



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

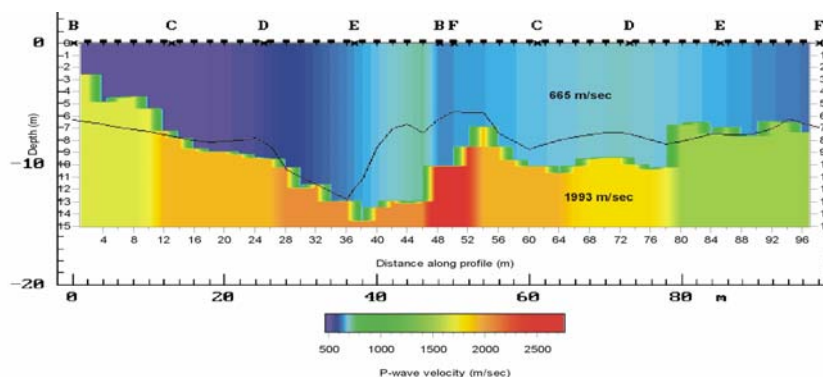
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΟΡΥΚΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ
ΔΟΜΩΝ ΣΤΟ ΟΡΟΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΟΜΑΛΟΥ Ν.ΧΑΝΙΩΝ ΚΡΗΤΗΣ***



ΑΝΔΡΟΝΙΚΗ Γ. ΒΑΡΔΙΔΑΚΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ :

ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ, Καθηγητής (επιβλέπων)

ΜΑΝΟΥΤΣΟΓΛΟΥ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ, Επ. Καθηγητής

ΣΟΥΠΙΟΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Επ. Καθηγητής

Χανιά, Μάιος 2005

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ευρενητική δραστηριότητα πάνω στις σύγχρονες μεθόδους της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, οι οποίες συμβάλλουν στην μελέτη του υπεδάφους τόσο σε μεγάλα βάθη (μερικές δεκάδες χιλιόμετρα) όσο και σε μικρά βάθη (μερικά μέτρα) με κύρια πεδία εφαρμογών στα γεωτεχνικά, τα υπόγεια νερά, την αρχαιομετρία, τη ρύπανση εδαφών, τον έλεγχο ποιότητας κατασκευών και την αναζήτηση / ανίχνευση ορυκτών πρώτων υλών, αποτελεί τον κύριο λόγο για τον οποίο επέλεξα το συγκεκριμένο θέμα διπλωματικής εργασίας.

*Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας νοιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου και επιβλέποντα κύριο **Αντώνη Βαφείδη** για τις πολύτιμες γνώσεις, ιδέες και συμβουλές του καθώς και την άποψη μεταξύ μας συνεργασία.*

*Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα **Γεώργιο Κρητικάκη** για τον καθοριστικό του ρόλο στην επιλογή του θέματος της διπλωματικής μου εργασίας και την πολύτιμη προσφορά του για την εκπόνηση της.*

*Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές κυρίους **Εμμανουήλ Μανούτσογλου** και **Παντελή Σουπιό** οι οποίοι με τίμησαν αποδεχόμενοι να συμμετάσχουν ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής.*

*Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες **Νικόλαο Οικονόμου** και **Νικόλαο Ανδρονικίδη** για την βοήθεια και τις συμβουλές τους.*

*Ευχαριστίες όμως οφείλονται και σε όλο το **προσωπικό του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής** για την όποια βοήθεια τους κατά την παραμονή μου στο εργαστήριο.*

*Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και φοιτητές του Πολυτεχνείου Κρήτης, **Rossitsa Simeonova**, **Νίκη Μπλιάτζα**, **Κατερίνα Μπούνον**, **Παναγιώτη Αμιτζόγλου** και **Γεώργιο Ζουρίδη** για την συμπαράσταση και όλη την υποστήριξη κατά την διάρκεια των σπουδών μου όλα αυτά τα χρόνια...*

Στους γονείς μου, Γιώργο και Βενετία

και

Στα αδέρφια μου

Αιμιλία, Νεκτάριο, Ηλία και Ελευθερία

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	ii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	iv
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</i>	<i>1</i>
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΟΜΑΛΟΥ.....</i>	<i>2</i>
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ.....</i>	<i>6</i>
3.1 Βασικές Αρχές της Σεισμικής Διάθλασης.....	6
3.2 Απόκτηση σεισμικών δεδομένων.....	11
3.2.1 Σεισμική διάθλαση P – κυμάτων.....	11
3.2.2 Σεισμική διάθλαση S – κυμάτων.....	11
3.3 Επεξεργασία των δεδομένων Διάθλασης	14
3.3.1 Επαναληπτική μέθοδος Συν – Πλην.....	14
3.3.2 Μέθοδος GRM (Generalized Reciprocal Method).....	16
 <i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ</i> <i>ΚΥΜΑΤΩΝ.....</i>	 <i>20</i>
4.1. Βασικές Αρχές.....	20
4.2. Θεωρητικές Έννοιες.....	22
4.3. Διατάξεις πεδίου.....	22
4.4. Χαρακτηριστικές καμπύλες διασποράς.....	25
 <i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....</i>	 <i>28</i>
5.1. Σχεδιασμός διασκόπησης στο Οροπέδιο του Ομαλού.....	28
5.2. Εξοπλισμός.....	31
5.3. Μεθοδολογία Ray – Tracing.....	32
5.3.1. Επιλογή των πρώτων αφίξεων.....	32
5.3.2. Δημιουργία δρομοχρονικών διαγραμμάτων.....	33
5.3.3. Προσδιορισμός των σεισμικών ταχυτήτων και των μοντέλων βάθους.....	34

5.4. Μεθοδολογία GRM.....	35
5.5. Πολυκάναλη ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων.....	38
5.5.1. Στάδια επεξεργασίας των δεδομένων των επιφανειακών κυμάτων.....	39
 <i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</i>	<i>53</i>
6.1. Αποτελέσματα με το λογισμικό SIPIK.....	53
6.2. Τρισδιάστατο μοντέλο (3D).....	56
6.3. Αποτελέσματα με την μέθοδο GRM.....	57
6.4. Αποτελέσματα επιφανειακών.....	58
6.5. Σύγκριση SIP με GRM.....	60
6.6. Σύγκριση SIP με επιφανειακά.....	61
6.7. Σύγκριση σεισμικών με ηλεκτρική τομογραφία.....	62
6.8. Συμπεράσματα.....	63
 Παράρτημα Α. Δρομοχρονικά διαγράμματα.....	64
Παράρτημα Β. Μοντέλα βάθους.....	76
Βιβλιογραφία.....	84

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με κύριο σκοπό την μελέτη του υπεδάφους με σεισμική διασκόπηση σε μία συγκεκριμένη περιοχή στο οροπέδιο του Ομαλού. Ο κύριος στόχος εστιάζεται στον εντοπισμό της εναλλαγής των στρωμάτων του υπεδάφους αλλά και στον προσδιορισμό των ταχυτήτων των διαμήκων κυμάτων (P waves) κάθε στρώματος μέσω του λογισμικού SIP. Επιπρόσθετα μελετώνται και οι αντίστοιχες ταχύτητες των εγκάρσιων κυμάτων (S waves) μέσω μιας διαδικασίας αντιστροφής σεισμικών δεδομένων επιφανειακών κυμάτων Rayleigh.

Η δομή της συγκεκριμένης εργασίας αρχίζει με μια γενική αναφορά στην γεωλογία της ευρύτερης περιοχής του Ομαλού και συνεχίζει με τον σχεδιασμό και τον εξοπλισμό της σεισμικής διασκόπησης.

Στην συνέχεια κρίνεται αναγκαίο να παρουσιαστούν οι βασικές αρχές της σεισμικής διάθλασης και των μεθόδων επεξεργασίας των δεδομένων διάθλασης Ray – Tracing και GRM αλλά και οι θεωρητικές έννοιες της πολυκαναλής ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων.

Η επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων με τον προσδιορισμό των σεισμικών ταχυτήτων των στρωμάτων και των μοντέλων βάθους περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο και ακολουθούν τα αποτελέσματα και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΟΜΑΛΟΥ

2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΟΜΑΛΟΥ

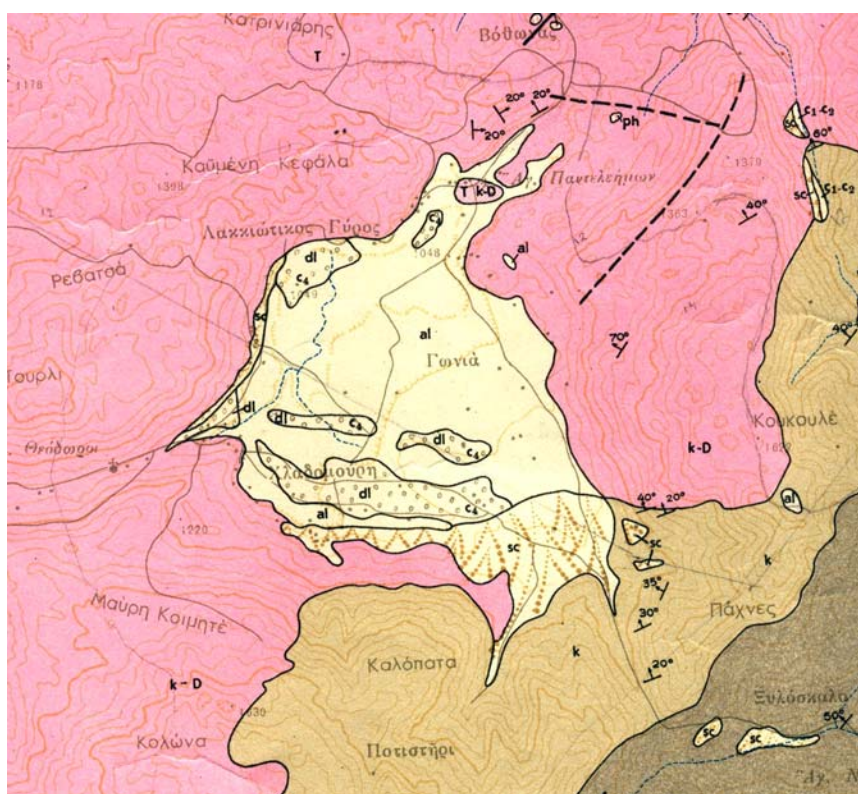
Γεωγραφικά ο Ομαλός βρίσκεται στον Νομό Χανίων. Ο δρόμος για τον Ομαλό διέρχεται μέσα από πετρώματα των φυλλιτών χαλαζιτών και μετά το χωριό Λάκκοι από τα πετρώματα του καλύμματος του Τρυπαλίου. Μεγάλες εμφανίσεις των φυλλιτικών πετρωμάτων υπάρχουν κατά μήκος όλης της διαδρομής. Γενικά πάντως, η γεωλογική τομή των Λευκών Ορέων στην περιοχή του Ομαλού είναι: πετρώματα φυλλιτών-χαλαζιτών, κάλυμμα Τρυπαλίου, τυπικοί πλακώδεις ασβεστόλιθοι του ομόνυμου καλύμματος, (στρώματα γκιγκίλου και δολομίτης). Συγκεκριμένα η διαδοχή των πετρολογικών τύπων στην περιοχή αυτή από τα ανώτερα προς τα βαθύτερα τμήματα είναι η εξής:

- Επιφανειακά παρατηρούνται σύγχρονες αποθέσεις (al, dl), παράκτιοι άμμοι (al), προσχώσεις (al), κροκαλοπαγή (pl), ασβεστιτικοί ψαμμίτες (pl), κίτρινες ψαμμιτικές μάργες (pl), μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι (pl), σαπροπηλοί (M3,M3·M2,M2), πλευρικά κορρήματα (sc).
- Ακολουθεί η σειρά των φυλλιτών – χαλαζιτών (ph) η οποία χαρακτηρίζεται από λεπτοστρωματώδεις χαλαζίτες με πιο λεπτές στρώσεις φυλλιτών και αργιλικών σχιστολίθων.
- Την σειρά των φυλλιτών – χαλαζιτών διαδέχεται η Ενότητα Τρυπαλίου (Ks-k). Πρόκειται για μία σειρά από ραουβάκες, κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και δολομιτικούς ασβεστόλιθους, των οποίων κύρια χαρακτηριστικά αποτελούν το μελανό ή τεφρομέλανο χρώμα και η βιτουμενιώδης οσμή.
- Σε τεκτονική επαφή με την Ενότητα του Τρυπαλίου είναι ο Μεταφλύσξης των πλακωδών ασβεστόλιθων (T, k-D). Με τον όρο αυτό εννοούμε τους φυλλίτες και τους αργιλικούς σχιστόλιθους οι οποίοι μεταβαίνουν σταδιακά σε πλακώδεις ασβεστολίθους και οι οποίοι αποτελούν τον μεταμορφωμένο φλύσχη. Στο κατώτερο

τμήμα έχουμε τα μεταβατικά στρώματα που αποτελούνται κυρίως από τεφροπράσινους ή και ερυθρωπούς ασβεστοφυλλίτες.

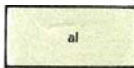
- Ακολουθεί η σειρά των πλακωδών ασβεστόλιθων (PC-k). Πρόκειται για την σειρά κρυσταλλικών ασβεστόλιθων με ενδιάμεσες στρώσεις ή βολβούς από κερατόλιθους. Η λιθολογική ομοιογένεια, η αδιατάραχτη ιζηματογένεση, το πάχος των στρώσεων και άλλα χαρακτηριστικά που παρατηρούνται σε όλες τις εμφανίσεις των πλακωδών ασβεστόλιθων οδηγούν στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για πελαγικά ιζήματα.

- Τέλος τα υποκείμενα στρώματα των πλακωδών ασβεστόλιθων (ph-D-k) τα οποία αποτελούνται από φυλλίτες, δολομίτες, μικρολατυποπαγείς ασβεστόλιθους, πυριτόλιθους και άργιλους. Διαπιστώνεται μετάβαση των στρωμάτων αυτών και των πλακωδών ασβεστόλιθων κατά γωνιώδη τεκτονική επαφή. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης σειράς αποτελούν οι συχνές εναλλαγές κλαστικών ιζημάτων (άργιλοι, ασβεστοφυλλίτες, ψαμμίτες, μικρολατυποπαγείς ασβεστόλιθοι).



Σχήμα 2.1: Γεωλογικός χάρτης του Οροπεδίου του Ομαλού

Τεταρτογενές



Σύγχρονες αλλουβιακές αποθέσεις



Πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων



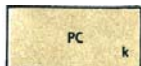
Μάργες, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή.
Εμφανίζονται στις παρυφές της
πόλγης του Ομαλού, πάνω στους
καρστικοποιημένους

Ενότητα Τρυπαλίου

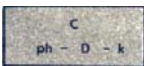


Ασβεστόλιθοι,

Ομάδα Πλακωδών Ασβεστολίθων



Πλακώδεις, κρυσταλλικοί



Ασβεστόλιθοι, δολομίτες με παρεμβολές
χαλαζιακών ψαμμιτών και αργιλικών
σχιστολίθων

Οι τρεις αυτές τελευταίες ενότητες αποτελούν και την Ζώνη Κρήτης – Μάνης ή αλλιώς Ενότητα Κρήτης – Μάνης (Φυτρολάκης, 1972).

Στόχος όπως προαναφέρθηκε της γεωφυσικής μελέτης και της ερμηνείας των αποτελεσμάτων είναι ο εντοπισμός υπόγειων καρστικών μορφών όπως τα υπόγεια σπήλαια και έγκοιλα που μπορούν να οδηγήσουν στον σχηματισμό δολίνων και πόλγων.

Με τον όρο δολίνη εννοούμε κλειστή λεκάνη, σχήματος κυκλικού ή ελλειπτικού και της οποίας το εύρος είναι μεγαλύτερο από το βάθος. Το εύρος κυμαίνεται από είκοσι έως εκατοντάδες μέτρα και το βάθος τους από δύο μέχρι εκατό μέτρα. Ο πυθμένας των δολίνων γενικά είναι επίπεδος και καλύπτεται τόσο αυτός όσο και πολλές φορές

τα εσωτερικά πρηνή από χημικά ιζήματα προερχόμενα από την χημική διάλυση των ασβεστόλιθων και πολλές φορές αναπτύσσεται και μικρή βλάστηση. Ανάλογα με τον σχηματισμό τους διακρίνονται σε εγκατακρημνισιγενείς, όταν προέρχονται από κατάρρευση της οροφής υπόγειου σπηλαίου και σε χοανοειδείς όταν προέρχονται από χημική διάλυση των πετρωμάτων. Αρχική αιτία σχηματισμού τους αποτελεί η ύπαρξη των διακλάσεων, η οποία σε συνδυασμό με την πυκνότητα αυτών συντελεί και στην εξέλιξη μίας δολίνης. Οι δολίνες εμφανίζονται άλλοτε μεμονωμένες και άλλοτε κατά αποικίες. Πλήθος δολινών εμφανίζεται και στην περιοχή του Ομαλού.

Ο όρος πόλγη αποδίδεται σε μεγάλα καρστικά επίπεδα. Οι πόλγες αποτελούν ευδιάκριτες κλειστές κοιλότητες με σχήμα κυρίως ελλειπτικό και η μεγάλη επιφάνειά τους έχει διαστάσεις που κυμαίνονται από μερικά έως εκατοντάδες τετρ. χιλιόμετρα. Η πόλγη είναι μικτός σχηματισμός τεκτονικής δράσεως και καρστικής διαβρώσεως. Ο αρχικός σχηματισμός οφείλεται σε τεκτονική ρήξη με αποτέλεσμα την επιφανειακή ταπείνωση. Η ταπείνωση αυτή σε ορισμένες περιπτώσεις προέρχεται από κατάρρευση υπόγειων θόλων. Η τελική όμως διαμόρφωση οφείλεται στην καρστική διάβρωση. Επίσης ο σχηματισμός μίας πόλγης μπορεί να οφείλεται και στην προοδευτική αύξηση και συνένωση δολινών.

Χαρακτηριστική πόλγη ανάλογης προέλευσης είναι αυτή που παρατηρείται στο οροπέδιο του Ομαλού. Η κατακόρυφη κάθοδος στο εσωτερικό των ασβεστολιθικών μαζών των φυσικών υδάτων γίνεται κατά κύριο λόγο μέσω των επιφανειών διακλάσεως και των επιφανειών διαστρώσεων των ασβεστόλιθων. Με τον τρόπο αυτό το κατεισδύον νερό συνέχεια διευρύνει τις αποστάσεις των παραπάνω επιφανειών σχηματίζοντας τα έγκοιλα. Τα σπήλαια είναι υπόγεια έγκοιλα μεγάλων σχετικά διαστάσεων, επικοινωνούν με στόμια και αναπτύσσονται κυρίως σε ασβεστολιθικές μάζες. Σχηματίζονται στο εσωτερικό της ασβεστολιθικής μάζας κατά τον ίδιο τρόπο όπως και τα υπόγεια έγκοιλα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

3.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

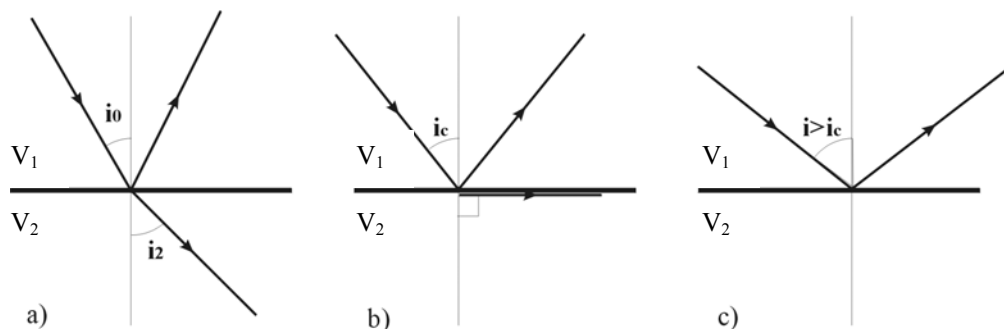
Τα σεισμικά κύματα υφίστανται διαδοχικές διαθλάσεις στις διαχωριστικές επιφάνειες ή σε μέσο όπου η ταχύτητα μεταβάλλεται με το βάθος, με αποτέλεσμα την αλλαγή της πορείας της σεισμικής ακτίνας. Η γωνία πρόσπτωσης, i_0 , η γωνία διάθλασης, i_2 , και οι ταχύτητες V_1 και V_2 στα δύο επιφανειακά στρώματα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

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

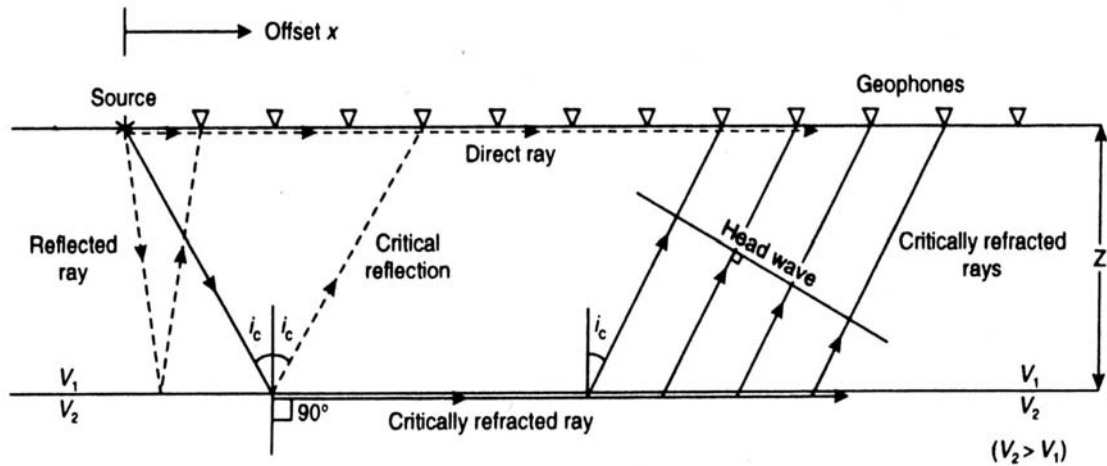
όπου p είναι η παράμετρος της σεισμικής ακτίνας. Η σεισμική ακτίνα προσπίπτει στην διαχωριστική επιφάνεια υπό **ορική γωνία**, όταν ισχύει $V_2 > V_1$ και η διαθλώμενη ακτίνα έχει διεύθυνση παράλληλη προς τη διαχωριστική επιφάνεια (Σχήμα 1.1b). Σε μια τέτοια περίπτωση ο νόμος του Snell τροποποιείται ως εξής :

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

Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της ορικής γωνίας, παρατηρείται ολική ανάκλαση (Σχήμα 1.1c). Βέβαια, θα πρέπει να σημειωθεί ότι βασική προϋπόθεση δημιουργίας ορικά διαθλώμενων κυμάτων είναι οι ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων θα πρέπει να αυξάνουν από τους ρηχότερους στους βαθύτερους σχηματισμούς.



Σχήμα 3.1 : 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.



Έστω σεισμική ακτίνα η οποία προσπίπτει σε διαχωριστική επιφάνεια υπό ορική γωνία. Τότε το διαθλώμενο κύμα διαδίδεται στο δεύτερο στρώμα παράλληλα προς τη διαχωριστική επιφάνεια. Σύμφωνα με την αρχή του Huygens, κάθε σημείο του διαθλώμενου μετώπου κύματος αποτελεί δευτερεύουσα πηγή σεισμικών κυμάτων. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα σεισμικά κύματα τα οποία προέρχονται από τις δευτερεύουσες αυτές πηγές και αναδύονται στο πρώτο στρώμα (Σχήμα 3.2).

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

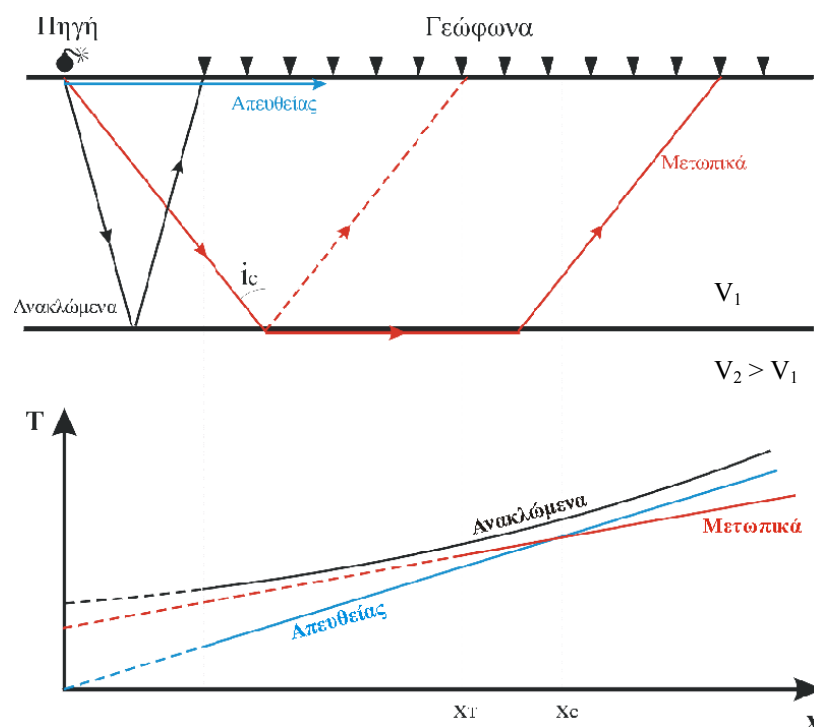
Τα σεισμικά κύματα που καταγράφονται πρώτα στις θέσεις των γεωφώνων είναι τα απευθείας και τα μετωπικά κύματα (Σχήμα 3.3). Τα απευθείας κύματα καταγράφονται πρώτα στα γεώφωνα, που βρίσκονται μέχρι ορισμένη απόσταση x_c από το σημείο της έκρηξης. Η απόσταση αυτή λέγεται ορική απόσταση (Σχήμα 3.3) και δίνεται από τη σχέση (Βαφείδης, 1993):

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

όπου z_1 είναι το πάχος του πρώτου στρώματος.

Αν x είναι η απόσταση κάποιου γεωφώνου από την πηγή, ο χρόνος διαδρομής, t_1 , των απευθείας κυμάτων θα είναι :

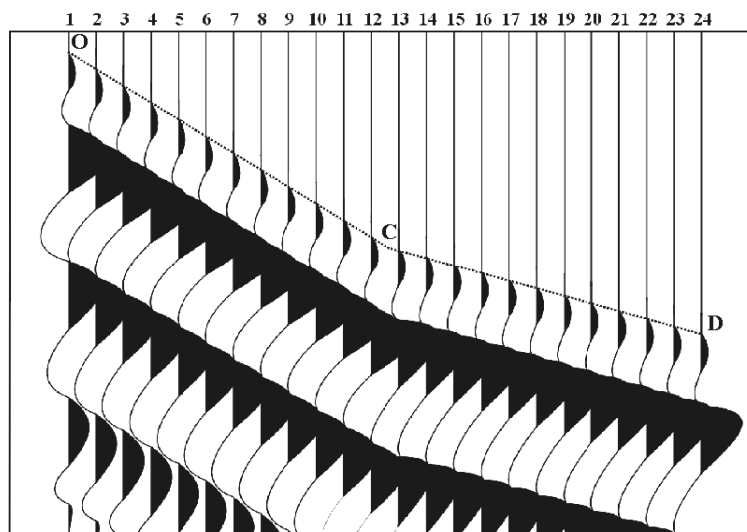
$$t_1 = \frac{x}{V_1} \quad (3.4)$$



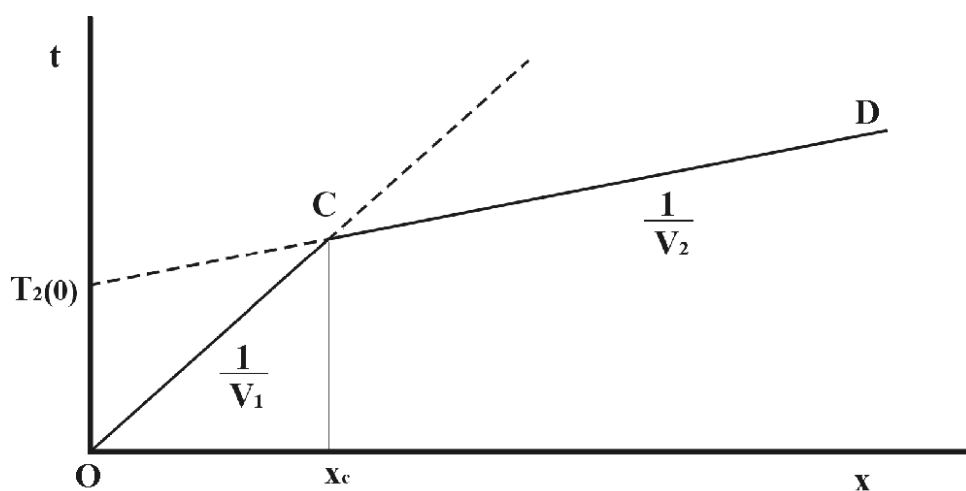
Σχήμα 3.2 : Σεισμικές ακτίνες των απευθείας, των διαθλώμενων και των ανακλώμενων σεισμικών κυμάτων (πάνω) και οι αντίστοιχες καμπύλες διαδρομής των κυμάτων αυτών (κάτω). Παρατηρείται ότι οι πρώτες αφίξεις είναι τα απευθείας κύματα για $x < x_c$ και τα μετωπικά για $x > x_c$.

Στην περίπτωση δύο οριζόντιων στρωμάτων (Σχήμα 3.3) οι καταγραφές που θα προκύψουν από τη σεισμική διάθλαση θα έχουν τη μορφή του Σχήματος 3.4. Παρατηρείται ότι ο χρόνος διαδρομής των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων είναι γραμμική συνάρτηση της απόστασης. Συνεπώς, η καμπύλη χρόνων διαδρομής των κυμάτων αυτών θα είναι ευθείες γραμμές. Η ευθείες των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων παριστάνονται με την OC και την CD στο Σχήμα 3.5 αντίστοιχα.

CHAN



Σχήμα 3.3 : Σχηματική παράσταση σεισμικών καταγραφών διάθλασης των οποίων οι πρώτες αφίξεις (διακεκομμένη γραμμή) αντιστοιχούν σε καταγραφές απευθείας (OC) και μετωπικών κυμάτων (CD).



Σχήμα 3.4 : Καμπύλες διαδρομής των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων.

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 διάγραμμα $t - x$ τοποθετούνται οι μετρήσεις των διπλών χρόνων διαδρομής (πρώτες αφίξεις, Σχήμα 3.4) και των αποστάσεων πηγής – γεωφώνου.
- Επιλέγονται τα σημεία που βρίσκονται σε ευθεία η οποία ξεκινά από την αρχή των αξόνων (ευθεία OC Σχήμα 3.4). Από την κλίση αυτής της ευθείας (απευθείας κύματα) υπολογίζεται η ταχύτητα του επιφανειακού στρώματος ($V_1 = 1 / \text{κλίση ευθείας απευθείας κυμάτων}$).
- 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 $T_2(0)$ Σχήμα 3.4). Από την κλίση της ευθείας των μετωπικών κυμάτων, υπολογίζεται η ταχύτητα του δεύτερου στρώματος ($V_2 = 1 / \text{κλίση ευθείας μετωπικών κυμάτων}$).
- Προσδιορίζεται η ορική γωνία i_c από τη σχέση (1.2) : $\sin(i_c) = \frac{V_1}{V_2}$
- Υπολογίζεται το πάχος του επιφανειακού στρώματος z_1 από τη σχέση :

$$z_1 = \frac{T_2(0) \cdot V_1}{2 \cos(i_c)} \quad (3.5)$$

όπου $T_2(0)$ είναι ο χρόνος συνάντησης και ισούται με το άθροισμα των χρόνων καθυστέρησης του σεισμικού κύματος στους κλάδους της σεισμικής ακτίνας που διαδίδονται στο επιφανειακό στρώμα. Ως χρόνος καθυστέρησης σε ένα κλάδο της σεισμικής ακτίνας που διαδίδεται σε ένα στρώμα ορίζεται ο πρόσθετος χρόνος που χρειάζεται το κύμα για να διατρέξει τον κλάδο αυτό, σε σχέση με το χρόνο που θα χρειαζόταν το κύμα για να διανύσει την οριζόντια προβολή του κλάδου με τη μέγιστη ταχύτητα που απόκτησε αυτό κατά τη διαδρομή του. Στην περίπτωση των δύο στρωμάτων, ο χρόνος καθυστέρησης στον ένα κλάδο της σεισμικής ακτίνα που διαδίδεται στο επιφανειακό στρώμα δίνεται από τη σχέση :

$$T_{12} = \frac{SA}{V_1} - \frac{OA}{V_2} \quad (= \frac{BG}{V_1} - \frac{BP}{V_2}) \quad (3.6)$$

3.2 ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.2.1 Σεισμική διάθλαση P – κυμάτων

Για τον καθορισμό της δομής με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης P - κυμάτων, αρχικά, εφόσον έχει οριοθετηθεί η γραμμή μελέτης, τα γεώφωνα τοποθετούνται, συνήθως σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους, κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Τα γεώφωνα που χρησιμοποιούνται (κατακόρυφης συνιστώσας) 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.

Σχεδόν πάντα πραγματοποιείται κανονικό και αντίστροφο πείραμα, δηλαδή λαμβάνονται καταγραφές με τη θέση της σεισμικής πηγής τοποθετημένη α) πριν από το πρώτο γεώφωνο (κανονικό πείραμα) και β) πέρα από το τελευταίο γεώφωνο (αντίστροφο πείραμα). Όσο περισσότερες καταγραφές πραγματοποιηθούν με τις πηγές σε διαφορετικές θέσεις, τόσο πιο αντικειμενικά θα είναι τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τη σεισμική διάθλαση. Μια συνηθισμένη τακτική είναι εκείνη κατά την οποία οι πηγές τοποθετούνται τόσο αντιδιαμετρικά του αναπτύγματος των γεωφώνων, όσο και σε σημεία ανάμεσα στα γεώφωνα.

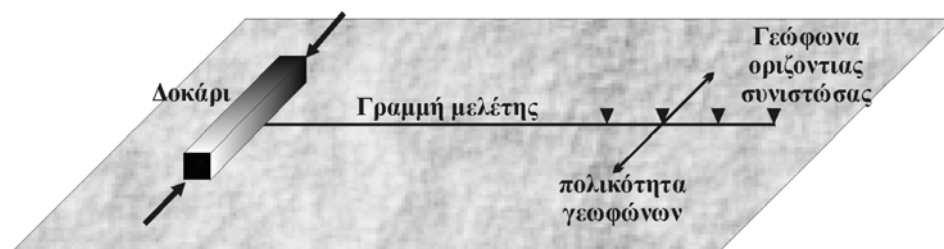
3.2.2 Σεισμική διάθλαση S – κυμάτων

Όπως προκύπτει και από την ονομασία τους, τα εγκάρσια σεισμικά κύματα (shear waves ή S-waves) δημιουργούνται από ταλαντώσεις σωματιδίων του εδάφους με φορά κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης του σεισμικού κύματος. Λόγω αυτής της κάθετης ταλάντωσης των σωματιδίων, τα κύματα S είναι δυνατό να θεωρηθούν πολωμένα. Στην πράξη, τα εγκάρσια κύματα που δημιουργούνται και καταγράφονται στις σεισμικές διασκοπήσεις είναι τα οριζόντια πολωμένα S-κύματα (SH waves), ενώ σπανιότερα

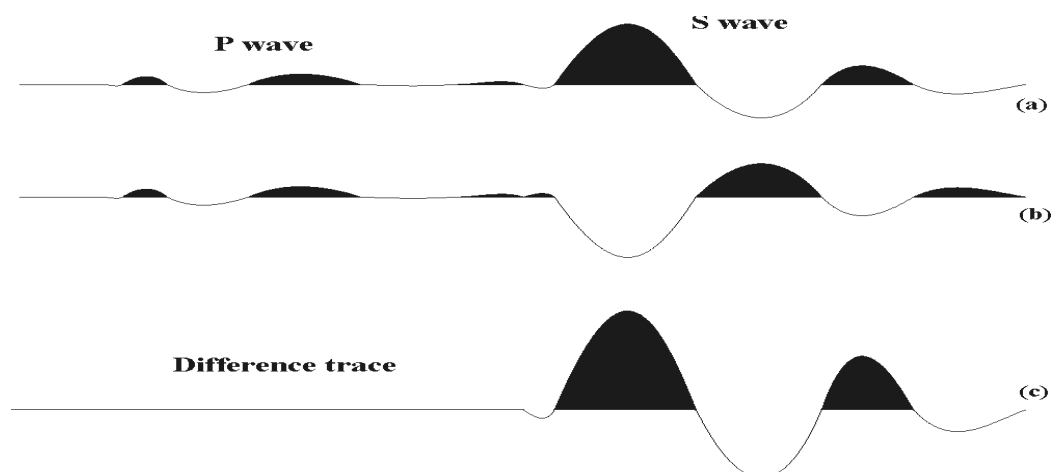
δημιουργούνται και καταγράφονται τα κατακόρυφα πολωμένα S-κύματα (SV waves) (Lankston, 1990).

Η επιλεκτική δημιουργία και καταγραφή μεμονωμένων εγκαρσίων ή διαμήκων κυμάτων, τουλάχιστον σε πειράματα που διεξάγονται στο ύπαιθρο, είναι πρακτικά αδύνατη. Σε γενικές γραμμές οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται στην σεισμική διάθλαση των P και των S – κυμάτων δεν διαφέρουν και πολύ. Ωστόσο, ανάλογα με το είδος του πειράματος που διεξάγεται, υπάρχουν διάφορες τεχνικές, όπου, αφενός χρησιμοποιώντας κατάλληλο εξοπλισμό, επιτυγχάνεται η «επιλεκτική» καταγραφή των διαφόρων σωματιδιακών ταλαντώσεων και αφετέρου, επιτυγχάνεται η δημιουργία σεισμικής ενέργειας ανισομερώς κατανεμημένη στα διάφορα είδη των κυμάτων.

Έτσι, τα γεώφωνα που χρησιμοποιούνται στην διασκόπηση σεισμικής διάθλασης S-κυμάτων είναι γεώφωνα οριζόντιας συνιστώσας. Τα γεώφωνα οριζόντιας συνιστώσας, σε αντίθεση με τα γεώφωνα κατακόρυφης συνιστώσας που χρησιμοποιούνται στη σεισμική διάθλαση διαμήκων κυμάτων (P-waves) και στη σεισμική ανάκλαση, είναι ευαίσθητα σε οριζόντιες ταλαντώσεις του εδάφους. Κατά τη διεξαγωγή της διασκόπησης, τα γεώφωνα αυτά τοποθετούνται στη γραμμή μελέτης έτσι ώστε ο άξονας της ταλάντωσης να είναι σύμφωνος με την διεύθυνση διάδοσης των SH-κυμάτων, δηλαδή κάθετα στην γραμμή μελέτης (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5 : Σχηματική παράσταση της δημιουργίας και καταγραφής των διαθλώμενων S-κυμάτων.



Σχήμα 3.6 : Σχηματική παράσταση της υπέρθεσης των καταγραφών των διαθλώμενων S-κυμάτων.

Για την δημιουργία σεισμικών κυμάτων, όπου το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειάς τους θα κατανέμεται σε SH κύματα, χρησιμοποιείται η διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Σε μια τέτοια περίπτωση, ως σεισμική πηγή χρησιμοποιείται συνήθως ένα ξύλινο δοκάρι και ένα σφυρί (βαριοπούλα). Το δοκάρι τοποθετείται κάθετα στη γραμμή μελέτης, στη θέση όπου έχει επιλεγεί να τοποθετηθεί η σεισμική πηγή. Αρχικά, πραγματοποιείται οριζόντια κρούση της βαριοπούλας στο ένα άκρο του δοκαριού, οπότε τα γεώφωνα θα καταγράψουν σεισμικά ίχνη (traces), όμοια με αυτό του Σχήματος 3.6a. Ακολούθως, πραγματοποιείται οριζόντια κρούση στο αντίθετο άκρο του δοκαριού και καταγράφονται σεισμικά ίχνη όμοια με αυτό του Σχήματος 3.6b.

Τα διαμήκη (P) κύματα εμφανίζονται στις καταγραφές σε μικρότερους χρόνους, εφόσον αυτά είναι τα ταχύτερα κύματα, και με σημαντικά μικρότερο πλάτος απ' ότι τα S-κύματα, λόγω του ότι η πηγή δημιουργεί κυρίως SH-κύματα και τα γεώφωνα είναι ευαίσθητα στην καταγραφή των SH κυμάτων.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που διακρίνει τις καταγραφές αυτές είναι το γεγονός ότι τα κύματα S στις δύο περιπτώσεις καταγράφονται με διαφορά φάσης 180° ενώ αντίθετα τα κύματα P καταγράφονται χωρίς διαφορά φάσης. Έτσι, αφαιρώντας αυτά τα δύο ίχνη μεταξύ τους είναι δυνατό να εξαλειφθούν οι καταγραφές των P-κυμάτων (Σχήματος

3.6c) και να είναι δυνατός ο εντοπισμός των διαθλώμενων εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων.

Η συνολική αυτή διαδικασία πραγματοποιείται με σκοπό να προσδιοριστούν οι πρώτες αφίξεις των απ' ευθείας και των μετωπικών εγκαρσίων κυμάτων. Οι πρώτες αυτές αφίξεις χρησιμοποιούνται πλέον, σύμφωνα με τις μεθόδους επεξεργασίας των δεδομένων σεισμικής διάθλασης, για τον προσδιορισμό του αριθμού των εδαφικών στρωμάτων και της κατανομής των ταχυτήτων των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων σε συνάρτηση με το βάθος.

3.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

3.3.1 Επαναληπτική Μέθοδος Συν - Πλήν

Η επεξεργασία του μεγαλύτερου όγκου των δεδομένων σεισμικής διάθλασης που συλλέχθηκαν από την περιοχή μελέτης, πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε να προκύψουν συμπεράσματα για τα πάχη των σχηματισμών και την μέση ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων.

Για την ερμηνεία των δεδομένων της σεισμικής διάθλασης χρησιμοποιείται αλγόριθμος αντιστροφής (Haeni et al., 1987), ο οποίος αρχικά προσδιορίζει εδαφικό μοντέλο από τις κλίσεις των δρομοχρονικών καμπύλων και τους χρόνους καθυστέρησης (delay-time method), ενώ στη συνέχεια εφαρμόζει επαναληπτική διαδικασία αντιστροφής των πρώτων αφίξεων. Η επαναληπτική διαδικασία περιλαμβάνει υπολογισμό των σεισμικών ακτίνων που προκύπτουν από θεωρητικό εδαφικό μοντέλο και διόρθωση του μοντέλου αυτού προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι διαφορές μεταξύ υπολογισμένων και μετρούμενων πρώτων αφίξεων.

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

1. Προσδιορισμός των ταχυτήτων των στρωμάτων με την εφαρμογή ελαχίστων τετραγώνων στις δρομοχρονικές καμπύλες των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων.
2. Εκτίμηση του βάθους της διεπιφάνειας με τη μέθοδο των χρόνων καθυστέρησης (delay time method).
3. Προσδιορισμός των σεισμικών ακτίνων για κάθε πηγή και για κάθε γεώφωνο που κατέγραψε μετωπικά κύματα και υπολογισμός του χρόνου διαδρομής για κάθε τέτοια σεισμική ακτίνα.
4. Τροποποίηση του βάθους της διεπιφάνειας έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι διαφορές μεταξύ των υπολογισμένων χρόνων διαδρομής και των καταγεγραμμένων πρώτων αφίξεων.

Η διαδικασία του προσδιορισμού των διαθλώμενων σεισμικών ακτίνων και η τροποποίηση του βάθους της διεπιφάνειας επαναλαμβάνεται τρεις φορές για την απόκτηση ενός αξιόπιστου εδαφικού μοντέλου.

Σε περιπτώσεις όπου το εδαφικό μοντέλο αποτελείται από περισσότερα των δύο στρωμάτων, για τον προσδιορισμό της δεύτερης διεπιφάνειας, το επιφανειακό στρώμα αφαιρείται από τους υπολογισμούς θέτοντας τα γεώφωνα και τις πηγές στην διεπιφάνεια μεταξύ του επιφανειακού και του υποκείμενου του εδαφικού στρώματος. Έτσι, η προαναφερθείσα διαδικασία επαναλαμβάνεται για τον προσδιορισμό του βάθους της δεύτερης διεπιφάνειας, ενώ για την $n - \text{οστή}$ διεπιφάνεια η διαδικασία απομάκρυνσης των εδαφικών στρωμάτων πραγματοποιείται για τα $n-1$ επιφανειακά στρώματα.

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

- Το **A** : Πραγματοποιεί αυτόματη επιλογή των πρώτων αφίξεων (picking) στα σειсмоγράμματα με δυνατότητα επέμβασης και από τον χρήστη.
- Το **B** : Τα αρχεία που προκύπτουν από το A εισάγονται στο B στο οποίο καθορίζεται η γεωμετρία της διάταξης των πηγών και των γεωφώνων και σχεδιάζονται οι δρομοχρονικές καμπύλες των απευθείας καθώς και των μετωπικών κυμάτων για κάθε εδαφικό στρώμα. Οι πρώτες αφίξεις που αντιστοιχούν στα απευθείας κύματα συμβολίζονται με τον αριθμό '1', στα μετωπικά από το δεύτερο στρώμα με τον αριθμό '2' κ.ο.κ.
- Το **C** : Οι δρομοχρονικές καμπύλες που προκύπτουν από το B εισάγονται στο C για την κατασκευή του μοντέλου ταχύτητας και βάθους.

3.3.2 Μέθοδος GRM (Generalized Reciprocal Method)

Σε περιπτώσεις που υπήρχε ιδιαίτερος λόγος για τον προσδιορισμό της πλευρικής μεταβολής των σεισμικών ταχυτήτων χρησιμοποιήθηκε μια πιο εκλεπτυσμένη μέθοδος επεξεργασίας η GRM (Generalized Reciprocal Method) η οποία είναι μια μέθοδος επεξεργασίας των σεισμικών δεδομένων διάθλασης . Η μέθοδος αυτή περιγράφεται από τα εξής βήματα (Louis et al., 2001):

1. Επιλογή των πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων (picking).
2. Καθορισμός του αριθμού των εδαφικών στρωμάτων και των δρομοχρονικών ευθειών που αντιστοιχούν στο κάθε ένα.
3. Συνδυασμός των καταγραφών των μετωπικών κυμάτων που προέρχονται από την ίδια διεπιφάνεια (phantoming arrivals).
4. Ανάλυση ταχυτήτων (velocity analysis).
5. Προσδιορισμός του βάθους των διεπιφανειών (time-to-depth conversion).

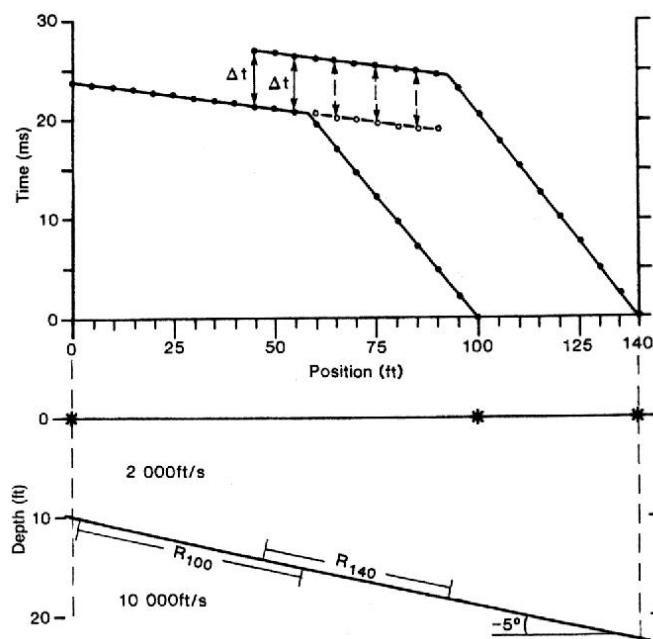
Τα δύο πρώτα βήματα εφαρμόζονται σε όλες τις μεθόδους επεξεργασίας δεδομένων σεισμικής διάθλασης.

Ο συνδυασμός των καταγραφών των μετωπικών κυμάτων που προέρχονται από την ίδια διεπιφάνεια (phantoming) εφαρμόζεται σε πρώτες αφίξεις που προέρχονται από την ίδια διεπιφάνεια αλλά από διαφορετική πηγή (Σχήμα 3.7). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται έτσι ώστε τελικά να προκύψει για κάθε διεπιφάνεια μια δρομοχρονική καμπύλη για το κανονικό πείραμα και μια για το αντίστροφο. Η καμπύλη αυτή των πρώτων αφίξεων των μετωπικών κυμάτων για όλες τις θέσεις των γεωφώνων σχετίζεται πλέον άμεσα με κάθε διεπιφάνεια.

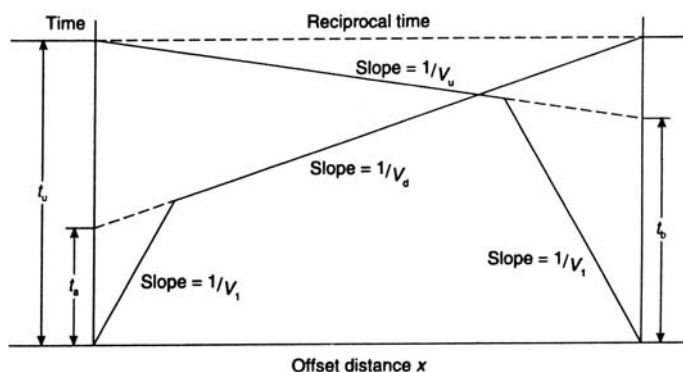
Η ανάλυση ταχυτήτων βασίζεται στην εξίσωση :

$$t_v(AG, XY) = (t_{AY} - t_{BX} + t_{AB}) / 2 \quad (3.7)$$

όπου t_v είναι συνάρτηση της απόστασης AG μιας θέσης G, ενδιάμεσης των δυο γεωφώνων (Σχήμα 3.8) (Lankston, 1990). Τα t_{AY} , t_{BX} και t_{AB} είναι οι χρόνοι διαδρομής των μετωπικών σεισμικών ακτίνων (Σχήμα 3.9). Έτσι, μεταβάλλοντας την απόσταση AG και για συγκεκριμένη απόσταση XY προκύπτει καμπύλη ανάλυσης ταχυτήτων. Για διαφορετικές τιμές της απόστασης XY προκύπτει ένα πλήθος τέτοιων καμπυλών (Σχήμα 3.10). Σύμφωνα με τον Palmer (1980) η βέλτιστη καμπύλη για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του στρώματος που υπόκειται της διεπιφάνειας είναι αυτή που παρουσιάζει τη μικρότερη διακύμανση της κλίσης (irregularity). Επιλέγοντας την βέλτιστη καμπύλη ουσιαστικά προσδιορίζεται και η βέλτιστη απόσταση XY.

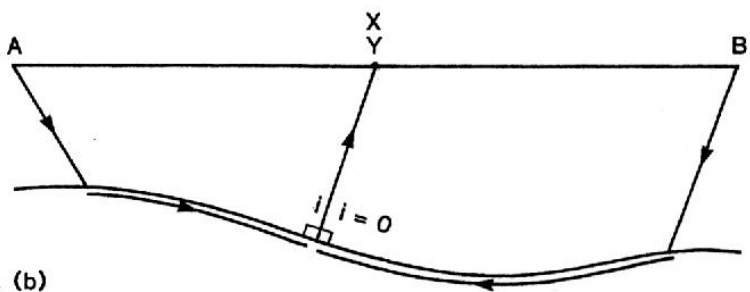
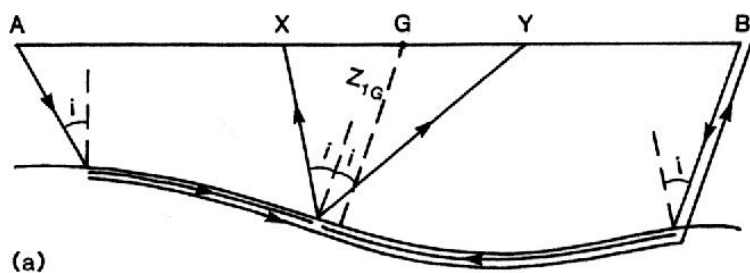


Σχήμα 3.7 : Δρομοχρονικές καμπύλες (πάνω) και η αντίστοιχη υπεδαφική κάλυψη (κάτω) δύο καταγραφών κοινής πηγής που προέκυψαν κατά την πραγματοποίηση αντίστροφου πειράματος. Οι τελείες συμβολίζουν τις πρώτες αφίξεις ενώ οι κύκλοι απεικονίζουν συνδυασμένες καταγραφές των μετωπικών κυμάτων (Lankston, 1990).

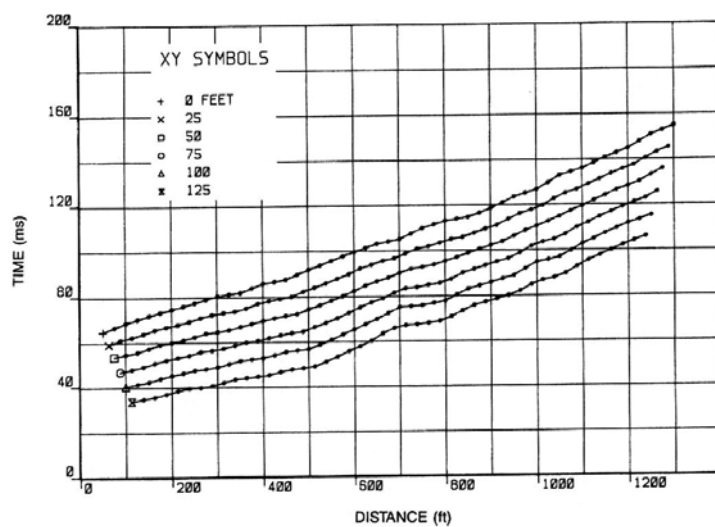


Σχήμα 3.8 : Δρομοχρονικό διάγραμμα σε περίπτωση στρώματος με κεκλιμένη την κάτω επιφάνεια (Reynolds, 1997).

Ο προσδιορισμός του βάθους της διεπιφάνειας (time-to-depth conversion) περιλαμβάνει δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο τα δεδομένα του χρόνου μετατρέπονται σε κατακόρυφη απόσταση, ενώ στο δεύτερο στάδιο, το κάθε σημείο βάθους διορθώνεται μετακινώντας το κατακόρυφα, κάτω από τη θέση του γεωφώνου από το οποίο προέκυψε, στην σωστή του θέση (Louis et al., 2001).



Σχήμα 3.9 : Διαγράμματα των σεισμικών ακτίνων για την βέλτιστη απόσταση XY (a) και για $XY = 0$ (b). Τα βέλη υποδεικνύουν το δρόμο που ακολουθούν οι σεισμικές ακτίνες από τις πηγές A και B προς τα γεωφώνια Y και X αντίστοιχα. Οι θέσεις X και Y αντιστοιχούν σε ένα ζεύγος γεωφώνων. Για διαφορετικές τιμές της απόστασης XY προκύπτει ένα πλήθος καμπύλων ανάλυσης ταχυτήτων (Lankston, 1990).



Σχήμα 3.10 : Καμπύλες ανάλυσης ταχυτήτων για αποστάσεις XY από 0 έως 125 ft (48 m). Η βέλτιστη καμπύλη με το ελάχιστο σφάλμα είναι αυτή που αντιστοιχεί σε απόσταση $XY = 0$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

4.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Στη σεισμική ανάκλαση τα κύματα επιφάνειας θεωρούνται γενικά ως θόρυβος, που δυσχεραίνει την αναγνώριση των προερχόμενων από τους βαθύτερους σχηματισμούς ανακλώμενων κυμάτων. Ωστόσο, περιέχουν πληροφορίες για τους σχηματισμούς στους οποίους διαδίδονται και αναλύονται με τις ίδιες τεχνικές, που χρησιμοποιούνται στη σεισμολογία.

Κατά την πραγματοποίηση σεισμικών διασκοπήσεων, τα κύματα επιφάνειας εμφανίζονται στα σειсмоγράμματα στο τέλος του σήματος (κατά σειρά μετά τα κύματα χώρου, διαθλώμενα και ανακλώμενα), και αναγνωρίζονται από το μεγάλο πλάτος και τη σχετικά χαμηλή συχνότητά τους (Σχήμα 4.1).

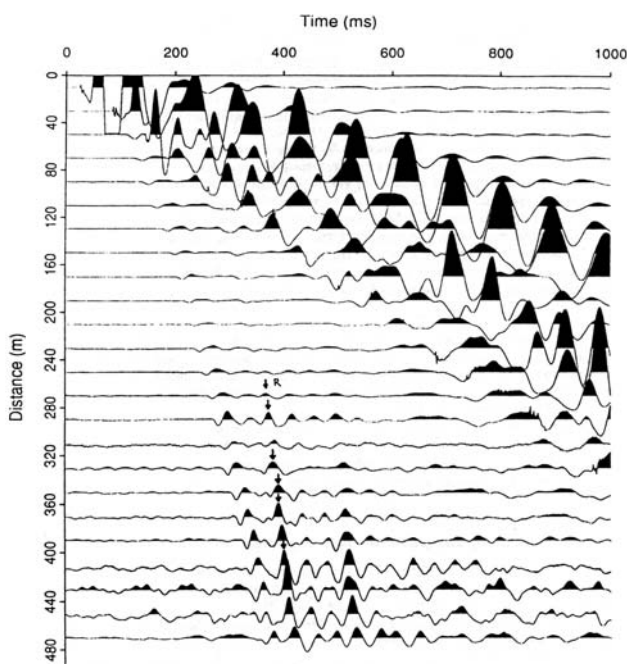
Τα επιφανειακά κύματα Love (L) δημιουργούνται από θετική συμβολή πολλαπλά ανακλώμενων SH κυμάτων σε λεπτό επιφανειακό στρώμα, ενώ τα κύματα Rayleigh (R) προέρχονται από θετική συμβολή πολλαπλά ανακλώμενων P και SV κυμάτων (Gegersen, 1976). Τα κύματα αυτά οφείλονται στην παγίδευση των ανακλάσεων τους, ιδιαίτερα στις υψηλές συχνότητες, στα επιφανειακά στρώματα γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφορετικών τρόπων (modes) διάδοσης, σχηματικά ανάλογων των αρμονικών σ' ένα δονούμενο σύστημα.

Η αρχή της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων με μετασχηματισμό του κυματικού πεδίου, προϋποθέτει τη λήψη σημάτων πλούσιων σε κύματα επιφάνειας R ή L και την ανάλυσή τους διαμέσου μίας διαδικασίας αντιστροφής των χαρακτηριστικών καμπύλων σκέδασης, για τον καθορισμό της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων κατανεμημένων με το βάθος.

Μια από τις κυριότερες διαδικασίες για την ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων είναι ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών καμπύλων σκέδασης (τα επιφανειακά κύματα

χαρακτηρίζονται σκεδαζόμενα από το γεγονός ότι η ταχύτητά τους μεταβάλλεται σε συνάρτηση με τη συχνότητα) από τα πειραματικά δεδομένα. Το βάθος διείσδυσής τους αυξάνει με την περίοδο. Η εισαγωγή ενός θεωρητικού μοντέλου της στρωματογραφίας και ο ανάλογος υπολογισμός των θεωρητικών καμπυλών σκέδασης σε συνάρτηση με τις πειραματικές, αποτελεί τη δεύτερη σημαντικότερη φάση.

Η εφαρμογή της μεθόδου αποσκοπεί στον προσδιορισμό της ταχύτητας Vs διαμέσου μιας διαδικασίας αντιστροφής των δεδομένων σκέδασης.



Σχήμα 4.1 : Χαρακτηριστικές εμφανίσεις επιφανειακών κυμάτων σε σεισμόγραμμα (Ραπτάκης, 1995).

Η μέθοδος θεωρείται από τις πλέον προνομιακές όσον αφορά στην αξιοπιστία του αποτελέσματος σε συνδυασμό με το μικρό κόστος, καθώς υπερτερεί της σεισμικής διάθλασης S – κυμάτων ως προς τη διακριτική ικανότητα των εδαφικών στρώσεων με ταχύτητες μικρότερες των υπερκείμενων, όπως επίσης και έναντι της διασκόπησης διαμέσου γεωτρήσεων, όσον αφορά στο κόστος, αφού η τελευταία προαπαιτεί γεωτρήσεις. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μακρά και επίπονη επεξεργασία η οποία προϋποθέτει τόσο την τεχνογνωσία για τη λήψη “σωστού” σήματος στο πεδίο, όσο και τη γνώση βασικών θεωρητικών εννοιών, που κυρίως άπτονται του προσδιορισμού και

της ανάλυσης των χαρακτηριστικών καμπύλων σκέδασης, καθώς και της αντιστροφής τους στην κατανομή των Vs με το βάθος.

4.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Η διάδοση των κυμάτων επιφάνειας σε στρωματομένο μέσο μελετήθηκε λεπτομερώς θεωρητικά από πολλούς συγγραφείς (βλέπε για παράδειγμα Aki and Richards, 1980). Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται με συντομία, σε εφαρμοσμένο επίπεδο, οι βασικές έννοιες που σχετίζονται με το κύριο ζητούμενο στην ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων με μετασχηματισμό του κυματικού πεδίου, που είναι ο προσδιορισμός και η ανάλυση πειραματικών και θεωρητικών καμπυλών σκέδασης, της ταχύτητας φάσης C.

Στις ενότητες που ακολουθούν τίγονται θέματα που αφορούν τη διαδικασία λήψης του σήματος στο πεδίο, την εμφάνιση διαφορετικών τρόπων διάδοσης, καθώς και τις τεχνικές προσδιορισμού των καμπυλών σκέδασης.

4.3 Διατάξεις πεδίου

Η διάταξη πηγής γεωφώνων συνήθως είναι εκείνη η οποία εφαρμόζεται στη σεισμική διάθλαση. Εφόσον ο προσδιορισμός των πειραματικών καμπυλών σκέδασης βασίζεται στην ανάλυση των σειсмоγραμμάτων γίνεται φανερό ότι η όσο το δυνατόν πιο ευκρινής καταγραφή των επιφανειακών κυμάτων είναι πολύ σημαντική για την εφαρμογή της μεθόδου.

Η λήψη των σημάτων (με σκοπό την αναγνώριση των χαρακτηριστικών σκέδασης), με την ανάπτυξη των πολυκάναλων καταγραφικών οργάνων (ψηφιακών σειсмоγράφων ενίσχυσης), γίνεται ταυτόχρονα από πολλά γεώφωνα (12, 24, 48 ...), γεγονός που δίνει τη δυνατότητα βελτίωσης του λόγου σήματος / θορύβου, κάλυψης μεγάλων αποστάσεων διασκόπησης και δραστηκής μείωσης των εργασιών πεδίου.

Η διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου άρχεται λοιπόν, με την προσεκτική λήψη των σειсмоγραμμάτων στο πεδίο. Η τεχνική λήψης του σήματος, στο οποίο θα πρέπει να δεσπόζουν τα κύματα επιφάνειας, απαιτεί ορισμένες ρυθμίσεις. Αφενός, προϋποθέτει τη ρύθμιση της ενίσχυσης (gain) στην απόκριση των γεωφώνων σε σχέση με τον τύπο, των

ίδιων των γεωφώνων (ιδιοσυχνότητα και απόσβεση), της πηγής διέγερσης (ενέργεια και φασματικό περιεχόμενο) και του εδάφους (δυναμικά χαρακτηριστικά), προκειμένου να μην κορεστούν οι φάσεις που κυρίως ενδιαφέρουν, για τον προσδιορισμό των πειραματικών καμπυλών σκέδασης. Αφετέρου, προϋποθέτει τη ρύθμιση των αποστάσεων πηγής – γεωφώνων και της ισαπόστασης των γεωφώνων, των χρόνων καταγραφής για την αποφυγή της χρονικής δίπλωσης και την εξασφάλιση της υψηλής ανάλυσης της χρονοσειράς, καθώς και το επιθυμητό επίπεδο ανάλυσης των σχηματισμών που ενδιαφέρουν.

Τα κριτήρια για την επιλογή των διαστημάτων d μεταξύ των γεωφώνων διαμορφώνονται ανάλογα με τους επιδιωκόμενους σκοπούς. Το μήκος της διάταξης, παίζει ρόλο και στο βάθος της διασκόπησης αλλά κυρίως στο βαθμό ανάλυσης των γεωλογικών σχηματισμών, καθώς η αποτελεσματικότητα της μεθόδου σε σχέση με το βάθος περιορίζεται από $1/3$ έως λ (Ραπτάκης, 1995). Ένα σχετικά μικρό μεσοδιάστημα δίνει τη δυνατότητα της λεπτομερέστερης διασκόπησης των επιφανειακών σχηματισμών κυρίως, ενώ με μεγάλο μήκος χάνεται η λεπτομερής ανάλυση των επιφανειακών και μικρού πάχους στρωμάτων αλλά επιτυγχάνεται η διερεύνησή τους σε μεγάλα βάθη.

Η 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.

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

Εκτός από το συχνοτικό περιεχόμενο της πηγής, σημαντικό ρόλο στην “ποιότητα” του σήματος παίζει και η συχνοτική απόκριση των γεωφώνων. Έχει αποδειχθεί ότι,

γεώφωνα με χαμηλή ιδιοσυχνότητα της τάξεως από 1.0. έως 4.5 Hz, υποβοηθούν στην καταγραφή κυμάτων μεγάλης περιόδου και άρα και στην εξασφάλιση διασκόπησης σε μεγαλύτερα βάθη, απ' ότι σε σχέση με τα γεώφωνα υψηλότερων ιδιοσυχνοτήτων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται φανερό ότι, η γεωμετρία της διάταξης στο πεδίο καθώς και τα χαρακτηριστικά της πηγής και των γεωφώνων, έχουν μεγάλη σημασία για τον προσδιορισμό των πειραματικών καμπυλών σκέδασης, που βασίζονται στην ταχύτητα φάσης C, όπως επίσης και στο τελικό αποτέλεσμα της κατανομής της ταχύτητας Vs με το βάθος.

Ανακεφαλαιώνοντας, όπως διαπιστώθηκε από τα παραπάνω, μεγάλης σημασίας αποτελεί η απόκτηση των σεισμικών δεδομένων έτσι ώστε να περιέχουν όσο το δυνατόν περισσότερες καταγραφές από επιφανειακά κύματα (κυρίως Rayleigh) και λιγότερες από κύματα χώρου. Αυτό, επιτυγχάνεται τόσο με κατάλληλη επιλογή πηγής, όσο και με κατάλληλη διάταξη πηγής – γεωφώνων.

Η πηγή θα πρέπει να εξασφαλίζει την γένεση ικανοποιητικού εύρους συχνοτήτων με σχετικά ομοιόμορφα κατανεμημένη ενέργεια στο φασματικό περιεχόμενο, κυρίως σε χαμηλές συχνότητες (από 1 έως και 100 Hz τουλάχιστον), έτσι ώστε τα επιφανειακά κύματα να περιέχουν μήκη κύματος, τέτοια ώστε να διεισδύουν μέχρι το βάθος που επικεντρώνεται η μελέτη. Λόγω του ότι τα επιφανειακά κύματα υφίστανται μεγάλη εξασθένηση με το βάθος (σε βάθος ίσο περίπου με 1,5 φορά το μήκος κύματος, η κατακόρυφη συνιστώσα του πλάτους γίνεται ίση με το 10 % του αρχικού πλάτους, που έχει στην ελεύθερη επιφάνεια (Nazarian, 1984)), ουσιαστικά κύματα με μήκη κύματος λ περιέχουν πληροφορίες για βάθη $d = \lambda$.

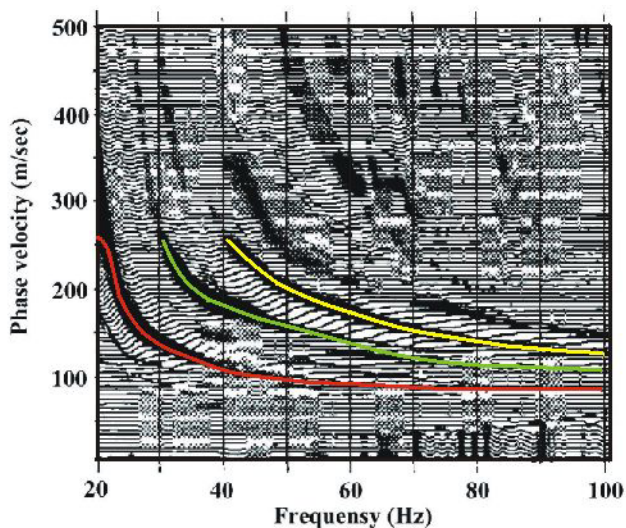
Επιπλέον, η διάταξη πηγής γεωφώνων θα πρέπει να ευνοεί την καταγραφή των κυμάτων με μήκη κύματος που μας ενδιαφέρουν. Με κατάλληλη ισαπόσταση των γεωφώνων είναι δυνατό το ενδιαφέρον μας να επικεντρωθεί σε ένα συγκεκριμένο εύρος μηκών κύματος.

Βέβαια, μεγάλο ρόλο παίζει και το πλήθος των καναλιών καταγραφής σε συνδυασμό με την υπεδαφική κάλυψη που επιτυγχάνεται με αυτά. Όπως φαίνεται από μελέτες (Park et

al., 1998), όσο μεγαλύτερη είναι η υπεδαφική κάλυψη, τόσο καλύτερη είναι και η ευκρίνεια των καμπύλων διασποράς. Ωστόσο, σε περιπτώσεις γεωτεχνικών μελετών, πολλές φορές είναι δύσκολο να επιτευχθεί μεγάλη υπεδαφική κάλυψη λόγω περιορισμένης έκτασης της περιοχής μελέτης.

4.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες διασποράς

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες διασποράς διαφορετικών τάξεων, αντιστοιχούν στην μέγιστη σεισμική ενέργεια του κυματικού πεδίου στο χώρο ταχύτητας και συχνότητας, διαχωρίζονται στην θεμελιώδη και στις δευτερεύοντες ή ανώτερης τάξης (Σχήμα 1.12).



Σχήμα 4.2 : Χαρακτηριστικές καμπύλες διασποράς (Park et al., 1998).

- θεμελιώδης
- 1^{ης} τάξης
- 2^{ης} τάξης

Η μορφή των θεμελιώδους και ανώτερης τάξης (αν και εφόσον αυτές υπάρχουν) χαρακτηριστικών καμπύλων σκέδασης (σε ένα σχετικά μεγάλο εύρος συχνοτήτων), είναι χαρακτηριστική του τρόπου με τον οποίο διαδίδονται τα επιφανειακά κύματα διαμέσου των εδαφικών σχηματισμών και κατ' επέκταση χαρακτηριστική των ιδιοτήτων των σχηματισμών.

Όλες οι τάξεις των χαρακτηριστικών καμπύλων διασποράς αντιστοιχούν σε διαφορετικές ταχύτητες φάσης. Η εμφάνιση ή όχι των καμπύλων διασποράς ανώτερης

τάξης, εξαρτάται από την στρωματογραφία, το δρόμο διάδοσης των R και L κυμάτων, από την πηγή και τα γεώφωνα.

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

Ικανοποιητική ευκρίνεια μεταξύ των διαφορετικών χαρακτηριστικών καμπύλων είναι δυνατό να επιτευχθεί κυρίως σε απλή δομή (μικρού αριθμού στρώσεων). Σε περιπτώσεις πολλών στρώσεων και αυξομειώσης των σεισμικών ταχυτήτων τους με το βάθος, οι καμπύλες ανώτερης τάξης, περιπλέκονται στις μικρές περιόδους και η διάκρισή τους γίνεται ασαφής. Ειδικότερα, στην περίπτωση που τα στρώματα παρουσιάζουν μείωση της ταχύτητας με το βάθος, εμφανίζονται χαρακτηριστικές καμπύλες ανώτερης τάξης που παίζουν σημαντικό ρόλο σε κάποιο εύρος συχνοτήτων. Οι καμπύλες αυτές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση της μεθόδου για την αξιόπιστη κατανομή της Vs με το βάθος.

Συμπερασματικά, ενδέχεται λοιπόν σε ένα σχετικά μικρό εύρος συχνοτήτων να εμφανίζονται δύο ή / και τρεις χαρακτηριστικές καμπύλες διασποράς, ανάλογα με το ποσό της σεισμικής ενέργειας που καταλαμβάνουν οι καμπύλες ανώτερης τάξης.

Η ανάλυση των καμπυλών σκέδασης συνήθως επικεντρώνεται στη θεμελιώδη χαρακτηριστική καμπύλη, αφού οι υπόλοιπες μπορούν να αποδοθούν σε θόρυβο εφόσον είναι ενεργειακά ασθενείς. Το βασικό πλεονέκτημα που προσφέρει η ανάλυση της θεμελιώδους χαρακτηριστικής καμπύλης είναι ότι εμπεριέχει πληροφορίες από ένα σχετικά μεγάλο εύρος μηκών κύματος (περιόδους), αναγκαίο για τη συλλογή πληροφοριών από τα επιφανειακά στρώματα μέχρι και τα πλέον βαθύτερα, με αποτέλεσμα τον ακριβέστερο προσδιορισμό του εδαφικού προτύπου. Στα μεγαλύτερα

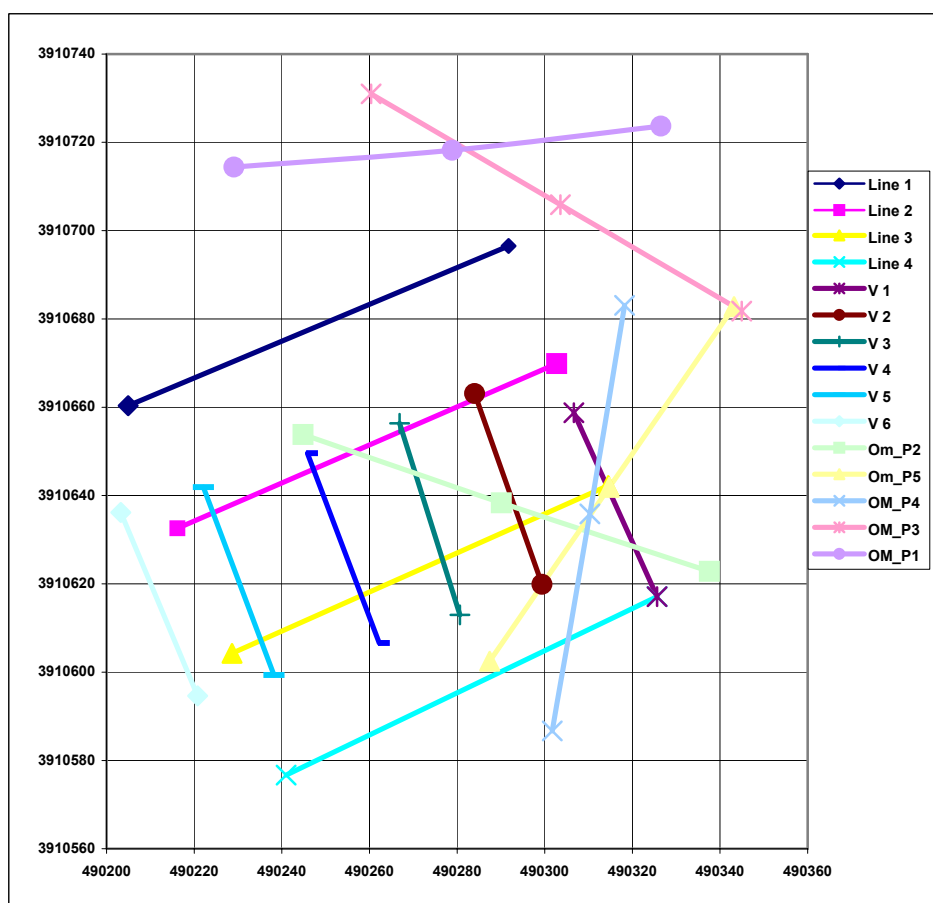
μήκη κύματος περιέχονται πληροφορίες από βαθύτερα στρώματα. Αντίθετα, μικρότερα μήκη κύματος περιέχουν πληροφορίες από επιφανειακούς σχηματισμούς. Επομένως, όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος των παραγόμενων μηκών κύματος, τόσο επηρεάζεται θετικά η ανάλυση για τα εδαφικά στρώματα και άρα συλλέγονται περισσότερες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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

5.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ ΣΤΟ ΟΡΟΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΟΜΑΛΟΥ

Στην ευρύτερη περιοχή του Οροπεδίου του Ομαλού σχεδιάστηκαν και πραγματοποιήθηκαν 15 σεισμικές γραμμές οι οποίες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα όπως επίσης και οι συντεταγμένες τους. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του μαθήματος του 8^{ου} εξαμήνου Ασκήσεις Υπαίθρου IV τις χρονιές 2002 και 2003.



Σχήμα 5.1: Απεικόνιση των σεισμικών γραμμών μελέτης

Πιο συγκεκριμένα το 2002 πραγματοποιήθηκαν οι σεισμικές διασκοπήσεις Om_P1, Om_P2, Om_P3, Om_P4, και Om_P5 ενώ το 2003 οι Line 1, Line 2, Line 3, Line 4, V 1, V 2, V 3, V 4, V 5, και V 6.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί μέσω των οποίων αναμένεται να διαδοθούν τα σεισμικά κύματα είναι:

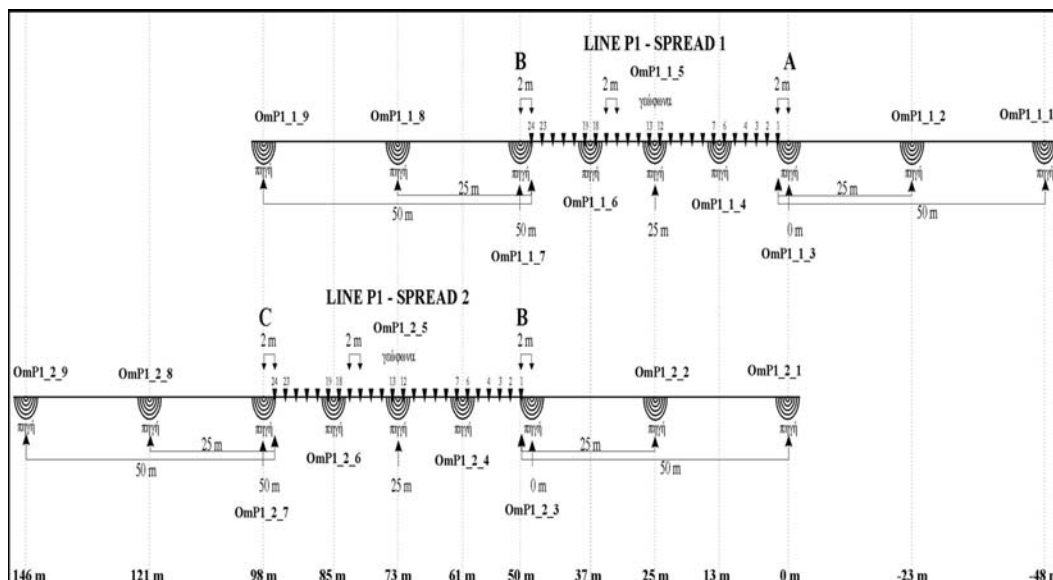
- επιφανειακά στρώματα Τεταρτογενών αποθέσεων (αλούβια – διλούβια) μεταβλητού πάχους και συγκεκριμένα μικρότερο πάχος στις παρυφές του οροπεδίου και μεγαλύτερο στο κέντρο.
- Ασβεστολίθοι της ζώνης Τρίπολης και πλακώδεις ασβεστόλιθοι στο υπόβαθρο της περιοχής.

Κάθε γραμμή μελέτης αποτελείται από 2 αναπτύγματα 24 γεωφώνων το κάθε ένα εκτός από τις γραμμές μελέτης V 1, V 2, V 3, V 4, V5 και V 6 οι οποίες αποτελούνται από 1 ανάπτυγμα 24 γεωφώνων. Σε κάθε γραμμή μελέτης πραγματοποιούνται καταγραφές τόσο για την απόκτηση διαμήκων (P) κυμάτων, όσο και για την απόκτηση εγκάρσιων (S) κυμάτων. Τα σημεία πηγών και οι θέσεις των γεωφώνων είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις όπως επίσης και ο ρυθμός δειγματοληψίας (0,2 msec) και η διάρκεια καταγραφής (408 msec).

Η συνολική διαδικασία απόκτησης των P – κυμάτων ακολουθεί τα εξής βήματα :

- Οριοθέτηση του πρώτου αναπτύγματος με μετροταινίες.
- Τοποθέτηση του σειсмоγράφου στο κέντρο της γραμμής μελέτης και άπλωμα των 2 καλωδίων των γεωφώνων αντιδιαμετρικά από αυτόν με προσοχή έτσι ώστε να υπάρχει μια υποδοχή για γεωφώνο κάθε 2 m.
- Προσεκτικό κάρφωμα των γεωφώνων κατακόρυφης συνιστώσας στο έδαφος ακριβώς δίπλα στην μετροταινία σε ισαποστάσεις των 2m.
- Τοποθέτηση της πηγής (σιδερένιας πλάκας με σφυρί) σε μία θέση, σύμφωνα με το σχέδιο το οποίο παρουσιάζεται παρακάτω.
- Λήψη των καταγραφών των P – κυμάτων για την συγκεκριμένη θέση.
- Τοποθέτηση της πηγής σε επόμενη θέση και επανάληψη του παραπάνου βήματος.

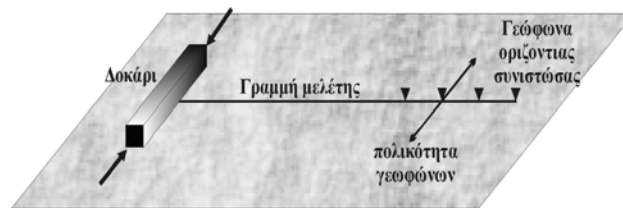
- Αφού ολοκληρωθούν οι καταγραφές των P – κυμάτων για το πρώτο ανάπτυγμα, τα γεώφωνα παραμένουν στην ίδια θέση και πραγματοποιείται το πείραμα της σεισμικής διάθλασης των S – κυμάτων.



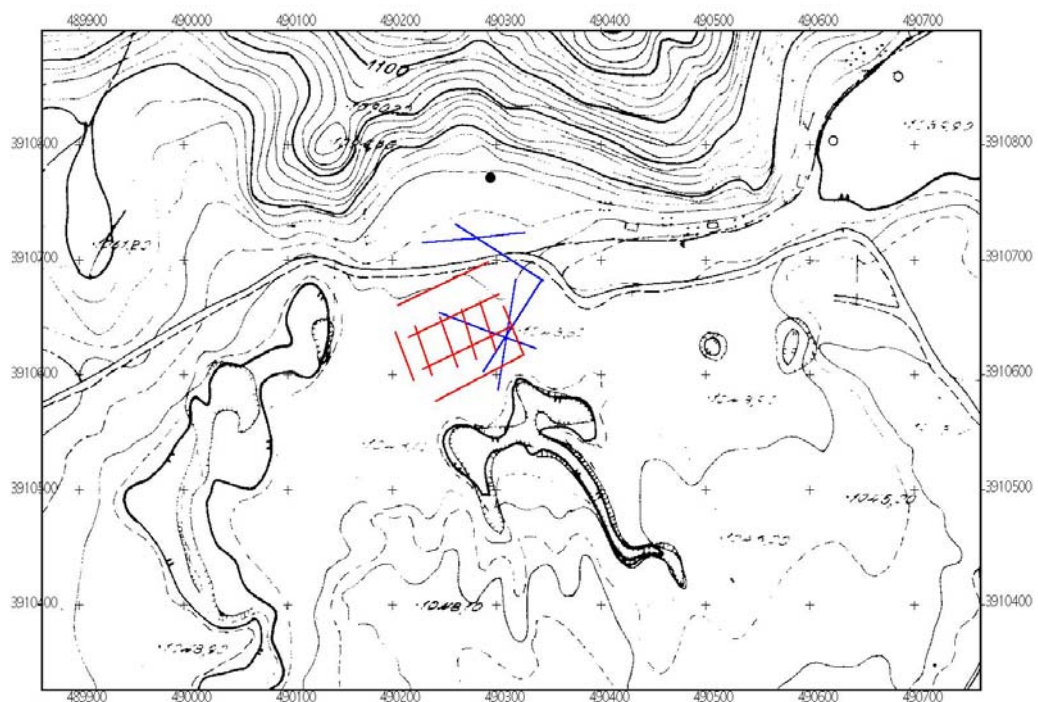
Σχήμα 5.2: Γεωμετρία ενός αναπτύγματος μιας σεισμικής γραμμής μελέτης όπου απεικονίζονται οι θέσεις των σεισμικών πηγών σε σχέση με τα γεώφωνα.

Η συνολική διαδικασία απόκτησης των S – κυμάτων που ακολουθείται είναι η ίδια σε γενικές γραμμές με αυτή που περιγράφεται από τα παραπάνω βήματα με τις εξής διαφορές :

- Αντί για γεώφωνα κατακόρυφης συνιστώσας, τοποθετούνται, με ισαπόσταση πάλι 2 m, γεώφωνα οριζόντιας συνιστώσας. Τα γεώφωνα αυτά τοποθετούνται προσανατολισμένα για την καταγραφή κυρίως των S κυμάτων.
- Ως πηγή χρησιμοποιείται ένα ξύλινο δοκάρι και σφυρί για την παραγωγή σεισμικών κυμάτων, το οποίο πακτώνεται σταθερά στο έδαφος με την υποβολή βάρους.
- Οι καταγραφές λαμβάνονται αρχικά με το σφυρί να χτυπάει στο ένα άκρο του δοκαριού και κατόπιν οι καταγραφές λαμβάνονται με το σφυρί να χτυπάει στο άλλο άκρο του δοκαριού, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.3 : Σχηματική παράσταση της δημιουργίας και καταγραφής των διαθλώμενων S-κυμάτων.



Σχήμα 5.4: Τοπογραφικός Χάρτης περιοχής μελέτης πάνω στον οποίο απεικονίζονται οι σεισμικές γραμμές μελέτης

5.2 Εξοπλισμός

Ο βασικός εξοπλισμός ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην ύπαιθρο περιελάμβανε τα εξής :

- Σεισμογράφος 24 καναλιών ES 2401 της EG & GEOMETRICS ©.
- Γεώφωνα κατακόρυφης και οριζόντιας συνιστώσας ιδιοσυχνότητας 14 Hz.
- Μια βαριοπούλα 5 kg για την δημιουργία σεισμικών δονήσεων.
- Μια σιδερένια πλάκα και ένα ξύλινο δοκάρι.

5.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ RAY – TRACING

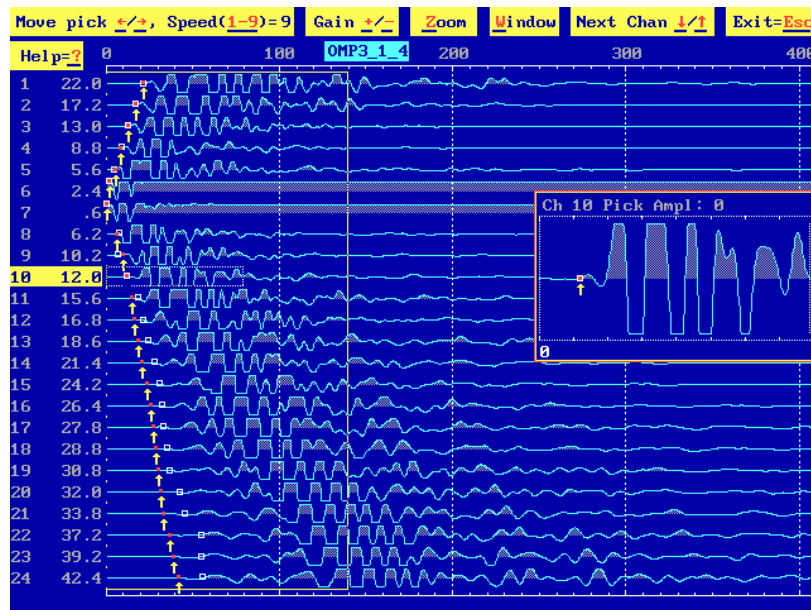
Οι καταγραφές των σεισμικών δεδομένων (καταγραφές κοινής πηγής shot gather) αποτελούνται από σεισμογράμματα, στα οποία απεικονίζεται για κάθε κανάλι του σεισμογράφου, που αντιστοιχεί σε ένα γεώφωνο, η εδαφική ταλάντωση σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων περιλαμβάνει τα εξής στάδια :

1. Επιλογή των πρώτων αφίξεων.
2. Δημιουργία δρομοχρονικών διαγραμμάτων.
3. Προσδιορισμός των σεισμικών ταχυτήτων και των μοντέλων βάθους.

5.3.1 Επιλογή των πρώτων αφίξεων

Η επιλογή των πρώτων αφίξεων πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό SIPIK της EG & GEOMETRICS © και περιλαμβάνει τον καθορισμό της χρονικής στιγμής όπου το έδαφος αρχίζει να ταλαντώνεται σε κάποιο γεώφωνο. Η διαδικασία αυτή για την καταγραφή κοινής πηγής 4 της γραμμής μελέτης OM_P3 απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.

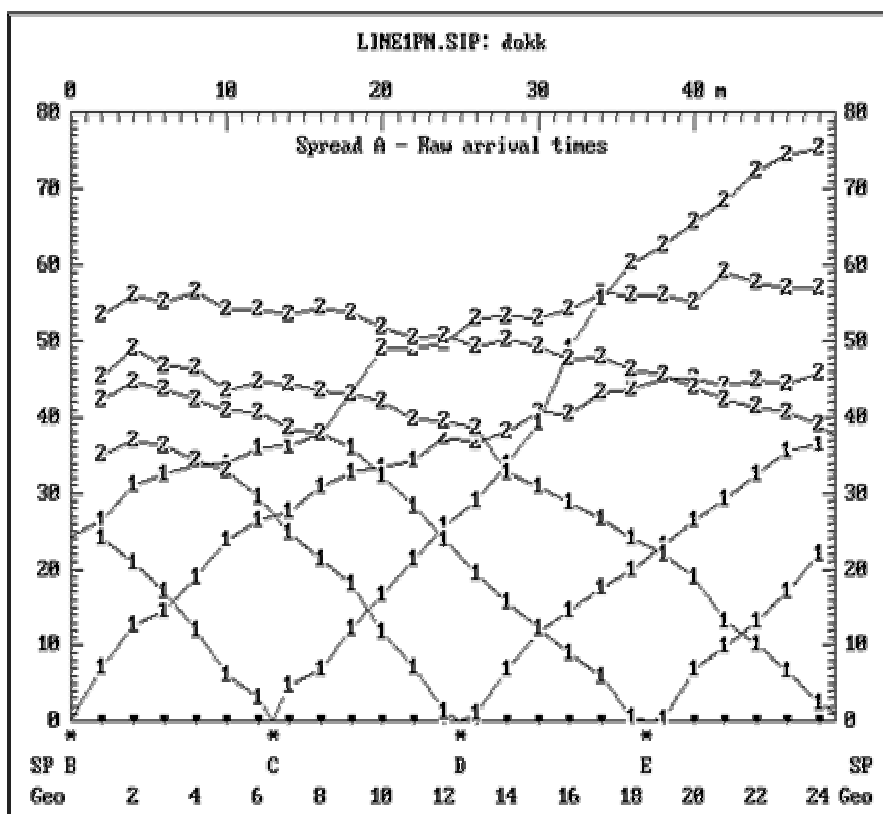


Σχήμα 5.5: Επιλογή πρώτων αφίξεων για την καταγραφή κοινής πηγής 4 της σεισμικής καταγραφής OM_P3

5.3.2 Δημιουργία Δρομοχρονικών Διαγραμμάτων

Γνωρίζοντας την απόσταση του κάθε γεωφώνου από την πηγή είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένα διάγραμμα πρώτων αφίξεων συναρτήσει της απόστασης από την σεισμική πηγή, δρομοχρονικό διάγραμμα. Στο διάγραμμα αυτό εντοπίζονται τα απευθείας και τα μετωπικά κύματα από κάθε διεπιφάνεια με την βοήθεια του λογισμικού SIPIN της EG & GEOMETRICS © τα οποία αντιστοιχούνται σε εδαφικά στρώματα. Παράδειγμα δρομοχρονικών διαγραμμάτων για την γραμμή μελέτης OM_P1 παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.

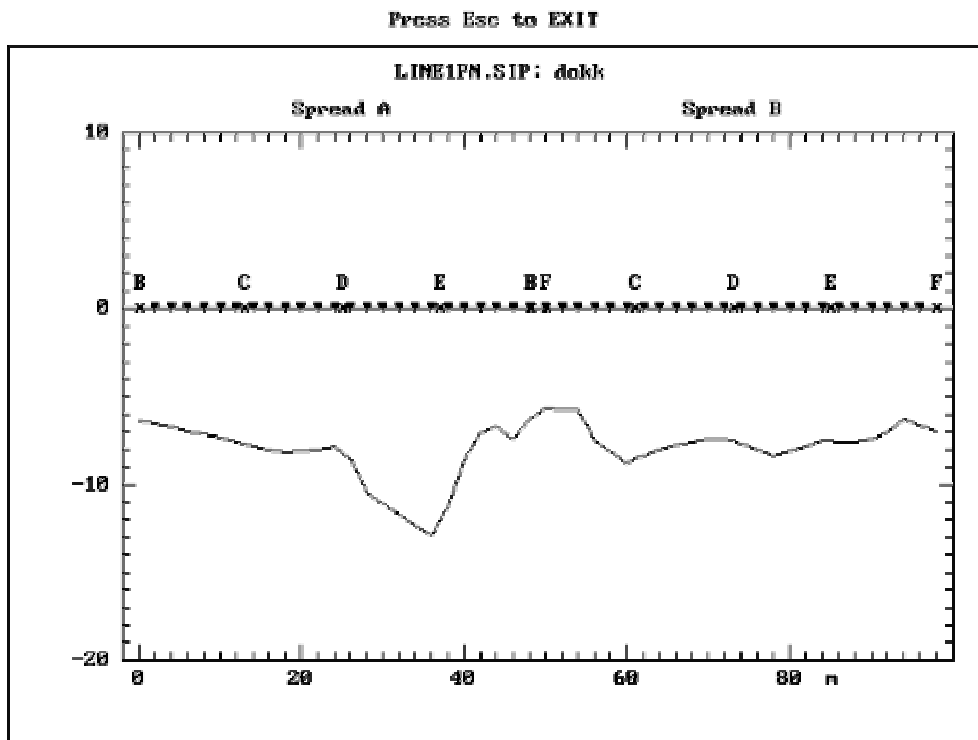
Spread 1 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



Σχήμα 5.6: Παράδειγμα δρομοχρονικών διαγραμμάτων για την γραμμή μελέτης OM_P1.

5.3.3 Προσδιορισμός των σεισμικών ταχυτήτων και των μοντέλων βάθους (σεισμικές τομές).

Ο προσδιορισμός των σεισμικών ταχυτήτων και των μοντέλων βάθους (σεισμικές τομές) προκύπτουν από το λογισμικό SIPT 2 της EG & GEOMETRICS © χρησιμοποιώντας την θεωρία επεξεργασίας των δεδομένων σεισμικής διάθλασης και την τεχνική Ray Tracing (Haeni et al, 1987). Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το μοντέλο βάθους που προέκυψε για την γραμμή μελέτης OMP_1 όπως προκύπτει από το λογισμικό SIPT 2 με ταχύτητα για το πρώτο στρώμα ίση με 665m/s και για το δεύτερο 1990m/s.



Σχήμα 5.7: Μοντέλο βάθους για την γραμμή μελέτης OMP_1

5.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ GRM

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3 σε κάποιες περιπτώσεις θέλουμε να προσδιορίσουμε την πλευρική μεταβολή της ταχύτητας του κάθε στρώματος. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί τις καταγραφές των μετωπικών κυμάτων που προέρχονται από την ίδια διεπιφάνεια αλλά από διαφορετική πηγή. Με ανάλογη διαδικασία όπως η μέθοδος Ray Tracing, χρησιμοποιούνται οι πρώτες αφίξεις των σεισμικών κυμάτων και καθορίζεται ο αριθμός των εδαφικών στρωμάτων ενώ δημιουργούνται οι δρομοχρονικές καμπύλες που αντιστοιχούν στο κάθε ένα στρώμα. Στην συνέχεια πραγματοποιείται ένας συνδυασμός των μετωπικών κυμάτων που προέρχονται από την ίδια διεπιφάνεια, ακολουθεί η ανάλυση των ταχυτήτων και έτσι πραγματοποιείται ο προσδιορισμός του βάθους των διεπιφανειών. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με αποτέλεσμα να προκύψει για κάθε διεπιφάνεια μια δρομοχρονική καμπύλη για το κανονικό πείραμα αλλά και μία για το αντίστροφο.

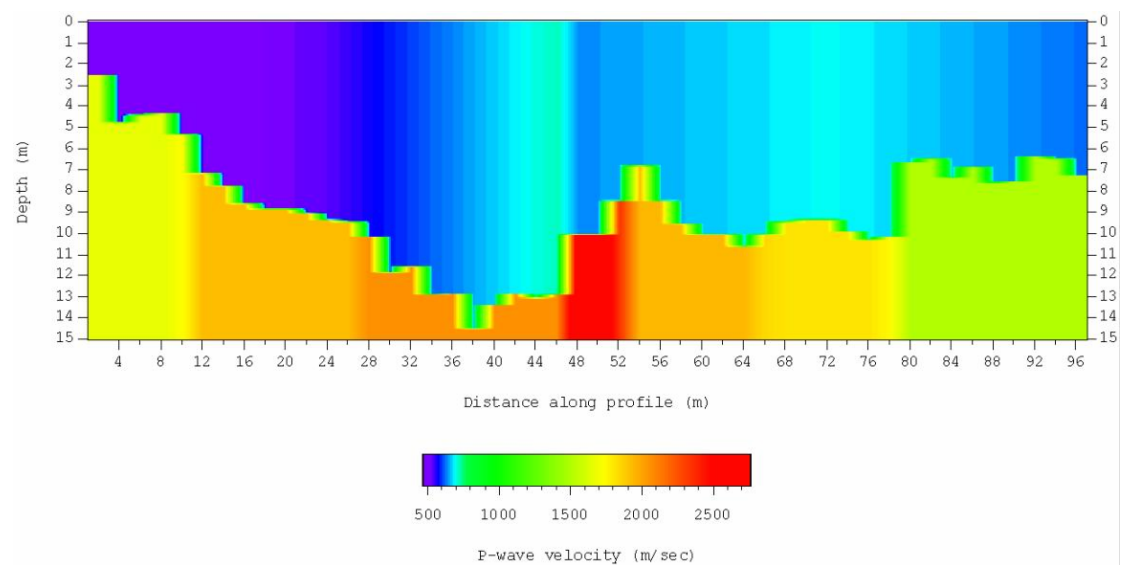
Τα αποτελέσματα εκτυπώνονται με την εξής μορφή :

GRM DEPTH SECTION RESULTS							
S – N : STATION NUMBER, V: VELOCITY (m/sec), Z: DEPTH (m)							
S - N	V1	V2	V3	V4	Z1	Z2	Z3
2	469.8	1652.9			2.45		
4	475.55	1652.9			4.171		
6	481.3	1652.9			4.377		
8	487.05	1652.9			4.23		
10	492.81	1724.65			5.236		
12	498.56	1934.35			7.073		
14	504.31	1934.35			7.722		
16	510.06	1934.35			8.53		
18	515.81	1934.35			8.808		
20	521.57	1934.35			8.765		
22	527.32	1934.35			9.006		
24	533.07	1934.35			9.293		
26	549.61	1934.35			9.377		
28	566.15	2072.29			10.888		
30	582.69	2072.29			11.719		
32	599.23	2072.29			11.518		
34	615.77	2072.29			12.833		
36	632.3	2072.29			12.815		
38	648.84	2072.29			13.459		
40	665.38	2072.29			13.349		
42	681.92	2072.29			12.782		
44	698.46	2072.29			12.983		
46	715	2072.29			12.874		
48	640.62	2757.57			10.044		
50	640.62	2757.57			10.044		
52	645.04	2348.94			8.392		
54	649.47	1940.3			6.733		
56	653.89	1940.3			8.382		
58	658.32	1940.3			9.496		
60	662.74	1940.3			9.991		

62	667.17	1940.3	9.996
64	671.59	1940.3	10.572
66	676.01	1842.97	9.974
68	680.44	1810.52	9.406
70	684.86	1810.52	9.33
72	689.29	1810.52	9.226
74	683.7	1810.52	9.828
76	678.11	1810.52	10.247
78	672.52	1745.63	10.044
80	666.93	1503.63	6.623
82	661.34	1503.63	6.407
84	655.76	1503.63	7.287
86	650.17	1503.63	6.778
88	644.58	1503.63	7.563
90	638.99	1503.63	7.483
92	633.4	1503.63	6.285
94	627.81	1503.63	6.246
96	622.22	1503.63	7.177

Στην συνέχεια για να απεικονιστούν τα αποτελέσματα και γραφικά δημιουργείται ένα αρχείο στο Excell το οποίο καταχωρείται στην συνέχεια στο πρόγραμμα Transform.

Το αποτέλεσμα είναι της μορφής:



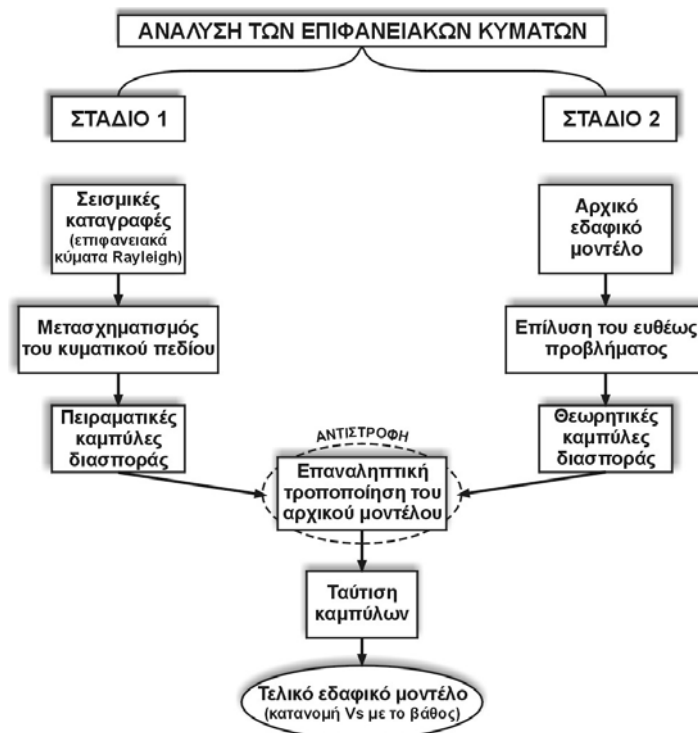
Σχήμα 5.8: Απεικόνιση αποτελεσμάτων GRM

5.5 ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

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

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

Από τη διαδικασία της αντιστροφής προσδιορίζονται οι παράμετροι του εδαφικού μοντέλου. Η μεθοδολογία της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh είναι δυνατό να χωριστεί σε δύο διακριτά στάδια (Σχ. 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. Ενώ στο δεύτερο στάδιο προσδιορίζονται οι θεωρητικές καμπύλες διασποράς για οριζόντια στρωματομένο εδαφικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας την τεχνική Thomson-Haskell (Haskell, 1953, Schwab and Knopoff, 1972). Τροποποιώντας επαναληπτικά το εδαφικό μοντέλο επιτυγχάνεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης διασποράς στην πειραματική (διαδικασία που ονομάζεται αντιστροφή). Έτσι, εφόσον πραγματοποιηθεί ταύτιση των καμπύλων, προσδιορίζεται το τελικό εδαφικό μοντέλο (κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων με το βάθος). Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται αναλυτικά όλα τα βήματα που ακολουθούνται κατά τη διαδικασία της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh.



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα ροής που περιγράφει τη μεθοδολογία της ανάλυσης των κυμάτων Rayleigh.

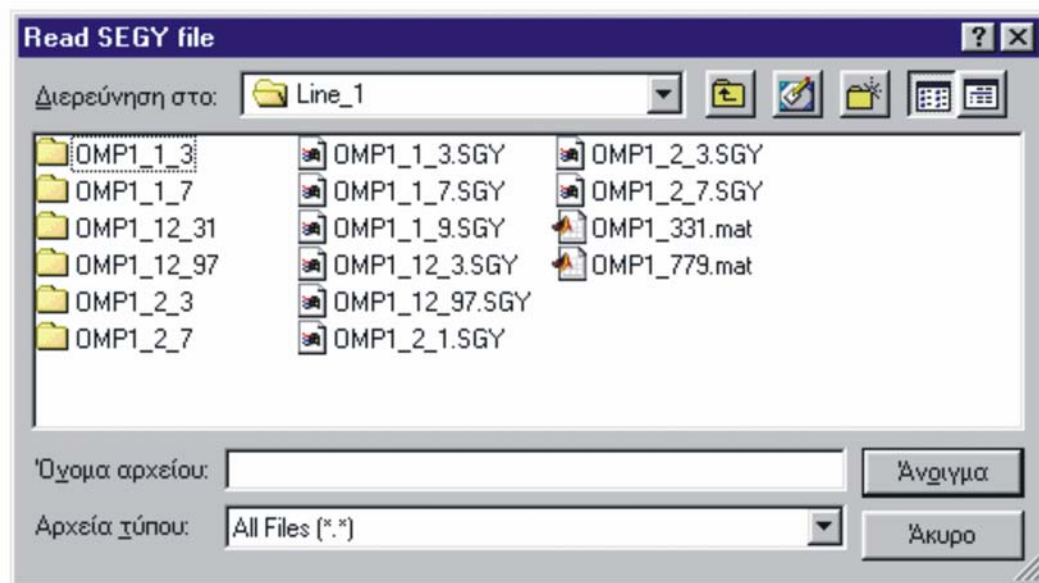
5.5.1 Στάδια επεξεργασίας των δεδομένων των επιφανειακών κυμάτων

Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh των σεισμικών δεδομένων στην περιοχή μελέτης που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή, η μεθοδολογία που περιγράφεται αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB υποστηριζόμενη από αλγόριθμους σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 77. Τα βασικά στάδια της επεξεργασίας είναι τα εξής :

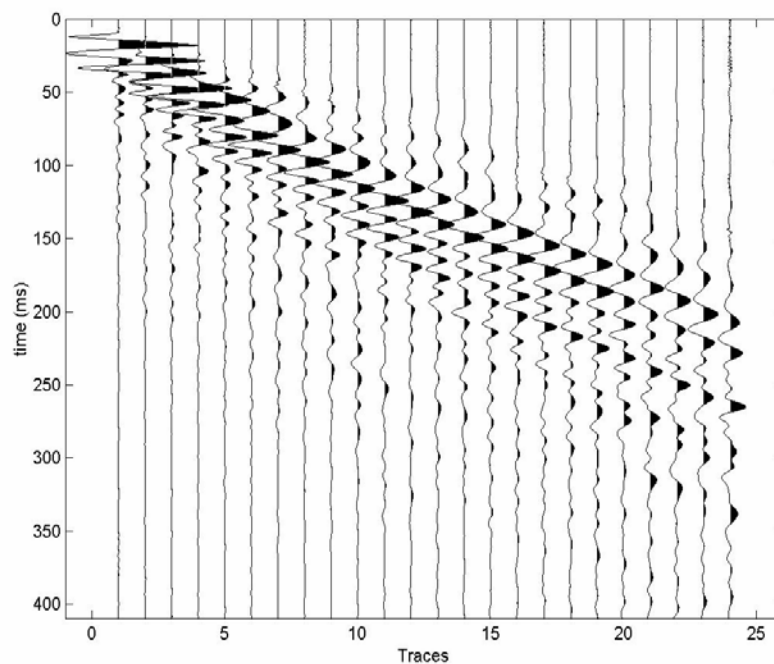
ΣΤΑΔΙΟ 1

Για να είναι δυνατή η ανάγνωση των σεισμικών δεδομένων στο Matlab αρχικά είναι απαραίτητη η μετατροπή τους από τον τύπο αρχείου SEG – 2, με τον οποίο αποθηκεύονται στον σειсмоγράφο, σε SEG – Y. Μετά την μετατροπή των αρχείων από SEG – 2 σε SEG – Y και εκτελώντας την εντολή “readdat1”, δίδεται στο χρήστη η επιλογή του αρχείου προς ανάγνωση μέσω ενός παραθύρου διαλόγου (Σχήμα 2).

Τα δεδομένα αποθηκεύονται αυτόματα σε πίνακες για την περαιτέρω επεξεργασία τους, ενώ παράλληλα απεικονίζονται με την μορφή σεισμικών ιχνών (Σχήμα 3)



Σχήμα 5.10: Παράθυρο διαλόγου για την ανάγνωση του αρχείου των σεισμικών δεδομένων



Σχήμα 5.11: Απεικόνιση των σεισμικών δεδομένων με την μορφή των σεισμικών ιχνών

Στην συνέχεια, εκτελώντας την εντολή “inversion” πραγματοποιούνται διαδοχικά οι ακόλουθες διαδικασίες για την κατασκευή των καμπυλών διασποράς και τον υπολογισμό της κατανομής των ταχυτήτων των διατμητικών κυμάτων με το βάθος.

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 $x - t$ στον χώρο $p - \omega$ (McMechan and Yedlin, 1981).

Αρχικά εφαρμόζεται γραμμική χρονική απόκλιση (Linear MoveOut – LMO) στα σεισμικά δεδομένα:

$$u(x, t) \xrightarrow{\text{LMO}} U(x, \tau) = U(x, t - px) \quad (1)$$

όπου $u(x, t)$ είναι η κατακόρυφη μετατόπιση των υλικών σημείων στο πεδίο απόστασης – χρόνου, τ είναι ο χρόνος καθυστέρησης:

$$\tau = t - px \quad (2)$$

και p είναι η παράμετρος της σεισμικής ακτίνας (εξ. 3), η οποία για οριζόντια διαδιδόμενα σεισμικά κύματα ισούται με το αντίστροφο της σεισμικής ταχύτητας και ονομάζεται βραδύτητα φάσης (Yilmaz, 1987).

$$p = \left. \frac{\sin(i)}{V} \right|_{i=90^\circ} \Rightarrow p = \frac{1}{V_{\text{hor}}} \quad (3)$$

Επίσης, η βραδύτητα φάσης (phase slowness) σχετίζεται με την ταχύτητας φάσης (c) σύμφωνα με τη σχέση:

$$p = \frac{1}{c}$$

(4)

Η ταχύτητα φάσης εκφράζει τη ταχύτητα διάδοσης κάθε αρμονικού σεισμικού κύματος.

Εφαρμόζοντας την ιδιότητα της χρονικής μετάθεσης (time shifting) του μετασχηματισμού Fourier, η γραμμική χρονική απόκλιση πραγματοποιείται στο χώρο των συχνοτήτων σύμφωνα με την σχέση:

$$U(x, \tau) = U(x, \tau - px) \leftrightarrow \tilde{U}(x, f) e^{-i2\pi fpx}$$

(5)

όπου $u(x, \tau) \leftrightarrow \tilde{U}(x, f)$ και το σύμβολο \leftrightarrow υποδηλώνει ζεύγος Fourier.

Ακολουθώντας, αθροίζονται τα ίχνη που έχουν υποστεί γραμμική χρονική απόκλιση στο χώρο τον συχνοτήτων:

$$\tilde{S}(p, f) = \sum_x \tilde{U}(x, f) \cdot e^{-i2\pi fpx}$$

(6)

όπου το \tilde{S} εκφράζει το κυματικό πεδίο στο χώρο $(p - f)$.

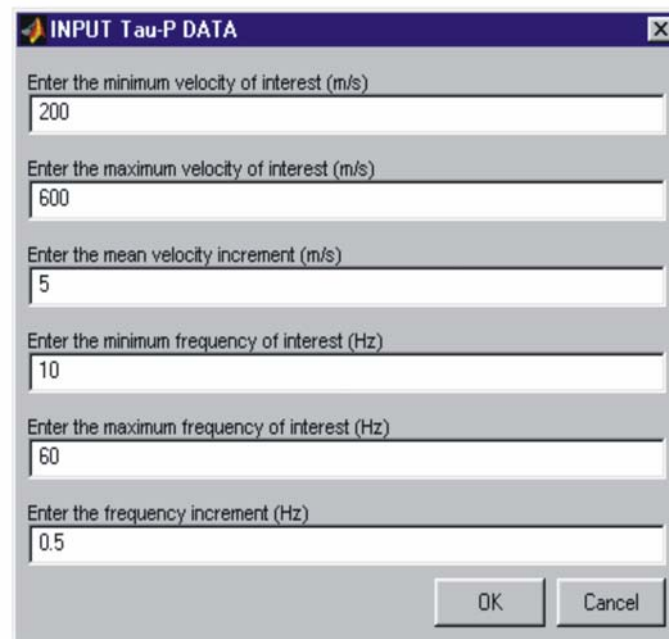
Οι καμπύλες διασποράς αντιστοιχούν σε τοπικά ενεργειακά μέγιστα της κυματικής ενέργειας που παρατηρούνται στο πεδίο $p - f$ και ουσιαστικά απεικονίζουν τη μεταβολή της ταχύτητας φάσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh συναρτήσει της συχνότητας (σταυροί στο σχ. 2a). Το ενδιαφέρον της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων στη συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται στη θεμελιώδη χαρακτηριστική καμπύλη (fundamental dispersion curve), ενώ καμπύλες διασποράς ανώτερης τάξης (higher modes) εμφανίζουν υψηλότερες ταχύτητες από αυτήν της θεμελιώδους για συγκεκριμένη συχνότητα.

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

Ορίζονται τα εξής:

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά (όταν δεν υπάρχουν πληροφορίες για τη γεωμετρία στα δεδομένα)

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



INPUT Tau-P DATA

Enter the minimum velocity of interest (m/s)
200

Enter the maximum velocity of interest (m/s)
600

Enter the mean velocity increment (m/s)
5

Enter the minimum frequency of interest (Hz)
10

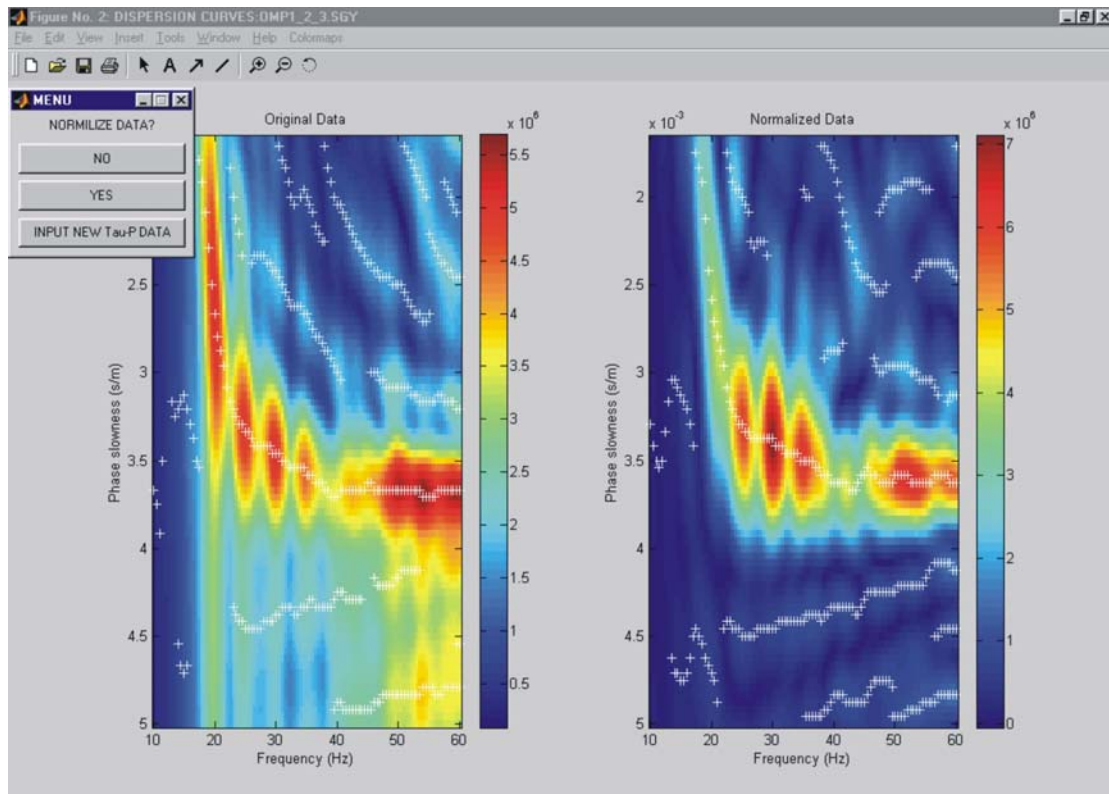
Enter the maximum frequency of interest (Hz)
60

Enter the frequency increment (Hz)
0.5

OK Cancel

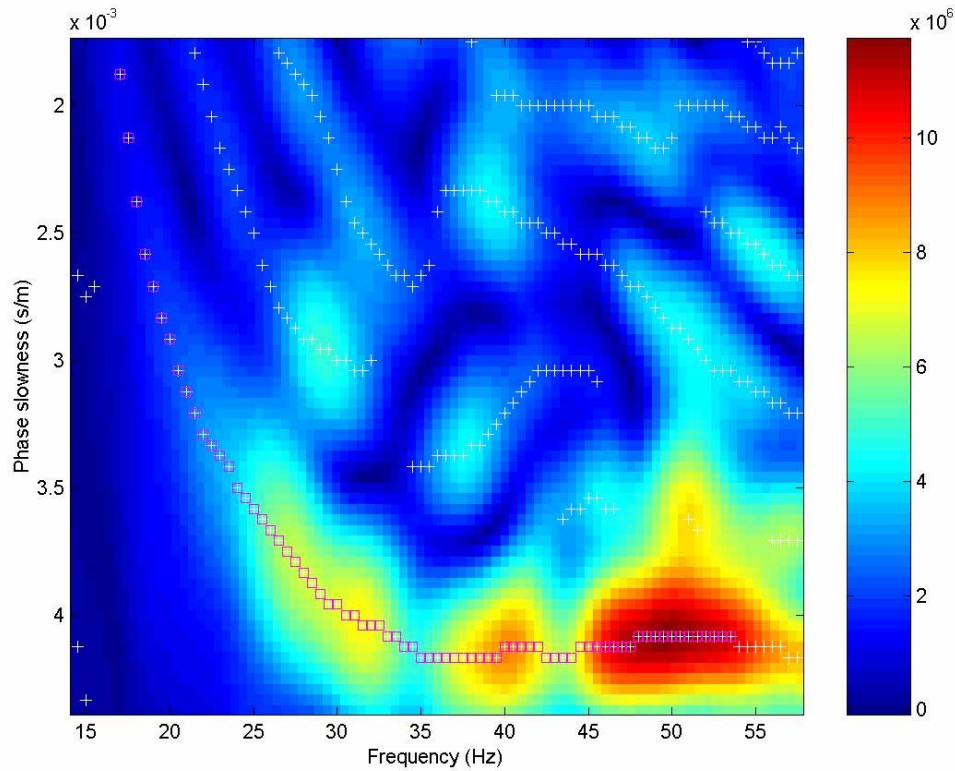
Σχήμα 5.12: Εισαγωγή πληροφοριών για την γεωμετρία της διάταξης

Μετά την είσοδο των παραπάνω παραμέτρων, ακολουθεί ο υπολογισμός του μετασχηματισμού κυματικού πεδίου χρησιμοποιώντας, τόσο τα αρχικά δεδομένα, όσο και τα κανονικοποιημένα ως προς την απόσταση σεισμικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα του μετασχηματισμού απεικονίζονται σε διαγράμματα βραδύτητας (ρ σε sec/m) και συχνότητας (f σε Hz).



Σχήμα 5.13: Διαγράμματα βραδύτητας

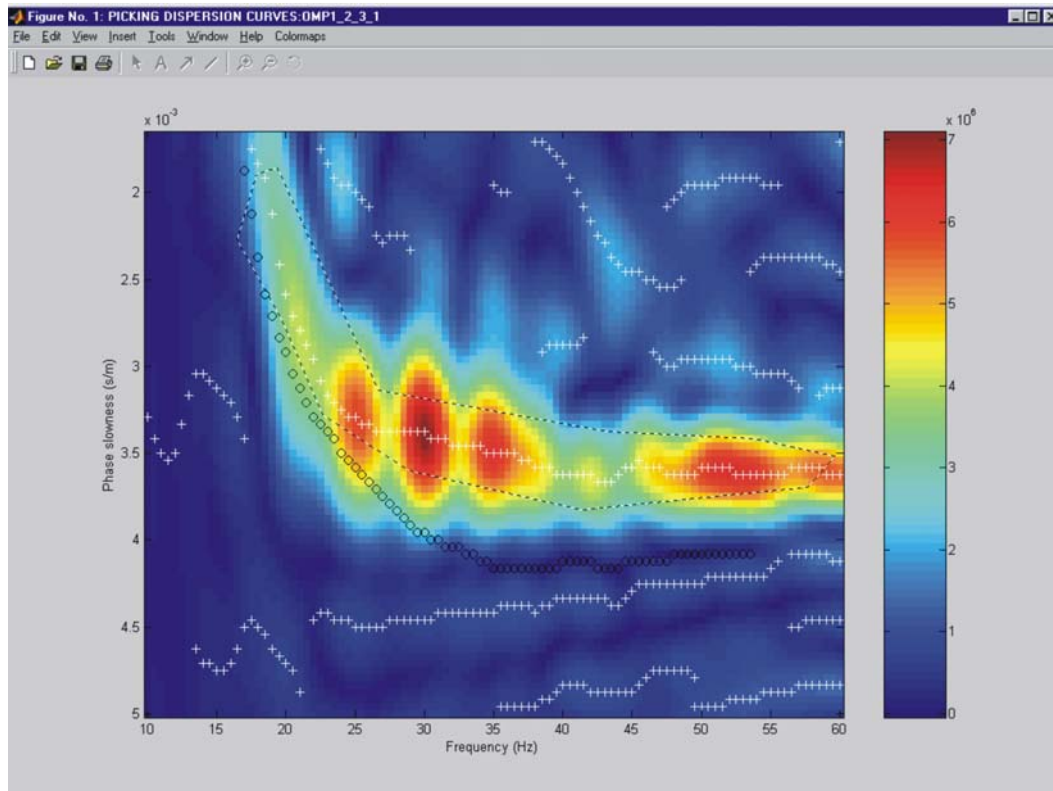
Επιλέγεται το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού των αρχικών ή και των κανονικοποιημένων δεδομένων ανάλογα με την ευκρίνεια και την συνέχεια που παρουσιάζουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες διασποράς στα διαγράμματα ($\rho - f$) (Σχήμα 5.13).



Σχήμα 5.14: Καμπύλες διασποράς για την καταγραφή *Omp1_1_3* του πρώτου αναπτύγματος της *OM_P1* της τρίτης καταγραφής

Επιλογή της θεμελιώδους πειραματικής καμπύλης διασποράς

Από την εικόνα του κυματικού πεδίου στο χώρο βραδύτητας – συχνότητας σε αυτό το στάδιο της διαδικασίας, επιλέγονται τα σημεία της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς τα οποία θα εισαχθούν στον αλγόριθμο αντιστροφής. Επιλέγονται τα τοπικά μέγιστα που αντιστοιχούν σε υψηλά ποσά σεισμικής ενέργειας ενώ αποφεύγονται αυτά που αντιστοιχούν σε θόρυβο ή αυτά που ανήκουν σε καμπύλες διασποράς υψηλότερης τάξης (higher modes).

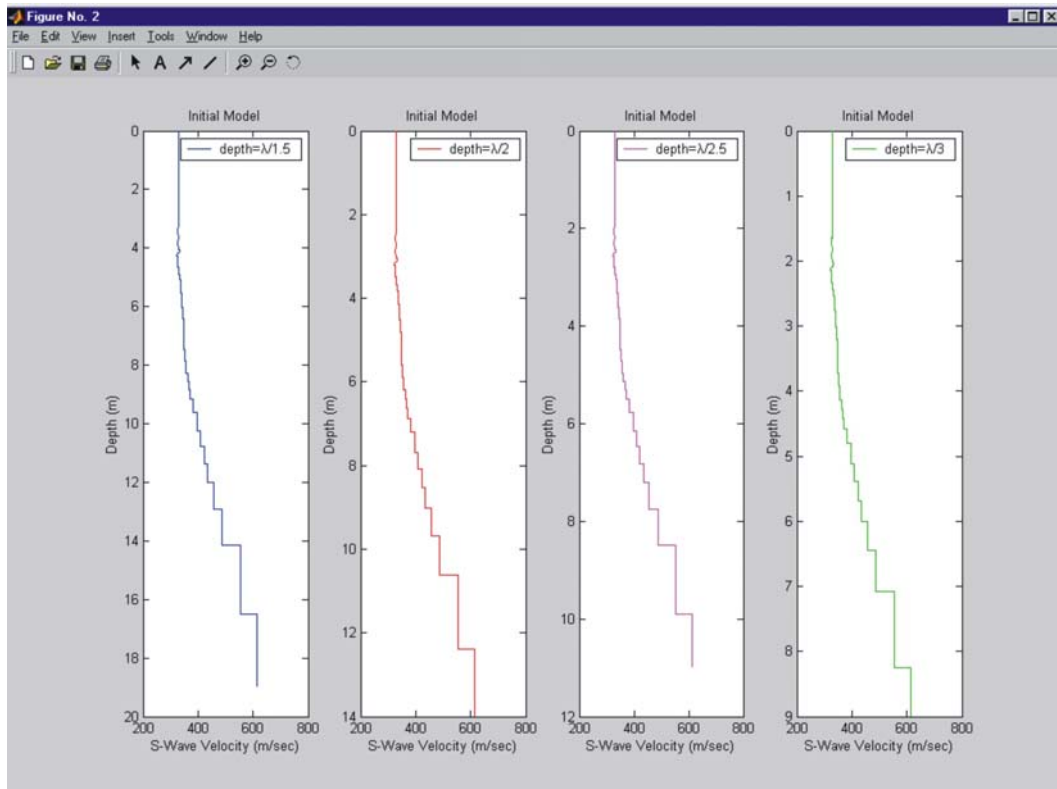


Σχήμα 5.15: Επιλογή των τοπικών μεγίστων που αντιστοιχούν σε υψηλά ποσά ενέργειας της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς, τα οποία θα εισαχθούν στον αλγόριθμο αντιστροφής

ΣΤΑΔΙΟ 2

Επιλογή αρχικού εδαφικού μοντέλου

Στις μεθόδους αντιστροφής η μη γραμμική αναλυτική σχέση προσεγγίζεται με τη χρήση του αναπτύγματος Taylor. Στη συνέχεια εφαρμόζεται επαναληπτική διαδικασία, για την επιτυχή σύγκλισή της οποίας 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.



Σχήμα 5.16 : Επιλογή λόγου μήκους κύματος (λ) προς βάθος (d) για την δημιουργία του αρχικού μοντέλου

Έτσι, για τον προσδιορισμό του αρχικού εδαφικού μοντέλου λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

- Από τις καμπύλες διασποράς και για κάθε τιμή ταχύτητας φάσης και συχνότητας είναι δυνατό να προσδιοριστεί το αντίστοιχο μήκος κύματος των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh, σύμφωνα με τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής:

$$c_R = \lambda_R \cdot f_R$$

(7)

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

- Η κατακόρυφη μετατόπιση των υλικών σημείων κατά τη διάδοση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh σε βάθος ίσο με το μήκος κύματός τους

ισούνται 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 συνδέεται με την ταχύτητα των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (V_s) με τη σχέση:

$$c_R(f_1) = a \cdot V_s(f_1)$$

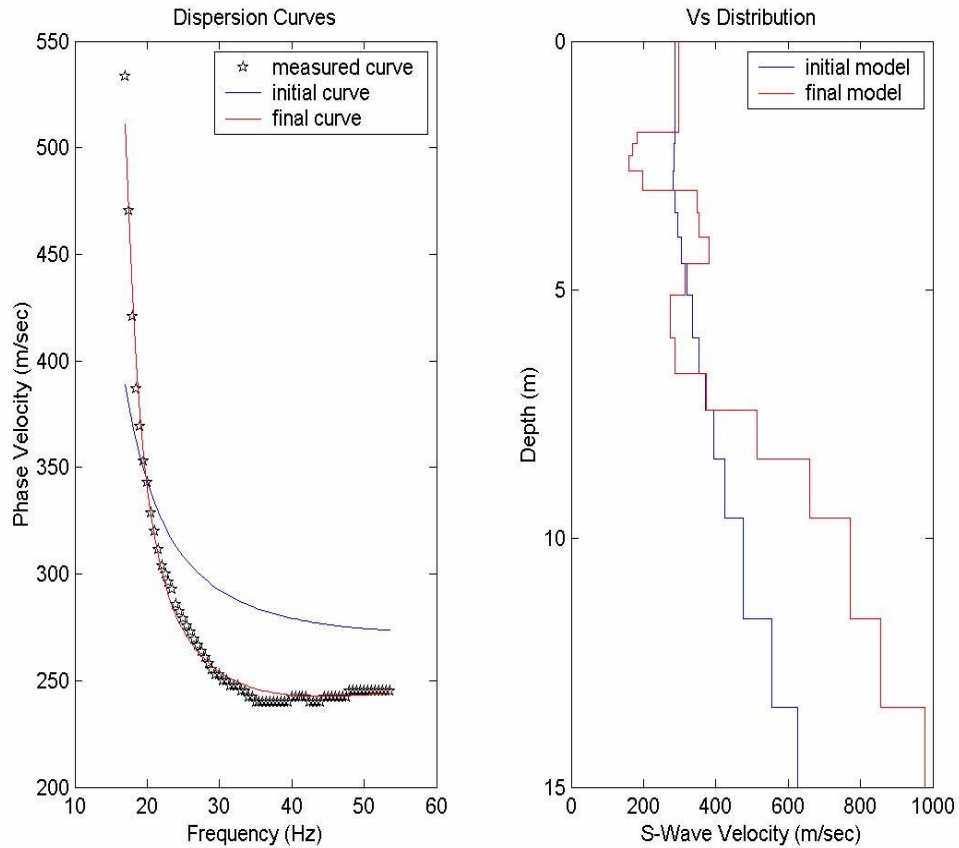
(8)

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).

Εν κατακλείδι, υπολογίζεται το μήκος κύματος των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh από την εξ. 7. Στη συνέχεια καθορίζεται το μέγιστο βάθος (d) διείσδυσης των επιφανειακών κυμάτων και το πάχος των στρωμάτων του εδαφικού μοντέλου, το οποίο αυξάνεται με το βάθος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ικανοποιητική εκτίμηση της κατανομής της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων με το βάθος. Ακολουθώντας, θεωρώντας σταθερό λόγο του Poisson (ν) για κάθε εδαφικό στρώμα είναι δυνατό να εκτιμηθεί η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων (V_p). Τέλος, με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων εκτιμάται και η πυκνότητα κάθε εδαφικού στρώματος. Πληροφορίες από άλλες μεθόδους που αφορούν την ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων και την πυκνότητα των γεωλογικών σχηματισμών είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν απευθείας ως παράμετροι του αρχικού εδαφικού μοντέλου.

Επιλογή κριτηρίων σύγκλισης

Αμέσως μετά ακολουθεί αυτόματα η διαδικασία της αντιστροφής, μετά το τέλος της οποίας απεικονίζεται η πειραματική και η θεωρητική καμπύλη, η κατανομή των ταχυτήτων των διαμηκτικών κυμάτων με το βάθος και δημιουργούνται αρχεία εξόδου με τα αποτελέσματα.



Σχήμα 5.17: Τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας αντιστροφής για την καταγραφή *Omp1_1_3*

Στο Σχήμα 5.17 διακρίνονται στα αριστερά η πειραματική καμπύλη διασποράς (αστέρια) καθώς και οι θεωρητικές καμπύλες διασποράς που αντιστοιχούν στο αρχικό (initial) και το τελικό εδαφικό μοντέλο. Μετά το τέλος της αντιστροφής με μπλε απεικονίζεται στα δεξιά η κατανομή της ταχύτητας των S- κυμάτων με το βάθος για το αρχικό εδαφικό μοντέλο, ενώ με κόκκινο για το τελικό μοντέλο. Η αντιστροφή θεωρείται τόσο περισσότερο επιτυχής όσο περισσότερο η θεωρητική καμπύλη του τελικού μοντέλου ταυτίζεται με την πειραματική.

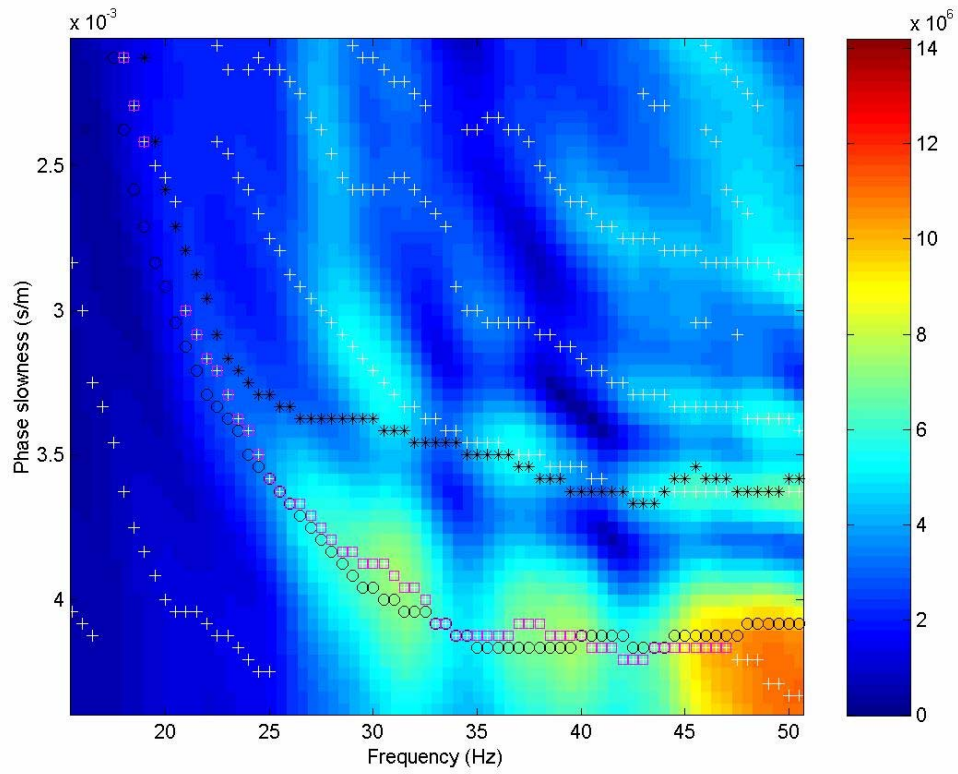
Πάχος (m)	Βάθος (m)	Λόγος Poisson	Πυκνότητα (gr/cm ³)	Vp (m/sec)	Vs (m/sec)
1.83	1.83	0.40	1.846	729.41	297.78
0.22	2.05	0.40	1.789	445.55	181.90
0.25	2.30	0.40	1.783	415.72	169.72
0.32	2.62	0.40	1.778	388.12	158.45
0.38	3.00	0.40	1.796	482.31	196.90
0.44	3.44	0.40	1.871	855.48	349.25
0.5	3.94	0.40	1.873	865.68	353.41
0.53	4.47	0.40	1.887	935.09	381.75
0.64	5.11	0.40	1.854	771.98	315.16
0.85	5.96	0.40	1.834	670.06	273.55
0.71	6.68	0.40	1.841	703.86	287.35
0.74	7.42	0.40	1.883	913.25	372.83
0.98	8.40	0.40	1.951	1257.34	513.31
1.19	9.59	0.40	2.024	1617.84	660.48
2.03	11.62	0.40	2.078	1891.81	772.33
1.78	13.40	0.40	2.119	2095.18	855.35
0.00	13.40	0.40	2.179	2395.93	978.13

***Πίνακας 5.1:** Αποτελέσματα που αποθηκεύονται σε ένα από τα αρχεία εξόδου μετά το τέλος της αντιστροφής*

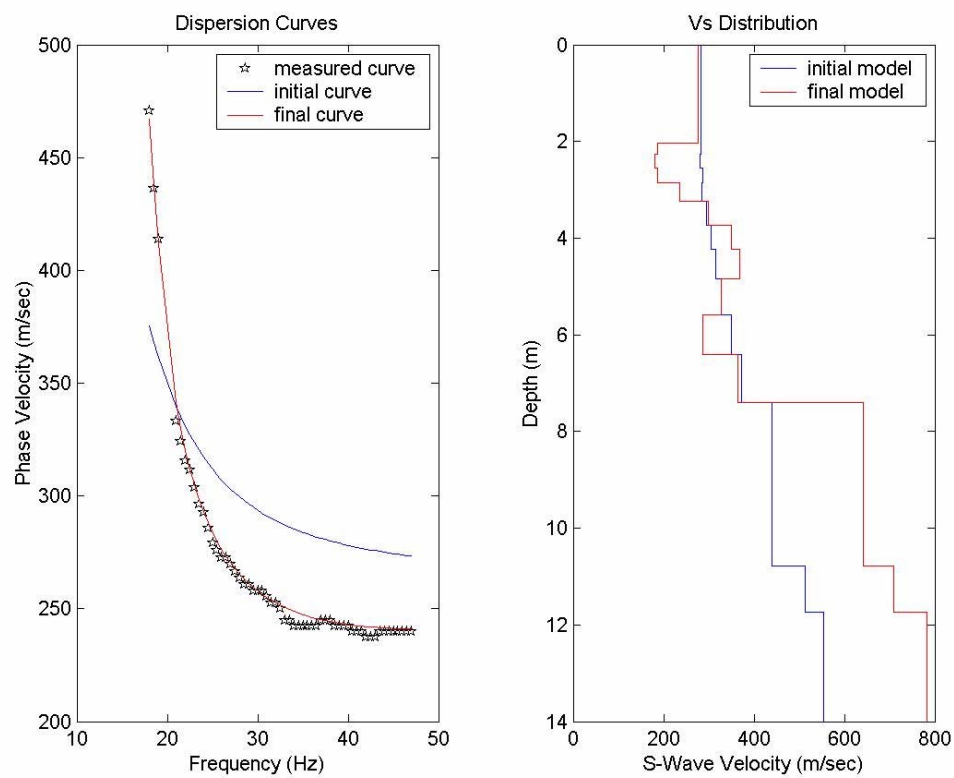
Στον Πίνακα 5.1 εμφανίζεται το αποτέλεσμα της αντιστροφής για την καταγραφή Omp1_1_3 όπως εκτυπώνεται σε αρχείο εξόδου. Εκτός από το αποτέλεσμα αποθηκεύονται και λεπτομέρειες σχετικά με το πάχος, το βάθος, τον λόγο Poisson, την πυκνότητα, και την ταχύτητα των διαμήκων και των διατμητικών κυμάτων του τελικού μοντέλου.

Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση του αριθμού των καναλιών στα αποτελέσματα της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων και δεδομένου ότι η γεωμετρία της απόκτησης των σεισμικών δεδομένων είχε σχεδιαστεί κατάλληλα για την γραμμή μελέτης 1 πραγματοποιήθηκε ένωση δύο καταγραφών κοινής πηγής. Ειδικότερα ενώθηκε η 3^η καταγραφή από το πρώτο ανάπτυγμα γεωφώνων με την 1^η καταγραφή από το δεύτερο ανάπτυγμα. Σε αυτήν την περίπτωση ουσιαστικά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.2, η θέση της πηγής παραμένει σταθερή και μετακινείται το ανάπτυγμα των γεωφώνων ώστε να δημιουργηθεί μια καταγραφή 48 καναλιών αντί 24 που αποτελείται μια απλή καταγραφή κοινής πηγής. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ακολουθείται η ίδια ακριβώς διαδικασία. Για την επεξεργασία των

δεδομένων οι καμπύλες διασποράς και το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας της αντιστροφής απεικονίζονται στα Σχήματα 5.18 και 5.19 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.18: Καμπύλη διασποράς για την καταγραφή OMP1_12_31



Σχήμα 5.19: Τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας αντιστροφής για την καταγραφή
OMP1_12_31

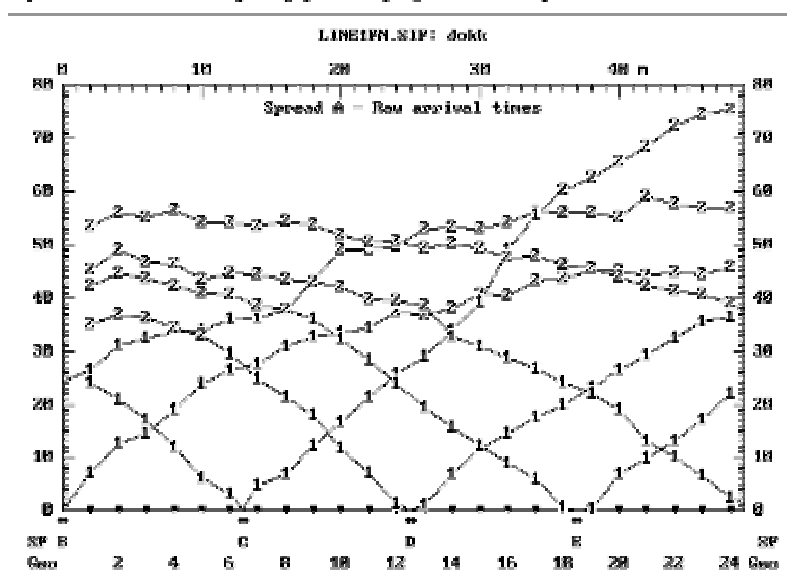
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

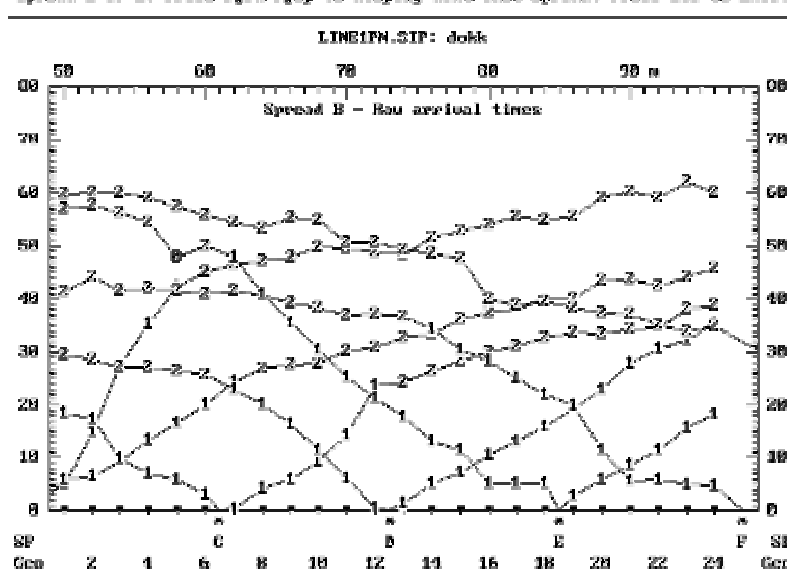
6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SIRIK

Αρχικά διαπιστώνεται ότι το υπέδαφος αποτελείται από 2 στρώματα. Πιο συγκεκριμένα ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η σεισμική γραμμή OMP_1 της οποίας τα δρομοχρονικά διάγραμμα είναι τα εξής για κάθε ανάπτυγμα αντίστοιχα:

Spread 1 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



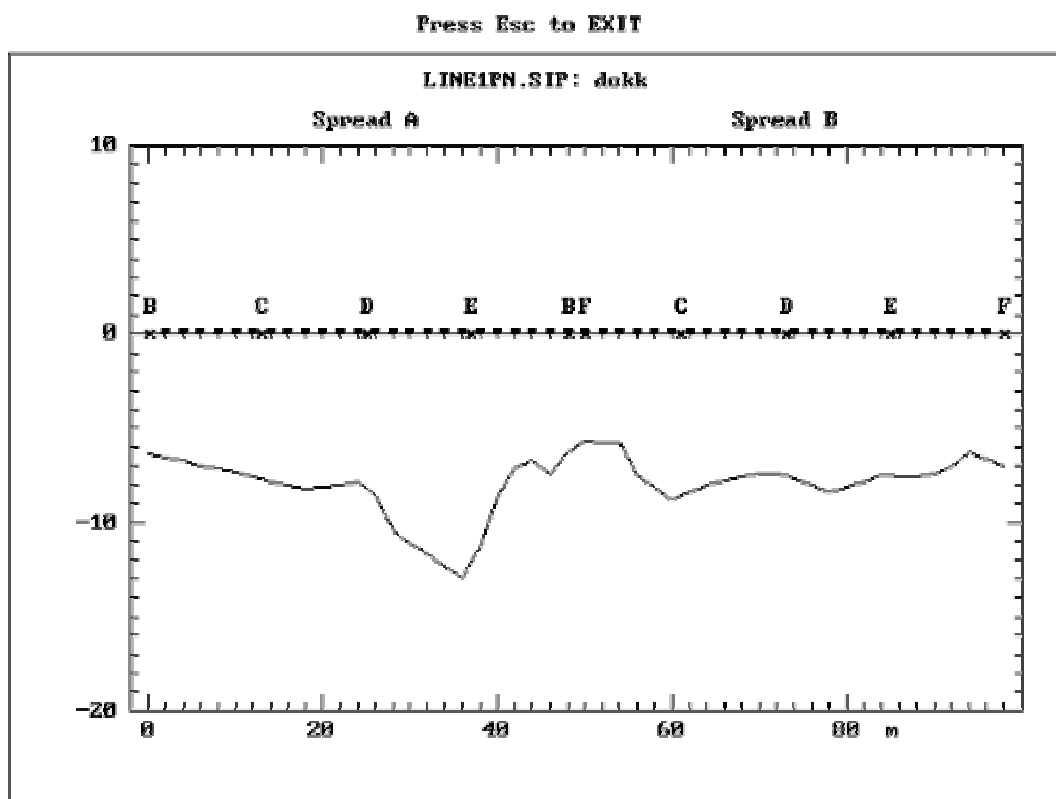
Spread 2 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



Σχήμα 6.1: Δρομοχρονικά διαγράμματα σεισμικής γραμμής OMP_1

Έτσι παρατηρούμε ότι υπάρχουν δύο ευθύγραμμα τμήματα στα δρομοχρονικά διαγράμματα. Το πρώτο αντιστοιχεί στο επιφανειακό στρώμα και συμβολίζεται με το 1 και το δεύτερο αντιστοιχεί στο υποκείμενο στρώμα και ομοίως συμβολίζεται με το 2.

Στην συνέχεια για να προσδιοριστεί η ταχύτητα κάθε στρώματος αλλά και το εδαφικό μοντέλο χρησιμοποιείται το SIPT2. Από το SIPT2 μπορεί να υπολογιστεί το βάθος στο οποίο υπάρχει αλλαγή του γεωλογικού υλικού.



Σχήμα 6.2: Απεικόνιση εδαφικού μοντέλου για την σεισμική καταγραφή OMP_1

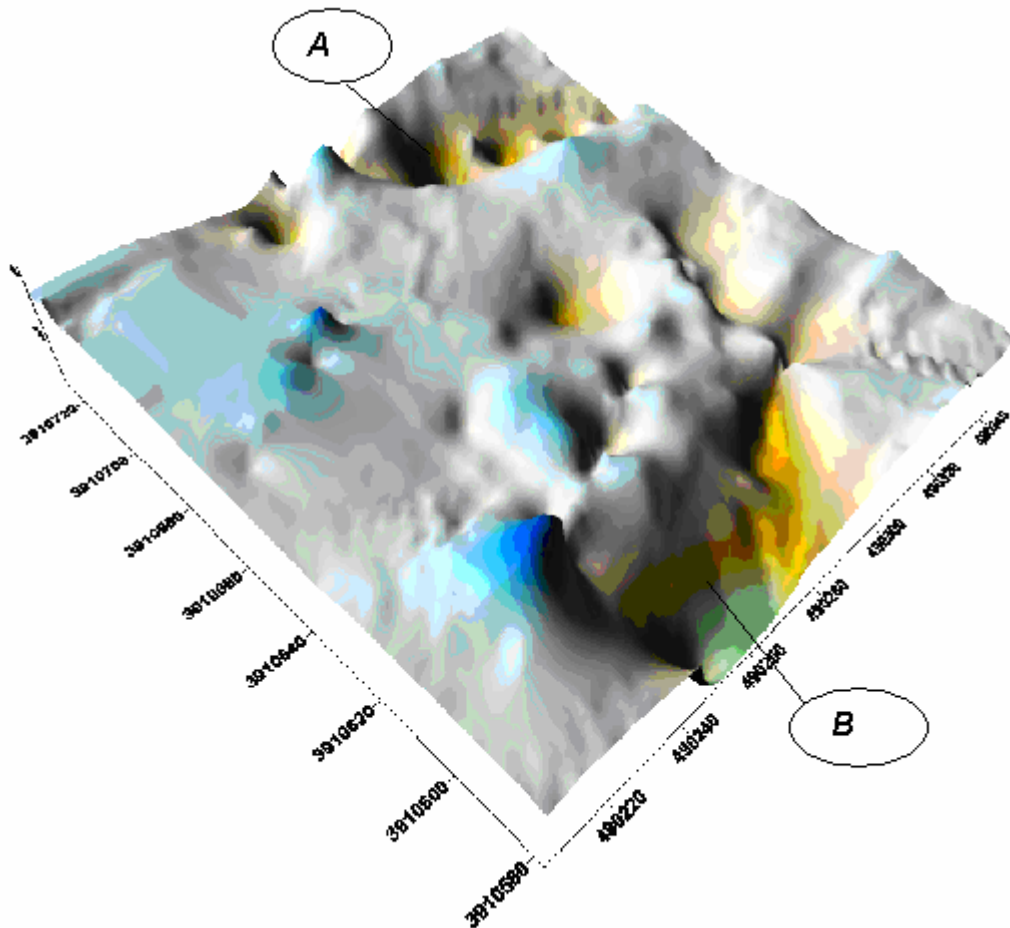
Οι ταχύτητες για κάθε στρώμα είναι για το πρώτο 665 m/sec και για το δεύτερο 1993 m/sec.

Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων σεισμικών γραμμών παρατίθενται στο Παράρτημα Α ενώ ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις ταχύτητες κάθε στρώματος για κάθε γραμμή.

Line	OMP_1	OMP_2	OMP_3	OMP_4	OMP_5
V (m/s) Layer 1	665	490	547	494	519
V (m/s) Layer 2	1993	1763	2407	1952	1952
Line	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5
V (m/s) Layer 1	551	591	584	524	628
V (m/s) Layer 2	2109	2533	2457	2764	2149
Line	V 6	Line1	Line2	Line3	
V (m/s) Layer 1	595	554	498	524	
V (m/s) Layer 2	1698	1963	2139	1722	

6.2 Τρισδιάστατο μοντέλο (3 D)

Από τα βάθη, τα οποία έχουν προκύψει από κάθε σεισμική γραμμή μελέτης και χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες συντεταγμένες προκύπτει τρισδιάστατο μοντέλο απεικόνισης του υποβάθρου στην περιοχή μελέτης, το οποίο απεικονίζεται παρακάτω



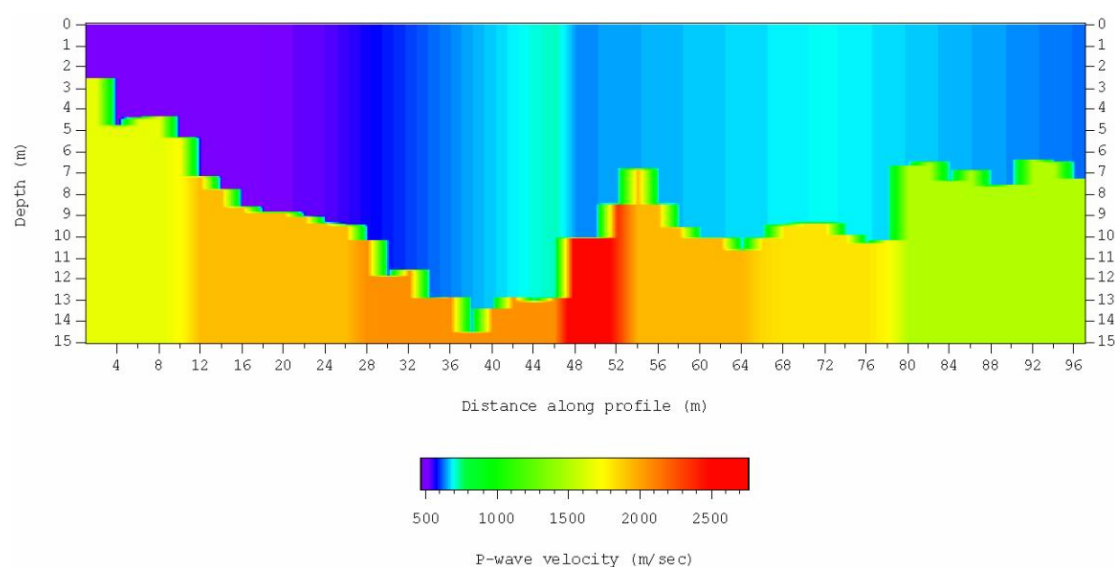
Σχήμα 6.3: Τρισδιάστατο μοντέλο απεικόνισης υποβάθρου στην περιοχή μελέτης με υψόμετρο από 2,5 m έως 13,5 m

Το ανάγλυφο του υποδεικνύει καρστικές μορφές όπως η Α και η Β.

6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ GRM

Με την συγκεκριμένη μέθοδο από τα δεδομένα της γραμμής μελέτης OMP_1 εξάγονται σύμπερασματα σχετικά με την πλευρική ταχύτητα σε κάθε στρώμα.

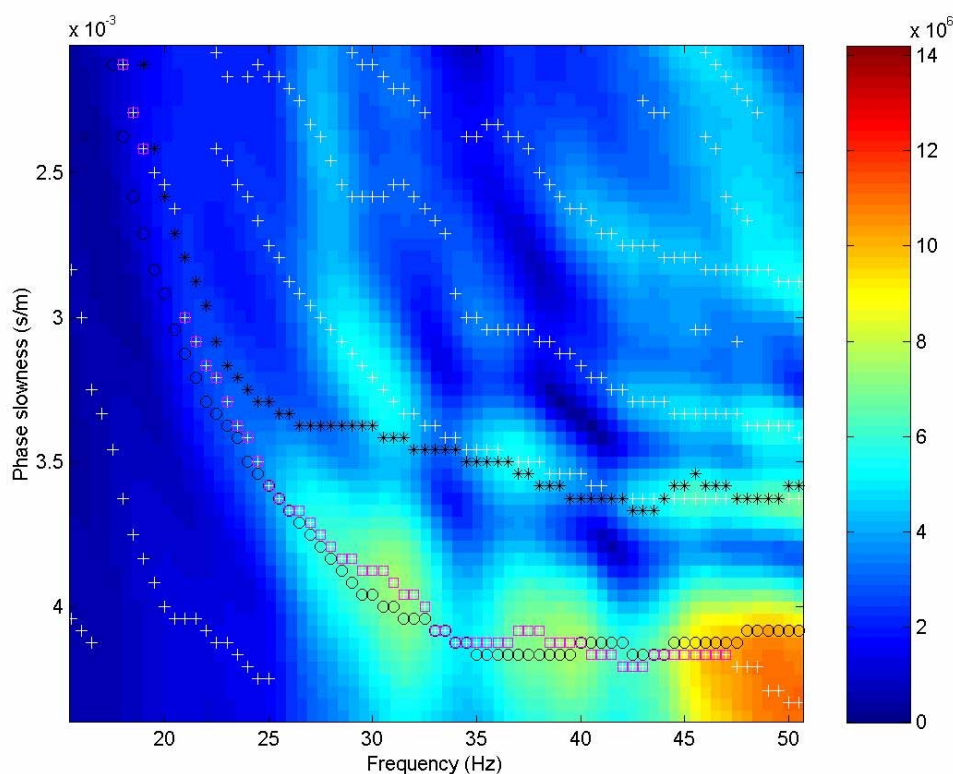
Έτσι για την γραμμή OMP_1 το αποτέλεσμα έχει ως εξής:



Παρατηρείται ότι για το πρώτο στρώμα η τιμή της ταχύτητας κυμαίνεται από 490 m/sec έως 715 m/sec, με 1 εναλλαγή της τιμής. Η συγκεκριμένη εναλλαγή παρατηρείται κοντά στα 42m με τιμή ταχύτητας 490 m/sec, ενώ στα 48m η τιμή ανέρχεται στα 715 m/sec. Για το δεύτερο η τιμή της ταχύτητας κυμαίνεται από 1500 m/sec έως 2760 m/sec με 3 εναλλαγές. Η πρώτη παρατηρείται στα 10 m με τιμή ταχύτητας 1653 m/sec η οποία στα 12 m πλησιάζει τα 2000 m/sec. Στην συνέχεια η δεύτερη εναλλαγή παρατηρείται στα 48 m στα οποία η τιμή της ταχύτητας είναι 2757 m/sec ενώ η τελευταία εναλλαγή παρατηρείται στα 80 m με την τιμή της ταχύτητας να μειώνεται στα 1500 m/sec.

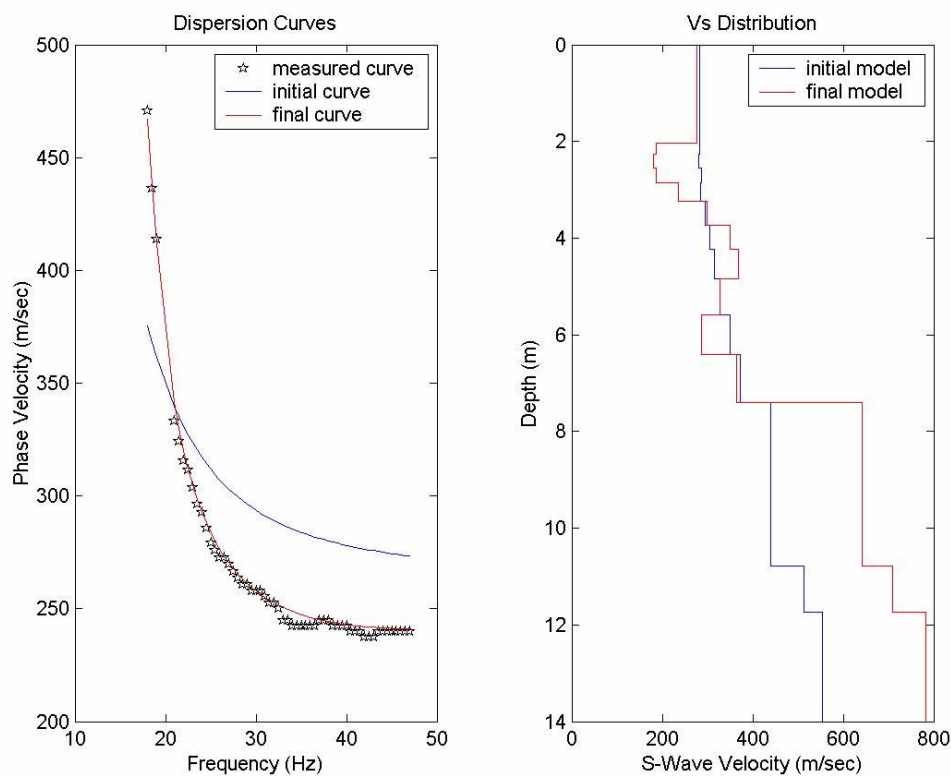
6.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επεξεργασία της ένωσης της τρίτης καταγραφής του πρώτου αναπτύγματος με την πρώτη καταγραφή του δεύτερου αναπτύγματος (1_12_31) της σεισμικής γραμμής OMP_1.



Σχήμα 6.4: Χαρακτηριστικές καμπύλες σκέδασης (1_12_31)

Στην χαρακτηριστική καμπύλη σκέδασης παρατηρείται με κόκκινους κύκλους η καταγραφή 1_3 ενώ με μπλέ κύκλους η 2_3 και με τα μαύρα «αστεράκια» η ενωσή τους. Από το παραπάνω διάγραμμα είναι ευκρινής η θεμελιώδης καμπύλης διασποράς για κάθε περίπτωση.

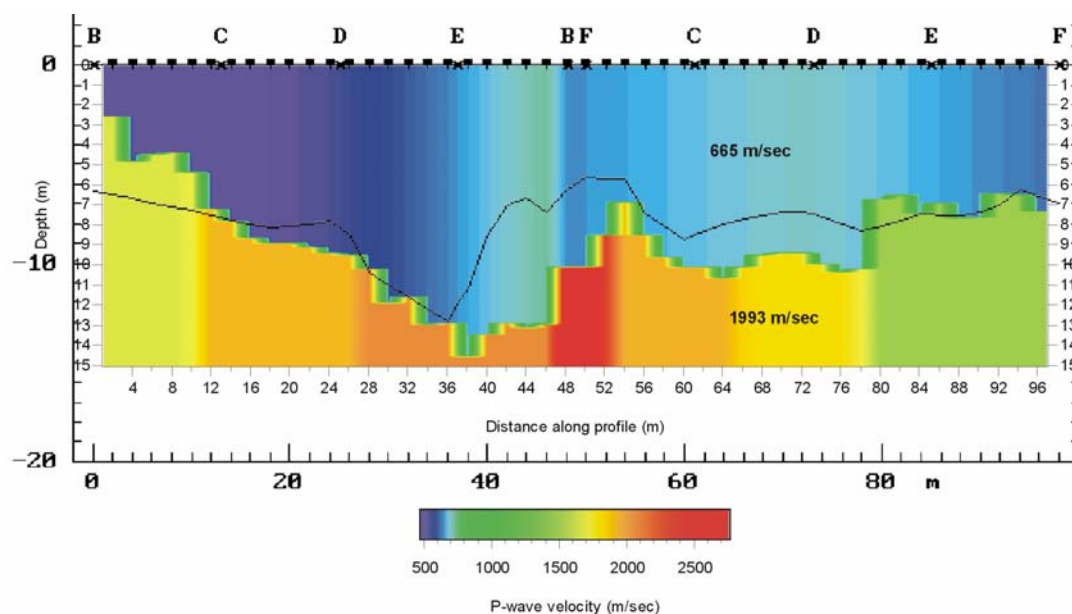


Σχήμα 6.5: Καμπύλη διασποράς και κατανομή της ταχύτητας V_s (1_12_31)

Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζεται αρχικά η καμπύλη διασποράς όπου παρατηρείται η μεταβολή της ταχύτητας φάσης με την συχνότητα ενώ δίπλα, η κατανομή της ταχύτητας V_s σε συνάρτηση με το βάθος. Έτσι για την συγκεκριμένη καταγραφή η αλλαγή του στρώματος βρίσκεται κοντά στα 7,5 m.

6.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ SIP ME GRM

Παρακάτω απεικονίζονται τα αποτελέσματα των SIP και GRM σε μία εικόνα έτσι ώστε να γίνει πιο εύκολη η σύγκριση τους.

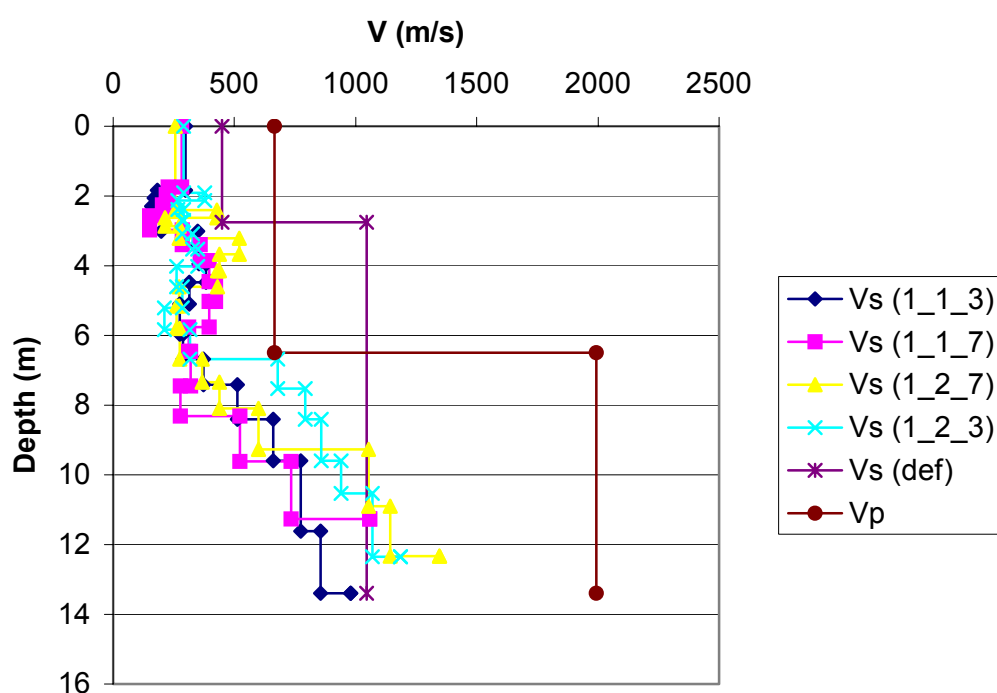


Σχήμα 6.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων SIP με GRM

Από την μέθοδο GRM προκύπτει ότι το επιφανειακό στρώμα δεν παρουσιάζει μεγάλη πλευρική μεταβολή της ταχύτητας. Το πάχος του πρώτου στρώματος από τις SIP και GRM είναι παρόμοιο. Οι τιμές του από το SIP είναι μικρότερες στο κεντρικό τμήμα της τομής και οφείλεται στο γεγονός ότι η SIP θεωρεί ότι το στρώμα αυτό παρουσιάζει σταθερή ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων. Όσον αφορά την ταχύτητα στο βραχώδες υπόβαθρο και στο κεντρικό τμήμα της τομής αυτές οι μέθοδοι δίνουν παρόμοια αποτελέσματα.

6.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ SIP ΜΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ

Στην συνέχεια απεικονίζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των επιφανειακών κυμάτων για την τιμή της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων σε σύγκριση με την τιμή που προκύπτει από το SIP, για την ίδια σεισμική γραμμή (OMP_1).

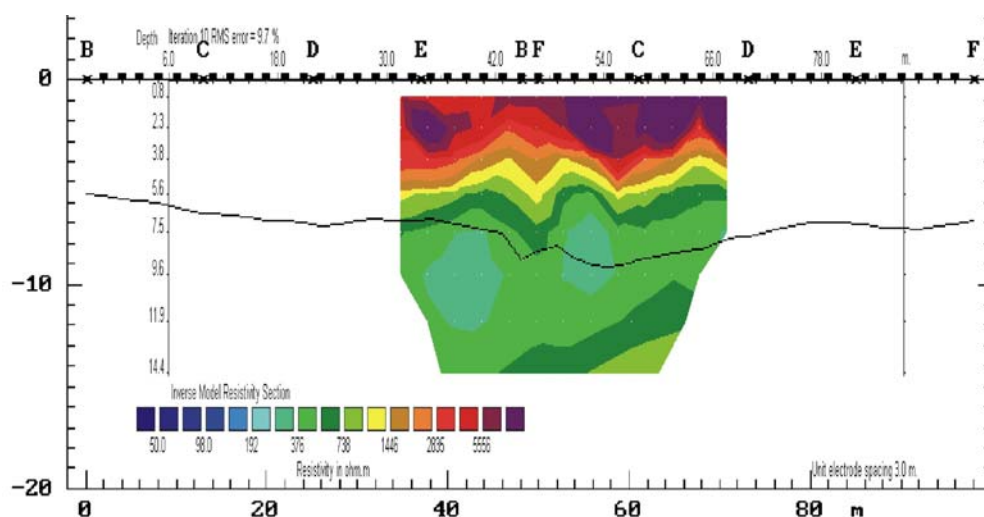


Σχήμα 6.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων της ταχύτητας με το βάθος επιφανειακών κυμάτων με SIP

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων από την OMP_1 και για 4 θέσεις της σεισμικής πηγής προκύπτει ότι η μέση τιμή της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων στο πρώτο στρώμα είναι 400m/s, ενώ στο δεύτερο στρώμα παρουσιάζει μεγαλύτερη διακύμανση από 500 μέχρι 800 m/s.

6.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Τέλος, συγκρίνεται η γεωηλεκτρική τομή NT-2, η οποία πραγματοποιήθηκε κατά μήκος της σεισμικής γραμμής OMP_4.



Σχήμα 6.9: Σύγκριση ηλεκτρικής μεθόδου με σεισμική διάθλαση

Στο ανάγλυφο του βραχώδους υποβάθρου εμφανίζονται κάποιες καρστικές μορφές με κυριότερη αυτή στο B - A άκρο του χάρτη αλλά και Δυτικά. Από σύγκριση κατά μοντέλου ταχύτητας των P – κυμάτων (σεισμική διάθλαση) με την γεωηλεκτρική τομή προκύπτει ότι το υπερκείμενο στρώμα αποτελείται από φερτά υλικά και έχει πάχος μέχρι 5,5m. Ακόμα, το υποκείμενο στρώμα παρουσιάζει υψηλές αντιστάσεις τυπικές των ασβεστολίθων και έντονη πλευρική ανομοιογένεια, που οφείλεται πιθανόν σε έγκοιλα πληρωμένα με αργιλικά ορυκτά, πράγμα το οποίο δεν μπορεί να διαχωριστεί από την σεισμική διάθλαση.

6.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, στη περιοχή μελέτης, παρατηρούνται δύο στρώματα. Το υπερκείμενο στρώμα αποτελείται από φερτά υλικά, ενώ το υπόβαθρο χαρακτηρίζεται βραχώδεις ασβεστολιθικό.

Το επιφανειακό στρώμα δεν παρουσιάζει μεγάλη πλευρική μεταβολή της ταχύτητας, μετά από σύγκριση σεισμικής διάθλασης με GRM.

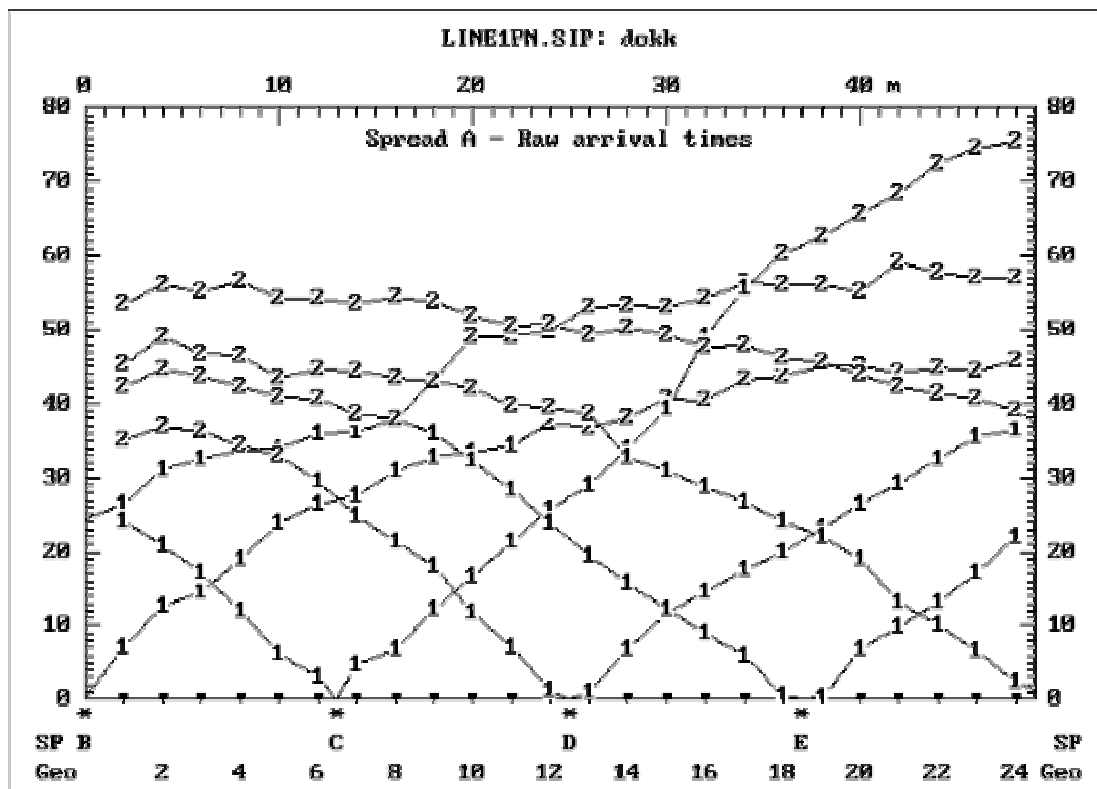
Το υποκείμενο στρώμα παρουσιάζει υψηλές αντιστάσεις τυπικές των ασβεστολίθων και έντονη πλευρική ανομοιογένεια, που οφείλεται πιθανόν σε έγκοιλα πληρωμένα με αργιλικά ορυκτά.

Από τον συνδυασμό των σεισμικών μεθόδων με την ηλεκτρική τομογραφία προέκυψε τρισδιάστατο μοντέλο του ασβεστολιθικού υποβάθρου στο οποίο παρατηρούνται καρστικές δομές.

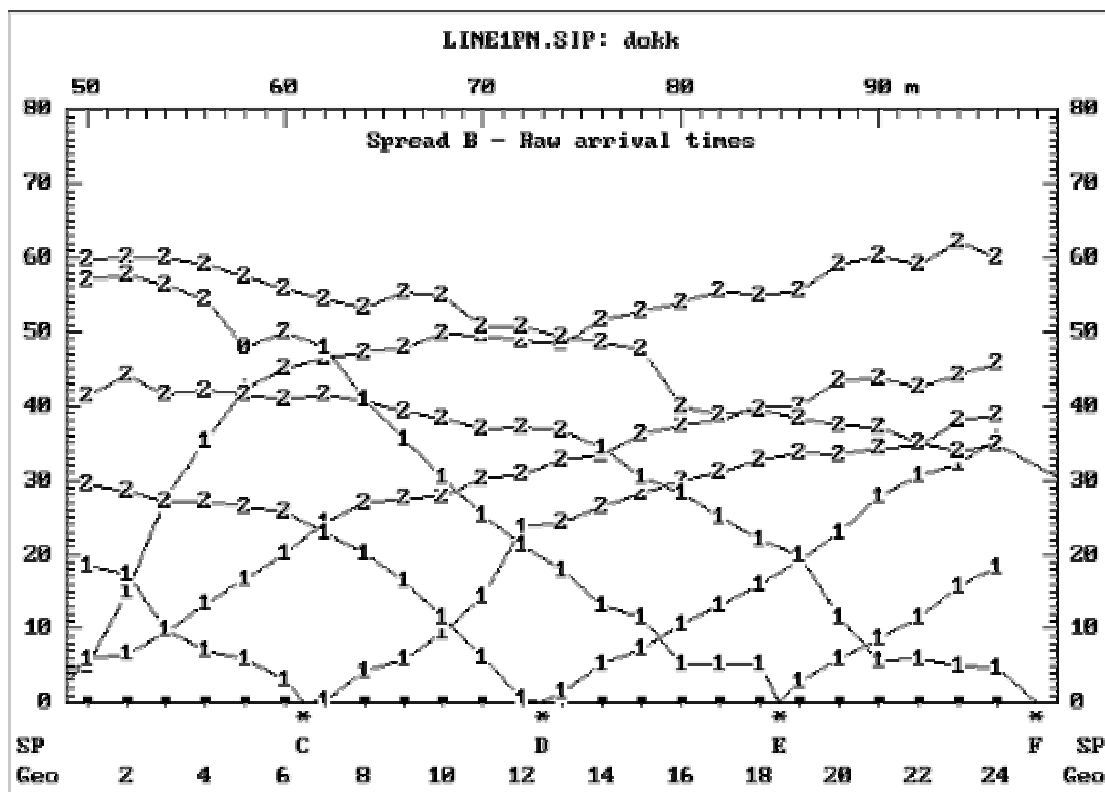
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΔΡΟΜΟΧΡΟΝΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

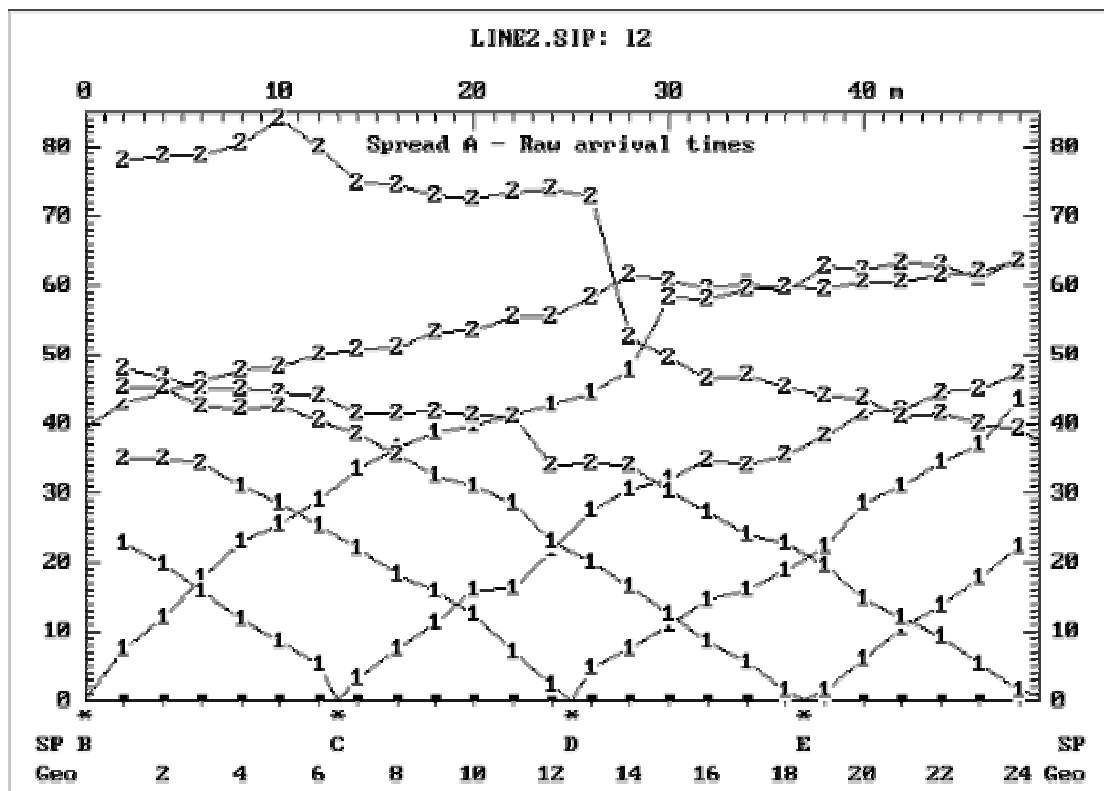
Spread 1 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



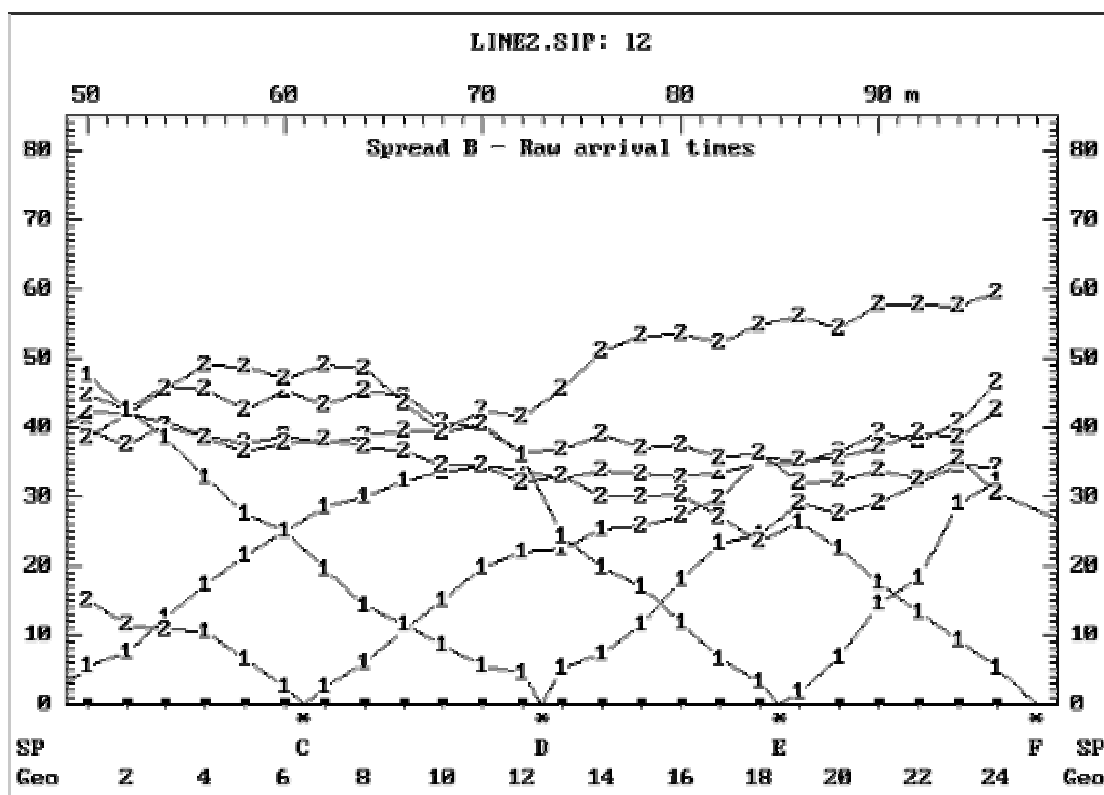
Spread 2 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



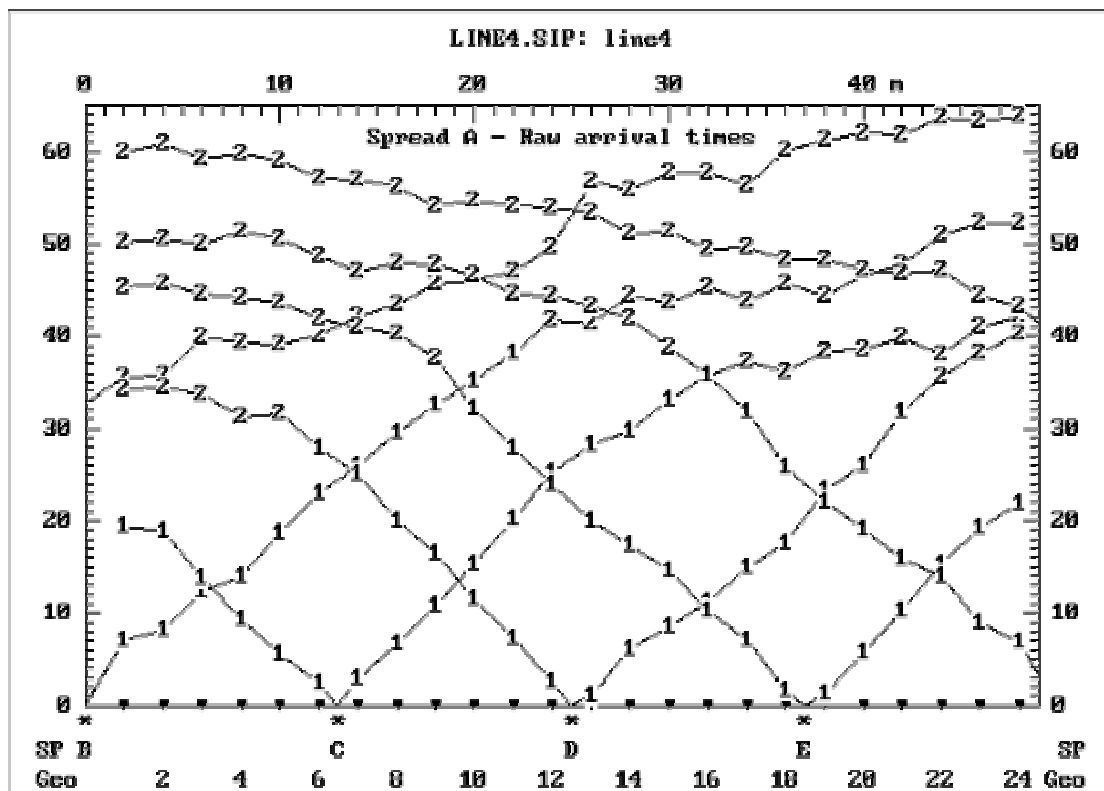
Spread 1 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



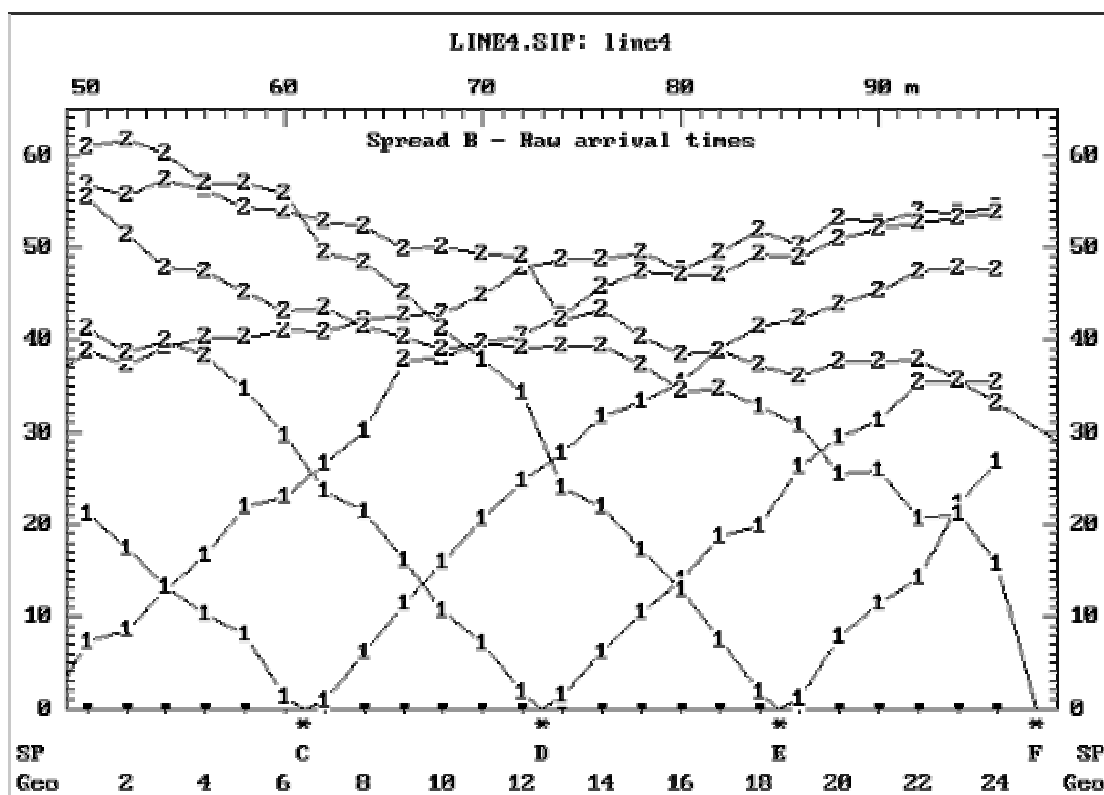
Spread 2 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



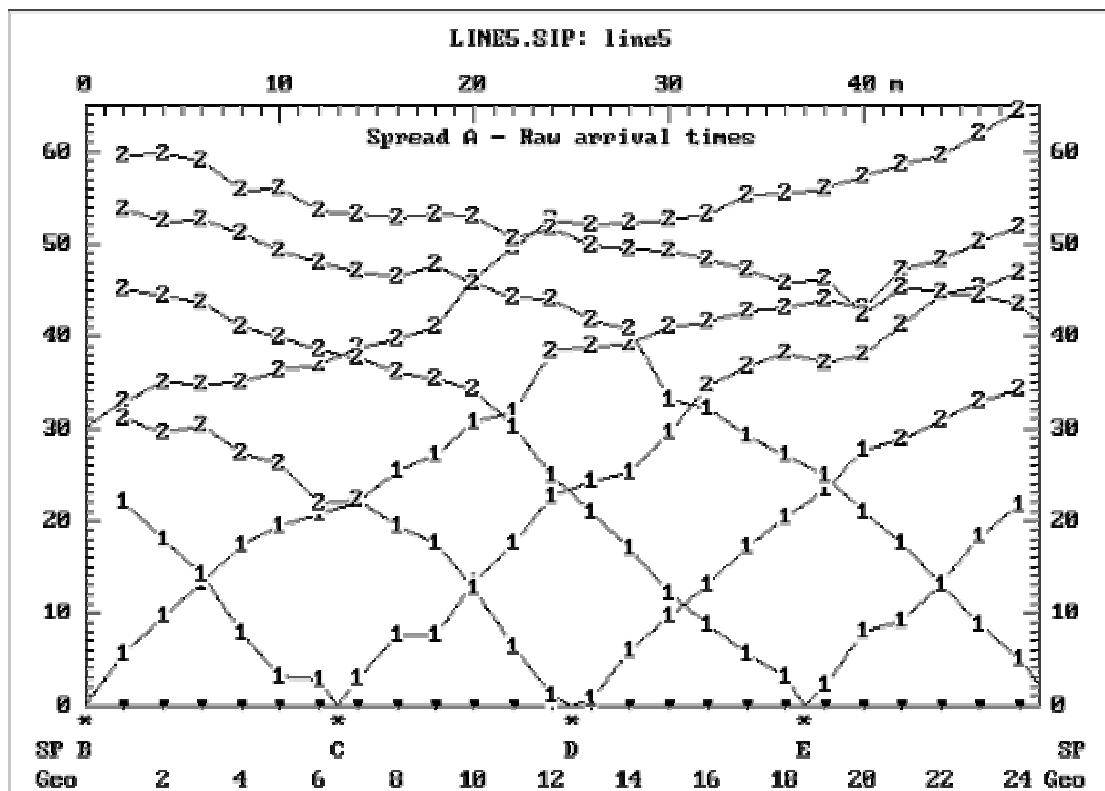
Spread 1 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



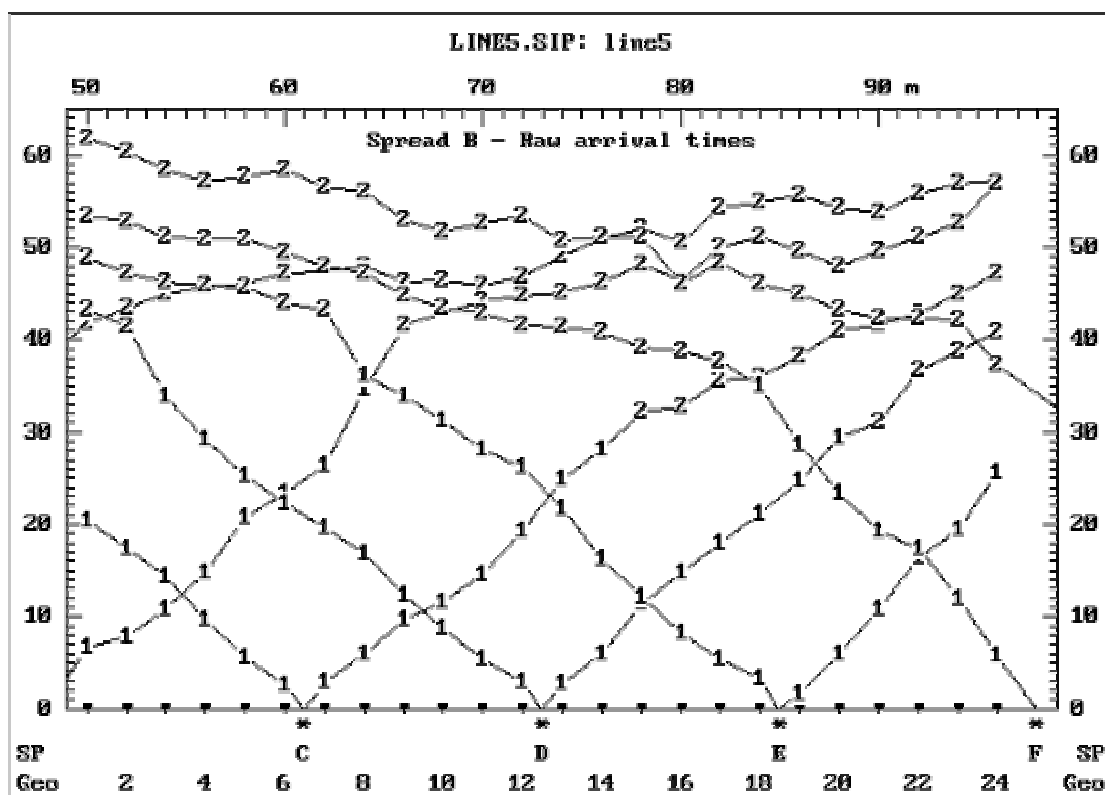
Spread 2 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



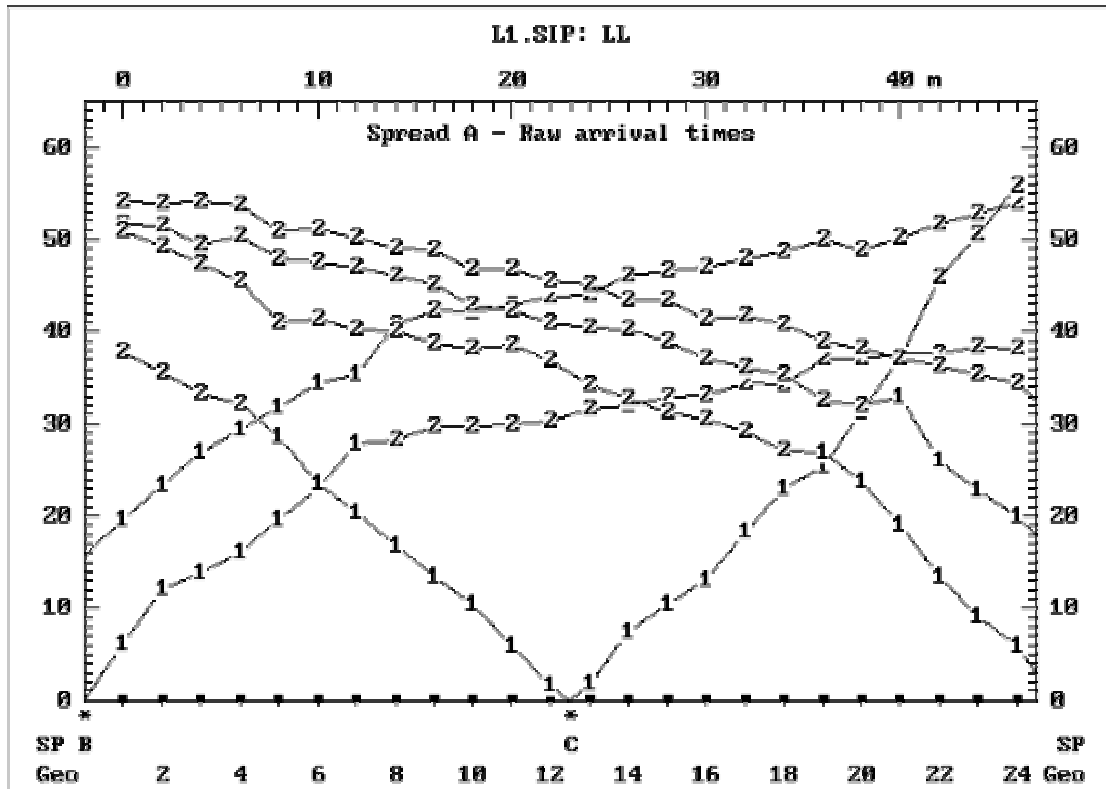
Spread 1 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



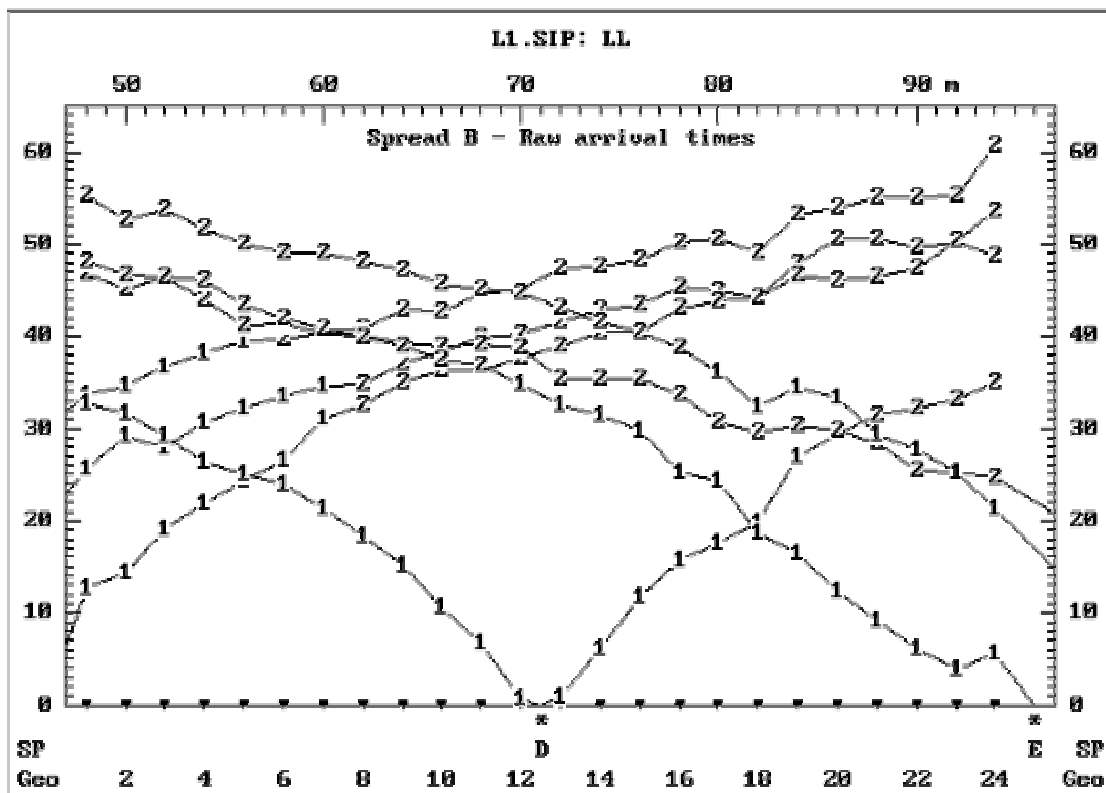
Spread 2 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



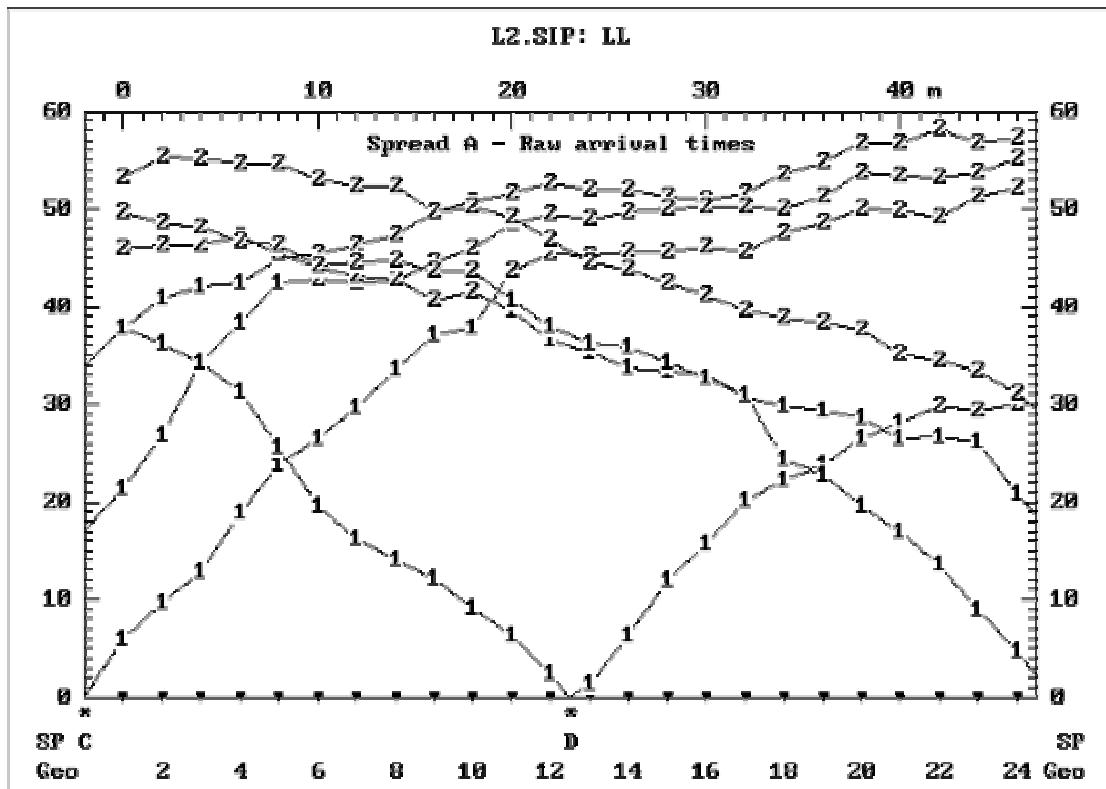
Spread 1 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



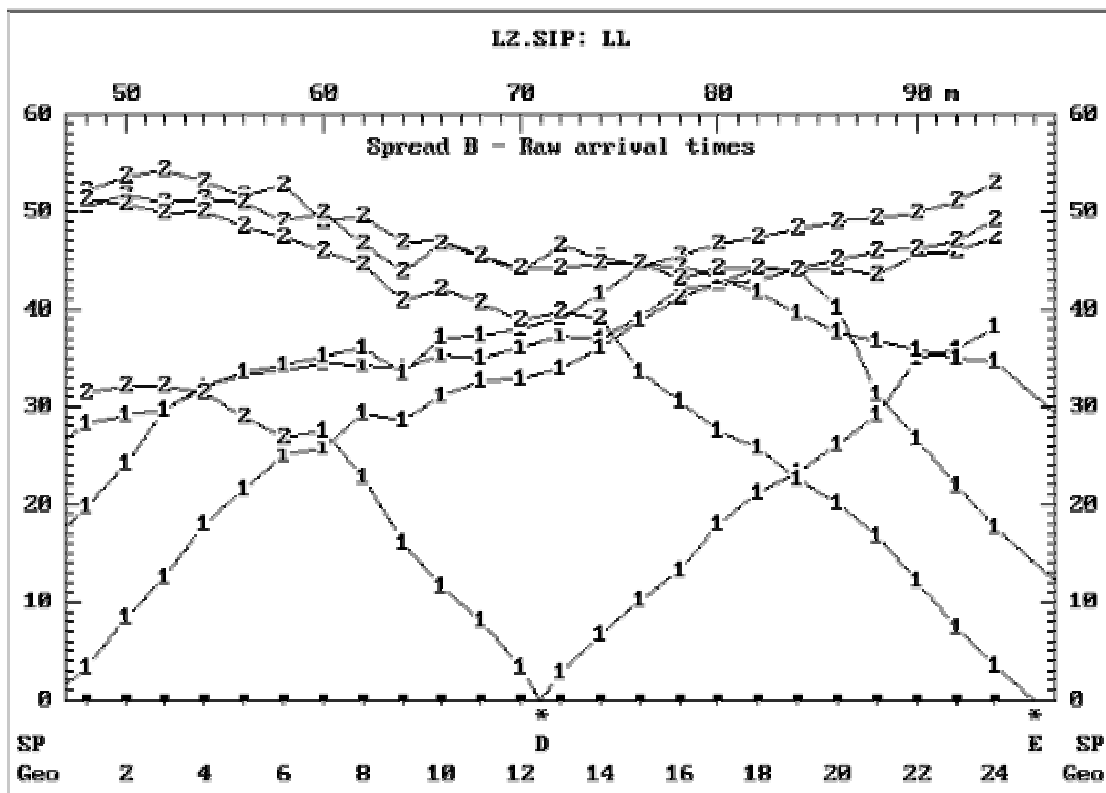
Spread 2 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



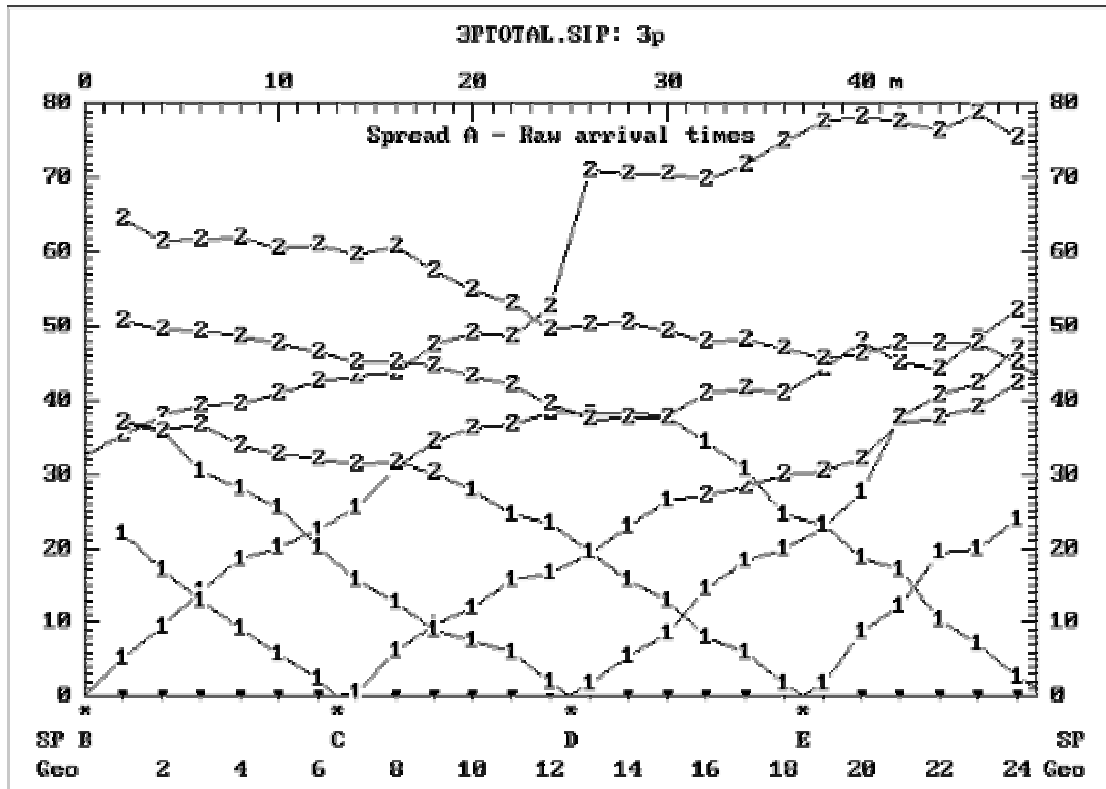
Spread 1 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



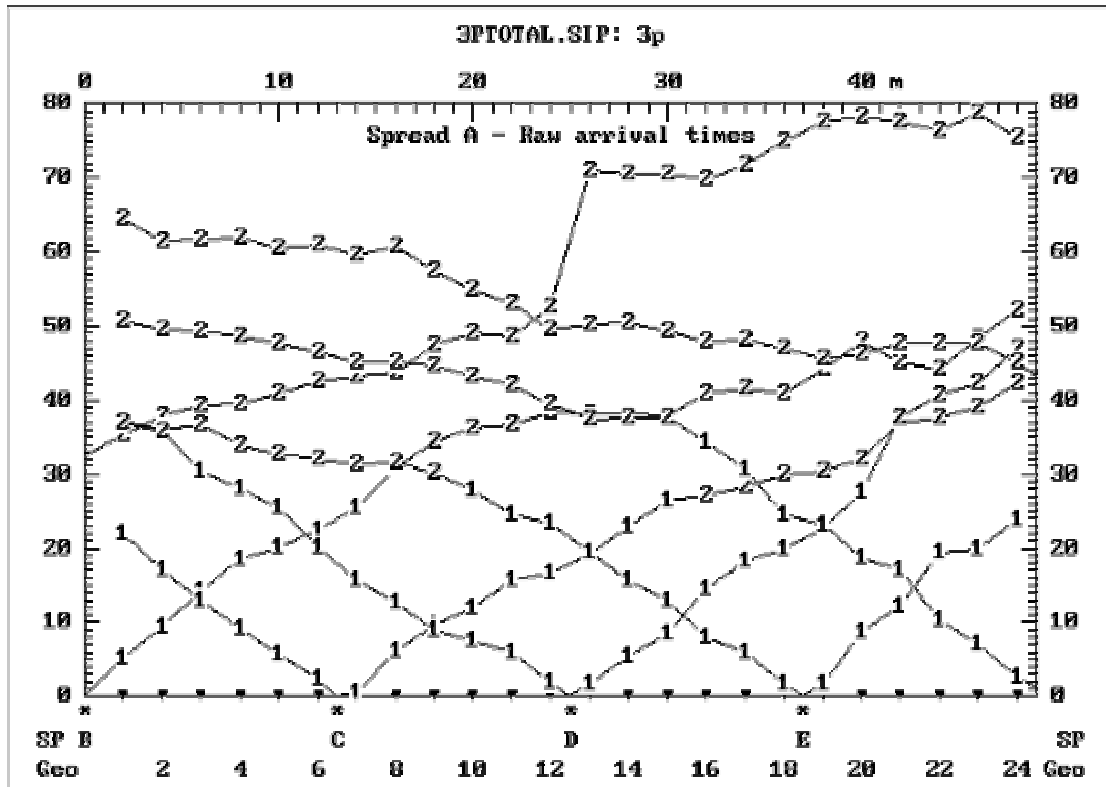
Spread 2 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



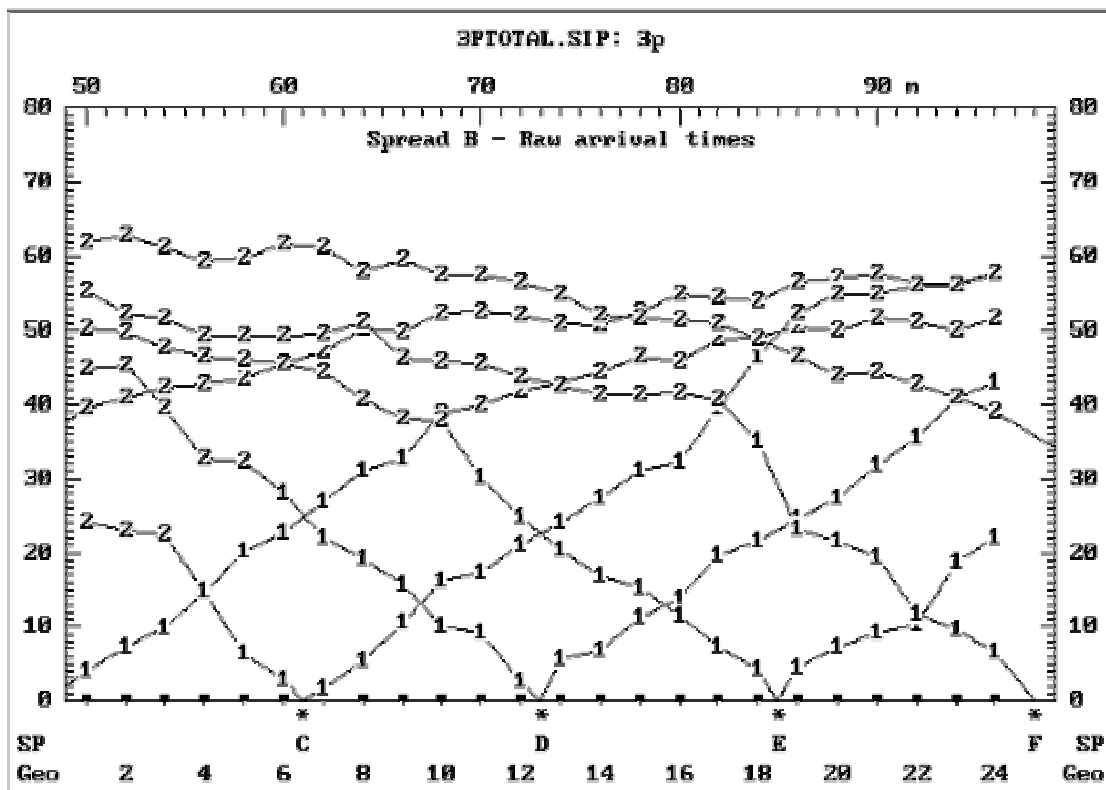
Spread 1 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



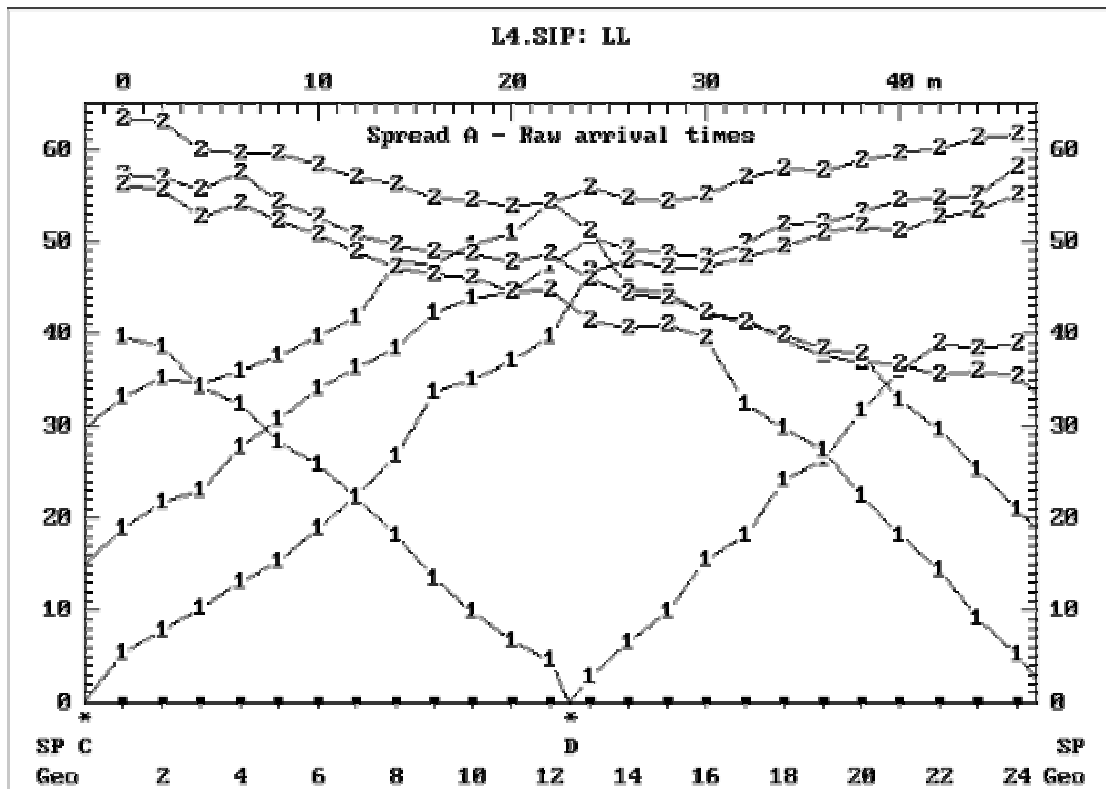
Spread 1 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



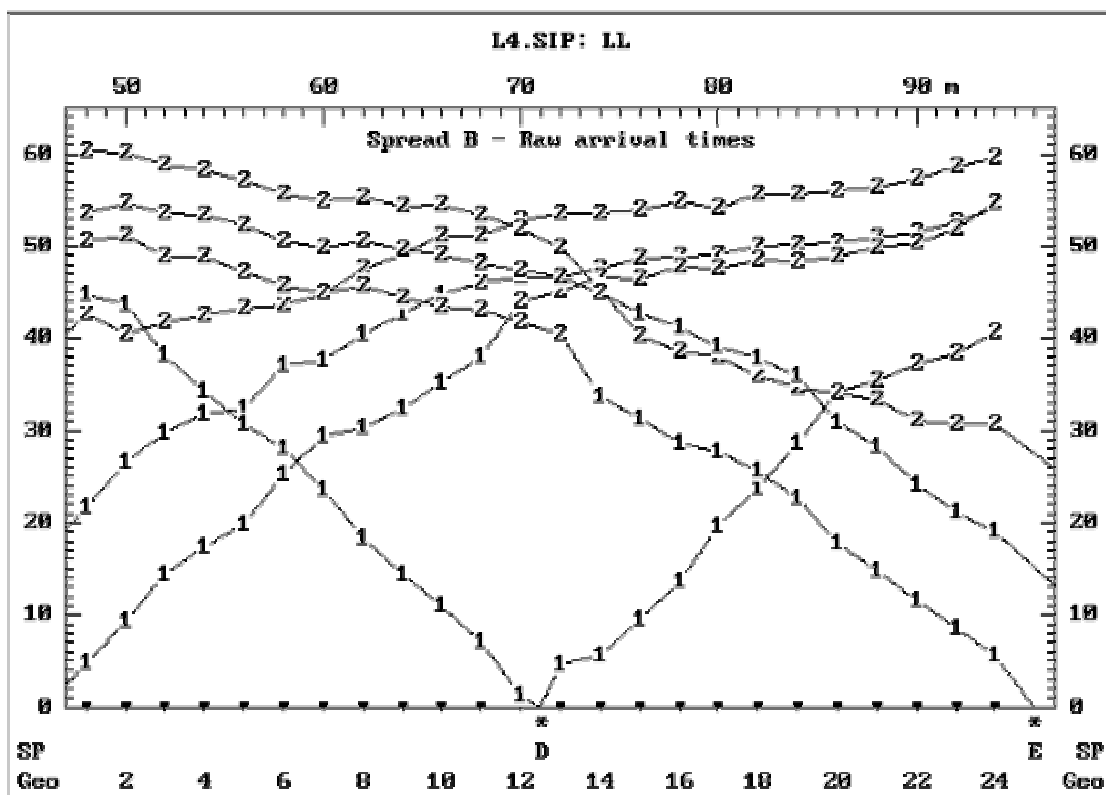
Spread 2 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



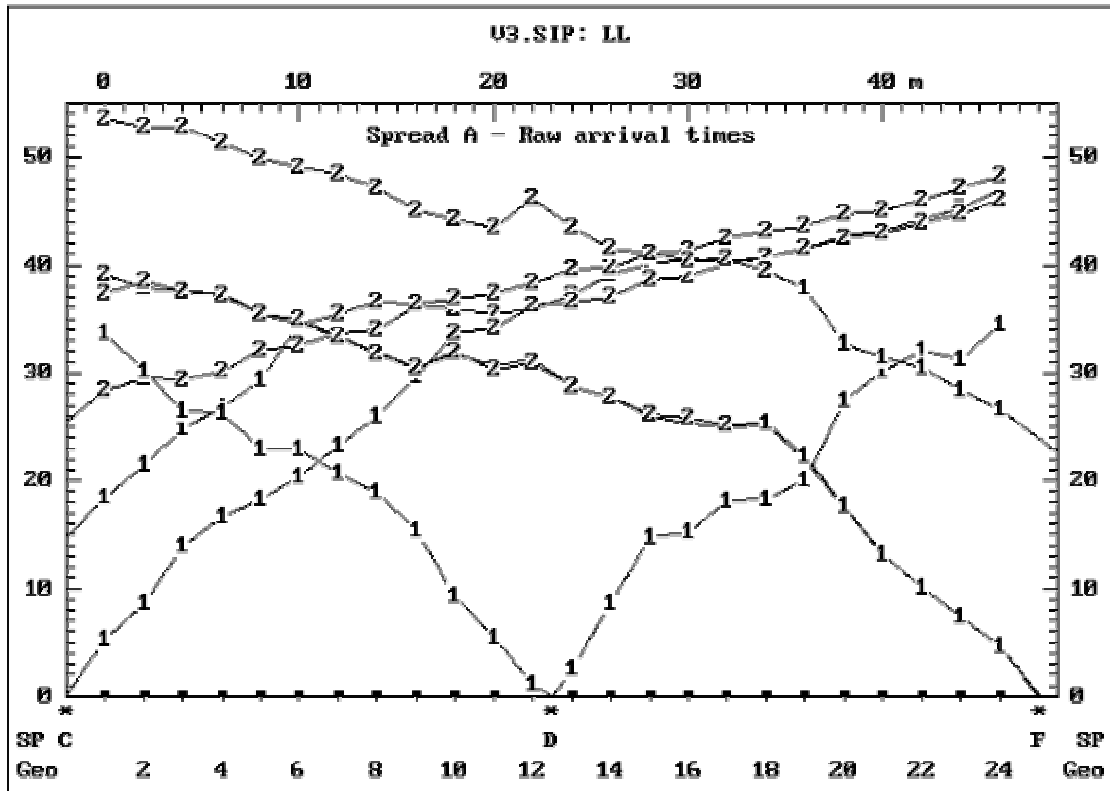
Spread 1 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



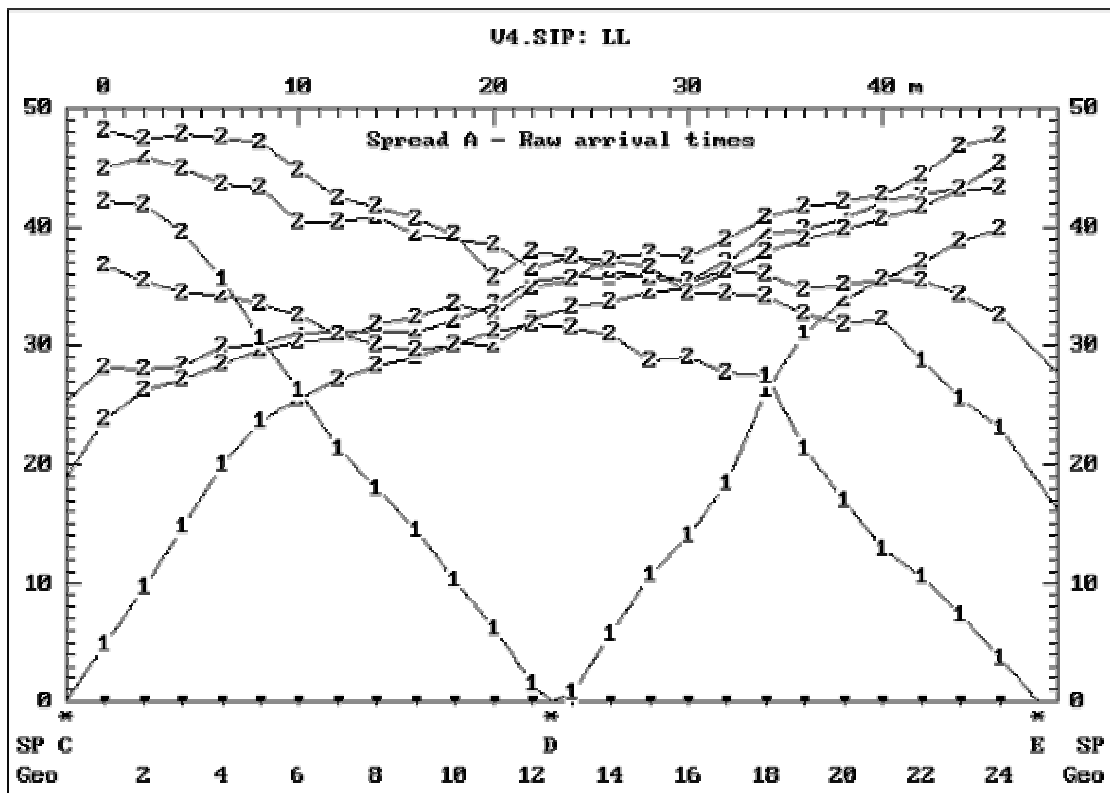
Spread 2 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



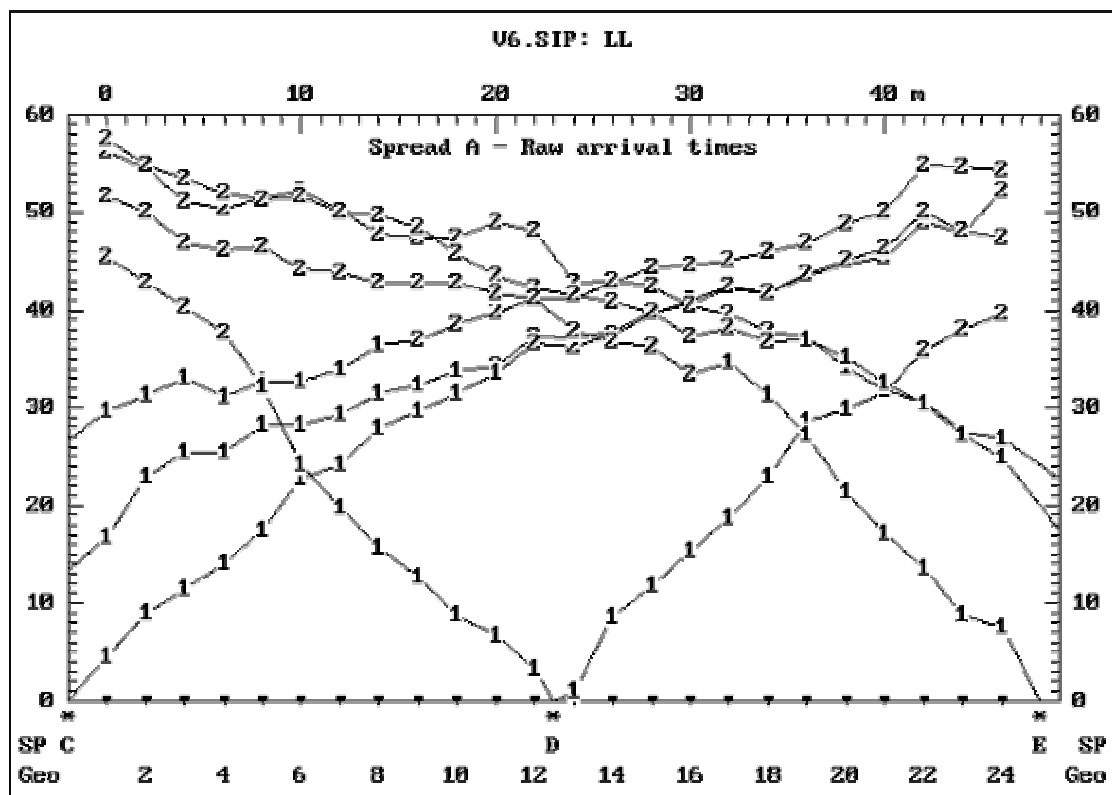
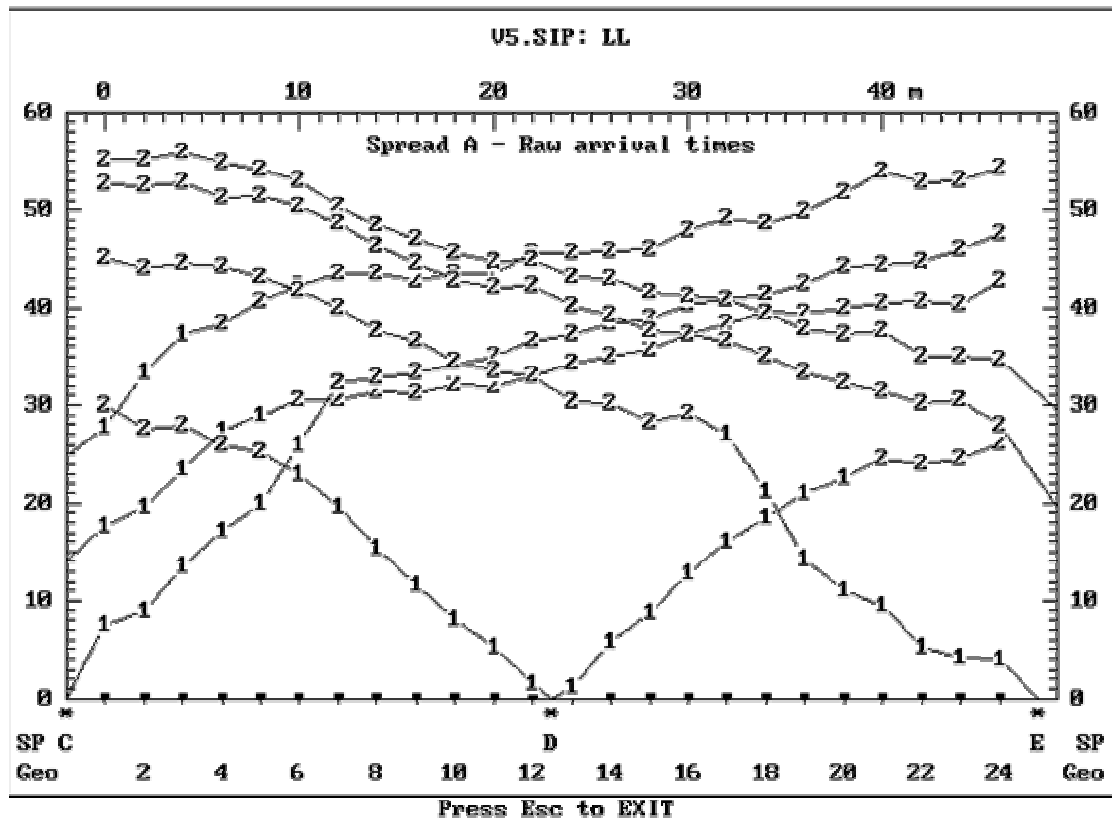
Press Esc to EXIT



Press Esc to EXIT



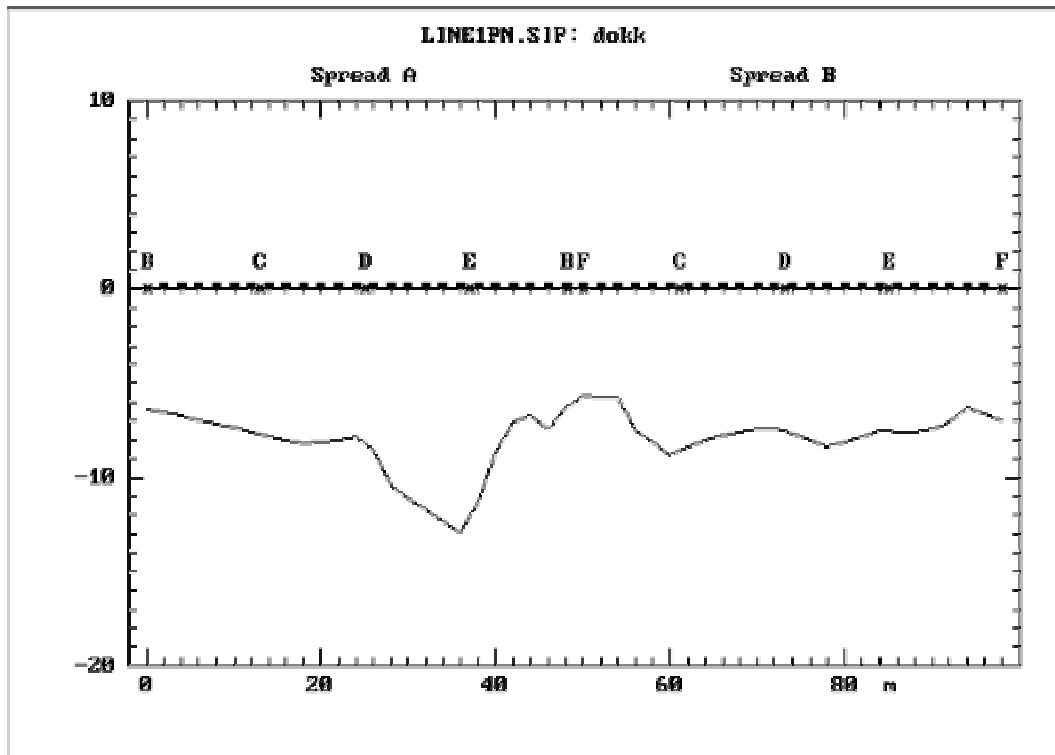
Press Esc to EXIT



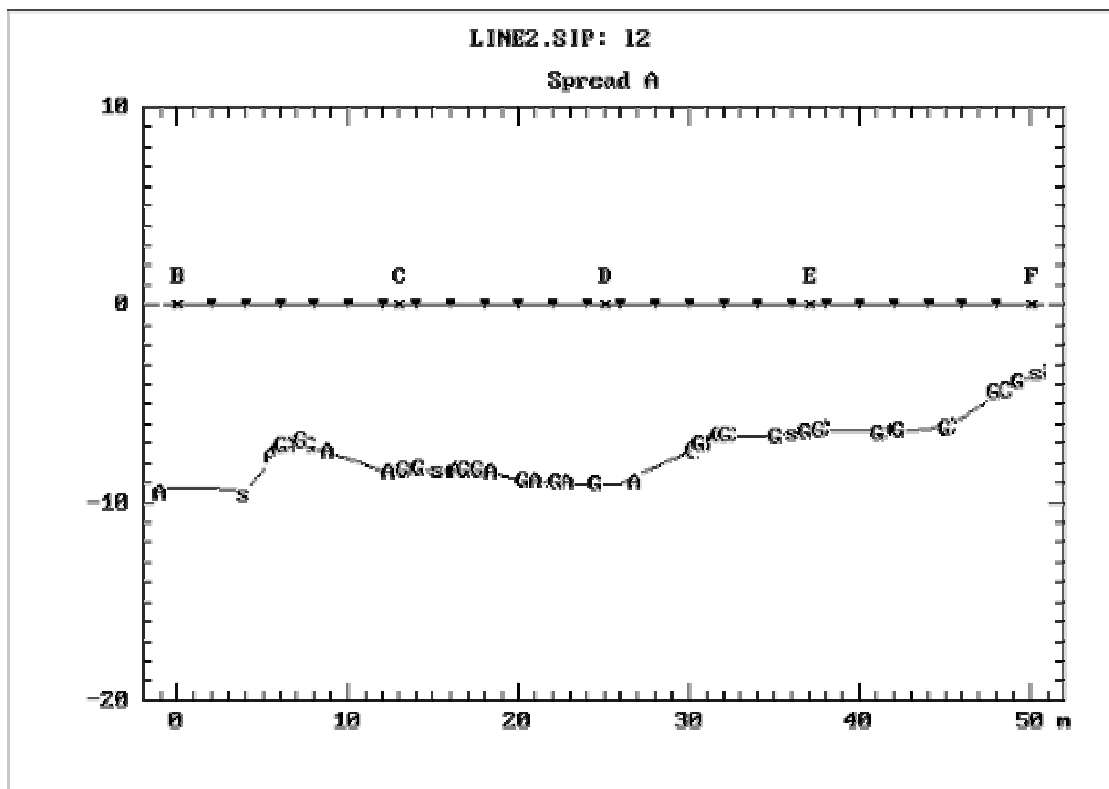
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΜΟΝΤΕΛΑ ΒΑΘΟΥΣ

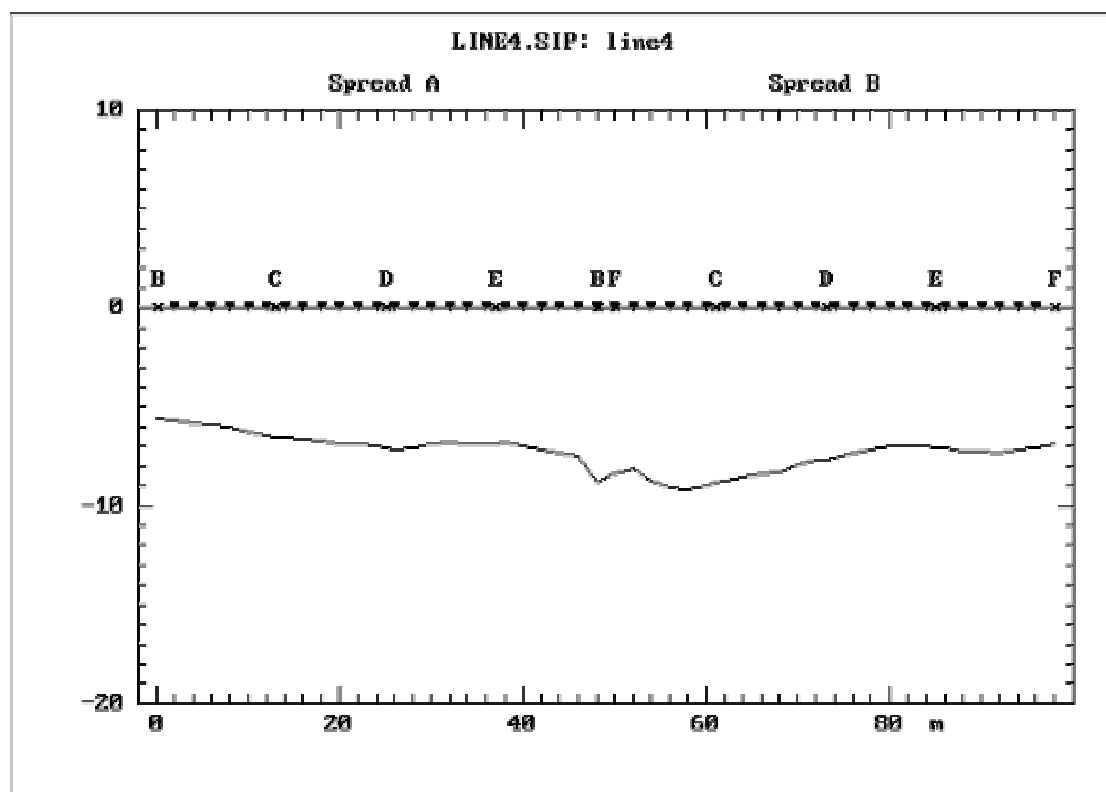
Press Esc to EXIT



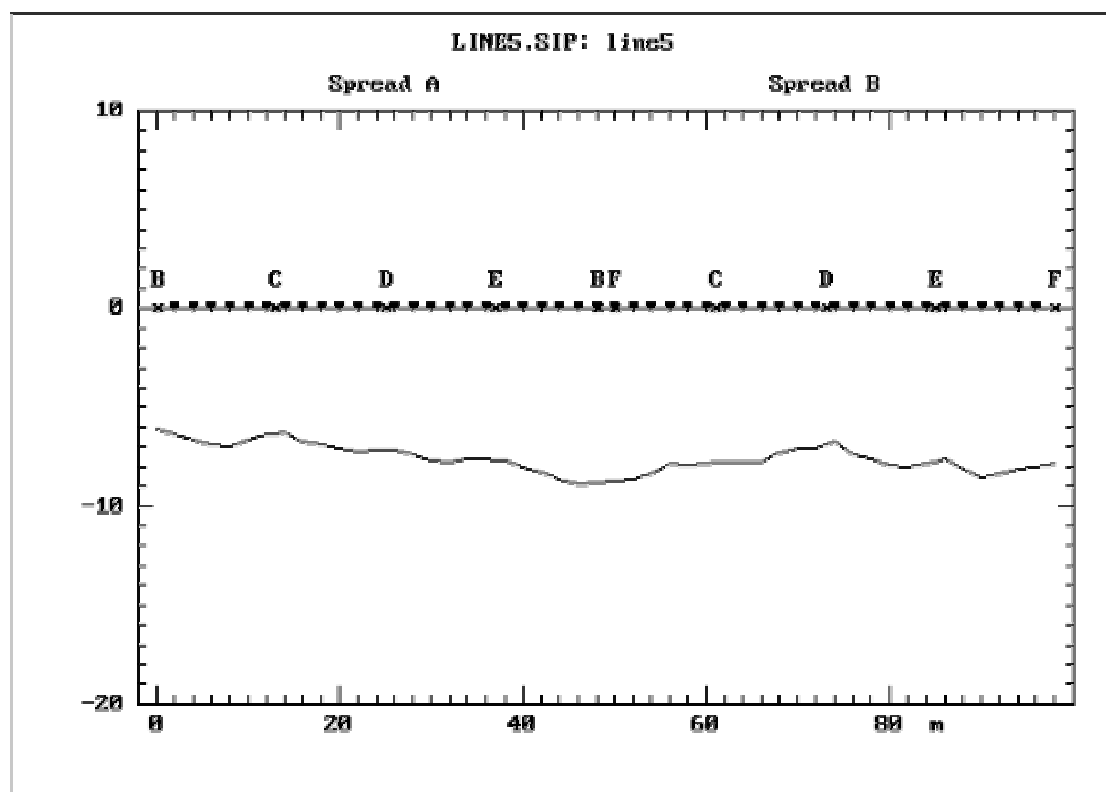
Spread 1 of 2. Press PgDn/PgUp to display next/last spread. Press Esc to EXIT.



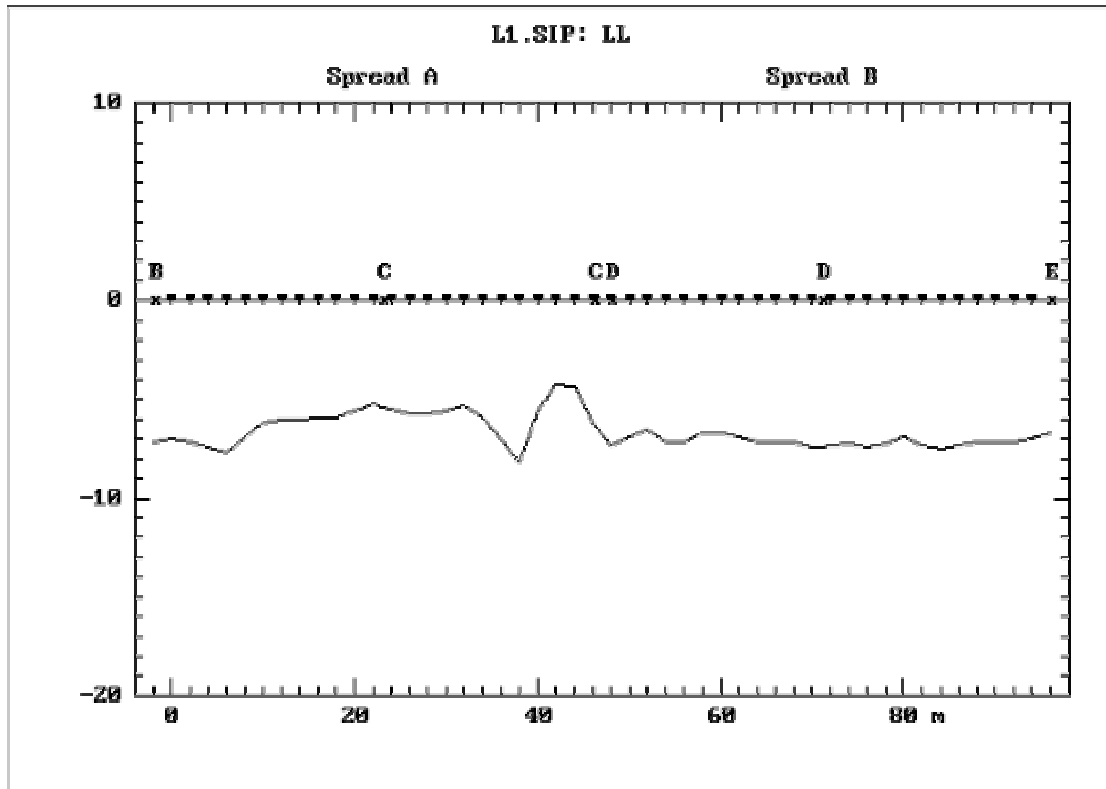
Press Esc to EXIT



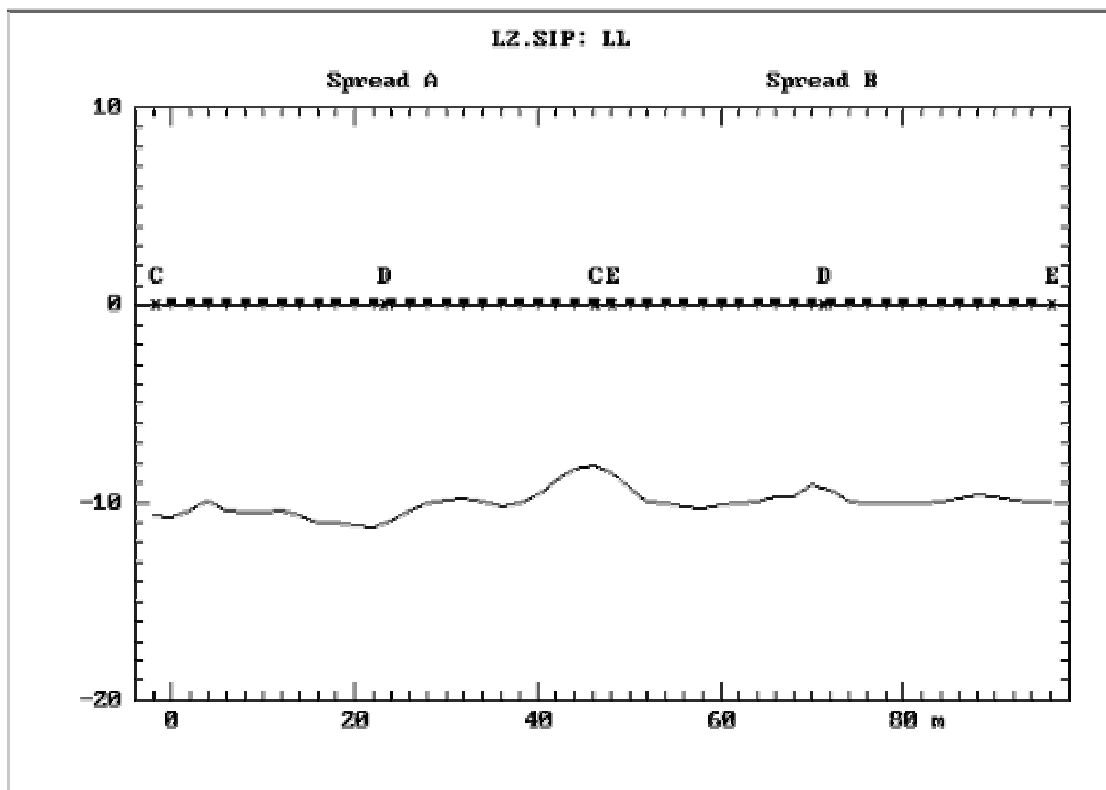
Press Esc to EXIT



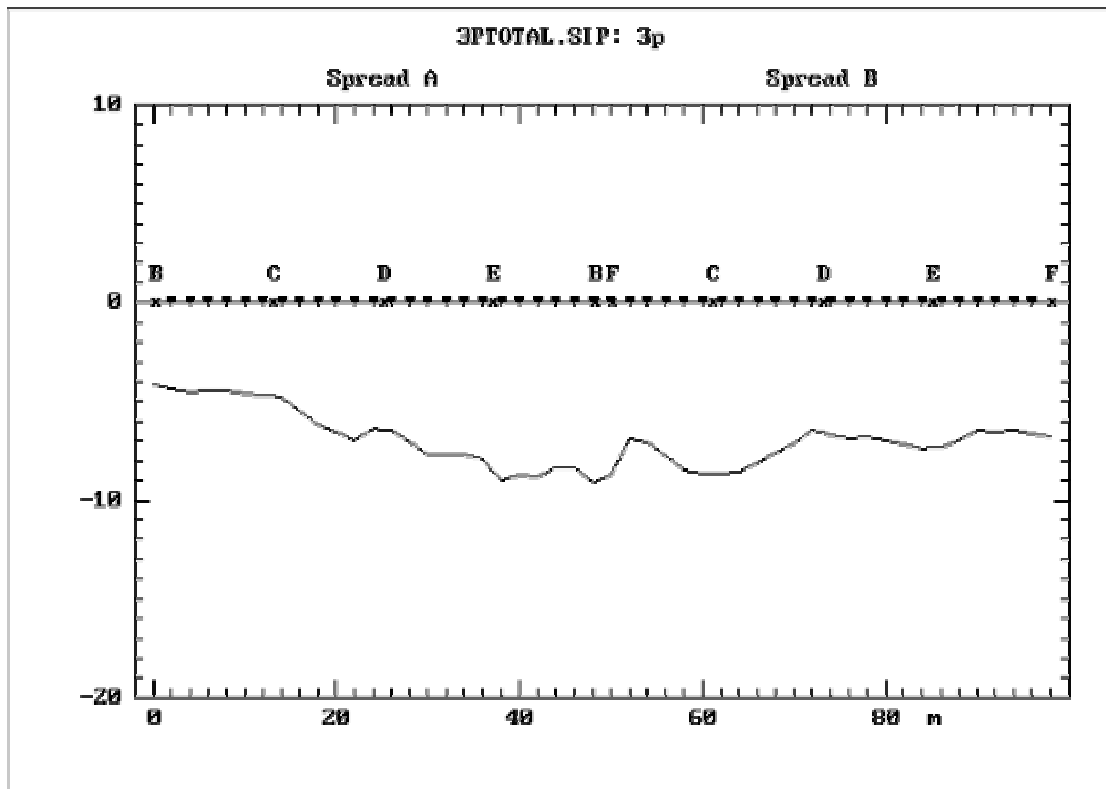
Press Esc to EXIT



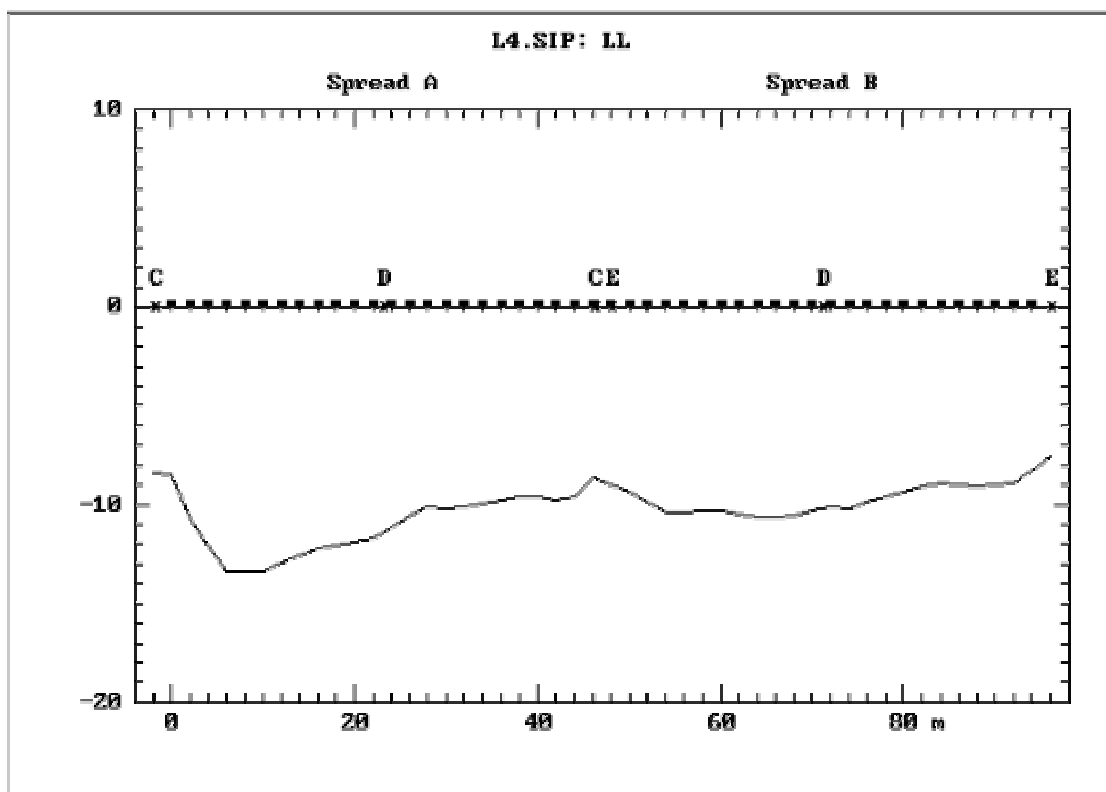
Press Esc to EXIT



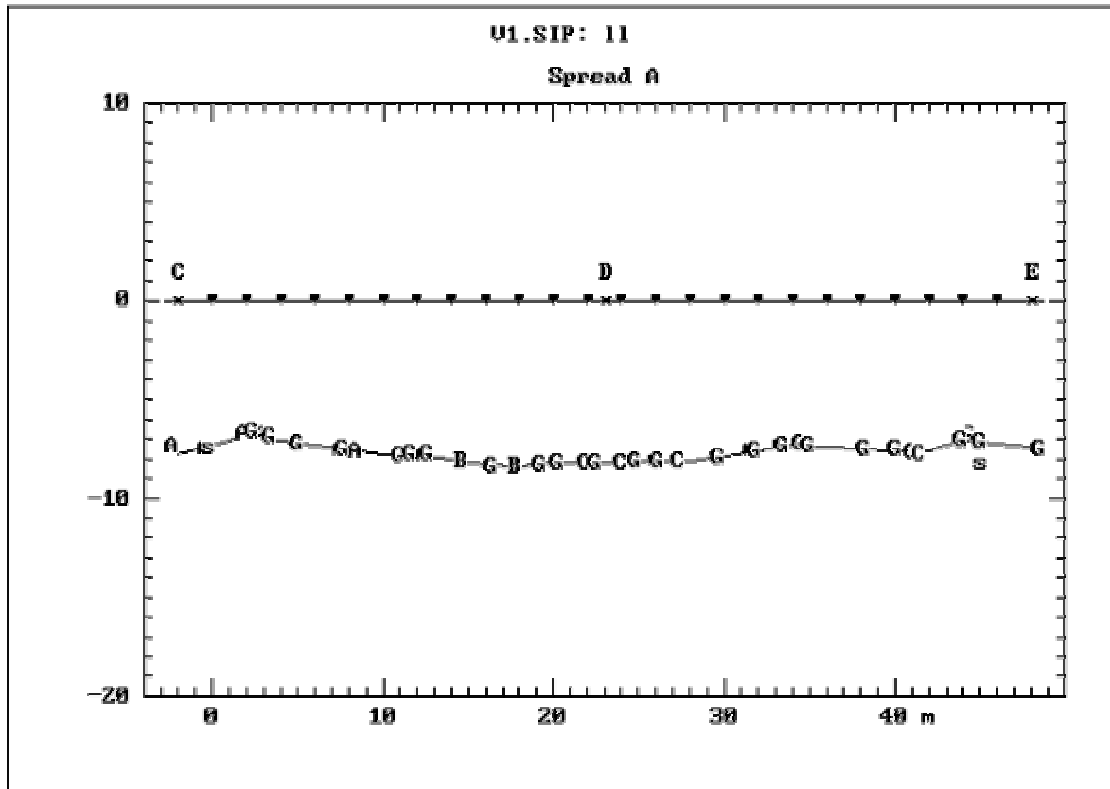
Press Esc to EXIT



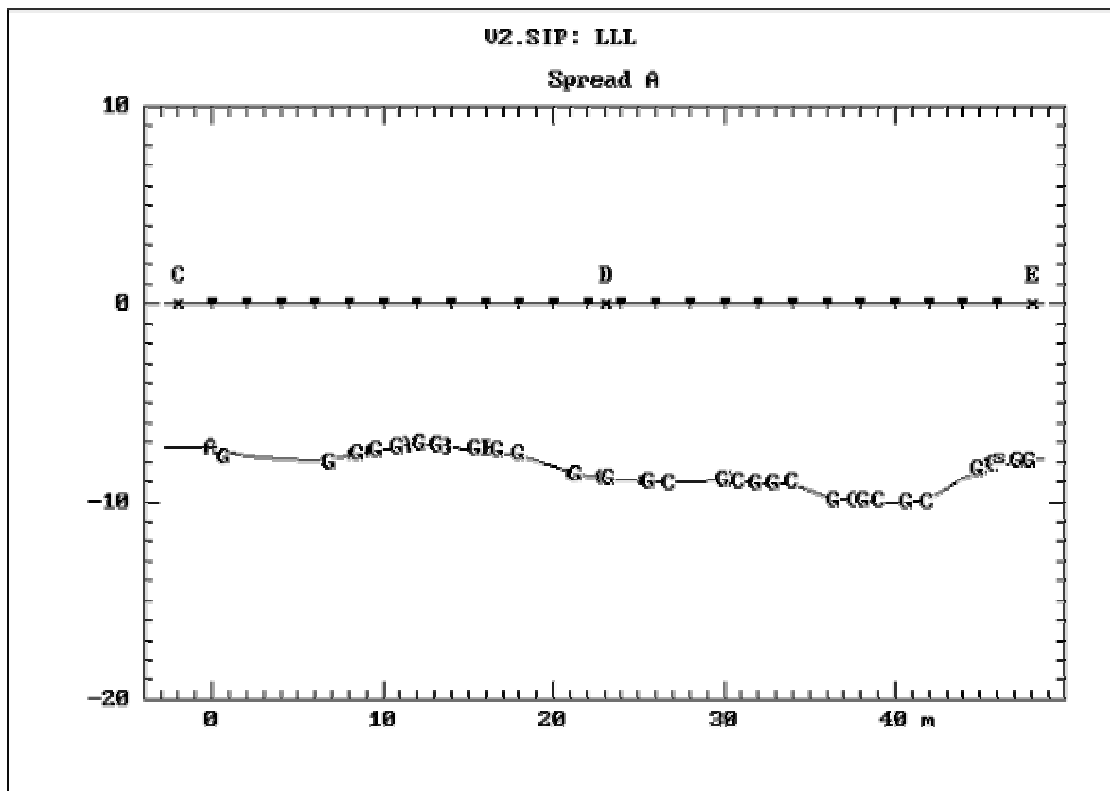
Press Esc to EXIT



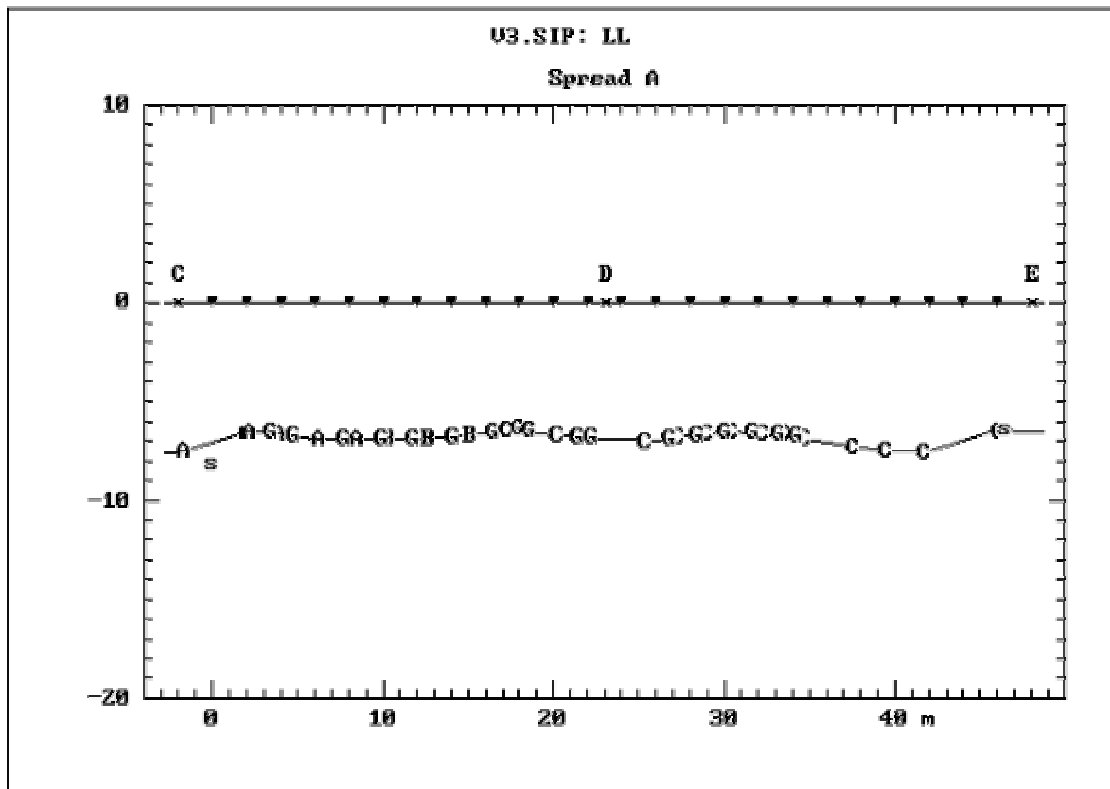
Press Esc to EXIT



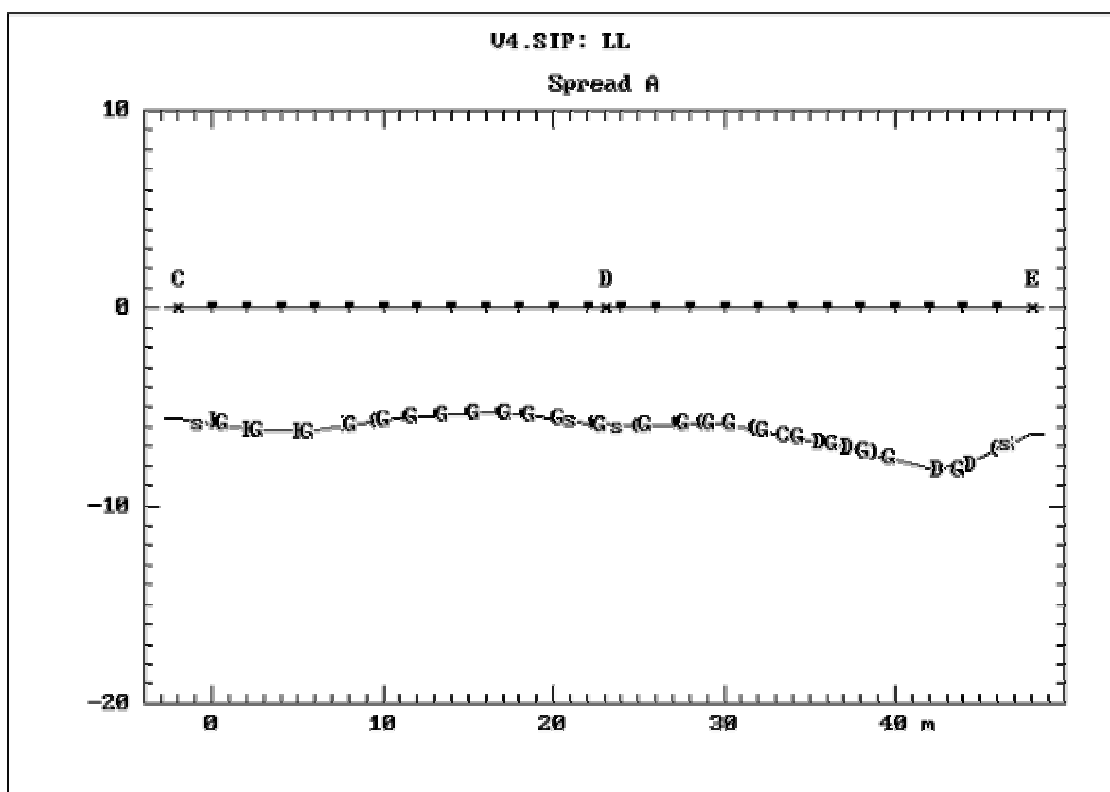
Press Esc to EXIT



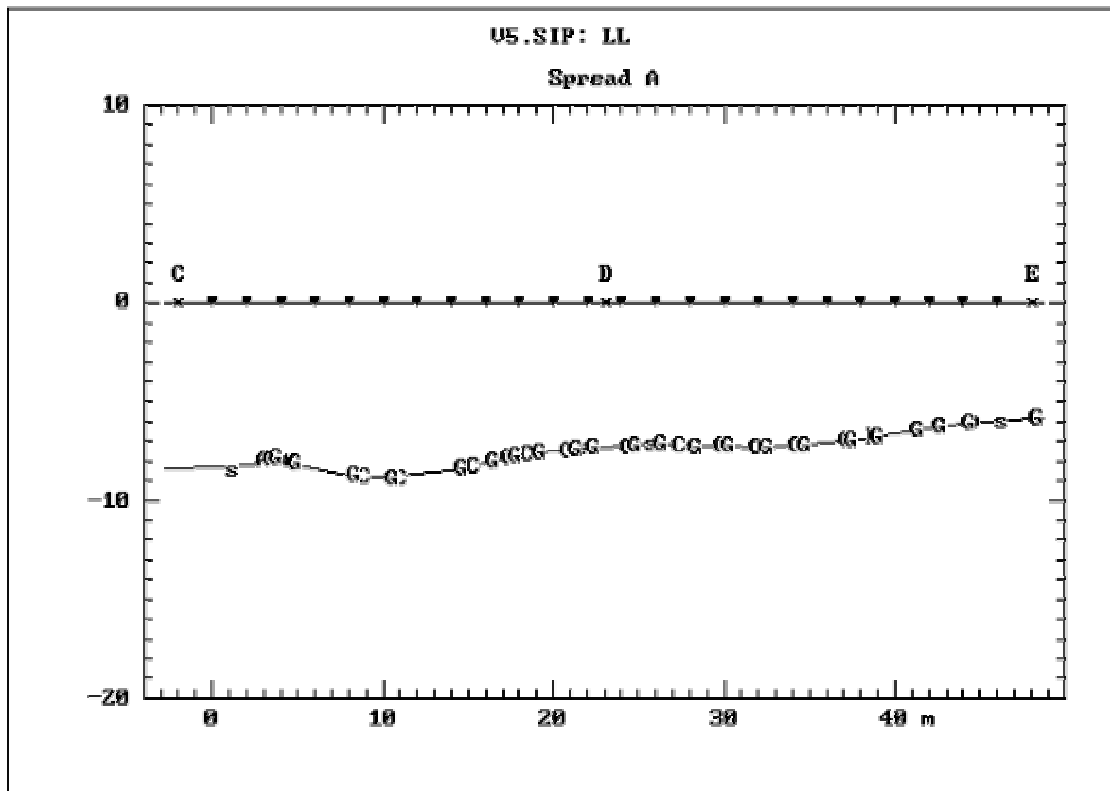
Press Esc to EXIT



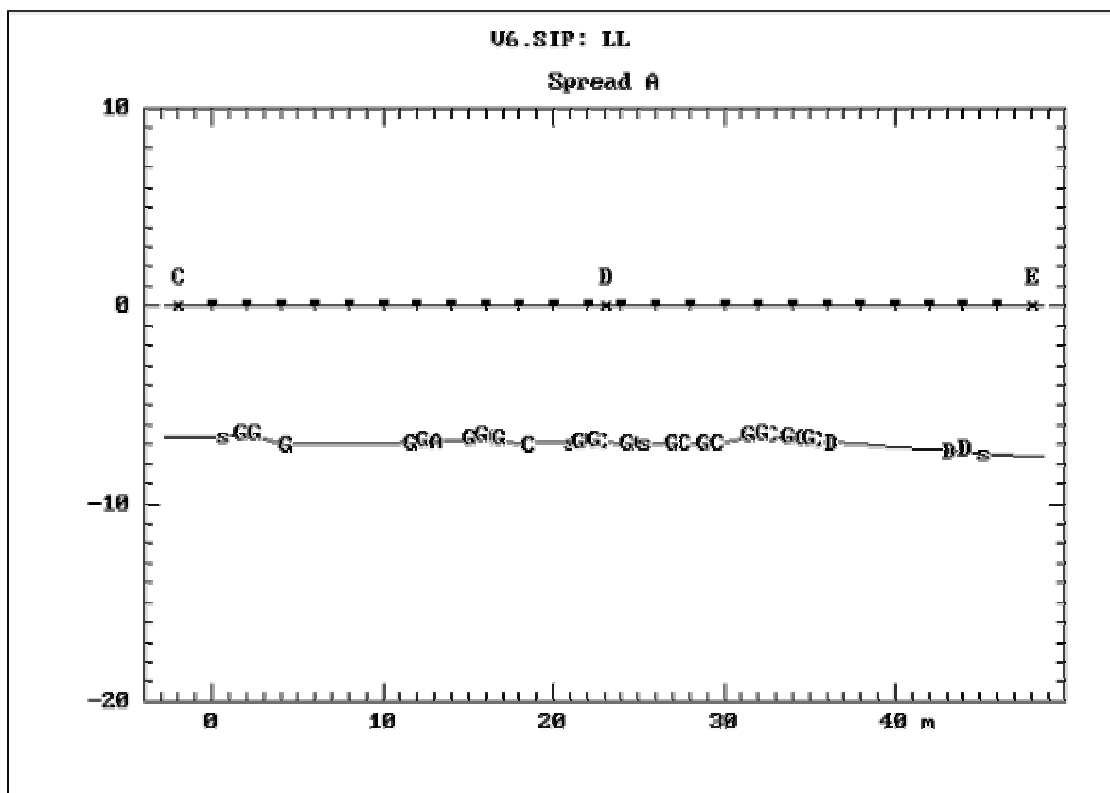
Press Esc to EXIT



Press Esc to EXIT



Press Esc to EXIT



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βαφείδης, Α., 1993, *Εφαρμοσμένη Γεωφυσική – 1: Σεισμικές Μέθοδοι*, Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
2. Κρητικάκης, Γ., 2000, *Συμβολή των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh στην εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υπεδάφους*, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
3. Lankston, W. R., 1990, *High-Resolution Refraction Seismic Data Acquisition and Interpretation*, Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. I, Ward, S., ed., Society of Exploration Geophysicists.
4. Κρητικάκης, Γ., 2001, *Προσδιορισμός της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων από καταστροφές επιφανειακών κυμάτων Rayleigh*, Μεταπτυχιακά διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
5. Παπακωνσταντίνου, Κ., 2004, *Μελέτη μηχανικών παραμέτρων του εδάφους με τη χρήση σεισμικών μεθόδων και εργαστηριακών μετρήσεων*, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
6. Παπαβασιλείου, Α., 2003, *Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ με την χρ'ση νευρωνικών δικτύων- εφαρμογές σε περιβαλλοντικά προβλήματα*, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
7. Κρητικάκης, Γ, Βαφείδης, Α, Gourry, C, 2004, *Ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και εφαρμογή σε χώρο απόθεσης απορρίμματος στην Β. Ιταλία και στην βιομηχανική περιοχή Porto Petroli, Genoa.*