μελέτης V2. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης και ο κατακόρυφος τον χρόνο καταγραφής των σεισμικών κυμάτων.

Στο επόμενο στάδιο πραγματοποιείται μετασχηματισμός του κυματικού πεδίου, όπου εισάγονται παράμετροι που αφορούν στη γεωμετρία του πειράματος και του μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου (Σχήμα 3.4). Οι παράμετροι είναι οι εξής:

- 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)).

WAVEFIELD TRANSFORMATION PARAMETERS								
Shot Geometry								
Get from Headers / Set Irregular Group Interval								
First Receiver Coordinate	0.00							
Receiver Interval (m)	2.00							
Last Receiver Coordinate	46.00							
Source Coordinate	-10.00							
O Normalize amplitudes of original (t,x) data							
C Normalize amplitudes of original (t,x) data								
Minimum Phase Velocity (m/s)	100.0							
Maximum Phase Velocity (m/s)	600.0							
Velocity Increment (m/s)	1.0							
Minimum Frequency (Hz)	1.0							
Maximum Frequency (Hz)	100.0							
Frequency Increment (Hz)	1.0							
Cancel Default	OK							

Σχήμα 3.4: Παράμετροι μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου για τα σεισμικά δεδομένα του Σχήματος 3.3.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλες τις καταγραφές σε κάθε ανάπτυγμα γεωφώνων, εκτός από αυτές όπου η πηγή βρίσκεται ενδιάμεσα στη διάταξη των γεωφώνων. Ακολούθως σε κάθε ανάπτυγμα γεωφώνων επιλέγεται μόνο μία καμπύλη διασποράς με κριτήρια την ευκρίνεια και τη συνοχή της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς. Τα δεδομένα κάθε γραμμής μελέτης υφίστανται περαιτέρω επεξεργασία με

βάση την καμπύλη διασποράς που επιλέχθηκε (μία καμπύλη για τις γραμμές μονού αναπτύγματος και δύο για τις γραμμές διπλού αναπτύγματος).

Αφού λοιπόν εντοπιστεί η καταγραφή που δίνει την ευκρινέστερη θεμελιώδη 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. Στο Σχήμα 3.5 παρατίθεται ενδεικτικά η οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς για τα σεισμικά δεδομένα του Σχήματος 3.3 ενώ στο παράρτημα Γ παρατίθενται οι καμπύλες διασποράς για όλες τις υπόλοιπες γραμμές μελέτης.



Σχήμα 3.5: Οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (τετράγωνα) για τα σεισμικά δεδομένα του Σχήματος 3.3, κατά την απεικόνιση της σεισμικής ενέργειας (χρωματική κλίμακα) 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, ορίζονται οι παράμετροι της αντιστροφής (Inversion parameters) και των κριτηρίων σύγκλισης του αλγόριθμου αντιστροφής (Convergence criteria) (Σχήμα 3.6). 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. Επιλέγεται 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). Για την αντιστροφή των καμπύλων διασποράς που παρουσιάζονται στην εργασία αυτή δεν επιλέγεται η σταθμισμένη αντιστροφή.

Επιλογή περιορισμού αντιστροφής (Constraint) ανάμεσα στους περιορισμούς: α) εξομάλυνσης (Smoothing), β) απόσβεσης (Damping), γ) Τραχύτητας (Blocky), δ) συνδυασμού του α) και β) και ε) συνδυασμού του β) και γ). Επιλέγεται ο περιορισμός εξομάλυνσης (Smoothing).

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)) να είναι 0.010 m/s.

MODEL PARAMETERS INVERSION PARAMETERS No of Layers 16 A / depth ratio 2.0 OR Quasi-Newton A / depth ratio 2.0 OR Quasi-Newton Layer thickness DC error Variable Equal Calculate from DC Constraint Calculate from DC Constraint Coarse Medium Fix all Vp all Pois Otimizing RMS Min % RMS Error Load Default Default Default In xall Vp all Pois 0.400 Fix all Pois fix all Vp all Pois 0.400 Fix all Pois fix all Vp all Pois 0.400 1.824 1 0.61 0.622.4 1.254.1 1 0.400 1.20.83 1.226.61 1 0.400 1.824 1 0.400 1.826 1 0.400 1.826	Dispersion Curve Inversion												
No of Layers 16 → à / depth ratio 2.0 → DR	MODEL PARAMETERS INVERSION PARAMETERS CONVERGENCE CRITERIA									_			
À / depth ratio 20 ↓ B 10.27 ↓ Layer thickness Cobian Custimut Variable Equal Constraint Damping Colorarse Medium Fine Constraint Damping Load Default Default Default Default Tix all Vp all Pois 0.400 fix all Pois fix all Pois 1 0.61 622.4 1 256.4 0.400 fix all Pois 1 0.61 622.4 1 256.4 0.400 1.824 1 2 0.83 0.22 628.0 1 256.4 0.400 1.824 1 2 0.83 0.22 628.0 1 256.4 0.400 1.824 1 3 1.10 0.27 688.5 1 272.9 1 0.400 1.849 1 3 1.79 0.55 757.1 1 309.1 1 0.400 1.849 1 4 1.42 0.24 0.400 0	No of L	avers	16		Ст.н				Optimizing BMS				
À / depth ratio 2.0 → DR 10.27 Layer thickness Conbined Calculate from DC Constraint Coarse Medium Load Default Default Default Default Default Load Default Default Default Constraint Damping fixed Vp sec or constraint 1 0.61 622.4 2 0.83 0.22 628.0 3 1.10 0.27 668.5 1 272.9 3 1.0 0.27 668.5 1 272.9 3 1.0 <t< td=""><td></td><td></td><td>1 10</td><td></td><td>acobian (</td><td>🗇 Quasi-Ne</td><td>ewton</td><td></td><td colspan="3"></td><td></td></t<>			1 10		acobian (🗇 Quasi-Ne	ewton						
OR C DC error max.depth 10.27 Layer thickness Fidobust Inversion Calculate from DC Combined Coarse Medium Fine Load Default Default Default Default Min % RMS Error 1.0 Constraint Damping Min % satisfied (m/s) 0.010 Tix all Vp all Pois 0.400 Fix all Pois fix all pois Constraint Default Default Default Default Tix all Vp all Pois 0.400 Fix all pois fix all pois Constraint Default Default Default Default Tix all Vp all Pois 0.400 Fix all pois fix all pois Constraint Default Default Default Default Tix all Vp all Pois 0.400 1.826 Tix all pois Constraint Default Default Default Default A 1.0 Consis on fixed Pois <t< td=""><td>∂ / dep</td><td>th ratio</td><td>2.0</td><td></td><td colspan="4"></td><td colspan="3">Max Iterations</td><td>30</td><td>Ī</td></t<>	∂ / dep	th ratio	2.0						Max Iterations			30	Ī
max.depth 10.27 Layer thickness Figure (Sacobial Values Variable Equal Calculate from DC Constraint Damping Coarse Medium Fine Load Default Default Min Vs correction for RMS satisfied (m/s) 0.010 ▼ K all Vp all Pois 0.400 ▼ fix all Pois fix all pois Z (m) Thickness (m) Vp (m/s) fixed Vp Vs (m/s) fixed Vs Poisson fixed Pois p (g/cc) fixed p 1 0.61 0.61 622.4 1 256.4 1 0.400 0 1.826 1 2 0.83 0.22 628.0 1 276.4 1 0.400 0 1.826 1 3 1.10 0.27 668.5 1 272.9 1 0.400 0 1.834 1 4 1.42 0.32 697.9 1 284.9 1 0.400 0 1.834 1 5 1.78 0.36 734.4 1 299.8 1	OR) • • • • • •	DC error			Min % BMS Error			1.0	
Layer thickness Import Street Max Vs correction for RMS satisfied (m/s) Calculate from DC Constraint Damping Min Vs correction for RMS not satisfied (m/s) Load Default Default Default Default Ecod Default Default Default Default Tix all Vp all Pois 0.400 ✓ fix all Pois fix all pois Z (m) Thickness (m) Vp (m/s) fixed Vp Vs (m/s) fixed Vs Poisson fixed Pois p (g/cc) fixed p 1 0.61 0.61 622.4 1 256.4 1 0.400 0 1.824 1 2 0.83 0.22 628.0 1 272.9 1 0.400 0 1.834 1 3 1.10 0.27 668.5 1 272.9 1 0.400 0 1.834 1 4 1.42 0.32 697.3 1 284.9 1 0.400 0 1.849 1 7 2.79 0.55 757.1 1 305.1 1	max de	pth	10.27		eighting (Jacobiar	n Values		1111178	AND		1 1.0	-
Variable Equal Smoothing Interference Interference		Layer	thickness		,	HODUST	nversion		MaxV	's correction		10	
Calculate from DC Constraint Damping Blocky Min Vs correction for MS NOT satisfied (m/s) 0.010 ▲ Load Default	🔘 Vari	able	O Ec	jual	(🖲 Smoothir	ng c	1	for RN	1S satisfied	(m/s)		-
Coarse Medium Fine Blocky BMS NOT satisfied (m/s) 0.010 Load Default Default Default Default Default Default Example Default Default Default Default Default Default Example Image: Coarse Medium Fixed Vp Steed Vp Steed Vs Poisson fixed Pois p(g/cc) fixed p 1 0.61 0.61 622.4 1 256.4 1 0.400 0 1.824 1 2 0.83 0.22 628.0 1 256.4 1 0.400 0 1.824 1 3 1.10 0.27 668.5 1 272.9 1 0.400 0 1.844 1 4 1.42 0.32 697.9 1 284.9 1 0.400 0 1.844 1 5 1.78 0.36 734.4 1 299.8 1 0.400 0		Calculat	te from DC	c	onstraint 🤇	🗇 Damping			Min V:	s correction	for		-
Load Default Default Default Default fix all Vp all Pois 0.400 ✓ fix all Pois fix all Pois Z (m) Thickness (m) Vp (m/s) fix adl Vp Vs (m/s) fix adl Vs Poisson fix adl Pois p(g/cc) fix adl poist 1 0.61 0.61 622.4 1 256.4 1 0.400 0 1.824 1 2 0.83 0.22 628.0 1 256.4 1 0.400 0 1.824 1 3 1.10 0.22 668.5 1 272.9 1 0.400 0 1.844 1 4 1.42 0.32 697.9 1 224.9 1 0.400 0 1.844 1 5 1.78 0.36 734.4 1 299.8 1 0.400 0 1.855 1 6 2.24 0.46 747.3 1 305.1 1 0.400 0	O Coa	rse 💿 I	Medium 🔘 Fir	ne 📗	(Blocky			RMS NOT satisfied (m/s)				
Load Derault Derault Derault fix all Vp all Pois 0.400 ✓ fix all Pois fix all P Z (m) Thickness (m) Vp (m/s) fix adl Vp Vs (m/s) fix adl Vs Poisson fix all Pois p(g/cc) fix all P 1 0.61 0.61 622.4 1 256.4 1 0.400 0 1.824 1 2 0.83 0.22 628.0 1 256.4 1 0.400 0 1.824 1 3 1.10 0.27 668.5 1 272.9 1 0.400 0 1.844 1 4 1.42 0.36 673.4 1 299.8 1 0.400 0 1.849 1 6 2.24 0.46 747.3 1 305.1 1 0.400 0 1.855 1 8 3.41 0.62 762.2 1 316.9 0.400 0 1.855 1			Defeult										
fix all Vp all Pois 0.400 ✓ fix all Pois fix all Pois		.oad	Derault	1	_	Default					efault		
Z (m) Thickness (m) Vp (m/s) fixed Vp Vs (m/s) fixed Vs Poisson fixed Pois ρ (g/cc) fixed p 1 0.61 0.61 622.4 1 254.1 1 0.400 0 1.824 1 2 0.83 0.22 628.0 1 256.4 1 0.400 0 1.824 1 3 1.10 0.27 668.5 1 272.9 1 0.400 0 1.824 1 4 1.42 0.36 673.4 1 299.8 1 0.400 0 1.849 1 5 1.78 0.36 734.4 1 299.8 1 0.400 0 1.849 1 6 2.24 0.46 747.3 1 305.1 1 0.400 0 1.851 1 8 3.41 0.62 776.2 1 316.9 1 0.400 0 1.855 1				fix al	Vp		all F	Pois	0.400	🗹 fix a	all Pois	🗌 fix	all p
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$		Z (m)	Thickness (m)	Vp (m/s)	fixed Vp	Vs (m/s)	fixed Vs	Po	oisson	fixed Pois	ρ (g/cc)	fixed p	
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	1	0.61	0.61	622.4	1	254.1	1		0.400	0	1.824	1	
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	2	0.83	0.22	628.0	1	256.4	1		0.400	0	1.826	1	
4 1.42 0.32 697.9 1 284.9 1 0.400 0 1.840 1 5 1.78 0.36 734.4 1 293.8 1 0.400 0 1.840 1 6 2.24 0.46 747.3 1 305.1 1 0.400 0 1.847 1 7 2.79 0.55 757.1 1 309.1 1 0.400 0 1.855 1 8 3.41 0.62 776.2 1 316.9 1 0.400 0 1.855 1 9 4.08 0.67 801.2 1 327.1 1 0.400 0 1.865 1 10 4.75 0.67 824.3 1 336.5 1 0.400 0 1.885 1 11 5.77 1.02 862.7 1 352.2 1 0.400 0 1.882 1 12 6	3	1.10	0.27	668.5	1	272.9	1		0.400	0	1.834	1	
5 1.78 0.36 734.4 1 299.8 1 0.400 0 1.847 1 6 2.24 0.46 747.3 1 305.1 1 0.400 0 1.847 1 7 2.79 0.55 757.1 1 309.1 1 0.400 0 1.847 1 8 3.41 0.62 776.2 1 316.9 1 0.400 0 1.855 1 9 4.08 0.67 801.2 1 327.1 1 0.400 0 1.860 1 10 4.75 0.67 824.3 1 336.5 1 0.400 0 1.885 1 11 5.77 1.02 862.7 1 352.2 1 0.400 0 1.882 1 12 6.65 0.88 910.7 1 371.8 1 0.400 0 1.882 1 13	4	1.42	0.32	697.9	1	284.9	1		0.400	0	1.840	1	
	5	1.78	0.36	734.4	1	299.8	1		0.400	0	1.847	1	
7 2.79 0.55 757.1 1 309.1 1 0.400 0 1.851 1 8 3.41 0.62 776.2 1 316.9 1 0.400 0 1.855 1 9 4.08 0.67 801.2 1 327.1 1 0.400 0 1.855 1 10 4.75 0.67 824.3 1 336.5 1 0.400 0 1.865 1 11 5.77 1.02 862.7 1 352.2 1 0.400 0 1.882 1 12 6.65 0.88 917.1 371.8 1 0.400 0 1.882 1 13 7.93 1.28 961.2 1 392.4 1 0.400 0 1.892 1 14 9.25 1.32 1077.8 1 440.0 1 0.400 0 1.925 1 15 10.27	6	2.24	0.46	747.3	1	305.1	1		0.400	0	1.849	1	
8 3.41 0.62 776.2 1 316.9 1 0.400 0 1.855 1 9 4.08 0.67 801.2 1 327.1 1 0.400 0 1.865 1 10 4.75 0.67 824.3 1 336.5 1 0.400 0 1.865 1 11 5.77 1.02 862.7 1 335.2 1 0.400 0 1.865 1 12 6.65 0.88 910.7 1 371.8 1 0.400 0 1.882 1 13 7.93 1.28 961.2 1 392.4 1 0.400 0 1.882 1 14 9.25 1.32 1077.8 1 440.0 1 0.400 0 1.925 1 15 10.27 1.02 1126.8 1 460.0 1 0.400 0 1.931 1 16	7	2.79	0.55	757.1	1	309.1	1		0.400	0	1.851	1	
9 4.08 0.67 801.2 1 327.1 1 0.400 0 1.860 1 10 4.75 0.67 824.3 1 336.5 1 0.400 0 1.865 1 11 5.77 1.02 862.7 1 352.2 1 0.400 0 1.865 1 12 6.65 0.88 910.7 1 371.8 1 0.400 0 1.882 1 13 7.93 1.28 961.2 1 332.4 1 0.400 0 1.882 1 14 9.25 1.32 1077.8 1 440.0 1 0.400 0 1.976 1 15 10.27 1.02 1126.8 1 440.0 1 0.400 0 1.925 1 16 10.27 0.00 1155.7 1 471.8 1 0.400 0 1.931 1	8	3.41	0.62	776.2	1	316.9	1		0.400	0	1.855	1	
10 4.75 0.67 824.3 1 336.5 1 0.400 0 1.865 1 11 5.77 1.02 862.7 1 352.2 1 0.400 0 1.873 1 12 6.65 0.88 910.7 1 371.8 1 0.400 0 1.882 1 13 7.93 1.28 961.2 1 392.4 1 0.400 0 1.892 1 14 9.25 1.32 1077.8 1 440.0 1 0.400 0 1.995 1 15 10.27 1.02 1126.8 1 460.0 1 0.400 0 1.925 1 16 10.27 0.00 1155.7 1 471.8 1 0.400 0 1.931 1	9	4.08	0.67	801.2	1	327.1	1		0.400	0	1.860	1	
11 5.77 1.02 862.7 1 352.2 1 0.400 0 1.873 1 12 6.65 0.88 910.7 1 371.8 1 0.400 0 1.882 1 13 7.93 1.28 961.2 1 392.4 1 0.400 0 1.882 1 14 9.25 1.32 107.8 1 392.4 1 0.400 0 1.892 1 14 9.25 1.32 107.78 1 440.0 1 0.400 0 1.916 1 15 10.27 1.02 1126.8 1 440.0 1 0.400 0 1.925 1 16 10.27 0.00 1155.7 1 471.8 1 0.400 0 1.931 1	10	4.75	0.67	824.3	1	336.5	1		0.400	0	1.865	1	
12 6.65 0.88 910.7 1 371.8 1 0.400 0 1.882 1 13 7.93 1.28 961.2 1 392.4 1 0.400 0 1.882 1 14 9.25 1.32 1077.8 1 440.0 1 0.400 0 1.916 1 15 10.27 1.02 1126.8 1 460.0 1 0.400 0 1.925 1 16 10.27 0.00 1155.7 1 471.8 1 0.400 0 1.931 1	11	5.77	1.02	862.7	1	352.2	1		0.400	0	1.873	1	
13 7.93 1.28 961.2 1 392.4 1 0.400 0 1.892 1 14 9.25 1.32 1077.8 1 440.0 1 0.400 0 1.916 1 15 10.27 1.02 1126.8 1 460.0 1 0.400 0 1.925 1 16 10.27 0.00 1155.7 1 471.8 1 0.400 0 1.931 1	12	6.65	0.88	910.7	1	371.8	1		0.400	0	1.882	1	
14 9.25 1.32 1077.8 1 440.0 1 0.400 0 1.916 1 15 10.27 1.02 1126.8 1 460.0 1 0.400 0 1.925 1 16 10.27 0.00 1155.7 1 471.8 1 0.400 0 1.931 1	13	7.93	1.28	961.2	1	392.4	1		0.400	0	1.892	1	
15 10.27 1.02 1126.8 1 460.0 1 0.400 0 1.925 1 16 10.27 0.00 1155.7 1 471.8 1 0.400 0 1.931 1	14	9.25	1.32	1077.8	1	440.0	1		0.400	0	1.916	1	
<u>16</u> 10.27 0.00 1155.7 1 471.8 1 0.400 0 1.931 1	15	10.27	1.02	1126.8	1	460.0	1		0.400	0	1.925	1	
	16	10.27	0.00	1155.7	1	471.8	1		0.400	0	1.931	1	

Σχήμα 3.6: Ορισμός των παραμέτρων του αρχικού μοντέλου (model parameters), των παραμέτρων αντιστροφής (Inversion parameters) και των κριτηρίων σύγκλισης για την αντιστροφή της καμπύλης διασποράς της γραμμής μελέτης V2.

Όσον αφορά στις παραμέτρους του αρχικού μοντέλου (πάχος στρωμάτων, ταχύτητα Vp, ταχύτητα Vs και πυκνότητα) ορίζονται αυτόματα από την θεμελιώδη καμπύλη διασποράς, σύμφωνα με όσα έχουν περιγραφεί στην ενότητα 3.1.1 (Προσδιορισμός αρχικού εδαφικού μοντέλου).

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αντιστροφής, σε κάθε επανάληψη το σφάλμα μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής καμπύλης διασποράς ελαττώνεται (Σχήμα 3.7). 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 3.8).



Σχήμα 3.7: Ελάττωση του σφάλματος (RMS %) μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής καμπύλης διασποράς κατά τη διαδικασία αντιστροφής της καμπύλης διασποράς που αντιστοιχεί στη γραμμή μελέτης V2. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει τον αριθμό των επαναλήψεων και ο κατακόρυφος άξονας το εκατοστιαίο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (%).



Σχήμα 3.8: 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).

Αριθμός στρωμάτων:	13	RMS% : 6.3e-001				
						Τυπική
Πάχος	Βάθος	Λόγος	Πυκνότητα	Vp	Vs	απόκλιση
(m)	(m)	Poisson	(gr/cm^3)	(m/s)	(m/s)	της Vs
						σ (m/s)
0.64	0.64	0.400	1.790	451.598	184.364	3.823
0.21	0.85	0.400	1.797	483.921	197.560	3.589
0.28	1.13	0.400	1.813	566.462	231.257	3.836
0.31	1.44	0.400	1.833	663.427	270.843	3.845
0.35	1.79	0.400	1.848	741.855	302.861	3.723
0.41	2.20	0.400	1.855	774.979	316.384	3.681
0.55	2.75	0.400	1.851	754.418	307.990	3.481
0.62	3.37	0.400	1.840	701.869	286.537	3.520
0.67	4.04	0.400	1.835	676.762	276.287	3.686
0.67	4.71	0.400	1.843	715.114	291.944	3.912
1.02	5.73	0.400	1.861	806.443	329.229	3.922
0.88	6.61	0.400	1.886	929.608	379.511	4.061
0.00	6.61	0.400	1.910	1.047.652	427.702	2.730

Πίνακας 3.1: Πίνακας αποτελεσμάτων αντιστροφής της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς για τη γραμμή μελέτης V2.

Σε επόμενη παράγραφο της εργασίας αυτής (§ 4.1) παρατίθενται τα τελικά μοντέλα κατανομής της ταχύτητας Vs, όπως προκύπτουν από την επεξεργασία των επιφανειακών κυμάτων, για όλες τις γραμμές μελέτης.

3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

3.2.1 Βασικές αρχές της σεισμικής διάθλασης

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

$$\rho = \frac{\sin(i_0)}{V_1} = \frac{\sin(i_2)}{V_2}$$
(3.12)

όπου p είναι η παράμετρος της σεισμικής ακτίνας. Η σεισμική ακτίνα προσπίπτει στην διαχωριστική επιφάνεια υπό ορική γωνία, όταν ισχύει V₂ > V₁ και η διαθλώμενη ακτίνα έχει διεύθυνση παράλληλη προς τη διαχωριστική επιφάνεια (Σχήμα 3.9b). Σε μια τέτοια περίπτωση ο νόμος του Snell τροποποιείται ως εξής:

$$\sin(i_c) = \frac{V_1}{V_2}$$
 (3.13)

Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της ορικής γωνίας, παρατηρείται ολική ανάκλαση (Σχήμα 3.9c). Βέβαια, θα πρέπει να σημειωθεί ότι βασική προϋπόθεση δημιουργίας ορικά διαθλώμενων κυμάτων είναι ότι οι ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων θα πρέπει να αυξάνουν από τους ρηχότερους στους βαθύτερους σχηματισμούς.



Σχήμα 3.9: Σχηματική παράσταση των τριών περιπτώσεων πρόσπτωσης μιας σεισμικής ακτίνας σε μια διεπιφάνεια. Κατά την πρόσπτωση υπό γωνία a) μικρότερη της ορικής δημιουργούνται ανακλώμενα και διαθλώμενα κύματα, b) ίση με την ορική γωνία δημιουργούνται ανακλώμενα και μετωπικά κύματα και c) 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 αποτελεί δευτερεύουσα πηγή σεισμικών κυμάτων. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα σεισμικά κύματα τα οποία προέρχονται από τις δευτερεύουσες αυτές πηγές και αναδύονται προς την επιφάνεια (Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10: Σχηματική παράσταση της δημιουργίας των μετωπικών κυμάτων (Reynolds, 1997)

Η γωνία των αναδυόμενων προς την επιφάνεια σεισμικών ακτίνων με την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια είναι ίση με την ορική γωνία. Αυτά τα αναδυόμενα σεισμικά κύματα ονομάζονται μετωπικά κύματα.

Στην περίπτωση δύο οριζόντιων στρωμάτων (Σχήμα 3.11) οι καταγραφές που θα προκύπτουν από τη σεισμική διάθλαση θα έχουν τη μορφή του Σχήματος 3.12. Παρατηρείται ότι ο χρόνος διαδρομής των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων είναι γραμμική συνάρτηση της απόστασης. Συνεπώς, η καμπύλη χρόνων διαδρομής των κυμάτων αυτών θα είναι ευθείες γραμμές (δρομοχρονικό διάγραμμα). Οι ευθείες των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων κυμάτων παριστάνονται με την ΟC και την CD στο Σχήμα 3.13, αντίστοιχα.

Τα σεισμικά κύματα που καταγράφονται πρώτα στις θέσεις των γεώφωνων είναι τα απευθείας και τα μετωπικά κύματα (Σχήμα 3.11). Τα απευθείας κύματα καταγράφονται πρώτα στα γεώφωνα που βρίσκονται μέχρι ορισμένη απόσταση *x*_c από το σημείο της σεισμικής πηγής. Η απόσταση αυτή λέγεται *ορική απόσταση* (Σχήμα 3.11).



Σχήμα 3.11: Σεισμικές ακτίνες των απευθείας, των διαθλώμενων και των ανακλώμενων σεισμικών κυμάτων (πάνω) και οι αντίστοιχες καμπύλες διαδρομής των κυμάτων αυτών (κάτω). Παρατηρείται ότι οι πρώτες αφίξεις είναι τα απευθείας κύματα για x < x_c και τα μετωπικά για x > x_c (Βαρδιδάκη, 2005).



Σχήμα 3.12: Σχηματική παράσταση σεισμικών καταγραφών διάθλασης των οποίων οι πρώτες αφίξεις (διακεκομμένη γραμμή) αντιστοιχούν σε καταγραφές απευθείας (OC) και μετωπικών κυμάτων (CD) (Βαρδιδάκη, 2005).





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

- Σε διαγράμματα t x τοποθετούνται οι μετρήσεις των διπλών χρόνων διαδρομής (πρώτες αφίξεις, Σχήμα 3.13) και των αποστάσεων πηγής – γεωφώνου.
- Επιλέγονται τα σημεία που βρίσκονται σε ευθεία, η οποία ξεκινά από την αρχή των αξόνων (ευθεία OC, Σχήμα 3.13). Από την κλίση αυτής της ευθείας (απευθείας κύματα) υπολογίζεται η ταχύτητα του επιφανειακού στρώματος (V₁=1/κλίση ευθείας απευθείας κυμάτων).
- Προσδιορίζεται η κλίση της ευθείας, η οποία περνά από τα υπόλοιπα σημεία (μετωπικά κύματα) αλλά και την τομή της με τον άξονα των χρόνων (χρόνος συνάντησης Τ₂(0), Σχήμα 3.13). Από την κλίση της ευθείας των μετωπικών κυμάτων, υπολογίζεται η ταχύτητα του δεύτερου στρώματος (V₂=1/κλίση ευθείας μετωπικών κυμάτων).
- Προσδιορίζεται η ορική γωνία i_c από τη σχέση (3.13):

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

Υπολογίζεται το πάχος του επιφανειακού στρώματος από τη σχέση:

$$z_{1} = \frac{T_{2}(0) \cdot V_{1}}{2\cos(i_{c})}$$
(3.14)

Για πιο πολύπλοκες δομές του υπεδάφους (πολυστρωματικό μέσο, κεκλιμένος διαθλαστήρας, καμπυλόσχημος διαθλαστήρας) υπάρχουν αντίστοιχες μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων και του πάχους κάθε στρώματος (Βαφείδης, 1993).

3.2.2 Επεξεργασία των δεδομένων της σεισμικής διάθλασης με χρήση του λογισμικού 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 για διακριτό αριθμό κελιών.

Τα δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα επεξεργασίας PickWin, σε μορφή SEG – 2. 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 3.14). 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 3.15).



Σχήμα 3.14: Επιλογή των πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων με το πρόγραμμα PickWin για την καταγραφή με την πηγή τοποθετημένη στα -20 m της γραμμής V2. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης και ο κατακόρυφος το χρόνο καταγραφής των σεισμικών κυμάτων. Οι σκιασμένες (ή μη) περιοχές αντιστοιχούν σε θετικά (ή αρνητικά) πλάτη ταλάντωσης.



Σχήμα 3.15: Διάγραμμα ροής του προγράμματος PickWin. Η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων επαναλαμβάνεται (loop) μέχρις ότου εισαχθούν όλα τα δεδομένα που αντιστοιχούν στο ίδιο ανάπτυγμα γεωφώνων (spread) (τροποποιημένο σχήμα, Παπαθανασίου, 2007).

Με το κύριο πρόγραμμα ανάλυσης και ερμηνείας (PlotRefa) πραγματοποιείται η αντιστροφή των πρώτων αφίξεων με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας. Το πρόγραμμα λαμβάνει ως αρχείο εισόδου, το αρχείο εξόδου του προγράμματος PickWin, 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. 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 3.16). Ο χρήστης καλείται να αντιστοιχίσει κάθε πρώτη άφιξη στα απευθείας ή τα μετωπικά κύματα.



Σχήμα 3.16: Δρομοχρονικό διάγραμμα που αντιστοιχεί στη γραμμή V2. 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 μέθοδος αντιστροφής των χρόνων καθυστέρησης (Time – Term). 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 και το αρχικό μοντέλο βάθους.

Πιο αναλυτικά, για αρχικό εδαφικό μοντέλο δύο στρωμάτων:

Ορίζεται ως βραδύτητα S, το αντίστροφο της ταχύτητας:

$$S_1 = \frac{1}{V_1}$$
 (3.15)

$$S_2 = \frac{1}{V_2}$$
 (3.16)

30
όπου V₁ και V₂ είναι οι μέσες ταχύτητες του πρώτου και δεύτερου στρώματος αντίστοιχα (Σχήμα 3.17).

Προσδιορίζεται η ορική γωνία i_c (Νόμος Snell):

$$\sin(i_c) = \frac{S_2}{S_1}$$
 (3.17)

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

 $t = 2S_{1}\cos(i_{c})z + xS_{2} = cz + xS_{2}$ (3.18)

όπου x η γνωστή απόσταση μεταξύ της πηγής και του γεωφώνου και z το πάχος του πρώτου στρώματος. Με το συνδυασμό των παραπάνω σχέσεων, υπολογίζεται η βραδύτητα S₂ και το πάχος z.

Όταν η διαχωριστική επιφάνεια παρουσιάζει κλίση (Σχήμα 3.18), το πάχος του πρώτου στρώματος και η βραδύτητα του δεύτερου στρώματος S₂ υπολογίζονται από τη σχέση:

$$t = cz_1 + cz_2 + xS_2$$
 (3.19)

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

Για εδαφικό μοντέλο με περισσότερα στρώματα ισχύει:

$$t_{j} = \sum_{k=1}^{n} c_{jk} z_{k} + x_{j} S_{2}$$
(3.20)

όπου ј είναι ο αριθμός των χρόνων διαδρομής και n ο αριθμός των γεωφώνων.

Στο Σχήμα 3.19 απεικονίζεται ενδεικτικά το μοντέλο βάθους και η μέση ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων Ρ για τους σχηματισμούς που απαντήθηκαν στη γραμμή μελέτης V2. Στο Παράρτημα Β παρατίθενται τα μοντέλα βάθους για όλες τις υπόλοιπες γραμμές μελέτης.



Σεισμική ακτίνα με ταχύτητα διάδοσης V_2

Σχήμα 3.17: Σεισμική ακτίνα μετωπικού κύματος (Παπαθανασίου, 2007).



Σχήμα 3.18: Πορεία σεισμικής ακτίνας (Παπαθανασίου, 2007).



Σχήμα 3.19: Μοντέλο βάθους (Μέθοδος Αντιστροφής των Χρόνων Καθυστέρησης) για τη γραμμή V2. Η μέση ταχύτητα διάδοσης του πρώτου στρώματος είναι 561 m/s, ενώ του δεύτερου στρώματος είναι 2447 m/s. Η γραμμή V2 είναι προσανατολισμένη από Βορρά προς Νότο.

3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Η μέθοδος της σεισμικής τομογραφίας προϋποθέτει την ύπαρξη αρχικού μοντέλου ταχυτήτων, το οποίο είτε δημιουργείται με τη μέθοδο αντιστροφής των χρόνων καθυστέρησης, είτε κατασκευάζεται βάσει ορισμένων παραμέτρων (ελάχιστη και μέγιστη σεισμική ταχύτητα, αριθμός στρωμάτων, βάθος, υψόμετρο). 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 3.20).
- 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. Το πλήθος των σημείων αυτών οριοθετεί την πυκνότητα των σεισμικών ακτίνων.



Σχήμα 3.20: 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).

Στο Σχήμα 3.21 απεικονίζονται όλες οι πιθανές διαδρομές από την πηγή Α στο γεώφωνο Β και υπολογίζεται ο χρόνος διαδρομής μεταξύ των κομβικών σημείων, ενώ στο Σχήμα 3.22 απεικονίζεται ο τρόπος υπολογισμού της συντομότερης διαδρομής.



Σχήμα 3.21: Πιθανές διαδρομές της σεισμικής ακτίνας από την πηγή Α στο γεώφωνο Β. Οι αριθμοί αντιστοιχούν στους χρόνους διαδρομής κάθε κλάδου (SeisImager/2DTM Manual, 2005).



Σχήμα 3.22: Υπολογισμός του ελάχιστου χρόνου διαδρομής της σεισμικής ακτίνας (SeisImager/2DTM Manual, 2005).

Η διαδικασία υπολογισμού των ταχυτήτων (αντίστροφο πρόβλημα) επαναλαμβάνεται, μέχρι να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ των χρόνων διαδρομής που παρατηρήθηκαν και αυτών που υπολογίζονται. Ακολουθεί τα εξής βήματα:

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

όπου i και M, N είναι ο αριθμός των σεισμικών ακτίνων και των κελιών αντίστοιχα, S είναι η βραδύτητα (S = 1/V) και I είναι το μήκος της σεισμικής ακτίνας σε κάθε κελί (Σχήμα 3.23). Επιλέγεται η διαδρομή με τον ελάχιστο χρόνο (βέλτιστη διαδρομή).



Σχήμα 3.23: Απεικόνιση της διαδρομής της σεισμικής ακτίνας από την πηγή στο γεώφωνο.

- Υπολογίζεται η διαφορά ΔΤ μεταξύ των χρόνων διαδρομής που υπολογίστηκαν (T^c) και αυτών που παρατηρήθηκαν (T^o): ΔT_k = T^o T_k^o (3.22) όπου k είναι ο αριθμός των επαναλήψεων.
- Προσδιορίζονται οι διορθωμένες τιμές της βραδύτητας και το αρχικό μοντέλο τροποποιείται. Το σύστημα που προκύπτει, είναι της μορφής:

$$L\Delta\Delta = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \cdot & I_{1N} \\ I_{21} & I_{22} & \cdot & I_{2N} \\ I_{31} & I_{32} & \cdot & I_{3N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ I_{M1} & I_{M2} & \cdot & I_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta s_1 \\ \Delta s_2 \\ \cdot \\ \Delta s_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \\ \cdot \\ \Delta t_M \end{bmatrix} = T^{\circ} - T^{\circ}$$
(3.23)

ή διανυσματικά:

$$L_{k}\Delta S_{k} = \Delta T_{k}$$
(3.24)

Η διόρθωση στις τιμές της βραδύτητας σε κάθε επανάληψη δίνεται από τη σχέση: $S_{k+1} = S_k + \Delta S_k \tag{3.25}$

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

$$\mathbf{I}_{ij} = \frac{\partial \mathbf{t}_i}{\partial \mathbf{s}_j} \tag{3.26}$$

Εφόσον το πλήθος των γραμμικών εξισώσεων είναι διαφορετικό από αυτό των αγνώστων (ταχύτητα σε κάθε κελί) το γραμμικό σύστημα (3.23) τροποποιείται ώστε να επιλυθεί με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων:

$$L^{\mathsf{T}}L\Delta S = L^{\mathsf{T}}\Delta T \tag{3.27}$$

όπου ο πίνακας με εκθέτη «Τ» αντιστοιχεί στον ανάστροφο αρχικού πίνακα.

- Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS error) υπολογίζεται από τη σχέση:
 E = LS T (3.28)
- Δημιουργείται το τελικό μοντέλο ταχυτήτων (Σχήμα 3.24). 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 3.24: Τελικό μοντέλο ταχυτήτων (Μέθοδος Σεισμικής Τομογραφίας) και απεικόνιση των διαδρομών των σεισμικών ακτίνων για τη γραμμή V2. Η γραμμή V2 είναι προσανατολισμένη από Βορρά προς Νότο. RMS = 1.401122 ms.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΥΠΕΡΘΕΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Παρακάτω (Σχήμα 4.1 – 4.14), παρατίθενται τα αποτελέσματα επεξεργασίας των επιφανειακών κυμάτων με το λογισμικό kriSIS – auto, όπως προκύπτουν μετά το στάδιο της αντιστροφής. Σε κάθε σχήμα παρουσιάζεται το βέλτιστο εδαφικό μοντέλο, δηλαδή το μοντέλο για το οποίο παρατηρείται το μικρότερο RMS% σφάλμα μεταξύ των πειραματικών και των θεωρητικών καμπυλών διασποράς.

Η αριστερή εικόνα κάθε σχήματος απεικονίζει την προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης (final curve) στην πειραματική (measured curve) θεμελιώδη καμπύλη διασποράς και η δεξιά, απεικονίζει την κατανομή της ταχύτητας Vs με το βάθος για το αρχικό (initial model) και το βέλτιστο μοντέλο (final model). Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η τυπική απόκλιση των τιμών της πειραματικής καμπύλης διασποράς (αριστερά) και της ταχύτητας Vs του μοντέλου (δεξιά).

Στο παράρτημα Δ παρατίθενται οι πίνακες των αποτελεσμάτων της αντιστροφής της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς για όλες τις γραμμές μελέτης.



Σχήμα 4.1: Κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας Vs (δεξιά – final model) μετά την προσαρμογή της θεωρητικής (final curve) στην πειραματική (measured curve) καμπύλη διασποράς για το πρώτο ανάπτυγμα (spread A) της γραμμής Line1.



Σχήμα 4.2: Κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας Vs (δεξιά – final model) μετά την προσαρμογή της θεωρητικής (final curve) στην πειραματική (measured curve) καμπύλη διασποράς για το δεύτερο ανάπτυγμα (spread B) της γραμμής Line1.



Σχήμα 4.3: Κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας Vs (δεξιά – final model) μετά την προσαρμογή της θεωρητικής (final curve) στην πειραματική (measured curve) καμπύλη διασποράς για το πρώτο ανάπτυγμα (spread A) της γραμμής Line2.



Σχήμα 4.4: Κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας Vs (δεξιά – final model) μετά την προσαρμογή της θεωρητικής (final curve) στην πειραματική (measured curve) καμπύλη διασποράς για το δεύτερο ανάπτυγμα (spread B) της γραμμής Line2.



Σχήμα 4.5: Κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας Vs (δεξιά – final model) μετά την προσαρμογή της θεωρητικής (final curve) στην πειραματική (measured curve) καμπύλη διασποράς για το πρώτο ανάπτυγμα (spread A) της γραμμής Line3.



Σχήμα 4.6: Κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας Vs (δεξιά – final model) μετά την προσαρμογή της θεωρητικής (final curve) στην πειραματική (measured curve) καμπύλη διασποράς για το δεύτερο ανάπτυγμα (spread B) της γραμμής Line3.



Σχήμα 4.7: Κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας Vs (δεξιά – final model) μετά την προσαρμογή της θεωρητικής (final curve) στην πειραματική (measured curve) καμπύλη διασποράς για το πρώτο ανάπτυγμα (spread A) της γραμμής Line4.



Σχήμα 4.8: Κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας Vs (δεξιά – final model) μετά την προσαρμογή της θεωρητικής (final curve) στην πειραματική (measured curve) καμπύλη διασποράς για το δεύτερο ανάπτυγμα (spread B) της γραμμής Line4.



Σχήμα 4.9: Κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας Vs (δεξιά – final model) μετά την προσαρμογή της θεωρητικής (final curve) στην πειραματική (measured curve) καμπύλη διασποράς για τη γραμμή V1.



Σχήμα 4.10: Κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας Vs (δεξιά – final model) μετά την προσαρμογή της θεωρητικής (final curve) στην πειραματική (measured curve) καμπύλη διασποράς για τη γραμμή V2.



Σχήμα 4.11: Κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας Vs (δεξιά – final model) μετά την προσαρμογή της θεωρητικής (final curve) στην πειραματική (measured curve) καμπύλη διασποράς για τη γραμμή V3.



Σχήμα 4.12: Κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας Vs (δεξιά – final model) μετά την προσαρμογή της θεωρητικής (final curve) στην πειραματική (measured curve) καμπύλη διασποράς για τη γραμμή V4.



Σχήμα 4.13: Κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας Vs (δεξιά – final model) μετά την προσαρμογή της θεωρητικής (final curve) στην πειραματική (measured curve) καμπύλη διασποράς για τη γραμμή V5.



Σχήμα 4.14: Κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας Vs (δεξιά – final model) μετά την προσαρμογή της θεωρητικής (final curve) στην πειραματική (measured curve) καμπύλη διασποράς για τη γραμμή V6.

4.2 ΥΠΕΡΘΕΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ Vs ΣΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Η κατανομή της Vs με το βάθος που προκύπτει από την επεξεργασία των επιφανειακών κυμάτων με το λογισμικό kriSIS – auto, έχει υπερτεθεί στα μοντέλα ταχυτήτων που προέκυψαν από την επεξεργασία των πρώτων αφίξεων με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας. Με αυτό τον τρόπο επιδιώκεται η σύγκριση των δύο αποτελεσμάτων.

Ειδικότερα, η θέση της κατακόρυφης κατανομής των S – κυμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία των επιφανειακών αντιστοιχείται κάθε φορά στο κέντρο της διάταξης των γεωφώνων. Στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 4.15 έως 4.24), παρουσιάζεται η υπέρθεση της κατακόρυφης κατανομής της Vs στα αντίστοιχα μοντέλα ταχυτήτων που προέκυψαν από την επεξεργασία των πρώτων αφίξεων με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας.



Σχήμα 4.15: Υπέρθεση της κατακόρυφης μεταβολής της ταχύτητας Vs στο μοντέλο βάθους της σεισμικής τομογραφίας, της γραμμής LINE1 (δύο αναπτύγματα γεωφώνων). Η γραμμή LINE1 είναι προσανατολισμένη από την Ανατολή προς τη Δύση.



Σχήμα 4.16: Υπέρθεση της κατακόρυφης μεταβολής της ταχύτητας Vs στο μοντέλο βάθους της σεισμικής τομογραφίας, της γραμμής LINE2 (δύο αναπτύγματα γεωφώνων). Η γραμμή LINE2 είναι προσανατολισμένη από την Ανατολή προς τη Δύση.



Σχήμα 4.17: Υπέρθεση της κατακόρυφης μεταβολής της ταχύτητας Vs στο μοντέλο βάθους της σεισμικής τομογραφίας, της γραμμής LINE3 (δύο αναπτύγματα γεωφώνων). Η γραμμή LINE3 είναι προσανατολισμένη από την Ανατολή προς τη Δύση.



Σχήμα 4.18: Υπέρθεση της κατακόρυφης μεταβολής της ταχύτητας Vs στο μοντέλο βάθους της σεισμικής τομογραφίας, της γραμμής LINE4 (δύο αναπτύγματα γεωφώνων). Η γραμμή LINE4 είναι προσανατολισμένη από την Ανατολή προς τη Δύση.



Σχήμα 4.19: Υπέρθεση της κατακόρυφης μεταβολής της ταχύτητας Vs στο μοντέλο βάθους της σεισμικής τομογραφίας, της γραμμής V1 (ένα ανάπτυγμα γεωφώνων). Η γραμμή V1 είναι προσανατολισμένη από το Βορρά προς το Νότο.



Σχήμα 4.20: Υπέρθεση της κατακόρυφης μεταβολής της ταχύτητας Vs στο μοντέλο βάθους της σεισμικής τομογραφίας, της γραμμής V2 (ένα ανάπτυγμα γεωφώνων). Η γραμμή V2 είναι προσανατολισμένη από το Βορρά προς το Νότο.



Σχήμα 4.21: Υπέρθεση της κατακόρυφης μεταβολής της ταχύτητας Vs στο μοντέλο βάθους της σεισμικής τομογραφίας, της γραμμής V3 (ένα ανάπτυγμα γεωφώνων). Η γραμμή V3 είναι προσανατολισμένη από το Βορρά προς το Νότο.



Σχήμα 4.22: Υπέρθεση της κατακόρυφης μεταβολής της ταχύτητας Vs στο μοντέλο βάθους της σεισμικής τομογραφίας, της γραμμής V4 (ένα ανάπτυγμα γεωφώνων). Η γραμμή V4 είναι προσανατολισμένη από το Βορρά προς το Νότο.



Σχήμα 4.23: Υπέρθεση της κατακόρυφης μεταβολής της ταχύτητας Vs στο μοντέλο βάθους της σεισμικής τομογραφίας, της γραμμής V5 (ένα ανάπτυγμα γεωφώνων). Η γραμμή V5 είναι προσανατολισμένη από το Βορρά προς το Νότο.



Σχήμα 4.24: Υπέρθεση της κατακόρυφης μεταβολής της ταχύτητας Vs στο μοντέλο βάθους της σεισμικής τομογραφίας, της γραμμής V6 (ένα ανάπτυγμα γεωφώνων). Η γραμμή V6 είναι προσανατολισμένη από το Βορρά προς το Νότο.

4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Παρατηρώντας τις υπερθέσεις των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων στις τομές της σεισμικής τομογραφίας (ενότητα 4.2), διαπιστώνεται ότι οι μεταβολές της ταχύτητας Vp (στην τομογραφία) και Vs (στην κατακόρυφη κατανομή της Vs) πραγματοποιούνται σε παρόμοιο βάθος. Συνεπώς συμπεραίνεται ότι τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων συμφωνούν ως προς το βάθος εντοπισμού του βραχώδους υποβάθρου.

Η ταχύτητα Vs, όπως υπολογίστηκε με τη μέθοδο ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων κυμαίνεται από 200 m/s για τους επιφανειακούς σχηματισμούς έως 600 m/s για το ανώτερο τμήμα του ασβεστολίθου. Αντίθετα, η ταχύτητα Vp που υπολογίστηκε με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης και τομογραφίας, κυμαίνεται από 500 έως 1800 m/s περίπου, αντίστοιχα. Οι τιμές της ταχύτητας Vs είναι σε γενικές γραμμές χαμηλές για να αντιστοιχούν σε ασβεστόλιθο, γεγονός που οφείλεται στο ότι αντιστοιχούν στο ανώτερο καρστικοποιημένο τμήμα του ασβεστολίθου.

4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ

4.4.1 Περιγραφή της δομής του υπεδάφους

Το υπέδαφος της περιοχής διασκόπησης αποτελείται από δύο κατηγορίες σχηματισμών. Το υπερκείμενο στρώμα, αποτελούμενο από τις νεότερες Τεταρτογενείς αποθέσεις και το υποκείμενο στρώμα που αποτελείται από ασβεστόλιθο της ενότητας Τρυπαλίου.

Ξεκινώντας από την επιφάνεια και έως τα 4 με 5 μέτρα βάθος, το υπόβαθρο απαρτίζεται από επιφανειακούς εδαφικούς σχηματισμούς, αλλούβια - διλούβια, μικρού πάχους. Στα στρώματα αυτά οι ταχύτητες των P κυμάτων κυμαίνονται από 500 έως 700 m/s και των S κυμάτων από 200 μέχρι 300 m/s περίπου.

Κατά κανόνα, στα 5 περίπου μέτρα ξεκινά μία ζώνη μετάβασης από τις επιφανειακές αποθέσεις προς τον ασβεστόλιθο. Κατερχόμενα νερά έχουν διαλύσει τα ανώτερα τμήματα του ασβεστολίθου, δημιουργώντας διάκενα (καρστ). Στα κενά αυτά έχουν εισχωρήσει αργιλικές προσχώσεις δημιουργώντας έτσι μια ζώνη μετάβασης προς τον υγιή ασβεστόλιθο. Οι ταχύτητες των διαμηκών κυμάτων, Vp, κατά μήκος της μεταβατικής ζώνης κυμαίνονται σε ένα εύρος από 800 έως 1700 m/s, ενώ των εγκάρσιων, Vs, από 300 έως 600 m/s. Η ζώνη αυτή κάτω από την περιοχή διασκόπησης φτάνει κατά μέσο όρο τα 10 m βάθος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΥΠΕΡΘΕΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Υπάρχουν όμως σημεία στην περιοχή μελέτης, όπου η μετάβαση στον ασβεστόλιθο γίνεται σταδιακά, οριοθετώντας μια ζώνη μετάβασης μεγαλύτερου πάχους. Τέτοια περίπτωση, όσον αφορά τις οριζόντιες γραμμές μελέτης, αποτελεί τμήμα της γραμμής Line2, από τα 12 m έως τα 40 m, όπου η ζώνη εκτείνεται μέχρι τα 14 m βάθος καθώς και από τα 84 m έως τα 94 m, όπου φτάνει στα 13 m βάθος. Κατά μήκος σχεδόν όλης της γραμμής Line3 όπου η ζώνη φτάνει σε βάθος τα 15 m και στη γραμμή Line 4 (από τα 48 m έως τα 70 m) όπου φτάνει έως τα 12 m βάθος. Όσον αφορά τις κάθετες γραμμές, στο νότιο τμήμα της γραμμής V1 η ζώνη μετάβασης φτάνει τα 15 m βάθος, στη γραμμή V2 (από τα 10 m έως τα 46 m) φτάνει στα 14 m βάθος, στη γραμμή V6 (από τα 18 m έως τα 40 m) φτάνει στα 12 m βάθος.

Τη μεταβατική ζώνη του καρστικοποιημένου ασβεστολίθου διαδέχεται ο υγιής ασβεστόλιθος της ενότητας Τρυπαλίου. Οι ταχύτητες στο μη καρστικοποιημένο τμήμα του ασβεστολίθου υπερβαίνουν τα 1800 m/s για τα διαμήκη κύματα (Vp). Σχεδόν σε όλες τις γραμμές μελέτης το μέγιστο βάθος διασκόπησης με την μέθοδο της ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων ήταν μικρότερο από το βάθος που απαντάται ο υγιής ασβεστόλιθος της ενότητας Τρυπαλίου.

Τέλος, τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας με τίτλο «Σεισμική διασκόπηση για τον εντοπισμό καρστικών δομών στο οροπέδιο του Ομαλού Ν. Χανίων Κρήτης» (Βαρδιδάκη, 2005), όπου για τις ίδιες γραμμές μελέτης τα μοντέλα βάθους προέκυψαν από τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης και της τεχνικής Ray Tracing, χρησιμοποιώντας το λογισμικό SIPT 2. Τα μοντέλα βάθους από τις δύο διπλωματικές εργασίες συμφωνούν ως προς το βάθος εντοπισμού του ασβεστολίθου, το οποίο υπολογίζεται στα 8 με 10 μέτρα. Επίσης, οι ταχύτητες Vp των σεισμικών κυμάτων είναι παρεμφερείς και στους δύο σχηματισμούς, έχοντας υψηλές τιμές άνω των 1800 m/s στο ασβεστολιθικό στρώμα και χαμηλότερες τιμές στους επιφανειακούς σχηματισμούς, της τάξης των 400 έως 600 m/s.

4.4.2 Χαρακτηρισμός του εδάφους σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8, τα εδάφη χωρίζονται σε επτά κατηγορίες οι οποίες χαρακτηρίζουν τις εδαφικές συνθήκες που επικρατούν σε μια περιοχή. Η ταξινόμηση των εδαφών στις κατηγορίες αυτές γίνεται σύμφωνα με την παράμετρο Vs₃₀, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1. Η παράμετρος Vs₃₀ υπολογίζεται από τη σχέση:

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

όπου h_i και V_i είναι αντίστοιχα το πάχος (σε m) και η ταχύτητα των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων, Vs, του i σχηματισμού ή στρώματος, σε ένα σύνολο N στρωμάτων, που εμφανίζονται στα πρώτα 30 m από την επιφάνεια του εδάφους.

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, το μέγιστο βάθος διασκόπησης φτάνει μέχρι τα 10 m και γι' αυτό το λόγο υπολογίστηκε η παράμετρος Vs₁₀, σύμφωνα με τη σχέση:

$$Vs_{10} = \frac{10}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$
(4.2)

Τα πάχη h_i και οι ταχύτητες V_i των εγκάρσιων κυμάτων, για όλες τις γραμμές μελέτης, δίνονται στους πίνακες του Παραρτήματος Δ. Η τιμή της παραμέτρου Vs₁₀, όπως υπολογίστηκε για κάθε ανάπτυγμα γεωφώνων, παρατίθεται στον Πίνακα 4.2.

Κατηγορία εδάφους	Στρωματογραφική σύσταση	Παράμετρος Vs ₃₀ (m/s)
A	Βραχώδης ή σχεδόν βραχώδης γεωλογικός σχηματισμός συμπεριλαμβανομένου το πολύ 5 m επιφανειακού εδαφικού υλικού.	> 800
В	Μεγάλες αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλικιών ή συμπαγούς αργίλου με τουλάχιστον μερικών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων τους με το βάθος.	360 - 800
С	Αποθέσεις πυκνής ή μέσης πυκνότητας άμμου, χαλικιών ή συμπαγούς αργίλου με πάχος από μερικές δεκάδες μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα.	180 – 360
D	Αποθέσεις από μικρής έως μέτριας συνεκτικότητας εδάφη (με ή χωρίς ενστρώσεις μαλακών συνεκτικών σχηματισμών) ή από επικρατούντα μαλακά προς συνεκτικά εδάφη.	< 180
E	Σχηματισμός εδαφικής σύστασης που αποτελείται από ένα επιφανειακό αλλουβιακό στρώμα με τιμές του τύπου C ή D με πάχος μεταξύ 5 και 20 m, υπερκείμενο από συμπαγές γεωυλικό ταχύτητας Vs ₃₀ > 800 m/s.	-
S ₁	Αποθέσεις που αποτελούνται - ή περιέχουν ένα στρώμα τουλάχιστον 10 m πάχος - από μαλακή άργιλο / ιλύ με υψηλό δείκτη πλαστικότητας (PI > 40) και υψηλή περιεκτικότητα σε νερό.	< 100
S ₂	Αποθέσεις από επιδεκτικά σε ρευστοποίηση εδάφη, από ευπαθείς αργίλους ή άλλο γεωϋλικό που δεν περιλαμβάνεται στους τύπους Α – Ε ή S ₁ .	-

Πίνακας 4.1: Κατηγορίες εδαφών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8.

Γραμμή μελέτης	Vs ₁₀ (m/s)	
Line 1	328.3	
Ανάπτυγμα Α		
Line 1	318.6	
Ανάπτυγμα Β		
Line 2	307 0	
Ανάπτυγμα Α	001.0	
Line 2	315 7	
Ανάπτυγμα Β	010.7	
Line 3	320.6	
Ανάπτυγμα Α		
Line 3	357 3	
Ανάπτυγμα Β	007.0	
Line 4	317 5	
Ανάπτυγμα Α	017.0	
Line 4	336 0	
Ανάπτυγμα Β	000.0	
Line V1	331.9	
Line V2	318.9	
Line V3	355.8	
Line V4	354.8	
Line V5	359.3	
Line V6	360.7	

Πίνακας 4.2: Τιμές της παραμέτρου Vs_{10} για κάθε ανάπτυγμα γεωφώνων.

Η ταξινόμηση του εδάφους έγινε με βάση τον παράγοντα Vs₁₀. Οι τιμές του Vs₁₀ είναι κατά κανόνα μικρότερες του παράγοντα Vs₃₀, γεγονός που επιτρέπει την ασφαλή ταξινόμηση του εδάφους σε μια από τις κατηγορίες του Πίνακα 4.1. Η μέση τιμή του Vs₁₀ για την περιοχή διασκόπησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι 334.6 m/s. Συνεπώς το έδαφος ανήκει στην κατηγορία C, η οποία περιλαμβάνει αποθέσεις πυκνής ή μέσης πυκνότητας άμμου, χαλικιών ή συμπαγούς αργίλου με πάχος από μερικές δεκάδες μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα.
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους επεξεργασίας σεισμικών κυμάτων, διαπιστώνεται ότι οι μεταβολές της ταχύτητας Vp (στην τομογραφία) και Vs (στην κατακόρυφη κατανομή της Vs, μέθοδος ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων) πραγματοποιούνται σε παρόμοιο βάθος. Συνεπώς συμπεραίνεται ότι τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων συμφωνούν ως προς το βάθος εντοπισμού του βραχώδους υποβάθρου.

Η μέθοδος πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων (MASW) είναι μια μέθοδος διασκόπησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητικά για την μονοδιάστατη απεικόνιση του υποβάθρου (βάθος – ταχύτητα Vs), φτάνοντας όμως σε μικρά βάθη. Παρ'όλα αυτά το βάθος διασκόπησης μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση κατάλληλης σεισμικής πηγής παραγωγής χαμηλών συχνοτήτων (π.χ. πίπτον βάρος μεγαλύτερο των 5 kg) ή με το σχεδιασμό μεγαλύτερου αναπτύγματος γεωφώνων. Η μέθοδος πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων μπορεί επίσης να απεικονίσει διαδιάστατες ψευδοτομές (βάθος – απόσταση κατά μήκος των γραμμών μελέτης) εφαρμόζοντας μια διαδικασία διαφοροποιημένη ως προς τη διαδικασία συλλογής των δεδομένων και διεξαγωγής των αποτελεσμάτων σε σχέση με τη διαδικασία που περιγράφτηκε στην παρούσα εργασία.

Η μέθοδος της σεισμικής τομογραφίας μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητικά για την δισδιάστατη απεικόνιση του υποβάθρου αλλά και της ζώνης μετάβασης των σχηματισμών, καθώς η διασκόπηση φτάνει σε μεγαλύτερα βάθη από ότι η μέθοδος ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων και η απεικονίζεται η μεταβολή της ταχύτητας στους επιμέρους σχηματισμούς τόσο κατά βάθος όσο και πλευρικά.

Το υπόβαθρο της περιοχής μελέτης απαρτίζεται από εδαφικούς σχηματισμούς, αλλούβια – διλούβια, μικρού πάχους και ξεκινούν από την επιφάνεια φτάνοντας τα 4 με 5 μέτρα βάθος. Στα στρώματα αυτά, οι ταχύτητες των P κυμάτων κυμαίνονται από 500 έως 700 m/s και των S κυμάτων από 200 μέχρι 300 m/s περίπου. Κατά κανόνα, στα 5 μέτρα περίπου ξεκινά μια ζώνη μετάβασης από τις επιφανειακές αποθέσεις προς τον ασβεστόλιθο. Τη μεταβατική ζώνη του καρστικοποιημένου ασβεστολίθου διαδέχεται ο υγιής ασβεστόλιθος της ενότητας Τρυπαλίου. Οι ταχύτητες στο μη καρστικοποιημένο τμήμα του ασβεστολίθου υπερβαίνουν τα 1800 m/s για τα διαμήκη κύματα (Vp). Σχεδόν σε όλες τις γραμμές μελέτης το μέγιστο βάθος διασκόπησης με τη μέθοδο της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων ήταν μικρότερο από το βάθος που απαντάται ο υγιής ασβεστόλιθος της ενότητας Τρυπαλίου.

Τέλος, κατά την ταξινόμηση του εδάφους με βάση τον Ευρωκώδικα 8, η μέση τιμή του Vs₁₀ για την περιοχή διασκόπησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας

υπολογίστηκε ότι είναι 334.6 m/s. Συνεπώς το έδαφος ανήκει στην κατηγορία C, η οποία περιλαμβάνει αποθέσεις πυκνής ή μέσης πυκνότητας άμμου, χαλικιών ή συμπαγούς αργίλου με πάχος από μερικές δεκάδες μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα.

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>

ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

- 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.
- Βαφείδης Α., 1993, Εφαρμοσμένη Γεωφυσική 1: Σεισμικές μέθοδοι, Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Κρητικάκης Σ. Γ., 2001, Εκτίμηση της ταχύτητας των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων και των δυναμικών μηχανικών παραμέτρων από καταγραφές επιφανειακών κυμάτων Rayleigh, Μεταπτυχιακή Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, σ 177.
- 4. Κρητικάκης Σ. Γ., Βαφείδης Α., Gourry J. C., 2004, Ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και εφαρμογή σε χώρο απόθεσης απορριμμάτων στη Β. Ιταλία και στη βιομηχανική περιοχή Porto Petroli, Genoa, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τομ. XXXVI, σ. 2 6.
- 5. 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.
- Ραπτάκης Δ., 1995, Συμβολή στον προσδιορισμό της γεωμετρίας και των δυναμικών ιδιοτήτων των εδαφικών σχηματισμών και στη σεισμική απόκρισή τους, Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνική σχολή Α. Π. Θ.
- Haskell N. A., 1953, The dispersion of surface waves in multi layered media, Bulletin of Seismological Society of America, vol. 43, p. 17 – 34.
- McMechan G. A. & Yedlin M. J., 1981, Analysis of dispersive waves by wave field transformation, Geophysics, vol. 46, p. 869 – 874.
- 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.
- 10. **Press W. H., Teukosky S. A., Vetterling W. T. & Flannery B. P., 1992**, *Numerical Recipes in Fortran*, 2nd Edition, Cambridge University Press, εξίσωση 2.9.
- 11. **Reynolds M. J., 1997**, *An introduction to applied and environmental geophysics*, John Wilsey & Sons Ltd, Chichester.

- Schwab F. & Knopoff L., 1972, Fast surface wave and free mode computations, in Bolt B. A. Edition, Methods in computational physics, Academic Press, p. 87 – 180.
- 13. 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.
- 14. Xia J., Miller R. D. & Park C. B., 1999, Estimation of near surface shear wave velocity by inversion of Rayleigh waves, Geophysics, vol. 64(3), p. 691 700.

ΑΛΛΕΣ ΠΗΓΕΣ

- 1. SeisImager/2D[™] Manual, 2005, Version 3.1, p. 248.
- 2. samjshah.files.wordpress.com/2008/07/pswaves_lrg.gif, πηγή Internet.
- www.exo.net/~pauld/summer_institute/summer_day10waves/rayleighlove_lrg.gif, πηγή Internet.
- 4. www.GoogleEarth.com, πηγή Internet.
- 5. www.masw.com/DataAcquisition.html, πηγή Internet.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α ΔΡΟΜΟΧΡΟΝΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ



Σχήμα Α.1: Δρομοχρονικό διάγραμμα που αντιστοιχεί στη γραμμή LINE1. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την οριζόντια απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης και ο κατακόρυφος, το χρόνο πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων.



Σχήμα Α.2: Δρομοχρονικό διάγραμμα που αντιστοιχεί στη γραμμή LINE2. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την οριζόντια απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης και ο κατακόρυφος, το χρόνο πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων.



Σχήμα Α.3: Δρομοχρονικό διάγραμμα που αντιστοιχεί στη γραμμή LINE3. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την οριζόντια απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης και ο κατακόρυφος, το χρόνο πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων.



Σχήμα Α.4: Δρομοχρονικό διάγραμμα που αντιστοιχεί στη γραμμή LINE4. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την οριζόντια απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης και ο κατακόρυφος, το χρόνο πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων.



Σχήμα Α.5: Δρομοχρονικό διάγραμμα που αντιστοιχεί στη γραμμή V1. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την οριζόντια απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης και ο κατακόρυφος, το χρόνο πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων.



Σχήμα Α.6: Δρομοχρονικό διάγραμμα που αντιστοιχεί στη γραμμή V2. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την οριζόντια απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης και ο κατακόρυφος, το χρόνο πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων.



Σχήμα Α.7: Δρομοχρονικό διάγραμμα που αντιστοιχεί στη γραμμή V3. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την οριζόντια απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης και ο κατακόρυφος, το χρόνο πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων.



Σχήμα Α.8: Δρομοχρονικό διάγραμμα που αντιστοιχεί στη γραμμή V4. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την οριζόντια απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης και ο κατακόρυφος, το χρόνο πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων.



Distance (m) Σχήμα Α.9: Δρομοχρονικό διάγραμμα που αντιστοιχεί στη γραμμή V5. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την οριζόντια απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης και ο κατακόρυφος, το χρόνο πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων.



Σχήμα Α.10: Δρομοχρονικό διάγραμμα που αντιστοιχεί στη γραμμή V6. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την οριζόντια απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης και ο κατακόρυφος, το χρόνο πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β ΜΟΝΤΕΛΑ ΒΑΘΟΥΣ

(ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΤΩΝ ΧΡΟΝΩΝ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ)



Σχήμα Β.1: Μοντέλο βάθους (Μέθοδος Αντιστροφής των Χρόνων Καθυστέρησης) για τη γραμμή LINE1. Η μέση ταχύτητα διάδοσης του πρώτου στρώματος είναι 552 m/s, ενώ του δεύτερου στρώματος είναι 1910 m/s. Η γραμμή LINE1 είναι προσανατολισμένη από Ανατολή προς Δύση.



Σχήμα B.2: Μοντέλο βάθους (Μέθοδος Αντιστροφής των Χρόνων Καθυστέρησης) για τη γραμμή LINE2. Η μέση ταχύτητα διάδοσης του πρώτου στρώματος είναι 542 m/s, ενώ του δεύτερου στρώματος είναι 1892 m/s. Η γραμμή LINE2 είναι προσανατολισμένη από Ανατολή προς Δύση.



Σχήμα B.3: Μοντέλο βάθους (Μέθοδος Αντιστροφής των Χρόνων Καθυστέρησης) για τη γραμμή LINE3. Η μέση ταχύτητα διάδοσης του πρώτου στρώματος είναι 558 m/s, ενώ του δεύτερου στρώματος είναι 1948 m/s. Η γραμμή LINE3 είναι προσανατολισμένη από Ανατολή προς Δύση.



Σχήμα B.4: Μοντέλο βάθους (Μέθοδος Αντιστροφής των Χρόνων Καθυστέρησης) για τη γραμμή LINE4. Η μέση ταχύτητα διάδοσης του πρώτου στρώματος είναι 479 m/s, ενώ του δεύτερου στρώματος είναι 1916 m/s. Η γραμμή LINE4 είναι προσανατολισμένη από Ανατολή προς Δύση.



Σχήμα Β.5: Μοντέλο βάθους (Μέθοδος Αντιστροφής των Χρόνων Καθυστέρησης) για τη γραμμή V1. Η μέση ταχύτητα διάδοσης του πρώτου στρώματος είναι 492 m/s, ενώ του δεύτερου στρώματος είναι 1890 m/s. Η γραμμή V1 είναι προσανατολισμένη από Βορρά προς Νότο.



Σχήμα B.6: Μοντέλο βάθους (Μέθοδος Αντιστροφής των Χρόνων Καθυστέρησης) για τη γραμμή V2. Η μέση ταχύτητα διάδοσης του πρώτου στρώματος είναι 561 m/s, ενώ του δεύτερου στρώματος είναι 2447 m/s. Η γραμμή V2 είναι προσανατολισμένη από Βορρά προς Νότο.



Σχήμα Β.7: Μοντέλο βάθους (Μέθοδος Αντιστροφής των Χρόνων Καθυστέρησης) για τη γραμμή V3. Η μέση ταχύτητα διάδοσης του πρώτου στρώματος είναι 466 m/s, ενώ του δεύτερου στρώματος είναι 2348 m/s. Η γραμμή V3 είναι προσανατολισμένη από Βορρά προς Νότο.



Σχήμα Β.8: Μοντέλο βάθους (Μέθοδος Αντιστροφής των Χρόνων Καθυστέρησης) για τη γραμμή V4. Η μέση ταχύτητα διάδοσης του πρώτου στρώματος είναι 493 m/s, ενώ του δεύτερου στρώματος είναι 1942 m/s. Η γραμμή V4 είναι προσανατολισμένη από Βορρά προς Νότο.



Σχήμα Β.9: Μοντέλο βάθους (Μέθοδος Αντιστροφής των Χρόνων Καθυστέρησης) για τη γραμμή V5. Η μέση ταχύτητα διάδοσης του πρώτου στρώματος είναι 450 m/s, ενώ του δεύτερου στρώματος είναι 2160 m/s. Η γραμμή V5 είναι προσανατολισμένη από Βορρά προς Νότο.



Σχήμα Β.10: Μοντέλο βάθους (Μέθοδος Αντιστροφής των Χρόνων Καθυστέρησης) για τη γραμμή V6. Η μέση ταχύτητα διάδοσης του πρώτου στρώματος είναι 483 m/s, ενώ του δεύτερου στρώματος είναι 1952 m/s. Η γραμμή V6 είναι προσανατολισμένη από Βορρά προς Νότο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ



Σχήμα Γ.1: Οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (τετράγωνα) για τα σεισμικά δεδομένα της γραμμής LINE1, ανάπτυγμα Α, κατά την απεικόνιση της σεισμικής ενέργειας (χρωματική κλίμακα) στο χώρο συχνότητας (οριζόντιος άξονας) – ταχύτητας φάσης (κατακόρυφος άξονας).



Σχήμα Γ.2: Οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (τετράγωνα) για τα σεισμικά δεδομένα της γραμμής LINE1, ανάπτυγμα Β, κατά την απεικόνιση της σεισμικής ενέργειας (χρωματική κλίμακα) στο χώρο συχνότητας (οριζόντιος άξονας) – ταχύτητας φάσης (κατακόρυφος άξονας).



Σχήμα Γ.3: Οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (τετράγωνα) για τα σεισμικά δεδομένα της γραμμής LINE2, ανάπτυγμα Α, κατά την απεικόνιση της σεισμικής ενέργειας (χρωματική κλίμακα) στο χώρο συχνότητας (οριζόντιος άξονας) – ταχύτητας φάσης (κατακόρυφος άξονας).



Σχήμα Γ.4: Οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (τετράγωνα) για τα σεισμικά δεδομένα της γραμμής LINE2, ανάπτυγμα Β, κατά την απεικόνιση της σεισμικής ενέργειας (χρωματική κλίμακα) στο χώρο συχνότητας (οριζόντιος άξονας) – ταχύτητας φάσης (κατακόρυφος άξονας).



Σχήμα Γ.5: Οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (τετράγωνα) για τα σεισμικά δεδομένα της γραμμής LINE3, ανάπτυγμα Α, κατά την απεικόνιση της σεισμικής ενέργειας (χρωματική κλίμακα) στο χώρο συχνότητας (οριζόντιος άξονας) – ταχύτητας φάσης (κατακόρυφος άξονας).



Σχήμα Γ.6: Οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (τετράγωνα) για τα σεισμικά δεδομένα της γραμμής LINE3, ανάπτυγμα Β, κατά την απεικόνιση της σεισμικής ενέργειας (χρωματική κλίμακα) στο χώρο συχνότητας (οριζόντιος άξονας) – ταχύτητας φάσης (κατακόρυφος άξονας).



Σχήμα Γ.7: Οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (τετράγωνα) για τα σεισμικά δεδομένα της γραμμής LINE4, ανάπτυγμα Α, κατά την απεικόνιση της σεισμικής ενέργειας (χρωματική κλίμακα) στο χώρο συχνότητας (οριζόντιος άξονας) – ταχύτητας φάσης (κατακόρυφος άξονας).



Σχήμα Γ.8: Οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (τετράγωνα) για τα σεισμικά δεδομένα της γραμμής LINE4, ανάπτυγμα Β, κατά την απεικόνιση της σεισμικής ενέργειας (χρωματική κλίμακα) στο χώρο συχνότητας (οριζόντιος άξονας) – ταχύτητας φάσης (κατακόρυφος άξονας).



Σχήμα Γ.9: Οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (τετράγωνα) για τα σεισμικά δεδομένα της γραμμής V1, κατά την απεικόνιση της σεισμικής ενέργειας (χρωματική κλίμακα) στο χώρο συχνότητας (οριζόντιος άξονας) – ταχύτητας φάσης (κατακόρυφος άξονας).



Σχήμα Γ.10: Οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (τετράγωνα) για τα σεισμικά δεδομένα της γραμμής V2, κατά την απεικόνιση της σεισμικής ενέργειας (χρωματική κλίμακα) στο χώρο συχνότητας (οριζόντιος άξονας) – ταχύτητας φάσης (κατακόρυφος άξονας).



Σχήμα Γ.11: Οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (τετράγωνα) για τα σεισμικά δεδομένα της γραμμής V3, κατά την απεικόνιση της σεισμικής ενέργειας (χρωματική κλίμακα) στο χώρο συχνότητας (οριζόντιος άξονας) – ταχύτητας φάσης (κατακόρυφος άξονας).



Σχήμα Γ.12: Οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (τετράγωνα) για τα σεισμικά δεδομένα της γραμμής V4, κατά την απεικόνιση της σεισμικής ενέργειας (χρωματική κλίμακα) στο χώρο συχνότητας (οριζόντιος άξονας) – ταχύτητας φάσης (κατακόρυφος άξονας).



Σχήμα Γ.13: Οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (τετράγωνα) για τα σεισμικά δεδομένα της γραμμής V5, κατά την απεικόνιση της σεισμικής ενέργειας (χρωματική κλίμακα) στο χώρο συχνότητας (οριζόντιος άξονας) – ταχύτητας φάσης (κατακόρυφος άξονας).



Σχήμα Γ.14: Οριοθέτηση της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (τετράγωνα) για τα σεισμικά δεδομένα της γραμμής V6, κατά την απεικόνιση της σεισμικής ενέργειας (χρωματική κλίμακα) στο χώρο συχνότητας (οριζόντιος άξονας) – ταχύτητας φάσης (κατακόρυφος άξονας).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΕΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΒΑΘΟΥΣ (ΚΑΤΑΝΟΜΗ VS)

Αριθμός στρωμάτων:	11	RMS%	: 1.3E+000			
Πάχος (m)	Βάθος (m)	Λόγος Poisson	Πυκνότητα (gr/cm^3)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Τυπική απόκλιση της Vs σ (m/s)
1.20	1.20	0.400	1.832	658.065	268.654	6.513
0.27	1.47	0.400	1.820	602.379	245.920	8.275
0.25	1.72	0.400	1.806	530.021	216.380	9.088
0.31	2.03	0.400	1.806	527.843	215.491	8.492
0.42	2.45	0.400	1.808	541.653	221.129	7.442
0.45	2.90	0.400	1.834	668.738	273.011	9.046
0.51	3.41	0.400	1.841	706.950	288.611	9.409
0.78	4.19	0.400	1.853	766.835	313.059	8.446
0.78	4.97	0.400	1.829	642.729	262.393	6.990
1.24	6.21	0.400	1.854	771.504	314.965	5.941
0.00	6.21	0.400	1.945	1.223.265	499.396	7.193

Πίνακας Δ.1: Πίνακας αποτελεσμάτων αντιστροφής της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς για τη γραμμή LINE1, ανάπτυγμα Α.

Πίνακας Δ.2: Πίνακας αποτελεσμάτων αντιστροφής της θεμελιώδους καμπύλης διασπορ	άς για τη γραμμή
LINE1, ανάπτυγμα Β.	

Αριθμός στρωμάτων:	13	RMS% : 9.9e-001				
Πάχος (m)	Βάθος (m)	Λόγος Poisson	Πυκνότητα (gr/cm^3)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Τυπική απόκλιση της Vs σ (m/s)
0.97	0.97	0.400	1.806	532.132	217.242	20.026
0.22	1.19	0.400	1.811	553.048	225.781	29.422
0.28	1.47	0.400	1.822	611.282	249.555	32.034
0.36	1.83	0.400	1.834	668.277	272.823	28.948
0.39	2.22	0.400	1.836	681.864	278.370	26.247
0.42	2.64	0.400	1.827	637.365	260.203	26.691
0.48	3.12	0.400	1.817	583.520	238.221	26.405
0.63	3.75	0.400	1.822	611.961	249.832	24.476
0.61	4.36	0.400	1.833	663.065	270.695	26.869
0.76	5.12	0.400	1.856	777.529	317.425	25.716
0.94	6.06	0.400	1.873	867.178	354.024	22.936
1.50	7.56	0.400	1.889	947.203	386.694	20.949
0.00	7.56	0.400	1.950	1.251.944	511.104	9.931

Αριθμός στρωμάτων:	11	RMS%	: 7.8e-001			
Πάχος (m)	Βάθος (m)	Λόγος Poisson	Πυκνότητα (gr/cm^3)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Τυπική απόκλιση της Vs σ (m/s)
1.07	1.07	0.400	1.806	528.786	215.876	8.148
0.24	1.31	0.400	1.808	540.561	220.683	9.355
0.32	1.63	0.400	1.827	633.063	258.447	10.263
0.36	1.99	0.400	1.840	698.962	285.350	10.152
0.43	2.42	0.400	1.844	720.064	293.965	9.255
0.45	2.87	0.400	1.848	741.027	302.523	8.861
0.61	3.48	0.400	1.844	720.032	293.952	8.320
0.61	4.09	0.400	1.830	647.915	264.510	8.563
0.55	4.64	0.400	1.836	679.430	277.376	9.519
0.71	5.35	0.400	1.844	718.283	293.238	9.323
0.00	5.35	0.400	1.887	933.723	381.191	3.131

Πίνακας Δ.3: Πίνακας αποτελεσμάτων αντιστροφής της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς για τη γραμμή LINE2, ανάπτυγμα Α.

Πίνακας Δ.4: Πίνακας αποτελεσμάτων αντιστροφής της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς για τη γραμμή	Ì
LINE2, ανάπτυγμα Β.	

Αριθμός στρωμάτων:	14	RMS% : 9.95e-001				
Πάχος (m)	Βάθος (m)	Λόγος Poisson	Πυκνότητα (gr/cm^3)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Τυπική απόκλιση της Vs σ (m/s)
0.56	0.56	0.400	1.796	480.073	195.989	5.156
0.21	0.77	0.400	1.797	486.723	198.704	6.548
0.27	1.04	0.400	1.805	525.487	214.529	6.628
0.30	1.34	0.400	1.820	600.130	245.002	6.340
0.39	1.73	0.400	1.830	652.280	266.292	6.333
0.45	2.18	0.400	1.824	621.000	253.522	6.176
0.48	2.66	0.400	1.809	544.286	222.204	5.936
0.53	3.19	0.400	1.809	543.432	221.855	6.067
0.75	3.94	0.400	1.832	660.160	269.509	5.916
0.90	4.84	0.400	1.860	800.750	326.905	6.474
0.74	5.58	0.400	1.877	884.511	361.100	7.373
1.10	6.68	0.400	1.890	951.825	388.581	7.092
1.57	8.25	0.400	1.912	1.060.945	433.129	6.772
0.00	8.25	0.400	1.949	1.242.616	507.296	4.442

Αριθμός στρωμάτων:	14	RMS% : 7.0e-001				
Πάχος (m)	Βάθος (m)	Λόγος Poisson	Πυκνότητα (gr/cm^3)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Τυπική απόκλιση της Vs σ (m/s)
0.72	0.72	0.400	1.817	583.547	238.232	4.243
0.20	0.92	0.400	1.810	550.824	224.873	4.694
0.26	1.18	0.400	1.807	534.268	218.114	5.006
0.31	1.49	0.400	1.813	563.931	230.224	4.772
0.37	1.86	0.400	1.829	644.880	263.271	4.554
0.41	2.27	0.400	1.848	739.903	302.064	4.723
0.51	2.78	0.400	1.859	795.168	324.626	4.592
0.62	3.40	0.400	1.855	773.488	315.775	4.425
0.65	4.05	0.400	1.840	699.949	285.753	4.552
0.76	4.81	0.400	1.831	653.935	266.968	4.411
1.01	5.82	0.400	1.841	702.719	286.884	4.208
1.03	6.85	0.400	1.872	859.310	350.812	4.899
1.45	8.30	0.400	1.910	1.049.139	428.309	4.832
0.00	8.30	0.400	1.939	1.197.458	488.860	3.634

Πίνακας Δ.5: Πίνακας αποτελεσμάτων αντιστροφής της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς για τη γραμμή LINE3, ανάπτυγμα Α.

Πίνακας Δ.6: Πίνακας αποτελεσμάτων αντιστροφής της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς για τη γραμμή LINE3, ανάπτυγμα Β.

Αριθμός στρωμάτων:	14	RMS% : 8.2e-001				
Πάχος (m)	Βάθος (m)	Λόγος Poisson	Πυκνότητα (gr/cm^3)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Τυπική απόκλιση της Vs σ (m/s)
0.62	0.62	0.400	1.815	574.195	234.414	5.321
0.20	0.82	0.400	1.815	574.195	234.414	5.248
0.25	1.07	0.400	1.821	606.447	247.581	5.796
0.30	1.37	0.400	1.836	678.178	276.865	5.597
0.40	1.77	0.400	1.850	748.353	305.514	4.799
0.40	2.17	0.400	1.852	759.751	310.167	4.916
0.46	2.63	0.400	1.842	712.091	290.710	5.003
0.56	3.19	0.400	1.830	648.003	264.546	4.875
0.66	3.85	0.400	1.836	678.756	277.101	4.937
0.72	4.57	0.400	1.855	775.655	316.660	5.041
1.04	5.61	0.400	1.893	965.226	394.052	5.022
0.92	6.53	0.400	1.919	1.096.715	447.732	5.771
1.17	7.70	0.400	1.941	1.203.045	491.141	5.546
0.00	7.70	0.400	1.958	1.289.135	526.287	4.806

Αριθμός στρωμάτων:	14	RMS% : 1.3e+000				
Πάχος (m)	Βάθος (m)	Λόγος Poisson	Πυκνότητα (gr/cm^3)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Τυπική απόκλιση της Vs σ (m/s)
0.94	0.94	0.400	1.816	582.320	237.731	497.612
0.23	1.17	0.400	1.796	479.240	195.649	1.583.427
0.30	1.47	0.400	1.837	686.614	280.309	1.657.261
0.31	1.78	0.400	1.850	749.032	305.791	1.785.887
0.39	2.17	0.400	1.851	752.633	307.261	1.441.094
0.42	2.59	0.400	1.885	924.579	377.458	1.625.308
0.49	3.08	0.400	1.851	752.873	307.359	1.475.513
0.52	3.60	0.400	1.824	621.683	253.801	1.326.281
0.73	4.33	0.400	1.806	529.381	216.119	1.061.431
0.91	5.24	0.400	1.858	788.219	321.789	1.414.315
0.81	6.05	0.400	1.913	1.067.328	435.735	1.383.294
1.02	7.07	0.400	1.928	1.139.121	465.044	1.014.785
1.36	8.43	0.400	1.834	669.801	273.445	250.710
0.00	8.43	0.400	1.954	1.270.886	518.837	55.561

Πίνακας Δ.7: Πίνακας αποτελεσμάτων αντιστροφής της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς για τη γραμμή LINE4, ανάπτυγμα Α.

Πίνακας Δ.8: Πίνακας αποτελεσμάτων αντιστροφής της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς για τη γραμμή LINE4, ανάπτυγμα Β.

Αριθμός στρωμάτων:	14	RMS% : 8.3e-001				
Πάχος (m)	Βάθος (m)	Λόγος Poisson	Πυκνότητα (gr/cm^3)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Τυπική απόκλιση της Vs σ (m/s)
1.13	1.13	0.400	1.828	637.859	260.405	3.502
0.24	1.37	0.400	1.831	653.017	266.593	3.209
0.31	1.68	0.400	1.834	669.989	273.522	3.264
0.37	2.05	0.400	1.837	685.686	279.930	3.412
0.44	2.49	0.400	1.839	696.025	284.151	3.369
0.48	2.97	0.400	1.840	699.053	285.387	3.167
0.51	3.48	0.400	1.840	699.082	285.399	2.977
0.65	4.13	0.400	1.841	705.992	288.220	2.855
0.66	4.79	0.400	1.847	736.133	300.525	2.941
0.74	5.53	0.400	1.860	798.485	325.980	2.968
0.99	6.52	0.400	1.879	895.661	365.652	2.942
1.44	7.96	0.400	1.904	1.022.373	417.382	2.977
0.87	8.83	0.400	1.931	1.154.903	471.487	3.103
0.00	8.83	0.400	1.956	1.278.183	521.816	2.509

Αριθμός στρωμάτων:	15	RMS% : 1.5e+000				
Πάχος (m)	Βάθος (m)	Λόγος Poisson	Πυκνότητα (gr/cm^3)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Τυπική απόκλιση της Vs σ (m/s)
0.94	0.94	0.400	1.817	583.052	238.030	9.015
0.21	1.15	0.400	1.818	591.108	241.319	8.811
0.26	1.41	0.400	1.853	763.734	311.793	9.615
0.34	1.75	0.400	1.871	854.892	349.008	9.806
0.37	2.12	0.400	1.872	858.933	350.658	9.376
0.41	2.53	0.400	1.874	869.870	355.123	8.876
0.54	3.07	0.400	1.853	765.674	312.585	8.008
0.52	3.59	0.400	1.827	636.211	259.732	7.443
0.69	4.28	0.400	1.816	581.237	237.289	7.344
0.66	4.94	0.400	1.824	620.625	253.369	7.933
0.81	5.75	0.400	1.855	772.782	315.487	7.574
1.09	6.84	0.400	1.894	967.864	395.129	7.911
1.26	8.10	0.400	1.920	1.101.293	449.601	8.924
0.83	8.93	0.400	1.933	1.163.189	474.870	9.075
0.00	8.93	0.400	1.942	1.209.744	493.876	4.638

Πίνακας Δ.9: Πίνακας αποτελεσμάτων αντιστροφής της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς για τη γραμμή V1.

Πίνακας Δ.10: Πίνακας αποτελεσμάτων αντιστροφής της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς για τη γραμμή V2.

Αριθμός στρωμάτων:	13	RMS% : 6.3e-001				
Πάχος (m)	Βάθος (m)	Λόγος Poisson	Πυκνότητα (gr/cm^3)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Τυπική απόκλιση της Vs σ (m/s)
0.64	0.64	0.400	1.790	451.598	184.364	3.823
0.21	0.85	0.400	1.797	483.921	197.560	3.589
0.28	1.13	0.400	1.813	566.462	231.257	3.836
0.31	1.44	0.400	1.833	663.427	270.843	3.845
0.35	1.79	0.400	1.848	741.855	302.861	3.723
0.41	2.20	0.400	1.855	774.979	316.384	3.681
0.55	2.75	0.400	1.851	754.418	307.990	3.481
0.62	3.37	0.400	1.840	701.869	286.537	3.520
0.67	4.04	0.400	1.835	676.762	276.287	3.686
0.67	4.71	0.400	1.843	715.114	291.944	3.912
1.02	5.73	0.400	1.861	806.443	329.229	3.922
0.88	6.61	0.400	1.886	929.608	379.511	4.061
0.00	6.61	0.400	1.910	1.047.652	427.702	2.730

Αριθμός στρωμάτων:	14	RMS% : 1.1e+000				
Πάχος (m)	Βάθος (m)	Λόγος Poisson	Πυκνότητα (gr/cm^3)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Τυπική απόκλιση της Vs σ (m/s)
0.72	0.72	0.400	1.812	561.918	229.402	3.852
0.21	0.93	0.400	1.814	571.268	233.219	3.938
0.25	1.18	0.400	1.818	590.949	241.254	4.315
0.30	1.48	0.400	1.826	627.912	256.344	4.201
0.39	1.87	0.400	1.836	680.150	277.670	3.741
0.48	2.35	0.400	1.846	728.711	297.495	3.626
0.51	2.86	0.400	1.849	743.239	303.426	3.731
0.64	3.50	0.400	1.844	721.144	294.406	3.499
0.71	4.21	0.400	1.841	705.446	287.997	3.455
0.96	5.17	0.400	1.856	777.652	317.475	3.276
1.05	6.22	0.400	1.895	976.261	398.557	3.805
1.45	7.67	0.400	1.941	1.203.772	491.438	4.264
0.81	8.48	0.400	1.975	1.374.945	561.319	4.609
0.00	8.48	0.400	2.002	1.508.143	615.697	3.714

Πίνακας Δ.11: Πίνακας αποτελεσμάτων αντιστροφής της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς για τη γραμμή V3.

Πίνακας Δ.12: Πίνακας αποτελεσμάτων	αντιστροφής της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς για τη γραμμή
V4.	

Αριθμός στρωμάτων:	14	RMS% : 1.8e+000				
Πάχος (m)	Βάθος (m)	Λόγος Poisson	Πυκνότητα (gr/cm^3)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Τυπική απόκλιση της Vs σ (m/s)
0.87	0.87	0.400	1.814	570.569	232.934	2.124
0.24	1.11	0.400	1.822	607.718	248.100	1.800
0.26	1.37	0.400	1.830	652.091	266.215	1.865
0.33	1.70	0.400	1.839	693.380	283.071	1.985
0.36	2.06	0.400	1.844	718.002	293.123	1.983
0.46	2.52	0.400	1.844	718.896	293.488	1.796
0.51	3.03	0.400	1.840	700.576	286.009	1.615
0.60	3.63	0.400	1.838	692.263	282.615	1.519
0.74	4.37	0.400	1.847	734.477	299.849	1.532
0.76	5.13	0.400	1.870	849.985	347.005	1.695
1.06	6.19	0.400	1.901	1.006.309	410.824	1.775
1.31	7.50	0.400	1.933	1.164.367	475.351	1.829
1.53	9.03	0.400	1.958	1.288.571	526.057	1.912
0.00	9.03	0.400	1.974	1.369.635	559.151	2.188

Αριθμός στρωμάτων:	9	RMS% : 2.5e+000				
Πάχος (m)	Βάθος (m)	Λόγος Poisson	Πυκνότητα (gr/cm^3)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Τυπική απόκλιση της Vs σ (m/s)
1.33	1.33	0.400	1.834	669.610	273.367	2.917
0.22	1.55	0.400	1.827	632.980	258.413	3.380
0.30	1.85	0.400	1.821	607.420	247.978	3.636
0.30	2.15	0.400	1.822	611.030	249.452	3.557
0.65	2.80	0.400	1.830	652.490	266.378	2.865
0.52	3.32	0.400	1.852	762.389	311.244	3.087
0.58	3.90	0.400	1.878	889.586	363.172	3.406
0.68	4.58	0.400	1.900	1.001.841	409.000	3.237
0.00	4.58	0.400	1.915	1.076.700	439.561	1.729

Πίνακας Δ.13: Πίνακας αποτελεσμάτων αντιστροφής της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς για τη γραμμή V5.

Πίνακας Δ.14: Πίνακας αποτελεσμάτων αντιστροφής της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς για τη γραμμή V6.

Αριθμός στρωμάτων:	14	RMS% : 9.5e-001				
Πάχος (m)	Βάθος (m)	Λόγος Poisson	Πυκνότητα (gr/cm^3)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Τυπική απόκλιση της Vs σ (m/s)
0.78	0.78	0.400	1.823	615.020	251.081	7.442
0.22	1.00	0.400	1.819	594.964	242.893	9.157
0.27	1.27	0.400	1.817	586.616	239.485	9.765
0.35	1.62	0.400	1.833	663.653	270.935	9.022
0.36	1.98	0.400	1.863	815.646	332.986	9.329
0.45	2.43	0.400	1.883	912.856	372.672	9.369
0.57	3.00	0.400	1.867	836.488	341.495	8.641
0.59	3.59	0.400	1.826	630.298	257.318	7.831
0.64	4.23	0.400	1.811	557.315	227.523	8.068
0.87	5.10	0.400	1.849	746.017	304.560	7.353
0.81	5.91	0.400	1.912	1.059.201	432.417	9.632
1.32	7.23	0.400	1.958	1.288.821	526.159	9.932
1.64	8.87	0.400	1.973	1.365.159	557.324	8.948
0.00	8.87	0.400	1.971	1.354.487	552.967	7.291