

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**



**ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΦΡΑΓΜΑ**  
**ΜΥΡΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ - ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΜΑΡΚΟΥΛΑΚΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης (Επιβλέπων)**

**Μανούτσουγλου Εμμανουήλ, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης**

**Σουπιός Παντελεήμων, Καθηγητής Fahd University of Petroleum and Minerals**

Χανιά, Νοέμβριος 2019

## Πρόλογος

Μετά της ολοκλήρωσής της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω εκ βάθους καρδιάς την οικογένεια μου και τους ανθρώπους όπου με βοήθησαν τόσο κατά της συγγραφή της παρούσας διπλωματικής όσο και καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου, καθότι δίχως την συμβολή τους δεν θα διάβαινα τον μακρύ αυτόν δρόμο.

Οφείλω να κάνω ιδιαίτερη μνεία στον καθηγητή κύριο Βαφείδη Αντώνιο για την πολύτιμη καθοδήγηση και βοήθειά του, καθώς και στους καθηγητές κύριους Μανούτσογλου Εμμανουήλ και Σουπιό Παντελεήμων όπου με τιμούν με την συμμετοχή τους ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τα δεδομένα γεωφυσικής διασκόπησης που πραγματοποιήθηκε εντός και πέριξ του ποταμού Μύρτου, δυτικά της Ιεράπετρας, με σκοπό να συμβάλλει στον γεωτεχνικό χαρακτηρισμό των σχηματισμών που εμφανίζονται στην περιοχή στην οποία πρόκειται να κατασκευαστεί φράγμα. Στα πλαίσια της μελέτης αυτής σχεδιάστηκε γεωφυσική έρευνα αποτελούμενη από γραμμές σεισμικής και ηλεκτρικής τομογραφίας, ενώ για την επεξεργασία τους χρησιμοποιήθηκαν οι σουίτες εφαρμογών SeisImager και RES2DINV αντίστοιχα. Πρώτα τέθηκε το θεωρητικό υπόβαθρο των ανωτέρω μεθόδων και περιγράφηκε η γεωλογία της περιοχής.

Έπειτα από την υπέρθεση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων στις τομές της σεισμικής τομογραφίας, τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους για τις δεδομένες θέσεις και την ερμηνεία των σεισμικών δεδομένων σε συνδυασμό με τις γεωηλεκτρικές τομές και τα γεωτρητικά στοιχεία, συμπεραίνεται ότι το έδαφος της περιοχής μελέτης ταξινομείται ως κατηγορίας Β έδαφος. Επιπρόσθετα απεικονίστηκε το υπέδαφος αποτελούμενο από δύο ή τρία στρώματα που αποδίδονται σε αλλουβιακές αποθέσεις, με αυξημένο πάχος προς τα ανατολικά (μέχρι και τα 20 μέτρα πάχος) οι οποίες υπέρκεινται των σχιστολίθων. Προς δυτικά ακολουθούν πλευρικά κορήματα (c<sub>j</sub>) με μικρό σχετικά πάχος (μέχρι 10 περίπου μέτρα) και οφιόλιθοι.

## Περιεχόμενα

1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....	1
1.1 Εφαρμογές Γεωφυσικών μεθόδων σε γεωτεχνικά έργα και φράγματα .....	1
1.2 Ανάλυση επιφανειακών κυμάτων.....	3
1.3 Σεισμική Τομογραφία .....	5
1.3 Ηλεκτρική Τομογραφία .....	8
2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	14
2.1 Περιοχή μελέτης .....	14
2.2 Γεωλογικά δεδομένα .....	14
3. ΣΥΛΛΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	18
3.1 Σεισμική Τομογραφία .....	18
3.1.1 Εξοπλισμός σεισμικής τομογραφίας.....	18
3.1.2 Διαδικασία εκτέλεσης της μεθόδου σεισμικής τομογραφίας.....	20
3.2 Ηλεκτρική τομογραφία .....	21
3.2.1 Εξοπλισμός ηλεκτρικής τομογραφίας.....	21
3.2.2 Διαδικασία εκτέλεσης της μεθόδου ηλεκτρικής τομογραφίας .....	22
4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	23
4.1 PICKWIN95 SeisImager/2D.....	23
4.2 PLOTREFA .....	24
4.3 SeisImagerSW .....	34
4.4 Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων (λόγος Poisson, μέτρα ελαστικότητας)...	43
4.4 Ηλεκτρικά Δεδομένα – RES2DINV .....	50
5. ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ –ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .	53
5.1 Συμπεράσματα για την δομή του υπεδάφους .....	53
5.2 Κατηγορία εφαφους .....	54
5.3 Προτάσεις.....	56

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	57
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ .....	59
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ .....	80
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ : ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ - ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ.....	83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΒΑΘΟΣ.....	86

## 1.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 1.1 Εφαρμογές Γεωφυσικών μεθόδων σε γεωτεχνικά έργα και φράγματα

Τα γεωτεχνικά έργα είναι έργα μεγάλων απαιτήσεων τόσο σε ασφάλεια όσο και σε κόστος. Η ακριβής γνώση της γεωλογικής δομής του εδάφους και υπεδάφους της περιοχής μελέτης καθώς και των μηχανικών και γεωτεχνικών τους παραμέτρων και ιδιοτήτων κρίνεται καίρια ανάγκη ως προς την εκπόνηση της βέλτιστης και ασφαλέστερα δυνατής περάτωσης του έργου με το μικρότερο δυνητικά κόστος. Λόγω αυτού, η λεπτομερής έρευνα κατά τον σχεδιασμό οποιουδήποτε τεχνικού έργου είναι αναγκαία και επιβεβλημένη.

Άμεση απόρροια του εντοπισμού ασθενών περιοχών θεμελίωσης, περιοχών μελλοντικών αστοχιών καθώς και καρστικοποιημένων υπόγειων γεωλογικών σχηματισμών είναι η βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας του έργου και η μείωση τους κόστους κατασκευής και συντήρησης αυτού. Οι γεωφυσικές μέθοδοι αποτελούν το εργαλείο του μηχανικού για την αποσαφήνιση και ταξινόμηση του εδάφους, δίδοντας μια άμεση και σαφή εικόνα με ταυτόχρονα χαμηλό κόστος, ενώ κρίνονται θεμελιώδους σημασίας στον σχεδιασμό και κατασκευή οποιουδήποτε έργου. Στον πίνακα 1 παρουσιάζεται το εύρος της εφαρμογής γεωφυσικών τεχνικών σε γεωλογικά και γεωτεχνικά ζητήματα.

Application	Ref.	Ref.	Seis. Tomo.	GPR	EM	Resist.	IP	SP	Mag.	Grav.	MASW	ReMi
Mapping lithology (<30-ft depth)	M	X		M	X	X					M	M
Mapping lithology (>30-ft depth)	X	M	X		X	X					M	M
Estimating clay-mineral content					M	X	X				X	X
Locating shallow sand and gravel deposits				M	M						X	X
Locating sand and gravel deposits (that contain heavy minerals)									M			
Determining volume of organic material in filled-in lakes or karsted features	M	M			M					M	X	X
Mapping top of ground water surface	M (p-wave)	M (p-wave)		M	M	M						
Determining water depths (including bridge scour)				M								
Mapping groundwater cones of depression	X	X		M	X	X						
Subsurface fluid flow								M				
Mapping contaminant plumes				M	M	X	X					
Mapping crop land salination and desalination over time					M	M						
Locating underwater ferromagnetic objects				M					M			
Mapping bedrock topography (<30-ft depth)	M			M	X	X				X	M	M
Mapping bedrock topography (>30-ft depth)	X	M			X	X				X	M	M
Mapping sub-bedrock structure	X	M		X	X	X					X	X
Delineating steeply dipping geologic contacts (<30-ft depth)	M			M	M	M						

NOTE: M = Major Application; X = Minor Application.

**Πίνακας 1 :** Εφαρμογές Γεωφυσικών Μεθόδων σε Γεωτεχνικά Έργα

Υπάρχουν πολυποίκιλες περιπτώσεις κατά τις οποίες κρίνονται ανεκτίμητης αξίας οι γεωφυσικές μεθόδους κατά την παρασκευή αλλά και συντήρηση φραγμάτων.

Συγκεκριμένα:

- Κατά την αξιολόγηση των γεωλογικών σχηματισμών θεμελίωσης (εδαφών και πετρωμάτων), ώστε να βοηθήσουν τους μηχανικούς στον σχεδιασμό.
- Εντοπισμός και αξιολόγηση ρηγματωδών δομών και ζωνών οι οποίες είναι πιθανές σεισμικά ασταθής ζώνες.
- Αξιολόγηση των υλικών (ιδιότητες αντοχής) για να εξεταστεί εάν καλύπτουν τις ανάγκες του σχεδιασμού.
- Έλεγχος ώστε να εξεταστεί εάν το σύστημα αποστράγγισης και αποχέτευσης λειτουργεί σωστά.
- Έλεγχος για ζώνες ολίσθησης σε χωμάτινα φράγματα που θα υποδεικνύουν βλάβη από σεισμό ή ζώνες υψηλής επικινδυνότητας αστοχίας.
- Εντοπισμός κοιλοτήτων, ζωνών διαρροής.
- Αξιολόγηση σκυροδέματος και της επιδείνωσης του σχηματισμού με τον χρόνο.
- Εντοπισμός και αξιολόγηση ελλαττωματικών κτισμάτων και ζωνών κοντά σε φράγμα που αποτελούν δυνητικές πηγές σεισμογενής ενέργειας.

Τα πλεονεκτήματα χρήσης γεωφυσικών μεθόδων σε φράγματα:

- Αποτελούν ως επί το πλείστον μη επεμβατικές μεθόδους, χαμηλού συγκριτικά κόστους.
- Δίδουν την δυνατότητα χαρακτηρισμού των γεωλογικών σχηματισμών.
- Συμβάλλουν στην ποσοτικοποίηση της ασφαλείας του φράγματος.

## 1.2 Ανάλυση Επιφανειακών Κυμάτων

“Είναι γνωστό ότι τα επιφανειακά σεισμικά κύματα παρουσιάζουν έντονο το φαινόμενο της διασποράς (*dispersion*), δηλαδή της εξάρτησης της ταχύτητας φάσης από τη συχνότητα. Η ταχύτητα φάσης των κυμάτων Rayleigh σε οριζόντια στρωματωμένο εδαφικό μοντέλο εξαρτάται από τη συχνότητα και τέσσερις εδαφικές παραμέτρους (Schwab and Knopoff, 1972):

- Ταχύτητα των διαμηκών κυμάτων ( $P$  – κύματα)
- Ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων ( $S$  – κύματα)
- Πυκνότητα των σχηματισμών
- Πάχος κάθε στρώματος

Η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων επηρεάζει την καμπύλη διασποράς περισσότερο από όλες τις άλλες εδαφικές παραμέτρους. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιώντας τεχνικές αντιστροφής, είναι δυνατό να προσδιοριστεί η κατανομή της ταχύτητας των  $S$  – κυμάτων συναρτήσει του βάθους, από την καμπύλη διασποράς Rayleigh. Η πλευρική μεταβολή της ταχύτητας των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τεχνικές *roll along* κατά την απόκτηση των σεισμικών καταγραφών (Miller et al, 1999). Από κάθε καταγραφή κοινής πηγής και μετά την αντιστροφή της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς προκύπτει η ταχύτητα των  $S$  – κυμάτων συναρτήσει του βάθους. Τοποθετώντας τα αποτελέσματα από κάθε αντιστροφή στο κέντρο του αναπτύγματος πηγής - γεωφώνων προκύπτει η ψευδοτομή της ταχύτητας των  $S$  – κυμάτων.

Πολλές εφαρμογές προσδιορισμού της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων από σεισμικά δεδομένα επιφανειακών κυμάτων (Ραπτάκης, 1995, Stokoe et al., 1994, Misiek, 1996) έχουν αποδείξει την αξιοπιστία της μεθόδου αυτής. Τέλος, οι νέες τάσεις στο συγκεκριμένο αντικείμενο εισάγουν την παράμετρο της πλευρικής ανομοιογένειας της ταχύτητας στα εδαφικά μοντέλα για τον χαρακτηρισμό των σχηματισμών με άμεσο γεωτεχνικό και περιβαλλοντικό ενδιαφέρον (Miller and Xia, 1999, Miller et al., 1999).

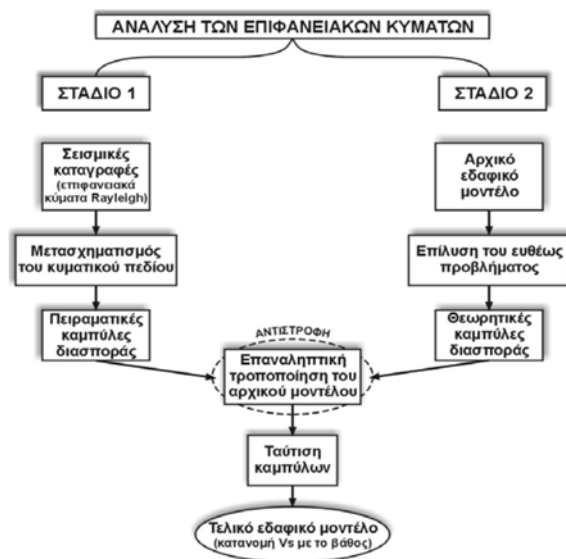
Η ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων περιλαμβάνει τη λήψη καταγραφών πλούσιων σε επιφανειακά κύματα Rayleigh και την αντιστροφή των χαρακτηριστικών καμπύλων διασποράς τους, για τον καθορισμό της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων ( $S$ ) κατανεμημένης με το βάθος.

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. 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 στρωματωμένο εδαφικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας την τεχνική Thomson-Haskell (Haskell, 1953, Schwab and Knoroff, 1972). Τροποποιώντας επαναληπτικά το εδαφικό μοντέλο επιτυγχάνεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης διασποράς στην πειραματική (διαδικασία που ονομάζεται αντιστροφή). Έτσι, εφόσον πραγματοποιηθεί ταύτιση των καμπύλων, προσδιορίζεται το τελικό εδαφικό μοντέλο (κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων με το βάθος).



**Σχήμα 1.1:** Διάγραμμα ροής που περιγράφει τη μεθοδολογία της ανάλυσης των κυμάτων Rayleigh.

Επιγραμματικά, κατά την ανάλυση επιφανειακών κυμάτων αρχικά υπολογίζεται το μήκος κύματος των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh από τις καμπύλες διασποράς (που απεικονίζουν την μεταβολή της ταχύτητας φάσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh συναρτήσει της συχνότητας τους) σύμφωνα με τη σχέση :

$$C_R = \lambda_R \cdot f_R \quad (1.1)$$

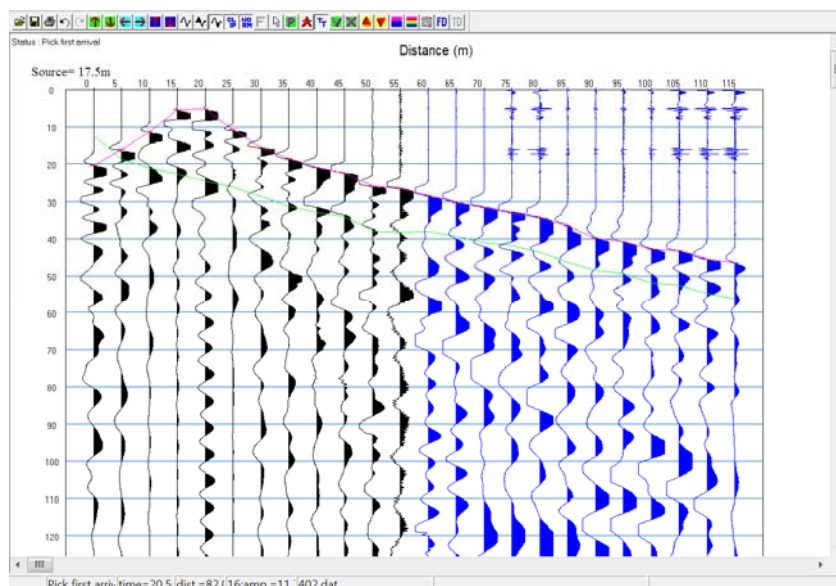
(όπου  $C_R$  είναι η ταχύτητα φάσης,  $f_R$  η συχνότητα και  $\lambda_R$  το μήκος κύματος των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh).

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 ( $\nu$ ) 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, όπου οδηγεί στην ταυτοποίηση και αξιολόγηση τους.” (Ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και εφαρμογή σε χώρο απόθεσης απορριμμάτων στη Β. Ιταλία και στη βιομηχανική περιοχή Porto Petroli, Genoa, Κρητικάκης Σ. Γ.1, Βαφείδης, Gourry J)

### 1.3 Σεισμική Τομογραφία

Η δομή της γης έχει μελετηθεί με την χρήση διαφόρων μεθοδολογιών, κυριότερες εκ των οποίων είναι η ανάκλαση και η διάθλαση των κυμάτων χώρου και η σκέδαση των επιφανειακών κυμάτων. Η ανάπτυξη της σεισμικής τομογραφίας επέτρεψε την διασκόπηση του εσωτερικού της γης και την δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων, όπου εκτός από την μεταβολή της ταχύτητας σε συνάρτηση με το βάθος προσδιορίζεται και η οριζόντια κατανομή της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων, επιτρέποντας την άμεση εξαγωγή συμπερασμάτων για της μεταβολές πυκνότητας και θερμοκρασίας στον φλοιό, μανδύα και πυρήνα της γης. (Σεισμική τομογραφία, «προσδιορισμός ζωνών ταχύτητας στον ευρύτερο Ελληνικό χώρο, Δρακάτος Γεώργιος, 1989)



**Σχήμα 1.2:** Σεισμική καταγραφή. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί σε απόσταση στην γραμμή μελέτης ενώ ο κατακόρυφος σε χρόνο.

Η γενική αρχή της σεισμικής μεθόδου είναι η διάδοση ελαστικών κυμάτων χρησιμοποιώντας μια πηγή ενέργειας. Όταν κατά την διάδοση τους τα κύματα

συναντούν διαχωριστική επιφάνεια παρατηρείται διάθλαση ή ανάκλαση. Τα γεώφωνα καταγράφουν την κίνηση του εδάφους και την μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα. Για ορισμένη απόσταση από την πηγή τα σεισμικά κύματα, που προσπίπτουν με ορική γωνία, συνεχίζουν να διαδίδονται κατά μήκος της σεισμικής ασυνέχειας με την ταχύτητα του δεύτερου μέσου. Σύμφωνα με την αρχή του Huygens και κάθε σημείο της σεισμικής ασυνέχειας δρα σαν δευτερογενής πηγή σεισμικών κυμάτων τα οποία διαδίδονται προς τα επάνω με την ταχύτητα του πρώτου στρώματος και θα εγκαταλείπουν την ασυνέχεια με γωνία ίση με την ορική.

Η καμπύλη που παριστάνει τον γεωμετρικό τόπο των σημείων στα οποία τα σεισμικά κύματα που δημιουργούνται από την σεισμική πηγή φθάνουν ταυτόχρονα με αυτά που εγκαταλείπουν την σεισμική ασυνέχεια ονομάζεται μέτωπο ίσου κυματος. Η καμπύλη αυτή συναντά την επιφάνεια σε ορισμένη απόσταση κκ από την σεισμική πηγή η οποία ονομάζεται κρίσιμη απόσταση. Στη μέθοδο της διάθλασης επιλέγουμε τους χρόνους "πρώτης άφιξης" από τα απ' ευθείας και τα μετωπικά κύματα.

Για την σεισμική τομογραφία απαραίτητη είναι η δημιουργία ενός αρχικού μοντέλου είτε με την μέθοδο των χρόνων καθυστέρησης είτε χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του βάθους, υψομέτρου, της σεισμικής ταχύτητας και του αριθμού των στρωμάτων, ενώ η χρησιμοποίηση του έγκειται σε περιπτώσεις βαθμιαίας μεταβολής της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, έντονου γεωλογικού αναγλύφου καθώς και σε περίπτωση όπου γνωρίζουμε την μεταβολή της πλευρικής ταχύτητας.

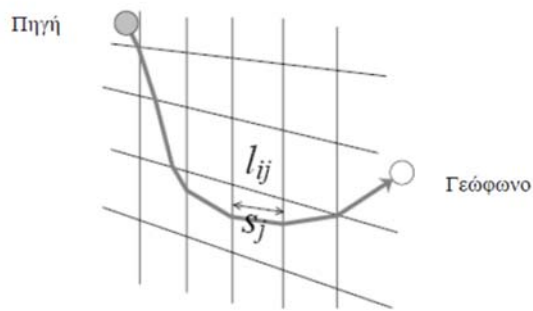
Επί του αρχικού μοντέλου ταχυτήτων επαναληπτικά σχεδιάζονται οι σεισμικές ακτίνες και υπολογίζεται ο χρόνος διαδρομής τους. Για την εύρεση της πορείας τους χρησιμοποιείται το ευθύ πρόβλημα ελάχιστου τρόπου διαδρομής ενώ θέτεται υπό επανάληψη το αντίστροφο πρόβλημα υπολογισμού των ταχυτήτων μέχρι την ελαχιστοποίηση της διαφοράς των παρατηρούμενων χρόνων διαδρομής και των υπολογισμένων.

Αναλυτικότερα:

- “Υπολογίζεται ο χρόνος διαδρομής της σεισμικής ακτίνας από την σχέση

$$t_i = \sum_{j=1}^N S_j / l_{ij} \quad (1.2)$$

όπου  $i$  και  $j$  είναι ο αριθμός των σεισμικών ακτίνων και των κελιών αντίστοιχα,  $S$  είναι η βραδύτητα ( $S=1/V$ ) και  $l$  είναι το μήκος της σεισμικής ακτίνας σε κάθε κελί (Σχήμα 1.3). Επιλέγεται η διαδρομή με τον ελάχιστο χρόνο (βέλτιστη διαδρομή).



**Σχήμα 1.3:** Απεικόνιση της διαδρομής της σεισμικής ακτίνας από την πηγή στο γεώφωνο

- υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ παρατηρούμενων και υπολογισθέντων χρόνων διαδρομής

$$\Delta T_k = T^o - T_k^c \quad (1.3)$$

(όπου k είναι ο αριθμός των επαναλήψεων.)

- Προσδιορίζονται οι διορθωμένες τιμές της βραδύτητας και το αρχικό μοντέλο τροποποιείται. Το γραμμικό σύστημα

$$L^T L \Delta S = L^T \Delta T \quad (1.4)$$

επιλύεται με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων.

- Υπολογίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS error) από τη σχέση:

$$E = LS - T \quad (1.5)$$

(Όταν η διαφορά είναι μεγαλύτερη του 1,5 msec, το μοντέλο που προκύπτει δεν είναι αποδεκτό.)

- Δημιουργείται το τελικό μοντέλο ταχυτήτων." (Παπαθανασίου Χριστίνα, Γεωφυσική Έρευνα με την μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας στον Μόχο Ηρακλείου, 2007, *Seislmager2D\_manual*)

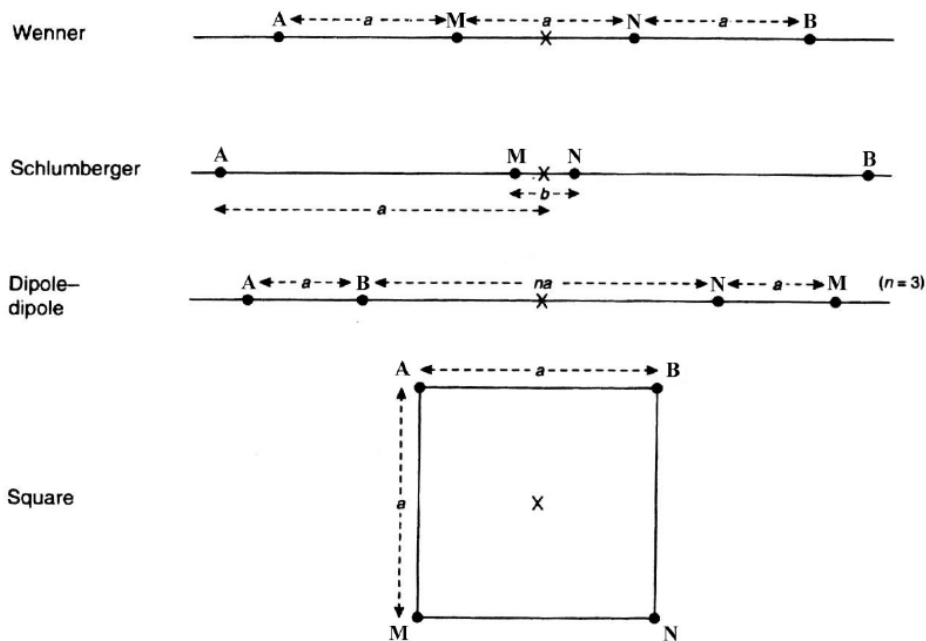
Ο αριθμός των επαναλήψεων είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με την αξιοπιστία του τελικού μοντέλου. Οι υπολογιζόμενοι χρόνοι διαδρομής απεικονίζονται σε δρομοχρονικό διάγραμμα και συγκρίνονται με τους πραγματικούς, ενώ τα αποτελέσματα αποθηκεύονται προς μελλοντική επεξεργασία.

## 1.4 Ηλεκτρική Τομογραφία

Ως τομογραφία θα μπορούσε να περιγραφεί ένα σύνολο βυθοσκοπήσεων που επεξεργάζονται ταυτοχρόνως, δημιουργώντας την εικόνα μιας τομής του εδάφους, το οποίο προκύπτει εκ της ενοποίησης δεδομένων σε σειρά καθώς και μετρήσεων σε ειδική διάταξη οι οποίες γίνονται κατά γραμμή σε συγκεκριμένο βάθος και όχι κατά γραμμή σε συγκεκριμένο σημείο, όπως είναι μία βυθοσκόπηση. (*Σημειώσεις του Μαθήματος Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II, Βαφείδης Αντώνιος*). Γενικότερα, διαμέσω του όρου της ειδικής ηλεκτρικής τομογραφίας περιγράφουμε έναν συγκεκριμένο τύπο μέτρησης της φαινόμενης ηλεκτρικής αντιστάσεως του εδάφους συνδυάζοντας δύο “παραδοσιακές” μορφές μέτρησης, την όδευση και την βυθοσκόπηση. Συγκεκριμένα, η ηλεκτρική τομογραφία μπορεί να θεωρηθεί είτε ως συνεχόμενες ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις επί μήκους της γραμμής έρευνας είτε ως σειρά οδεύσεων στην ίδια περιοχή μελέτης με κατά βήματα αυξανόμενη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Εκ της μεθόδου αυτής άγεται η πληροφορία τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφο συνιστώσα της μεταβολής της ειδικής ηλεκτρικής αντιστάσεως, οδηγώντας μας στην λεπτομερή και ακριβέστερη αξιολόγηση του υπεδάφους.

Η ηλεκτρική τομογραφία ως μέλος των ηλεκτρικών γεωφυσικών μεθόδων και όντας μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας συμβάλλει αποφασιστικά στην λεπτομερή απεικόνιση του εδάφους. Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στην μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντιστάσεως κατά την οριζόντια και κατακόρυφο, με αποτέλεσμα τον εντοπισμό ασυνεχειών. Η μέτρηση της φαινόμενης ειδικής αντιστάσεως πραγματοποιείται μετατοπίζοντας τα ηλεκτρόδια κατά μήκος της γραμμής μελέτης, ενώ εν συνεχεία πραγματοποιείται η επεξεργασία των τιμών αυτών με την χρήση ειδικού λογισμικού προς εύρεση της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντιστάσεως.

Στην ηλεκτρική τομογραφία το ρεύμα εισαγάγεται στο έδαφος χρησιμοποιώντας δύο ηλεκτρόδια ρεύματος, ενώ χρησιμοποιούνται άλλα δύο ηλεκτρόδια για μέτρηση της διαφοράς του δυναμικού. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολυποίκιλες διατάξεις, οι οποίες έχουν ως στόχο τη συγκέντρωση δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της πλευρικής και κατακόρυφης μεταβολής στις τιμές της εδαφικής αντιστάσεως. Η λήψη των δεδομένων, οι αποστάσεις και οι θέσεις των ηλεκτροδίων καθορίζονται με την επιλογή των διατάξεων (Schlumberger, Wenner, κλπ.).



**Σχήμα 1.4:** Διατάξεις Ηλεκτροδίων ( Raynolds, 1997)

Αναλυτικότερα :

- Διάταξη Schlumberger: Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού βρίσκονται συμμετρικά από το κέντρο της διάταξης απέχοντας αποστάσεις  $a$  και  $b$  αντίστοιχα. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από την σχέση:

$$\rho_a = \pi \frac{\Delta V}{I} \frac{a^2}{b}, \text{ αν } a \ll b \quad (1.6)$$

- Διάταξη Wenner: Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση  $a$  και η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από την σχέση:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} 2\pi a \quad (1.7)$$

- Διάταξη Dipole-Dipole: Τα ηλεκτρόδια ρεύματος απέχουν απόσταση  $a$ , όσο απέχουν και τα ηλεκτρόδια δυναμικού, ενώ τα δίπολα μεταξύ τους απέχουν απόσταση πολλαπλάσια της απόστασης  $a$  ( $na$ ). Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από την σχέση:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} a \pi n(n+1)(n+2) \quad (1.8)$$

- Διάταξη Pole-Pole: Ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχουν απόσταση  $a$ , ενώ τα άλλα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού απέχουν πολύ μεγάλη απόσταση από τα δύο κοντινά ηλεκτρόδια. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από την σχέση:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} 2\pi a \quad (1.9)$$

Το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται μέσα στα πετρώματα και ορυκτά με τρεις τρόπους: ηλεκτρονικά (ωμικά), ηλεκτρολυτικά και διηλεκτρικά. Στην πρώτη περίπτωση η ροή του ρεύματος στα υλικά περιέχει ελεύθερα ηλεκτρόνια (μέταλλα), στην δεύτερη το ρεύμα μεταφέρεται μέσω ιόντων με σχετικά χαμηλό ρυθμό, ενώ στην περίπτωση της διηλεκτρικής αγωγιμότητας λαμβάνει χώρα σε φτωχούς αγωγούς ή μονωτές όπου τα ατομικά ηλεκτρόνια κάτω από την επίδραση εξωτερικού πεδίου μετακινούνται σχετικά με τον πυρήνα.

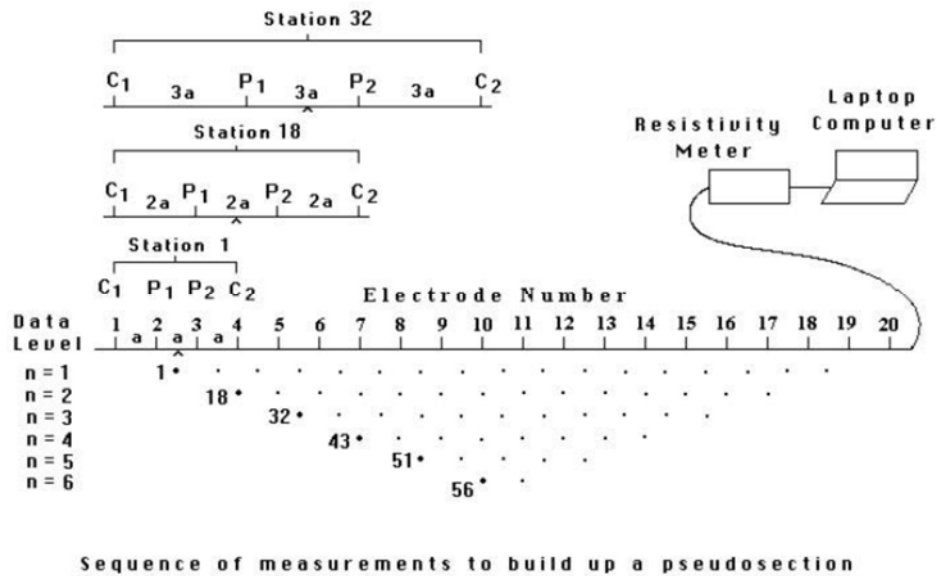
Τα περισσότερα πετρώματα είναι κακοί αγωγοί και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση τους θα ήταν πολύ υψηλή αν δεν είχαν πόρους με ρευστά, κυρίως νερό. Το αποτέλεσμα είναι ότι τα πετρώματα είναι ηλεκτρολυτικοί αγωγοί και η αγωγιμότητα είναι περισσότερο ηλεκτρολυτική παρά ωμική. Το ρεύμα διαδίδεται μέσω όντων (μορίων με περίσσεια ή έλλειψη ηλεκτρονίων). Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται από την ευκολία στην μετακίνηση, την συγκέντρωση και τον βαθμό κορεσμού σε νερό. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός μέσου με βάση τον εμπειρικό τύπο του Archie (1942) είναι:

$$\rho_e = \alpha \phi^{-m} s^{-n} \rho_w \quad (1.10)$$

όπου  $\phi$  : ποσοστό όγκου των πόρων (πορώδες),  $s$  : ποσοστό πόρων που περιέχουν νερό,  $\rho_w$  : ειδική αντίσταση του νερού,  $\alpha, m$  : σταθερές ( $0.5 \leq \alpha \leq 2.5$ ,  $1.3 \leq m \leq 2.5$ )

*“Η ηλεκτρική τομογραφία χρησιμοποιείται για την χαρτογράφηση περιοχών περίπλοκης γεωλογικής δομής όπου η συμβατική μέθοδος της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης είναι ανεπαρκής. Τέτοιες διασκοπήσεις πραγματοποιούνται τοποθετώντας πληθώρα ηλεκτροδίων (ανά τετράδες) κατά αύξουσα σειρά, ενώ μια κεντρική μονάδα υπολογιστή επιλέγει αυτόματα τα ενεργά ηλεκτρόδια που θα χρησιμοποιηθούν για κάθε μέτρηση, αναλόγως της διάταξης που έχει επιλεχθεί από την χρήση πριν από την έναρξη των μετρήσεων.*

*“Όλες οι τιμές χρησιμοποιούνται σε μία διαδικασία ερμηνείας, που τελικά δίνει μία δισδιάστατη γεωηλεκτρική τομή μεγάλης ακρίβειας, δηλαδή την γεωηλεκτρική τομογραφία. Η δισδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία απαιτεί την καταγραφή δεδομένων με πολλές διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων, κατά μήκος μιας γραμμής (Σχήμα 1.5). Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει μια αρκετά πυκνή πλευρική κάλυψη, από πλευράς λήψης δεδομένων, προκειμένου να καταστεί εφικτή την ανίχνευση πολύπλοκων δομών του υπεδάφους, γεγονός το οποίο επιβάλλει τη χρησιμοποίηση αυτοματοποιημένων πολυ-ηλεκτροδιακών συστημάτων λήψης δεδομένων.” (Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Αποστολόπουλος Γεώργιος)*



**Σχήμα 1.5:** Συλλογή γεωηλεκτρικών δεδομένων κατά μήκος μίας γραμμής μελέτης.

Μετάπειτα χρησιμοποιούμε την διαδικασία της αντιστροφής, της οποίας ο σκοπός είναι η εύρεση μοντέλου με τιμές όσο το δυνατόν παραπλήσιες των πραγματικών, στις φαινόμενες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, για την σωστή ερμηνεία και τον ορθό προσδιορισμό των επιθυμητών βάθων.

Στην αντιστροφή επιδιώκεται η εύρεση ενός προτύπου (μιας εξιδανικευμένης μαθηματικής αντιπροσώπευσης του εξεταζόμενου τμήματος γης) το οποίο να ανταποκρίνεται στις μετρούμενες αληθής τιμές. Εμπεριέχει ένα σύνολο παραμέτρων όπου υποδεικνύουν τις φυσικές ποσότητες που χρειάζεται να εξαχθούν εκ των παρατηρηθέντων στοιχείων, τα οποία γράφονται ως ένα διάνυσμα της μορφής:

$$y = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (1.11)$$

όπου  $m$  αριθμός μετρήσεων. Ομοίως, η πρότυπη απόκριση  $f$  μπορεί να γραφεί ως:

$$f = \text{col}(f_1, f_2, \dots, f_m) \quad (1.12)$$

Αναγάγωντας τα άνωθεν στο πρόβλημα της επίλυσης της ειδικής αντιστάσεως, χρησιμοποιούμε τον λογάριθμο των τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντιστάσεως για τα παρατηρηθέντα δεδομένα και την πρότυπη απόκριση, καθώς και τον λογάριθμο των προτύπων τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντιστάσεως των προτύπων παραμέτρων, αντιπροσωπούμενοι εκ του διανύσματος :

$$q = \text{col}(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (1.13)$$



όπου  $n$  ο αριθμός παραμέτρων, ενώ η διαφορά μεταξύ των παρατηρηθέντων στοιχείων και της πρότυπης απόκρισης δίνεται από την σχέση (Loke 2004):

$$g = y - f \quad (1.14)$$

“Στη μέθοδο βελτιστοποίησης ελαχίστων τετραγώνων, το αρχικό πρότυπο τροποποιείται έτσι ώστε το άθροισμα των τετραγώνων της διαφοράς μεταξύ της πρότυπης απόκρισης και των δεδομένων να ελαχιστοποιείται (Loke 2004):

$$E = g^T g = (x + a)^n \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad (1.15)$$

Για να μειωθεί το  $E$ , η ακόλουθη εξίσωση Gauss-Newton χρησιμοποιείται στον καθορισμό των πρότυπων παραμέτρων οι οποίες πρέπει να μειώσουν το άθροισμα των τετραγώνων του σφάλματος” (Lines και Treitel 1984):

$$J^T J \Delta q_i = J^T g \quad (1.16)$$

όπου  $\Delta q$  είναι το  $i$ -οστό πρότυπο διάνυσμα αλλαγής παραμέτρου, και το  $J$  είναι ο Ιακωβιανός πίνακας (από  $m$  ως  $n$ ) από τις μερικές παραγώγους. Τα στοιχεία του Ιακωβιανού πίνακα δίνονται από “(Loke 2004):

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \quad (1.17)$$

αυτή είναι η αλλαγή στην  $i$ -οστή πρότυπη απόκριση λόγω μιας αλλαγής στην πρότυπη παράμετρο  $j$ . Αφού υπολογιστεί το διάνυσμα αλλαγής παραμέτρου, ένα νέο πρότυπο λαμβάνεται από τη σχέση (Loke 2004):

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (1.18)$$

Ωστόσο, στην γεωφυσική αντιστροφή σπανίως χρησιμοποιείται μόνον η απλή εξίσωση ελαχίστων τετραγώνων. Σε μερικές περιπτώσεις ο πίνακας  $J^T J$  μπορεί να είναι μοναδιαίος, επομένως η εξίσωση δεν έχει μια λύση για το  $\Delta q$ , ενώ σε άλλες τείνει να είναι σχεδόν μοναδιαίος, εάν χρησιμοποιείται φτωχό αρχικό πρότυπο πολύ διαφορετικό εκ του βέλτιστου. Το υπολογισμένο διάνυσμα από την σχέση (1.10) μπορεί να έχει πάρα πολύ μεγάλες παραμέτρους έτσι ώστε το νέο πρότυπο που

υπολογίζεται από την (1.12) να μην έχει ρεαλιστικές τιμές. Μια κοινή μέθοδος για να αποφευχθεί το πρόβλημα αυτό είναι η τροποποίηση Marquardt-Levenberg (Lines και Treitel 1984) στην εξίσωση Gauss-Newton που δίνεται από:

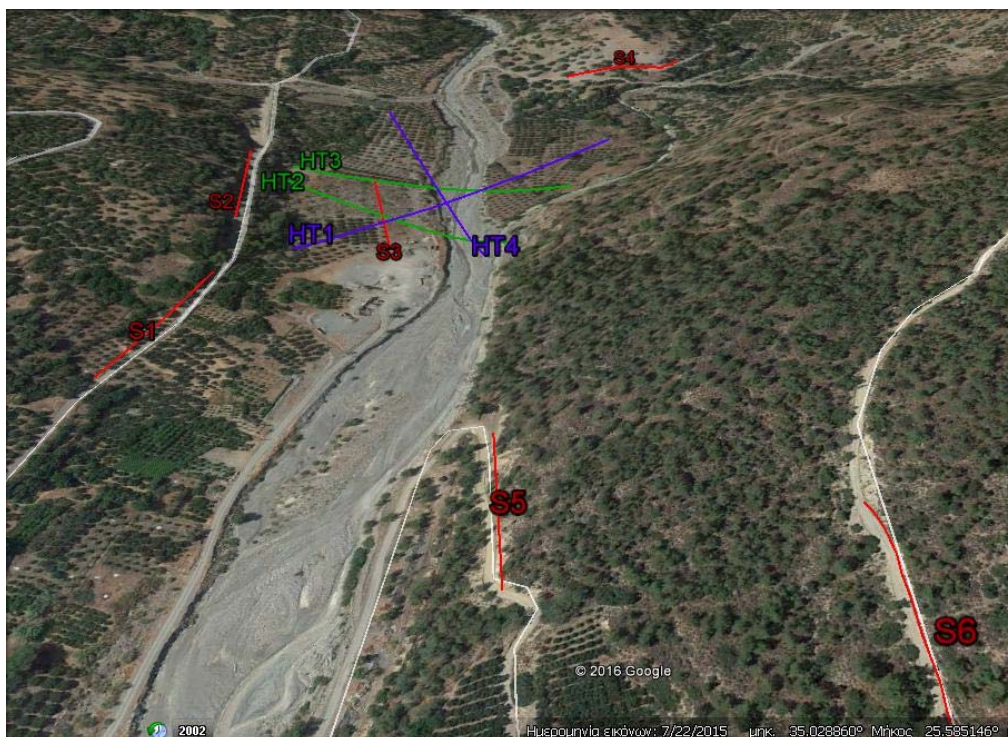
$$(J^T J + \lambda I) \Delta q_i = J^T g \quad (1.19)$$

όπου το  $I$  είναι ο μοναδιαίος πίνακας. Ο παράγοντας  $\lambda$  είναι γνωστός ως παράγοντας Marquardt ή απόσβεσης, και αυτή η μέθοδος είναι επίσης γνωστή ως μέθοδος οπισθοπροβολής (Inman 1975)" (Ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και εφαρμογή σε χώρο απόθεσης απορριμμάτων στη Β. Ιταλία και στη βιομηχανική περιοχή Porto Petroli, Genoa, Κρητικάκης Σ. Γ.1 , Βαφείδης, Gourry J)

## 2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 2.1 Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται δυτικά της Ιεράπετρας και βόρεια του παραθαλάσσιου οικισμού του Μύρτου. Η γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε εντός και πέριξ του ποταμού με σκοπό να συμβάλλει στον γεωτεχνικό χαρακτηρισμό των σχηματισμών που εμφανίζονται στην περιοχή (Σχήμα 2.1) προκειμένου να κατασκευαστεί φράγμα. Το ανάγλυφο της περιοχής είναι έντονο, ενώ το υψόμετρο στην περιοχή μελέτης φτάνει μέχρι και τα 200 περίπου μέτρα.

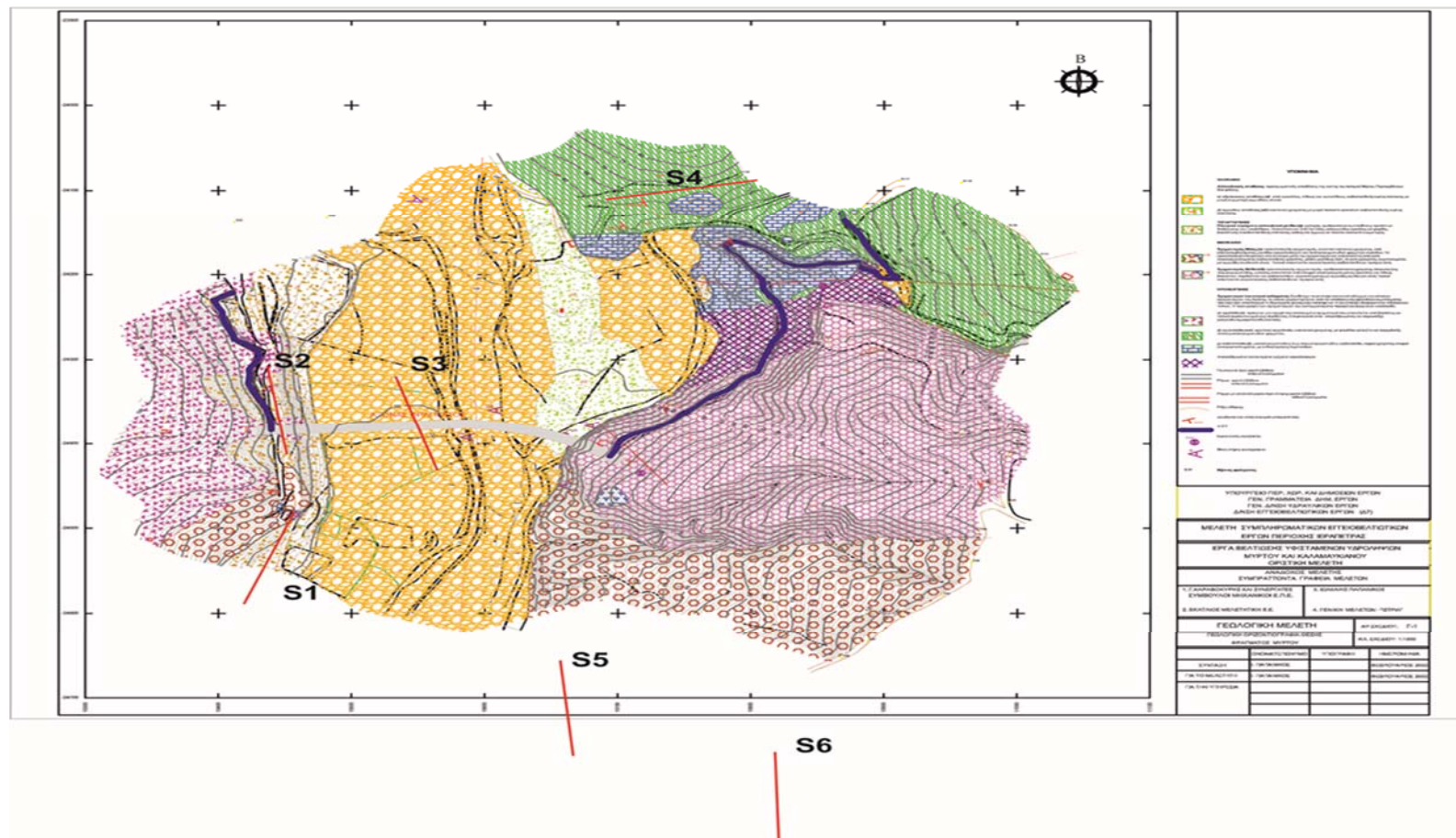


**Σχήμα 2.1 :** Δορυφορική φωτογραφία της περιοχής μελέτης στην οποία εμφανίζονται οι σεισμικές γραμμές με κόκκινο χρώμα και οι ηλεκτρικές με μπλε.

### 2.2 Γεωλογικά δεδομένα

Η περιοχή μελέτης αποτελείται από γεωλογικούς σχηματισμούς οι οποίοι είναι (Σχήμα 2.2):

- α) Αλλουβιακές αποθέσεις (a1, a2).
- β) Πλευρικά κορήματα- αλλουβιακά ριπίδια (cl).
- γ) Κροκαλοπαγή του Μειοκαίνου (c, c2).
- δ) Οφιόλιθοι (o), σχιστόλιθοι (sch) και ασβεστόλιθοι (k).



**Σχήμα 2.2:** Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης στην οποία εμφανίζονται οι σεισμικές γραμμές με κόκκινο χρώμα (Καραβοκύρης & συνεργάτες, Εκατ. Μελετητική Ε.Ε., Παπανίκιος Ι., ΜΕΓΡΑΛ)



**Αλλουβιακές αποθέσεις:** προσχωματικές αποθέσεις της κοίτης του ποταμού Μύρτου. Περιλαμβάνουν δύο φάσεις:



α) **αδρόκοκκες αποθέσεις (al)**: από κροκάλες, λίθους και σγκολίθους, ασβεστολιθικής κυρίως σύστασης, με μικρή συμμετοχή αμμώδους υλικού.



β) **αμμώδεις αποθέσεις (al2)**: καστανού χρώματος με μικρό ποσοστό κροκαλών ασβεστολιθικής κυρίως σύστασης.

#### ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ



**Πλευρικά κορήματα-αλλουβιακά ρηθία (c):** χαλαρές, ερυθροκάστανες αποθέσεις προϊόντων διάβρωσης του υποβάθρου. Αποτελούνται από λατύπες, υπογωνιώδεις κροκάλες και ψηφίδες, βασαλτικής ή ασβεστολιθικής σύστασης, καθώς και άμμους σε πακίλο ποσοστό συμμετοχής.

#### ΜΕΙΟΚΑΙΝΟ



**Σχηματισμός Μάλες (c):** κροκαλοπαγής σχηματισμός, ανακτού καστανού χρώματος, από επαναλαμβανόμενες μονάδες κροκαλοπαγών και λεπτοστρωματιδών ψαμμιτών-ιλυολίθων. Τα κροκαλοπαγή επικρατούν στα ανώτερα μέλη του σχηματισμού και αποτελούνται από καλά αποστρωγγυλωμένες ασβεστολιθικές κροκάλες, μέσου μεγέθους 2cm, λευκού χρώματος, συγκολλημένες με αμμώδες συνδετικό υλικό. Τοπικά απαντώνται συγκεντρώσεις ασβεστολιθικών τεμαχίων (c-k).



**Σχηματισμός Μύθοι (c2):** κροκαλοπαγής σχηματισμός, ερυθροκάστανου χρώματος, όστρωτος έως παχυστρωματώδης, ο οποίος αποτελείται από ελαφρά αποστρωγγυλωμένες κροκάλες και λίθους βασαλτών, περιδοσιτών και ασβεστολίθων, συγκολλημένες με αμμώδες συνδετικό υλικό. Τοπικά απαντώνται συγκεντρώσεις ασβεστολιθικών τεμαχίων (c-k).

#### ΠΡΟΝΕΟΓΕΝΕΣ

**Σχηματισμοί τεκτονικού καλύμματος:** Συνθέτουν το ανώτερο τεκτονικό κάλυμμα των ολικών σχηματισμών της Κρήτης, το οποίο χαρακτηρίζεται από την αλίσθηση ενός οφιολίθου συμπλέγματος που είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία φυλσικού *melange* και τη συνύπαρξη διαφορετικών λιθολογικών τύπων. Η περιγραφή των σχηματισμών του καλύμματος στην περιοχή του έργου είναι η ακόλουθη:



α) **οφιάλιθαι (o)**: πρόκειται για ισχυρά λατυποποιημένο σχηματισμό που αποτελείται από βασάλτες και τοπικά σερπεντινωμένους περδοσίτες. Επιφανειακά είναι αποσασθρωμένοι και παρουσιάζει χαλικώδη-αμμοχαλικώδη σύσταση.



β) **σχιστόλιθαι (sch)**: οργιτικοί σχιστόλιθοι, καστανού χρώματος, με φλεβίδια χαλαζίτη και πορεμβολές λεπτο-μεσοστρωματιδών ψαμμιτών.



γ) **ασβεστόλιθαι (k)**: μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθοι, τεφρού χρώματος, ελαφρά ανακρυσταλλωμένοι, με ενδιαστρώσεις πυριτολίθων.

**Σχήμα 2.3α:** Υπόμνημα του Γεωλογικού χάρτη της περιοχής μελέτης.

## ΥΠΟΜΝΗΜΑ

### ΟΛΟΚΑΙΝΟ

**Αλλουβιακές αποθέσεις:** προσχωματικές αποθέσεις της κοίτης του ποταμού Μύρτου. Περιλαμβάνουν δύο φάσεις:



α) **αδρόκοκκες αποθέσεις (al1)**: από κροκάλες, λίθους και σγκολίθους, ασβεστολιθικής κυρίως σύστασης, με μικρή συμμετοχή αμμώδους υλικού.



β) **αμμώδεις αποθέσεις (al2)**: καστανού χρώματος με μικρό ποσοστό κροκαλών ασβεστολιθικής κυρίως σύστασης.

### ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ



**Πλευρικά κορήματα-αλλουβιακά ρηθία (t):** χαλαρές, ερυθροκάστανες αποθέσεις προϊόντων διάβρωσης του υποβάθρου. Αποτελούνται από λατύπες, υπογωνιώδεις κροκάλες και ψηφίδες, βασालτικής ή ασβεστολιθικής σύστασης, καθώς και άμμους σε ποικίλο ποσοστό συμμετοχής.

### ΜΕΙΟΚΑΙΝΟ



**Σχηματισμός Μάλες (c):** κροκαλοπαγής σχηματισμός, ανοικτού καστανού χρώματος, από επαναλαμβανόμενες μονάδες κροκαλοπαγών και λεπτοστρωματιδών ψαμμιτών-ιλυολίθων. Τα κροκαλοπαγή επικρατούν στα ανώτερα μέλη του σχηματισμού και αποτελούνται από καλά αποστρωγγυλωμένες ασβεστολιθικές κροκάλες, μέσου μεγέθους 2cm, λευκού χρώματος, συγκολλημένες με αμμώδες συνδετικό υλικό. Τοπικά απαντώνται συγκεντρώσεις ασβεστολιθικών τεμαχίων (c-k).



**Σχηματισμός Μύθοι (c2):** κροκαλοπαγής σχηματισμός, ερυθροκάστανου χρώματος, άστρωτος έως παχυστρωματιδής, ο οποίος αποτελείται από ελαφρά αποστρωγγυλωμένες κροκάλες και λίθους βασάλτων, περιδοπιών και ασβεστολίθων, συγκολλημένες με αμμώδες συνδετικό υλικό. Τοπικά απαντώνται συγκεντρώσεις ασβεστολιθικών τεμαχίων (c-k).

### ΠΡΟΝΕΟΓΕΝΕΣ



**Σχηματισμοί τεκτονικού καλύμματος:** Συνθέτουν το ανώτερο τεκτονικό κάλυμμα των αλπικών σχηματισμών της Κρήτης, το οποίο χαρακτηρίζεται από την ολίσθηση ενός οφιολιθικού συμπλέγματος που είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία φλυσικού *melange* και τη συνύπαρξη διαφορετικών λιθολογικών τύπων. Η περιγραφή των σχηματισμών του καλύμματος στην περιοχή του έργου είναι η ακόλουθη:

α) **οφιόλιθοι (o):** πρόκειται για ισχυρά λατυποποιημένο σχηματισμό που αποτελείται από βασάλτες και τοπικά σερπεντινιζμένους περικοίτες. Επιφανειακά είναι αποσθρωμένοι και παρουσιάζει χαλικώδη-αμμοχαλικώδη σύσταση.



β) **σχιστόλιθοι (sch):** οργυλικοί σχιστόλιθοι, καστανού χρώματος, με φλεβίδια χαλαζήτη και παρεμβολές λεπτο-μεσοστρωματιδών ψαμμιτών.



γ) **ασβεστόλιθοι (k):** μεσοστρωματιδείς έως παχυστρωματιδείς ασβεστόλιθοι, τεφρού χρώματος, ελαφρά ανακρυσταλλωμένοι, με ενδιστρώσεις πυριτολίθων.

Γεωλογικό όριο ορατό ή βέβαιον  
πιθανό ή καλυμμένο

Ρήγμα ορατό ή βέβαιον  
πιθανό ή καλυμμένο

Ρήγμα με κανονικό χαρακτήρα κίνησης πιθανό ή καλυμμένο

Επίπτωση πιθανή ή καλυμμένη

Ρήξη εδάφους

Φαινόμενη κλίση στρωμάτων/σχιστότητας

Α.Σ.Υ. (Ανώτατη στάθμη λίμνης)

Ερευνητική γεώτρηση

Στάθμη νερού

**Σχήμα 2.36:** Υπόμνημα του Γεωλογικού χάρτη της περιοχής μελέτης.

### 3. ΣΥΛΛΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

#### 3.1 Σεισμική Τομογραφία

##### 3.1.1 Εξοπλισμός σεισμικής τομογραφίας

Για την επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε:

- ο φορητός 12-κάναλος σειсмоγράφος GEODE (πίνακας 2) της Geometrics.
- 12 γεώφωνα κατακόρυφης συνιστώσας ιδιοσυχνότητας 4.5 Hz. Τα γεώφωνα είναι όργανα εκ των οποίων γίνεται αισθητή η εδαφική κίνηση αποτελούμενα από πηνίο σταθερά συνδεδεμένο και μαγνήτη εν κινήσει. Τα σεισμικά κύματα που φτάνουν στο πηνίο το αναγκάζουν σε ταλάντωση ίδια με αυτή του εδάφους ενώ ο μαγνήτης πραγματοποιεί ταλάντωση έτερη εκ του πηνίου λόγω αδράνειας. Λόγω της διαφορετικής κίνησης μαγνήτη – πηνίου δημιουργείται στο πηνίο μία μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή, η οποία προκαλεί διαφορά δυναμικού στα άκρα του πηνίου.
- Μία βαριοπούλα 5kg για δημιουργία σεισμικών δονήσεων , μία σιδερένια πλάκα διαμέτρου 20x20 εκατοστών πάνω στην οποία κρούει η βαριοπούλα και ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο προσαρτημένο στο στέλεχος της βαριοπούλας για την ενεργοποίηση της καταγραφής του σειсмоγράφου.
- Φορητός υπολογιστής που λειτουργεί ως καταγραφικό για τον έλεγχο και την αποθήκευση των μετρήσεων.

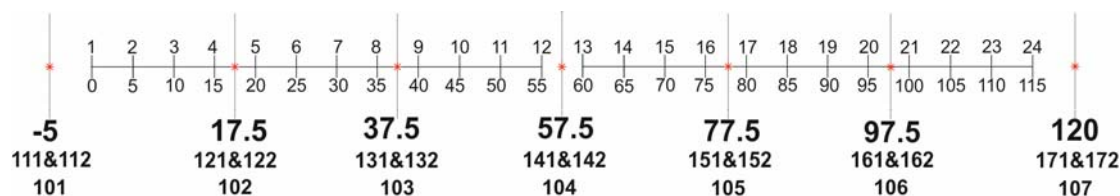
Αριθμός ενεργών καναλιών	: 12
Εύρος μετατροπέα Αναλογικού σε Ψηφιακό σήμα (A/D)	: 24 bit χρησιμοποιώντας ως μετατροπέα κρυσταλλικό ημιαγωγό τύπου sigma-delta
Δυναμικό εύρος	: 144 dB
Φασματικό εύρος	: Από 1.75 Hz έως 20 kHz
Προενίσχυση σήματος	: Εργοστασιακή ρύθμιση στα 24 και 36 dB με δυνατότητα επιλογής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

**Πίνακας 2:** Χαρακτηριστικά του σειсмоγράφου “Geode Ultra-light seismograph” της εταιρίας Geometrics (geometrics.com)



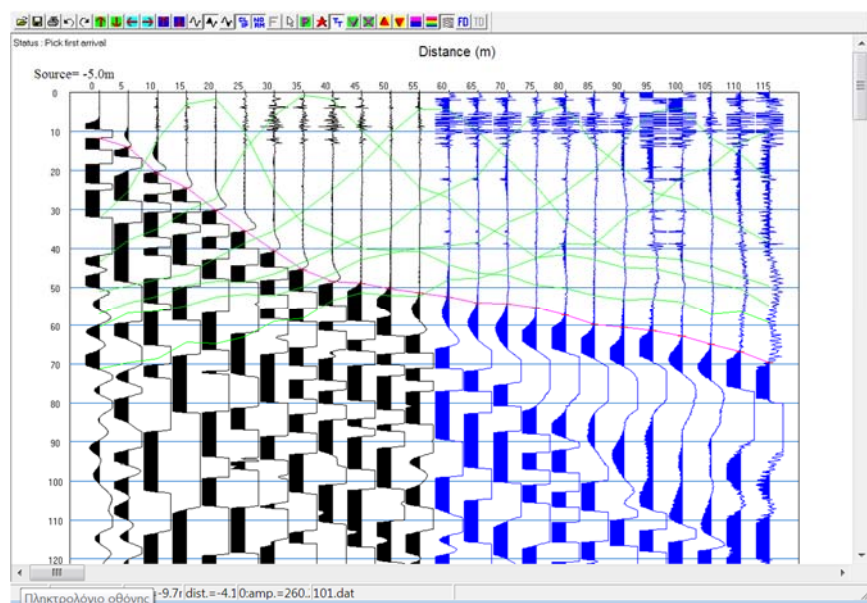
### 3.1.2 Διαδικασία εκτέλεσης της μεθόδου σεισμικής τομογραφίας

Η διάρκεια της καταγραφής και το διάστημα δειγματοληψίας ορίστηκαν στο 1sec και στα 0.125 ms αντίστοιχα. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 6 σεισμικές γραμμές μελέτης μήκους 115m έκαστη, ενώ κάθε σεισμική γραμμή αποτελούνταν από δύο αναπτύγματα των 55m.



**Σχήμα 3.1:** Γεωμετρία ενός αναπτύγματος της σεισμικής γραμμής μελέτης S1, όπου απεικονίζονται οι θέσεις των σεισμικών πηγών με αστερίσκο σε σχέση με τα γεώφωνα. Τα γεώφωνα συμβολίζονται με αριθμούς 1-24. Η αριθμηση στο κάτω μέρος της γραμμής μελέτης αναφέρεται στα ονόματα των αρχείων, όπως αυτά έχουν καταγραφεί. Επίσης, στο κάτω μέρος της γραμμής μελέτης αναγράφεται η θέση της σεισμικής πηγής. Για παράδειγμα, 102 σημαίνει όνομα αρχείου 102.dat, σεισμική πηγή στην θέση 17.5 μέτρα.

Αρχικά ο σειсмоγράφος ήταν συνδεδεμένος με τα γεώφωνα 1 έως 12. Κρούοντας την μεταλλική πλάκα με την βαριοπούλα η λειτουργία καταγραφής του σειсмоγράφου στο πρώτο ανάπτυγμα (καταγραφή 101) των επτά πρώτων θέσεων της σεισμικής πηγής (Σχ. 3.1). Εν συνεχεία ο σειсмоγράφος συνδέθηκε με τα γεώφωνα από 13 έως 24 και επαναλαμβάνοντας την διαδικασία λήφθηκαν καταγραφές στο δεύτερο ανάπτυγμα με την πηγή να τοποθετείται στις ίδιες θέσεις με το πρώτο ανάπτυγμα. Οι καταγραφές που αντιστοιχούσαν στις ίδιες θέσεις ενώθηκαν προκειμένου να επεξεργαστούν με την μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας.



**Σχήμα 3.2:** Καταγραφή 101 σεισμικής γραμμής S1, θέση σεισμικής πηγής στα -5

## 3.2 Ηλεκτρική τομογραφία

### 3.2.1 Εξοπλισμός ηλεκτρικής τομογραφίας

Κατά την τέλεση της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκαν:

- Το όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντιστάσης Sting™ R1 της AGI (Πίνακας 3), με ένταση ρεύματος από 0,1 έως 200mA και ικανότητα μέτρησης τάσης μεγέθους 0,05 Volt.
- Ανοξείδωτοι ράβδοι χάλυβα που δρουν ως ηλεκτρόδια ρεύματος.
- Πυξίδα για το προσανατολισμό της γραμμής μελέτης.
- Καρούλια καλωδίων μήκους 500 μέτρων για την ανάπτυξη της γραμμής AB και καλώδια για την σύνδεση των ηλεκτροδίων δυναμικού.
- Σημαίες προς σήμανση της γραμμής ανάπτυξης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού.
- Αλατούχο ύδωρ για την βελτίωση επαφής του συστήματος "ηλεκτρόδιο - γη".

MiniSting™ Technical Specification

MiniSting™ R1 IP, MEMORY EARTH RESISTIVITY & IP METER	
Item	Description
Measurement modes	Apparent resistivity, resistance, voltage (SP), induced polarization (IP), battery voltage
Measurement range	400 kΩ to 0.1 mΩ (resistance), 0-500 V full scale voltage auto-ranging.
Measuring resolution	Max 30 mV, depends on voltage level
Screen resolution	4 digits in engineering notation
Output current	1-2-5-10-20-50-100-200-500 mA.
Output voltage	The user can switch between high and low voltage limit for the transmitter (800 Vp-p or 320 Vp-p voltage limit). Actual electrode voltage depends on transmitted current and ground resistivity.
Input gain ranging	Automatic, always uses full dynamic range of receiver.
Input impedance	>20 MΩ
Input voltage	Max 500 V
SP compensation	Automatic cancellation of SP voltages during resistivity measurement. Constant and linearly varying SP cancels completely.
Type of IP measurement	Time domain chargeability (M), six time slots measured and stored in memory
IP current transmission	ON+, OFF, ON-, OFF
IP time cycles	1 s, 2 s, 4 s and 8 s
Measure cycles	Running average of measurement displayed after each cycle. Automatic cycle stop when reading errors fall below user set limit or user set max cycles are done.
Cycle time	Basic measure time is 1.2, 3.6, 7.2 or 14.4 s as selected by user via keyboard. auto ranging and commutation adds about 1.4 s.
Signal processing	Continuous averaging after each complete cycle. Noise errors calculated and displayed as percentage of reading. Reading displayed as resistance (ΔV/I) and apparent resistivity (Ωm). Resistivity is calculated using user entered electrode array coordinates.
Noise suppression	Better than 100 dB at f=20 Hz Better than 120 dB at power line frequencies (16 2/3, 20, 50 and 60 Hz).
Total accuracy	Better than 1% of reading in most cases (lab measurements). Field measurement accuracy depends on ground noise and resistivity. Instrument will calculate and display running estimate of measuring accuracy.
System calibration	Calibration is done digitally by the microprocessor based on correction values stored in memory.
Supported configurations	Resistance, Schlumberger, Wenner, dipole-dipole, pole-dipole, pole-pole, azimuthal, mise-a-la-masse, SP (absolute) and SP (gradient).
Data storage	Full resolution reading average and error are stored along with user entered coordinates and time of day for each measurement. Storage is effected automatically.
Memory capacity	More than 3000 measuring points can be stored in internal memory.
Data transmission	RS-232C channel included to dump data from instrument to PC on user command.
User controls	20 key tactile, weather proof keyboard with numeric entry keys and function keys. On/off switch. Measure button, integrated within main keyboard. LCD night light switch (push to light).
Display	Alphanumeric LCD display (4 lines x 20 characters) with night light.
Connectors	4 banana plug, pole screws for current and potential electrodes. 3-pole KPT connector for external power, 10-pole KPT connector for RS-232C and synchronization connections.
Power supply	12V, 4.5 Ah NiMH built-in rechargeable battery. External power connector on front panel, the instrument automatically selects external battery if present.
Operating time	Depends on conditions, internal circuitry in auto mode adjusts current to save energy. At 20 mA output current and 10 kΩ electrode resistance more than 2000 cycles are available from a fully charged battery pack.
Battery charger	Dual stage charger with switchable input (115/230 V AC @ 50/60 cycles)
Weight	6.6 kg (14.5 lb.)
Dimensions	Width 255 mm (10"), length 255 mm (10") and height 123 mm (5").

**Πίνακας 3:** Χαρακτηριστικά του μετρητή ειδικών αντιστάσεων Sting™ R1 της AGI (agiusa.com).

### 3.2.2 Διαδικασία εκτέλεσης της μεθόδου ηλεκτρικής τομογραφίας

Κατά την εκτέλεση της τομογραφίας, όπου χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός της διάταξης Wenner και Schlumberger, εκτελέσθηκε η εξής διαδικασία:

- Τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρόδια κατά μήκος της γραμμής μελέτης, σε ισαπέχουσα απόσταση  $a$  και ταυτόχρονα σημάνθηκαν.
- Τα ηλεκτρόδια δυναμικού και ρεύματος τοποθετήθηκαν σε αποστάσεις  $MN/2$  και  $AB/2$  αντιστοίχως εξ επιλεγμένου κέντρου. Έγινε σύνδεση των ηλεκτροδίων  $A$  και  $B$  με τη πηγή, διοχετεύθη ρεύμα και λήφθηκε μέτρηση εκ του συνενδεδεμένου μετρητή Sting™.
- Το κέντρο μετατοπίσθη κατά απόσταση  $a$  και επαναλήφθησαν τα ανωτέρω βήματα καθ' όλη την γραμμή μελέτης.
- Οι αποστάσεις των ημιαναπτυγμάτων  $AB/2$  και οι μετρούμενες τιμές ένταση ρεύματος και διαφοράς δυναμικού σημειώθηκαν σε ειδικό έντυπο προς μελλοντική επεξεργασία.



**Εικόνα 1:** Τυπική σύνδεση της μεθόδου ηλεκτρικής τομογραφίας

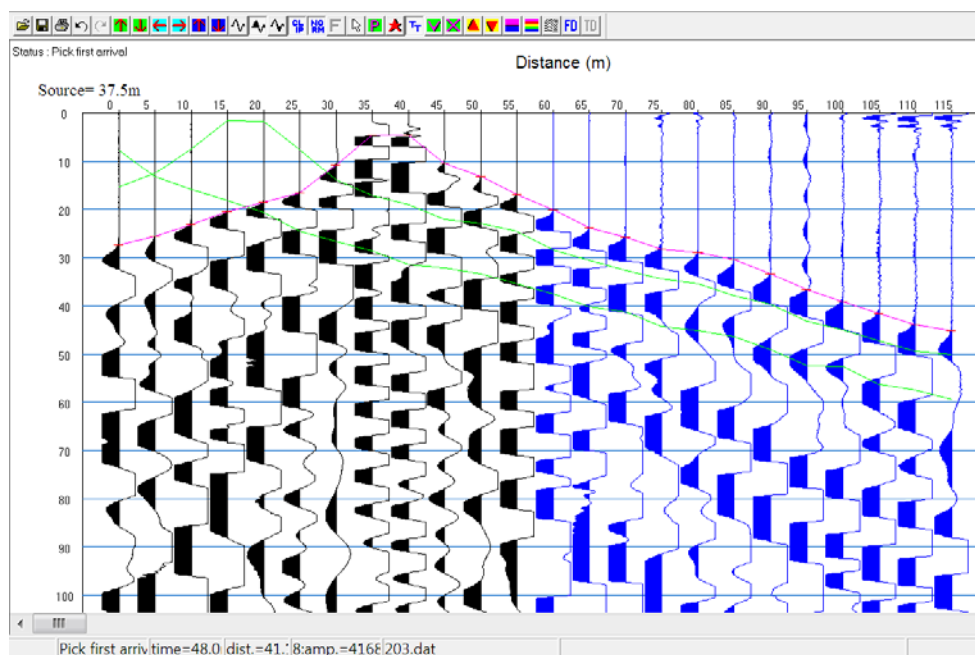
## 4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΦΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

### 4.1 PICKWIN95 SeisImager/2D

Για την επιλογή των πρώτων αφίξεων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα PICKWIN95 της σουίτας εφαρμογών SeisImager/2D™. Ο κύριος σκοπός της εν λόγω εφαρμογής είναι η βοήθεια στον εντοπισμό των πρώτων αφίξεων, ώστε να επιλεγούν και να εισαχθούν στο συμπληρωματικό πρόγραμμα ανάλυσης Plotrefa για περαιτέρω επεξεργασία. (SeisImager2D\_Manual).

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:

- Εισάχθηκαν στο PICKWIN95 τα πρωτογενή SEG-2 αρχεία που παράχθηκαν κατά την διάρκεια της συγκέντρωσης των δεδομένων στην περιοχή μελέτης.
- Το πρόγραμμα αυτόματα επέλεξε πρώτες αφίξεις, όπου υποδεικνύουν την χρονική στιγμή όπου το έδαφος αρχίζει την ταλάντωση του εκάστοτε γεωφώνου.
- Οι προτεινόμενες πρώτες αφίξεις ελεγχθήκαν και χειροκίνητα επανεπιλεχθήκαν στο πλέον ακριβές χρονικό τους σημείο, όπως αποτυπώνεται στην ροζ γραμμή στο σχήμα 2.3 (οι πράσινες γραμμές απεικονίζουν συγκριτικά τις πρώτες αφίξεις των υπόλοιπων θέσεων της επιλεχθείσας σεισμικής πηγής).
- Το αρχείο σώζεται και τα ανωτέρω βήματα επαναλαμβάνονται για κάθε πηγή (Παράρτημα Α)



**Σχήμα 4:** Καταγραφή 203, θέση σεισμικής πηγής στα 37.5 m.

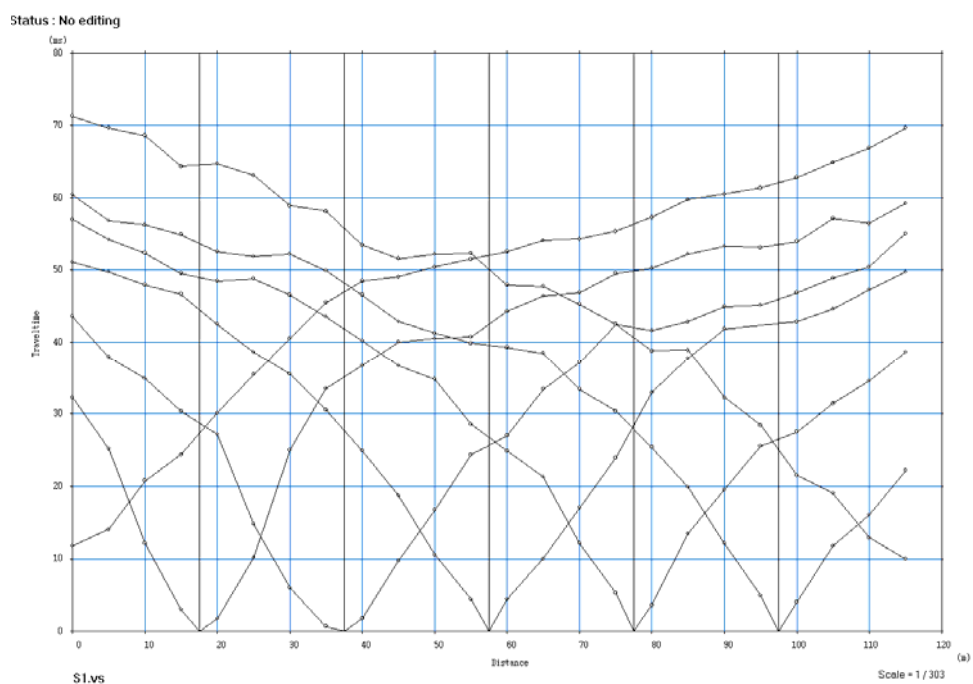
## 4.2 PLOTREFA

Το PLOTREFA είναι η μονάδα ερμηνείας του SeisImager/2D™. Λαμβάνει ως αρχείο εισόδου τα αρχεία από την προαναφερθείσα σειρά βημάτων στο PICKWIN95 παρέχει τη δυνατότητα κοινής επεξεργασίας περισσότερων του ενός αναπτύγματος γεωφώνων, τα οποία απαρτίζουν μια κοινή γραμμή μελέτης.

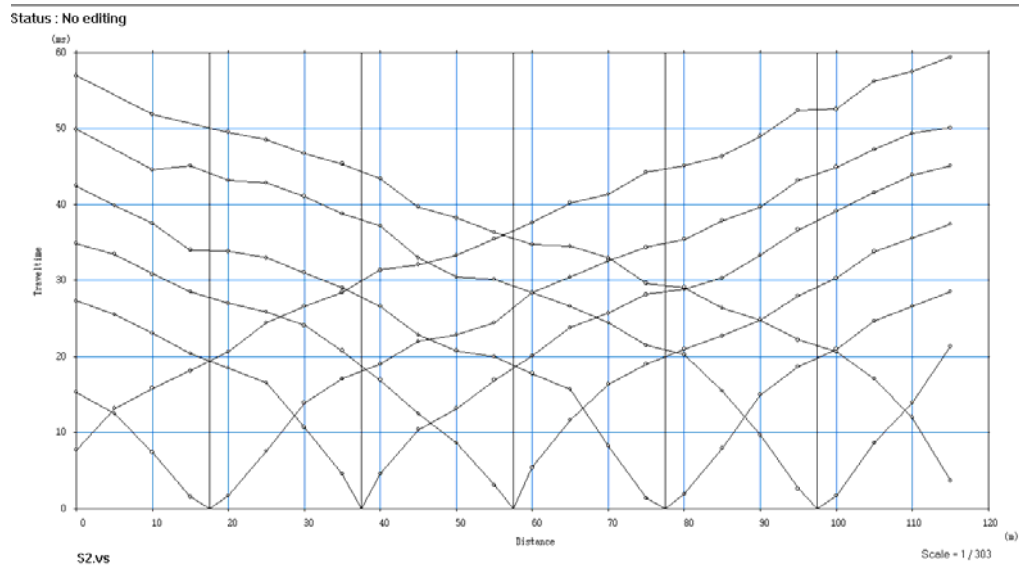
Από τις επιλογές των πρώτων αφίξεων σε συνάρτηση με την απόσταση του εκάστοτε γεωφώνου με την πηγή κατασκευάζουμε τα δρομοχρονικά διαγράμματα για κάθε μία από τις έξι σεισμικές γραμμές, στο οποίο πραγματοποιείται ο προσδιορισμός της σεισμικής τομής. Αναλυτικότερα, τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:

- Αρχικά τα δρομοχρονικά διαγράμματα εισάγονται στο λογισμικό Plotrefta.
- Απεικονίζονται δρομοχρονικά διαγράμματα κάθε σεισμικής γραμμής. Εντοπίζεται και ορίζεται ο αριθμός των στρωμάτων με βάση τις απεικονίσεις και τις κλίσεις αυτών, αντιστοιχούνται οι πρώτες αφίξεις σε μετωπικά ή απευθείας κύματα και γίνονται οι όποιες αναγκαίες διορθώσεις (σχήματα 4.1 έως 4.6).
- Εν συνεχεία ορίζονται οι κάτωθι παραμέτροι σε συνδυασμό με την εισαγωγή του αρχείου elevation για ένα αρχικό οριζοντίως στρωματωμένο μέσο το οποίο χρησιμοποιείτε ως αρχικό μοντέλο:
  - i. Μέγιστο βάθος (30m).
  - ii. Ελάχιστη και μέγιστη ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων (300 m/s και 5000 m/s αντίστοιχα).
  - iii. Αριθμός στρωμάτων (15).
  - iv. Υψόμετρα στο αριστερό και δεξιό άκρο του μοντέλου.
- Τα δύο αρχεία ενοποιούνται, και δίνοντας την εντολή για αντιστροφή της γραμμής μελέτης με 10 επαναλήψεις προέκυψαν τα τελικά μοντέλα βάθους καθώς και οι πορείες των σεισμικών κυμάτων για της πηγές στα γεώφωνα (σχήματα 4.7 έως 4.18, οι τεθλασμένες γραμμές αντιστοιχούν στις σεισμικές ακτίνες).

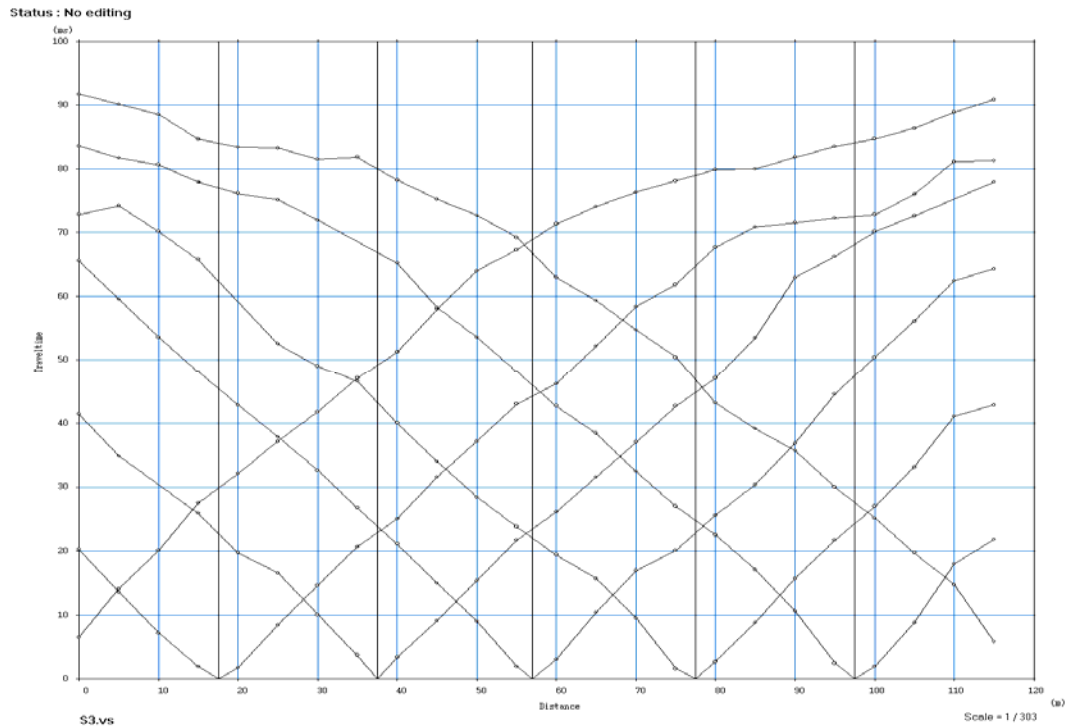




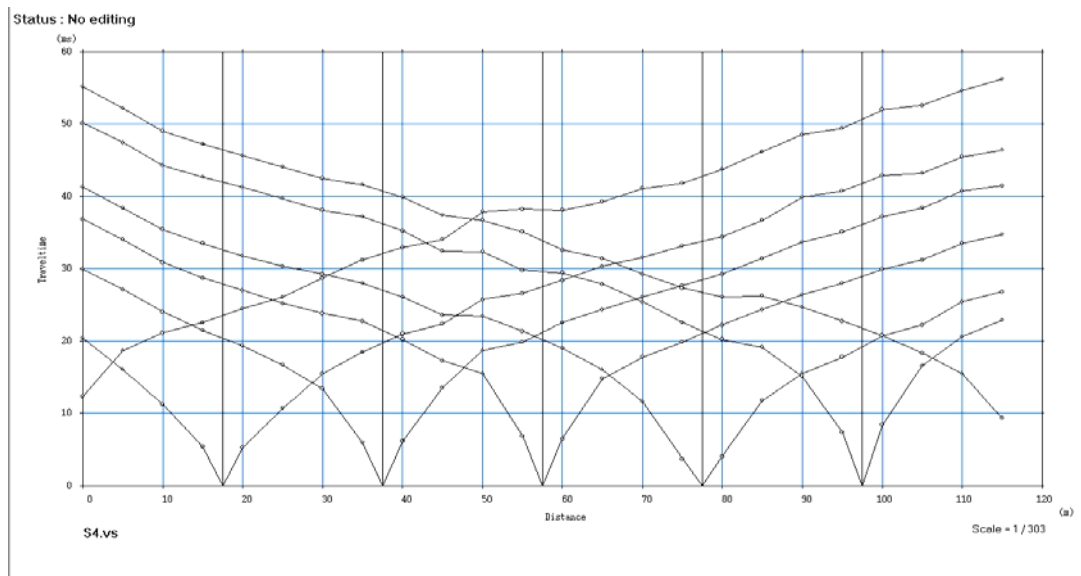
**Σχήμα 4.1:** Σεισμική γραμμή S1. Δρομοχρονικό διάγραμμα από το πείραμα της σεισμικής διάθλασης.



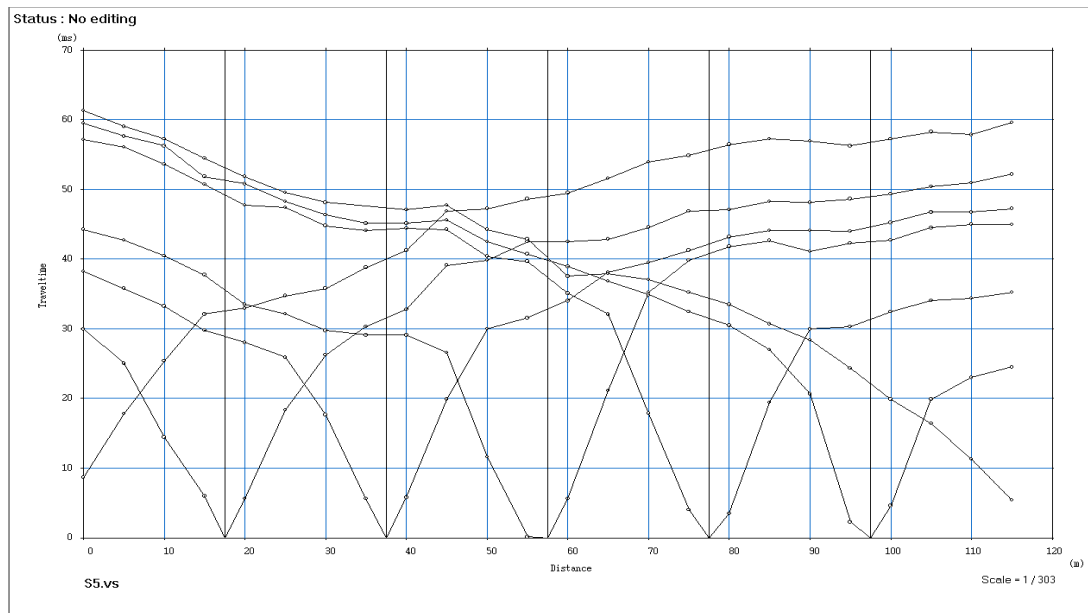
**Σχήμα 4.2:** Σεισμική γραμμή S2. Δρομοχρονικό διάγραμμα από το πείραμα της σεισμικής διάθλασης.



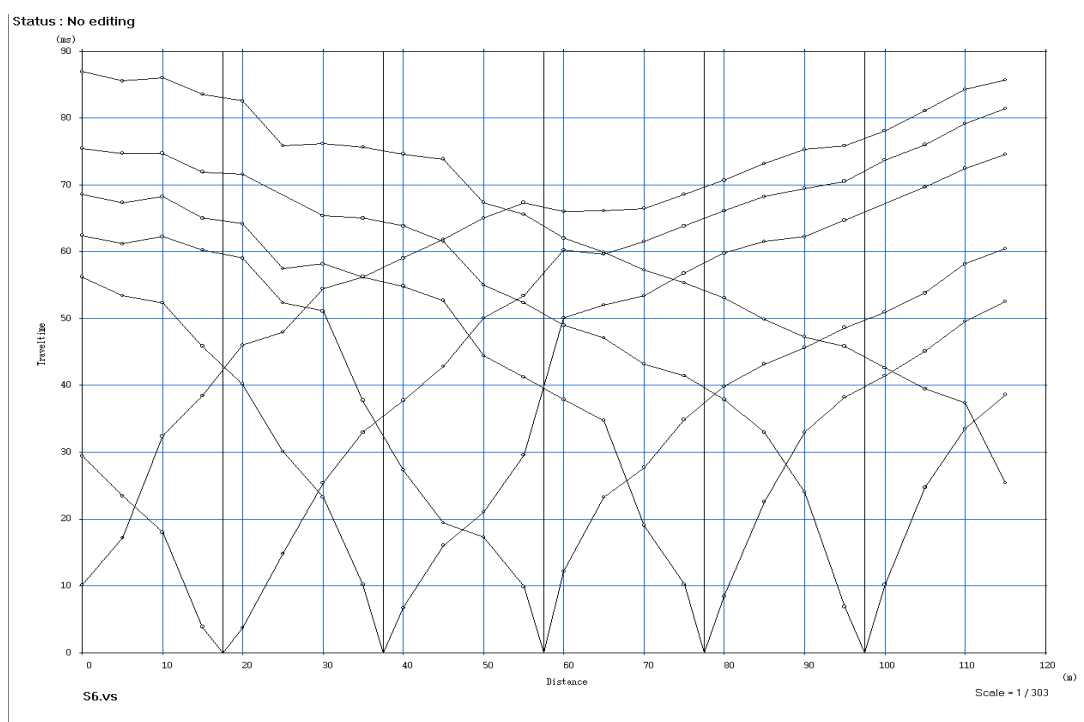
**Σχήμα 4.3:** Σεισμική γραμμή S3. Δρομοχρονικό διάγραμμα από το πείραμα της σεισμικής διάθλασης.



**Σχήμα 4.4:** Σεισμική γραμμή S4. Δρομοχρονικό διάγραμμα από το πείραμα της σεισμικής διάθλασης.

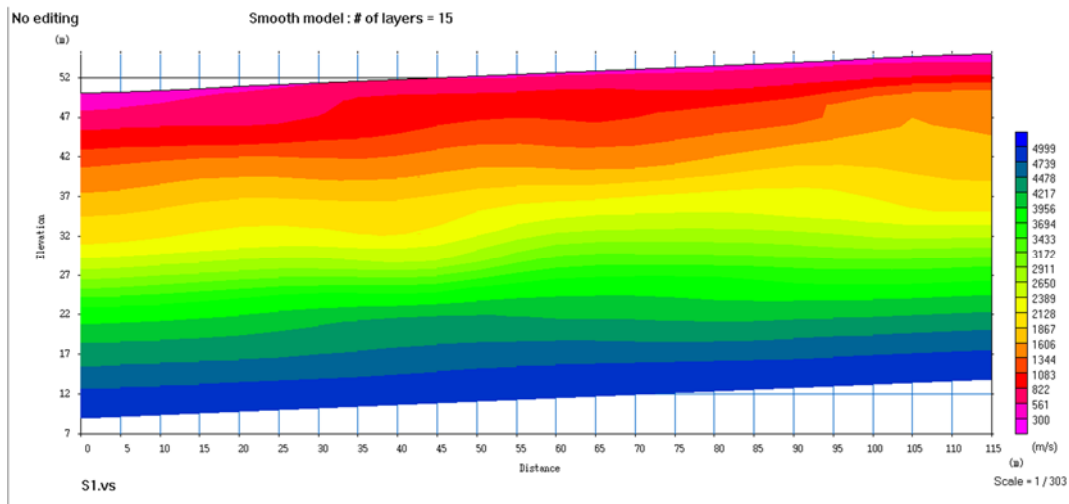


**Σχήμα 4.5:** Σεισμική γραμμή S5. Δρομοχρονικό διάγραμμα από το πείραμα της σεισμικής διάθλασης.

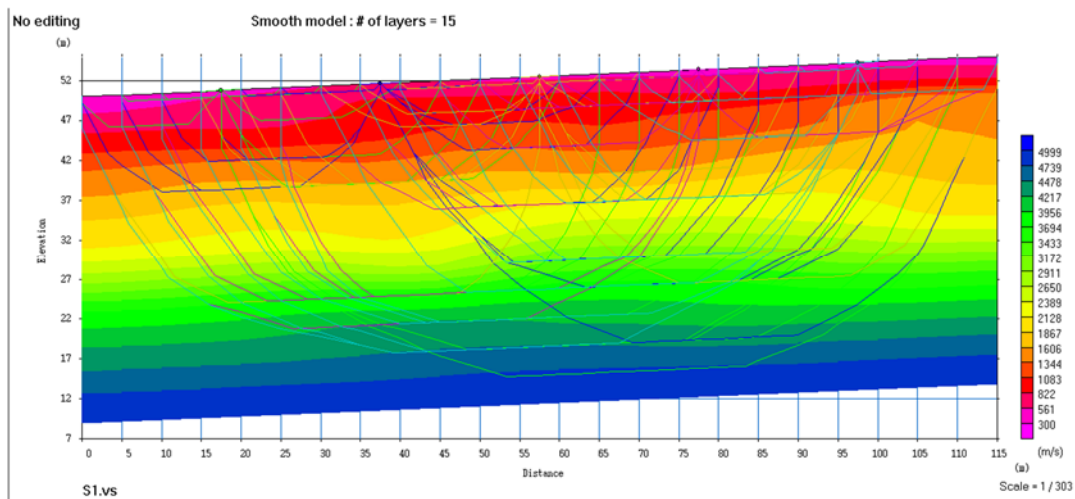


**Σχήμα 4.6:** Σεισμική γραμμή S6. Δρομοχρονικό διάγραμμα από το πείραμα της σεισμικής διάθλασης

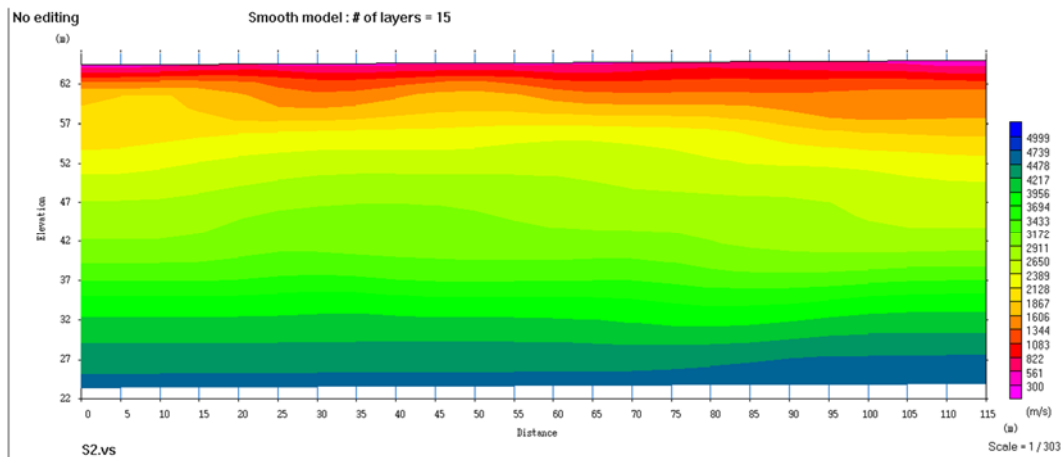




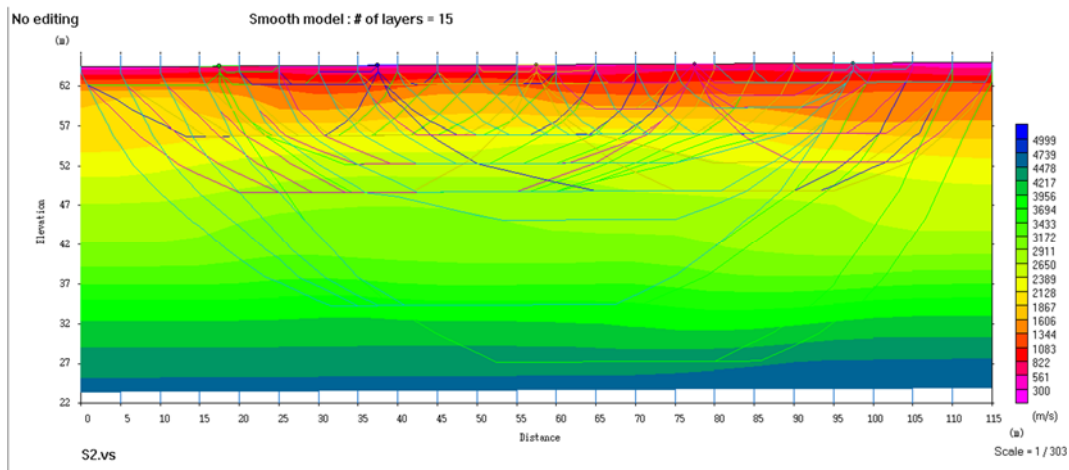
**Σχήμα 4.7:** Τελικό μοντέλο βάθους για την γραμμή S1. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί σε απόσταση στην γραμμή μελέτης ενώ ο κατακόρυφος σε απόλυτο υψόμετρο. Η χρωματική διαβάθμιση αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των P κυμάτων σε m/s.



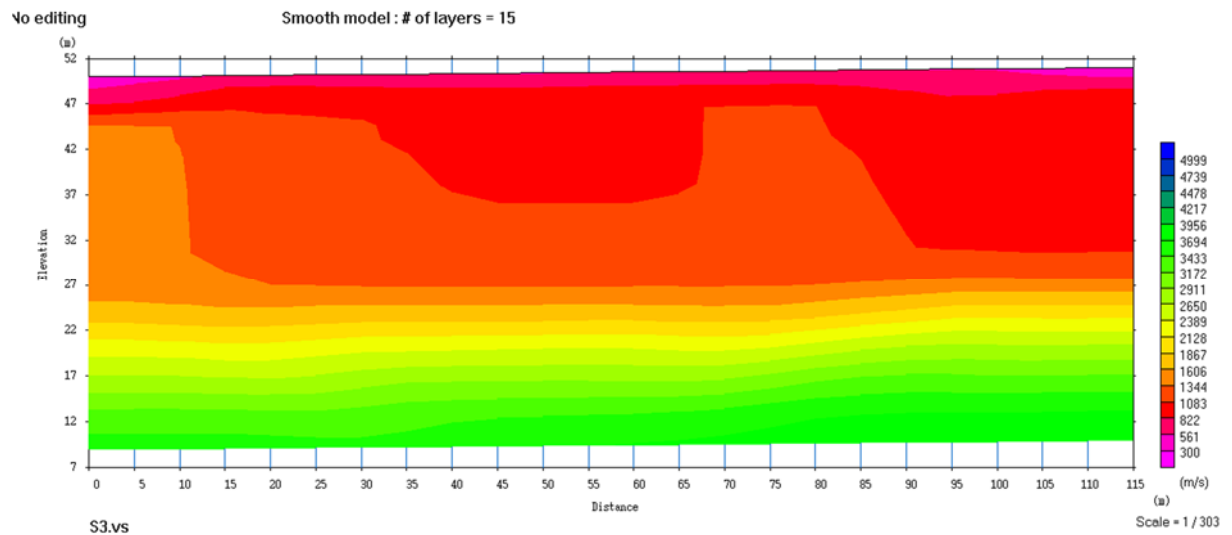
**Σχήμα 4.8:** Τελικό μοντέλο βάθους για την γραμμή S1 στο οποίο απεικονίζονται οι πορείες των σεισμικών κυμάτων από τις πηγές των γεωφώνων. Η σεισμική γραμμή S1 έχει φορά από ΝΔ προς ΒΑ. Διακρίνουμε τρία εδαφικά στρώματα : ένα αρχικό σε απόλυτο υψός από 57 έως 40 μέτρα, με μικρές ταχύτητες διάδοσης έως 1200 m/s περίπου χρωματικής παλέτας από ροζ έως βαθύ πορτοκαλί, ένα δεύτερο σε απόλυτο ύψος έως 20 περίπου μέτρα με ταχύτητες περίπου 4000 m/s χρώματος πράσινου και ένα τρίτο κάτωθι του με ταχύτητες που ξεπερνάνε τα 5000m/s .



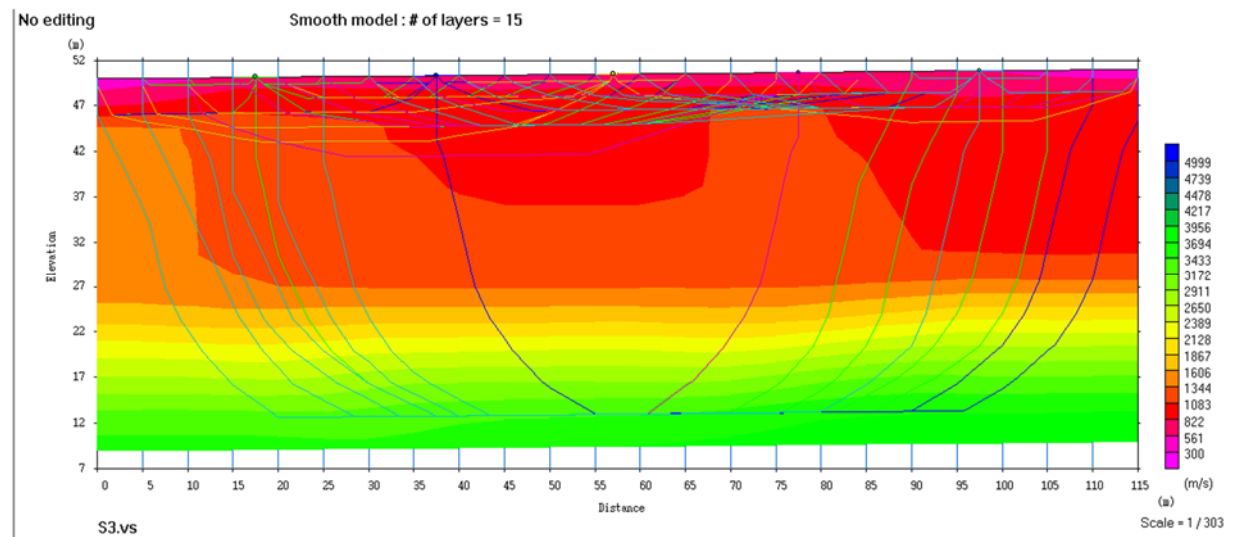
**Σχήμα 4.9:** Τελικό μοντέλο βάθους για την γραμμή S2. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί σε απόσταση στην γραμμή μελέτης ενώ ο κατακόρυφος σε απόλυτο υψόμετρο. Η χρωματική διαβάθμιση αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των P κυμάτων σε m/s.



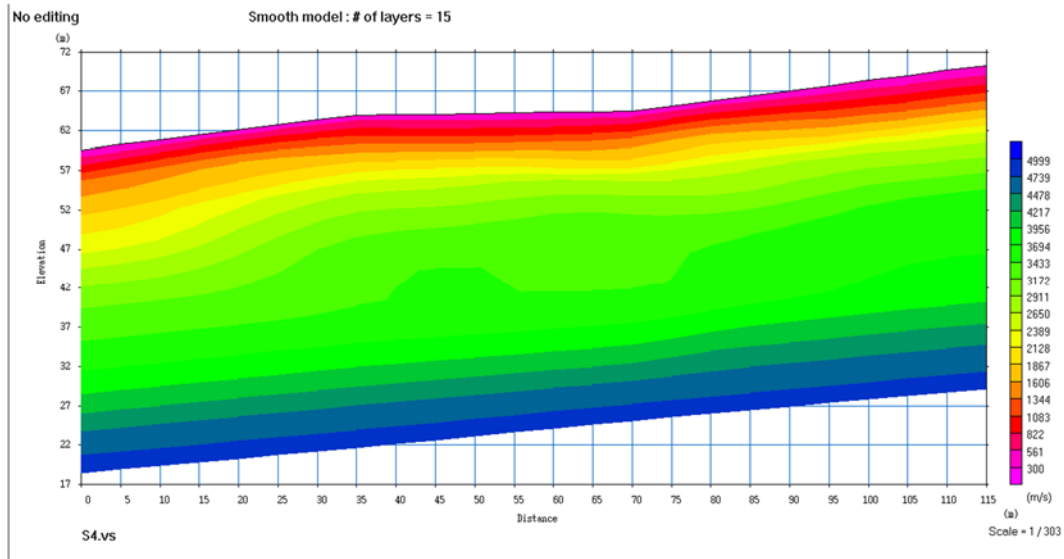
**Σχήμα 4.10:** Τελικό μοντέλο βάθους για την γραμμή S2 στο οποίο απεικονίζονται οι πορείες των σεισμικών κυμάτων από τις πηγές των γεωφώνων. Η σεισμική γραμμή S2 έχει φορά από N προς B. . Διακρίνουμε τρία εδαφικά στρώματα : ένα αρχικό σε απόλυτο υψός από 64 έως 47 μέτρα, με ταχύτητες διάδοσης έως 2700 m/s περίπου (χρωματικής παλέτας από ροζ έως ανοιχτό πράσινο), ένα δεύτερο σε απόλυτο ύψος έως 35 περίπου μέτρα με ταχύτητες περίπου 3700 m/s (χρώματος πράσινου) και ένα τρίτο κάτωθι του με ταχύτητες που ξεπερνάνε τα 3700 m/s.



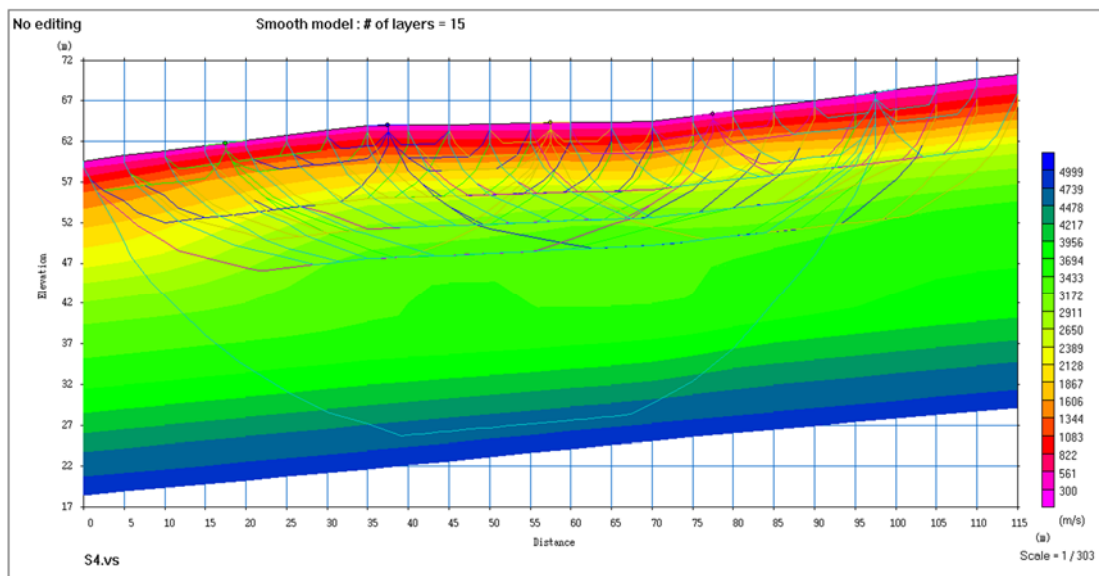
**Σχήμα 4.11:** Τελικό μοντέλο βάθους για την γραμμή S3. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί σε απόσταση στην γραμμή μελέτης ενώ ο κατακόρυφος σε απόλυτο υψόμετρο. Η χρωματική διαβάθμιση αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των P κυμάτων σε m/s.



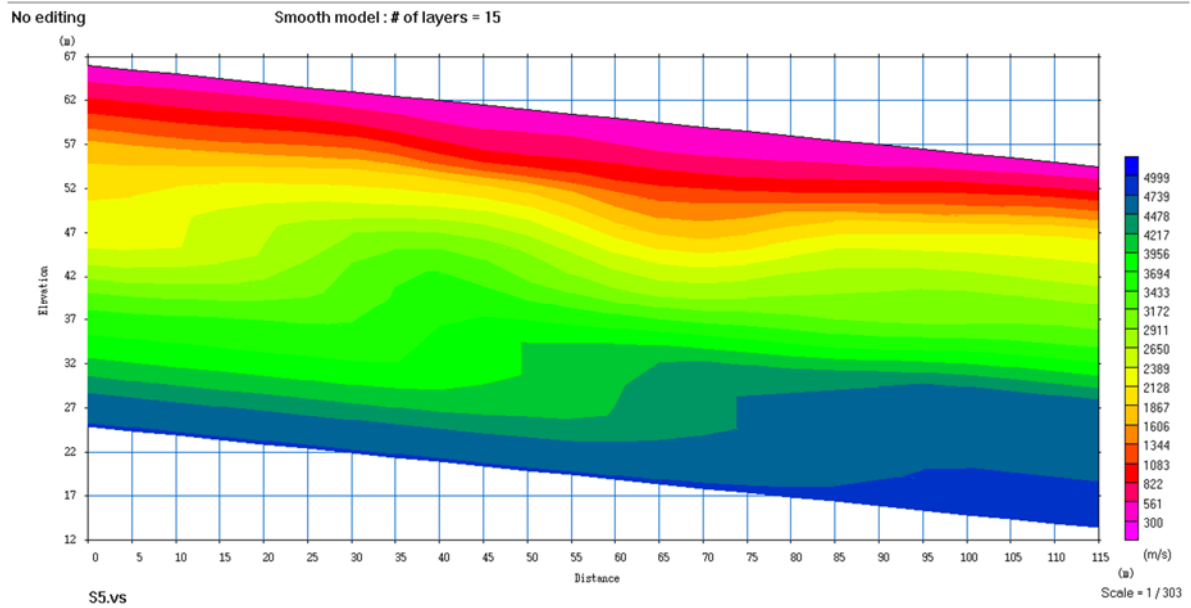
**Σχήμα 4.12:** Τελικό μοντέλο βάθους για την γραμμή S3 στο οποίο απεικονίζονται οι πορείες των σεισμικών κυμάτων από τις πηγές των γεωφώνων. Η σεισμική γραμμή S3 έχει φορά από ΝΑ προς ΒΔ. . Διακρίνουμε τρία εδαφικά στρώματα : ένα αρχικό σε απόλυτο υψός από 50 έως 37 μέτρα χρώματος βαθύ κόκκινου, με μικρές ταχύτητες διάδοσης έως 700 m/s περίπου, ένα δεύτερο σε απόλυτο ύψος έως 27 περίπου χρώματος ανοιχτού κόκκινου με ταχύτητες έως 1400 m/s και ενός τρίτου κάτωθι τους με ταχύτητες που ξεπερνάνε τα 3700 m/s.



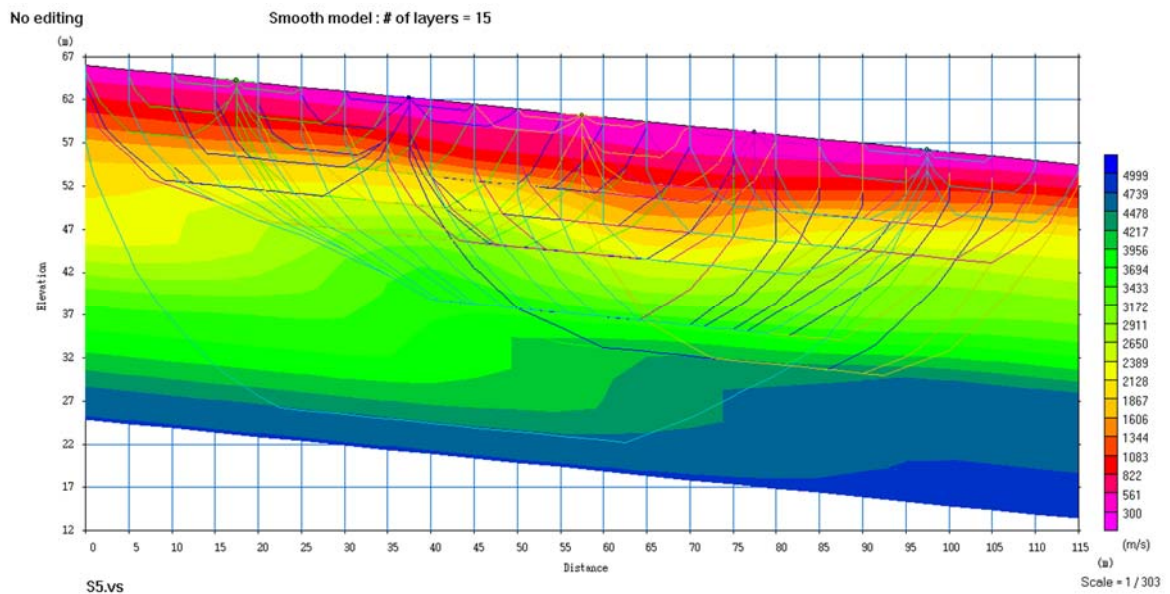
**Σχήμα 4.13:** Τελικό μοντέλο βάθους για την γραμμή S4. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί σε απόσταση στην γραμμή μελέτης ενώ ο κατακόρυφος σε απόλυτο υψόμετρο. Η χρωματική διαβάθμιση αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των P κυμάτων σε m/s.



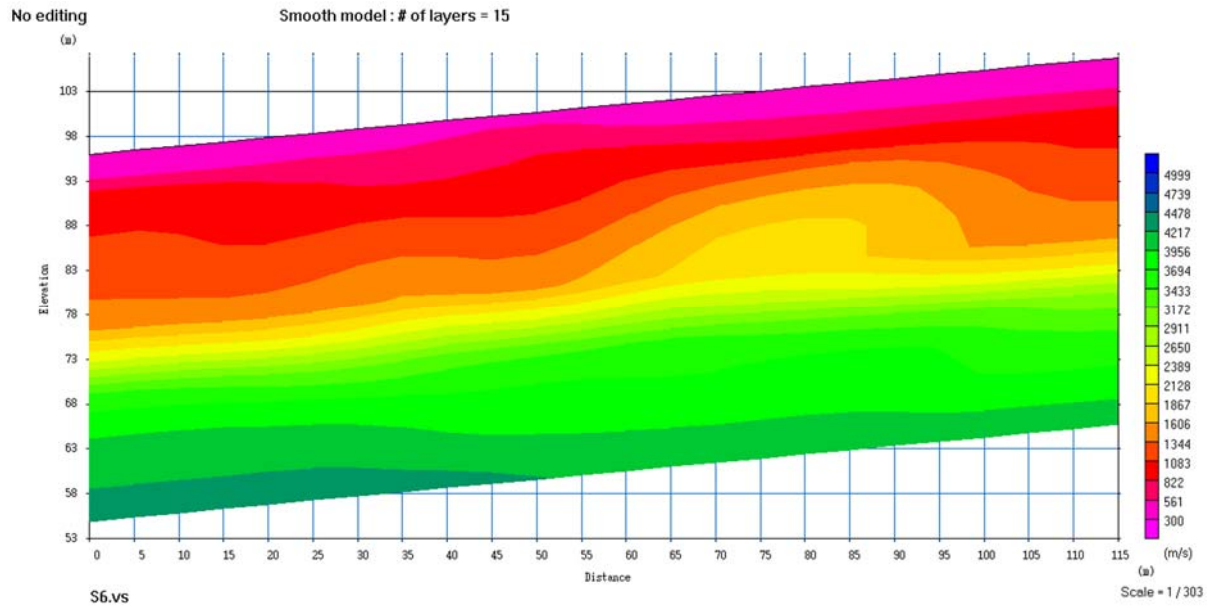
**Σχήμα 4.14:** Τελικό μοντέλο βάθους για την γραμμή S4 στο οποίο απεικονίζονται οι πορείες των σεισμικών κυμάτων από τις πηγές των γεωφώνων. Η σεισμική γραμμή S4 έχει φορά από Α προς Δ. Διακρίνουμε τρία εδαφικά στρώματα : ένα αρχικό σε απόλυτο υψός από 67 έως 50 μέτρα, με ταχύτητες διάδοσης έως 2400 m/s περίπου (χρωματικής παλέτας από ροζ έως κίτρινο), ένα δεύτερο σε απόλυτο ύψος έως 28 περίπου μέτρα με ταχύτητες περίπου 3400 m/s (χρώματος πράσινου) και ένα τρίτο κάτωθι του με ταχύτητες που ξεπερνάνε τα 5000 m/s.



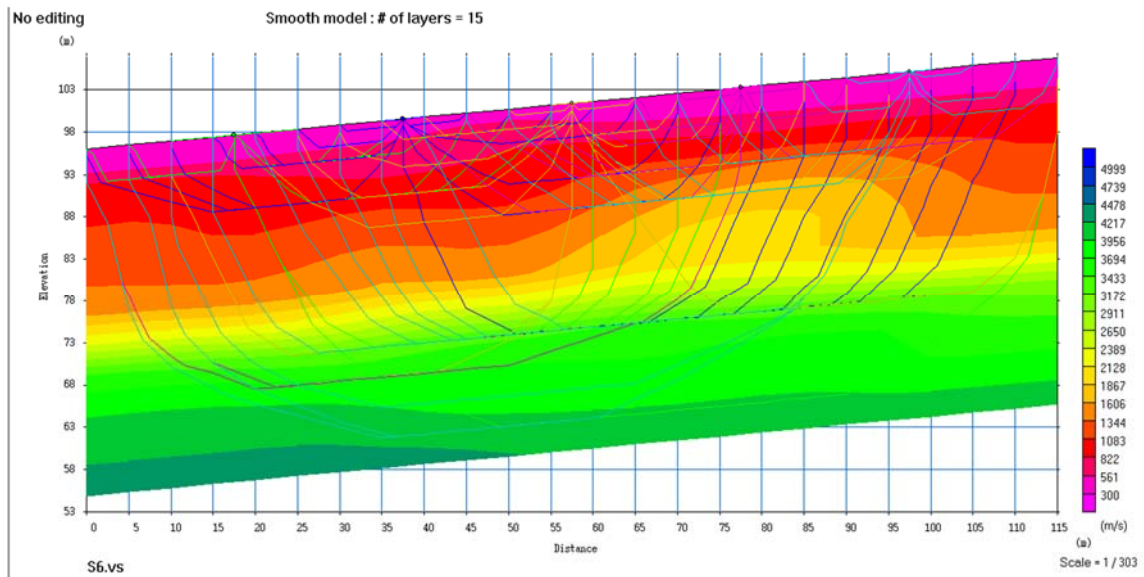
**Σχήμα 4.15:** Τελικό μοντέλο βάθους για την γραμμή S5. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί σε απόσταση στην γραμμή μελέτης ενώ ο κατακόρυφος σε απόλυτο υψόμετρο. Η χρωματική διαβάθμιση αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των P κυμάτων σε m/s.



**Σχήμα 4.16:** Τελικό μοντέλο βάθους για την γραμμή S5 στο οποίο απεικονίζονται οι πορείες των σεισμικών κυμάτων από τις πηγές των γεωφώνων. Η σεισμική γραμμή S5 έχει φορά από ΝΑ προς ΒΔ. Διακρίνουμε τρία εδαφικά στρώματα : ένα αρχικό σε απόλυτο υψός από 67 έως 55 μέτρα, με ταχύτητες διάδοσης έως 1600 m/s περίπου χρωματικής παλέτας από ροζ έως πορτοκαλί ένα δεύτερο σε απόλυτο ύψος έως 32 περίπου μέτρα με ταχύτητες έως 3400 m/s χρώματος πράσινου και ένα τρίτο κάτωθι του με ταχύτητες που ξεπερνάνε τα 5000 m/s.



**Σχήμα 4.17:** Τελικό μοντέλο βάθους για την γραμμή S6. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί σε απόσταση στην γραμμή μελέτης ενώ ο κατακόρυφος σε απόλυτο υψόμετρο. Η χρωματική διαβάθμιση αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης των P κυμάτων σε m/s.



**Σχήμα 4.18:** Τελικό μοντέλο βάθους για την γραμμή S6 στο οποίο απεικονίζονται οι πορείες των σεισμικών κυμάτων από τις πηγές των γεωφώνων. Η σεισμική γραμμή S5 έχει φορά από N προς B. Διακρίνουμε τρία εδαφικά στρώματα : ένα αρχικό σε απόλυτο υψός από 107 έως 80 μέτρα, με ταχύτητες διάδοσης έως 1600 m/s περίπου χρωματικής παλέτας από ροζ έως κόκκινο, ένα δεύτερο σε απόλυτο ύψος έως 73 περίπου μέτρα με ταχύτητες έως 2400 m/s χρώματος έως κίτρινο και ένα τρίτο κάτωθι του με ταχύτητες που ξεπερνάνε τα 4000 m/s.



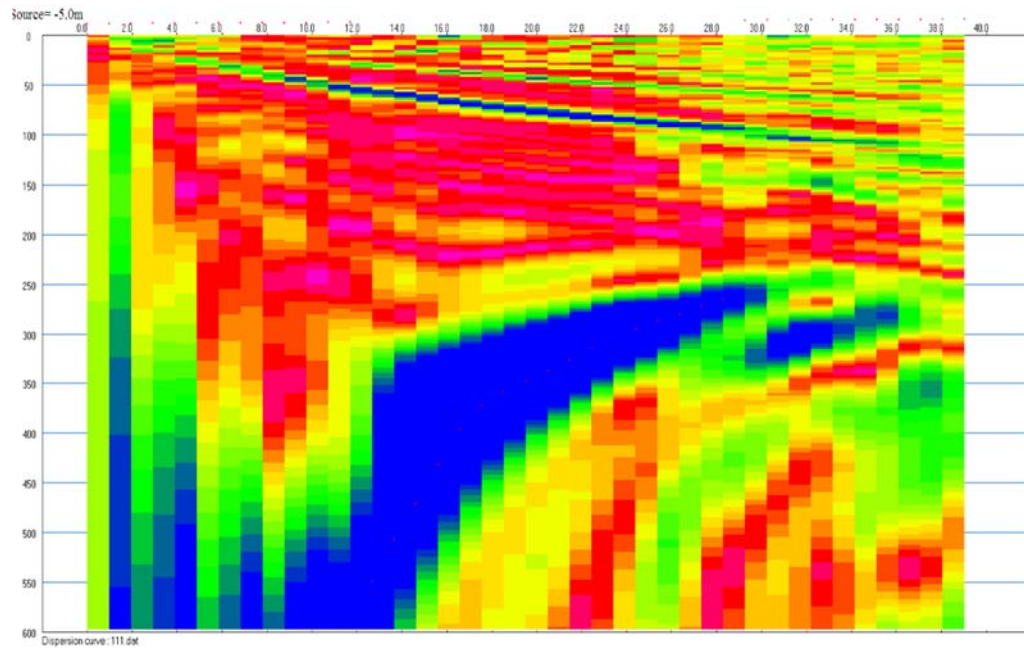
### 4.3 SeisImagerSW

Το λογισμικό SeisImagerSW<sup>TM</sup> είναι μια πλατφόρμα προγραμμάτων στην οποία μπορεί να γίνει ανάλυση επιφανειακών κυμάτων από ενεργητικές και παθητικές πηγές (μικροθορύβους). Αποτελείται από τα προγράμματα Pickwin και WaveEq. Η επεξεργασία των κυμάτων πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια.

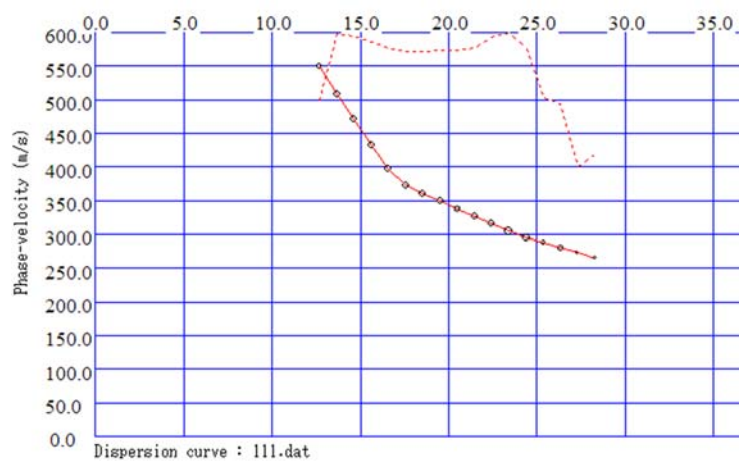
Στο πρώτο στάδιο:

- Εισήχθησαν οι αρχικές καταγραφές κοινής πηγής και μετασχηματίστηκαν στο χώρο ταχύτητας - συχνότητας, ενώ χειροκίνητα επιλέχθηκαν οι βέλτιστες θέσεις της καμπύλης διασποράς (κόκκινες κουκίδες) εντός των ορίων της της καταγραφής (Σχήμα 4.19, Παράρτημα Β).
- Μετέπειτα η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς μεταφέρθηκε στο πρόγραμμα WaveEq, όπου απεικονίστηκε ως διάγραμμα ταχύτητας-συχνότητας (σχήμα 4.20, Παράρτημα Γ)
- Δημιουργήθηκε ένα αρχικό μοντέλο της ταχύτητας Vs (m/s) και διατελούσης της μεθόδου αντιστροφής με τον αναγκαίο αριθμό επαναλήψεων αναγκαίο ώστε το σφάλμα να περιέλθει σε επίπεδα κάτω του 3% προέκυψε η τελική ταχύτητα των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων συναρτήσει του βάθους (σχήμα 4.21 και παράρτημα Δ).

Στο δεύτερο στάδιο της επεξεργασίας έγινε υπέρθεση της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων του προηγούμενου βήματος πάνω στα τελικά μοντέλα βάθους της σεισμικής τομογραφίας (κεφάλαιο 4.2) για την εκάστοτε σεισμική γραμμή στο πρόγραμμα CorelDraw5 (σχήματα 4.22 έως 4.27).

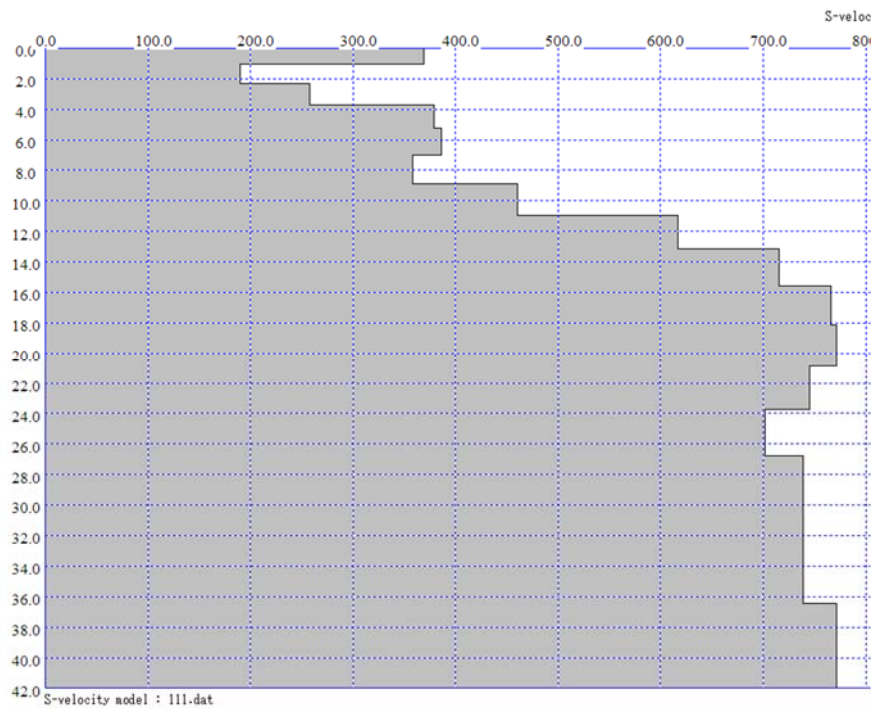


**Σχήμα 4.19:** Καμπύλες διασποράς επιφανειακών κυμάτων της σεισμικής γραμμής S1 στο πρόγραμμα Pickwin. Η πηγή βρίσκεται στα -5m. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η συχνότητα (Hz) ενώ στον κατακόρυφο η ταχύτητα της φάσης (m/s).

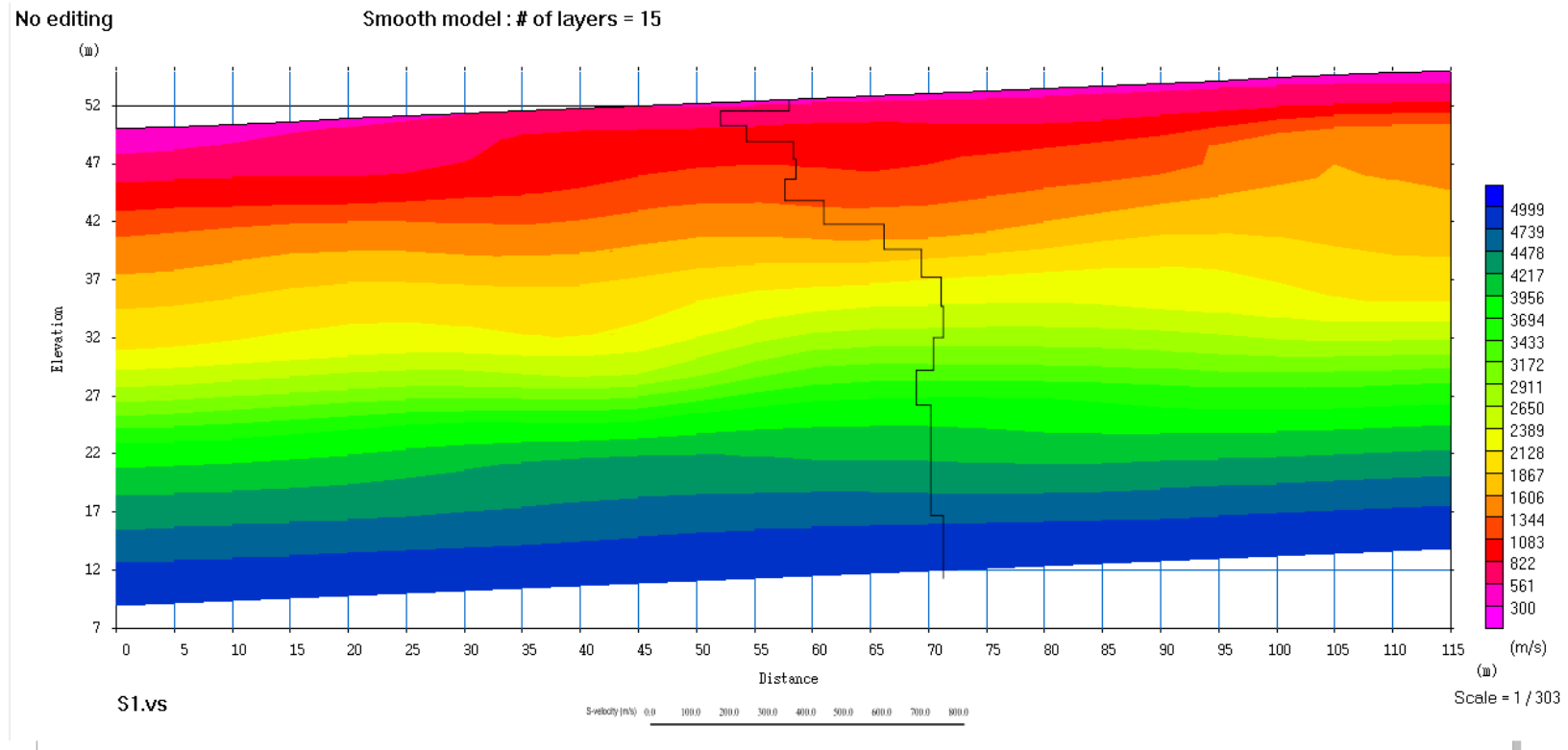


**Σχήμα 4.20:** Επιλεγμένο διάγραμμα ταχύτητας-συχνότητας για την σεισμική γραμμή S1. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η συχνότητα (Hz) ενώ στον κατακόρυφο η ταχύτητα φάσης (m/s).

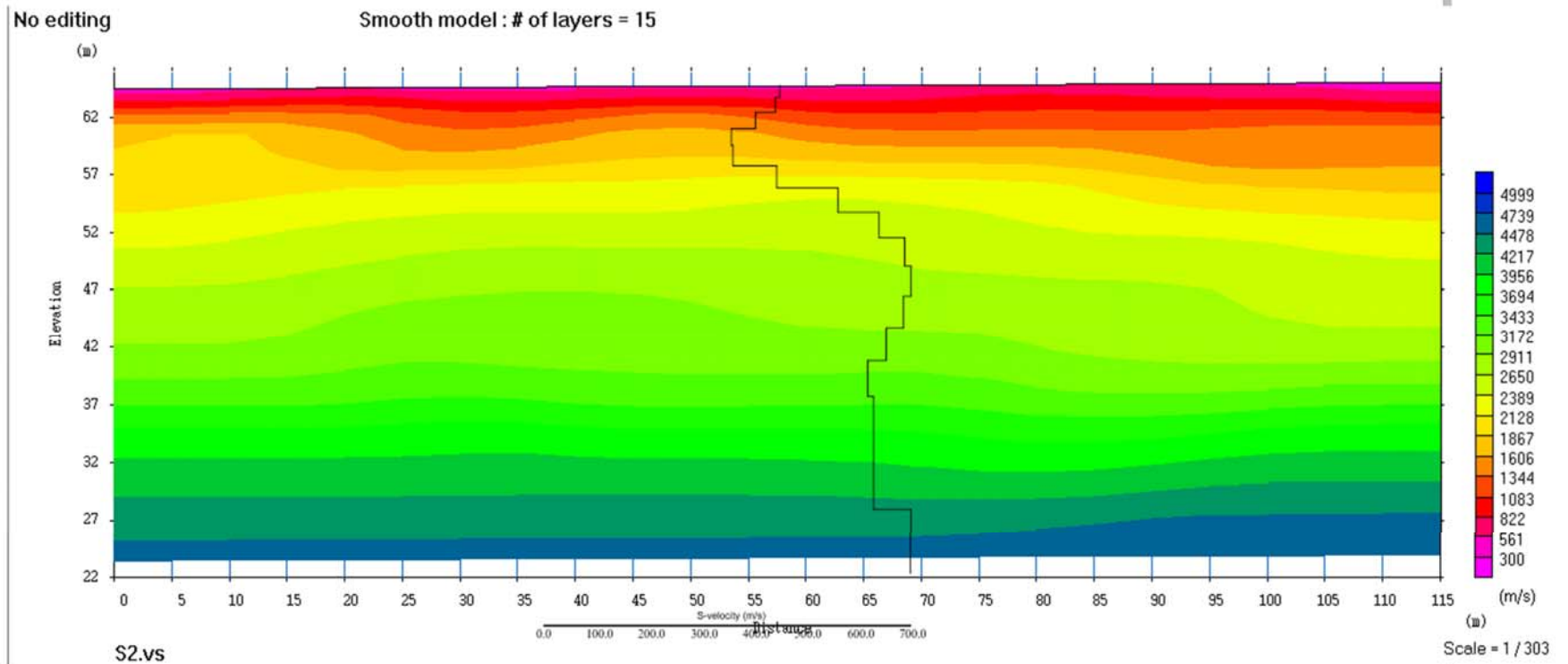




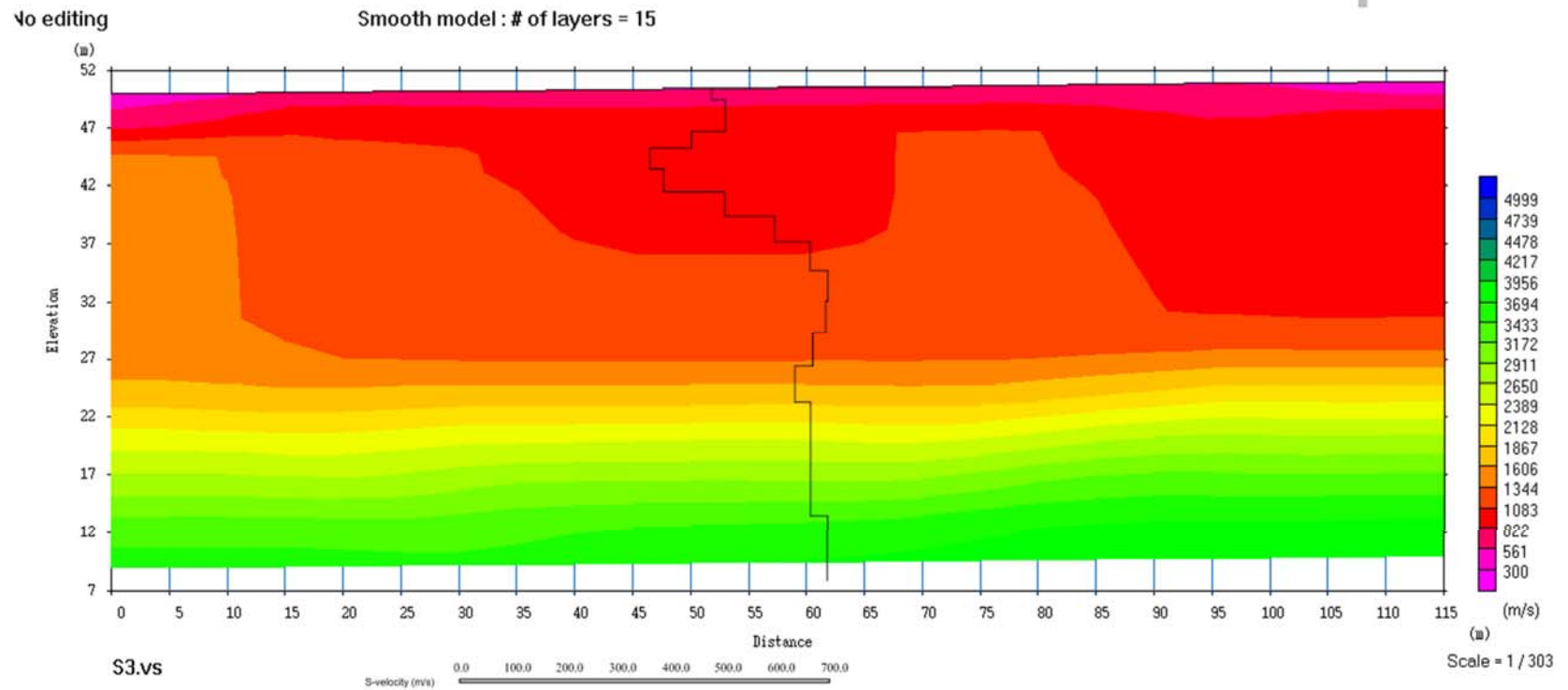
**Σχήμα 4.21:** Επιλεγμένο διάγραμμα κατανομής της ταχύτητας για την σεισμική γραμμή S1. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η ταχύτητα των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (m/s) ενώ στον κατακόρυφο το βάθος (m).



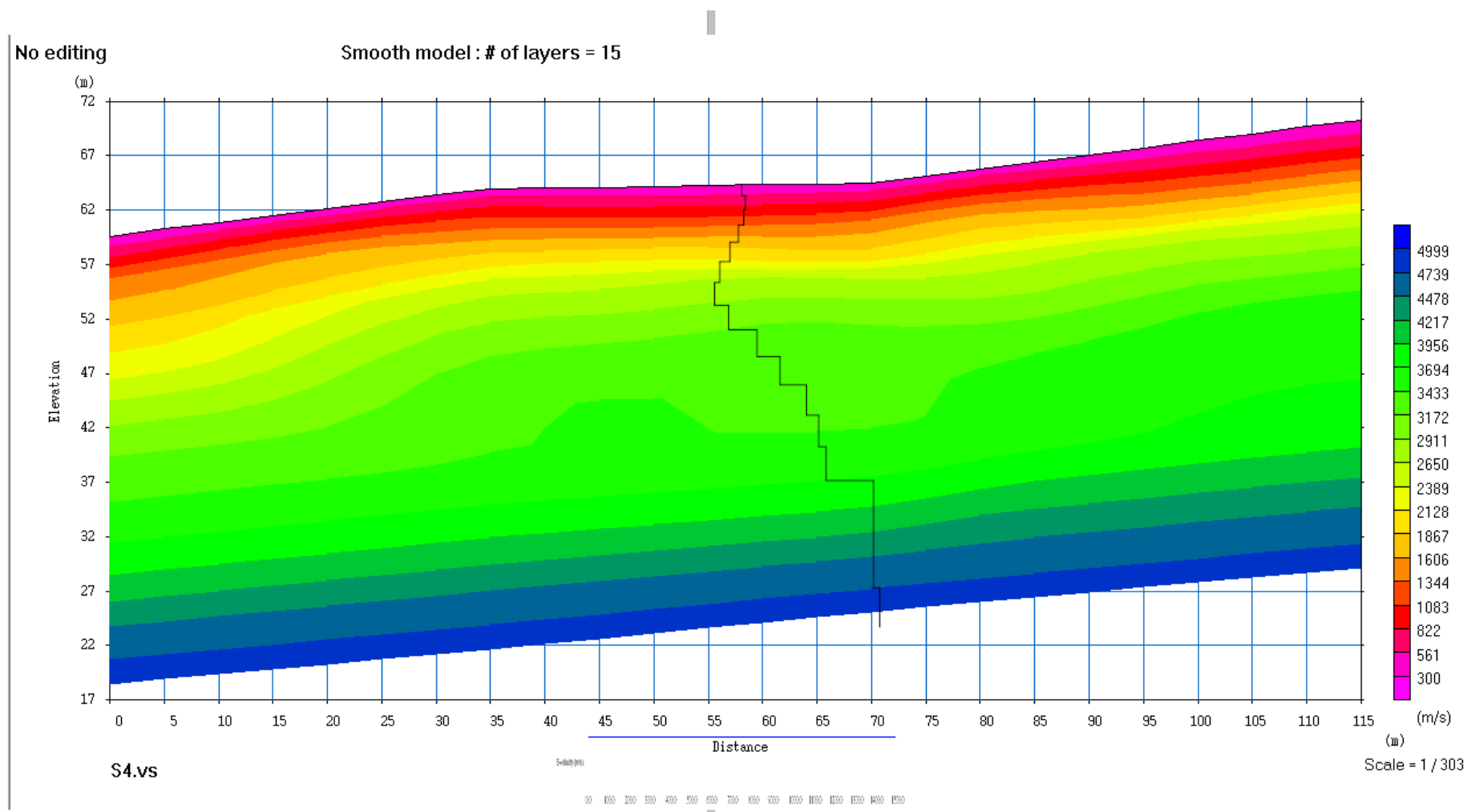
**Σχήμα 4.22:** Υπέρθυση των αποτελεσμάτων της σεισμικής τομογραφίας και της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων για την σεισμική γραμμή S1. Υπέρθυση των αποτελεσμάτων της της σεισμικής τομογραφίας και της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων για την σεισμική γραμμή S2. Η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων είναι περίπου στα 750 m/s ενώ η σεισμική ταχύτητα του στρώματος είναι πάνω από 4900 m/s.



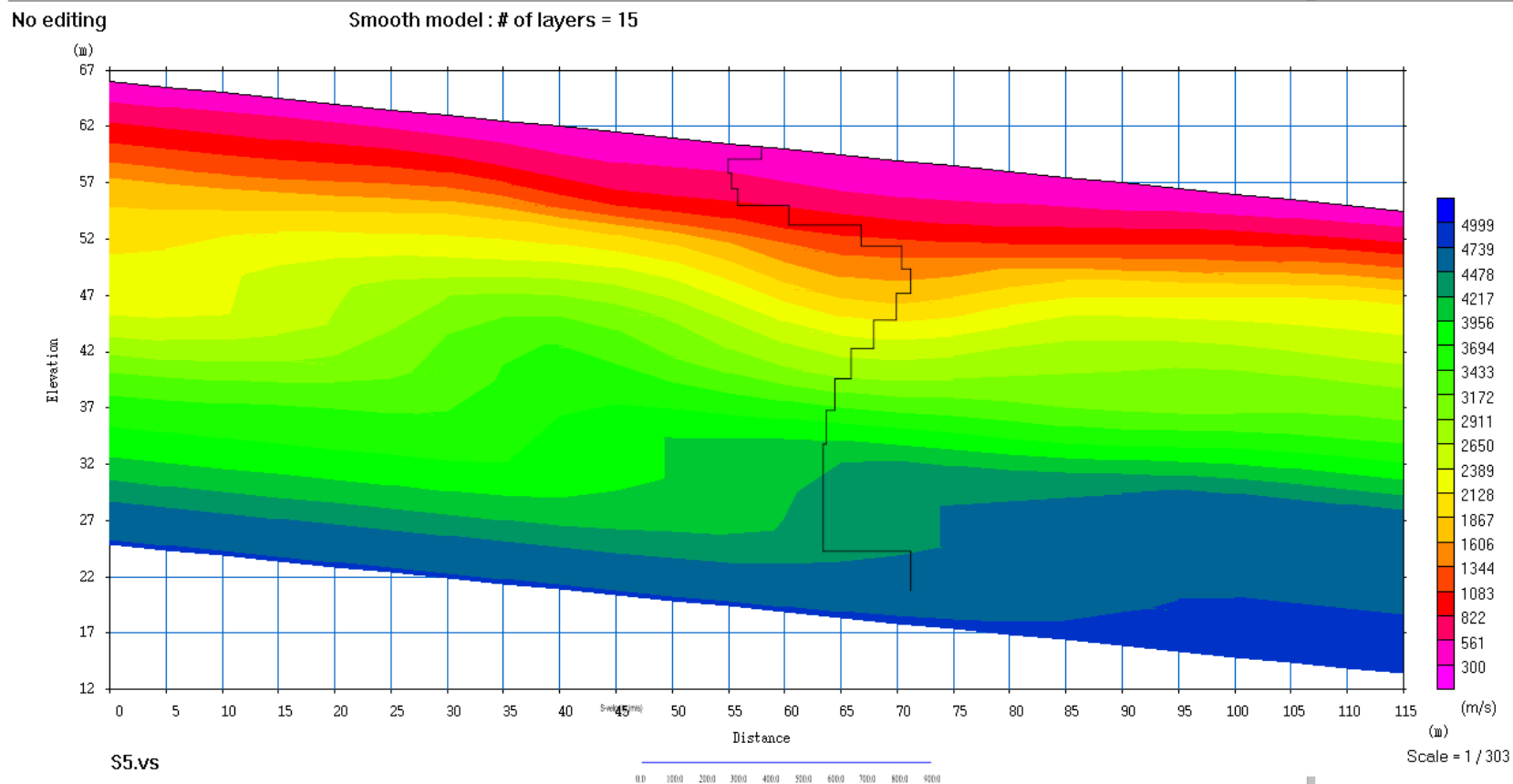
**Σχήμα 4.23:** Υπέρθεση των αποτελεσμάτων της της σεισμικής τομογραφίας και της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων για την σεισμική γραμμή S2. Η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων είναι περίπου στα 700 m/s ενώ η σεισμική ταχύτητα του στρώματος είναι πάνω από 4500 m/s.



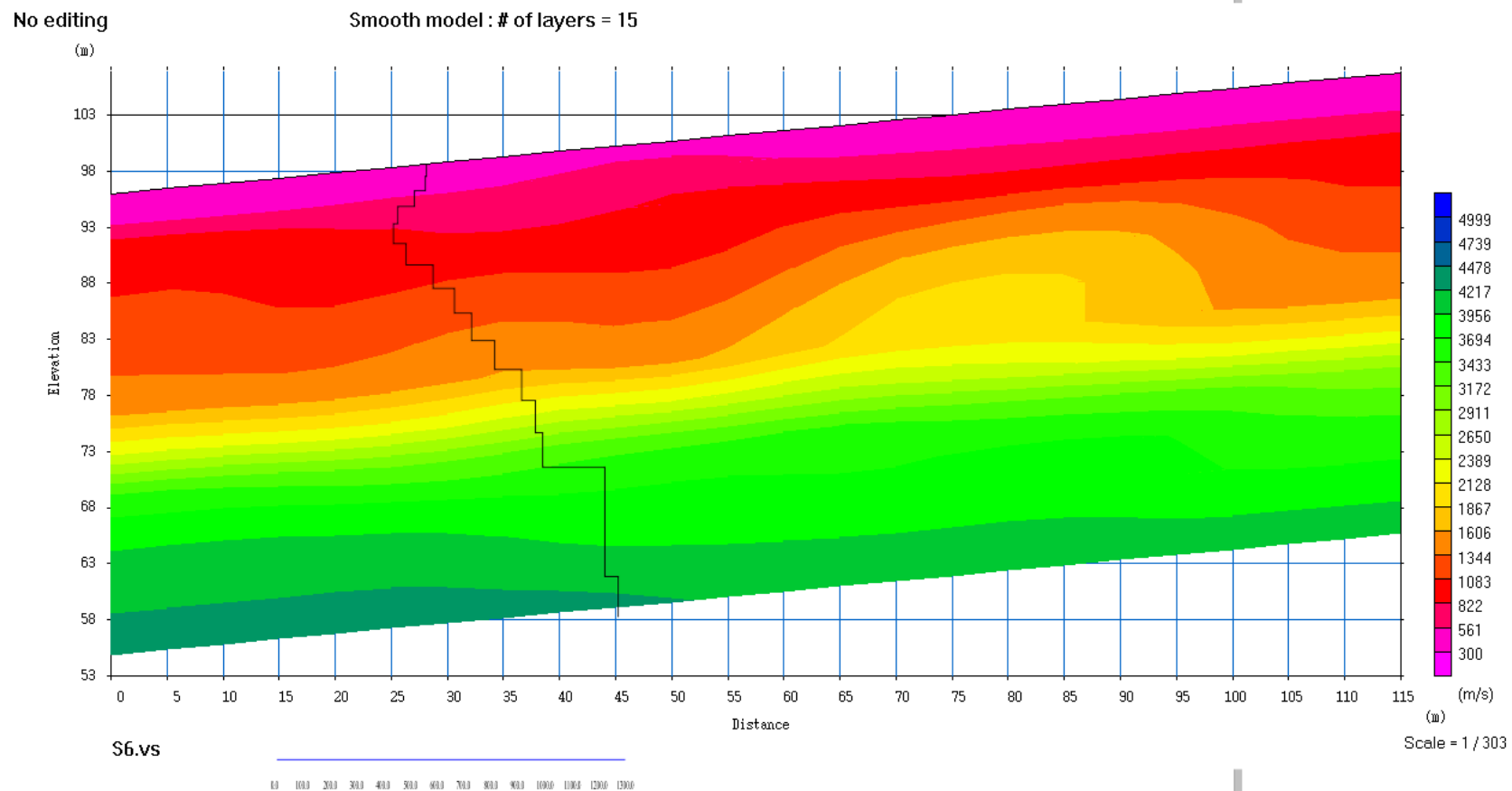
**Σχήμα 4.24:** Υπέρθεση των αποτελεσμάτων της της σεισμικής τομογραφίας και της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων για την σεισμική γραμμή S3. Η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων είναι περίπου στα 700 m/s ενώ η σεισμική ταχύτητα του στρώματος είναι πάνω από 3000 m/s.



**Σχήμα 4.25:** Υπέρθεση των αποτελεσμάτων της της σεισμικής τομογραφίας και της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων για την σεισμική γραμμή S4. Η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων είναι περίπου στα 1400 m/s ενώ η σεισμική ταχύτητα του στρώματος είναι πάνω από 4900 m/s.



**Σχήμα 4.26:** Υπέρθεση των αποτελεσμάτων της της σεισμικής τομογραφίας και της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων για την σεισμική γραμμή S5. Η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων είναι περίπου στα 800 m/s ενώ η σεισμική ταχύτητα του στρώματος είναι πάνω από 4700 m/s.



**Σχήμα 4.27:** Υπέρθεση των αποτελεσμάτων της της σεισμικής τομογραφίας και της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων για την σεισμική γραμμή. Η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων είναι περίπου στα 1250 m/s ενώ η σεισμική ταχύτητα του στρώματος είναι πάνω από 4000 m/s



#### 4.4 Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων (λόγος Poisson, μετρό ελαστικότητας)

Για δεδομένες θέσεις κατά μήκος των γραμμών μελέτης (S1 έως S6) στην περιοχή εντός και πέριξ του ποταμού Μυρτού έχει υπολογιστεί ο λόγος του Poisson ( $\nu$ ) και το μέτρο ελαστικότητας του Young ( $E$ ) από τις σχέσεις:

$$\nu = \frac{\left[ \frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]}{\left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]} \quad (4.1)$$

Και

$$E = 2\rho V_s^2(1+\nu) \quad (4.2)$$

οπού  $V_p$  η ταχύτητα των διαμηκών σεισμικών κυμάτων,  $V_s$  η ταχύτητα των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων,  $\rho$  η πυκνότητα. Το  $V_s$  υπολογίστηκε από την επεξεργασία με την μέθοδο των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh ενώ το  $V_p$  (m/s) από την επεξεργασία με την μέθοδο της σεισμικής διαθλασης. Για το μέτρο ελαστικότητας του Young χρησιμοποιήθηκε η σχέση  $V_p = 109\rho^4$  (Βαφείδης 1993). Στους πίνακες από 4 έως 9 παρατίθενται τα αποτελέσματα:

**Πίνακας 4:** Ελαστικές σταθερές του εδάφους για την γραμμή S1.

A/A	Οριζόντια απόσταση(m)	Βάθος (m)	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	E <sub>dyn</sub> (Mpa)	ρ (gr/cm <sup>3</sup> )
1	70,5	0,0	728	369	0,32	581,7	1,6
2	8,5	1,1	394	190	0,35	134,5	1,4
3	22,5	2,3	510	258	0,33	259,7	1,5
4	76,8	3,7	747	379	0,33	617,2	1,6
5	81,4	5,3	768	386	0,33	647,0	1,6
6	64,0	7,0	722	358	0,34	550,4	1,6
7	142,5	8,9	925	460	0,34	966,1	1,7
8	361,8	11,0	1227	617	0,33	1854,7	1,8
9	579,9	13,2	1417	715	0,33	2582,4	1,9
10	722,3	15,6	1515	766	0,33	3011,4	1,9
11	738,8	18,1	1526	772	0,33	3060,0	1,9
12	661,1	20,9	1473	745	0,33	2828,4	1,9
13	545,3	23,7	1389	702	0,33	2471,8	1,9
14	644,2	26,8	1460	739	0,33	2776,7	1,9
15	738,8	36,4	1526	772	0,33	3060,0	1,9

**Πίνακας 5:** Ελαστικές σταθερές του εδάφους για την γραμμή S2.

A/A	Οριζόντια απόσταση(m)	Βάθος (m)	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	E <sub>dyn</sub> (Mpa)	ρ (gr/cm <sup>3</sup> )
1	134,0	0,0	899	452	0,33	134,0	1,7
2	126,7	1,0	887	444	0,33	126,8	1,7
3	94,7	2,3	809	405	0,33	94,7	1,7
4	65,1	3,7	723	360	0,34	65,2	1,6
5	66,5	5,2	728	362	0,34	66,5	1,6
6	129,2	7,0	897	446	0,34	129,2	1,7
7	271,0	8,9	1122	563	0,33	271,0	1,8
8	411,2	10,9	1274	642	0,33	411,3	1,8
9	517,0	13,1	1365	690	0,33	517,1	1,9
10	546,3	15,5	1387	702	0,33	546,3	1,9
11	511,4	18,1	1359	688	0,33	511,5	1,9
12	437,3	20,8	1296	655	0,33	437,4	1,9
13	367,5	23,7	1229	620	0,33	367,6	1,8
14	387,8	26,7	1249	630	0,33	387,9	1,8
15	546,3	36,4	1387	702	0,33	546,3	1,9

**Πίνακας 6:** Ελαστικές σταθερές του εδάφους για την γραμμή S3.

A/A	Οριζόντια απόσταση(m)	Βάθος (m)	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	E <sub>dyn</sub> (Mpa)	ρ (gr/cm <sup>3</sup> )
1	160,1	0	952	503	0,33	1044,2	1,7
2	189,4	1,0	1002	503	0,33	1174,7	1,7
3	188,9	2,3	1001	440	0,33	1172,3	1,7
4	123,2	3,7	881	360	0,33	870,2	1,7
5	65,3	5,2	730	386	0,34	559,3	1,6
6	81,4	7,0	777	502	0,34	651,2	1,6
7	188,0	8,9	999	597	0,33	1167,9	1,7
8	326,4	10,9	1181	663	0,33	1718,9	1,8
9	455,2	13,1	1310	696	0,33	2173,5	1,9
10	532,7	15,5	1380	694	0,33	2431,8	1,9
11	525,8	18,1	1377	668	0,33	2412,5	1,9
12	466,5	20,8	1328	636	0,33	2218,9	1,9
13	398,0	23,7	1266	665	0,33	1985,5	1,8
14	459,2	26,7	1324	696	0,33	2196,8	1,9
15	532,7	36,4	1380	503	0,33	2431,8	1,9

**Πίνακας 7:** Ελαστικές σταθερές του εδάφους για την γραμμή S4.

A/A	Οριζόντια απόσταση(m)	Βάθος (m)	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	E <sub>dyn</sub> (Mpa)	ρ (gr/cm <sup>3</sup> )
1	655,4	0,0	1491	743	0,33	2836,8	1,9
2	705,7	1,1	1523	761	0,33	2984,6	1,9
3	684,0	2,3	1511	753	0,33	2922,5	1,9
4	608,7	3,7	1457	726	0,33	2692,6	1,9
5	509,0	5,3	1378	687	0,33	2373,1	1,9
6	399,1	7,0	1280	636	0,34	2001,3	1,9
7	349,4	8,9	1227	610	0,34	1821,3	1,8
8	493,1	11,0	1361	680	0,33	2317,1	1,9
9	886,7	13,2	1627	817	0,33	3496,2	2,0
10	1336,5	15,6	1851	930	0,33	4672,2	2,0
11	2028,7	18,1	2113	1060	0,33	6278,7	2,1
12	2412,4	20,9	2227	1119	0,33	7089,0	2,1
13	2664,3	23,7	2297	1155	0,33	7603,1	2,1
14	4761,2	26,8	2748	1385	0,33	11436,0	2,2
15	5098,8	36,4	2803	1416	0,33	11991,7	2,3

**Πίνακας 8:** Ελαστικές σταθερές του εδάφους για την γραμμή S5.

A/A	Οριζόντια απόσταση(m)	Βάθος (m)	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	E <sub>dyn</sub> (Mpa)	ρ (gr/cm <sup>3</sup> )
1	74,2	0,0	747	375	0,33	605,9	1,6
2	26,8	1,1	554	273	0,34	299,0	1,5
3	30,2	2,3	563	283	0,33	321,4	1,5
4	37,2	3,7	606	302	0,33	374,0	1,5
5	143,3	5,3	922	461	0,33	966,9	1,7
6	506,2	7,0	1357	685	0,33	2345,6	1,9
7	867,5	8,9	1602	812	0,33	3423,9	2,0
8	969,2	11,0	1656	840	0,33	3699,7	2,0
9	816,7	13,2	1568	796	0,33	3276,6	1,9
10	605,1	15,6	1430	725	0,33	2653,8	1,9
11	438,0	18,1	1297	655	0,33	2117,5	1,9
12	340,1	20,9	1201	605	0,33	1774,1	1,8
13	294,0	23,7	1152	578	0,33	1603,8	1,8
14	278,0	26,8	1134	568	0,33	1543,1	1,8
15	969,2	36,4	1656	840	0,33	3699,7	2,0

**Πίνακας 9:** Ελαστικές σταθερές του εδάφους για την γραμμή S6.

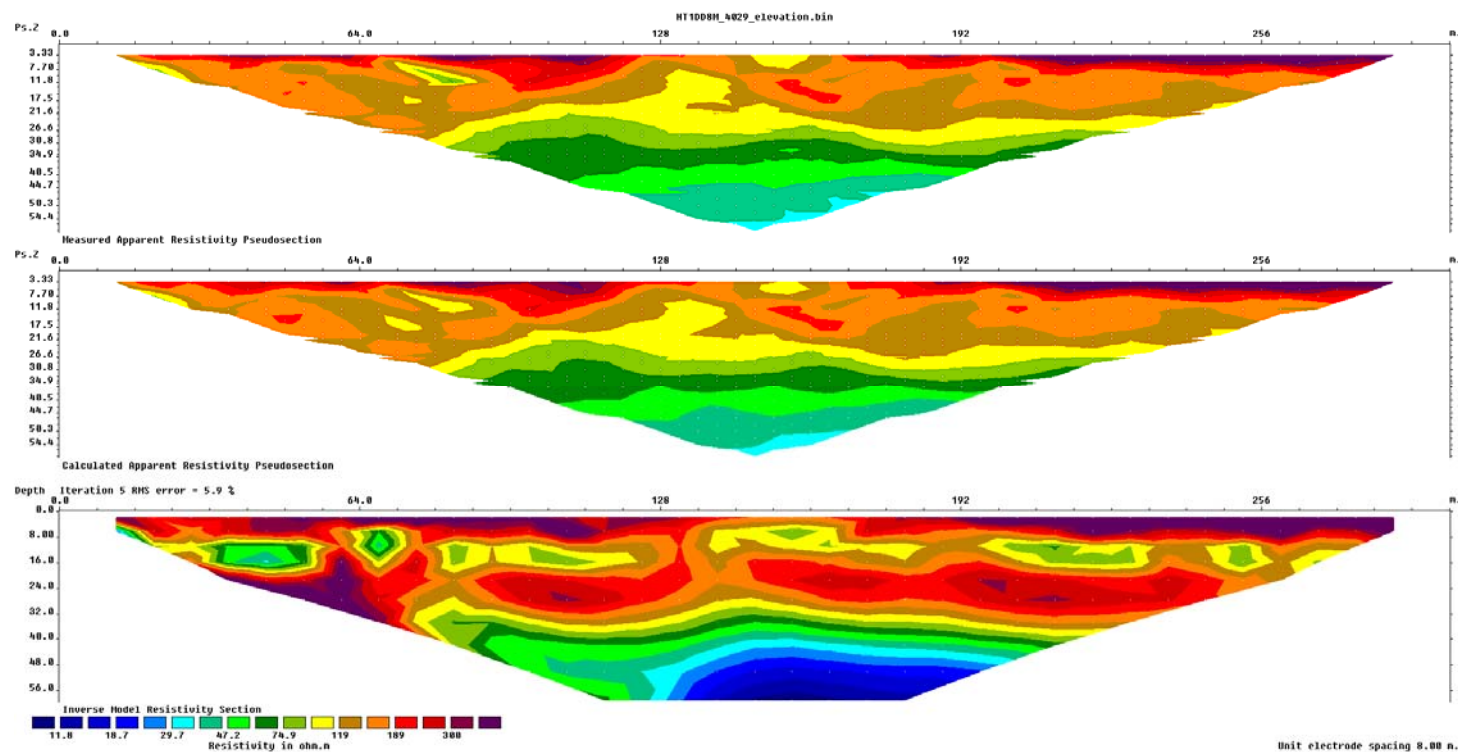
A/A	Οριζόντια απόσταση(m)	Βάθος (m)	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	E <sub>dyn</sub> (Mpa)	ρ (gr/cm <sup>3</sup> )
1	261,7	0,0	1114	557	0,33	261,7	1,8
2	256,2	1,1	1108	553	0,33	256,3	1,8
3	200,0	2,3	1031	512	0,34	200,1	1,8
4	132,5	3,7	914	450	0,34	132,5	1,7
5	118,1	5,3	879	434	0,34	118,2	1,7
6	163,7	7,0	961	481	0,33	163,8	1,7
7	300,8	8,9	1148	582	0,33	300,8	1,8
8	452,9	11,0	1318	662	0,33	452,9	1,9
9	606,3	13,2	1451	725	0,33	606,3	1,9
10	869,8	15,6	1632	812	0,34	869,8	2,0
11	1261,4	18,1	1827	913	0,33	1261,4	2,0
12	1504,8	20,9	1927	965	0,33	1504,9	2,1
13	1641,3	23,7	1974	992	0,33	1641,3	2,1
14	3201,3	26,8	2418	1223	0,33	3201,4	2,2
15	3639,1	36,4	2507	1273	0,33	3639,2	2,2



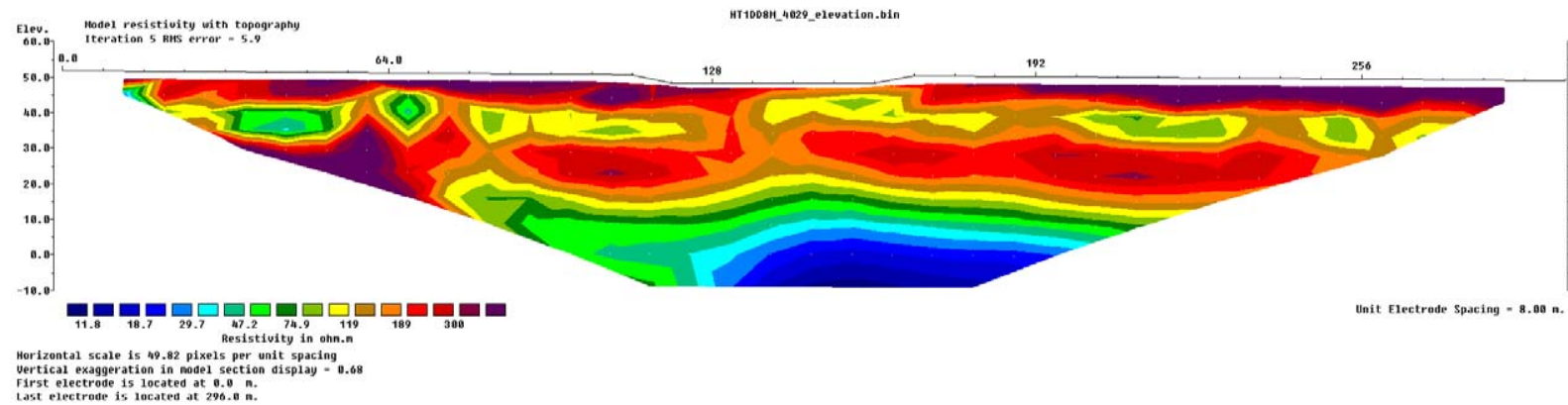
#### 4.5 Ηλεκτρικά Δεδομένα – RES2DINV

Το λογισμικό RES2DINV της GEOTOMO SOFTWARE αυτόματα προσδιορίζει το δυσδιάστατο μοντέλο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με βάση τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν με την μέθοδο αντιστροφής ελαχίστων τετραγώνων με περιορισμούς εξομάλυνσης, με αρκετές επαναλήψεις μέχρι το σφάλμα να κυμανθεί κάτω από 10% και το μοντέλο να θεωρηθεί αποδεκτό (RES2DIV manual, [geoelectrical.com](http://geoelectrical.com)).

Από ένα αρχικό μοντέλο επιλύεται το ευθύ πρόβλημα και υπολογίζονται οι τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντιστάσης. Οι θεωρητικές αυτές τιμές, σε συνδυασμό με τις πραγματικές τιμές των μετρήσεων καθώς και τις παραμέτρους του επιλεχθέντος μοντέλου δημιουργούν ένα σύστημα εξισώσεων, όπου επιλύεται διαμέσω της διαδικασίας της αντιστροφής με άγνωστους τις προαναφερθείσες παραμέτρους. Συνεχιζόμενης της διαδικασίας δημιουργείται νέο βελτιωμένο μοντέλο όπου αφορά μόνον τις παραμέτρους του μοντέλου, και συνεχιζόμενης της διαδικασίας περαιτέρω υπολογίζονται οι φαινόμενες αντιστάσεις διαμέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων και συγκρίνονται με τις πραγματικές τιμές αυτών, μέχρις ότου το σφάλμα πέσει κάτω από 10%. Στα σχήματα 4.28, 4.29 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της προαναφερθείσας μεθόδου για την σεισμική γραμμή S1.



**4.28:** Γεωηλεκτρική τομή των ειδικών αντιστάσεων της γραμμής μελέτης S1. Απεικονίζονται κατά σειρά οι πειραματικές φαινόμενες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντιστάσεως, οι υπολογισμένες φαινόμενες και οι πραγματικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντιστάσης. Ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους σε m, ο οριζόντιος το μήκος της γραμμής μελέτης σε m και η χρωματική κλίμακα την ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε  $\Omega m$ .



**4.29 :** Γεωηλεκτρική τομή των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων για την γραμμή μελέτης S1. Ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει το υψόμετρο σε  $m$ , ο οριζόντιος το μήκος της γραμμής μελέτης σε  $m$  και η χρωματική κλίμακα την ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε  $\Omega m$ .

## 5. ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 5.1 Συμπεράσματα για την δομή του υπεδάφους

Παρατηρώντας τις υπερθέσεις των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων στις τομές της σεισμικής τομογραφίας, καθώς και τα ηλεκτρικά δεδομένα της γραμμής S1, συμπεραίνουμε ότι τα αποτελέσματα των προαναφερθεισών μεθόδων συμφωνούν ως προς το βάθος του γεωλογικού υπόβαθρου.

Βάση της γεωλογίας της περιοχής και των προσδιοριζόμενων μηχανικών ιδιοτήτων, καταλήγουμε ότι στην περιοχή μελέτης υπάρχουν τρία στρώματα:

- Το υπερκείμενο εδαφικό στρώμα σχηματισμού του Τεταρτογενούς, ύψους μεταξύ 10 και 20 μέτρων, όπου αποτελείται από αλλουβιακά ριπιδία υπογωνιώδων κροκάλων, λατύπων και ψηδίσφων με αλλουβιανές αμμώδεις αποθέσεις σε διαφορετικές συστάσεις εντός τους με ταχύτητες  $V_p$  εύρους 700-2400 m/s,
- Ένα υποκείμενο στρώμα κροκαλοπαγή σχηματισμού του Μειοκαίνου, ύψους περί των 20 μέτρων από επαναλαμβανόμενες μονάδες κροκαλοπαγών καλά στρογγυλεμένων ασβεστόλιθων και βασαλτών συγκολλημένων με αμμώδεις συνδετικό υλικό με ταχύτητες  $V_p$  έως 4000 m/s, ενώ τέλος
- Το βαθύτερο στρώμα σχηματισμού του Προνεογενούς, τεκτονικού καλύμματος φλυσικού mélange με συνύπαρξη οφιόλιθων, σχιστόλιθων και ασβεστόλιθων, με ταχύτητες  $V_p$  που ξεπερνούν τα 5000 m/s.

## 5.2 Κατηγορία εδάφους

“Στον ΕΚ8 προδιαγράφονται πέντε κατηγορίες εδάφους Α, Β, C, D και Ε ανάλογα με τη στρωματογραφία και τις παραμέτρους που περιγράφονται παρακάτω. Υπάρχουν και δύο ειδικές κατηγορίες εδαφών, οι S1 και S2, για τις οποίες απαιτούνται ειδικές μελέτες για τον καθορισμό των σεισμικών δράσεων. Ιδιαίτερα στην κατηγορία S2 πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η πιθανότητα αστοχίας του εδάφους υπό τα σεισμικά φορτία σχεδιασμού. Για την κατηγορία S1 απαιτείται ειδική μελέτη για τον καθορισμό της τοπικής μεγέθυνσης (site amplification) και της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής.

Η κατάταξη των εδαφών γίνεται με βάση την ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων,  $v_{s,30}$ , εάν είναι διαθέσιμη, αλλιώς χρησιμοποιείται η τιμή  $N_{SPT}$  (αριθμός κρούσεων για πρότυπη διείδυση 30 cm). Η ταχύτητα  $v_{s,30}$  αντιστοιχεί στη μέση ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων στα ανώτερα 30m εδάφους και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i}} \quad (4.1)$$

Όπου  $h_i$  = πάχος στρώματος (m),  $v_i$  = ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων στρώματος  $i$  και  $N$  = πλήθος στρωμάτων στα ανώτερα 30 m εδάφους. Στον πίνακα 10 παρουσιάζεται η κατάταξη των εδαφών και το εύρος των τιμών αυτών στις παραμέτρους  $v_{s,30}$ ,  $N_{SPT}$  και  $C_u$  (kPa) “(Γιάννης Ψυχάρης, Βασικές διατάξεις Ευρωκώδικα 8, 2014) ενώ στο πίνακα 11 οι τιμές της  $v_{s,30}$  για την εκάστοτε γραμμή μελέτης.

Βάση των ανωτέρω το έδαφος στην περιοχή μελέτης με ταχύτητα  $v_{s,30} = 560,455$  m/s εντάσσεται στην κατηγορία εδάφους Β: αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλίκων, ή πολύ σκληρής αργίλου, πάχους τουλάχιστον αρκετών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος, με μέτρο  $v_{s,30}$  300 με 800 m/s, τιμή  $N_{SPT} > 50$  και  $C_u > 250$  Kpa.

Κατάταξη εδαφών				
Κατηγορία εδάφους	Περιγραφή στρωματογραφίας	Παράμετροι		
		$V_{s,30}$	$N_{SPT}$	$c_u$ (kPa)
A	Βράχος ή άλλος βραχώδης γεωλογικός σχηματισμός που περιλαμβάνει το πολύ 5 m ασθενέστερου επιφανειακού υλικού	> 800	–	–
B	Αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλίκων, ή πολύ σκληρής αργίλου, πάχους τουλάχιστον αρκετών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος	360 - 800	> 50	> 250
C	Βαθιές αποθέσεις πυκνής ή μετρίως πυκνής άμμου, χαλίκων ή σκληρής αργίλου πάχους από δεκάδες έως πολλές εκατοντάδες μέτρων	180 - 360	15 - 50	70 - 250
D	Αποθέσεις χαλαρών έως μετρίως χαλαρών μη συνεκτικών υλικών (με ή χωρίς κάποια μαλακά στρώματα συνεκτικών υλικών), ή κυρίως μαλακά έως μετρίως σκληρά συνεκτικά υλικά	< 180	< 15	< 70
E	Εδαφική τομή που αποτελείται από ένα επιφανειακό στρώμα ύψους με τιμές $v_s$ κατηγορίας C ή D και πάχους που ποικίλλει μεταξύ περίπου 5 m και 20 m, με υπόστρωμα από πιο σκληρό υλικό με $v_s > 800$ m/s			
$S_1$	Αποθέσεις που αποτελούνται ή που περιέχουν ένα στρώμα πάχους τουλάχιστον 10 m μαλακών αργίλων/ιλών με υψηλό δείκτη πλαστικότητας ( $PI > 40$ ) και υψηλή περιεκτικότητα σε νερό	< 100 (ενδεικτικό)	–	10 - 20
$S_2$	Στρώματα ρευστοποιήσιμων εδαφών, ευαίσθητων αργίλων, ή οποιαδήποτε άλλη εδαφική τομή που δεν περιλαμβάνεται στους τύπους A – E ή $S_1$			

**Πίνακας 10:** Κατάταξη εδαφών βάση κλίμακας Ευρωκώδικα 8.

Περιοχή	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Σύνολο
Ταχύτητα $V_{s,30}$ (m/s)	465.927	484.982	459.888	794.387	500.266	657.281	560.455

**Πίνακας 11:** Αποτελέσματα κατάταξης εδαφών στην περιοχή μελέτης.

### 5.3 Προτάσεις

Προτείνεται:

- όρυξη διερευνητικών γεωτρήσεων και εργαστηριακή μελέτη των δειγμάτων προς επιβεβαίωση των σεισμικών και ηλεκτρικών διασκοπήσεων στην περιοχή μελέτης.
- Γεωφυσική μελέτη της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης του φράγματος.
- Περαιτέρω συλλογή γεωλογικών, γεωτρητικών, γεωφυσικών και βροχομετρικών πληροφοριών της ευρύτερης περιοχής με σκοπό την μοντελοποίηση της υδρολογικής συμπεριφοράς της περιοχής.



## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική Βιβλιογραφία:

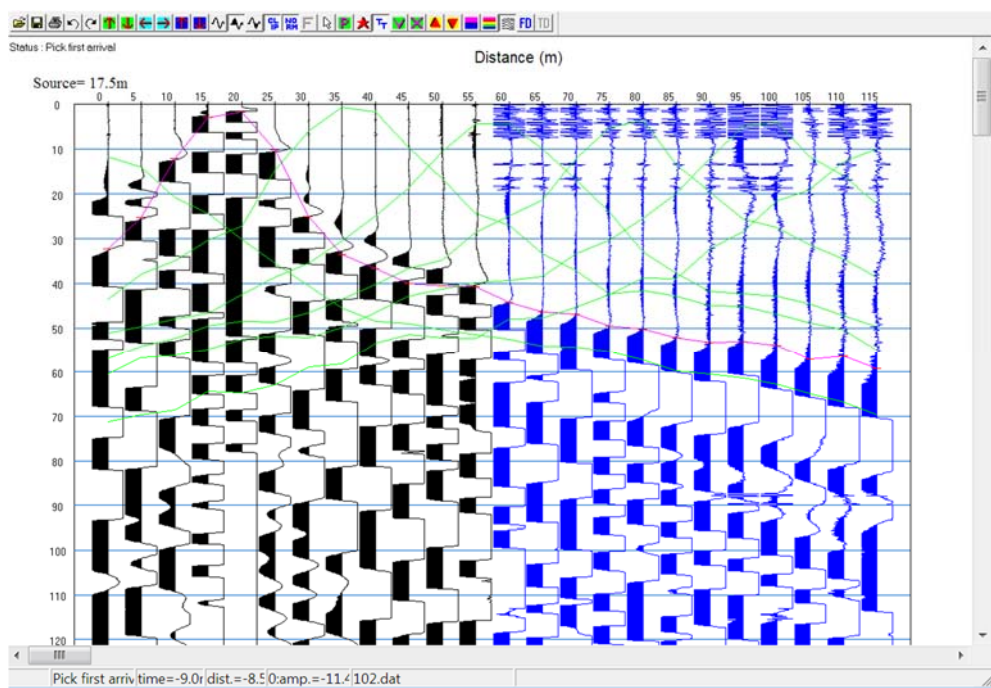
- **Αποστολόπουλος Γ. (2013).** *Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής*, ΕΜΠ, Αθήνα.
- **Βαφείδης, Α. (1993).** Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Ι, Σεισμικές μέθοδοι. *Σημειώσεις μαθήματος*. Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά.
- **Βαφείδης, Α. (2001).** Εφαρμοσμένη Γεωφυσική ΙΙ. *Σημειώσεις μαθήματος*. Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά.
- **Δρακάτος Γ. (1989).** Σεισμική τομογραφία, “προσδιορισμός ζωνών ταχύτητας στον ευρύτερο Ελληνικό χώρο”
- **Λούης, Ι. (2004).** Εισαγωγικά Μαθήματα στην Διερευνητική Γεωφυσική. *Σημειώσεις μαθήματος*. Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστημίου Αθήνας.
- **Κρητικάκης Σ. Γ.1 , Βαφείδης, Gourry J., (2004)** *Ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και εφαρμογή σε χώρο απόθεσης απορριμμάτων στη Β. Ιταλία και στη βιομηχανική περιοχή Porto Petroli, Genoa,*
- **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.*
- **Παπαθανασίου, Χ., (2007),** Διπλωματική Εργασία “Γεωφυσική Έρευνα με την μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας στον Μόχο Ηρακλείου”
- **Ραπτάκης Δ. (1995),** *Συμβολή στον προσδιορισμό της γεωμετρίας και των δυναμικών ιδιοτήτων των εδαφικών σχηματισμών και στη σεισμική απόκριση τους, Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνική σχολή Α.Π.Θ.*
- **Ψυχάρης, Γ. (2014),** *Βασικές διατάξεις Ευρωκώδικα 8*

### Διεθνής βιβλιογραφία

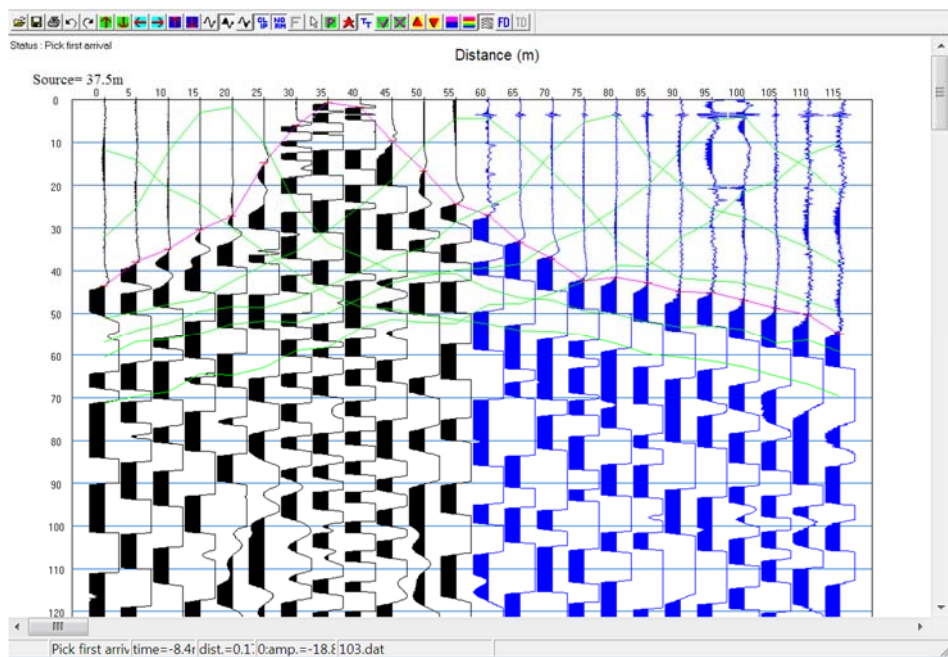
- **Haskell N.A. (1953),** *The dispersion of surface waves in multi-layered media. Bulletin of Seismological Society of America, 43, 17-34.*
- **Miller R.D., Xia J., Park C.B. & Ivanov J.M. 1999.** *Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. The Leading Edge, 18(12),1392-1396.*

- **Miller R.D. & Xia J.** (1999), *Using MASW to Map Bedrock in Oathle, Kansas*, Open file report No. 99-9. Harding Lawson Associates, Lee's Summit, Missouri.
- **SeisImager\_2D Manual**, (2005), Geometrics
- **SeisImager/SW<sup>TM</sup> Manual** (2005), Geometrics
- **Schwab F. & Knopoff L.** (1972). *Fast surface wave and free mode computations. in Bolt B.A. Edition, Methods in computational physics*, Academic Press, 87-180.
- **Rock fractures and fluid flow**, *National Research Council*, 1996)

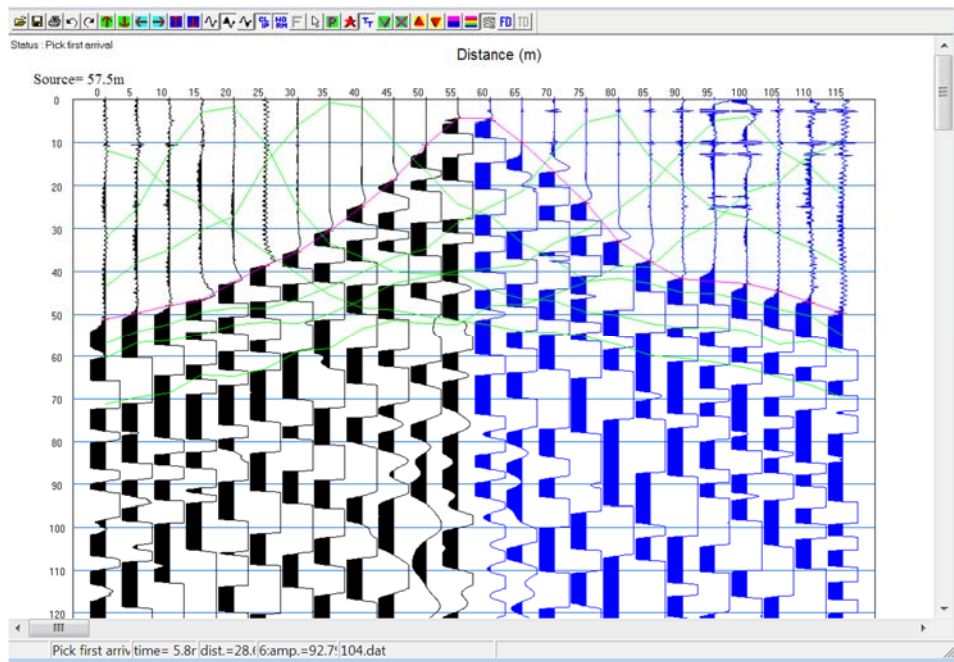
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ



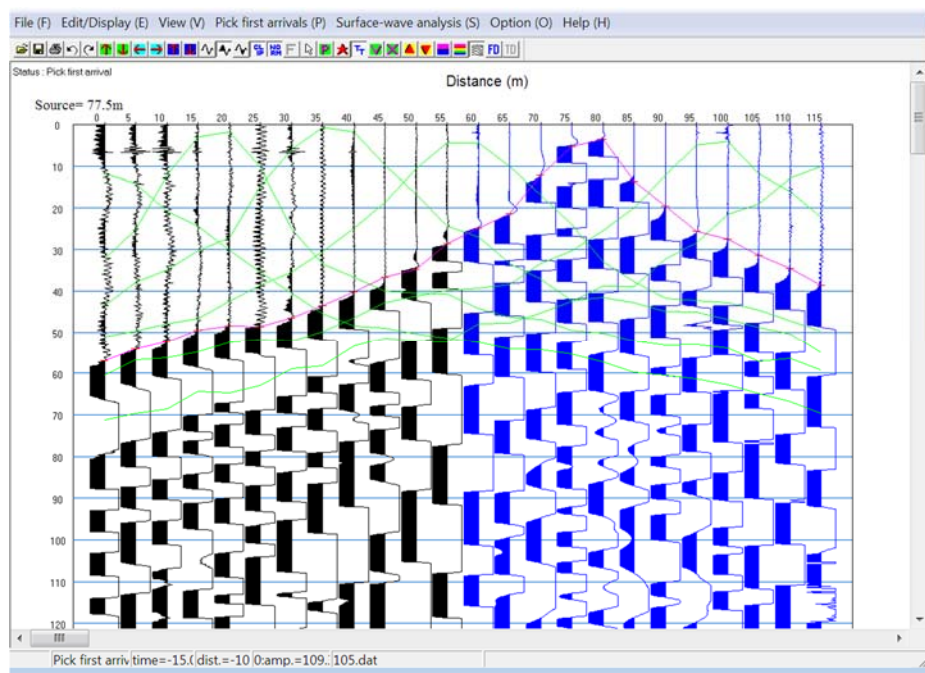
Καταγραφή 102, θέση σεισμικής πηγής στα 17.5 m.



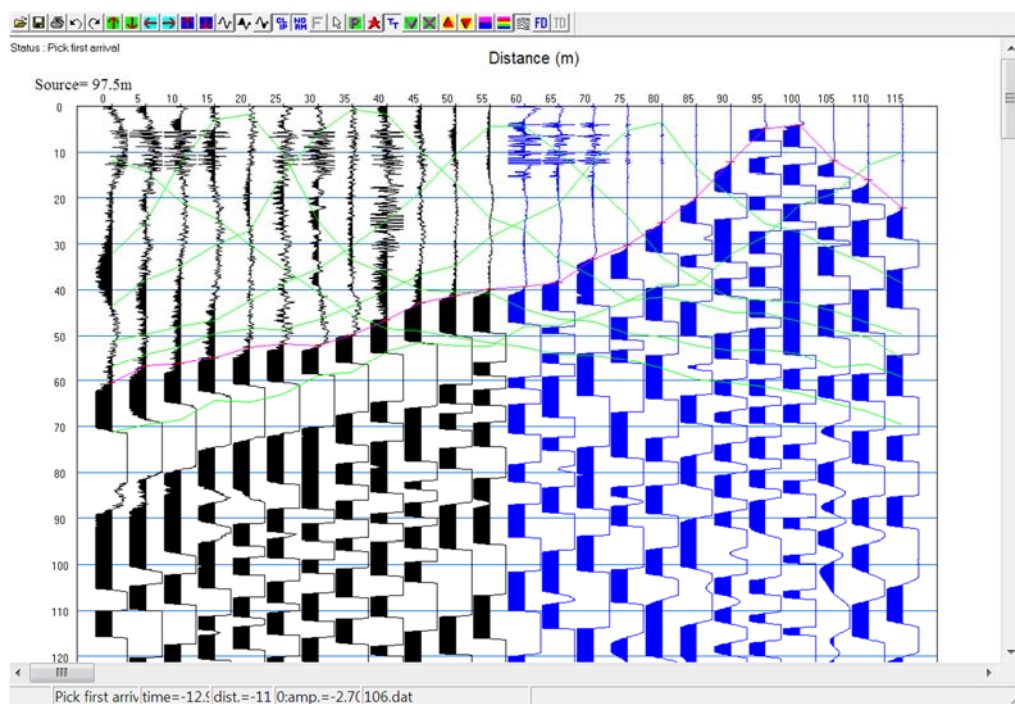
Καταγραφή 103, θέση σεισμικής πηγής στα 37.5 m.



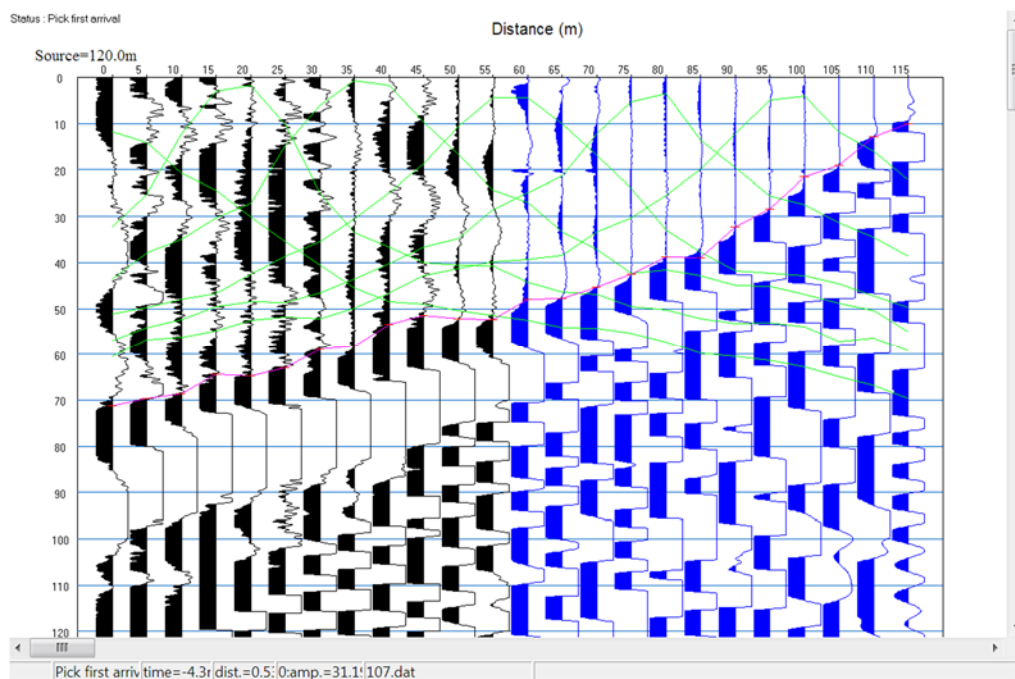
Καταγραφή 104, θέση σεισμικής πηγής στα 57.5 m.



Καταγραφή 105, θέση σεισμικής πηγής στα 77.5 m.



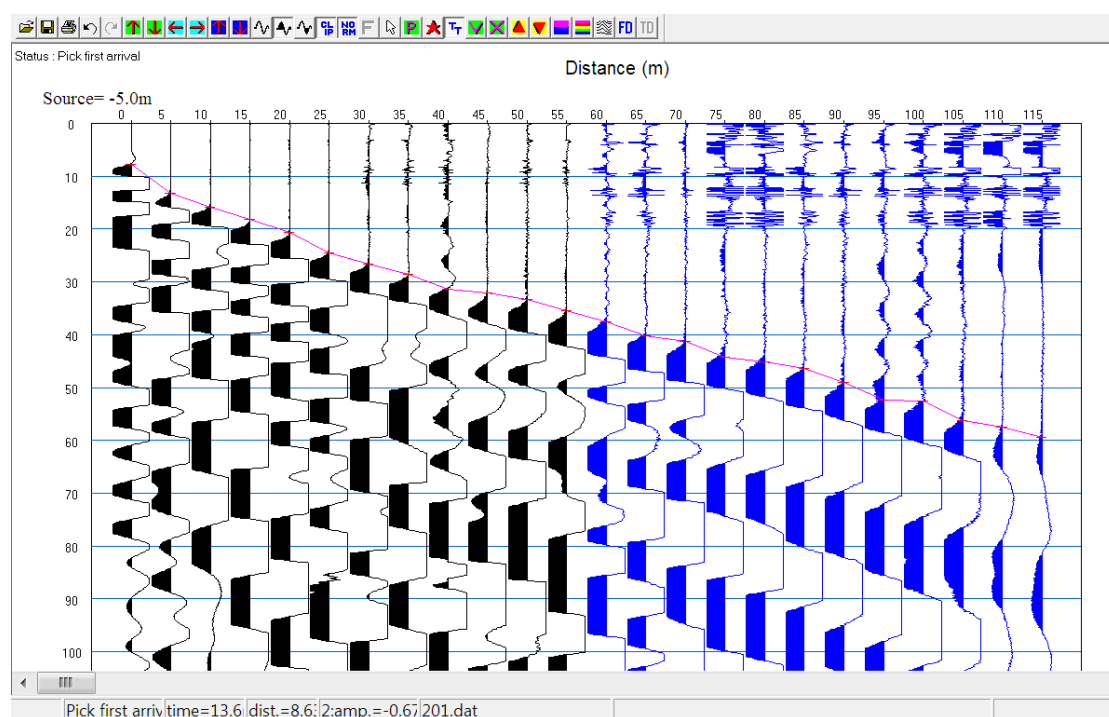
Καταγραφή 106, θέση σεισμικής πηγής στα 97.5 m.



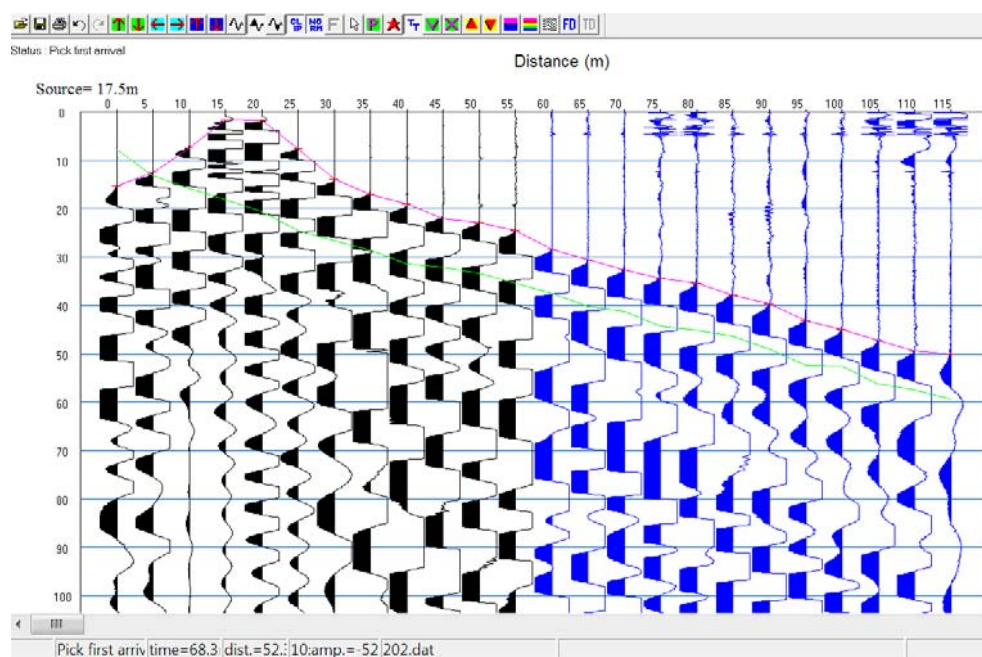
Καταγραφή 107, θέση σεισμικής πηγής στα 120 m.



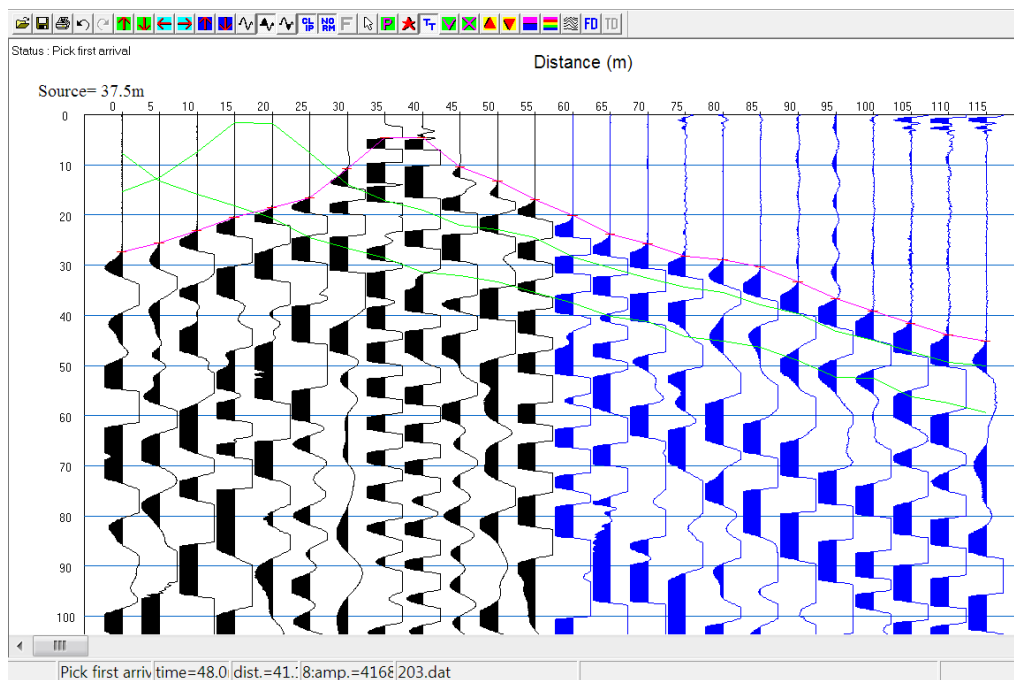
## Σεισμική Γραμμή S2



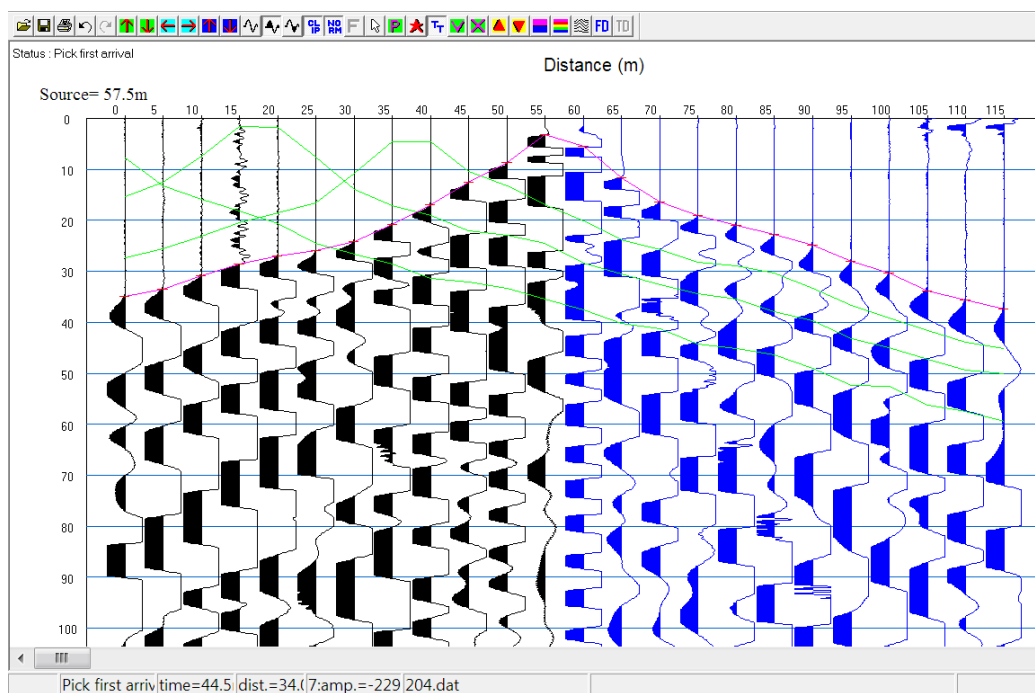
Καταγραφή 201, θέση σεισμικής πηγής στα -5 m.



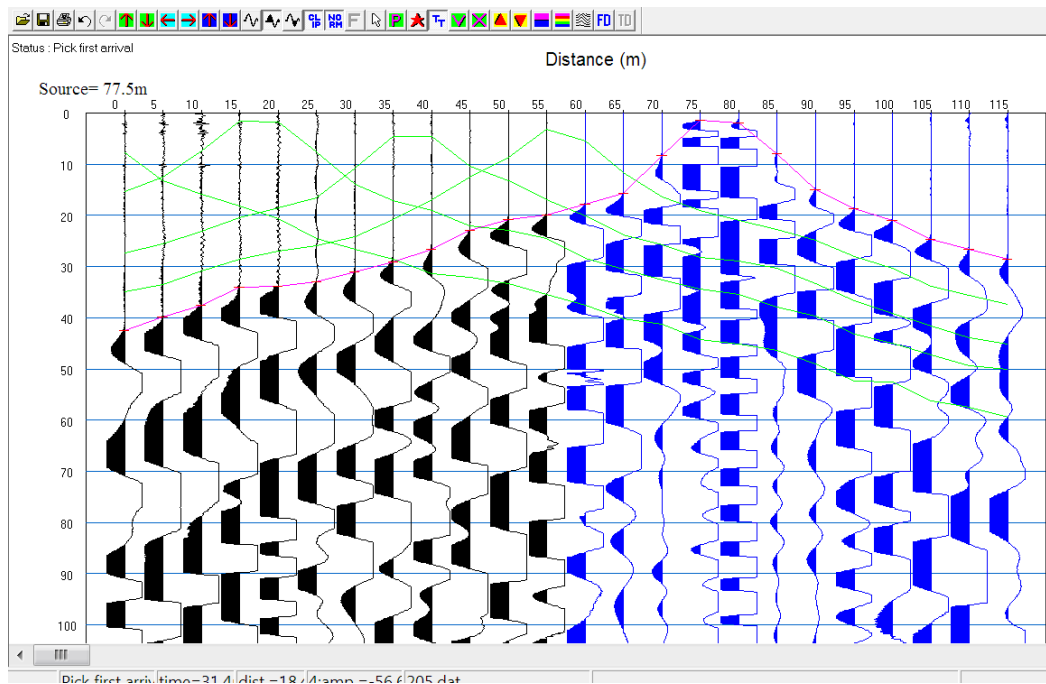
Καταγραφή 202, θέση σεισμικής πηγής στα 17.5 m.



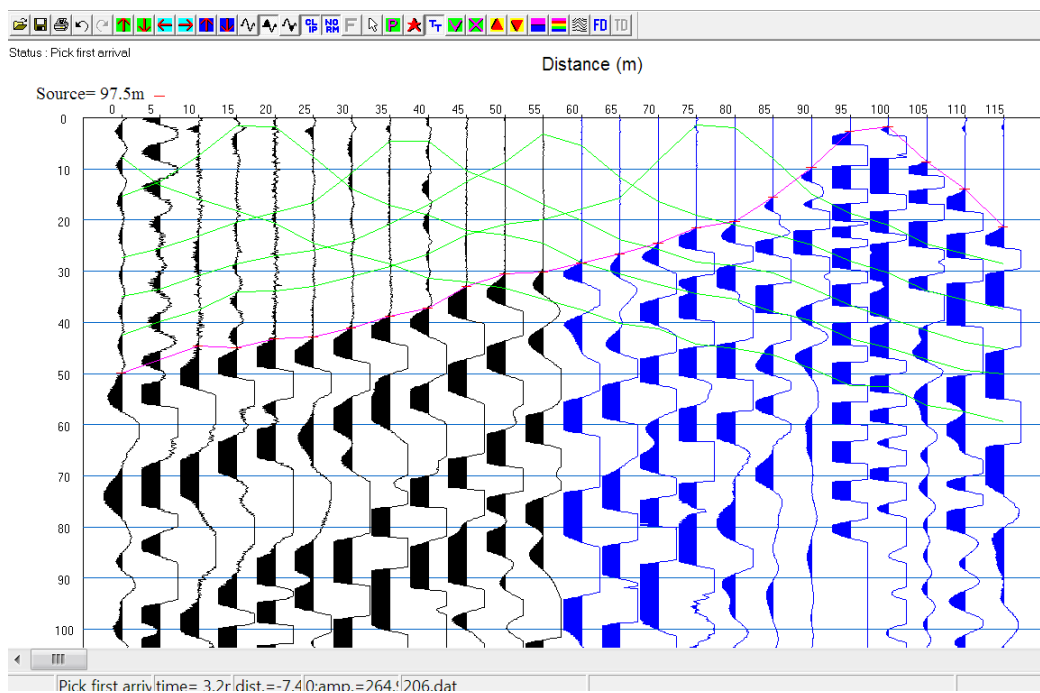
Καταγραφή 203, θέση σεισμικής πηγής στα 37.5 m.



Καταγραφή 204, θέση σεισμικής πηγής στα 57.5 m.

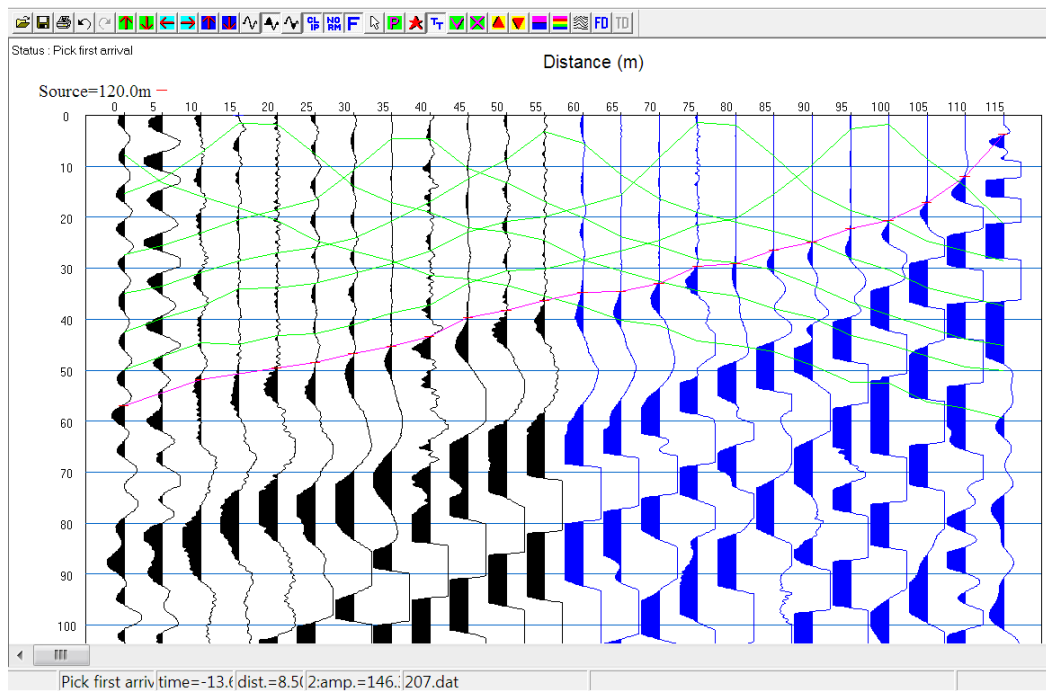


Καταγραφή 205, θέση σεισμικής πηγής στα 77.5 m.



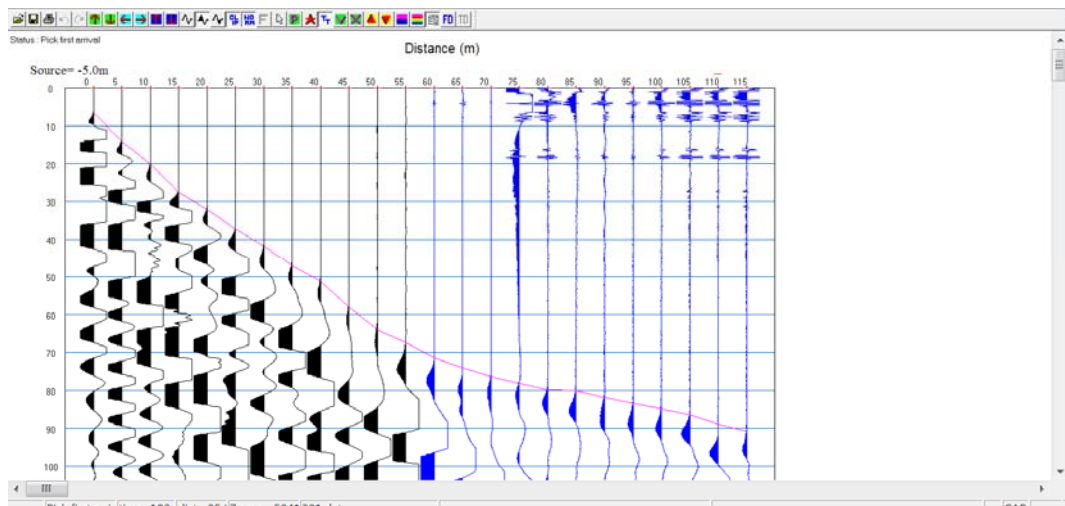
Καταγραφή 206, θέση σεισμικής πηγής στα 97.5 m.



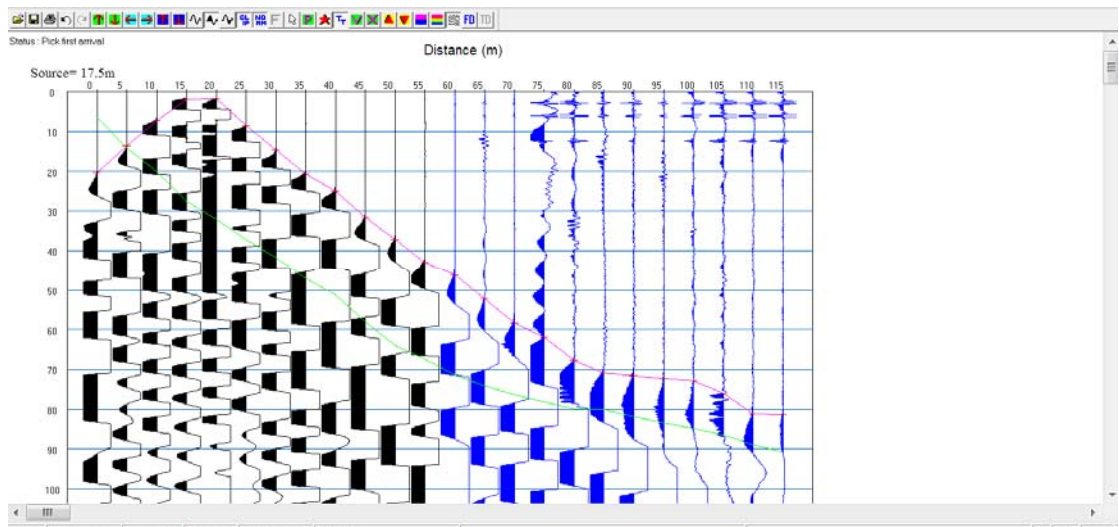


Καταγραφή 207, θέση σεισμικής πηγής στα 120 m.

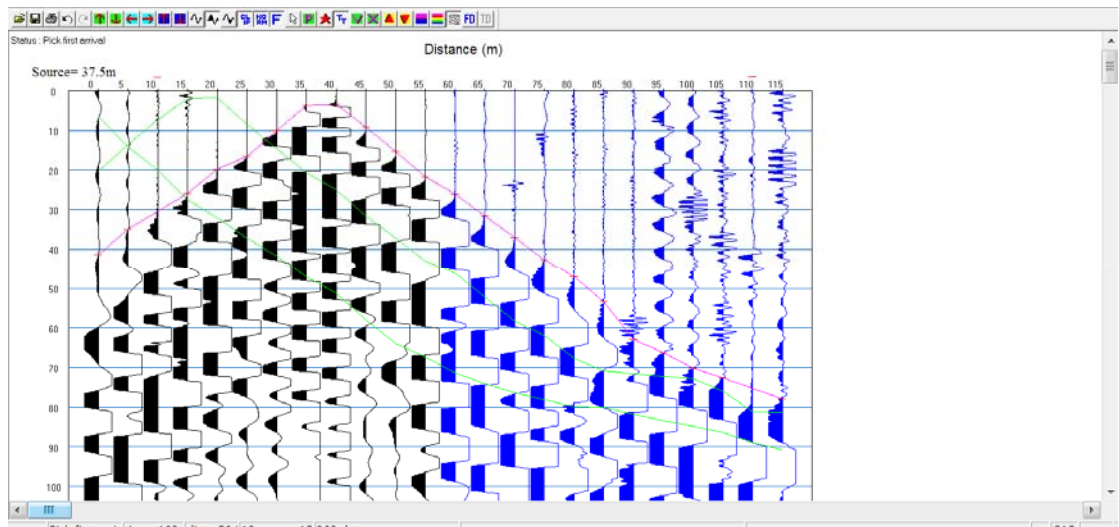
### Σεισμική Γραμμή S3



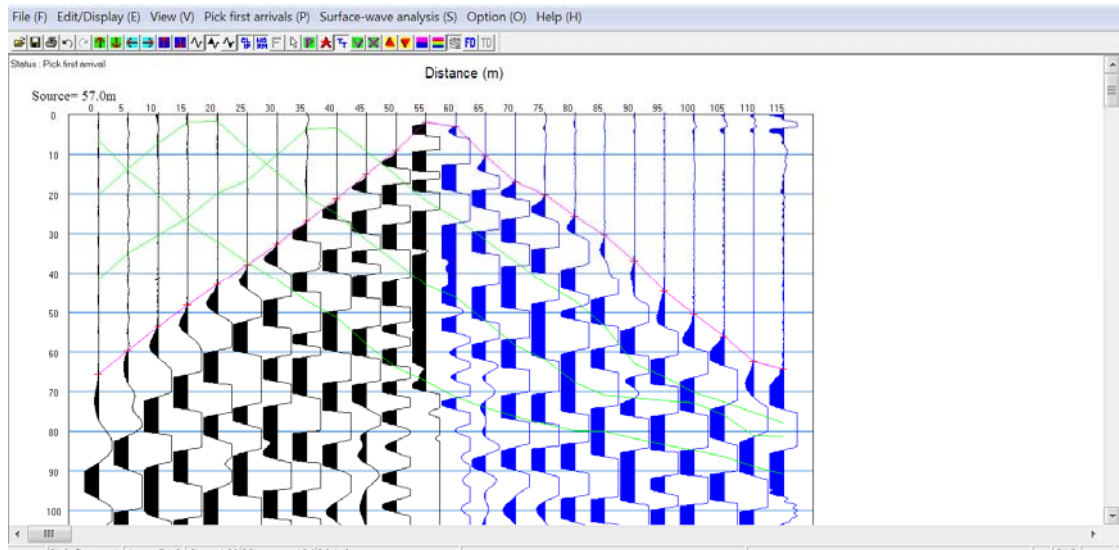
Καταγραφή 301 θέση σεισμικής πηγής στα -5 m.



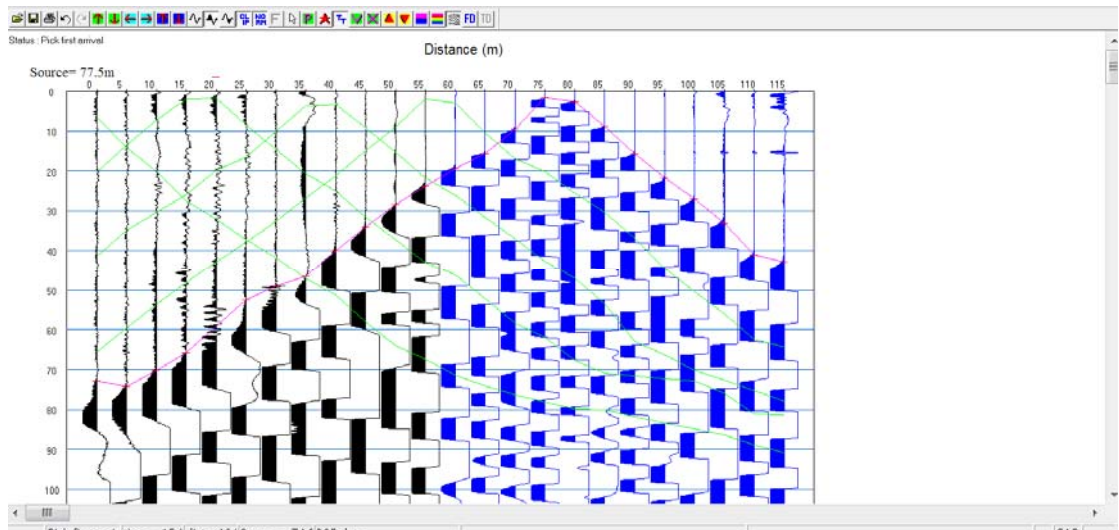
Καταγραφή 302 θέση σεισμικής πηγής στα 17.5 m.



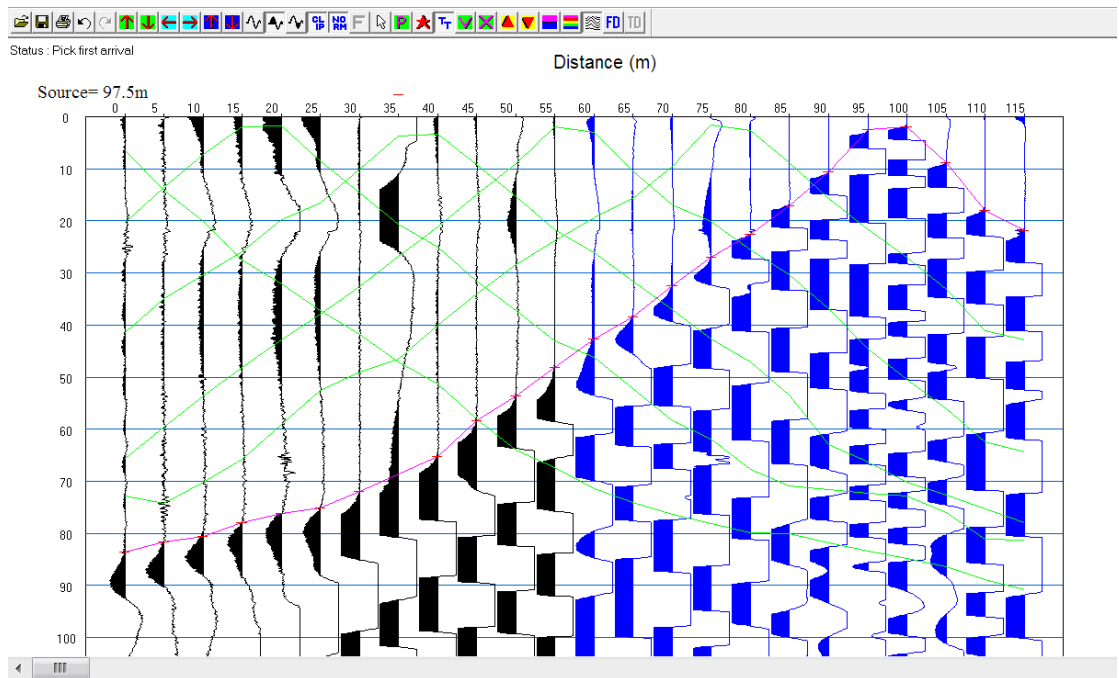
Καταγραφή 303 θέση σεισμικής πηγής στα 37.5 m.



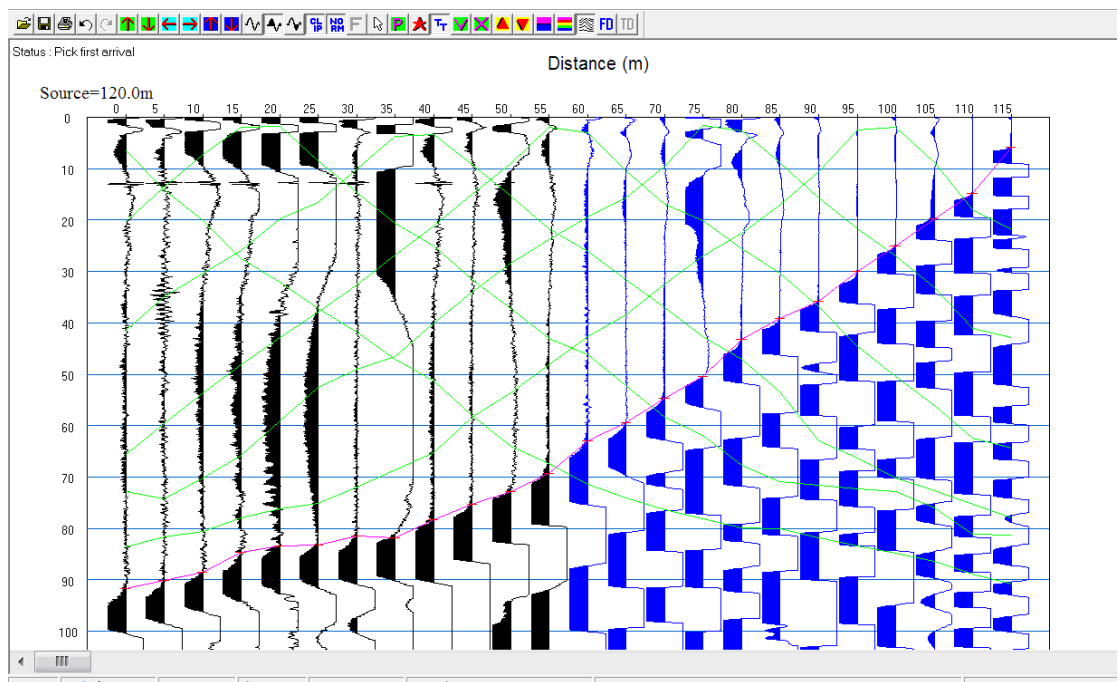
Καταγραφή 304 θέση σεισμικής πηγής στα 57 m.



Καταγραφή 305 θέση σεισμικής πηγής στα 77.5 m.

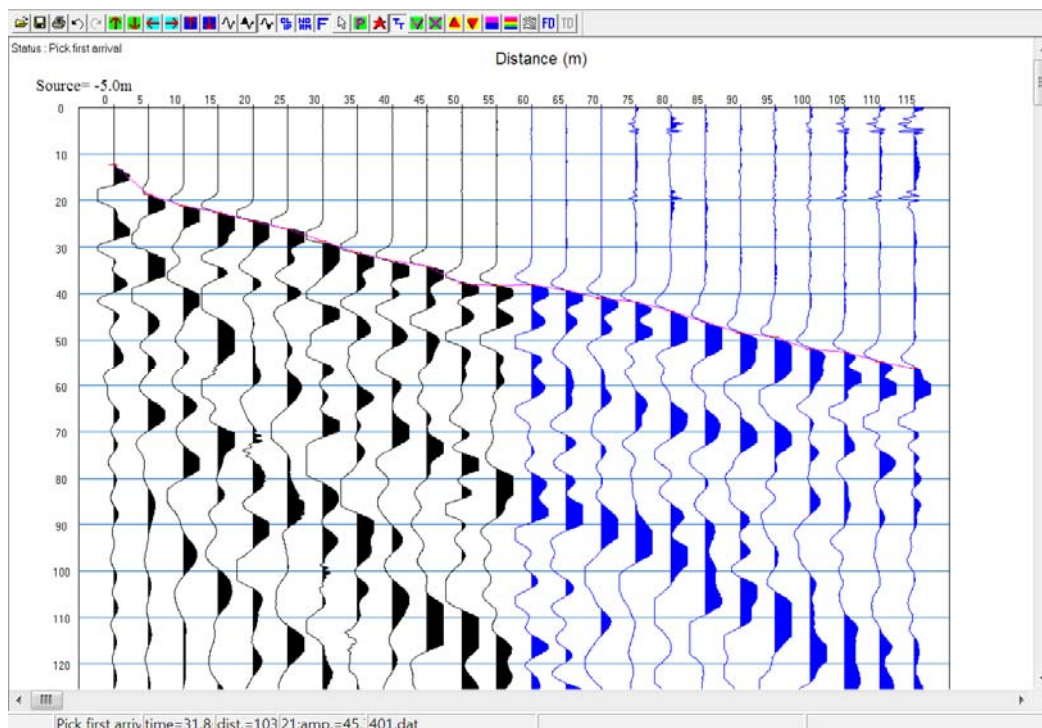


Καταγραφή 306 θέση σεισμικής πηγής στα 97.5 m.

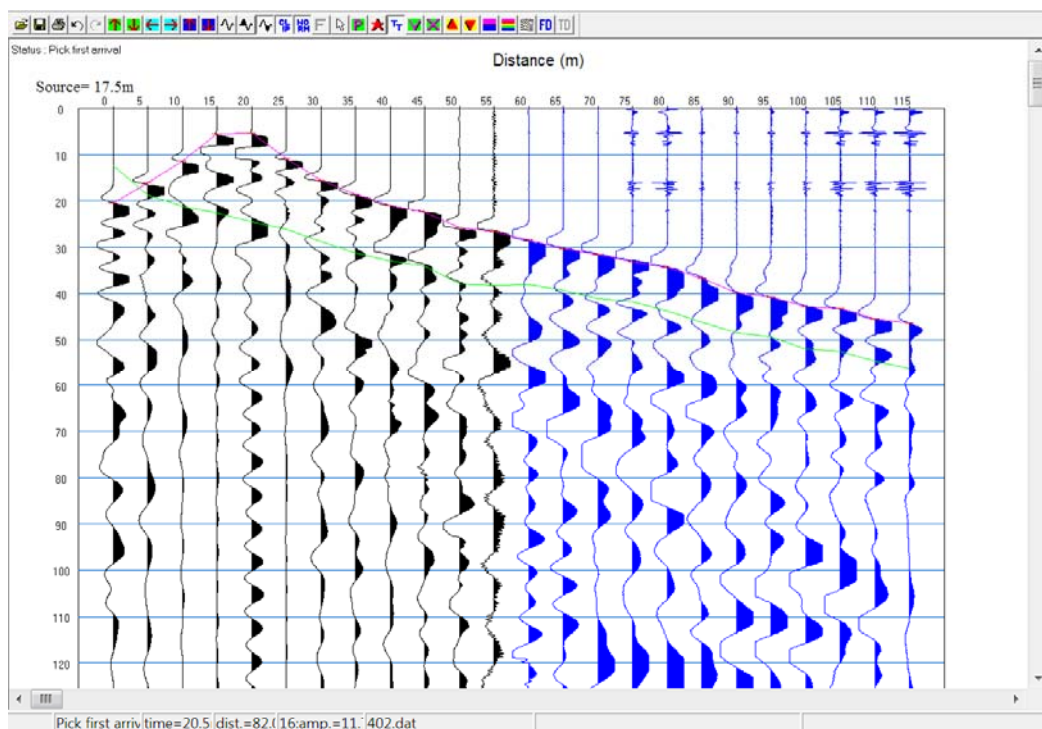


Καταγραφή 307 θέση σεισμικής πηγής στα 120 m.

### Σεισμική Γραμμή S4

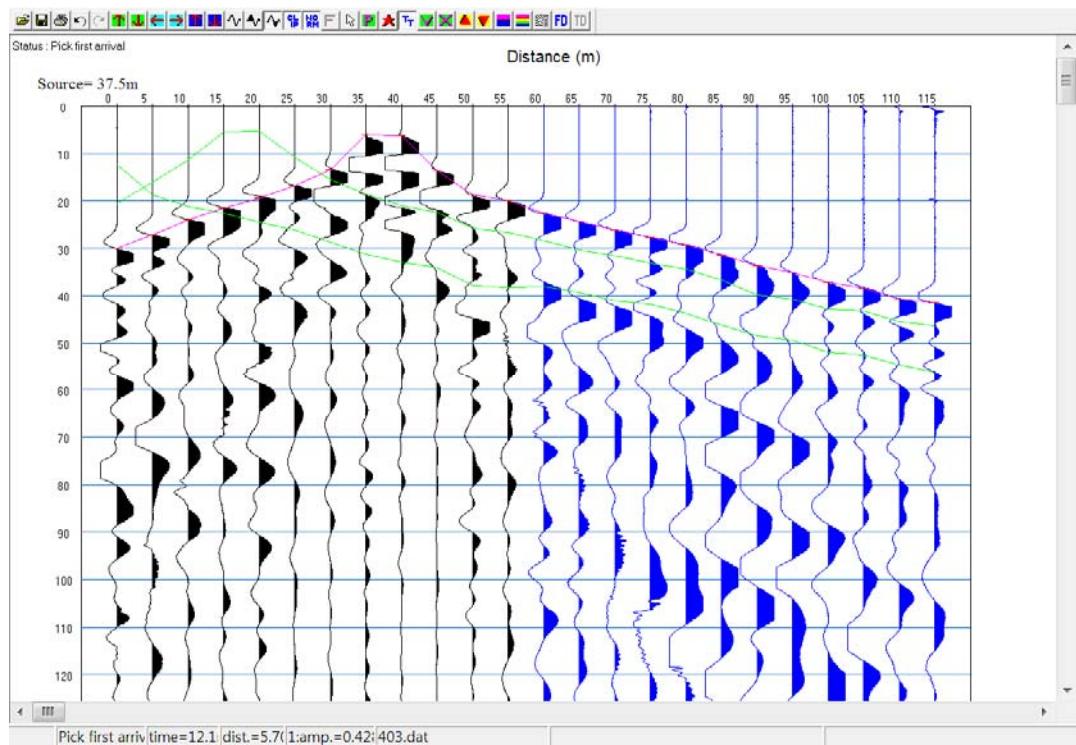


Καταγραφή 401 θέση σεισμικής πηγής στα -5 m.

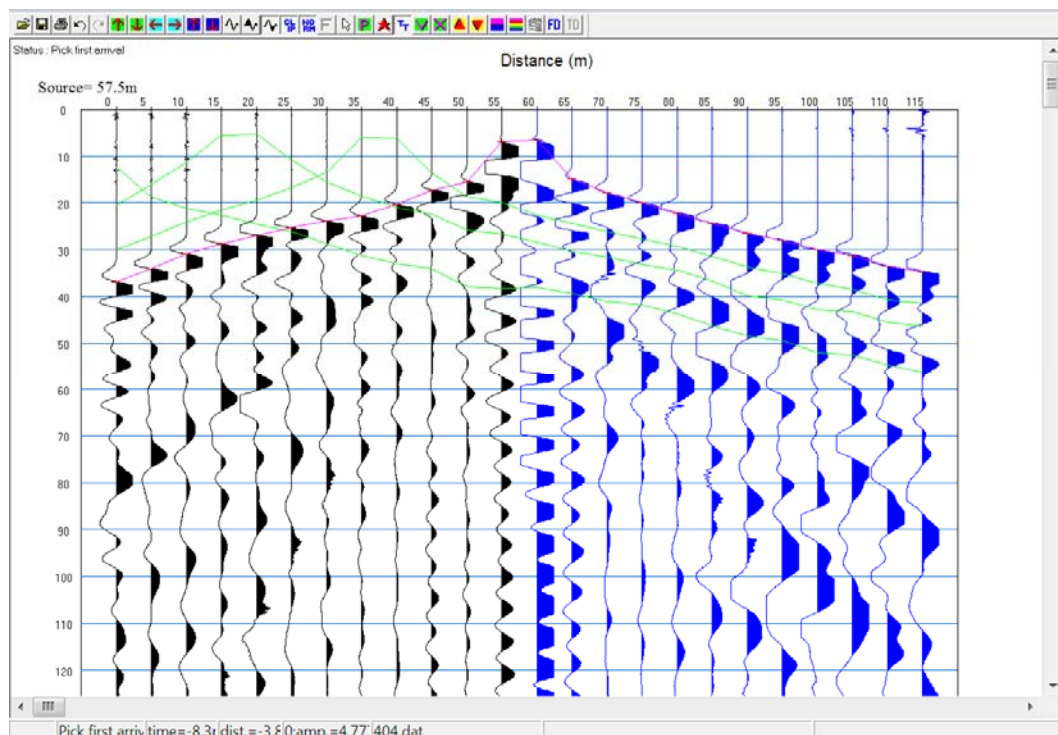


Καταγραφή 402 θέση σεισμικής πηγής στα 17.5 m.

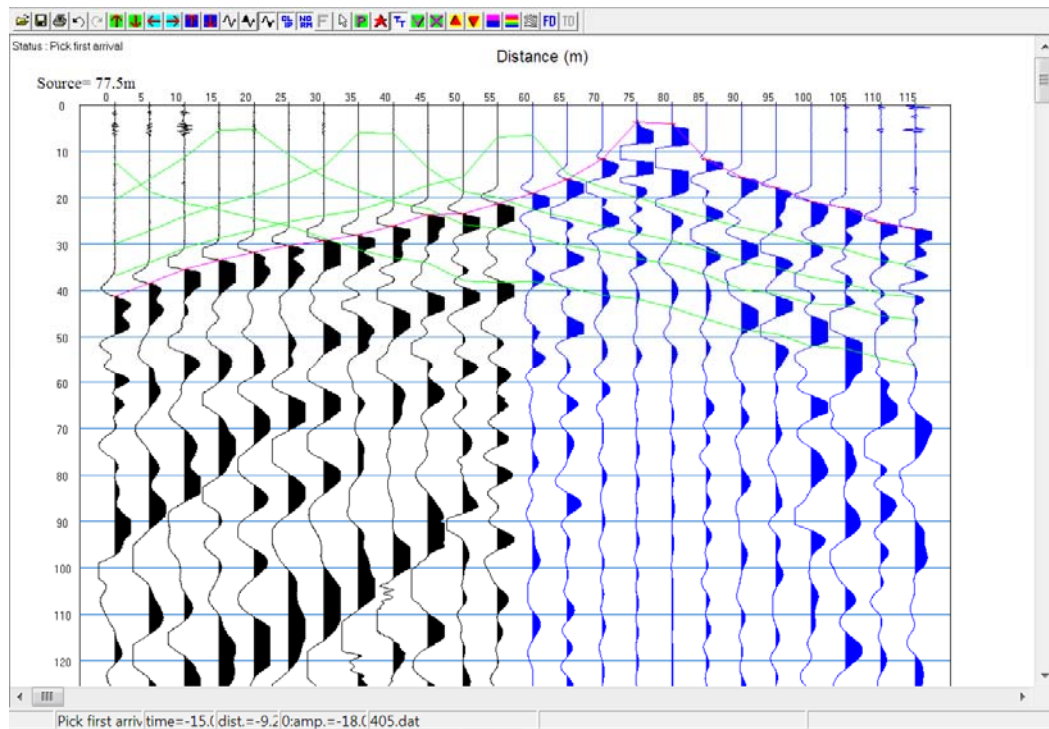




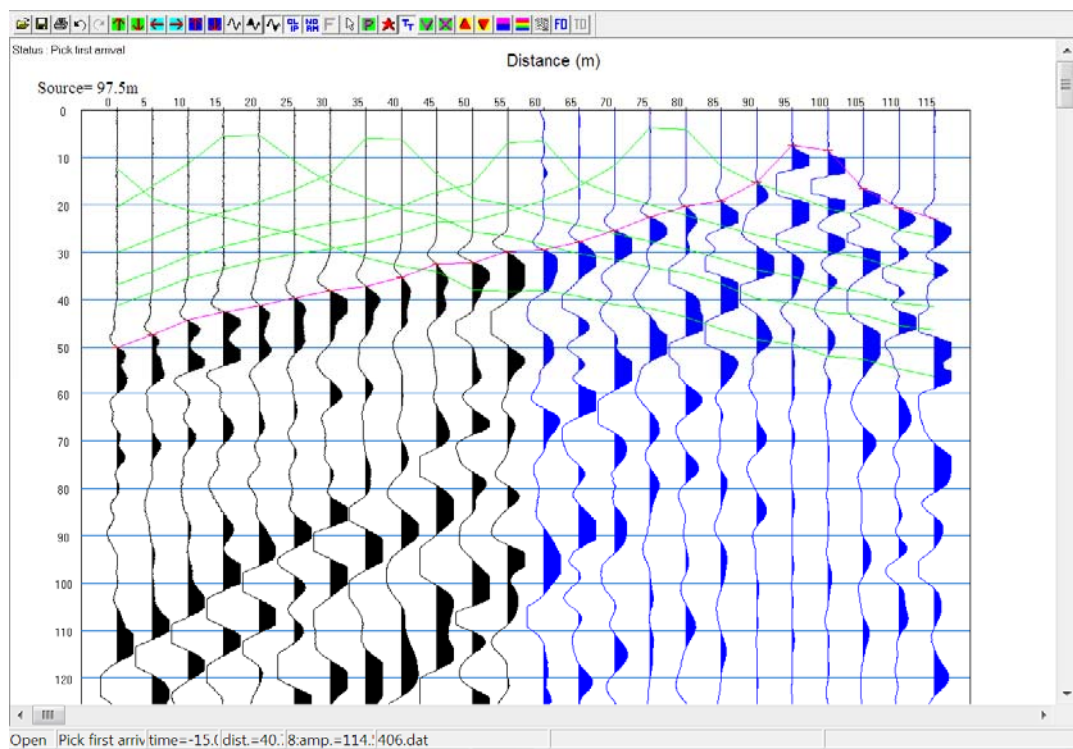
Καταγραφή 403 θέση σεισμικής πηγής στα 37.5 m.



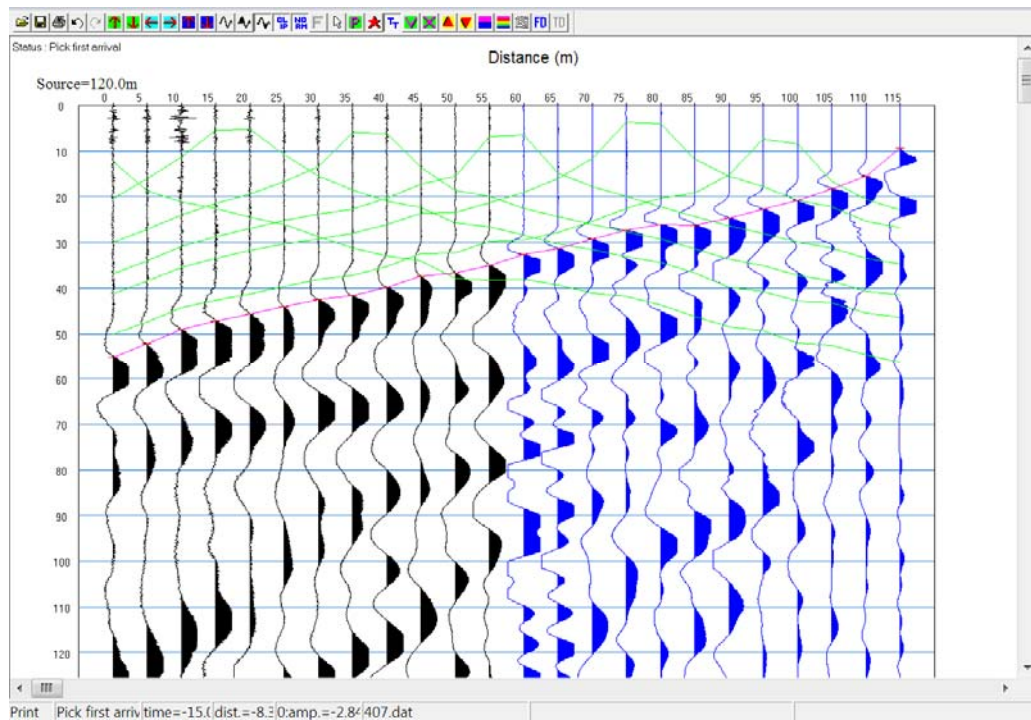
Καταγραφή 404 θέση σεισμικής πηγής στα 57.5 m.



Καταγραφή 405 θέση σεισμικής πηγής στα 77.5 m.

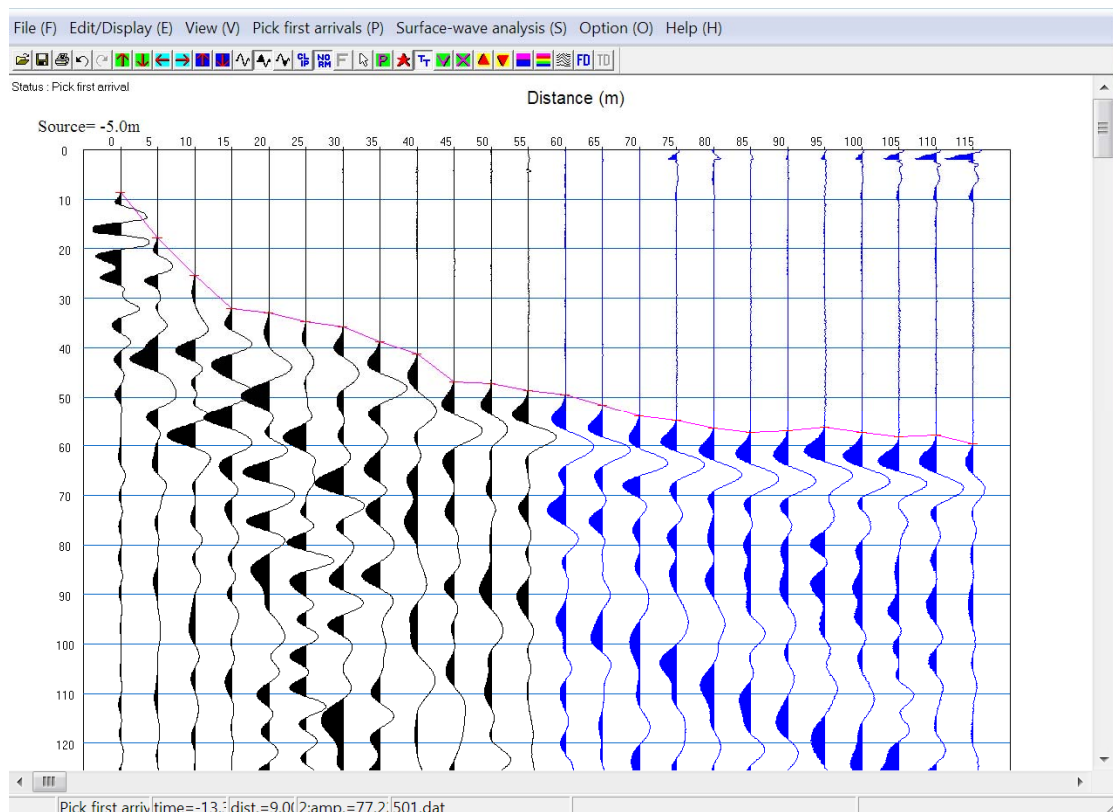


Καταγραφή 406 θέση σεισμικής πηγής στα 97.5 m.



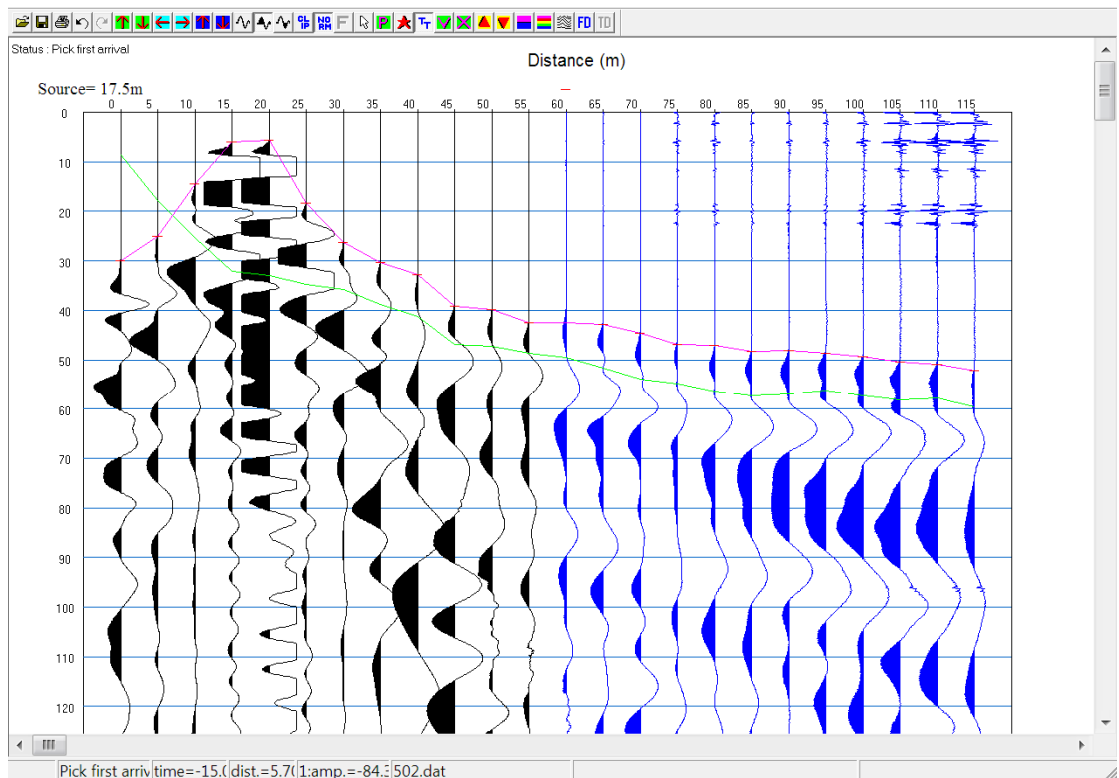
Καταγραφή 407 θέση σεισμικής πηγής στα 120 m.

### Σεισμική Γραμμή S5

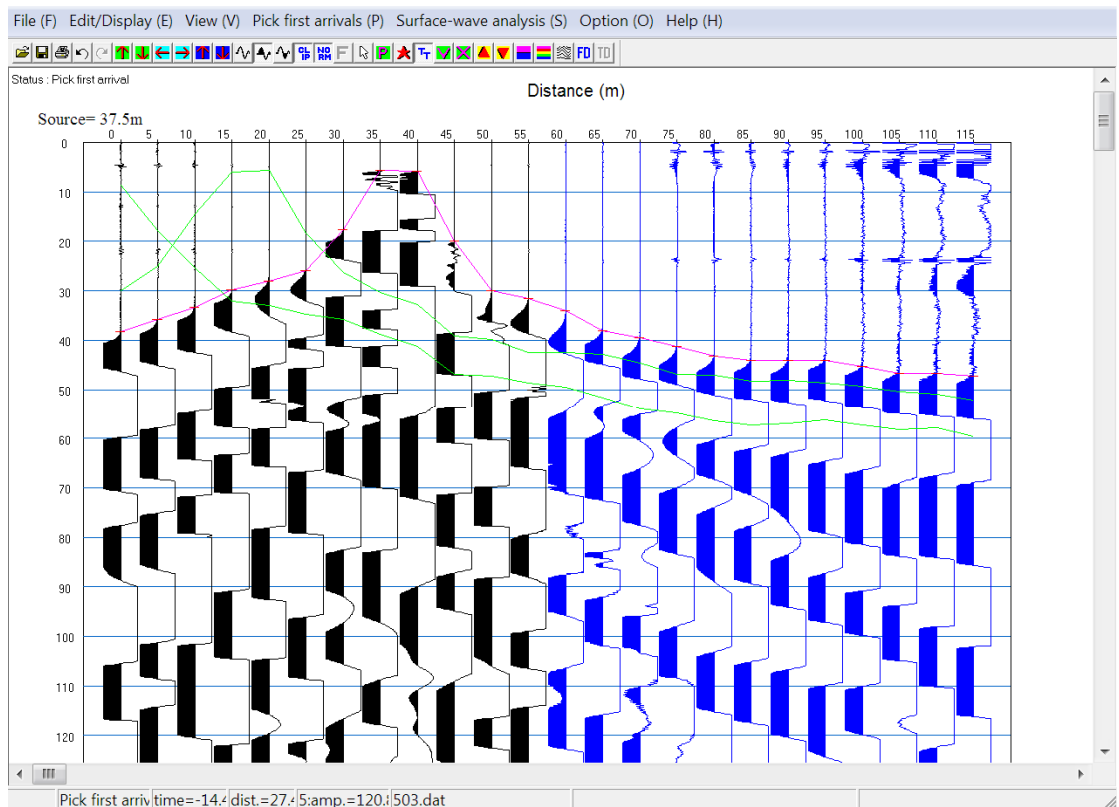


Καταγραφή 501 θέση σεισμικής πηγής στα -5 m.

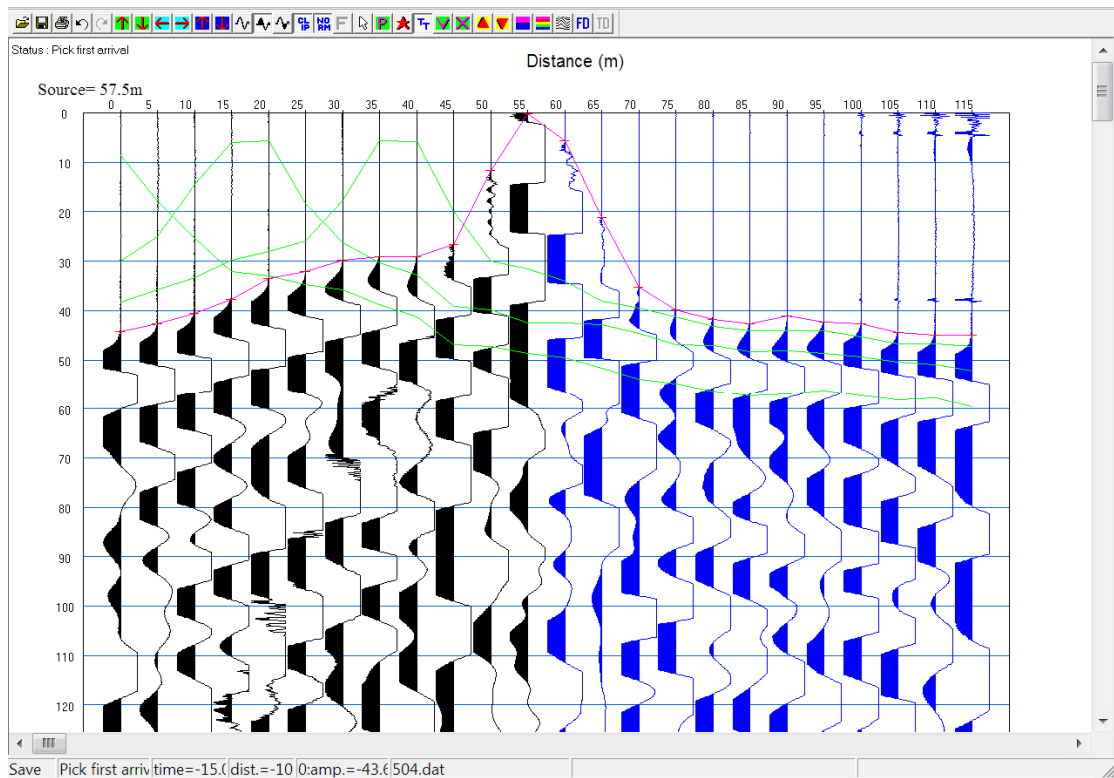




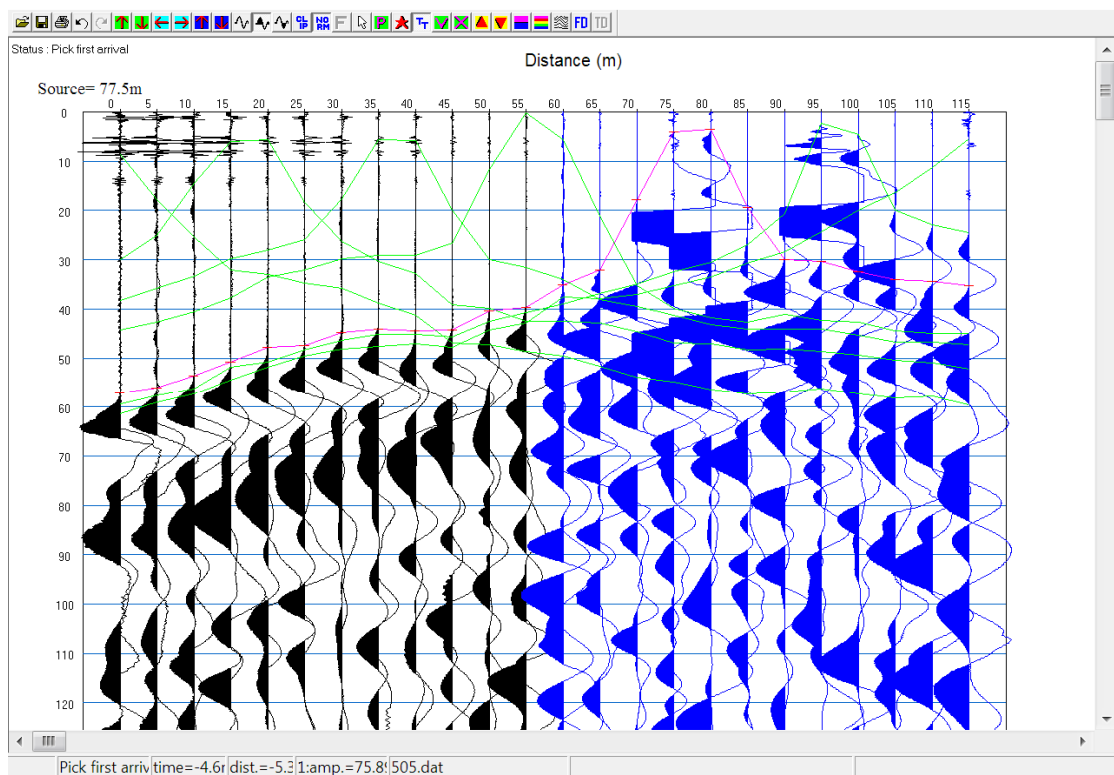
Καταγραφή 502 θέση σεισμικής πηγής στα 17.5 m.



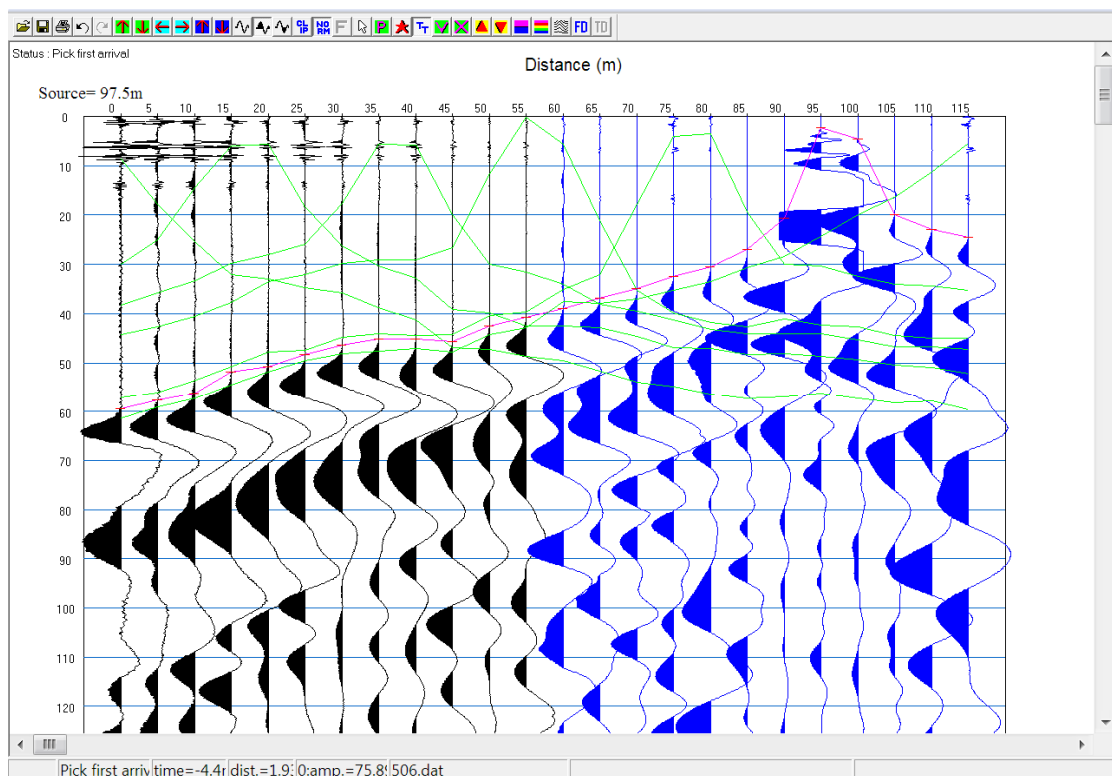
Καταγραφή 503 θέση σεισμικής πηγής στα 37.5 m.



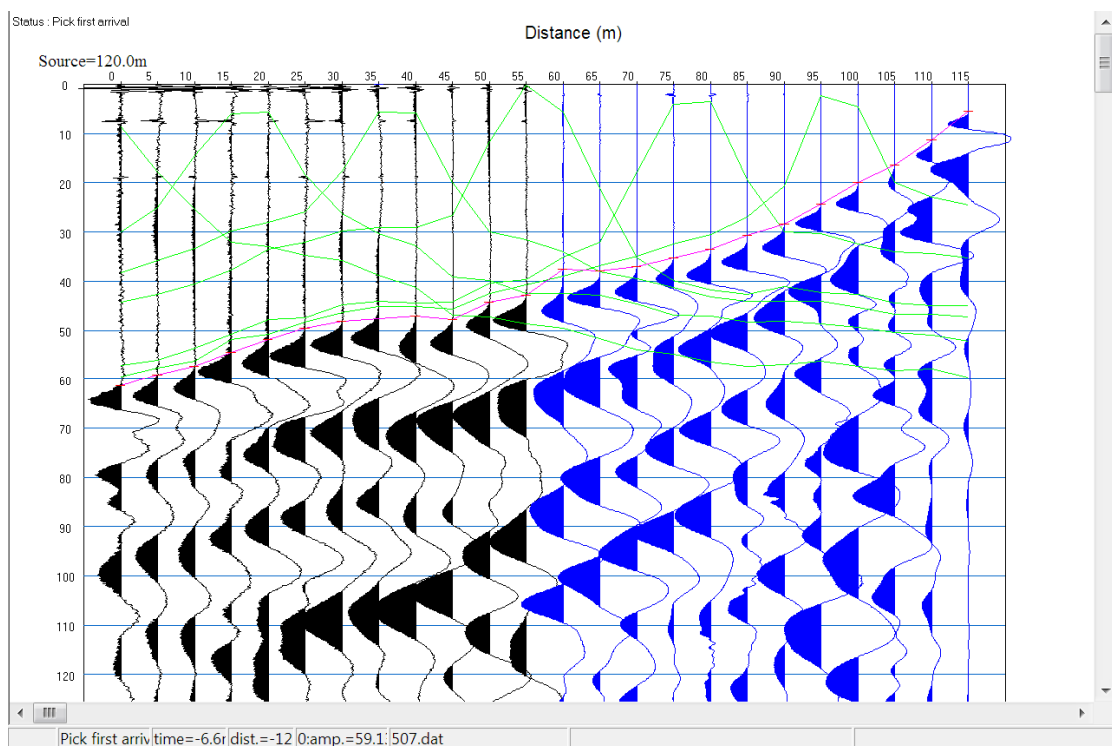
Καταγραφή 504 θέση σεισμικής πηγής στα 57.5 m.



Καταγραφή 505 θέση σεισμικής πηγής στα 77.5 m.

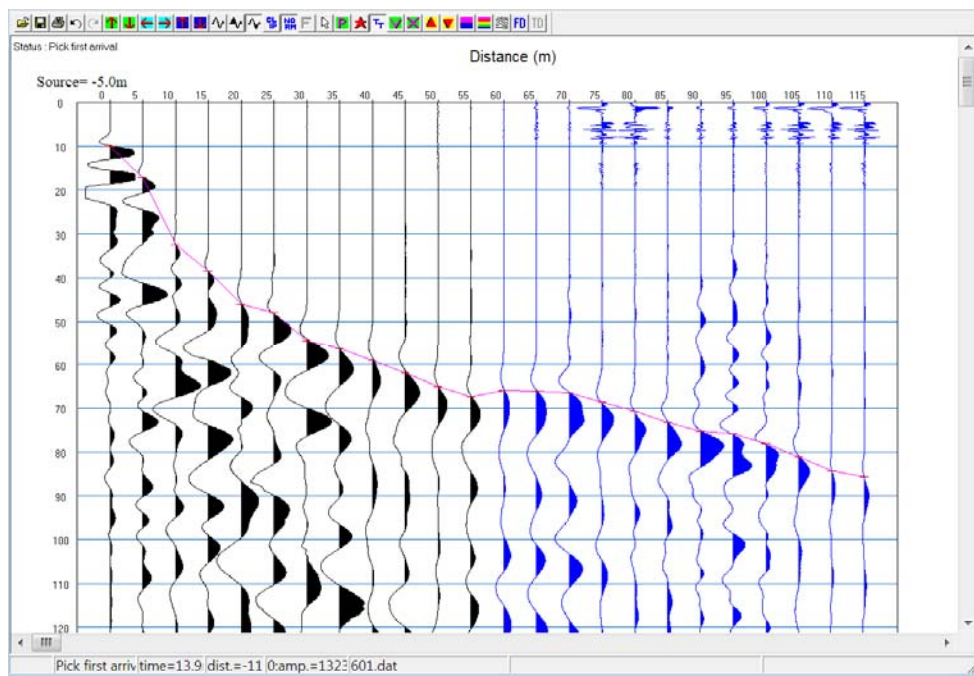


Καταγραφή 506 θέση σεισμικής πηγής στα 97.5 m.

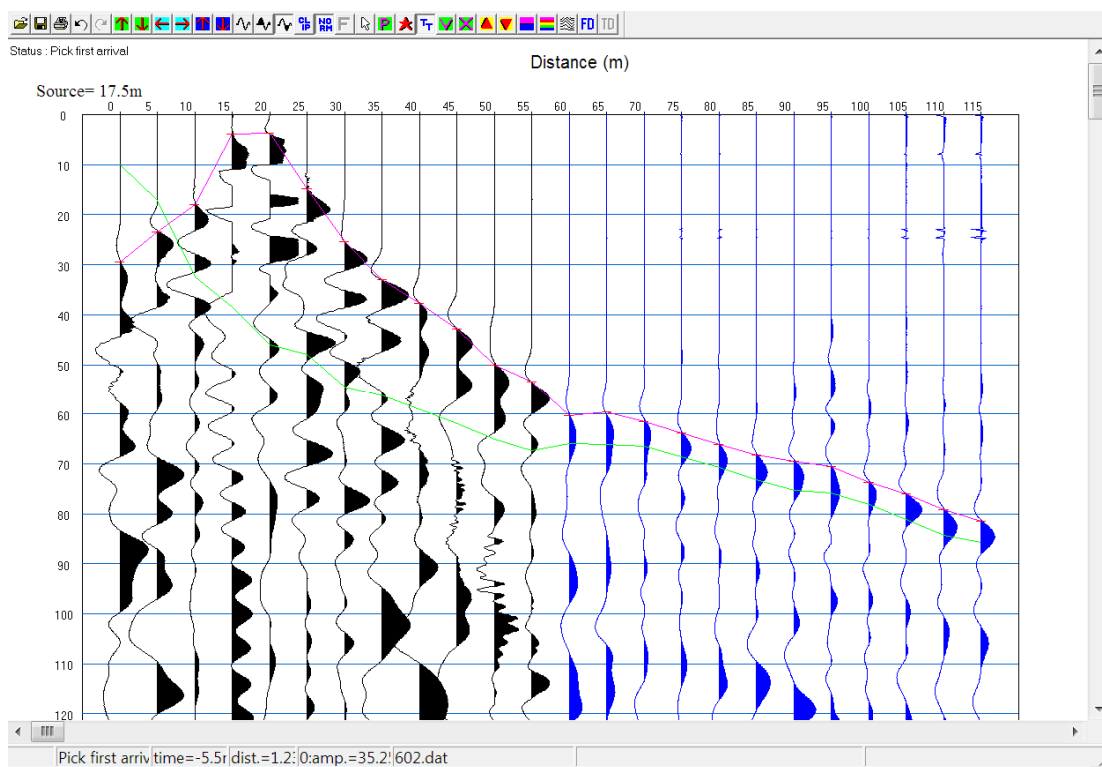


Καταγραφή 507 θέση σεισμικής πηγής στα 120 m.

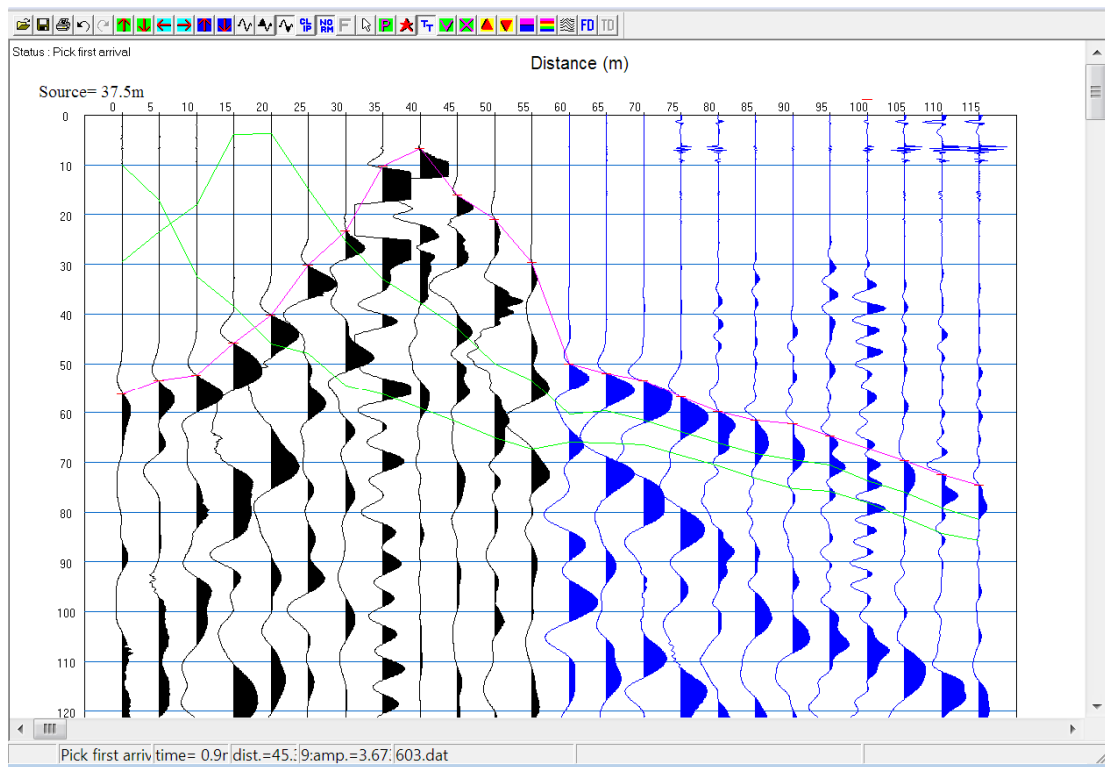
## Σεισμική Γραμμή S6



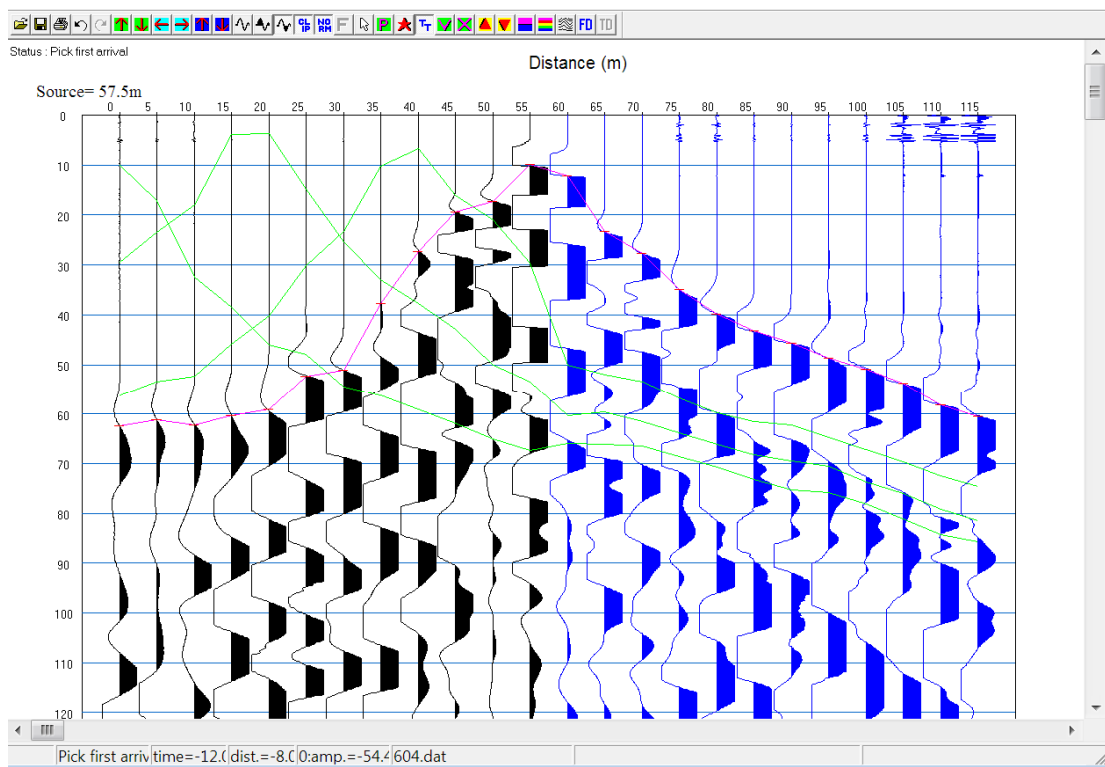
Καταγραφή 601 θέσης σεισμικής πηγής στα -5 m.



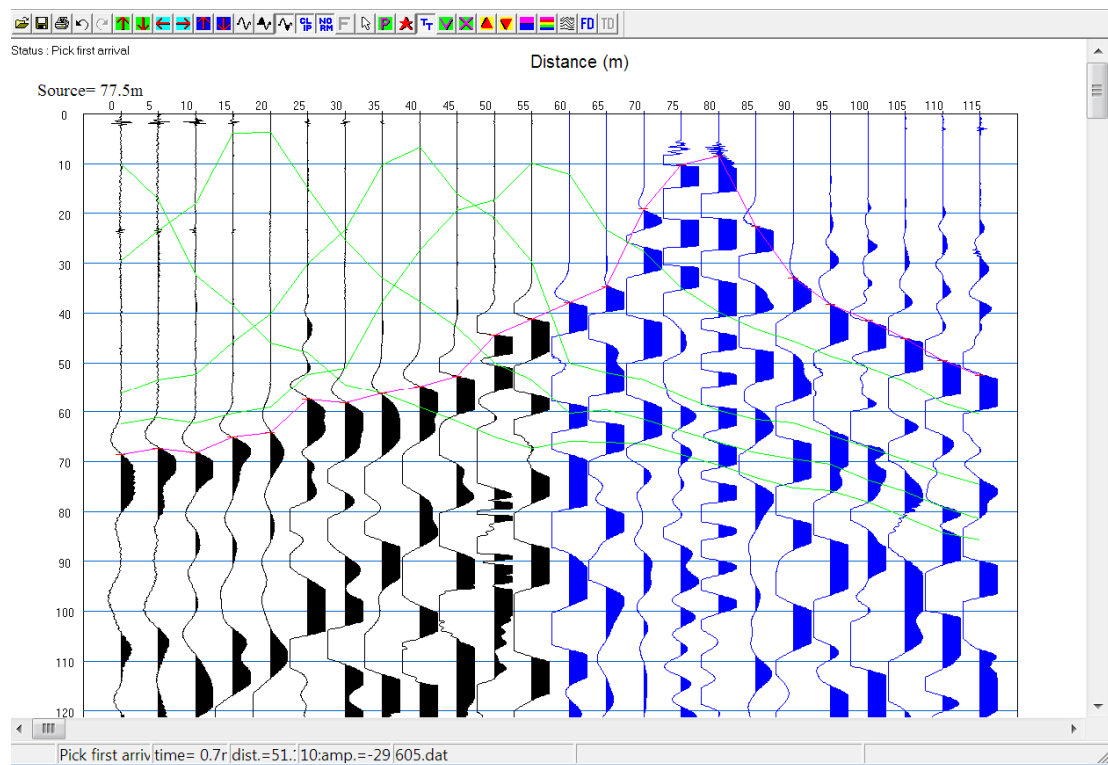
Καταγραφή 602 θέσης σεισμικής πηγής στα 17.5 m.



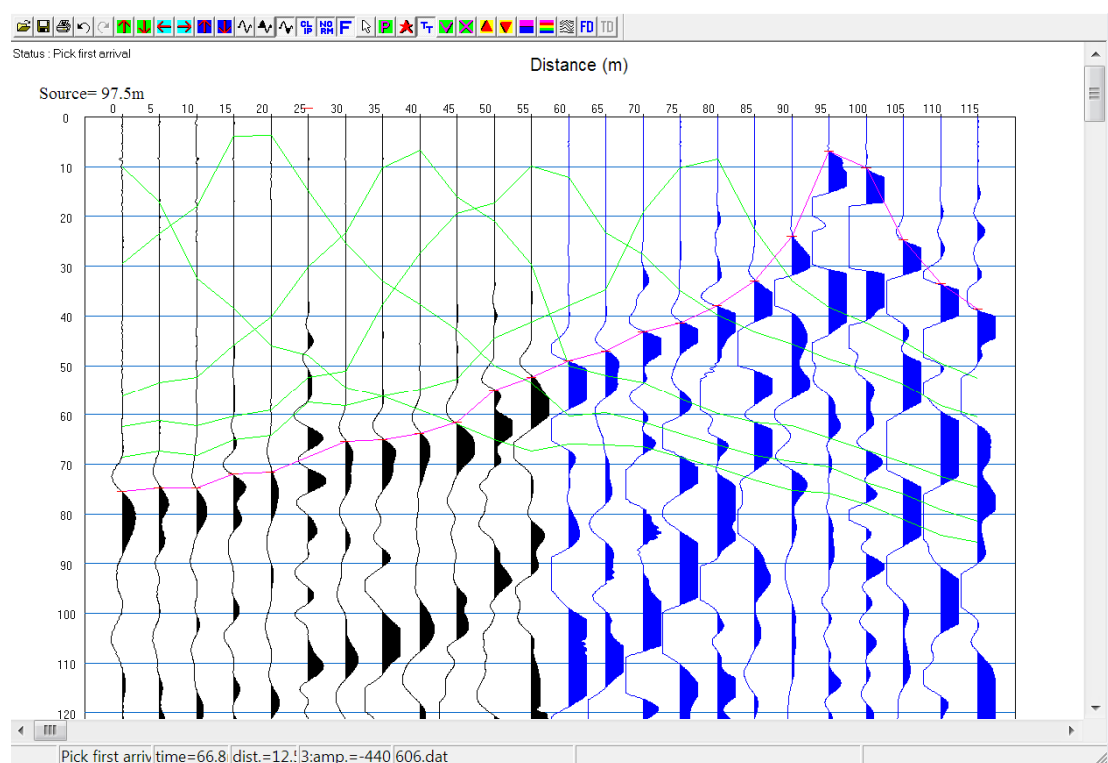
Καταγραφή 603 θέσης σεισμικής πηγής στα 37.5 m.



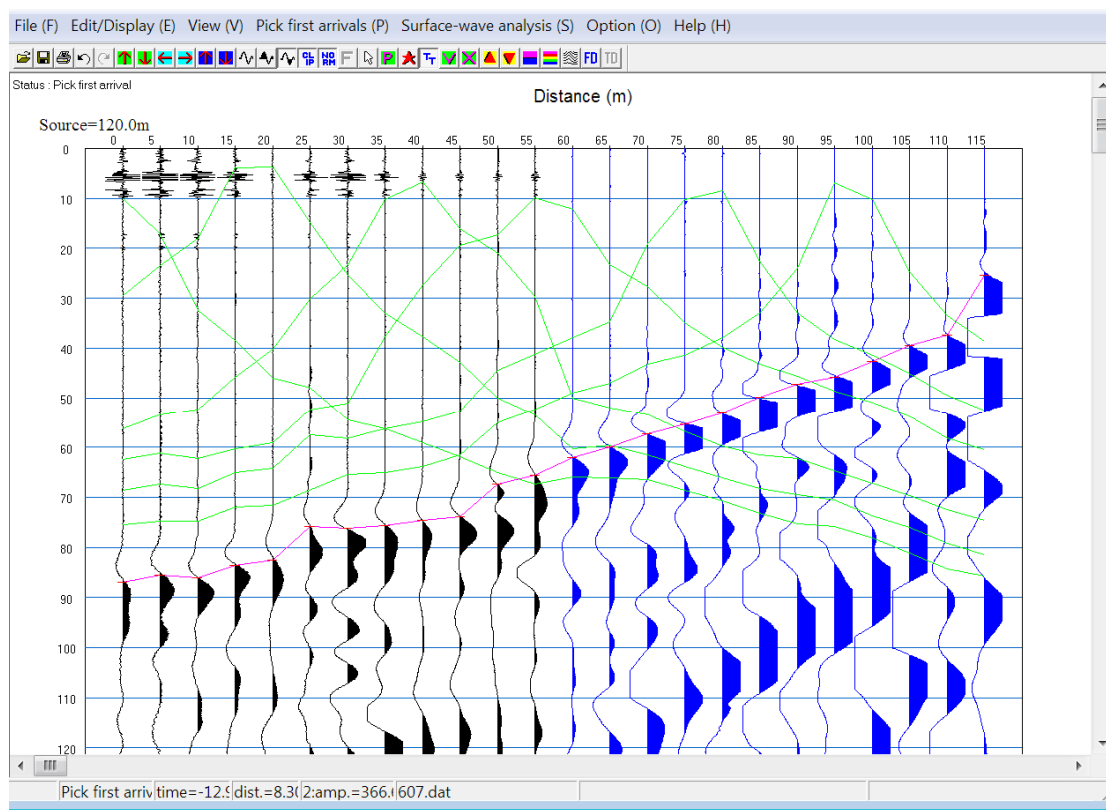
Καταγραφή 604 θέσης σεισμικής πηγής στα 57.5 m.



Καταγραφή 605 θέση σεισμικής πηγής στα 77.5 m.

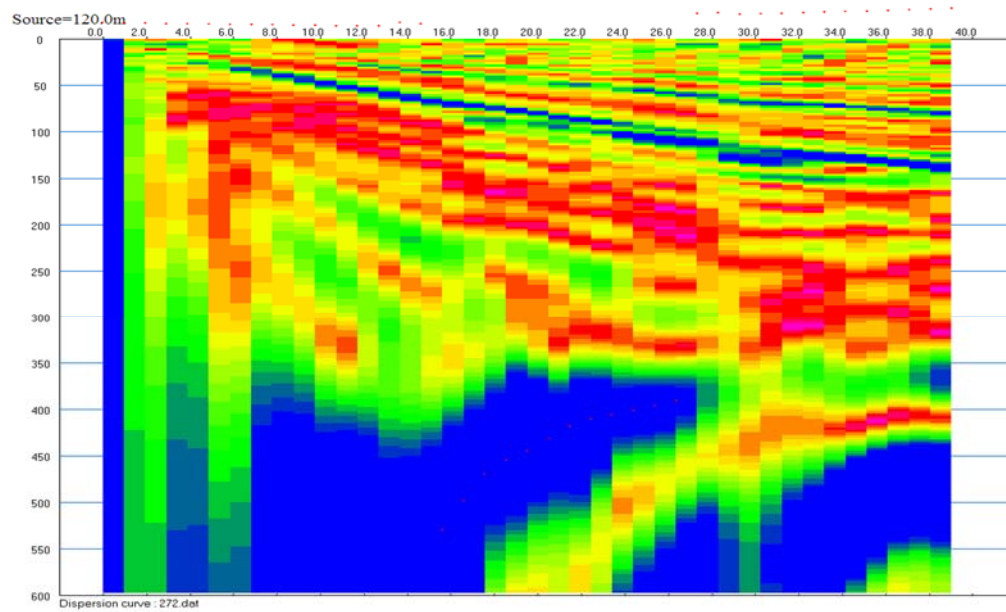


Καταγραφή 606 θέση σεισμικής πηγής στα 97.5 m

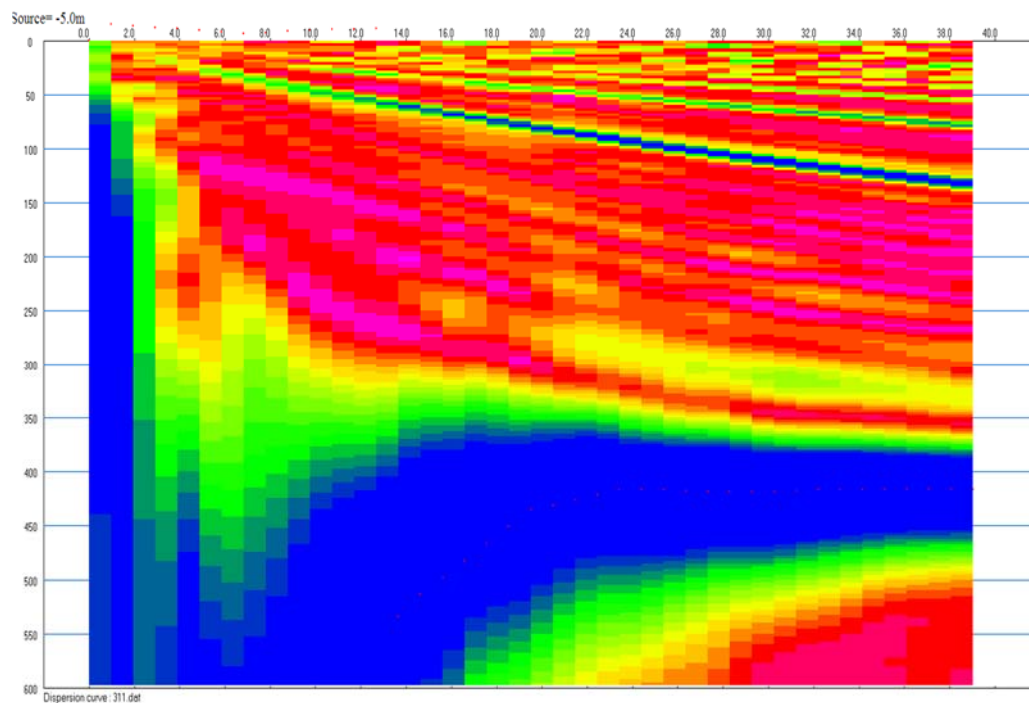


Καταγραφή 607 θέση σεισμικής πηγής στα 120

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ

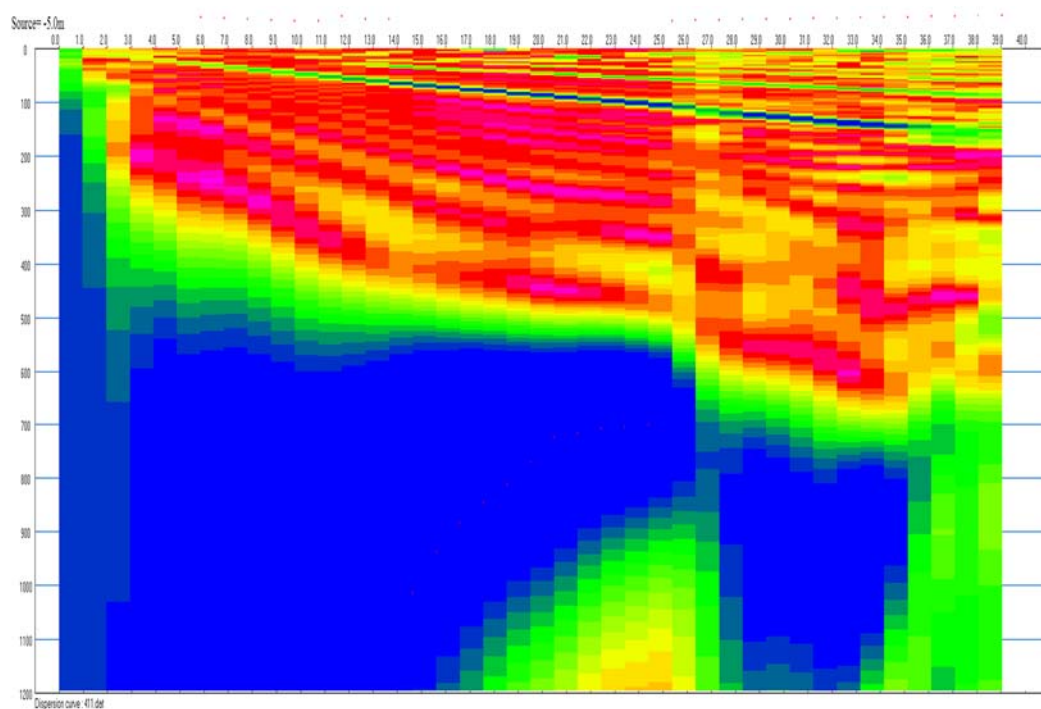


Καμπύλες διασποράς επιφανειακών κυμάτων της σεισμικής γραμμής S2 στο πρόγραμμα Riskwin. Η πηγή βρίσκεται στα -5m. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η συχνότητα (Hz) ενώ στον κατακόρυφο η ταχύτητα της φάσης (m/s).

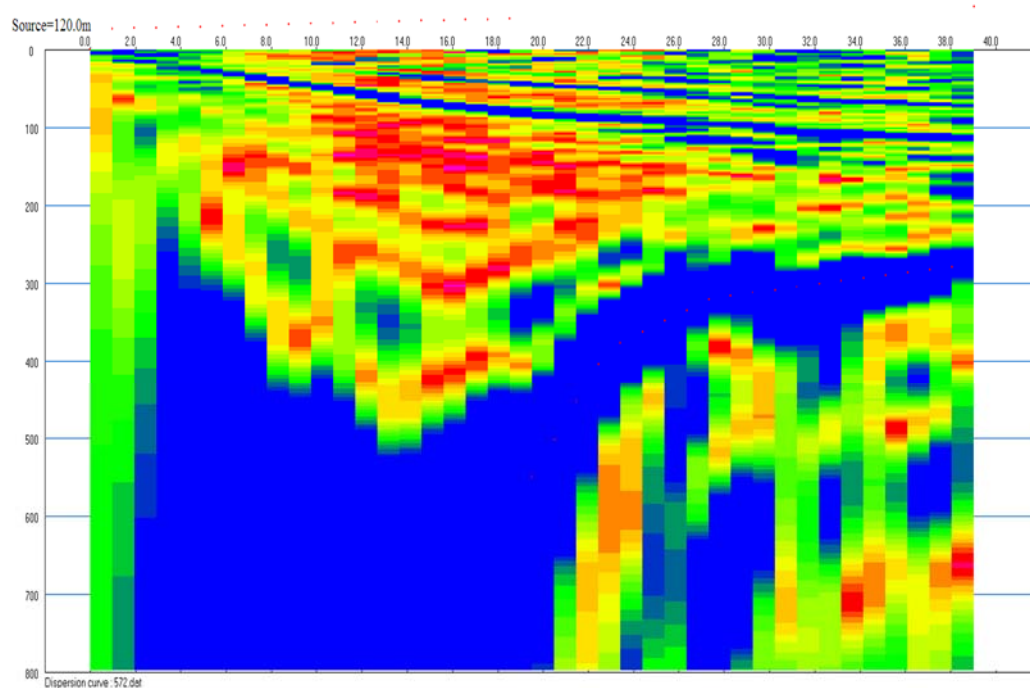


Καμπύλες διασποράς επιφανειακών κυμάτων της σεισμικής γραμμής S3 στο πρόγραμμα Riskwin. Η πηγή βρίσκεται στα -5m. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η συχνότητα (Hz) ενώ στον κατακόρυφο η ταχύτητα της φάσης (m/s).

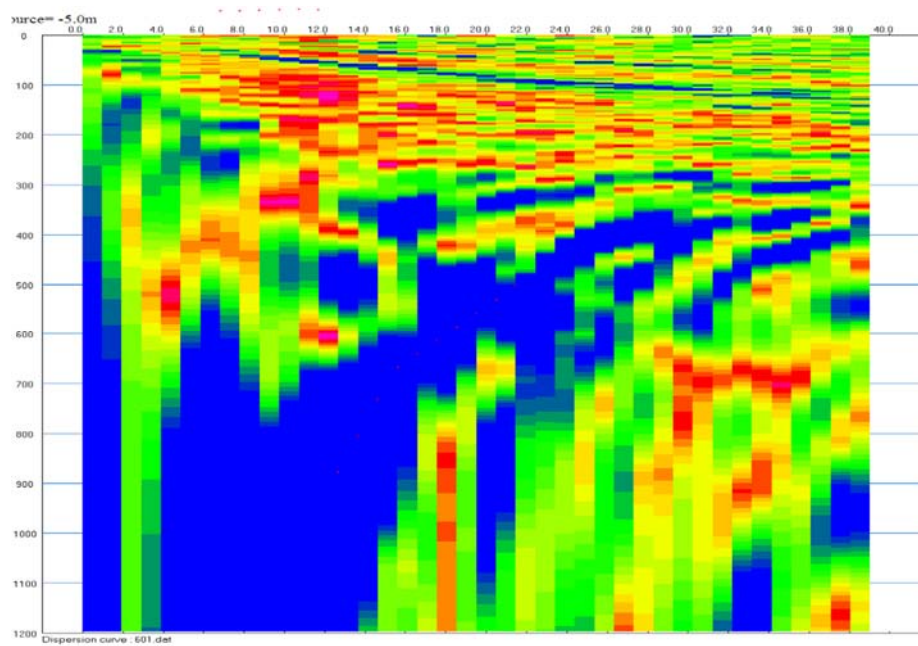




Καμπύλες διασποράς επιφανειακών κυμάτων της σεισμικής γραμμής S4 στο πρόγραμμα Pickwin. Η πηγή βρίσκεται στα -5m. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η συχνότητα (Hz) ενώ στον κατακόρυφο η ταχύτητα της φάσης (m/s).

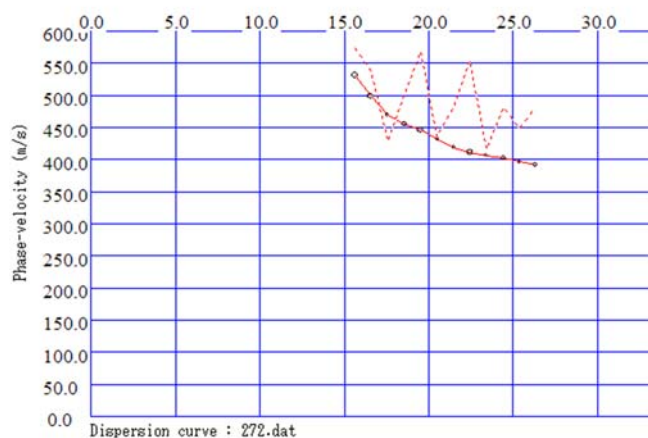


Καμπύλες διασποράς επιφανειακών κυμάτων της σεισμικής γραμμής S5 στο πρόγραμμα Pickwin. Η πηγή βρίσκεται στα -5m. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η συχνότητα (Hz) ενώ στον κατακόρυφο η ταχύτητα της φάσης (m/s).

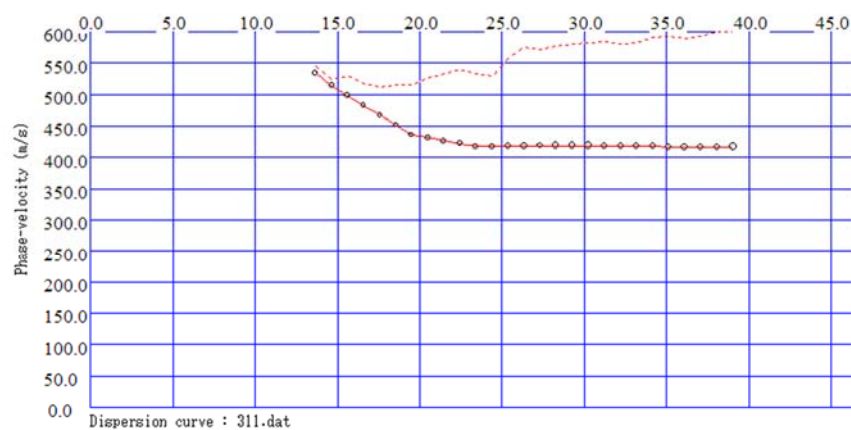


Καμπύλες διασποράς επιφανειακών κυμάτων της σεισμικής γραμμής S6 στο πρόγραμμα *Pickwin*. Η πηγή βρίσκεται στα -5m. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η συχνότητα (Hz) ενώ στον κατακόρυφο η ταχύτητα της φάσης (m/s).

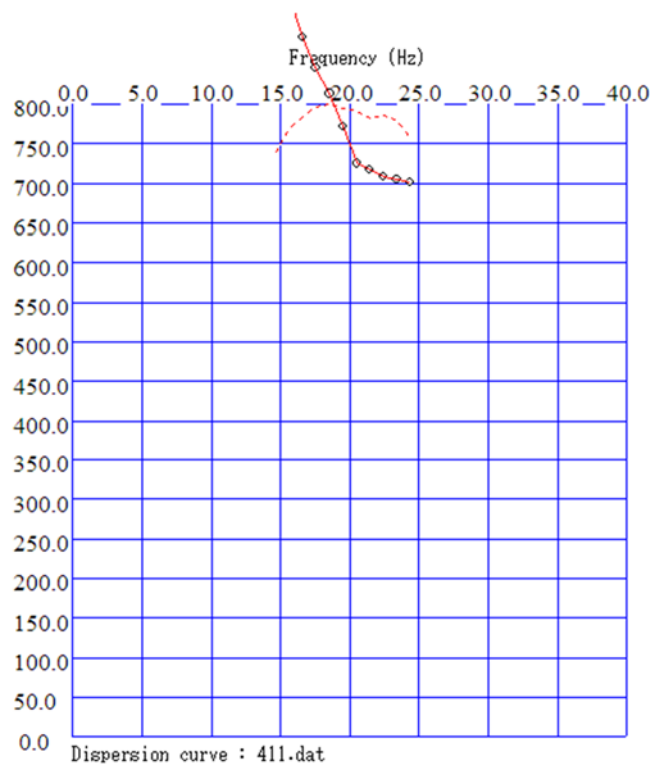
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ : ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ - ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ



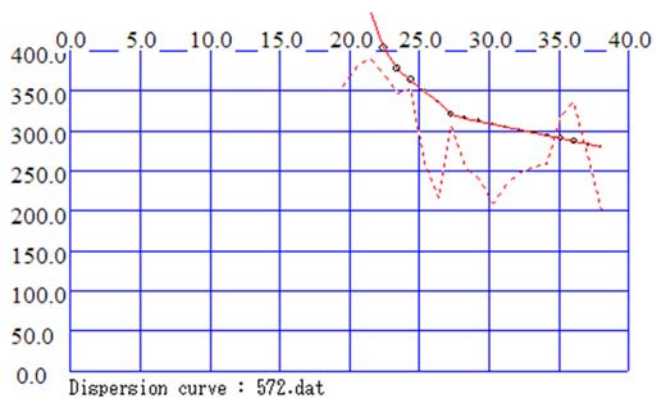
Διάγραμμα ταχύτητας-συχνότητας για την σεισμική γραμμή S2. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η συχνότητα (Hz) ενώ στον κατακόρυφο η ταχύτητα φάσης (m/s).



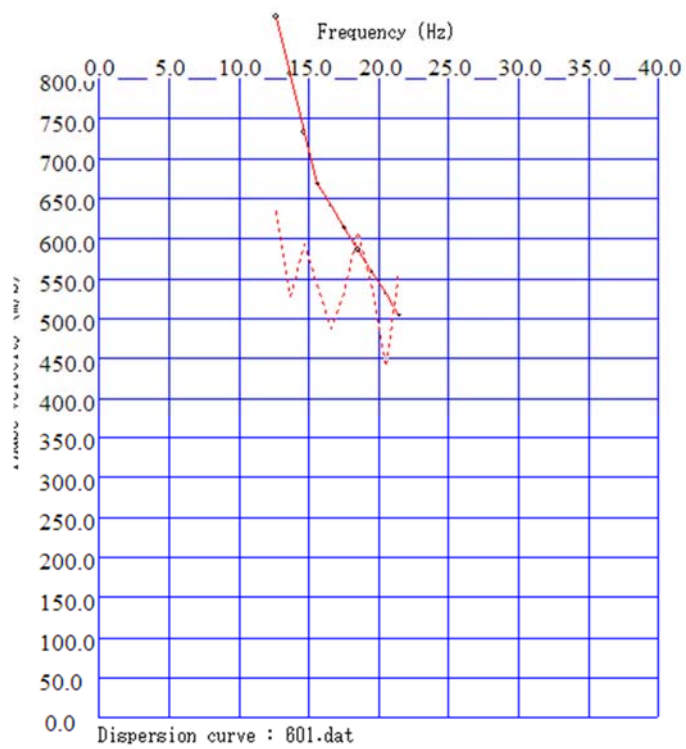
Διάγραμμα ταχύτητας-συχνότητας για την σεισμική γραμμή S3. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η συχνότητα (Hz) ενώ στον κατακόρυφο η ταχύτητα φάσης (m/s).



Διάγραμμα ταχύτητας-συχνότητας για την σεισμική γραμμή S4. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η συχνότητα (Hz) ενώ στον κατακόρυφο η ταχύτητα φάσης (m/s).

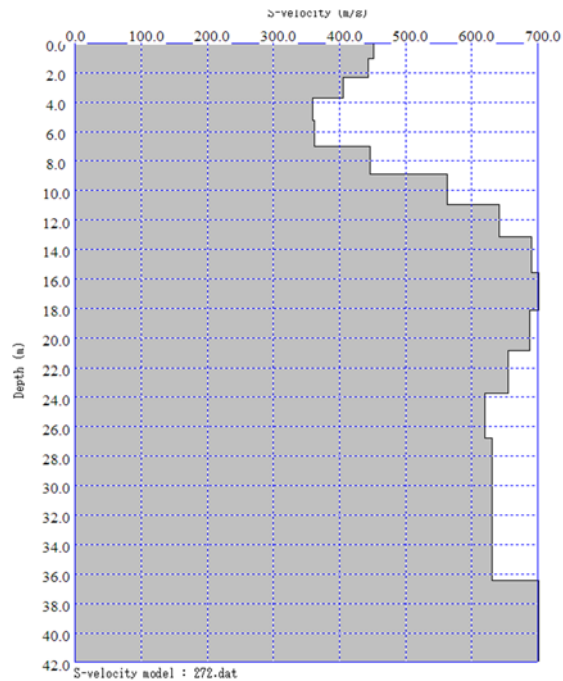


Διάγραμμα ταχύτητας-συχνότητας για την σεισμική γραμμή S5. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η συχνότητα (Hz) ενώ στον κατακόρυφο η ταχύτητα φάσης (m/s).

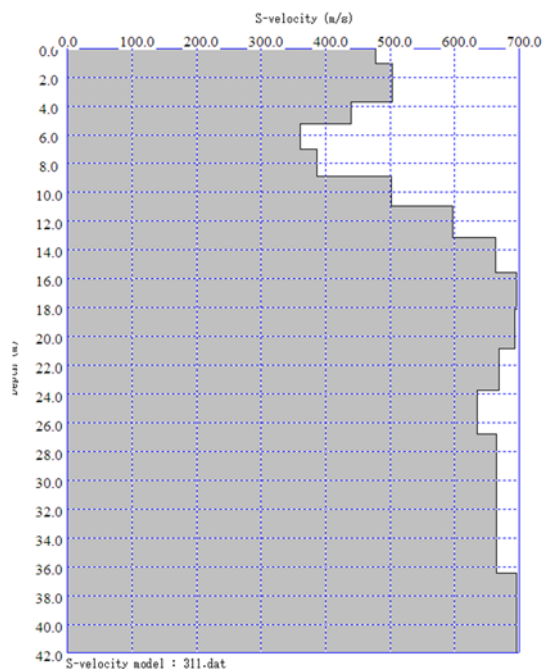


Διάγραμμα ταχύτητας-συχνότητας για την σεισμική γραμμή S6. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η συχνότητα (Hz) ενώ στον κατακόρυφο η ταχύτητα φάσης (m/s).

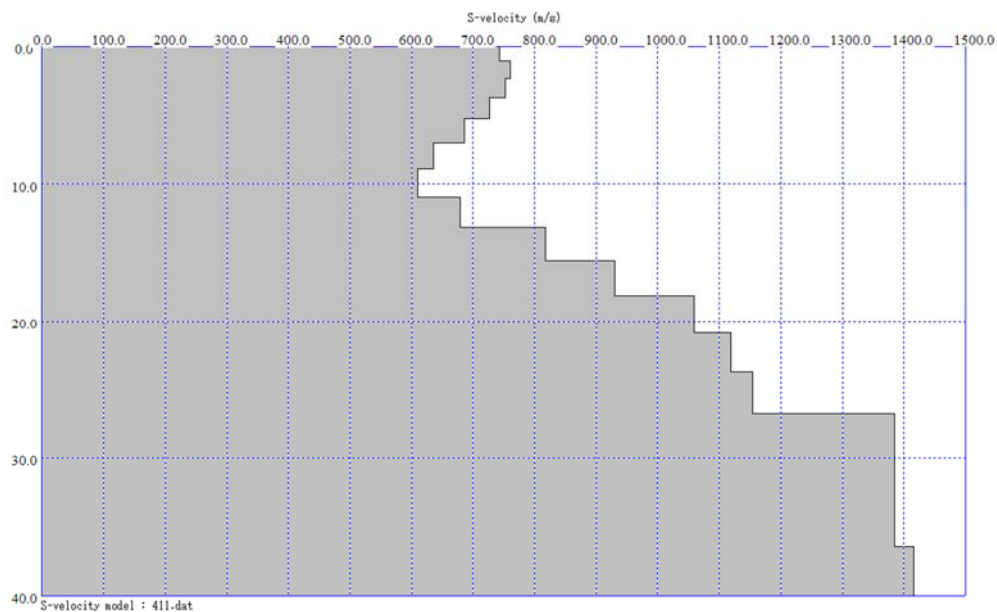
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΒΑΘΟΣ



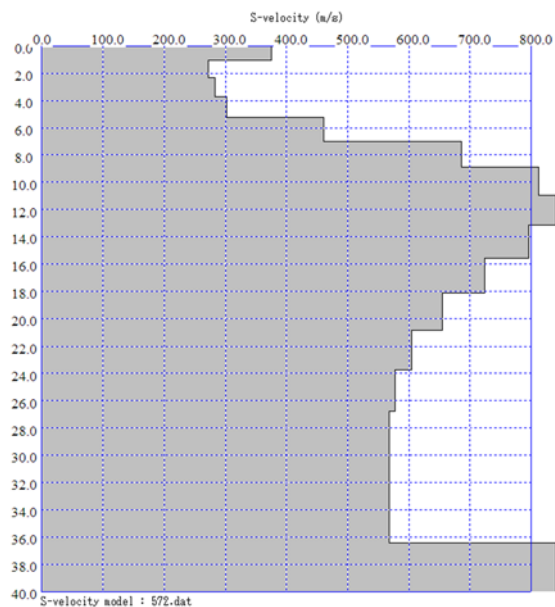
Επιλεγμένο διάγραμμα κατανομής της ταχύτητας για την σεισμική γραμμή S2. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η ταχύτητα των S κυμάτων (m/s) ενώ στον κατακόρυφο το βάθος (m).



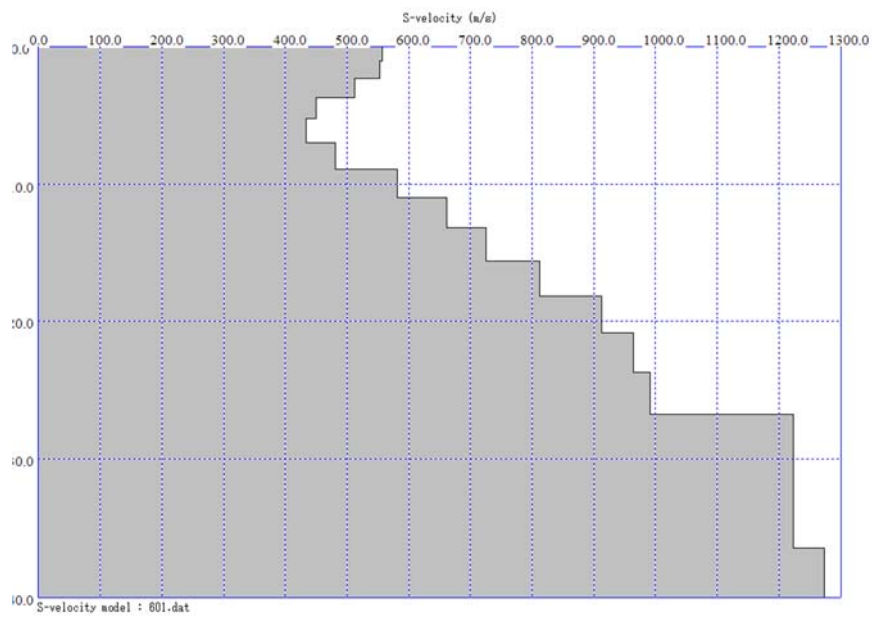
Επιλεγμένο διάγραμμα κατανομής της ταχύτητας για την σεισμική γραμμή S3. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η ταχύτητα των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (m/s) ενώ στον κατακόρυφο το βάθος (m).



Επιλεγμένο διάγραμμα κατανομής της ταχύτητας για την σεισμική γραμμή S4. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η ταχύτητα των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (m/s) ενώ στον κατακόρυφο το βάθος (m).



Επιλεγμένο διάγραμμα κατανομής της ταχύτητας για την σεισμική γραμμή S5. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η ταχύτητα των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (m/s) ενώ στον κατακόρυφο το βάθος (m).



Επιλεγμένο διάγραμμα κατανομής της ταχύτητας για την σεισμική γραμμή S6. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η ταχύτητα των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (m/s) ενώ στον κατακόρυφο το βάθος (m).