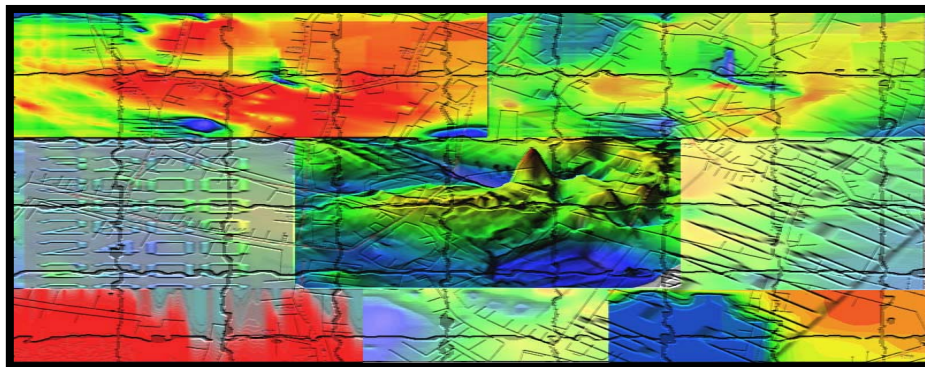


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ
ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΣΤΟ ΜΟΧΟ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ



ΧΡΙΣΤΙΝΑ Θ. ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ

Εξεταστική Επιτροπή:
Αντώνιος Βαφείδης, Καθηγητής (Επιβλέπων)
Ζαχαρίας Γ. Αγιουτάντης, Καθηγητής
Διονύσιος Θ. Χριστόπουλος, Αν. Καθηγητής

ΧΑΝΙΑ
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2007

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο διάστημα 19 – 25/07/2005 πραγματοποιήθηκε γεωφυσική έρευνα στην περιοχή του Μοχού Ηρακλείου που περιελάμβανε διασκόπηση με τη σεισμική διάθλαση Ρ-κυμάτων. Η διπλωματική εργασία αντλεί στοιχεία από την προαναφερθείσα μελέτη και έχει ως στόχο τον προσδιορισμό, τη χαρτογράφηση και απεικόνιση των γεωλογικών σχηματισμών του υπεδάφους και τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκων σεισμικών κυμάτων στους επιφανειακούς σχηματισμούς.

Κύριος σκοπός είναι ο υπολογισμός της κατανομής του βραχώδους γεωϋλικού στο υπέδαφος, από τον εντοπισμό των ζωνών που παρουσιάζουν αυξημένη ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Οι ζώνες αυτές αποτελούν πρόβλημα για το δίκτυο ύδρευσης – αποχέτευσης της περιοχής μελέτης.

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική έρευνα που πραγματοποιήθηκε, και αφορά στη μεθοδολογία προσδιορισμού της επιδεκτικότητας ενός πετρώματος σε εξόρυξη με χρήση μηχανοκίνητου άροτρου (rippability).

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

Παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης, η γεωλογία της περιοχής, αναλύεται ο σχεδιασμός της γεωφυσικής διασκόπησης και η επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων. Περιγράφεται η λειτουργία του λογισμικού απεικόνισης χαρτών (Surfer), παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας, και καταγράφονται τα συμπεράσματα.

Τέλος, υπολογίζεται η κατανομή βραχωδών γεωϋλικών στο υπέδαφος και παρατίθενται τα αποτελέσματα.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η γεωφυσική έρευνα έχει ως στόχο την αξιοποίηση των γεωφυσικών γνώσεων για πρακτικούς σκοπούς. Από τα αποτελέσματα της εφαρμοσμένης γεωφυσικής έρευνας, προκύπτουν σημαντικές πληροφορίες για τα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης, που μπορεί να σχετίζονται με δομές οικονομικής σημασίας, κοιτάσματα πετρελαίου, μεταλλεύματα κ.α. Επίσης, προσδιορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των επιφανειακών στρωμάτων, που έχουν σχέση με την κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων, όπως θεμελιώσεις γεφυρών, φραγμάτων, κατασκευή αποχετευτικών συστημάτων, κ.α.

Η διπλωματική εργασία αυτή, με τίτλο «Γεωφυσική Έρευνα με τη Μέθοδο της Σεισμικής Τομογραφίας στο Μοχό Ηρακλείου», αποσκοπεί στον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκων σεισμικών κυμάτων στους επιφανειακούς σχηματισμούς και τελικά στον υπολογισμό της κατανομής του βραχώδους γεωϋλικού στο υπέδαφος.

Τα πρωτογενή δεδομένα παραχωρήθηκαν και δόθηκε άδεια για τη δημοσίευσή τους από την τεχνική εταιρεία «Μεσόγειος Α.Τ.Ε.Ε.» με έδρα το Ηράκλειο Κρήτης, εκπροσωπούμενη από τον κ. Παπαζήση Βασίλειο.

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα κύριο Αντώνη Βαφείδη, για την υποστήριξη και τη βοήθειά του. Επίσης, τους κύριους Νικόλαο Ανδρονικίδη, Hamdan Hamdan, Νικόλαο Οικονόμου, Γεώργιο Κρητικάκη, για τις συμβουλές τους και την καλή συνεργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές κυρίους Αγιουτάντη Ζαχαρία και Χριστόπουλο Διονύσιο, οι οποίοι συμμετέχουν ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	iv
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΝΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΕΞΟΡΥΞΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗΧΑΝΟΚΙΝΗΤΟΥ ΑΡΟΤΡΟΥ.....	2
2.1 ΑΜΕΣΕΣ ΚΑΙ ΕΜΜΕΣΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	3
2.2 ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	5
2.3 ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΕΞΟΡΥΞΗΣ	7
2.4 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	13
3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ	14
3.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ.....	14
3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	18
4. ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	26
4.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	26
4.2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	26
4.3 ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	28
4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ	34
4.4.1 Υποκειμενικότητα στην Επεξεργασία των Δεδομένων	34
4.4.2 Σεισμικές γραμμές μελέτης.....	43
4.4 ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ	63
4.5 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΧΑΡΤΩΝ	64
4.5.1 Δημιουργία Κανάβου με τη Μέθοδο Kriging.....	64
4.5.2 Βαριόγραμμα	67
4.5.3 Δημιουργία Νέου Κανάβου και Χάρτη	69
4.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SURFER	70
4.6.1 Ζώνη Βάθους 0-2 m.....	72
4.6.2 Ζώνη Βάθους 2-4 m.....	74
4.6.3 Ζώνη Βάθους 4-6 m.....	76
4.6.4 Σύγκριση Τιμών της Σεισμικής Ταχύτητας για τα Αναπτύγματα που Αφαιρέθηκαν	78
5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ	83
5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ	84
5.2 ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ	104

5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	110
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	112
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Χάρτες	116

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γνώση της γεωλογίας μιας περιοχής και η απόκτηση πληροφοριών για το υπέδαφος, αποτελούν αναγκαία και σημαντικά βήματα για την εκπόνηση ερευνών επιστημονικού ενδιαφέροντος, για την κατασκευή τεχνικών έργων, για τη λύση γεωτεχνικών προβλημάτων κ.α.

Η επιστήμη της γεωφυσικής, μέσω των γεωφυσικών ερευνών, στοχεύει στη συλλογή πληροφοριών γεωλογικού ενδιαφέροντος και στην αξιοποίησή τους για πρακτικούς σκοπούς. Οι γεωφυσικές μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί, αποσκοπούν στον προσδιορισμό των γεωλογικών σχηματισμών του υπεδάφους και στην εύρεση των ιδιοτήτων τους.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, αντλώντας στοιχεία από τη γεωφυσική έρευνα που διεξήχθη στην περιοχή του Μοχού Ηρακλείου, αποσκοπεί στον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκων σεισμικών κυμάτων στους επιφανειακούς σχηματισμούς και τελικά στον υπολογισμό της κατανομής του βραχώδους γεωϋλικού στο υπέδαφος. Η γνώση των παραπάνω στοιχείων βοηθά στην επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων που σχετίζονται με το δίκτυο ύδρευσης – αποχέτευσης της περιοχής μελέτης.

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης, προσδιορίζεται η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων σεισμικών κυμάτων στους επιφανειακούς σχηματισμούς. Γνωρίζοντας τη γεωλογία της περιοχής, από τις σεισμικές ταχύτητες που υπολογίζονται, προσδιορίζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί.

Η ποσοστιαία κατανομή των βραχωδών (ή αντίστοιχα των γαιωδών) γεωϋλικών στο υπέδαφος σχετίζεται με την κατανομή της ταχύτητας των P-κυμάτων στους επιφανειακούς σχηματισμούς και υπολογίζεται με αντίστοιχες σχέσεις.

Επίσης, βάσει των ταχυτήτων διάδοσης των διαμήκων κυμάτων προσδιορίζεται η επιδεκτικότητα ενός πετρώματος σε εξόρυξη, με χρήση μηχανοκίνητου άροτρου (βιβλιογραφική έρευνα).

Από την αξιοποίηση των παραπάνω αποτελεσμάτων, προκύπτει μια συνολική και εποπτική εικόνα των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΝΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΕΞΟΡΥΞΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗΧΑΝΟΚΙΝΗΤΟΥ ΑΡΟΤΡΟΥ

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζεται η βιβλιογραφική έρευνα που έγινε με θέμα τη μεθοδολογία προσδιορισμού της επιδεκτικότητας ενός πετρώματος σε εξόρυξη, με χρήση μηχανοκίνητου άροτρου (rippability). Για το σκοπό αυτό, έγινε αναζήτηση μέσω του διαδικτύου, ενώ συλλέχθηκαν και πληροφορίες από βιβλία και επιστημονικά άρθρα.

Η επιδεκτικότητα ενός πετρώματος σε εξόρυξη, με χρήση μηχανοκίνητου άροτρου, πρέπει να προσδιορίζεται σε κάθε εκσκαφή, έτσι ώστε να χρησιμοποιείται ο κατάλληλος τύπος μηχανήματος για την κάθε περίπτωση. Με αυτό τον τρόπο, η παραγωγικότητα θα είναι ικανοποιητική, θα ελαχιστοποιηθούν οι ώρες εργασίας και το κόστος. Η ιδιότητα αυτή, είναι δύσκολο να καθοριστεί, λόγω του πλήθους των παραγόντων που επηρεάζουν την εξόρυξη.

Παλιότερα, ο μόνος τρόπος προσδιορισμού της εξορυξιμότητας ενός πετρώματος, ήταν μέσω του προσδιορισμού της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων. Οι μεγάλες τιμές ταχύτητας, υποδεικνύουν πέτρωμα λιγότερο επιδεκτικό σε εξόρυξη. Σήμερα, χρησιμοποιούνται συστήματα και μέθοδοι ταξινόμησης, για την εκτίμηση της εξορυξιμότητας. Κάθε γεωϋλικό, υποβάλλεται σε αναλύσεις και βάσει πινάκων που συσχετίζουν τη σεισμική ταχύτητα με παραμέτρους του γεωϋλικού, χαρακτηρίζεται ανάλογα με την επιδεκτικότητά του.

Έχει αποδειχθεί ότι η εύρεση της επιδεκτικότητας ενός πετρώματος σε εξόρυξη με χρήση μηχανοκίνητου άροτρου, είναι πιο ακριβής όταν συνδυάζεται η γεωλογία με τη γεωφυσική επιστήμη. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση της σεισμικής ταχύτητας σε συνδυασμό με την εκτίμηση παραμέτρων όπως ο βαθμός αποσάθρωσης, η δομή του σχηματισμού, η ύπαρξη ασυνεχειών και οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την εξόρυξη, δίνουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης, προτείνεται η χρήση των συστημάτων ταξινόμησης των πετρωμάτων και της βραχώμαζας (όπως το σύστημα Bieniawski, 1976). Τα συστήματα αυτά μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τα φυσικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά, καθώς και για τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος, και άρα να υποδείξουν τον τρόπο εξόρυξης.

2.1 ΑΜΕΣΕΣ ΚΑΙ ΕΜΜΕΣΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνταν για τον προσδιορισμό της επιδεκτικότητας ενός πετρώματος σε εξόρυξη μέχρι το 1990, διακρίνονται σε άμεσες και έμμεσες. Η καλύτερη μέθοδος, είναι αυτή που βασίζεται στη λειτουργία μηχανοκίνητου άροτρου στο πεδίο (άμεση μέθοδος). Αυτή η μέθοδος δεν είναι πάντα δυνατό να εφαρμοστεί, γι' αυτό έγιναν προσπάθειες για την ανάπτυξη μιας σχέσης, μεταξύ της εξόρυξης με τη βοήθεια μηχανοκίνητου άροτρου και των φυσικών και μηχανικών παραμέτρων του πετρώματος (έμμεση μέθοδος).

Οι έμμεσες μέθοδοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία, ανήκουν οι μέθοδοι που βασίζονται μόνο στην ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων. Πολλοί ερευνητές (Atkinson 1971, Bailey 1975, Church 1981 κ.α.) και εταιρείες κατασκευής χωματουργικών μηχανημάτων (Caterpillar 1983 και 1986, Komatsu 1982), έχουν σχετίσει την επιδεκτικότητα σε εξόρυξη με χρήση μηχανοκίνητου άροτρου, μόνο με την ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων.

Ειδικότερα, η εταιρεία Caterpillar έχει εκδώσει πίνακες (Caterpillar Performance Handbook, 1989) για κάθε μοντέλο μηχανοκίνητου άροτρου, στους οποίους συσχετίζει την ταχύτητα σεισμικών κυμάτων διαμέσου ενός γεωϋλικού, με την επιδεκτικότητα ενός πετρώματος σε εξόρυξη. Με τους πίνακες αυτούς, ένα γεωϋλικό χαρακτηρίζεται εύκολα, οριακά ή δύσκολα εξορύξιμο.

Στη δεύτερη κατηγορία, ανήκουν οι μέθοδοι που βασίζονται στις φυσικές και μηχανικές παραμέτρους του πετρώματος, σε συνδυασμό με τη σεισμική ταχύτητα. Τέτοιες μέθοδοι έχουν προταθεί από τους: Franklin et al. (1971), Weaver (1975), Muftuoglu (1983), Smith (1986), Singh et al. (1987) και Karpuz (1990). Ορισμένοι από τους παραπάνω ερευνητές, προτείνουν τη χρήση διαγραμμάτων και πινάκων, που δημιουργήθηκαν με πραγματικά δεδομένα και λειτουργούν ως συστήματα ταξινόμησης. Με αυτό τον τρόπο, αξιολογείται ο κάθε σχηματισμός, σύμφωνα με συγκεκριμένες ιδιότητες (βαθμός αποσάθρωσης, αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, αντοχή σε εφελκυσμό, ύπαρξη και είδος ασυνεχειών κ.α.), ενώ ταυτόχρονα σχετίζεται με την ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων. Μετά την αξιολόγηση, το γεωϋλικό χαρακτηρίζεται εύκολα ή δύσκολα εξορύξιμο.

Τα συστήματα ταξινόμησης, αποτελούν τη βάση για την επιλογή της μεθόδου εξόρυξης και των μηχανημάτων και οδηγούν σε συμπεράσματα για την αναγκαιότητα η όχι, χρήσης εκρηκτικών. Κανένα όμως σύστημα, δεν περιλαμβάνει τις παραμέτρους της

διάτμησης, παρόλο που η αστοχία σε διάτμηση θεωρείται ο κύριος μηχανισμός αστοχίας (Kirsten, 1983) κατά την εξόρυξη. Επίσης, δεν λαμβάνεται υπόψιν η περιεκτικότητα του πετρώματος σε υγρασία και άργιλο, που επηρεάζει την αποδοτικότητα του μηχανήματος και ο αριθμός των οικογενειών ασυνεχειών.

Οι έμμεσες μέθοδοι εφαρμόστηκαν σε διετές ερευνητικό πρόγραμμα, σε υπαίθρια ορυχεία λιγνίτη (Turkish Coal Enterprises, TKI) στην Τουρκία (Karpuz et al, 1990). Έγινε εργαστηριακή μελέτη και έρευνα στο πεδίο, σε δείγματα 46 διαφορετικών θέσεων από 17 ορυχεία. Γενικά, η περιοχή καλυπτόταν από ιζηματογενή πετρώματα, με πιο συνηθισμένα τις μάργες και τον αποσαθρωμένο ασβεστόλιθο.

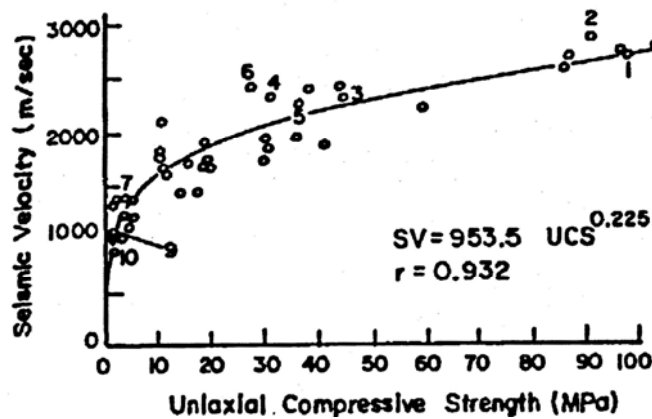
Για να εκτιμηθεί η επιδεκτικότητα ενός πετρώματος σε εξόρυξη με χρήση μηχανοκίνητου άροτρου (rippability), προσδιορίστηκαν οι παρακάτω παράμετροι: πάχος στρωμάτων, σύστημα ασυνεχειών, υλικό πλήρωσης και άνοιγμα ασυνεχειών, βαθμός αποσάθρωσης, σκληρότητα κ.α. καθώς και η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων μέσω του γεωυλικού. Ακόμη, συλλέχθηκαν αντιπροσωπευτικά δείγματα για περαιτέρω ανάλυση στο εργαστήριο.

Για κάθε δείγμα, εφαρμόστηκαν όλα τα συστήματα (εκτός από το σύστημα Karpuz, 1990). Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Τα ίδια δεδομένα, χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας απόσπασης του πετρώματος, από τη φυσική του θέση (diggability).

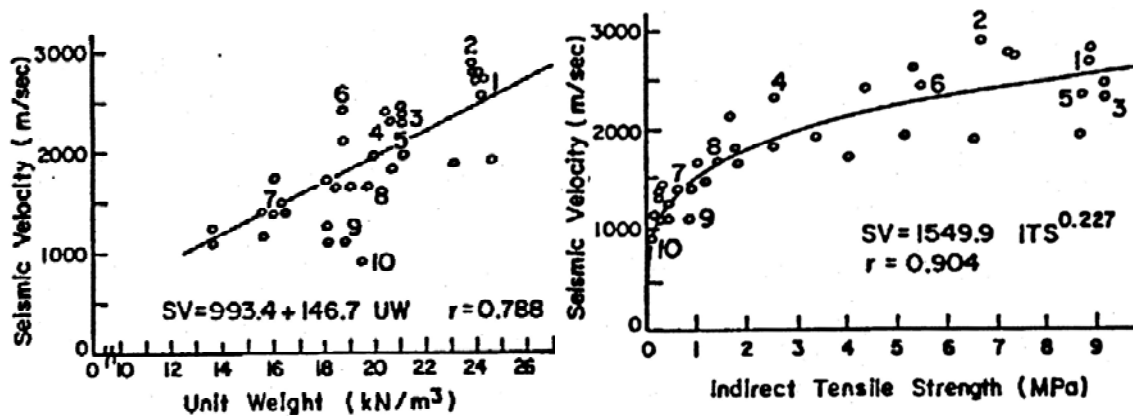
Βάσει των αποτελεσμάτων, ένα γεωυλικό χαρακτηρίστηκε (ως προς την εξόρυξη με χρήση μηχανοκίνητου άροτρου): 1) μη εξορύξιμο, προτάθηκε η χρήση εκρηκτικών, 2) πιθανώς εξορύξιμο, με συγκεκριμένο τύπο μηχανοκίνητου άροτρου, 3) εύκολα εξορύξιμο, με συγκεκριμένο τύπο μηχανοκίνητου άροτρου, και 4) δύσκολα ή πολύ δύσκολα εξορύξιμο. Για την τελευταία κατηγορία, κρίθηκε αναγκαίο να πραγματοποιηθούν δοκιμές στο πεδίο ώστε να επανεκτιμηθούν οι παράμετροι. Οι διαφορές που εμφανίστηκαν κατά την αξιολόγηση, οφείλονταν στη διαφορετική βαθμονόμηση των παραμέτρων που πρότειναν οι ερευνητές. Για παράδειγμα, στο σύστημα που προτάθηκε από τον Weaver (1975), ένα γεωυλικό χαρακτηρίζεται δύσκολα εξορύξιμο όταν η σεισμική ταχύτητα λαμβάνει την τιμή των 2150 m/sec, ενώ για την ίδια περίπτωση, οι Singh et al. (1987), εκτιμούν ότι η τιμή της ταχύτητας είναι 2500 m/sec.

Η εύρεση της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων διαμέσου των γεωυλικών, είναι καθοριστική παράμετρος, αλλά δεν είναι πάντα διαθέσιμη. Επίσης, δεν αρκεί η χρήση της σεισμικής ταχύτητας και μόνον αυτής, για το χαρακτηρισμό ενός γεωυλικού. Γι'

αυτό το λόγο, προτάθηκε η συσχέτιση της σεισμικής ταχύτητας με παραμέτρους (όπως η αντοχή σε θλίψη, η αντοχή σε εφελκυσμό, η πυκνότητα κ.α.), οι οποίες μπορούν εύκολα να καθοριστούν (σχήματα 2.1-2.3). Κρίθηκε αναγκαίο να συμπεριληφθούν στα συστήματα εκτίμησης, τα μηχανήματα που υποστηρίζουν την κάθε περίπτωση και να συνεχιστούν οι δοκιμές στο πεδίο με πραγματικά δεδομένα. Συστήθηκε να αναπτυχθούν οι υπάρχουσες μέθοδοι εκτίμησης, με στόχο τη βελτίωσή τους και την παραγωγή πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων.



Σχήμα 2.1: Σεισμική ταχύτητα συναρτήσει της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (Karpuz et al., 1990).



Σχήμα 2.2: Σεισμική ταχύτητα συναρτήσει του μοναδιαίου βάρους (Karpuz et al., 1990).

Σχήμα 2.3: Σεισμική ταχύτητα συναρτήσει της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (Karpuz et al., 1990).

2.2 ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Σημαντικό βήμα για την ανάπτυξη των μεθόδων ήταν η δημιουργία ενός ‘έμπειρου’ συστήματος (expert system shell), που ονομάστηκε Crystal, από την

Intelligent Environments, U.K. (1991).

Οι μέθοδοι που εισήχθησαν στο σύστημα, προτάθηκαν από τους: Weaver (1975), Minty και Kearns (1983), Pells (1985) και οι πίνακες της εταιρείας Caterpillar (1989). Οι μέθοδοι αυτές συνδύασαν γεωλογικές παραμέτρους, με χαρακτηριστικά των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνταν για την εξόρυξη και με τη σεισμική ταχύτητα.

Όταν η ταχύτητα δεν είναι γνωστή, το έμπειρο σύστημα χρησιμοποιεί σχέσεις μεταξύ αυτής και του δείκτη σημειακής φόρτισης, ή της ανεμπόδιστης αντοχής σε θλίψη. Μετά την εκτίμηση της ταχύτητας, επιλέγεται το πεδίο τιμών που βρίσκεται ανάμεσα στο 80 % και στο 125 % της εκτίμησης. Εμφανίζονται δύο εκτιμήσεις, μία για το ανώτερο όριο ταχύτητας και μία για το κατώτερο. Από τη συνολική εκτίμηση των παραμέτρων, προκύπτει η επιλογή του μηχανήματος.

Ο χρήστης, μπορεί να επιλέξει μία από τις τέσσερις μεθόδους, ή το συνδυασμό αυτών (συνδυασμένη μέθοδος). Η κάθε μέθοδος περιλαμβάνει ορισμένες γεωλογικές παραμέτρους. Η ορολογία και η κλίμακα για την κάθε παράμετρο, διαφέρουν από μέθοδο σε μέθοδο. Η συνδυασμένη μέθοδος χρησιμοποιεί συγκεκριμένη κλίμακα και ορολογία για αυτές τις παραμέτρους. Για παραμέτρους των οποίων το μέγεθος κυμαίνεται, επιλέγεται η 'χειρότερη' τιμή.

Σε περίπτωση εφαρμογής της συνδυασμένης μεθόδου, το έμπειρο σύστημα επεξεργάζεται τα δεδομένα και εμφανίζει αποτελέσματα, για κάθε μία από τις τέσσερις μεθόδους και για τη συνδυασμένη μέθοδο. Είναι σημαντικό να επιλέγεται η κατάλληλη μέθοδος, έτσι ώστε τα αποτελέσματα που προκύπτουν να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα. Για τον παραπάνω λόγο, λαμβάνονται υπόψιν τα ακόλουθα:

- Εκτιμήσεις που βασίζονται μόνο στη σεισμική ταχύτητα, δεν είναι αξιόπιστες.
- Καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν, όταν συνδυάζονται οι γεωλογικές παράμετροι με τη σεισμική ταχύτητα.
- Οι πίνακες της εταιρείας Caterpillar (1989), αξιολογούν τα δεδομένα με μικρότερη αυστηρότητα από την απαιτούμενη. Προτείνεται η χρήση μηχανήματος που αντιστοιχεί στην αμέσως πιο δύσκολη περίπτωση.
- Η μέθοδος Weaver (1975) θεωρείται ότι παράγει καλές εκτιμήσεις.
- Η μέθοδος Minty και Kearns (1983), είναι αρκετά αυστηρή και δεν καταλήγει στη σωστή επιλογή μηχανήματος.
- Η μέθοδος Pells (1985) παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα, όταν χρησιμοποιείται για ψαμμίτη.

Το έμπειρο σύστημα, χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση δεδομένων που

ελήφθησαν στη Νέα Νότια Ουαλία, με απώτερο στόχο την αξιολόγησή του ως προς την ακρίβειά του. Στο σύστημα εισήχθησαν δεδομένα από εννιά είδη πετρωμάτων. Για τα περισσότερα, η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων εκτιμήθηκε με τον τρόπο που αναφέρθηκε προηγουμένως. Τα ανώτερα και κατώτερα όρια ταχυτήτων, ήταν παρόμοια με αυτά που συναντήθηκαν στο πεδίο. Συνολικά, το έμπειρο σύστημα Crystal αποδείχθηκε ακριβές και τα αποτελέσματα κρίθηκαν ικανοποιητικά. Στα μελλοντικά σχέδια των δημιουργών του, ήταν η ανάπτυξή του, με την εισαγωγή πιο πολλών μεθόδων και την εφαρμογή σε περισσότερες περιπτώσεις.

2.3 ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΕΞΟΡΥΞΗΣ

Τα τμήματα Πολιτικών Μηχανικών και Μεταλλειολόγων Μηχανικών στο Πανεπιστήμιο της Νέας Νότιας Ουαλίας (1994) εκπόνησαν ερευνητικό πρόγραμμα με στόχο την ανάπτυξη των μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας εξόρυξης με μηχανοκίνητο άροτρο και τον προσδιορισμό των δύσκολων συνθηκών εξόρυξης.

Η έρευνα περιλάμβανε: α) συλλογή γεωφυσικών, γεωλογικών δεδομένων και δεδομένων εξόρυξης από διάφορες τοποθεσίες για τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων πληροφοριών, β) ανάλυση της βάσης δεδομένων για τον προσδιορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν τη διαδικασία εξόρυξης, γ) εργαστηριακές δοκιμές για τον καθορισμό της σχέσης μεταξύ της αντοχής του πετρώματος και της εξόρυξης, δ) χρήση μοντέλου για τον προσδιορισμό των δυνάμεων που επιδρούν κατά τη διάρκεια εξόρυξης, ε) ανάλυση στοιχείων για τους μηχανισμούς και τις τάσεις που ασκούνται κατά την εξόρυξη, στ) αποτίμηση των υπάρχοντων τεχνικών εκτίμησης της επιδεκτικότητας εξόρυξης, χρησιμοποιώντας τη βάση δεδομένων, ζ) πολλαπλές αναλύσεις για την ανάπτυξη μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας από γεωλογικούς παράγοντες και χαρακτηριστικά του μηχανήματος και η) ανάπτυξη των μεθόδων για την εκτίμηση παραγωγικότητας σε δύσκολες συνθήκες εξόρυξης.

Τα δείγματα συλλέχθηκαν από 15 τοποθεσίες στη Νέα Νότια Ουαλία. Η διαδικασία εξόρυξης έλαβε χώρα σε 242 περιοχές και τα δεδομένα κάθε περιοχής χωρίστηκαν ανάλογα με τον προσανατολισμό, τον χειριστή, το μηχάνημα και τον τρόπο εξόρυξης, σε 527 ομάδες δεδομένων για ανάλυση. Εξορύχθηκαν 19 διαφορετικοί τύποι πετρωμάτων, 11 από αυτούς ήταν ιζηματογενούς προέλευσης, τέσσερις τύποι ανήκαν στα μεταμορφωμένα πετρώματα και τέσσερις στα πυριγενή.

Τα περισσότερα δεδομένα συλλέχθηκαν από δρόμους και οδούς υπό κατασκευή,

αλλά μερικά ελήφθησαν από εργοτάξια οικοδομών, από υπαίθριες εκμεταλλεύσεις και από περιοχές απόθεσης αποβλήτων. Θεωρείται ότι οι τεχνικές της εξόρυξης καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιδεκτικότητα σε εξόρυξη, δεν εξαρτώνται από την τοποθεσία.

Για κάθε περιοχή καταγράφηκαν:

(Α) Γεωλογικά δεδομένα:

- Χαρακτηριστικά της δομής του πετρώματος, χρώμα, μέγεθος κόκκων, βαθμός αποσάθρωσης, ανεμπόδιστη αντοχή σε θλίψη.
- Γεωλογικά χαρακτηριστικά, τύπος πετρώματος, ύπαρξη ασυνεχειών, μέγεθος και σχήμα των τεμαχίων όπως βρίσκονται στο πεδίο.
- Λεπτομέρειες κάθε οικογένειας ασυνεχειών: γωνία κλίσης, γωνία βύθισης, άνοιγμα και μήκος των ασυνεχειών, περιγραφή των συνθηκών στα άκρα των ασυνεχειών, υλικό πλήρωσης, τραχύτητα, υγρασία κ.α.

(Β) Δεδομένα εξόρυξης:

- Εργολάβος και εξοπλισμός, τύπος και χωρητικότητα μηχανήματος εξόρυξης, όνομα χειριστή.
- Συνθήκες της τοποθεσίας, τοπογραφία, περιορισμοί ως προς την κίνηση του μηχανήματος, κλιματικές συνθήκες, παρουσία επιφανειακού νερού.
- Λεπτομέρειες εξόρυξης.
- Δεδομένα εξόρυξης, κατεύθυνση εξόρυξης και ασυνεχειών, εξορυσσόμενη επιφάνεια, περιοχή εδάφους που επηρεάζεται από τη διαδικασία εξόρυξης, μέσο βάθος εξόρυξης, ολικός χρόνος εξόρυξης, μηχανισμοί αποχωρισμού του πετρώματος, σχήμα και μέγεθος του προϊόντος.
- Στοιχεία κύκλου εργασίας της εξόρυξης: μήκος, χρόνος, κατεύθυνση της εξόρυξης, γωνία και χρόνος διείσδυσης.
- Από την ανάλυση και τον συνδυασμό των παραπάνω παραγόντων, προέκυψαν σχέσεις (πίνακες) εκτίμησης της παραγωγικότητας ανάλογα με το είδος του πετρώματος και τις συνθήκες εξόρυξης.

(Γ) Δεδομένα εργαστηρίου

Τα δείγματα ελήφθησαν από περιοχές, για τις οποίες ήταν γνωστά τα γεωλογικά δεδομένα και τα δεδομένα εξόρυξης. Ο σκοπός της δειγματοληψίας ήταν η συλλογή αντιπροσωπευτικών δειγμάτων, ώστε να εμφανίζουν τα ίδια χαρακτηριστικά με το εξορυσσόμενο υλικό και να έχουν τις κατάλληλες διαστάσεις για την ανάλυση. Ακολούθησε σειρά δοκιμών:

- Σημειακή φόρτιση.
- Ανεμπόδιστη αντοχή σε θλίψη (UCS).
- Μέτρο ελαστικότητας Young.
- Λόγος Poisson.
- Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (Brasil).
- Κάμψη.
- Περιεκτικότητα υγρασίας.
- Πορώδες και πυκνότητα.
- Ταχύτητα ήχου.

Όπου υπήρχε δυνατότητα, τα δείγματα υποβλήθηκαν σε όλες τις δοκιμές, σύμφωνα με τις αρχές του Διεθνούς Οργανισμού της Μηχανικής Πετρωμάτων (ISRM) και του Αμερικανικού Οργανισμού για Δοκιμές και Υλικά (ASTM).

(Δ) Σεισμική Ταχύτητα

Οι ταχύτητες, λαμβάνονται κατά τα στάδια της έρευνας κάθε τοποθεσίας, ή κατά τη διάρκεια της εξόρυξης. Τα περισσότερα δεδομένα ελήφθησαν από την Υπηρεσία Οδοποιίας.

Ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες και το είδος του μηχανοκίνητου άροτρου, ο ρυθμός της παραγωγικότητας ποικίλει, εξαρτώμενος από ορισμένες παραμέτρους που σχετίζονται με τις λειτουργίες του άροτρου, τις διαστάσεις της περιοχής, το πρόγραμμα παραγωγής, τις διαστάσεις του υλικού και την ύπαρξη νεκρού χρόνου. Μετά από έρευνα, υπολογίστηκαν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\bullet \text{ Παραγωγικότητα κύκλου εργασίας (run productivity)} = \frac{C * L * W * D}{T} \quad (2.1)$$

όπου C: συντελεστής διόρθωσης

L: μήκος κύκλου εργασίας (m)

W: πλάτος μεταξύ διαδοχικών κύκλων εργασίας (m)

D: μέσο βάθος διείδυσης (m)

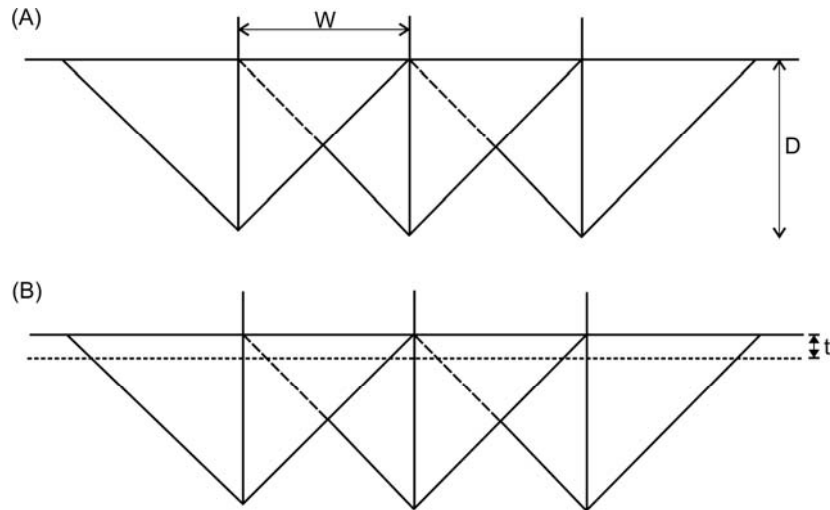
T: χρόνος κύκλου εργασίας (h)

$$\bullet \text{ Παραγωγικότητα περιοχής (area productivity)} = \frac{\sum_1^n (L * W * D)}{\sum T} \quad (2.2)$$

για αριθμό κύκλων εργασίας από 1 έως n.

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν δύο είδη παραγωγικότητας, ακέραιη και ολική. Η ακέραιη παραγωγικότητα (intact) αναφέρεται μόνο στο υλικό το οποίο δεν έχει υποστεί χαλάρωση, ενώ η ολική παραγωγικότητα (total) αναφέρεται σε όλο το υλικό που

μετακινήθηκε κατά τη διάρκεια του κύκλου εργασίας. Στο σχήμα 2.4, απεικονίζεται η περιοχή που εκτιμάται ότι έχει επηρεαστεί από προηγούμενο κύκλο εργασίας. Στον υπολογισμό της παραγωγικότητας, η περιοχή αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν μόνο μία φορά. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται ο συντελεστής διόρθωσης C . Στον πίνακα 2.1 (MacGregor et al, 1994), σχετίζεται η ακέραια παραγωγικότητα περιοχής με την ευκολία της εξόρυξης.



Σχήμα 2.4: Τομή για τον υπολογισμό της παραγωγικότητας (A) χωρίς χαλάρωση του εδαφικού καλύμματος, όπου W : πλάτος μεταξύ διαδοχικών κύκλων εργασίας (m) και D : μέσο βάθος διείσδυσης (m), (B) με χαλάρωση του εδαφικού καλύμματος, όπου t : πάχος χαλάρωσης του εδαφικού καλύμματος.

Πίνακας 2.1: Χαρακτηρισμός εξόρυξης με χρήση μηχανοκίνητου άροτρου σε σχέση με την ακέραιη παραγωγικότητα περιοχής (MacGregor et al., 1994).

Ακέραιη παραγωγικότητα περιοχής (m^3/h)	Χαρακτηρισμός εξόρυξης με χρήση μηχανοκίνητου άροτρου
0-250	Πολύ δύσκολη
250-750	Δύσκολη
750-2000	Μέτριας δυσκολίας
2000-3500	Εύκολη
> 3500	Πολύ εύκολη

Η εταιρεία Caterpillar (1988), έκρινε ότι με την εφαρμογή των σχέσεων (2.1) και (2.2), η τιμή της παραγωγικότητας που υπολογίζεται, είναι μεγαλύτερη κατά 10 έως 20%, από αυτή που προκύπτει με άλλες μεθόδους.

Μετά την ανάλυση των δεδομένων εξόρυξης, η σχέση μεταξύ σεισμικής

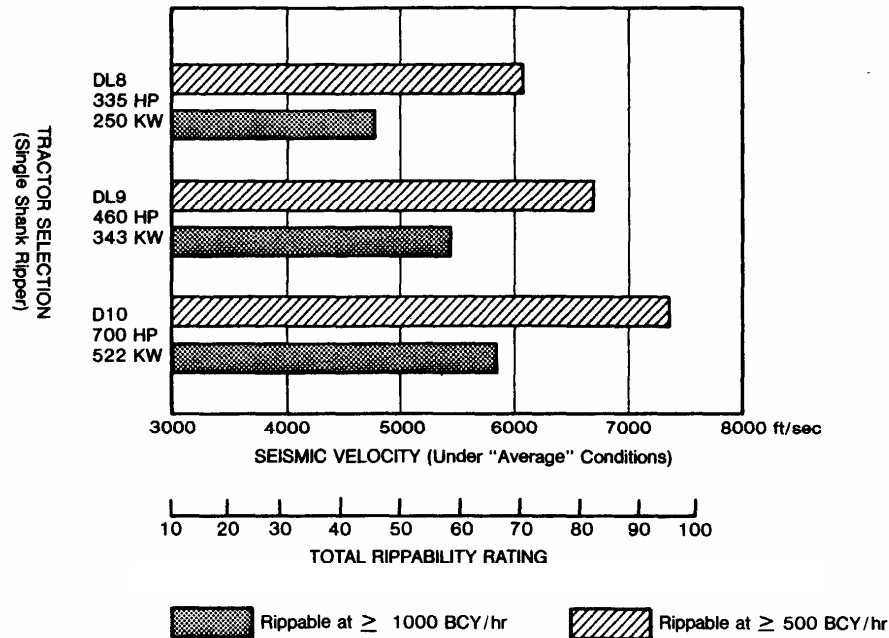
ταχύτητας και παραγωγικότητας έδειξε ότι υπάρχει μία οριακή ταχύτητα πέραν της οποίας, η εξόρυξη χαρακτηρίζεται δύσκολη έως πολύ δύσκολη (MacGregor et al, 1994). Το όριο αυτό είναι περίπου 2000 m/s. Πάνω από την τιμή των 3000 m/s, το πέτρωμα χαρακτηρίζεται ως μη επιδεκτικό σε εξόρυξη, με εξορυκτικό εξοπλισμό μεγέθους D10 ή μικρότερου μεγέθους.

Μέρος της έρευνας (MacGregor et al, 1994) αποτέλεσε η αποτίμηση των μεθόδων που προβλέπουν την επιδεκτικότητα του πετρώματος ως προς την εξόρυξη. Αυτές κατηγοριοποιούνται παρακάτω:

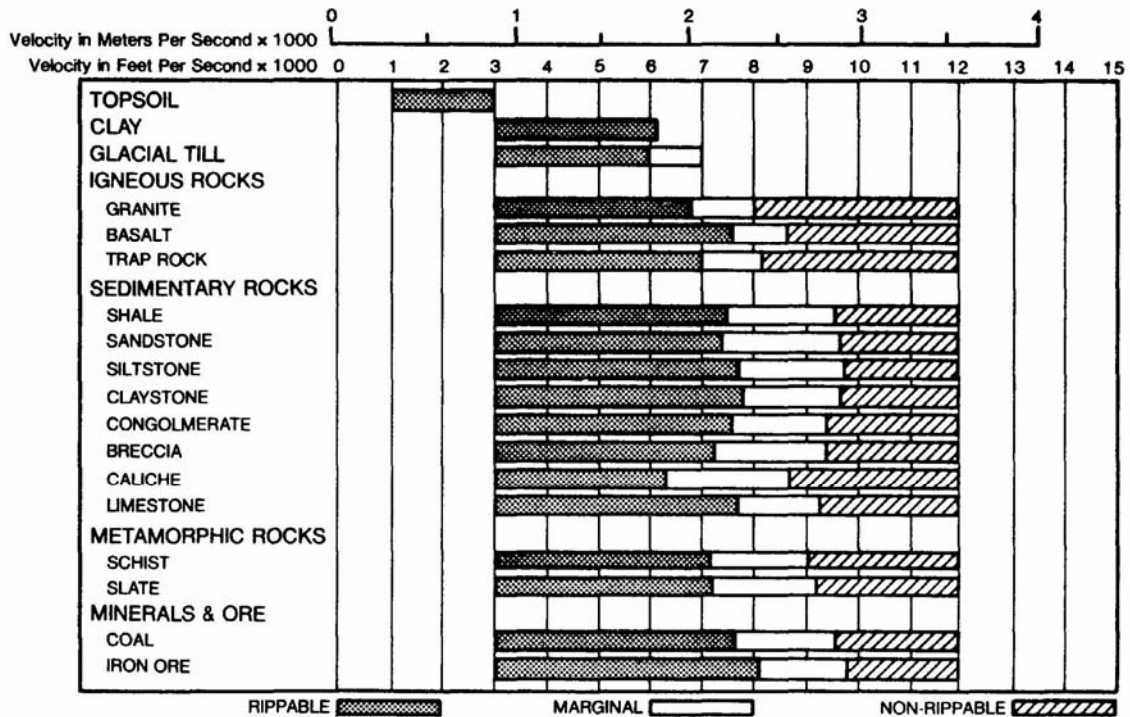
1. Εγχειρίδια κατασκευαστών χωματουργικών μηχανημάτων (Caterpillar, Komatsu). Υπάρχουν πίνακες που σχετίζουν τη σεισμική ταχύτητα (σχήματα 2.5-2.6) με τον τύπο του πετρώματος και χαρακτηρίζουν το πέτρωμα ως επιδεκτικό σε εξόρυξη (rippable), οριακά επιδεκτικό (marginal) ή μη επιδεκτικό (non rippable). Η εταιρία Caterpillar παρουσιάζει διαγράμματα παραγωγικότητας και σεισμικής ταχύτητας για ορισμένους τύπους μηχανήματος. Η εταιρία Komatsu έχει συσχετίσει την επιδεκτικότητα σε εξόρυξη με την αντοχή του πετρώματος. Τα διαγράμματα Caterpillar δείχνουν ότι ένα πέτρωμα μπορεί να εξορυχτεί οικονομικά ακόμα και όταν η παραγωγικότητα στο πεδίο είναι πολύ χαμηλή και η διαδικασία της εξόρυξης χαρακτηρίζεται από δύσκολη έως πολύ δύσκολη. Για τον παραπάνω λόγο, τα διαγράμματα Caterpillar υπερεκτιμούν την επιδεκτικότητα σε εξόρυξη.
2. Μέθοδοι βαθμονόμησης βασιζόμενες σε γεωλογικούς παράγοντες. Μερικές από αυτές προτάθηκαν από τους Franklin (1970), Franklin et al (1971), Weaver (1975), Chevassu (1978), Kirsten (1982), Minty & Kearns (1983), Scoble & Muftuoglu (1984), Pells (1985), Smith (1986), Singh, Denby & Egrelli (1987), Hadjigeorgiou & Scoble (1990). Οι μέθοδοι προσδιορίζουν το μέγεθος του χωματουργικού μηχανήματος που είναι κατάλληλο για την εξόρυξη ενός πετρώματος. Θεωρήθηκε ότι οι παραπάνω τεχνικές δεν εκτιμούν με ακρίβεια την παραγωγικότητα. Προτάθηκε μία καινούργια μέθοδος η οποία αποτελεί τη βελτιωμένη μορφή των προηγούμενων μεθόδων και είναι περισσότερο ακριβής.

Η προτεινόμενη μέθοδος για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας ενός πετρώματος σε εξόρυξη με χρήση μηχανοκίνητου άροτρου, χωρίστηκε σε δύο μέρη (MacGregor et al, 1994): εκτίμηση της παραγωγικότητας του κύκλου εργασίας και προσδιορισμός των συνθηκών για τις οποίες η εξόρυξη χαρακτηρίζεται δύσκολη ή και απαιτείται χρήση εκρηκτικών. Η εκτίμηση των παραπάνω, έγινε με το σχεδιασμό ενός γεωτεχνικού μοντέλου στο οποίο προσαρμόστηκαν τα δεδομένα. Η παραγωγικότητα κύκλου

εργασίας για κάθε τύπο πετρώματος, υπολογίστηκε από τις εμπειρικές σχέσεις που προέκυψαν από την ανάλυση. Αποδείχτηκε ότι η παραγωγικότητα κύκλου εργασίας με τιμή μικρότερη των 750 m³/h, σχετίζεται με δύσκολες συνθήκες εξόρυξης, ενώ αυτή με τιμή μικρότερη των 250 m³/h, σχετίζεται με πολύ δύσκολες συνθήκες.



Σχήμα 2.5: Επιλογή μηχανήματος συναρτήσει της σεισμικής ταχύτητας (Caterpillar, 1982).



Σχήμα 2.6: Σχέση ταχύτητας σεισμικού κύματος και εξορυξιμότητας πετρωμάτων (Caterpillar, 1982).

2.4 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Τα τελευταία χρόνια, από την έρευνα δεν έχουν εξαχθεί περαιτέρω συμπεράσματα. Η μεθοδολογία που ενδείκνυται για τον προσδιορισμό της επιδεκτικότητας ενός πετρώματος σε εξόρυξη με τη χρήση μηχανοκίνητου άροτρου (rippability), είναι αυτή που βασίζεται στο συνδυασμό των ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν ένα πέτρωμα και των στοιχείων εξόρυξης. Βασική προϋπόθεση για το σωστό σχεδιασμό της εξόρυξης, είναι η έρευνα της περιοχής και η συλλογή αντιπροσωπευτικών δειγμάτων, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν σε εργαστηριακές δοκιμές. Μετά τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν τους σχηματισμούς της περιοχής, ακολουθεί η χρήση των συστημάτων ταξινόμησης και των διαγραμμάτων, με τα οποία σχετίζονται τα χαρακτηριστικά του πετρώματος (φυσικά, γεωλογικά και μηχανικά), με την ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων. Τα πετρώματα κατατάσσονται σε κατηγορίες, κάθε μια από τις οποίες αντιστοιχεί σε ένα τύπο μηχανήματος. Με αυτό τον τρόπο, επιλέγεται ο εξοπλισμός της εξόρυξης σύμφωνα με δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί στο πεδίο. Η μεθοδολογία αυτή, εφαρμόστηκε σε ερευνητικά προγράμματα και είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Παρόλα αυτά, η εμπειρία έχει δείξει ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από μεθοδολογίες αξιολόγησης δεδομένων, αποτελούν εκτιμήσεις με μικρό ή μεγάλο ποσοστό αβεβαιότητας και μπορεί πολλές φορές να διαφέρουν από την πραγματικότητα.

3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

3.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

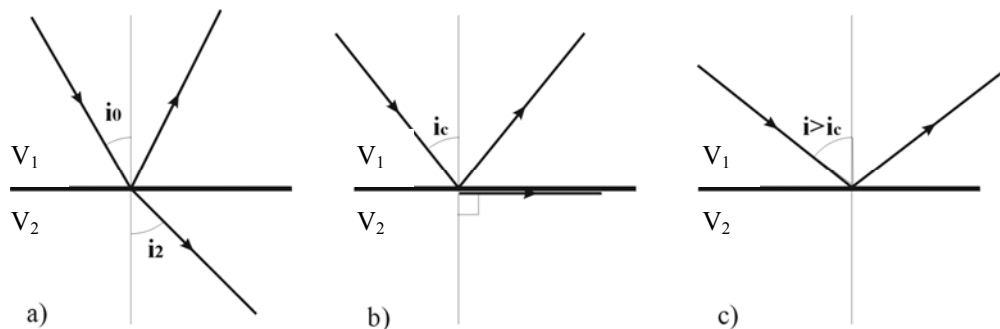
Τα σεισμικά κύματα υφίστανται διαδοχικές διαθλάσεις στις διαχωριστικές επιφάνειες ή σε μέσο όπου η ταχύτητα μεταβάλλεται με το βάθος, με αποτέλεσμα την αλλαγή της πορείας της σεισμικής ακτίνας. Η γωνία πρόσπτωσης, i_0 , η γωνία διάθλασης i_2 , και οι ταχύτητες V_1 και V_2 στα δύο επιφανειακά στρώματα 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 3.1b). Σε μια τέτοια περίπτωση ο νόμος του Snell τροποποιείται ως εξής:

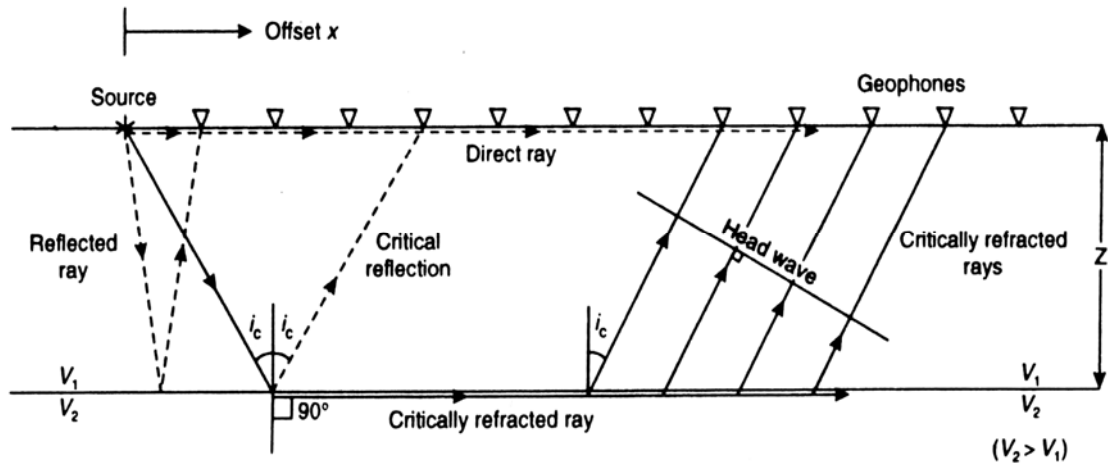
$$\sin(i_c) = \frac{V_1}{V_2} \quad (3.2)$$

Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της ορικής γωνίας, παρατηρείται ολική ανάκλαση (Σχήμα 3.1c). Βέβαια, θα πρέπει να σημειωθεί ότι βασική προϋπόθεση δημιουργίας ορικών διαθλωμένων κυμάτων είναι ότι 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).



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

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:

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

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.

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 3.5) και των αποστάσεων πηγής – γεωφώνου.
- Επιλέγονται τα σημεία που βρίσκονται σε ευθεία, η οποία ξεκινά από την αρχή των αξόνων (ευθεία OC Σχήμα 3.5). 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 3.5). 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 (3.2):

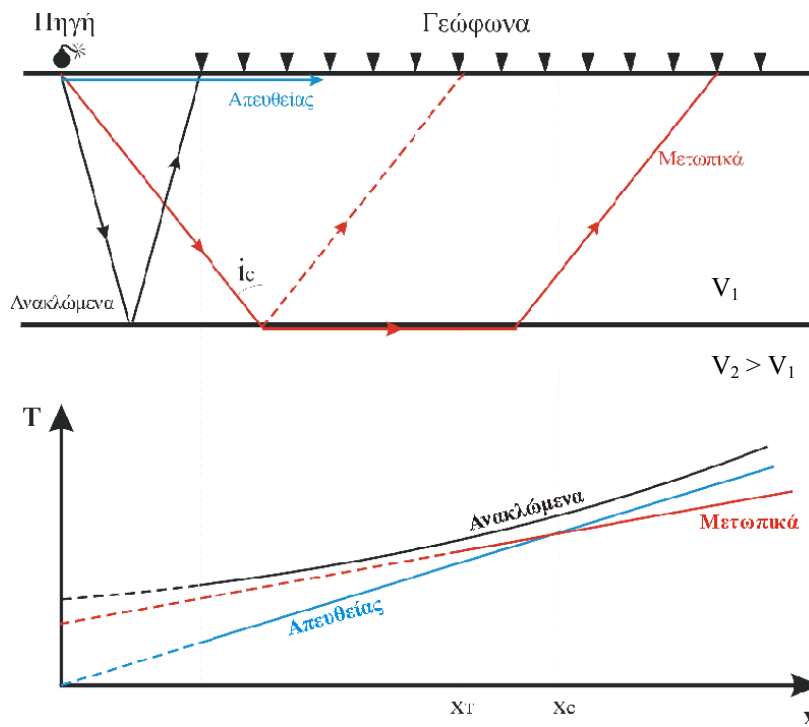
$$\sin(i_c) = \frac{V_1}{V_2}$$

- Υπολογίζεται το πάχος του επιφανειακού στρώματος z_1 από τη σχέση:

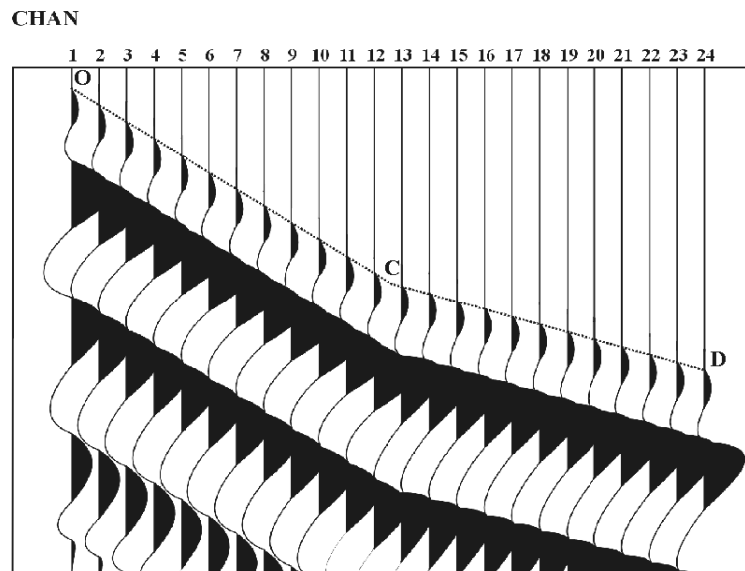
$$z_1 = \frac{T_2(0) \cdot V_1}{2 \cos(i_c)} \quad (3.5)$$

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 ακτίνας που διαδίδεται στο επιφανειακό στρώμα δίνεται από τη σχέση:

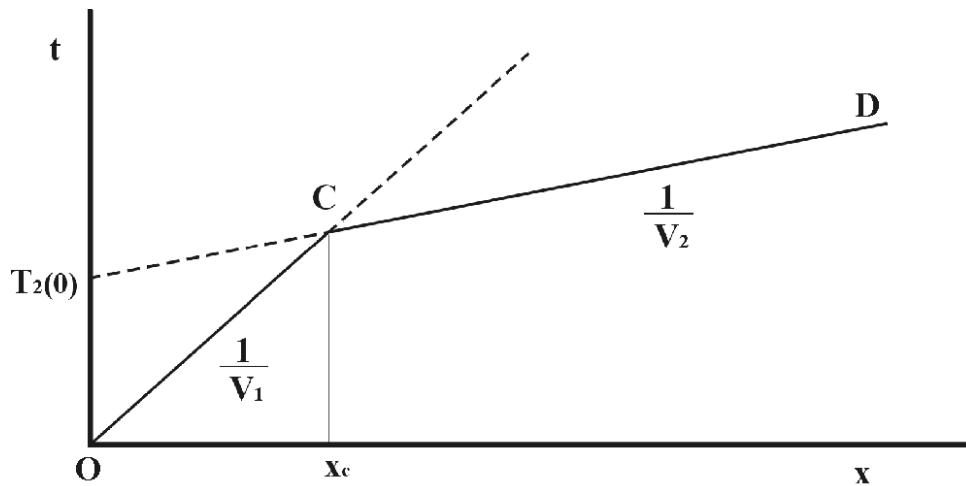
$$T_{12} = \frac{SA}{V_1} - \frac{OA}{V_2} \quad (= \frac{BG}{V_1} - \frac{BP}{V_2}) \quad (3.6)$$



Σχήμα 3.3: 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 $x > x_c$.



Σχήμα 3.4: Σχηματική παράσταση σεισμικών καταγραφών διάθλασης των οποίων οι πρώτες αφίξεις (διακεκομμένη γραμμή) αντιστοιχούν σε καταγραφές απευθείας (OC) και μετωπικών κυμάτων (CD).



Σχήμα 3.5: Καμπύλες διαδρομής των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων.

3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

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

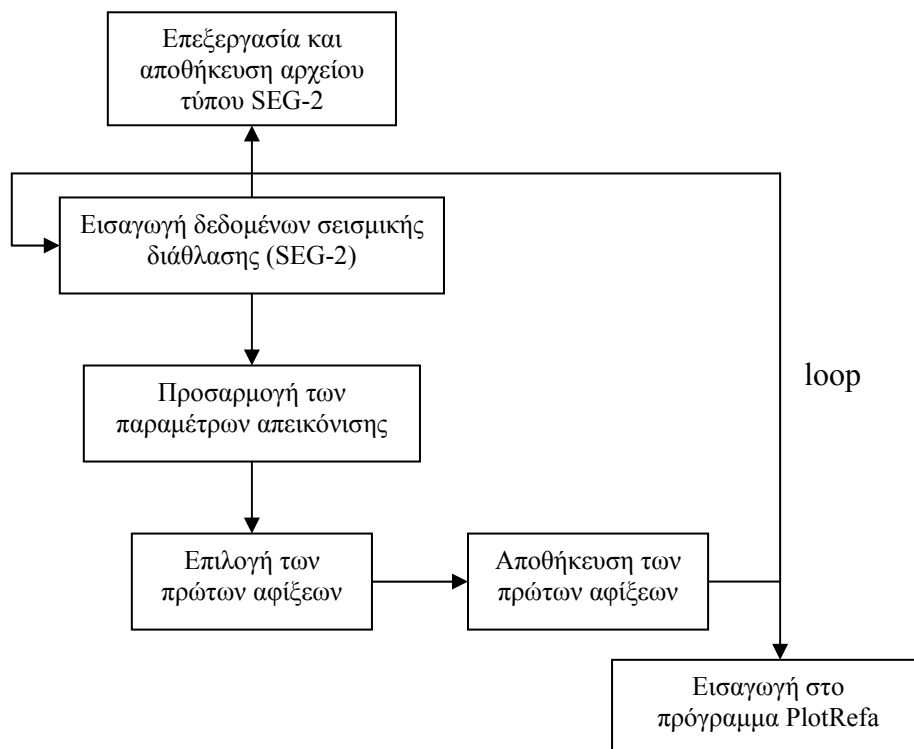
- Εισαγωγή των δεδομένων της σεισμικής διάθλασης.
- Διαμόρφωση της γεωμετρίας των δεδομένων.
- Επιλογή των πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων (picking) και αποθήκευση αυτών.
- Επεξεργασία των πρώτων αφίξεων.
- Δημιουργία δρομοχρονικών διαγραμμάτων.
- Αντιστροφή.
- Προσδιορισμός των σεισμικών ταχυτήτων και του μοντέλου βάθους (σεισμικές τομές).

Τα δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα επεξεργασίας (PickWin), σε μορφή SEG-2. Μετά την εισαγωγή των δεδομένων, ο χρήστης μπορεί να επέμβει και να διορθώσει τη γεωμετρία του πειράματος, αν είναι απαραίτητο (θέση πηγής, ισαπόσταση γεωφώνων κ.τ.λ.). Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης της εμφάνισης των δεδομένων, προκειμένου να διακρίνονται πιο εύκολα οι πρώτες αφίξεις. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται φίλτρα απομάκρυνσης θορύβου, ενίσχυσης του πλάτους των κυμάτων και μεγέθυνσης στην οριζόντια ή στην κατακόρυφη διεύθυνση.

Το πρόγραμμα επιλέγει αυτόματα τις πρώτες αφίξεις των σεισμικών κυμάτων, ενώ παρέχει δυνατότητα ελεύθερης επιλογής στο χρήστη. Η διαδικασία της εισαγωγής

και επεξεργασίας των δεδομένων, ολοκληρώνεται όταν χρησιμοποιηθούν όλα τα αρχεία που αντιστοιχούν στην ίδια γραμμή μελέτης (spread). Ακολουθεί η αποθήκευση του αρχείου (επέκταση .vs), το οποίο συμπεριλαμβάνει όλα τα αρχεία της ίδιας γραμμής μελέτης (σχήμα 3.6).

Με το κύριο πρόγραμμα ανάλυσης και ερμηνείας (PlotRefa) πραγματοποιείται η αντιστροφή των πρώτων αφίξεων με τη μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας. Το πρόγραμμα λαμβάνει ως αρχείο εισόδου, το αρχείο εξόδου του προγράμματος Pickwin (αρχεία με επέκταση .vs) και παρέχει τη δυνατότητα της κοινής επεξεργασίας περισσότερων του ενός αναπτύγματος (spreads), που σχηματίζουν ευθεία γραμμή μελέτης. Μετά την εισαγωγή των δεδομένων, δημιουργείται το δρομοχρονικό διάγραμμα (διάγραμμα χρόνου διαδρομής συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης πηγής - γεωφώνου). Ο χρήστης μπορεί να κάνει διορθώσεις, να διαγράψει δεδομένα και να μεταβάλει την κλίμακα. Επιλέγεται ο αριθμός των στρωμάτων. Το σημείο που εμφανίζει αλλαγή κλίσης στην καμπύλη των πρώτων αφίξεων, αποτελεί ένδειξη αλλαγής στρώματος. Τα σεισμικά στρώματα τονίζονται με διαφορετικό χρώμα.



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα ροής του προγράμματος PickWin. Η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων επαναλαμβάνεται (loop) μέχρις ότου εισαχθούν όλα τα δεδομένα που αντιστοιχούν στην ίδια γραμμή μελέτης (spread).

Στη συνέχεια εφαρμόζονται δύο μέθοδοι αντιστροφής: η μέθοδος της Σεισμικής Τομογραφίας (Tomography) και η μέθοδος Αντιστροφής των Χρόνων Καθυστέρησης (Time-Term).

Στη δεύτερη μέθοδο, με την εντολή “Time-Term Inversion”, οι χρόνοι καθυστέρησης (delay times) υπολογίζονται αυτόματα (μέσω της γραμμικής μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων), ενώ μπορούν να εισαχθούν τα υψόμετρα στις θέσεις των γεωφώνων. Προκύπτει το αρχικό μοντέλο βάθους που αποτελείται από δύο στρώματα. Σε κάθε στρώμα αντιστοιχεί μία μέση ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Πιο αναλυτικά:

- Ορίζεται ως βραδύτητα S , το αντίστροφο της ταχύτητας:

$$S_1 = \frac{1}{V_1} \quad (3.7)$$

$$S_2 = \frac{1}{V_2} \quad (3.8)$$

όπου V_1 και V_2 είναι οι ταχύτητες του πρώτου και δεύτερου στρώματος αντίστοιχα (σχήμα 3.7).

- Προσδιορίζεται η ορική γωνία i_c (Νόμος Snell):

$$\sin(i_c) = \frac{S_2}{S_1}. \quad (3.9)$$

- Ο ολικός χρόνος διαδρομής t του μετωπικού κύματος, από την πηγή στο γεώφωνο δίνεται από τη σχέση:

$$t = 2S_1 \cos(i_c)z + xS_2 = cz + xS_2 \quad (3.10)$$

όπου x η γνωστή απόσταση μεταξύ της πηγής και του γεωφώνου και z το πάχος του πρώτου στρώματος. Με το συνδυασμό των παραπάνω σχέσεων, υπολογίζεται η βραδύτητα S_2 και το πάχος z .

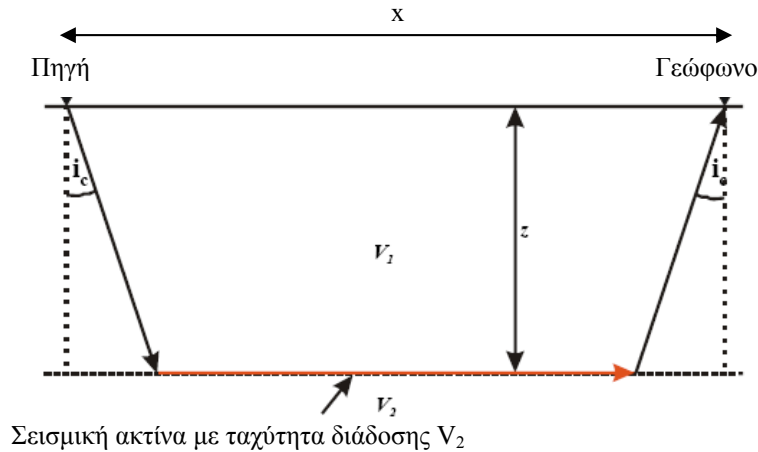
Όταν η διαχωριστική επιφάνεια παρουσιάζει καμπυλότητα (σχήμα 3.8), το πάχος του πρώτου στρώματος και η βραδύτητα του δεύτερου στρώματος S_2 υπολογίζονται από τη σχέση:

$$t = cz_1 + cz_2 + xS_2 \quad (3.11)$$

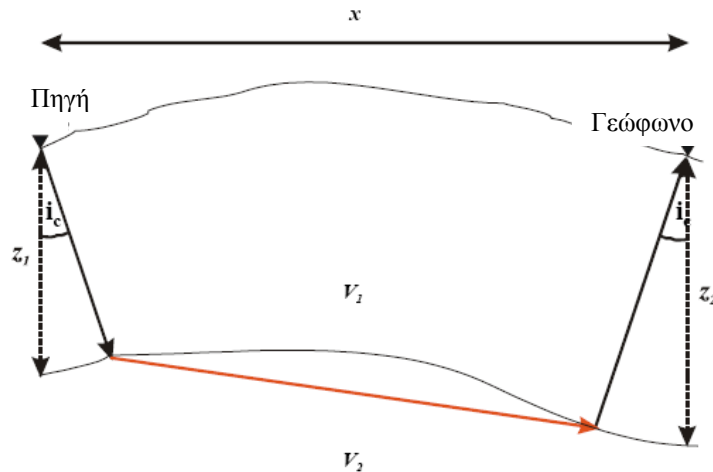
Για περισσότερα στρώματα ισχύει:

$$t_j = \sum_{k=1}^n c_{jk} z_k + x_j S_2 \quad (3.12)$$

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



Σχήμα 3.7: Σεισμική ακτίνα μετωπικού κύματος.



Σχήμα 3.8: Πορεία σεισμικής ακτίνας.

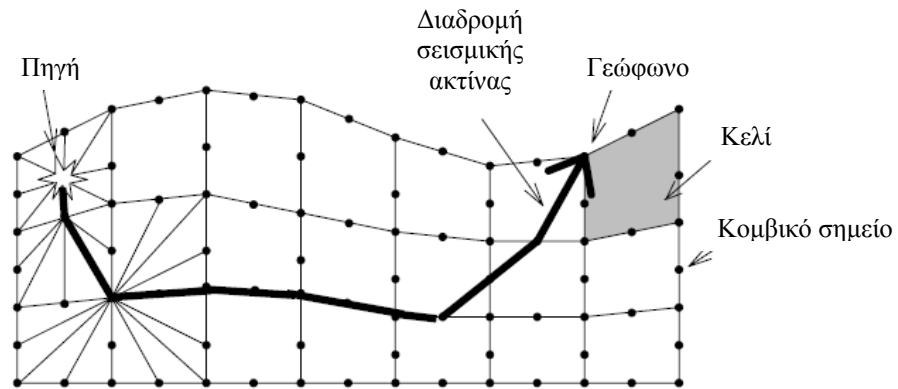
Η μέθοδος της σεισμικής τομογραφίας βασίζεται σε αρχικό μοντέλο ταχυτήτων, το οποίο είτε δημιουργείται με τη μέθοδο αντιστροφής των χρόνων καθυστέρησης, είτε κατασκευάζεται βάσει ορισμένων παραμέτρων (ελάχιστη και μέγιστη σεισμική ταχύτητα, αριθμός στρωμάτων, βάθος, υψόμετρο). Χρησιμοποιείται όταν η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων μεταβάλλεται βαθμιαία, όταν είναι γνωστή η ύπαρξη πλευρικής μεταβολής της ταχύτητας και σε περιπτώσεις έντονου ανάγλυφου.

Πάνω στο αρχικό μοντέλο ταχυτήτων, σχεδιάζονται επαναληπτικά οι διαθλώμενες σεισμικές ακτίνες και υπολογίζεται ο χρόνος διαδρομής για κάθε τέτοια ακτίνα, με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα που προκύπτει, μεταξύ των χρόνων διαδρομής που παρατηρούνται και αυτών που υπολογίζονται.

Η διαδικασία εύρεσης του ελάχιστου χρόνου διαδρομής του κύματος, από την πηγή στο γεώφωνο, για κάθε ζεύγος πηγής – γεωφώνου (ευθύ πρόβλημα) ακολουθεί τα

εξής βήματα:

- Το αρχικό μοντέλο ταχυτήτων χωρίζεται σε περιοχές-κελιά (cells) σταθερής ταχύτητας (σχήμα 3.9).
- Καθορίζεται η τιμή των παρακάτω παραμέτρων: αριθμός των επαναλήψεων, αριθμός των κομβικών σημείων (nodes) που βρίσκονται κατά μήκος των πλευρών του κελιού και όχι στις γωνίες, εξομάλυνση κατά την οριζόντια και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, μέγιστη και ελάχιστη ταχύτητα.
- Σχεδιάζονται οι πιθανές διαδρομές των σεισμικών ακτίνων από την πηγή στα γεώφωνα. Τα σημεία τομής της ακτίνας με το κελί, ονομάζονται κομβικά σημεία. Το πλήθος των σημείων αυτών, αποτελεί ένδειξη της πυκνότητας των ακτίνων.



Σχήμα 3.9: Σχεδιασμός κανάβου στο αρχικό μοντέλο ταχυτήτων.

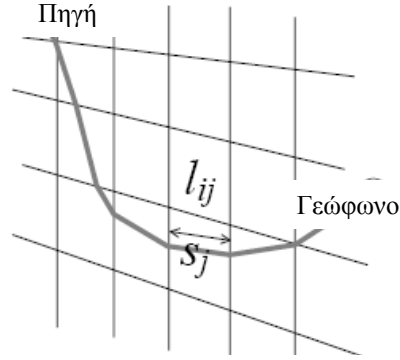
Στο σχήμα 3.11 απεικονίζονται όλες οι πιθανές διαδρομές από την πηγή Α στο γεώφωνο Β και υπολογίζεται ο χρόνος διαδρομής μεταξύ των κομβικών σημείων, ενώ στο σχήμα 3.12 απεικονίζεται ο τρόπος υπολογισμού της συντομότερης διαδρομής.

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

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

$$t_i = \sum_{j=1}^N S_j l_{ij} \quad (3.13)$$

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 3.10). Επιλέγεται η διαδρομή με τον ελάχιστο χρόνο (βέλτιστη διαδρομή).



Σχήμα 3.10: Απεικόνιση της διαδρομής της σεισμικής ακτίνας από την πηγή στο γεώφωνο.

- Υπολογίζεται η διαφορά ΔT μεταξύ των χρόνων διαδρομής που υπολογίστηκαν (T^c) και αυτών που παρατηρήθηκαν (T^o):

$$\Delta T_k = T^o - T_k^c \quad (3.14)$$

όπου k είναι ο αριθμός των επαναλήψεων.

- Προσδιορίζονται οι διορθωμένες τιμές της βραδύτητας και το αρχικό μοντέλο τροποποιείται. Το σύστημα που προκύπτει, είναι της μορφής:

$$L\Delta S = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdot & l_{1N} \\ l_{21} & l_{22} & \cdot & l_{2N} \\ l_{31} & l_{32} & \cdot & l_{3N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ l_{M1} & l_{M2} & \cdot & l_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta s_1 \\ \Delta s_2 \\ \cdot \\ \Delta s_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \\ \cdot \\ \Delta t_M \end{bmatrix} = T^o - T^c \quad (3.15)$$

$$L_k \Delta S_k = \Delta T_k \quad (3.16)$$

$$S_{k+1} = S_k + \Delta S_k \quad (3.17)$$

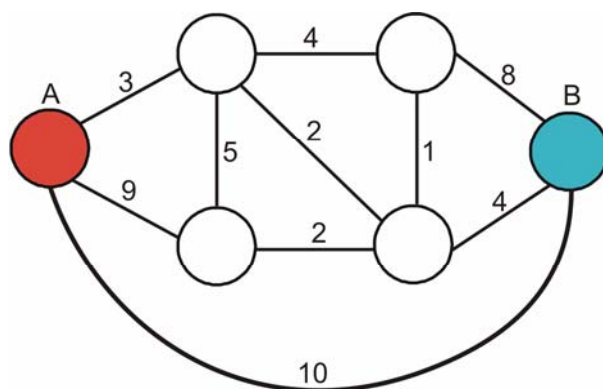
Τα στοιχεία του πίνακα L (Ιακωβιανός πίνακας) υπολογίζονται από τη σχέση:

$$l_{ij} = \frac{\partial t_i}{\partial s_j} \quad (3.18)$$

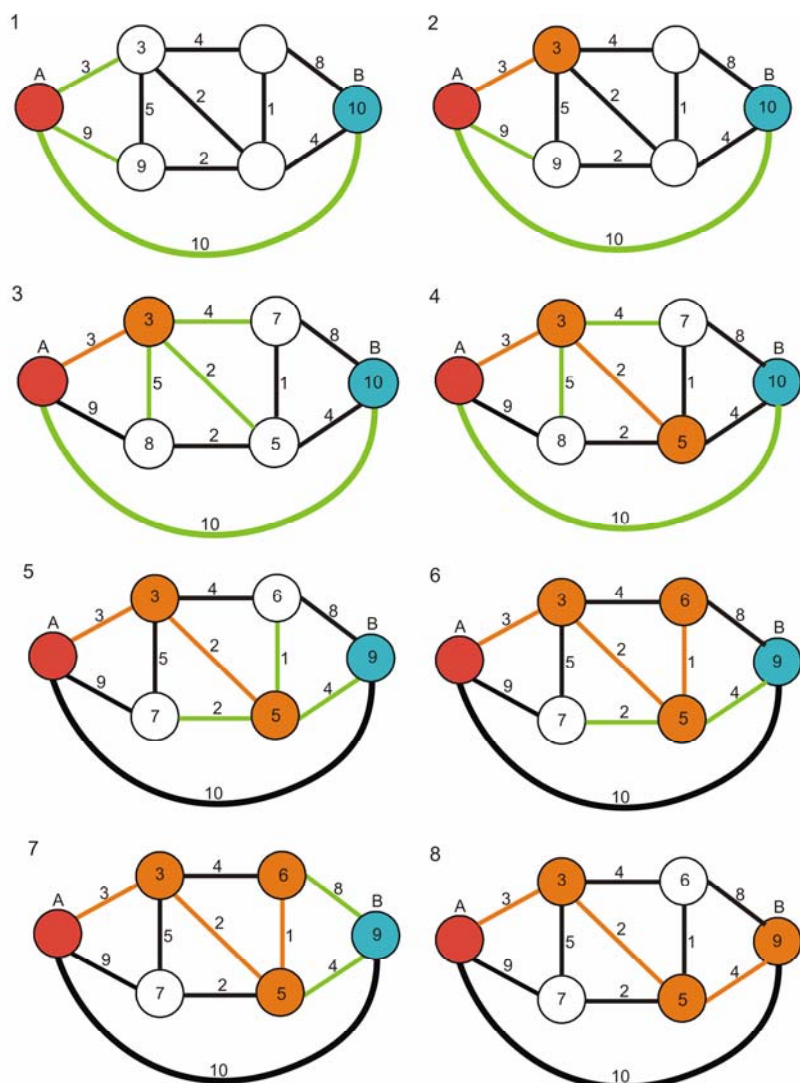
Το γραμμικό σύστημα (3.15) τροποποιείται:

$$L^T L \Delta S = L^T \Delta T \quad (3.19)$$

και επιλύεται με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων.



Σχήμα 3.11: Πορεία της σεισμικής ακτίνας από την πηγή A στο γεώφωνο B.



Σχήμα 3.12: Υπολογισμός του ελάχιστου χρόνου διαδρομής της σεισμικής ακτίνας.

- Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS error) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E = LS - T \quad (3.20)$$

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

- Δημιουργείται το τελικό μοντέλο ταχυτήτων.

Όσο περισσότερες είναι οι επαναλήψεις, τόσο πιο αξιόπιστο είναι το τελικό μοντέλο.

Οι υπολογιζόμενοι χρόνοι διαδρομής, απεικονίζονται στο δρομοχρονικό διάγραμμα και συγκρίνονται με αυτούς που παρατηρήθηκαν. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποθηκεύονται για περαιτέρω επεξεργασία.

Τα προγράμματα επεξεργασίας (PickWin, PlotRefa) αποτελούν εφαρμογές του λογισμικού SeisImager.

4. ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης ανήκει στο Δήμο Μαλίων, Νομού Ηρακλείου και βρίσκεται περίπου 30 km Δυτικά – Νοτιοδυτικά της πόλης του Ηρακλείου (Σχήμα 4.1). Ειδικότερα, η περιοχή μελέτης καλύπτει την ευρύτερη περιοχή του χωριού Μοχός Ηρακλείου.

4.2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

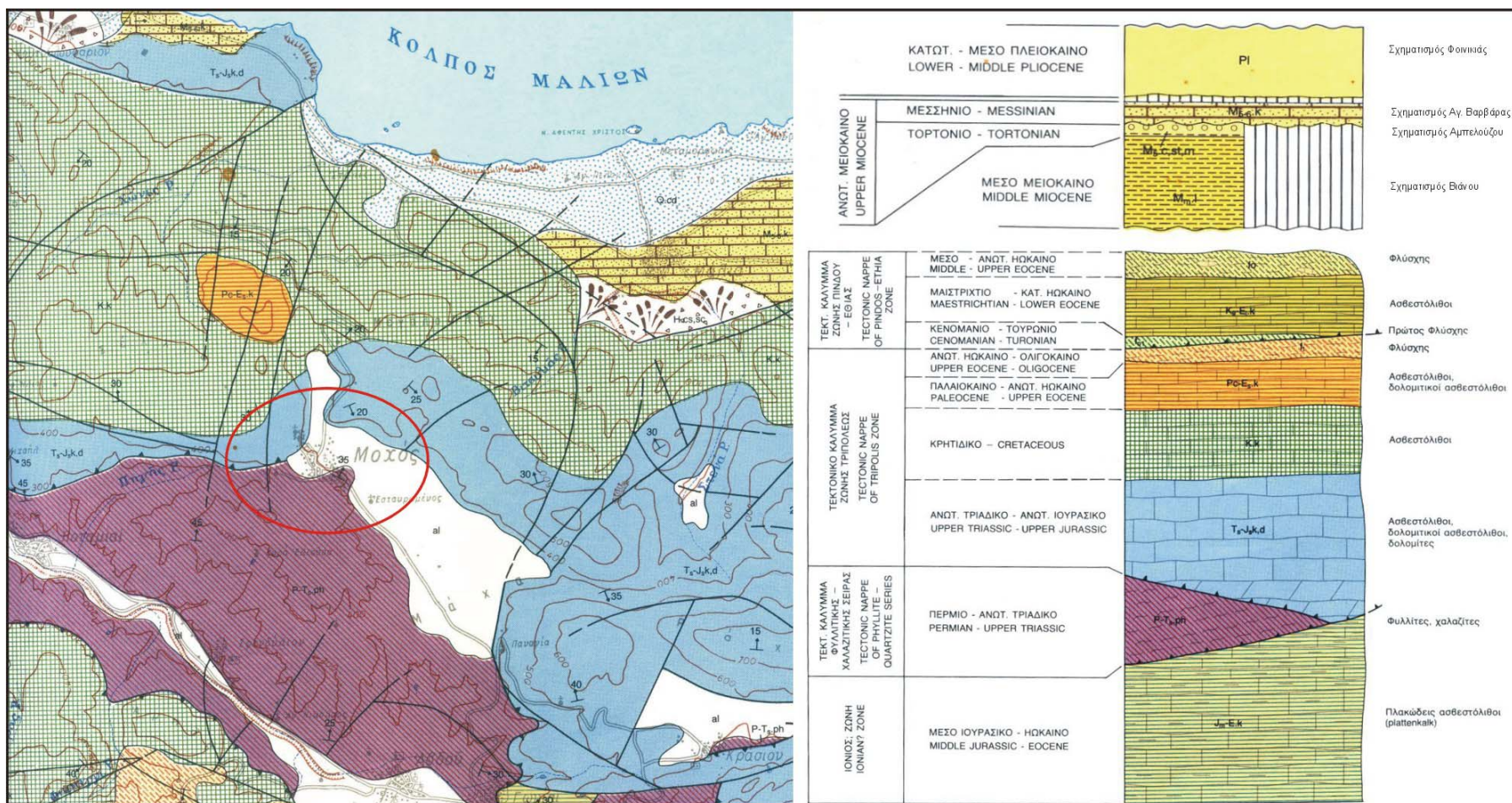
Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που παρατηρούνται στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος (Σχήμα 4.1) είναι (πηγή: Γεωλογικός χάρτης, Φύλλο Μοχός, 1:50.000):

α) Τεταρτογενείς αλλουβιακές αποθέσεις (al): είναι οι νεότερες αποθέσεις της περιοχής και αποτελούνται από χαλαρά αργιλοαμμώδη υλικά, ερυθρογή (Terra Rosa) με κροκαλολατύπες σε μικρές εσωτερικές λεκάνες και υλικά ελουβιακού μανδύα.

β) Ασβεστόλιθοι, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες της ζώνης Τρίπολης (T_s - J_s ,k,d): αποτελούν τη βάση του τεκτονικού καλύμματος των εξωτερικών ζωνών και βρίσκονται κατά κανόνα πάνω από τη φυλλιτική – χαλαζιτική σειρά, με αποτέλεσμα στη βάση τους να είναι κατά θέσεις μυλονιτωμένοι, λόγω του τεκτονισμού αυτών. Τα κατώτερα μέλη τους αποτελούνται από ημικρυσταλλικούς δολομίτες, παχυστρωματώδεις μέχρι άστρωτους, τεφρούς, ενώ τα ανώτερα, μεταπίπτουν σε ασβεστόλιθους και δολομιτικούς ασβεστόλιθους μεσοστρωματώδεις, τεφρόλευκους μέχρι τεφρόμαυρους. Στο σύνολό τους είναι καρστικοί και κυρίως τα ανώτερα μέλη.

γ) Ζώνη της Φυλλιτικής – Χαλαζιτικής σειράς (P - T_s ,ph): Ενότητα πετρωμάτων χαμηλής μεταμόρφωσης που έχει επωθηθεί, μαζί με τους τεκτονικά υπερκείμενους σχηματισμούς της ζώνης Τριπόλεως, πάνω από την αυτόχθονη σειρά των «πλακωδών ασβεστολίθων» κατά το Κατώτερο Μειόκαινο. Αναλυτικότερα, στην ενότητα αυτή τοποθετούνται οι φυλλίτες, χαλαζίτες και σερικιτικοί σχιστόλιθοι, που παρεμβάλλονται μεταξύ των «πλακωδών ασβεστολίθων» ή του μεταφλύσχη και των ανθρακικών πετρωμάτων της ζώνης Τριπόλεως. Μερικές φορές διασχίζονται από αδροκρυσταλλικές φλέβες χαλαζία πάχους 10 cm, περίπου. Κατά θέσεις φέρουν φακοειδή σώματα από μεταβασίτες.

Επικρατούν: α) μαρμαρυγικοί-ανθρακικοί σχιστόλιθοι, με ιστό μικροκρυσταλλικό-λεπιδοβλαστικό και υφή σχιστώδη, παράλληλα προσανατολισμένη.



Σχήμα 4.1: Τμήμα του γεωλογικού χάρτη «Φύλλο Μοχός», όπου απεικονίζεται με έλλειψη η ευρύτερη περιοχή μελέτης.

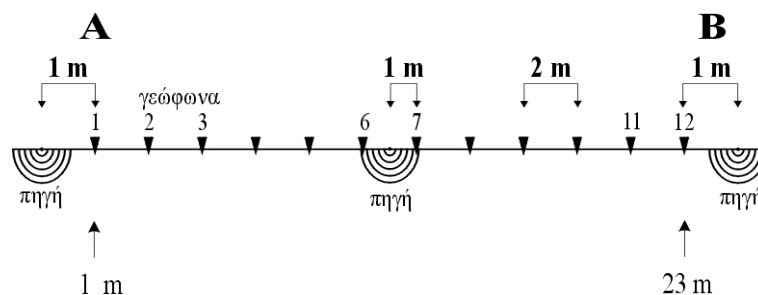
Αποτελούνται κυρίως από μαρμαρυγίες-υδρομαρμαρυγίες και χλωρίτη σε μικροφυλλάκια παράλληλα διευθετημένα, επιμήκεις μικροκρυστάλλους ασβεστίτη και σε μικρότερη αναλογία κρυστάλλους χαλαζία και αστρίων. Η αρχική τους προέλευση είναι ιζηματογενής. β) Χαλαζιακοί μετα-ψαμμίτες, με ιστό μικροψαμμιτικό και υφή συμπαγή ελαφρά παράλληλα προσανατολισμένη και μικροπτυχωμένη. Αποτελούνται κυρίως από θραυστιγενείς γωνιώδεις κόκκους χαλαζία, με πολύ μικρή συμμετοχή αστρίων και θραύσματα πυριτόλιθων, τα διάκενα των οποίων πληρούν με μορφή συγκολλητικής μάζας λεπτοφυλλάκια σερίκίτη και λιγότερο υδροβιοτίτη.

4.3 ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η γεωφυσική έρευνα είχε ως στόχο την απεικόνιση των γεωλογικών σχηματισμών του υπεδάφους, τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκων σεισμικών κυμάτων στους επιφανειακούς σχηματισμούς της περιοχής μελέτης και τελικά τον υπολογισμό της κατανομής του βραχώδους γεωϋλικού στο υπέδαφος.

Στα πλαίσια της μελέτης αυτής, η γεωφυσική έρευνα περιλαμβάνει 79 αναπτύγματα πηγής-γεωφώνων με τη διάταξη της σεισμικής διάθλασης μήκους 24 m το κάθε ένα. Η γεωμετρία των πειραμάτων (θέσεις σεισμικών πηγών και γεωφώνων) των αναπτυγμάτων αυτών απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2. Η διάρκεια κάθε σεισμικής καταγραφής ήταν 100 msec, ενώ το διάστημα δειγματοληψίας ορίστηκε στα 62.5 nsec. Χρησιμοποιήθηκαν 12 γεώφωνα κατακόρυφης συνιστώσας ιδιοσυχνότητας 14 Hz και αντίστοιχου αριθμού μεταλλικές βάσεις στερέωσής τους. Ως καταγραφικό όργανο χρησιμοποιήθηκε ένα 12κάναλο GEODE της Geometrics, ενώ ως σεισμική πηγή χρησιμοποιήθηκε βαριοπούλα 5 kg, πίπτουσα επί μεταλλικής πλάκας.

Για την κωδικοποίηση των αναπτυγμάτων των σεισμικών γραμμών χρησιμοποιήθηκαν τα αριθμητικά σύμβολα από 101 έως 179 για τα 79 αναπτύγματα πηγής-γεωφώνων, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.2: Γεωμετρία των σεισμικών γραμμών μελέτης.

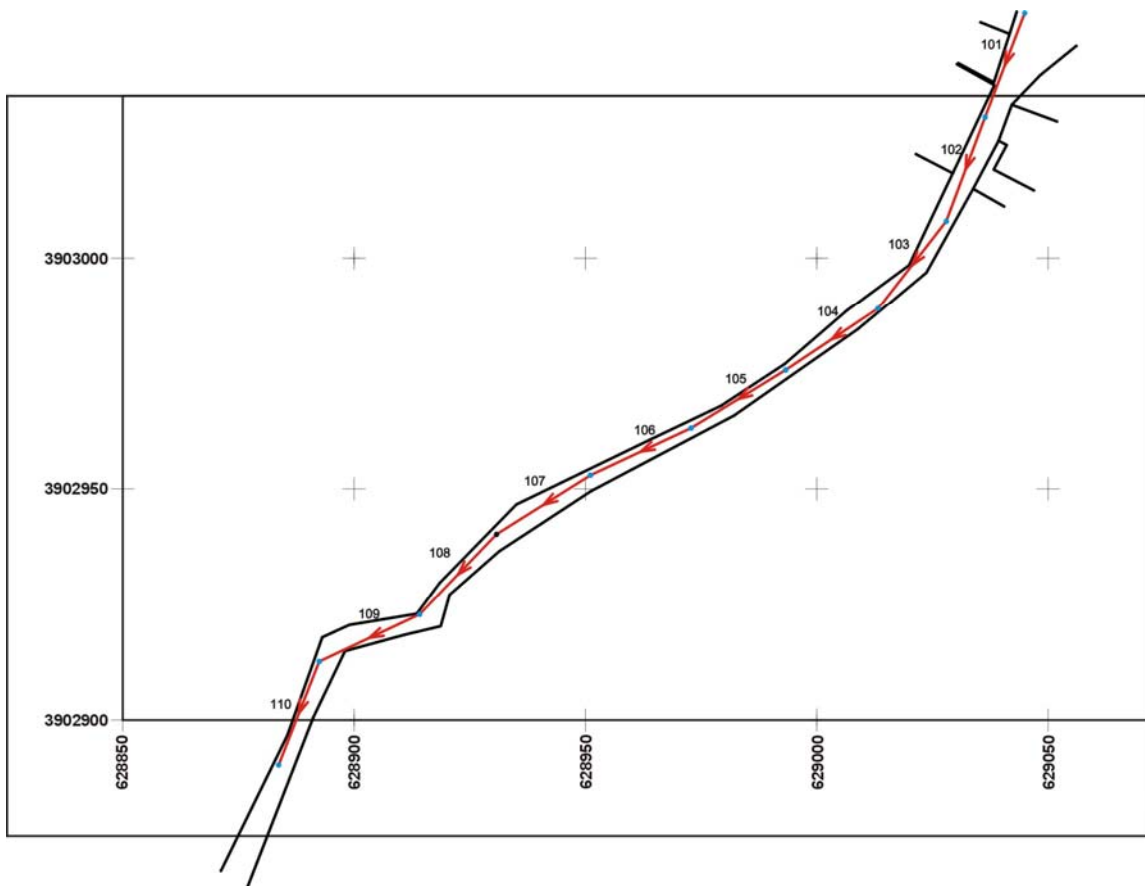
Λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων, ορισμένα από τα αναπτύγματα σεισμικών πηγής-γεωφώνων ενοποιήθηκαν, ώστε να σχηματίζουν σεισμικές γραμμές μελέτης. Ως κριτήριο για την ενοποίηση των αναπτυγμάτων χρησιμοποιήθηκε η γεωμετρική συνέχεια τους στο χώρο. Ειδικότερα, ενοποιήθηκαν κατά κανόνα, τα αναπτύγματα που βρίσκονταν πάνω σε νοητή ευθεία. Στον Πίνακα 4.1 παρατίθενται οι πληροφορίες που αφορούν στην ενοποίηση των σεισμικών αναπτυγμάτων, ενώ στα Σχήματα 4.3 έως 4.6 απεικονίζονται τμηματικά τα αναπτύγματα πηγής-γεωφώνων τοποθετημένα σε τοπογραφικό χάρτη της περιοχής μελέτης. Οι συντεταγμένες αναφέρονται στο γεωδαιτικό σύστημα ΕΓΣΑ 87’.

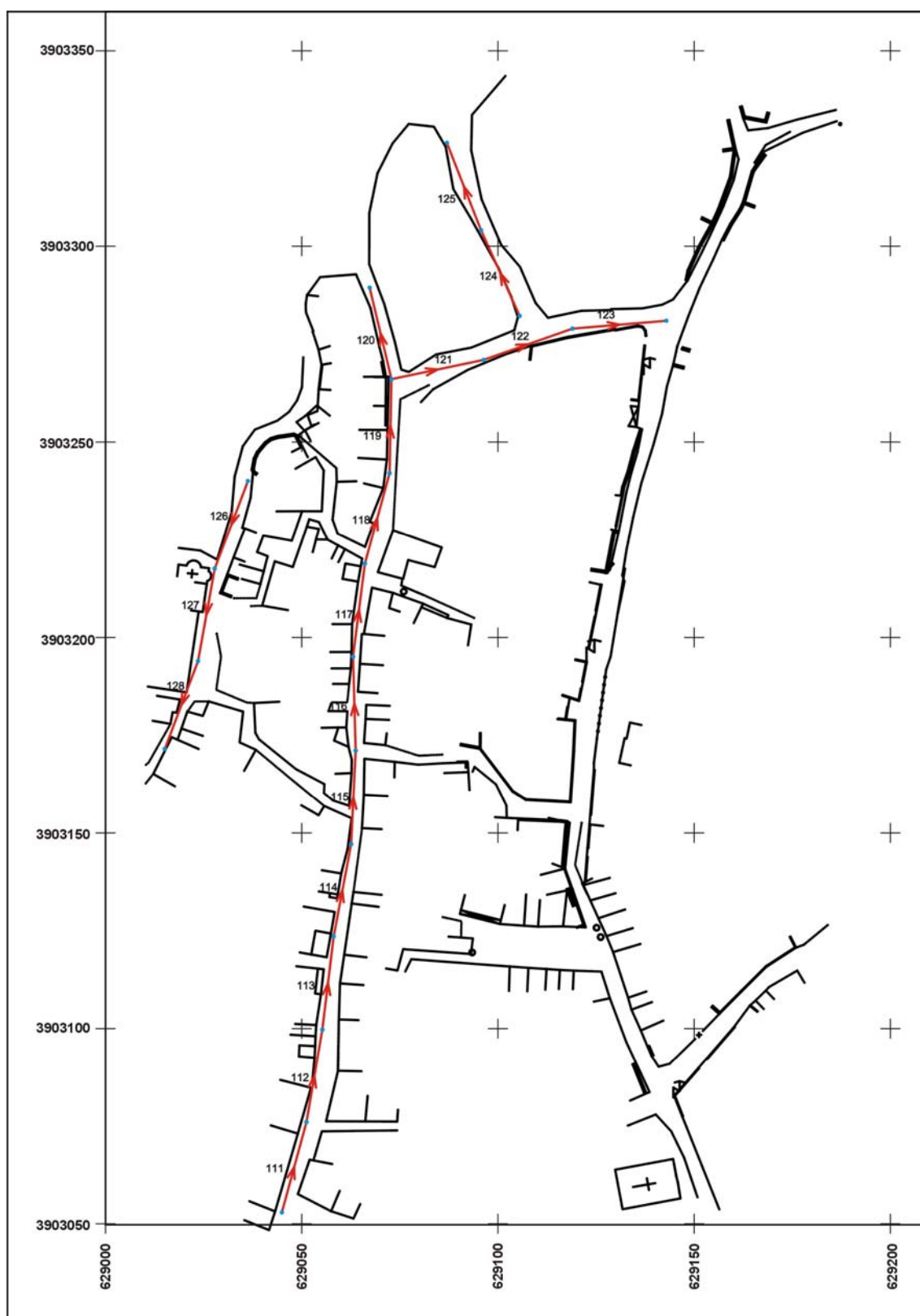
Κατά την επεξεργασία των δεδομένων δε λήφθηκαν υπόψη τυχόν υψομετρικές διαφορές και επομένως, τα μοντέλα βάθους που προέκυψαν οριοθετούνται από το ανάγλυφο της επιφανείας του εδάφους.

Η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης βασίζεται στον πειραματικό προσδιορισμό των χρόνων διαδρομής των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων και στη χρησιμοποίησή τους για τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων και του πάχους των εδαφικών σχηματισμών. Η πλευρική μεταβολή της ταχύτητας προσδιορίζεται με τη μέθοδο σεισμικής τομογραφίας. Κατά τη διαδικασία αυτή, οι ταχύτητες ενός θεωρητικού μοντέλου μεταβάλλονται επαναληπτικά προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ υπολογιζόμενου και μετρούμενου χρόνου των πρώτων αφίξεων σε κάθε θέση καταγραφής.

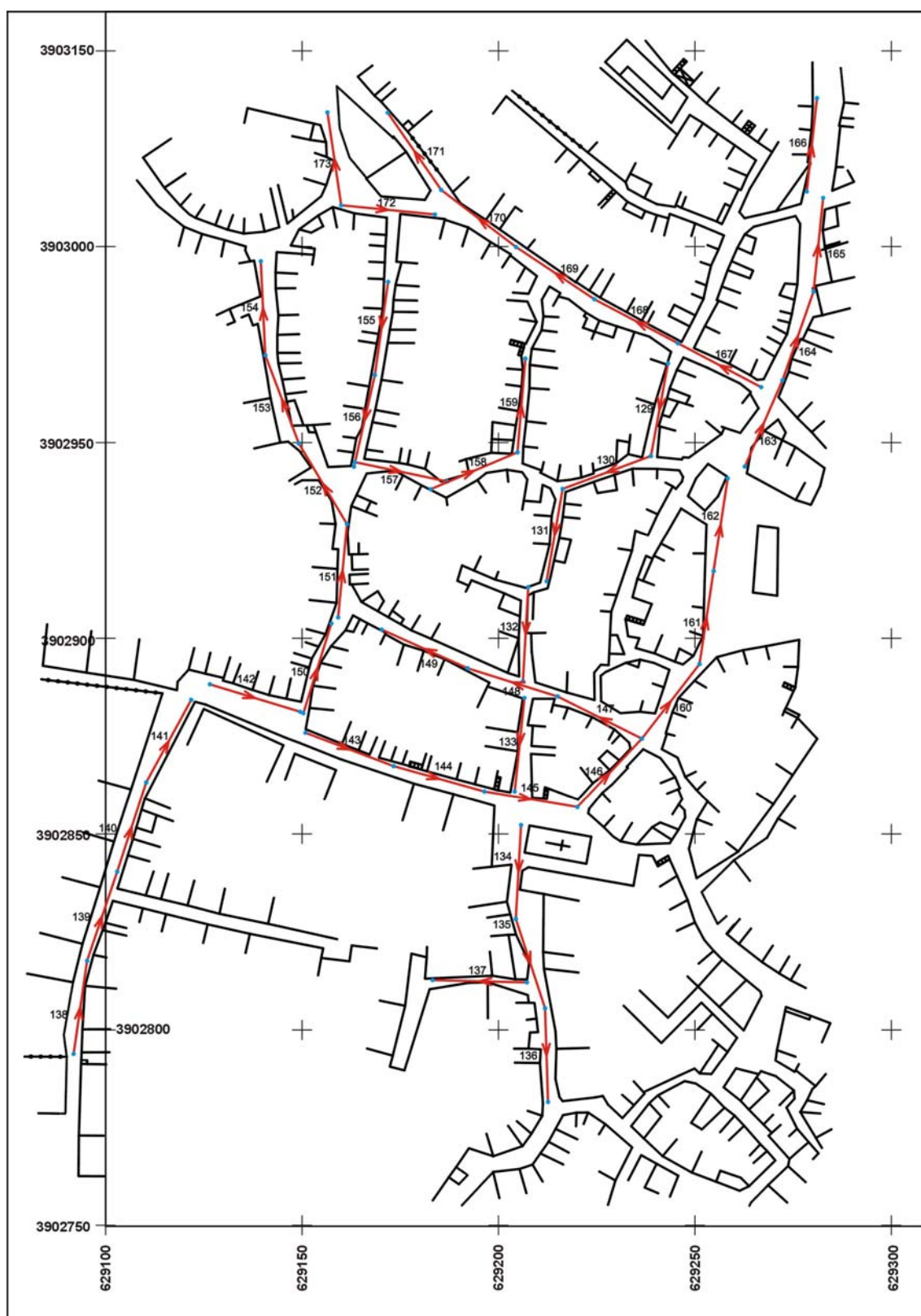
Πίνακας 4.1: Ενοποίηση των αναπτυγμάτων πηγής-γεωφώνων σε σεισμικές γραμμές μελέτης.

Κωδικός Σεισμικής Γραμμής	Αναπτύγματα	Γενική Διεύθυνση	Μήκος Γραμμής (m)
Line_101-110	101 – 110	BA → NΔ	240
Line_111-120	111 – 120	N → B	240
Line_121-123	121 – 123	Δ → A	72
Line_124-125	124 – 125	N → B	48
Line_126-128	126 – 128	B → N	72
Line_129-136	129 – 136	B → N	192
Line_137	137	A → Δ	24
Line_138-141	138 – 141	N → B	96
Line_142-145	142 – 145	Δ → A	96
Line_147-149	147 – 149	A → Δ	72
Line_150-154	150 – 154	N → B	120
Line_155-156	155 – 156	B → N	48
Line_157-159	157 – 159	Δ → A & N → B	72
Line_160-166(+146)	146 + 160 – 166	N → B	192
Line_167-171	167 – 171	NA → BΔ	120
Line_172-173	172 – 173	Δ → A & N → B	48
Line_174	174	N → B	24
Line_175-176	175 – 176	NΔ → BA & BΔ → NA	48
Line_177-179	177 – 179	BA → NΔ	72

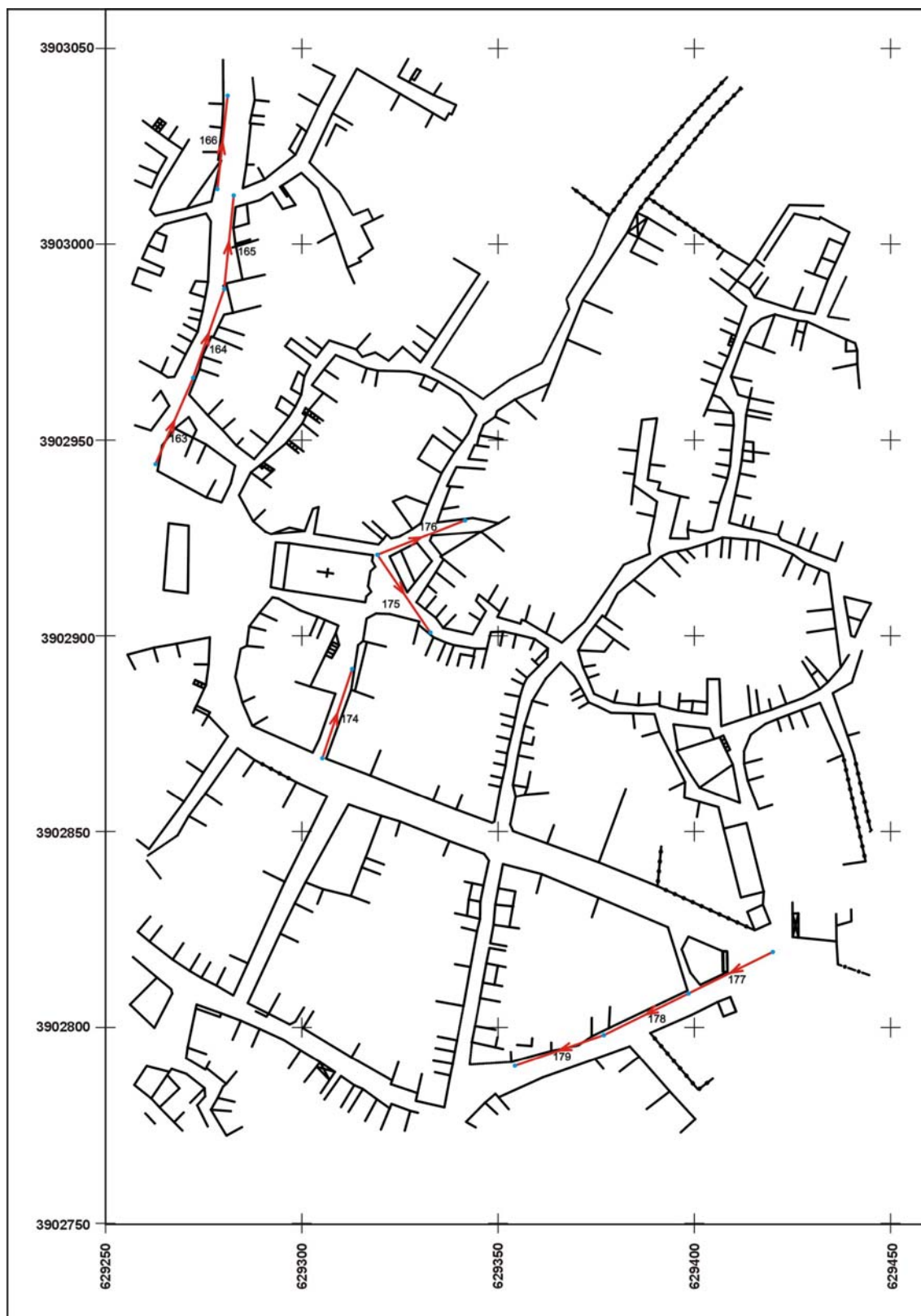
**Σχήμα 4.3:** Απεικόνιση των αναπτυγμάτων πηγής-γεωφώνων 101-110.



Σχήμα 4.4: Απεικόνιση των αναπτυγμάτων πηγής-γεωφώνων 111-120, 121-123, 124-125 και 126-128.



Σχήμα 4.5: Απεικόνιση των αναπτυγμάτων πηγής-γεωφώνων 129-136, 137, 138-141, 142-145, 147-149, 150-154, 155-156, 157-159, 160-166(+146), 167-171 και 172-173.



Σχήμα 4.6: Απεικόνιση των αναπτυγμάτων πηγής-γεωφώνων 174, 175-176, και 177-179.

4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

4.4.1 Υποκειμενικότητα στην Επεξεργασία των Δεδομένων

Προκειμένου να αποδειχτεί ότι η χρήση του λογισμικού SeisImager φέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ανεξαρτήτως χρήστη, έγινε ξανά επεξεργασία για ορισμένες γραμμές μελέτης (πίνακας 4.2):

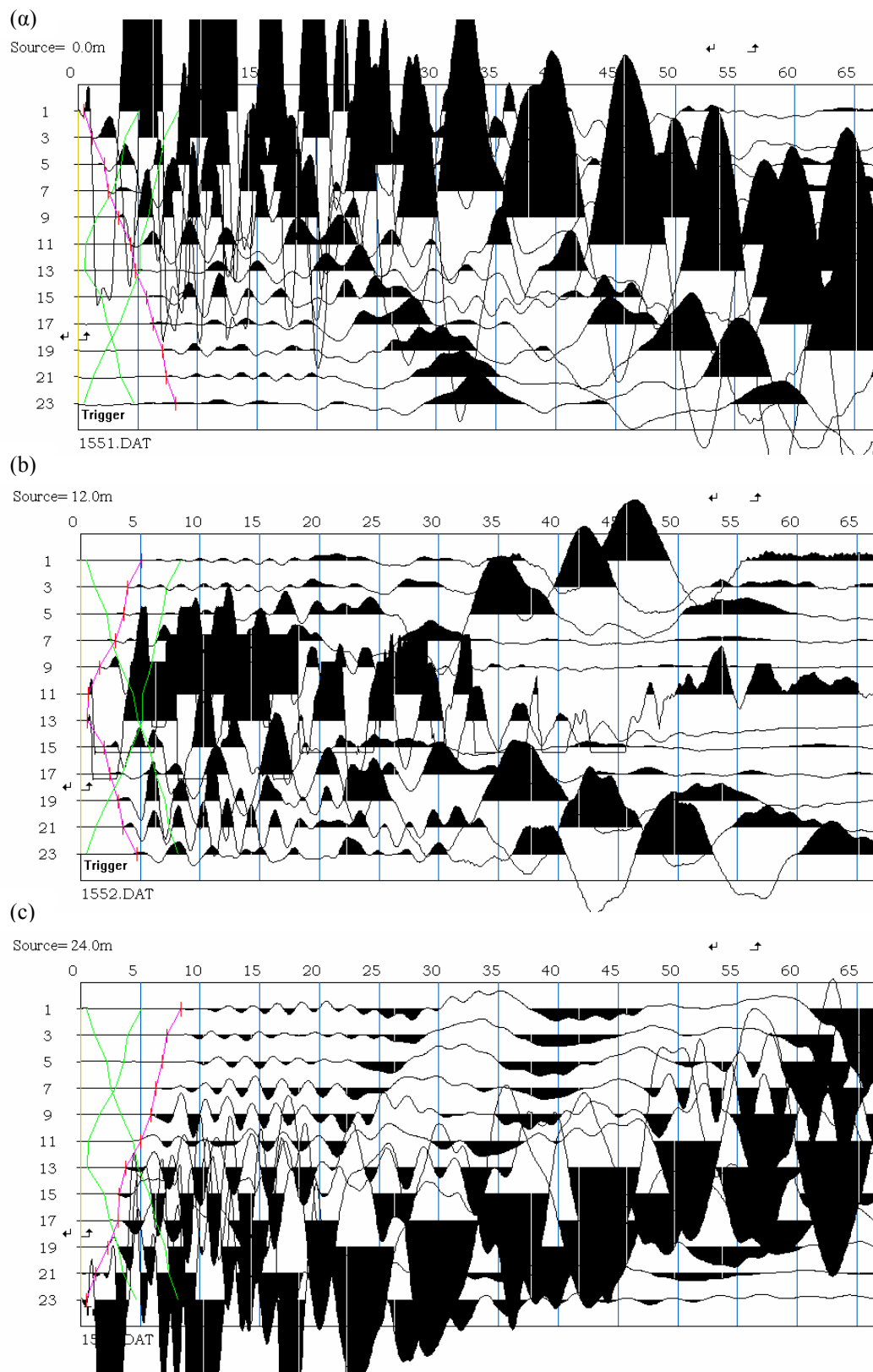
Πίνακας 4.2: Ενοποίηση των αναπτυγμάτων πηγής-γεωφώνων σε σεισμικές γραμμές μελέτης.

Κωδικός Σεισμικής Γραμμής	Αναπτύγματα	Γενική Διεύθυνση	Μήκος Γραμμής (m)
Line_124-125	124 – 125	N → B	48
Line_126-128	126 – 128	B → N	72
Line_155-156	155 – 156	B → N	48

Στα σχήματα 4.7-4.12 φαίνονται τα βήματα επεξεργασίας με το λογισμικό SeisImager (ενότητα 3.2) για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_155-156.

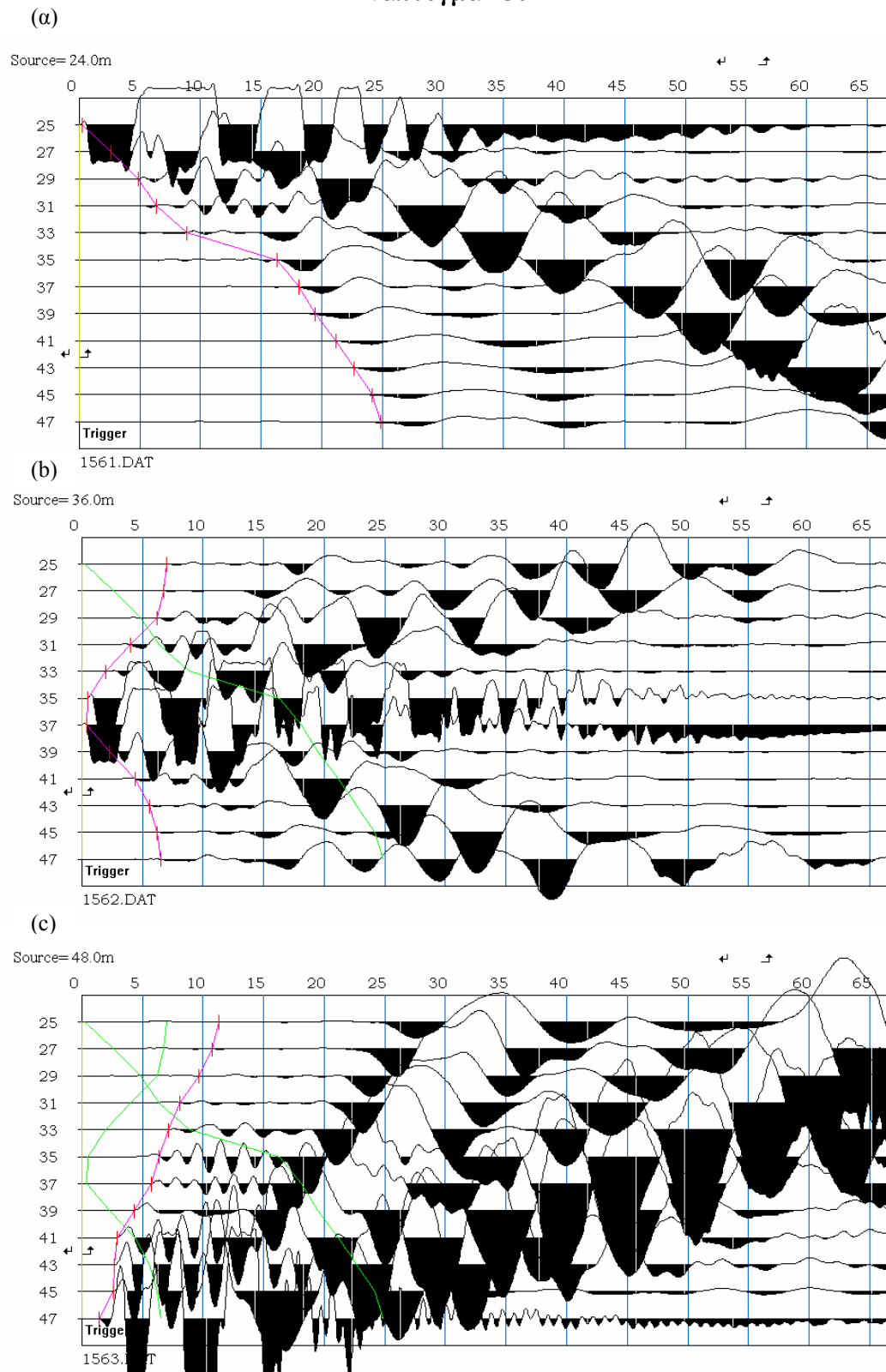
Τα δεδομένα εξόδου του λογισμικού SeisImager εισήχθησαν στο λογισμικό Surfer (ενότητα 4.5) με το οποίο έγινε η απεικόνιση των σεισμικών τομών (σχήματα 4.13-4.18). Οι διαφορές που εντοπίζονται μεταξύ των σχημάτων 4.13 και 4.14, 4.15 και 4.16, 4.17 και 4.18 είναι μικρές, και οφείλονται στην υποκειμενικότητα της ερμηνείας των χρηστών. Για παράδειγμα, στο σχήμα 4.17, η περιοχή που απεικονίζεται με έλλειψη, παρουσιάζει ελάχιστα μικρότερες ταχύτητες από την αντίστοιχη περιοχή του σχήματος 4.18. Τέτοιες διαφορές θεωρούνται αμελητέες και δε μεταβάλλουν τη συνολική εκτίμηση της ταχύτητας.

Ανάπτυγμα 155

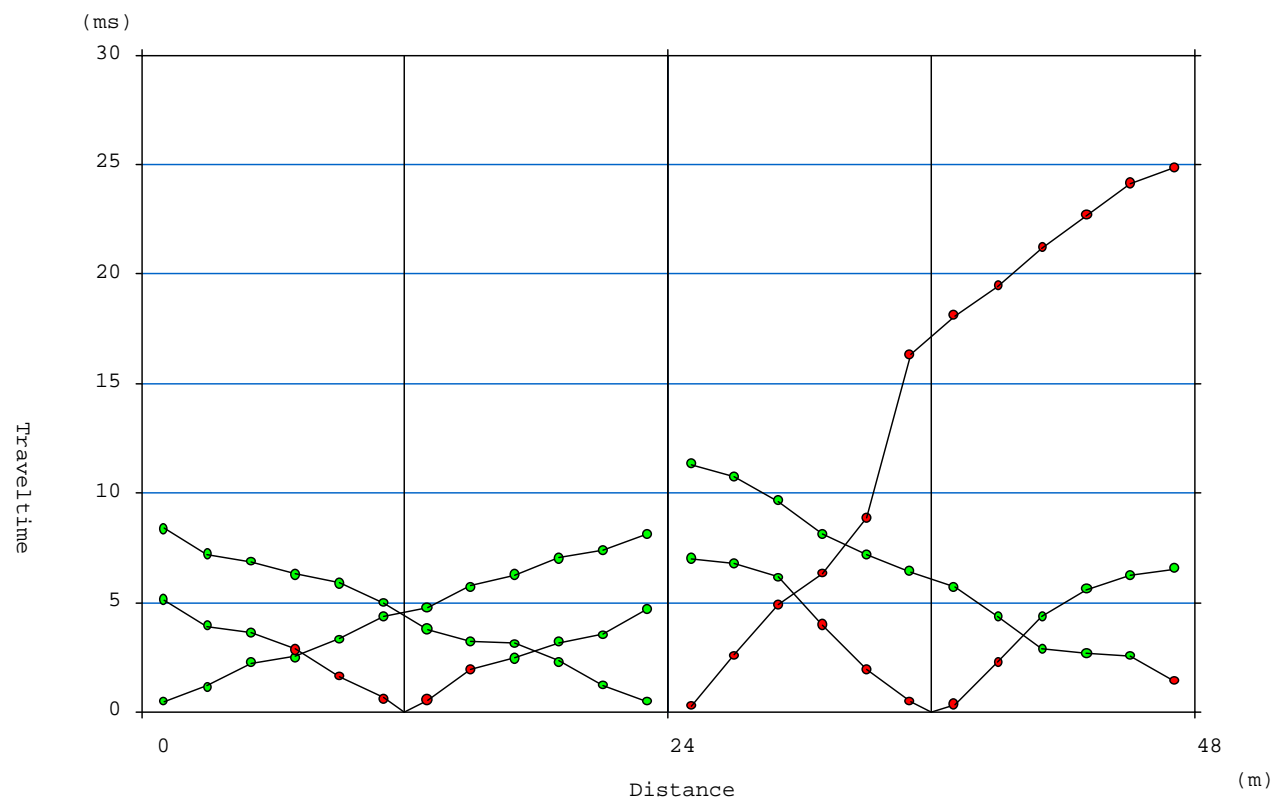


Σχήμα 4.7: Σεισμικές καταγραφές και επιλογή πρώτων αφίξεων για το ανάπτυγμα 155, (α) θέση σεισμικής πηγής 0 m, (b) θέση σεισμικής πηγής 12 m, (c) θέση σεισμικής πηγής 24 m.

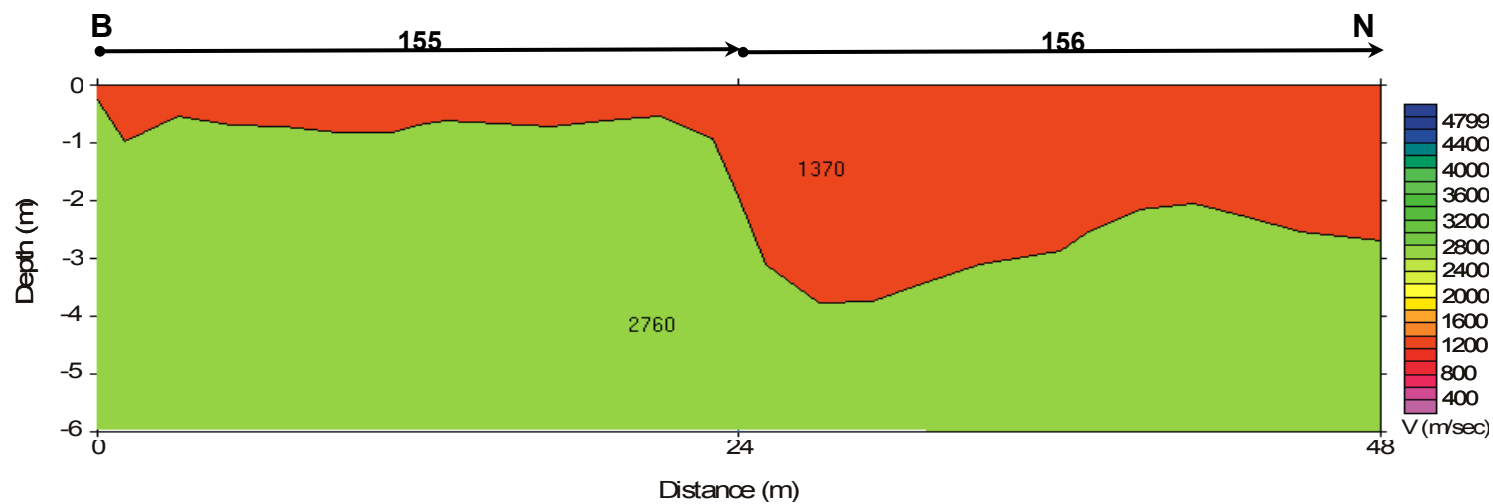
Ανάπτυγμα 156



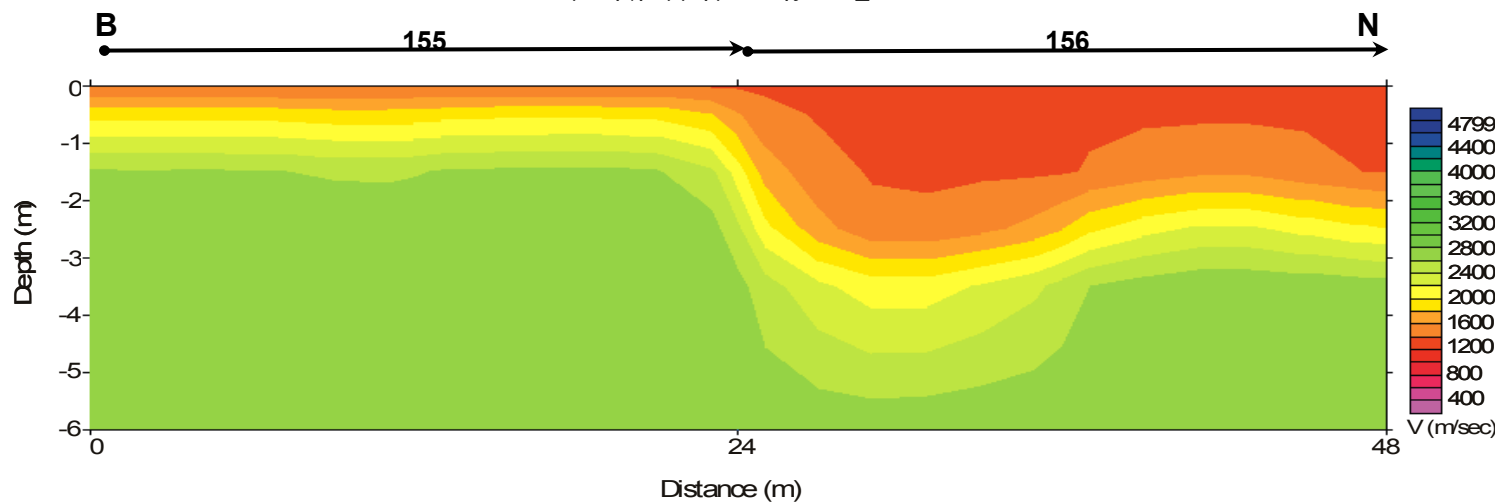
Σχήμα 4.8: Σεισμικές καταγραφές και επιλογή πρώτων αφίξεων για το ανάπτυγμα 156, (α) θέση σεισμικής πηγής 24 m, (b) θέση σεισμικής πηγής 36 m, (c) θέση σεισμικής πηγής 48 m.



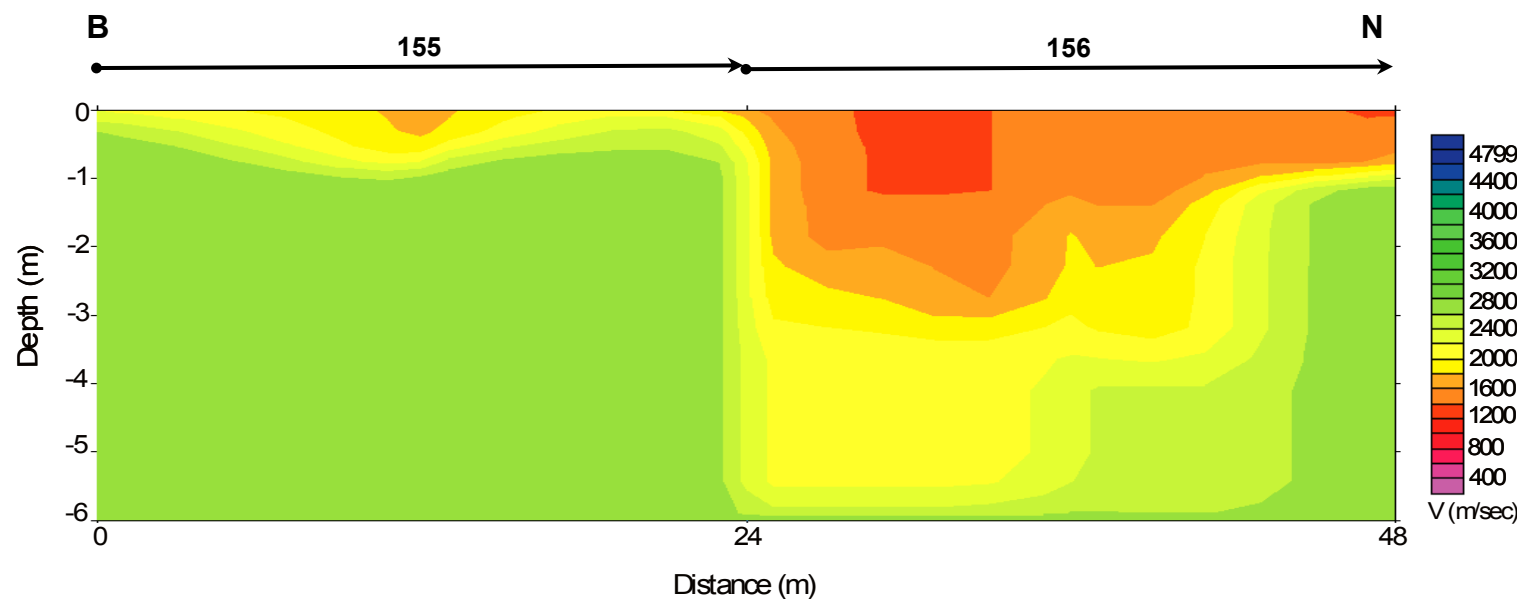
Σχήμα 4.9: Δρομοχρονικό διάγραμμα για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_155-156. Τα δύο στρώματα τονίζονται με διαφορετικό χρώμα.



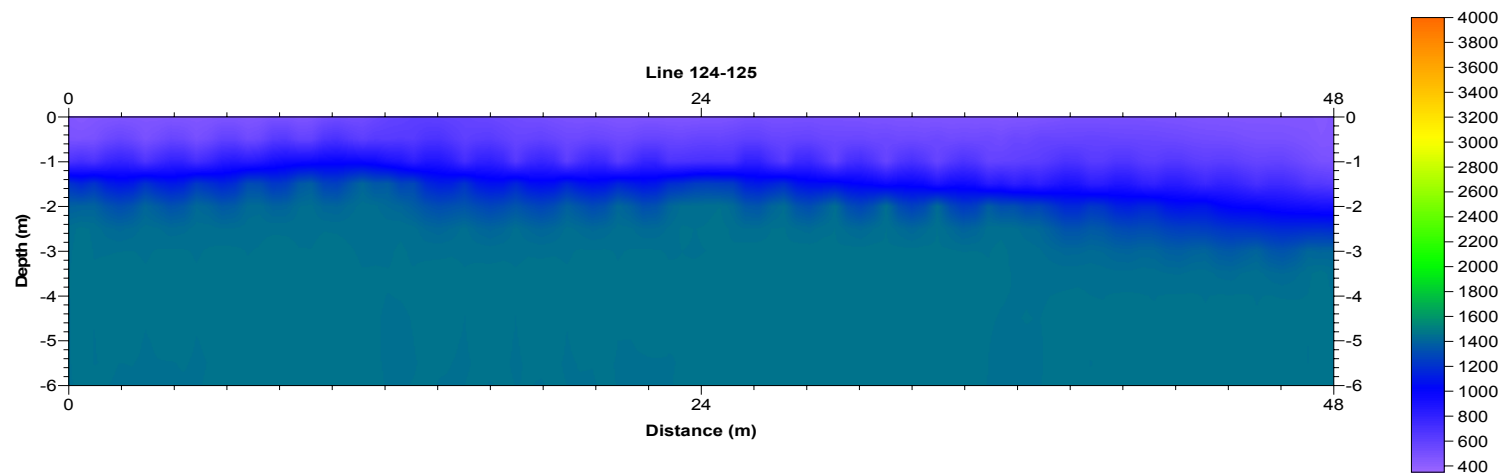
Σχήμα 4.10: Μοντέλο ταχυτήτων (Μέθοδος Αντιστροφής των Χρόνων Καθυστέρησης) αποτελούμενο από δύο στρώματα ($V_{p1} = 1370$ m/sec, $V_{p2} = 2760$ m/sec) για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_ 155-156.



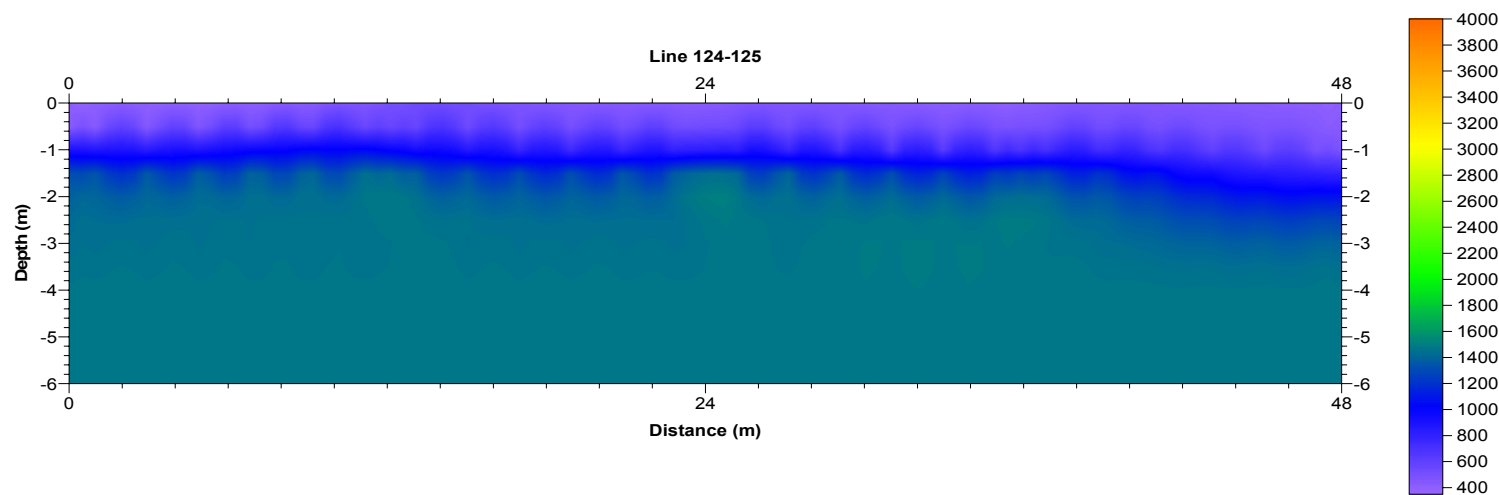
Σχήμα 4.11: Αρχικό μοντέλο ταχυτήτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_155-156 (Μέθοδος της Σεισμικής Τομογραφίας).



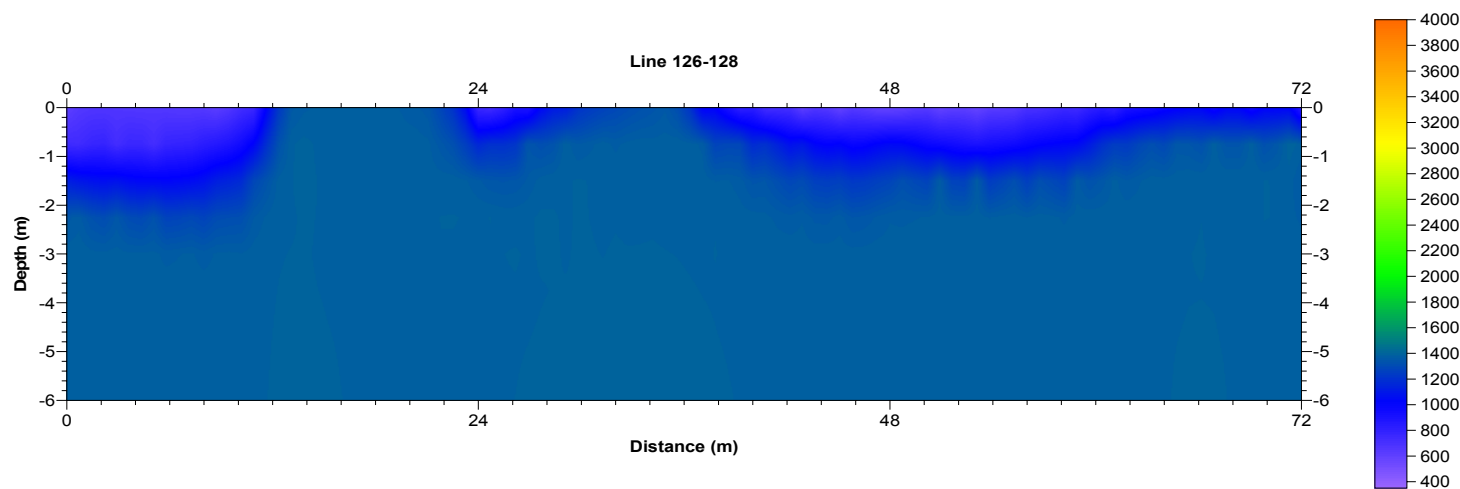
Σχήμα 4.12: Τελικό μοντέλο ταχυτήτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_155-156 (Μέθοδος της Σεισμικής Τομογραφίας).



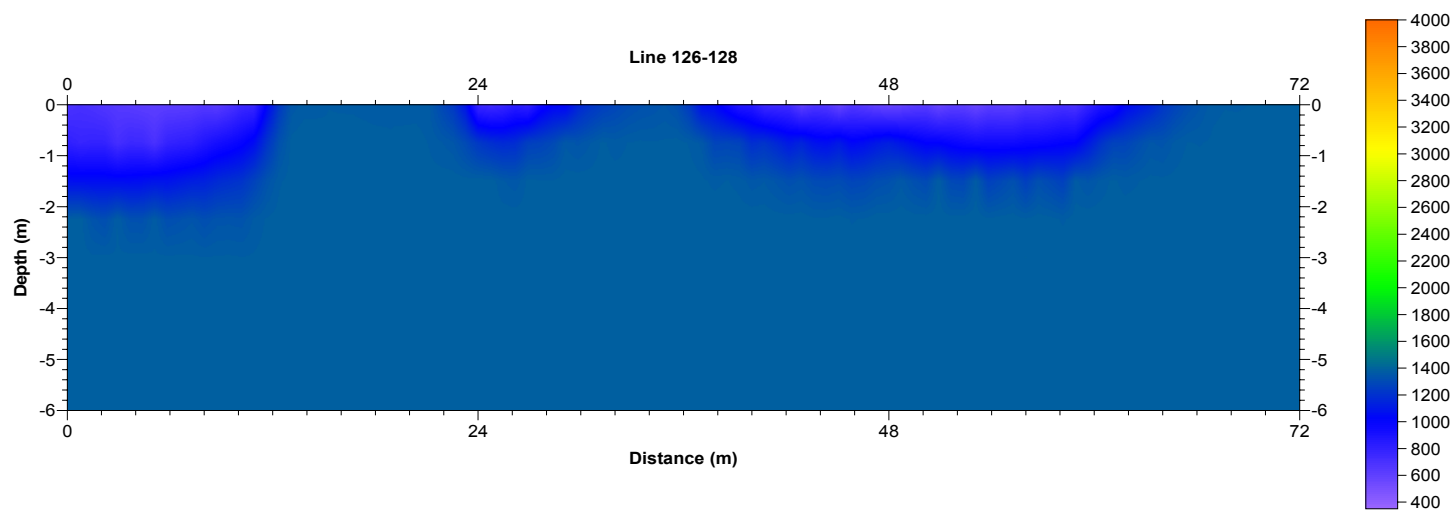
Σχήμα 4.13: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_124-125 (Γεωφυσική Διασκόπηση για την Εκτίμηση Σεισμικής Ταχύτητας Επιφανειακών Σχηματισμών σε Περιοχή του Μοχού Ηρακλείου, Έκθεση Γεωφυσικής Έρευνας, Βαφείδης Αντώνιος, Χανιά, Αύγουστος 2005).



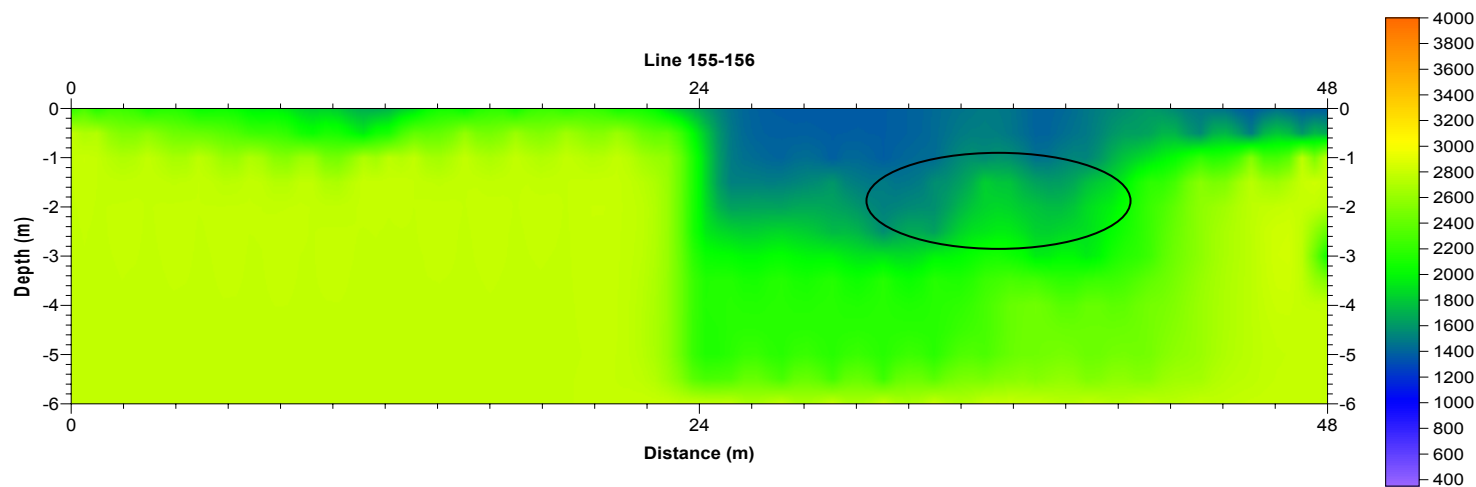
Σχήμα 4.14: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_124-125.



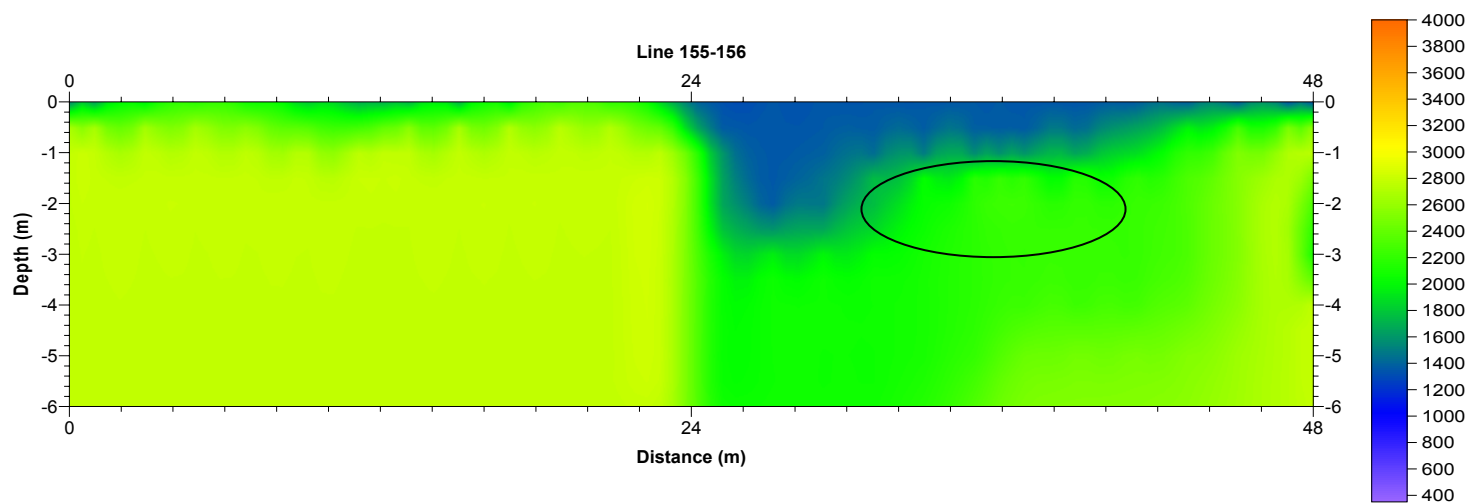
Σχήμα 4.15: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_126-128 (Γεωφυσική Διασκόπηση για την Εκτίμηση Σεισμικής Ταχύτητας Επιφανειακών Σχηματισμών σε Περιοχή του Μοχού Ηρακλείου, Έκθεση Γεωφυσικής Έρευνας, Βαφείδης Αντώνιος, Χανιά, Αύγουστος 2005).



Σχήμα 4.16: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_126-128.



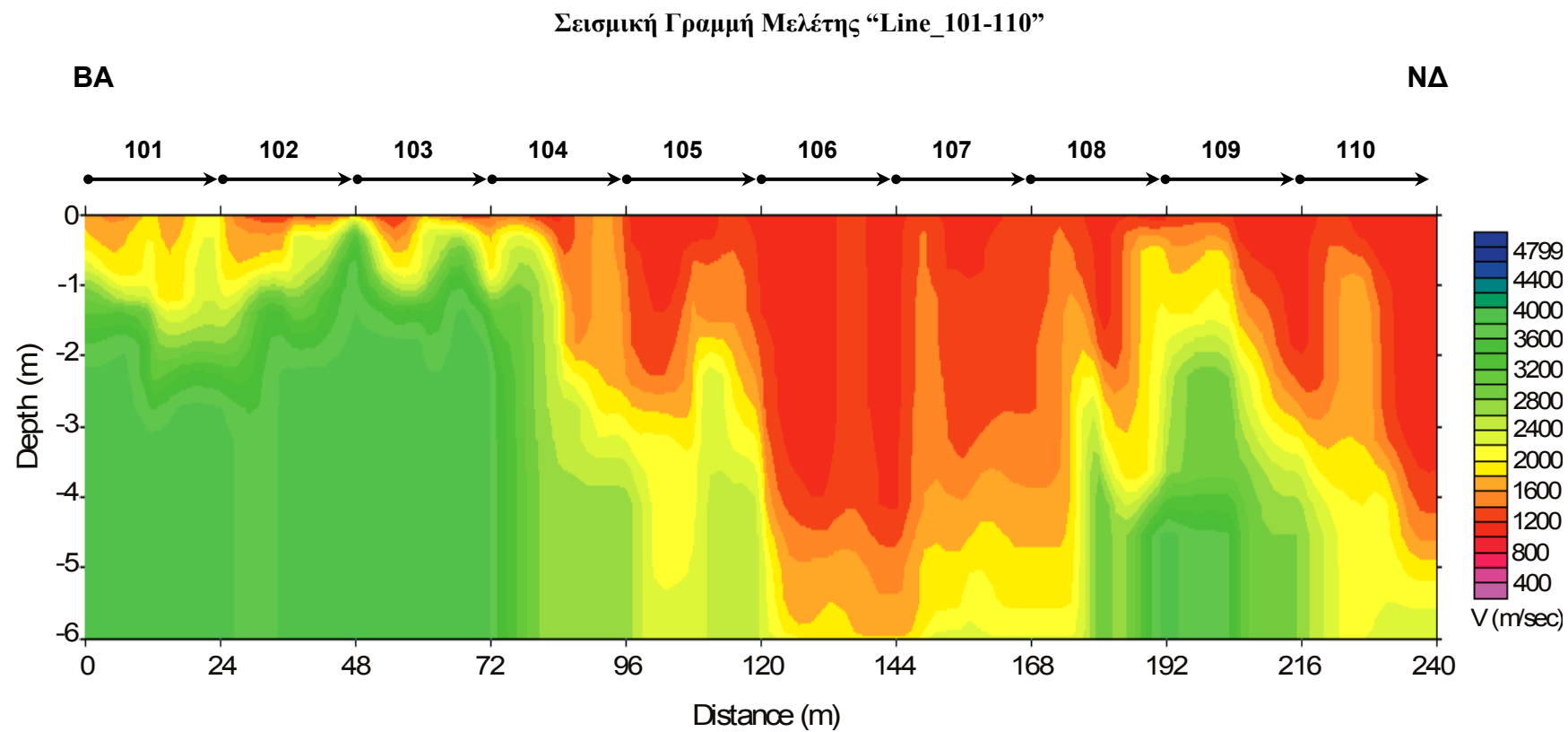
Σχήμα 4.17: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_155-156 (Γεωφυσική Διασκόπηση για την Εκτίμηση Σεισμικής Ταχύτητας Επιφανειακών Σχηματισμών σε Περιοχή του Μοχού Ηρακλείου, Έκθεση Γεωφυσικής Έρευνας, Βαφείδης Αντώνιος, Χανιά, Αύγουστος 2005).



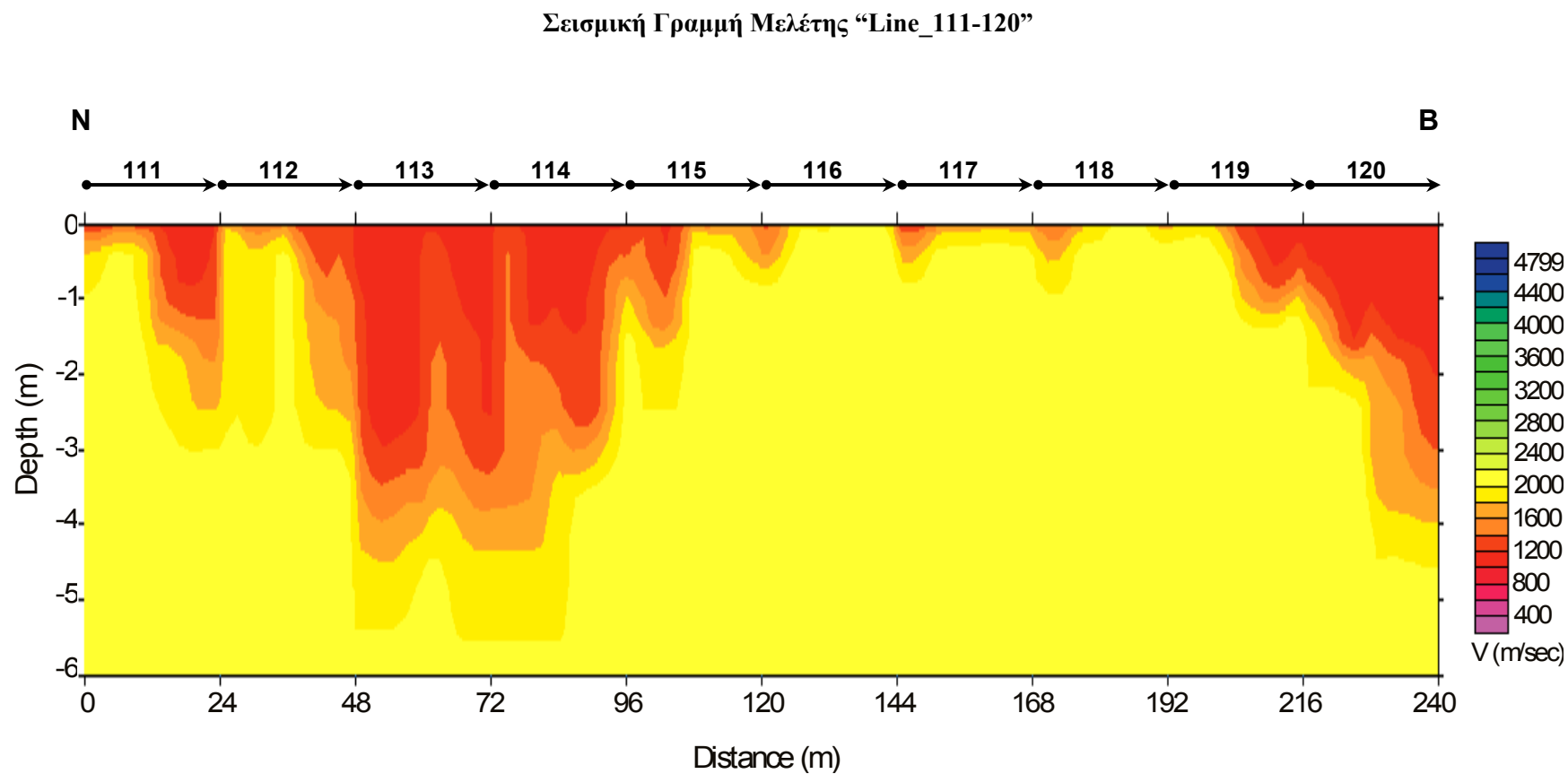
Σχήμα 4.18: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_155-156.

4.4.2 Σεισμικές γραμμές μελέτης

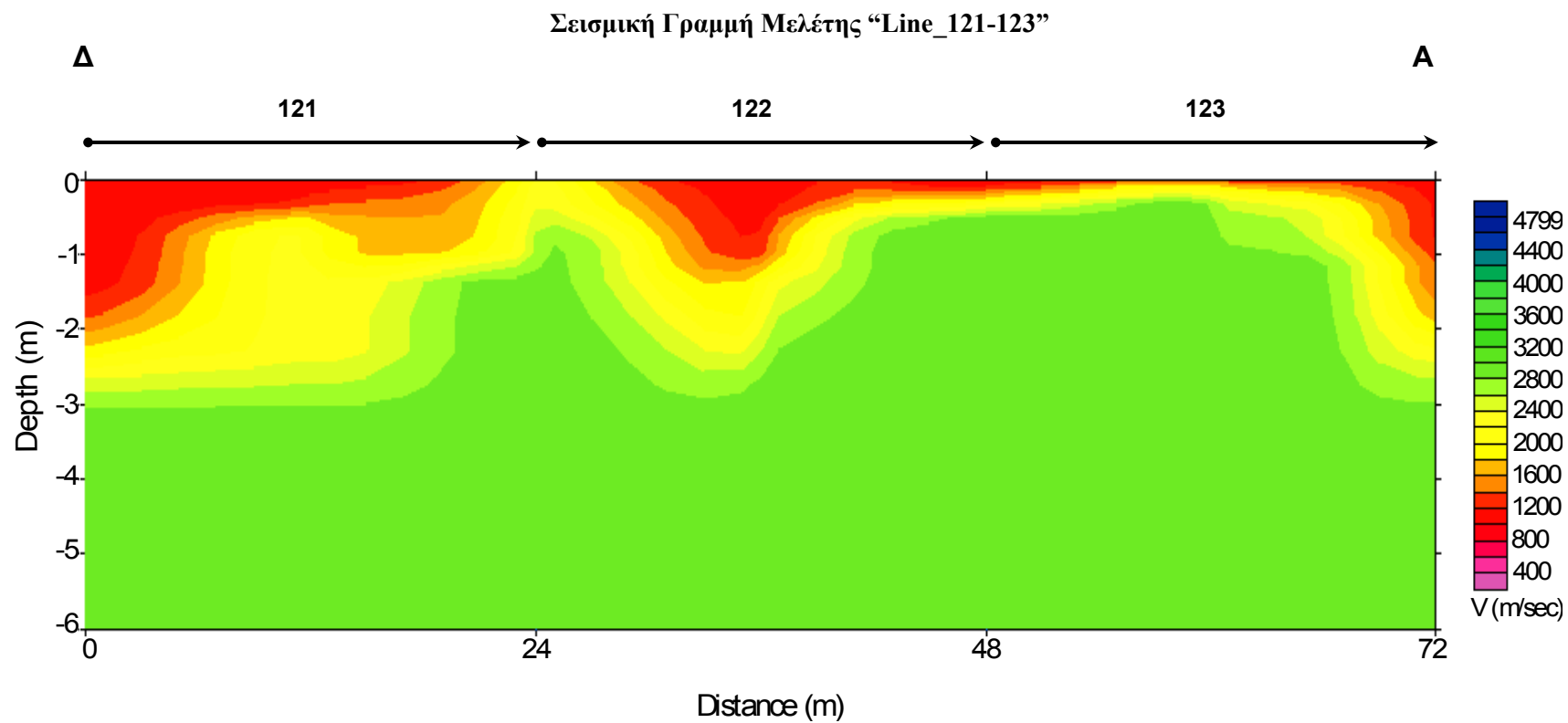
Στα σχήματα 4.19-4.37, παρατίθενται τα μοντέλα βάθους και η κατανομή της ταχύτητας των Ρ-κυμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων. Το κάθε ανάπτυγμα πηγής-γεωφώνων έχει μήκος 24 m. Η ισαπόσταση των γεωφώνων ορίστηκε στα 2 m, ενώ το τελευταίο γεώφωνο ενός αναπτύγματος σε σχέση με το πρώτο γεώφωνο του επόμενου αναπτύγματος απέχει επίσης 2 m. Η διεύθυνση των σεισμικών γραμμών μελέτης, φαίνεται στα σχήματα 4.3-4.6.



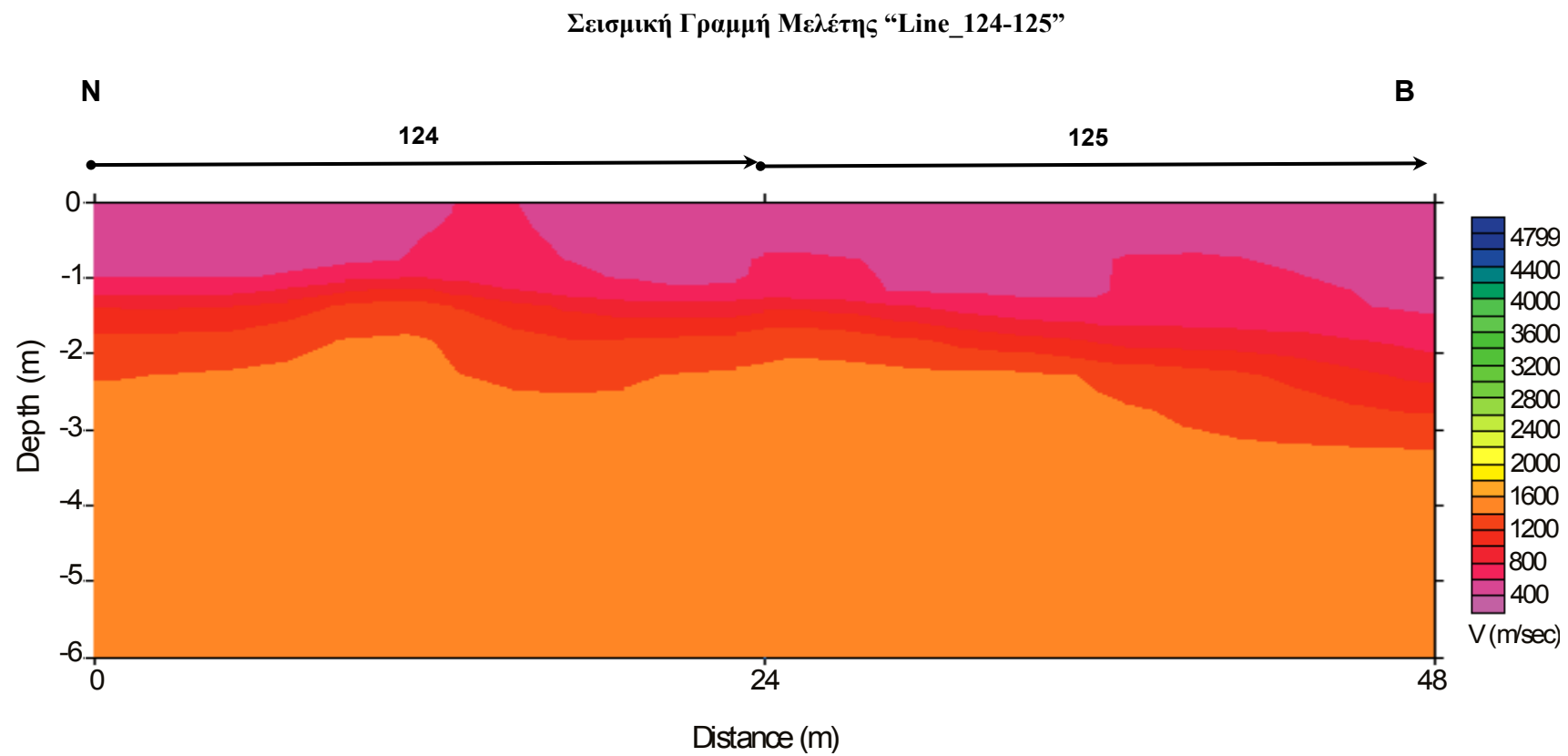
Σχήμα 4.19: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_101-111.



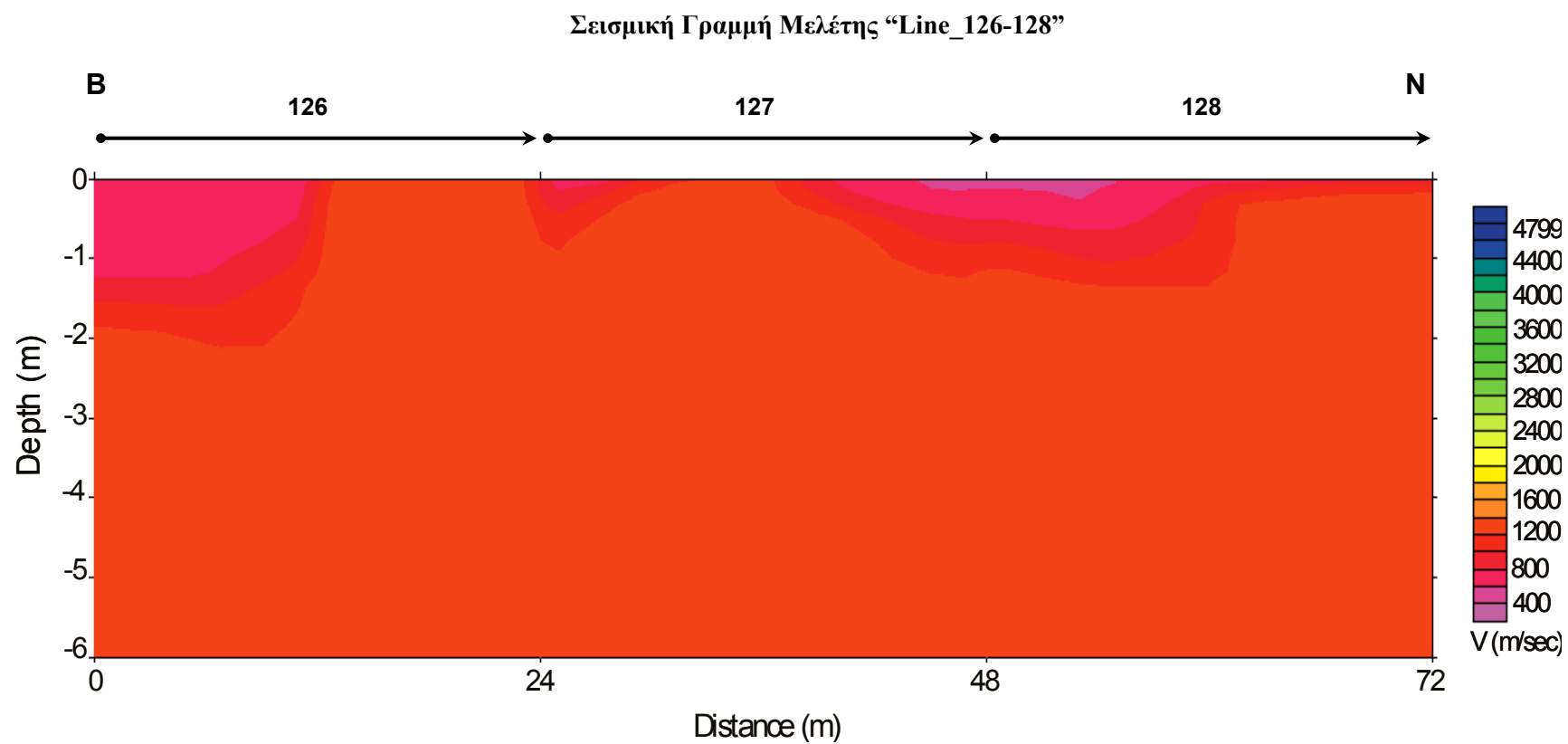
Σχήμα 4.20: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_111-120.



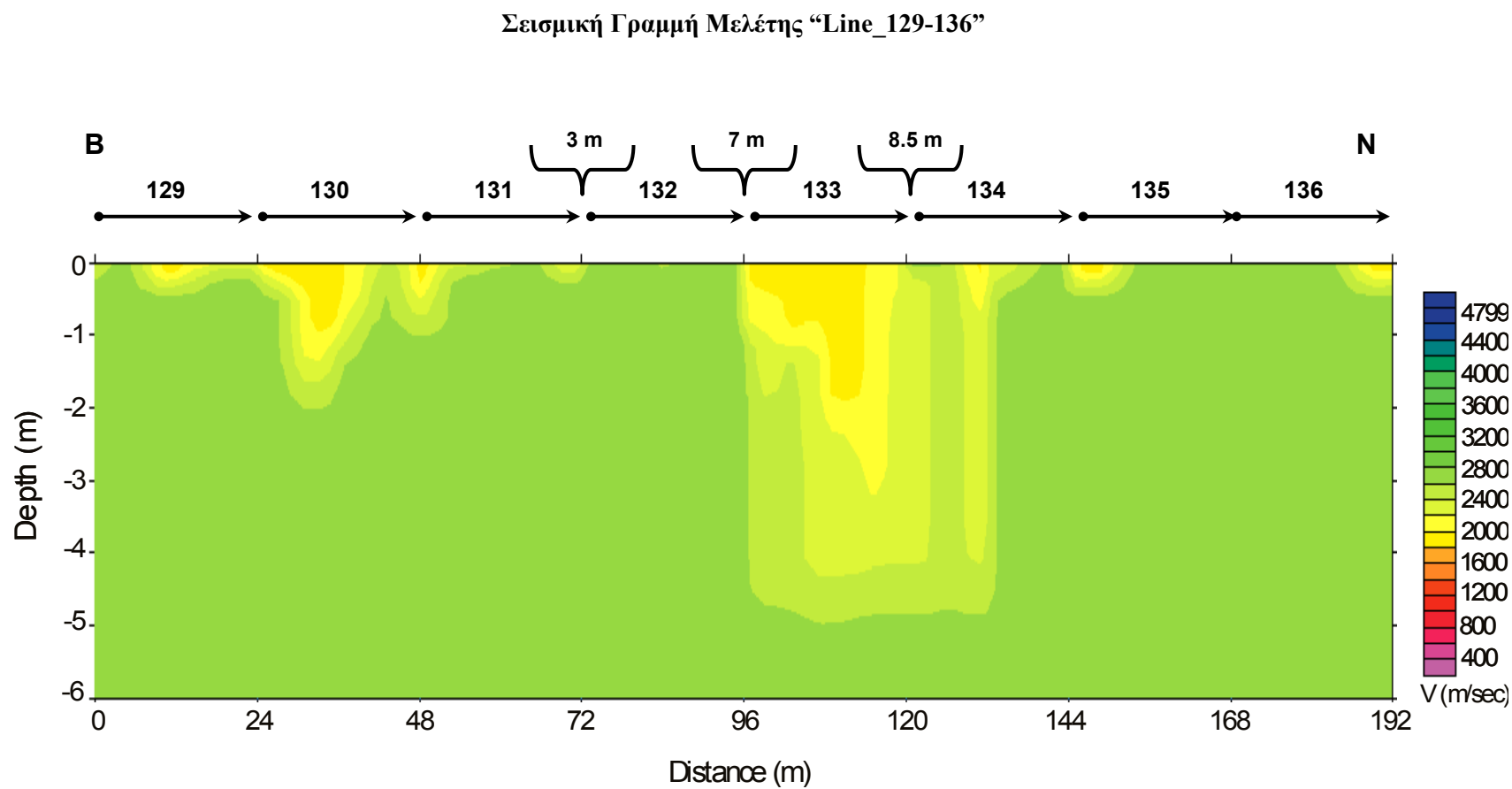
Σχήμα 4.21: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_121-123.



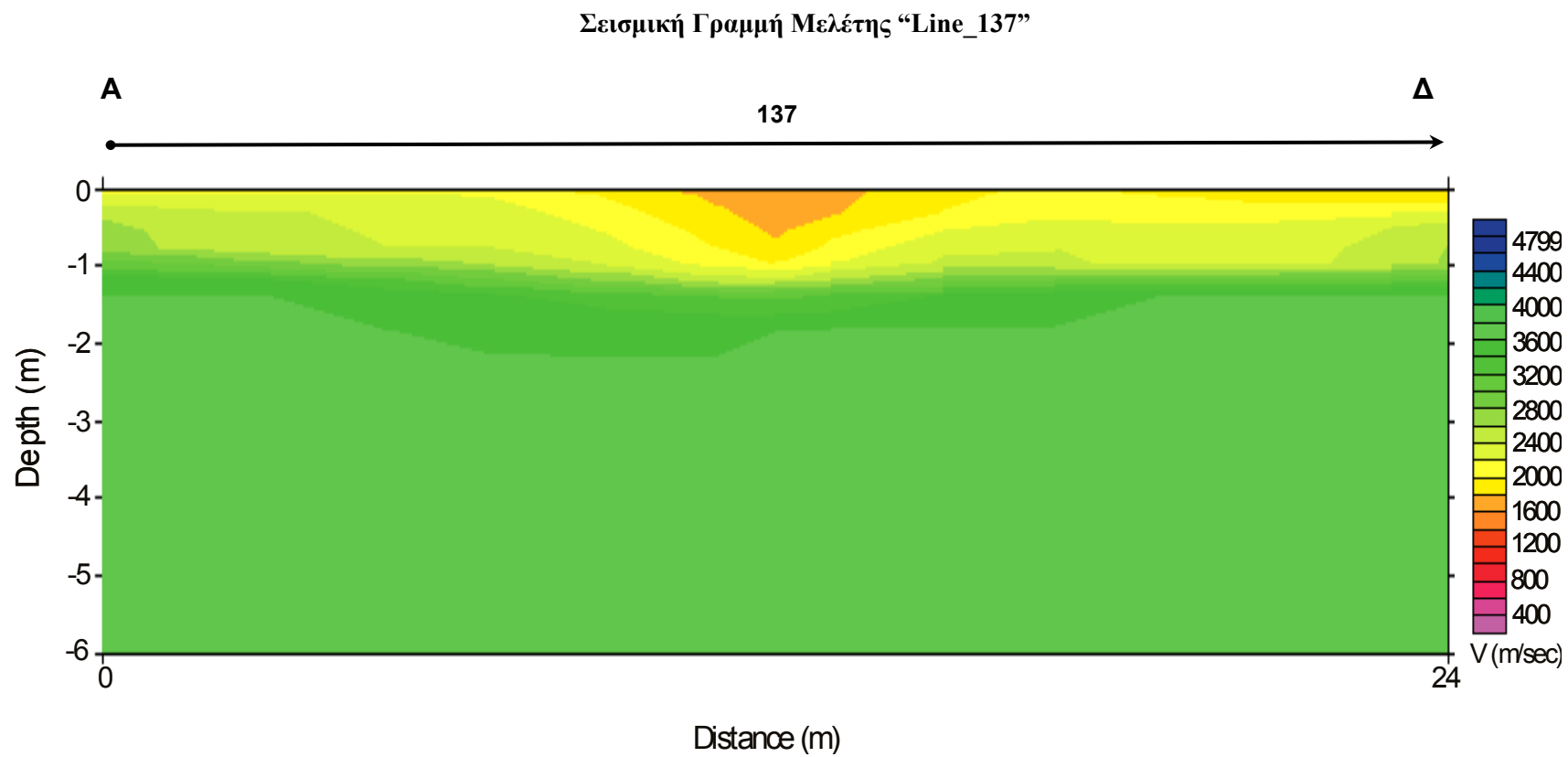
Σχήμα 4.22: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_124-125.



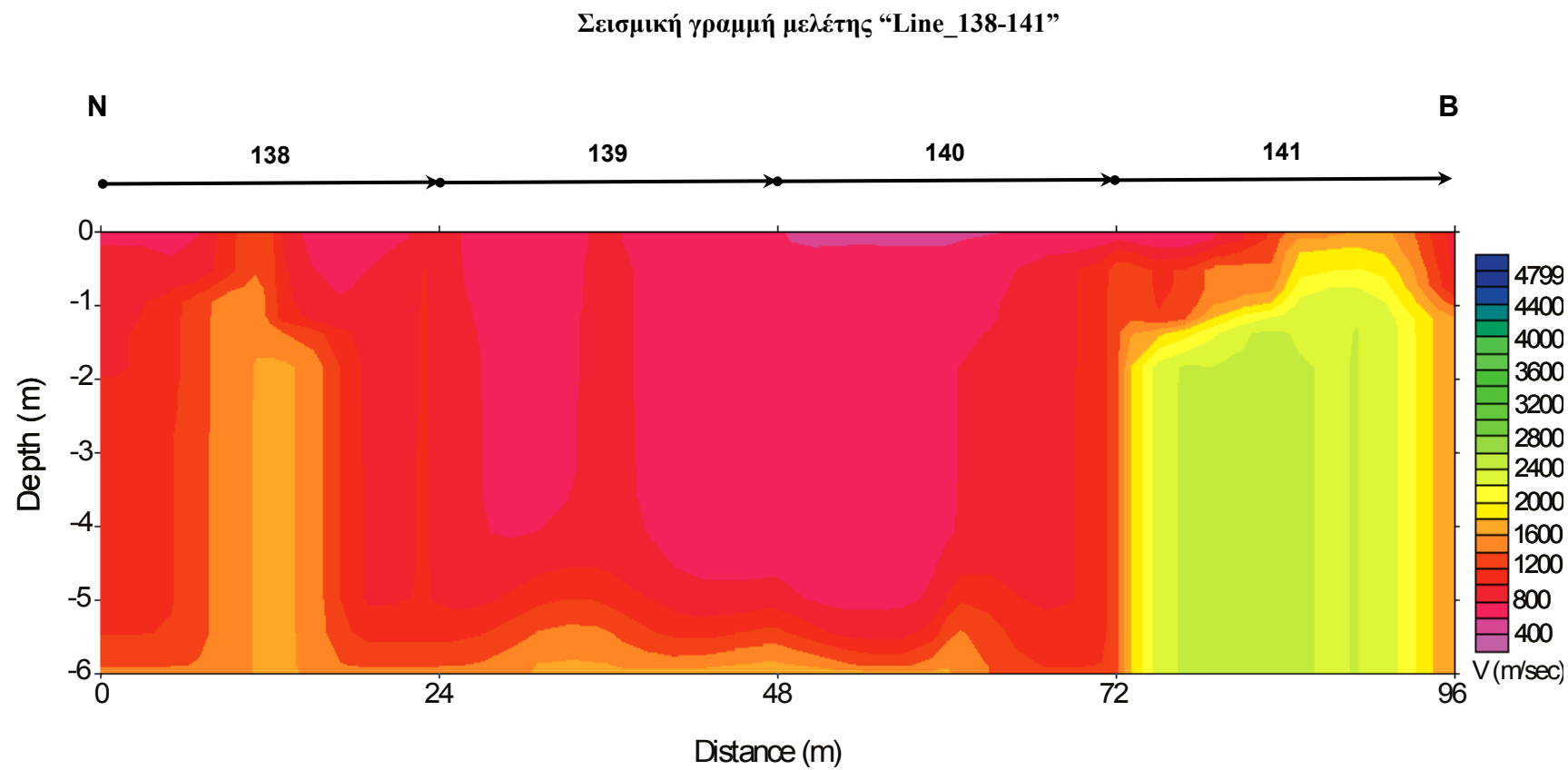
Σχήμα 4.23: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_126-128.



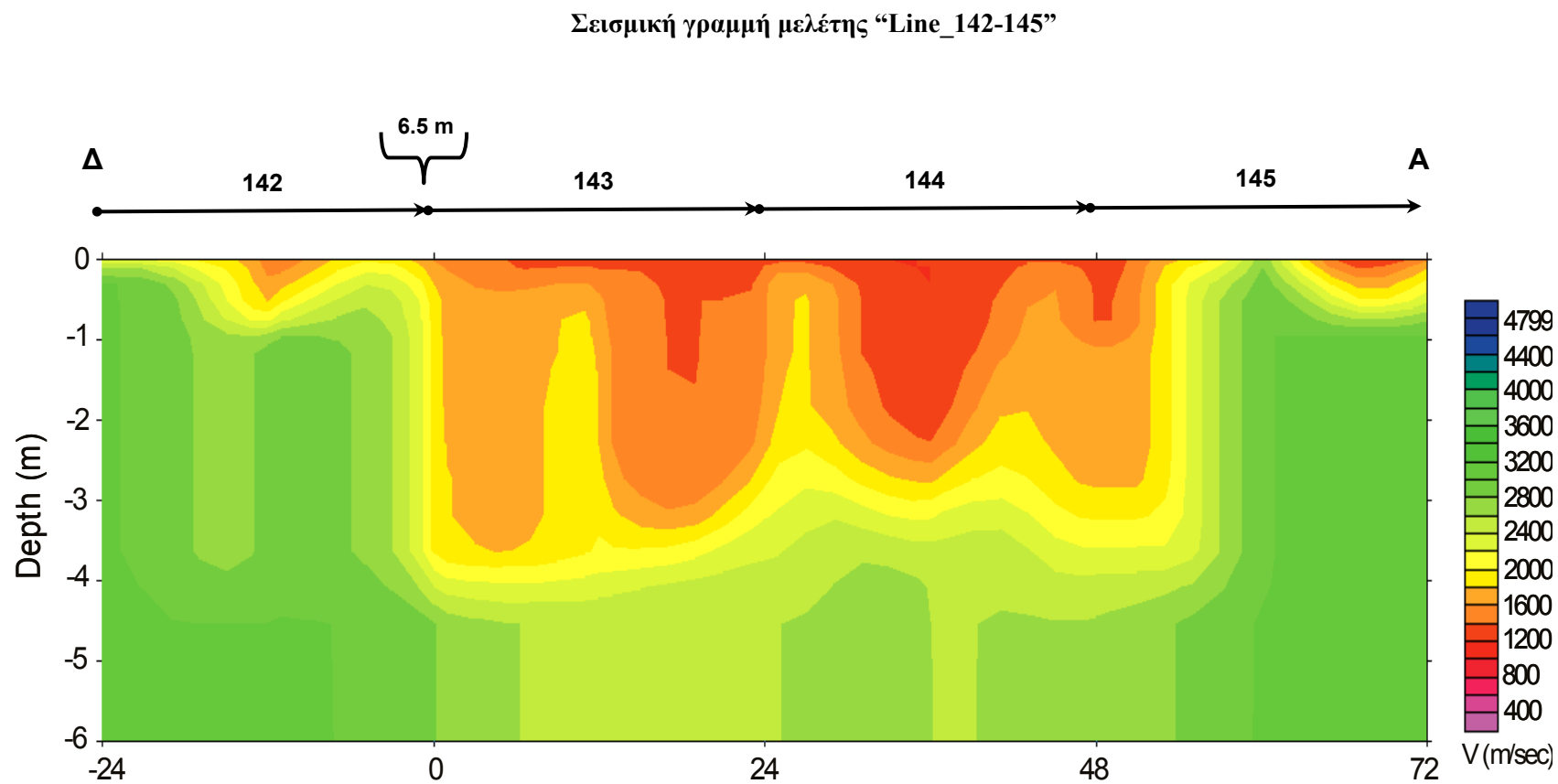
Σχήμα 4.24: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_129-136. Οι αποστάσεις στις αγκύλες αντιστοιχούν στις αποστάσεις μεταξύ του τελευταίου και του πρώτου γεωφώνου των διαδοχικών αναπτυγμάτων.



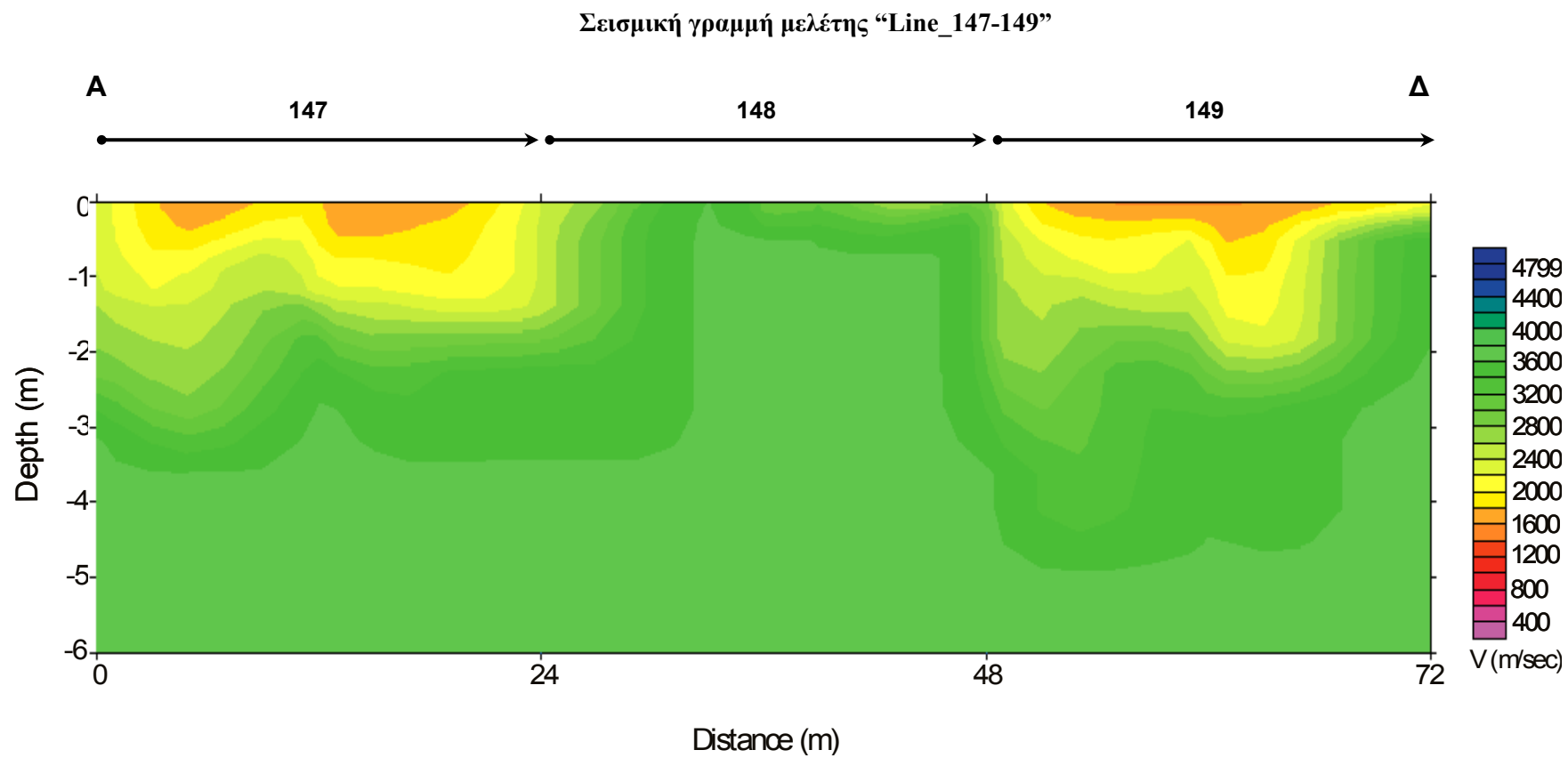
Σχήμα 4.25: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_137.



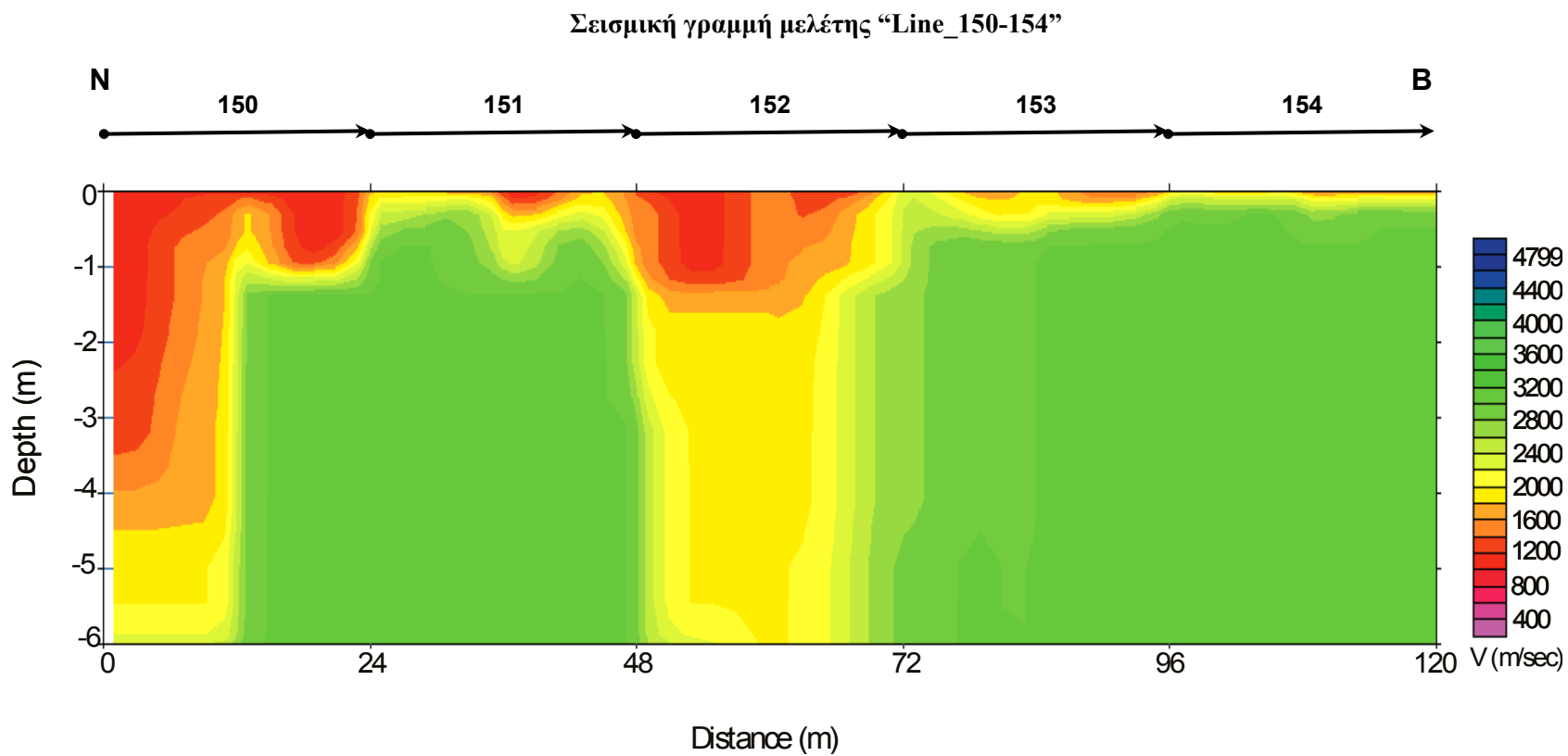
Σχήμα 4.26: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_138-141.



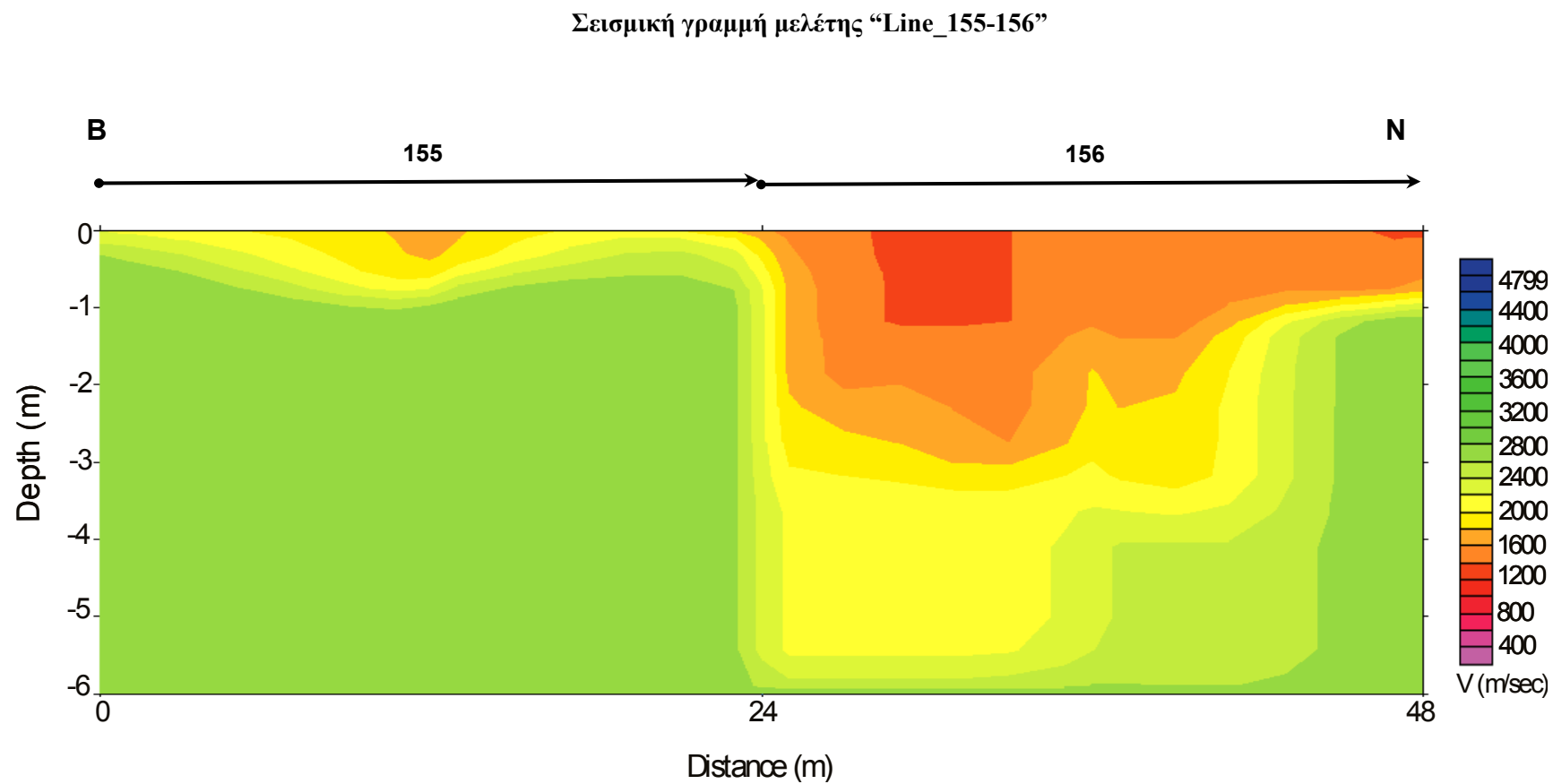
Σχήμα 4.27: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_142-145. Η απόσταση στις αγκύλες αντιστοιχεί στην απόσταση μεταξύ του τελευταίου και του πρώτου γεωφώνου των αναπτυγμάτων 142 & 143, αντίστοιχα.



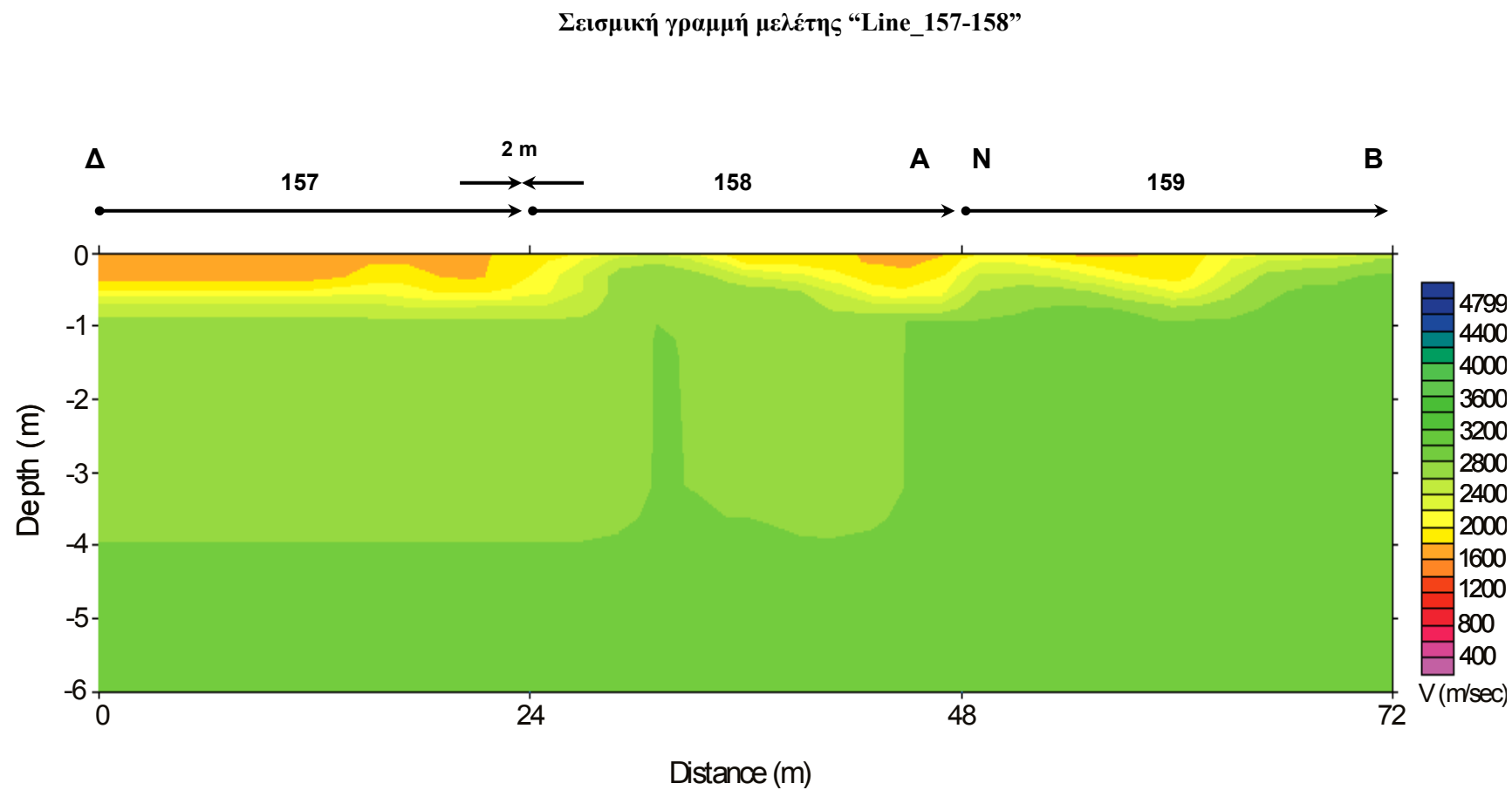
Σχήμα 4.28: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_147-149.



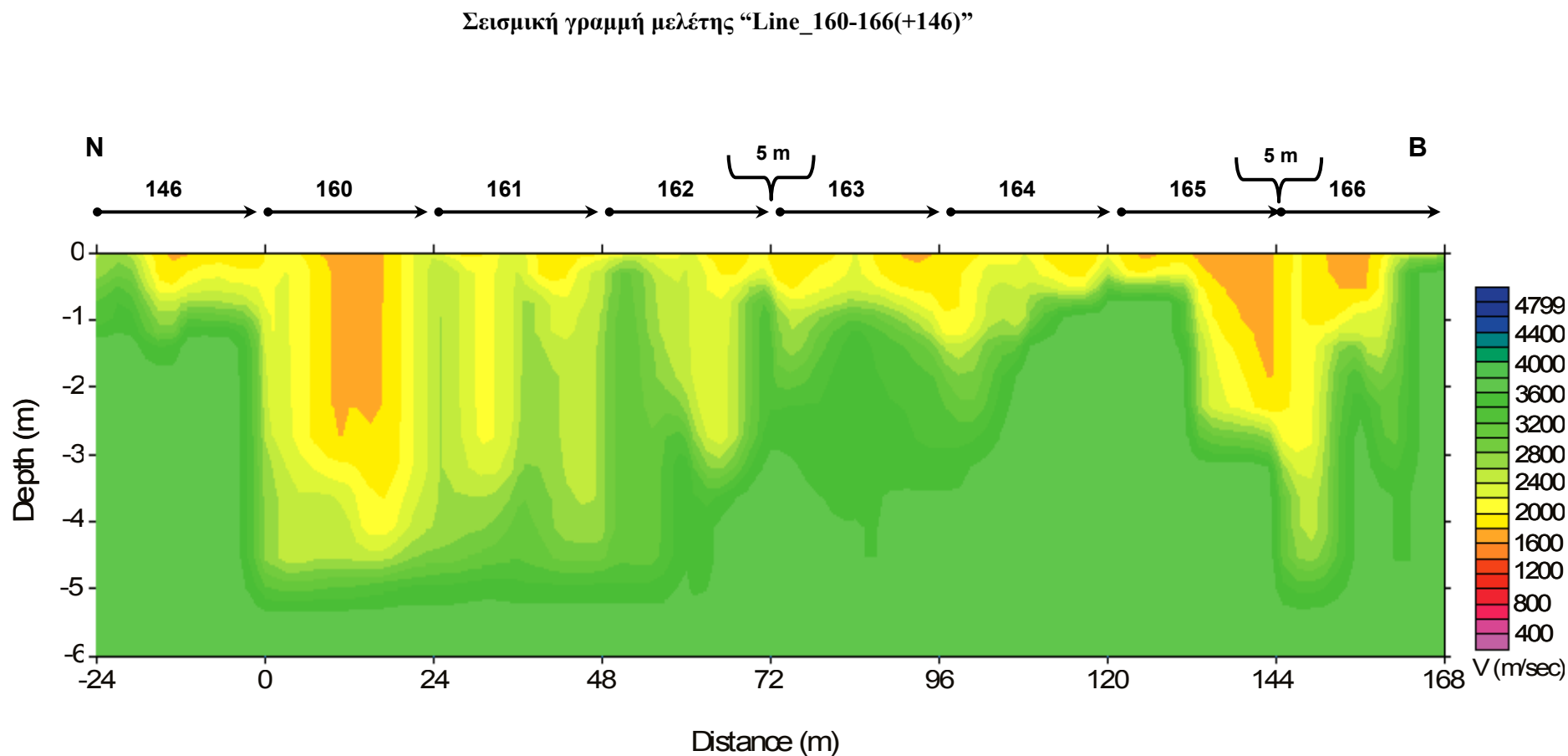
Σχήμα 4.29: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_150-154.



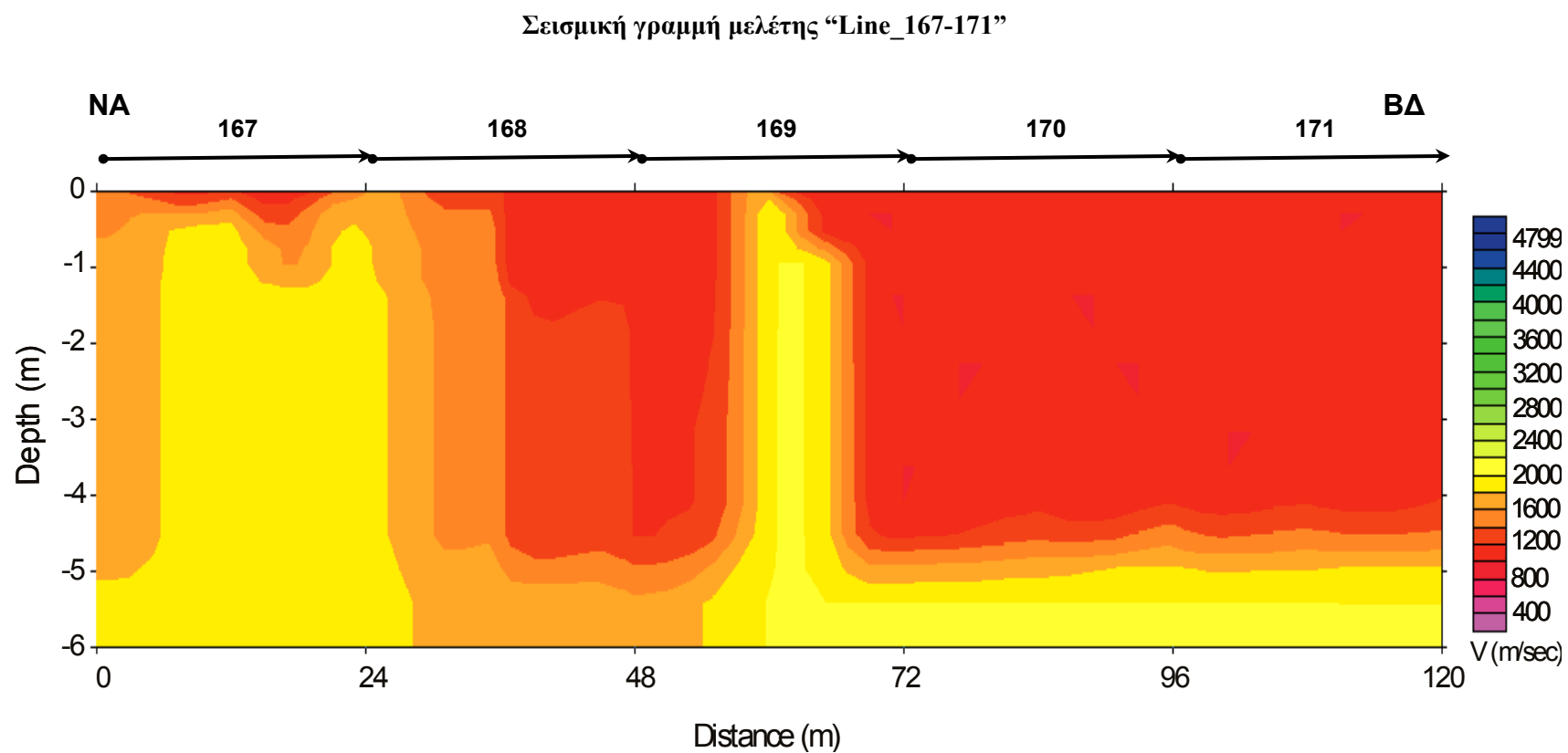
Σχήμα 4.30: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_155-156.



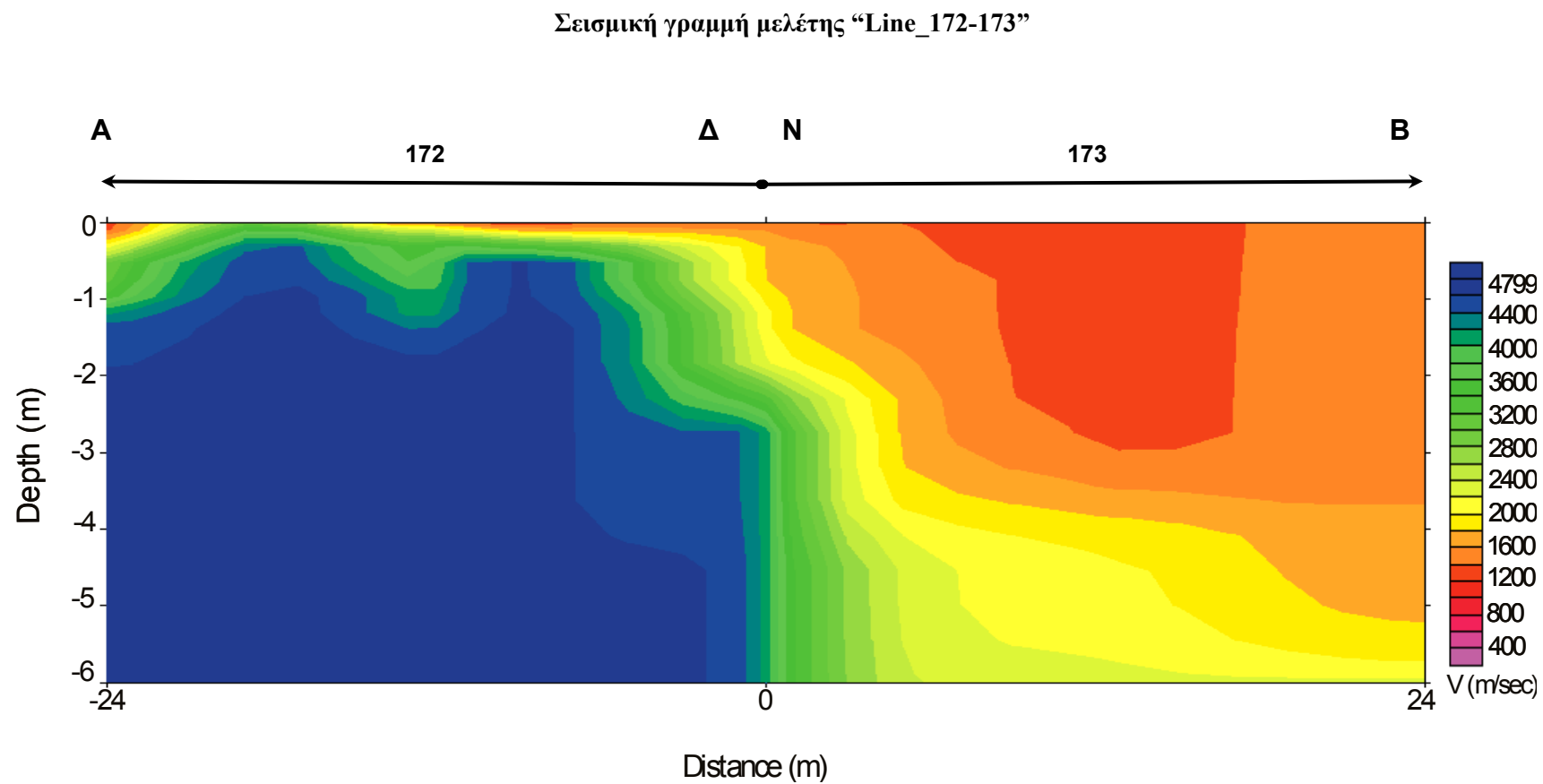
Σχήμα 4.31: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_157-159. Τα αναπτύγματα 157 και 158 αλληλεπικαλύπτονται κατά 2 m.



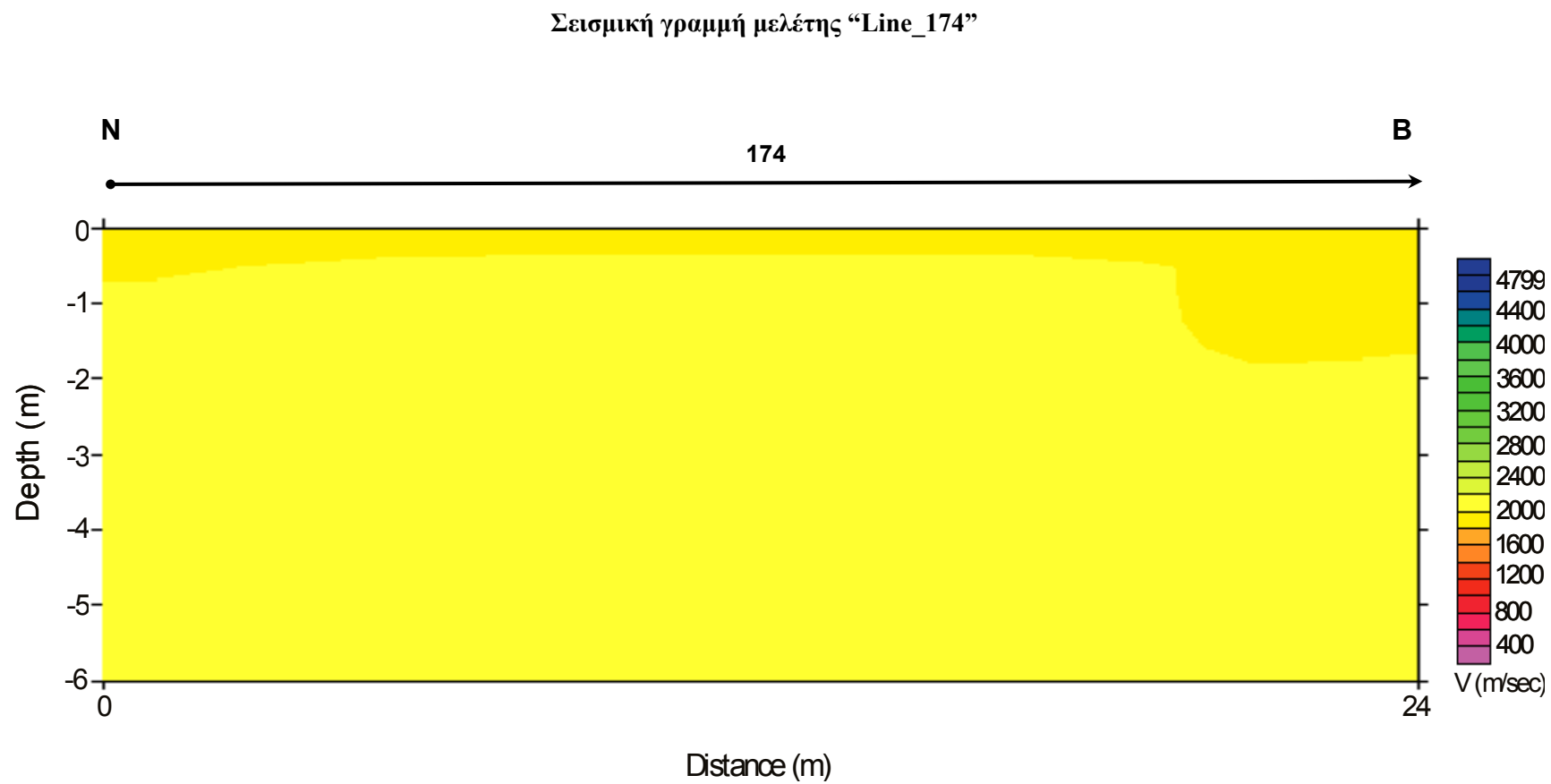
Σχήμα 4.32: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_160-166(+146). Οι αποστάσεις στις αγκύλες αντιστοιχούν στις αποστάσεις μεταξύ του τελευταίου και του πρώτου γεωφώνου των διαδοχικών αναπτυγμάτων.



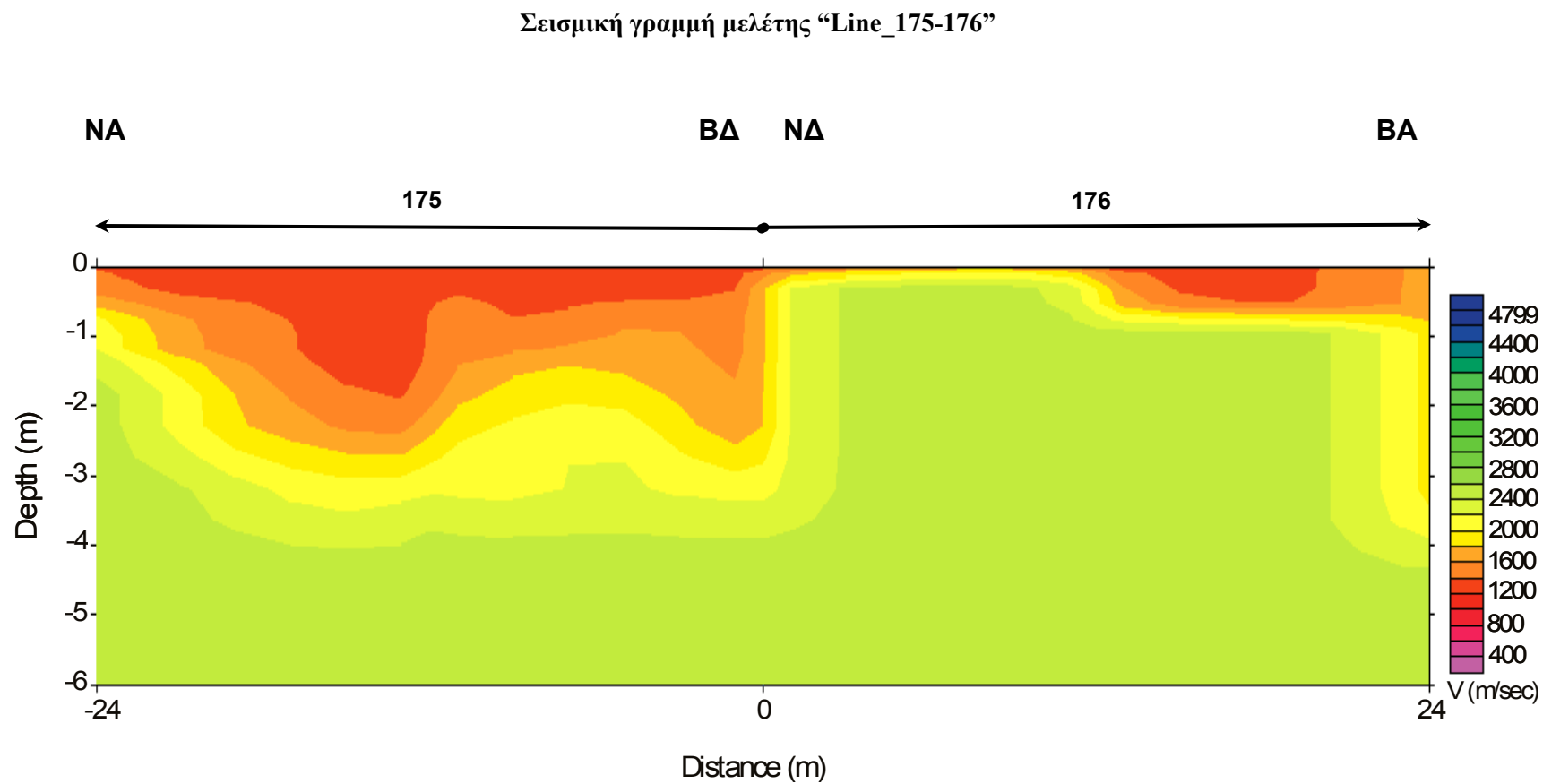
Σχήμα 4.33: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_167-171.



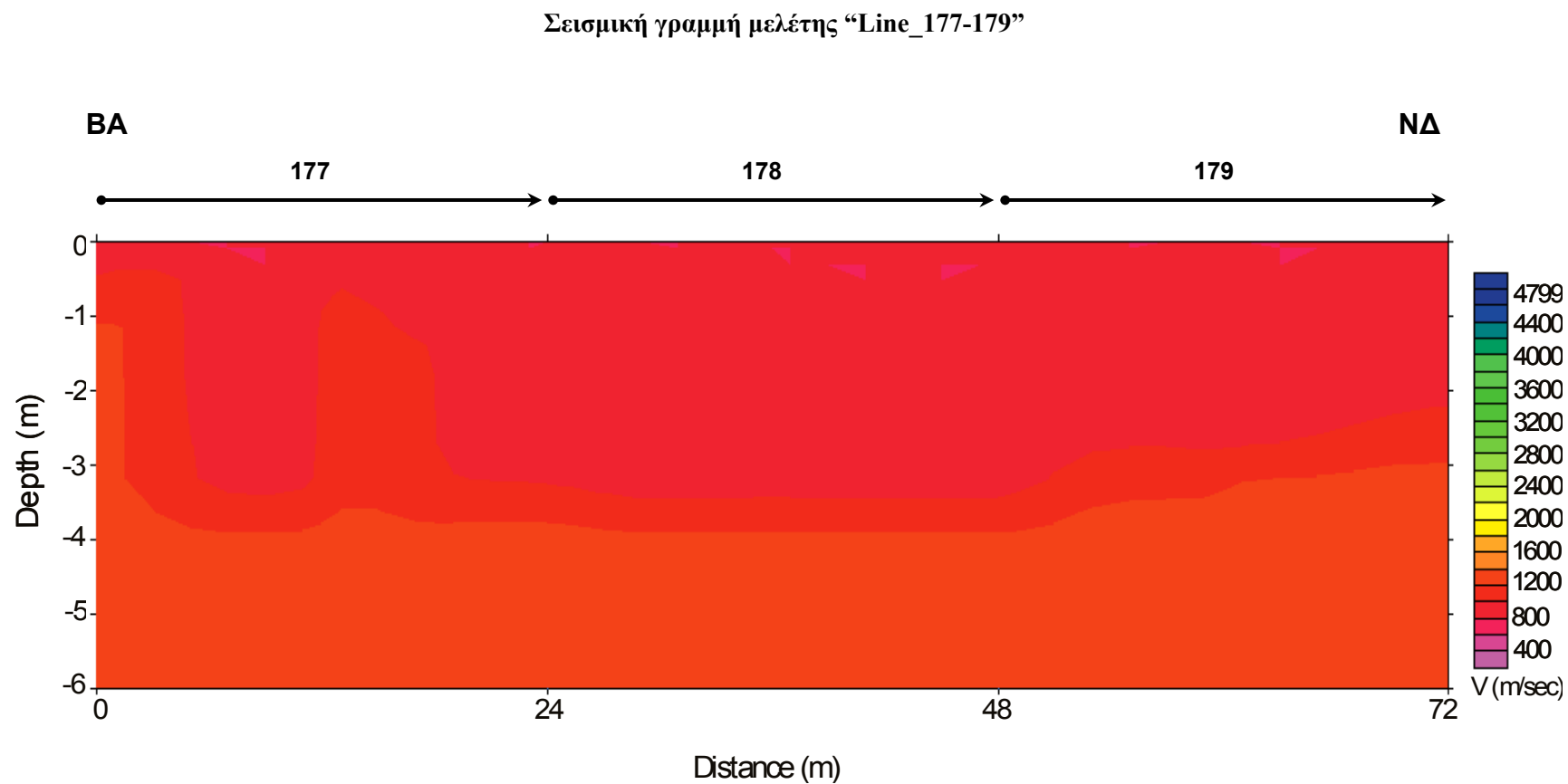
Σχήμα 4.34: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_172-173. Το πρώτο γεώφωνο του αναπτύγματος 172 απέχει 2 m από το πρώτο γεώφωνο του αναπτύγματος 173.



Σχήμα 4.35: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_174.



Σχήμα 4.36: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_175-176. Το πρώτο γεώφωνο του αναπτύγματος 175 απέχει 2 m από το πρώτο γεώφωνο του αναπτύγματος 176.



Σχήμα 4.37: Σεισμική τομή της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τη σεισμική γραμμή μελέτης Line_177-179.

4.4 ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

Με βάση τις σεισμικές ταχύτητες που προσδιορίστηκαν από την επεξεργασία των σεισμικών μεθόδων και τη γεωλογία της περιοχής μελέτης, προκύπτει ότι το υπέδαφος αποτελείται από:

1. Έναν επιφανειακό σχηματισμό που αποδίδεται κυρίως σε ασβεστολιθικά τεμάχια, περιβαλλόμενα από αλλουβιακές αποθέσεις (κυρίως ερυθρογή - Terra Rosa) με ταχύτητες διάδοσης των διαμήκων σεισμικών κυμάτων που κυμαίνονται από $V_{p_{min}} = 550 \text{ m/sec}$ έως $V_{p_{max}} = 2000 \text{ m/sec}$. Η διαβάθμιση της ταχύτητας στο σχηματισμό αυτό οφείλεται στο διαφορετικό ποσοστό του ασβεστόλιθου στις αλλουβιακές αποθέσεις.
2. Έναν ενδιάμεσο σχηματισμό που αποδίδεται σε καρστικοποιημένο ή/και κατακερματισμένο δολομιτικό ασβεστόλιθο, τα διάκενα του οποίου είναι πληρωμένα από αλλουβιακές αποθέσεις (κυρίως Terra Rosa), με ταχύτητες διάδοσης των διαμήκων σεισμικών κυμάτων που κυμαίνονται από $V_{p_{min}} = 2000 \text{ m/sec}$ έως $V_{p_{max}} = 3000 \text{ m/sec}$. Η διαβάθμιση της ταχύτητας στον σχηματισμό αυτό οφείλεται στο διαφορετικό ποσοστό καρστικοποίησης ή/και ύπαρξης διακλάσεων. Το στρώμα αυτό σε πολλές θέσεις εμφανίζεται από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ κατά κανόνα εκτείνεται μέχρι και το βάθος της διασκόπησης (6 – 7 m περίπου).
3. Έναν τρίτο σχηματισμό που αποδίδεται σε συμπαγή δολομιτικό ασβεστόλιθο της ζώνης της Τρίπολης που δεν έχει υποστεί διεργασίες διάβρωσης και καρστικοποίησης, με ταχύτητες διάδοσης των διαμήκων σεισμικών κυμάτων μεγαλύτερες από $V_{p_{min}} = 3000 \text{ m/sec}$. Το στρώμα αυτό εντοπίζεται μόνο σε ορισμένες σεισμικές γραμμές.

Τα αποτελέσματα της γραμμής μελέτης Line_124-125 θεωρούνται μειωμένης αξιοπιστίας όσον αφορά στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του υγιούς υπεδάφους, εφόσον οι ιδιότητες του στις θέσεις αυτές έχουν αλλοιωθεί κατά την εκσκαφή των οδών, για την τοποθέτηση του δικτύου ύδρευσης – αποχέτευσης.

Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές (MacGregor et al, 1994), οι σχηματισμοί με ταχύτητες διάδοσης των διαμήκων κυμάτων, μεγαλύτερες από 2000 m/s, παρουσιάζουν δυσκολία στην εξόρυξη με χρήση μηχανοκίνητου άροτρου ή/και απαιτούν εκρηκτικά, και έχουν μικρή έως πολύ μικρή παραγωγικότητα.. Με ταχύτητα πάνω από την τιμή των 3000 m/s, το πέτρωμα χαρακτηρίζεται ως μη επιδεκτικό σε εξόρυξη, με εξορυκτικό εξοπλισμό μεγέθους D10 ή μικρότερου μεγέθους.

4.5 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΧΑΡΤΩΝ

Το λογισμικό του πακέτου Surfer (πρόγραμμα της Golden Software), είναι ένα λογισμικό απεικόνισης και σχεδιασμού δισδιάστατων και τρισδιάστατων χαρτών. Το λογισμικό δέχεται ως δεδομένα εισόδου τις συντεταγμένες X και Y (θέσεις γεωφώνων και σεισμικών πηγών, σημεία μέτρησης της σεισμικής ταχύτητας) που αναφέρονται στο γεωδαιτικό σύστημα ΕΓΣΑ '87, και την ταχύτητα V (m/s) των σεισμικών κυμάτων. Τελικό αποτέλεσμα της επεξεργασίας, είναι η απεικόνιση της σεισμικής ταχύτητας σε χάρτη (image map).

Το πλήθος των δεδομένων είναι περιορισμένο σε σχέση με το απαιτούμενο πλήθος για τη σάρωση της περιοχής έρευνας, διότι πρόκειται για κατοικημένη περιοχή (περιοχή Μοχού Ηρακλείου). Ο προσδιορισμός των αγνώστων τιμών βασίζεται στη χρήση στατιστικών προτύπων χωρικής εξάρτησης.

4.5.1 Δημιουργία Κανάβου με τη Μέθοδο Kriging

Για τη δημιουργία χάρτη είναι αναγκαία η κατασκευή υπολογιστικού πλέγματος (δημιουργία κανάβου, grid), που περιλαμβάνει τα δεδομένα (αρχεία τύπου dat) και τις εκτιμήσεις της μεταβλητής V (σεισμική ταχύτητα). Το υπολογιστικό πλέγμα είναι μια περιοχή ορθογωνίου σχήματος που περικλείει την περιοχή μελέτης. Αποτελείται από γραμμές και στήλες. Το σημείο τομής μιας γραμμής και μιας στήλης ονομάζεται κόμβος (grid node). Οι γραμμές αντιστοιχούν σε τιμές ταχύτητας ίδιου Y, ενώ οι στήλες σε τιμές ταχύτητας ίδιου X. Οι τιμές της σεισμικής ταχύτητας στα κομβικά σημεία υπολογίζονται με τη μέθοδο της παρεμβολής (interpolation).

Το πλήθος των κόμβων καθορίζεται από τον αριθμό των γραμμών και των στηλών του αρχείου πλέγματος ή της απόστασης που ορίζεται μεταξύ των κόμβων. Μεγάλο πλήθος κόμβων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία χαρτών με μεγάλη εξομάλυνση. Η αύξηση του πλήθους των κόμβων αυξάνει σημαντικά το χρόνο δημιουργίας των αρχείων πλέγματος, το μέγεθός τους και το χρόνο σχεδιασμού του χάρτη. Τα σημεία που βρίσκονται πιο κοντά σε έναν κόμβο, έχουν μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας από αυτά που βρίσκονται πιο μακριά.

Οι τιμές της σεισμικής ταχύτητας που εκτιμώνται με το λογισμικό Surfer, τοποθετούνται πάνω σε κανάβο. Αντίθετα, τα δεδομένα πάνω στο χάρτη δεν έχουν συγκεκριμένη διάταξη με αποτέλεσμα την ύπαρξη περιοχών χωρίς δεδομένα. Με τη δημιουργία κανάβου οι περιοχές αυτές πληρούνται με δεδομένα. Για το σκοπό αυτό

υπολογίζεται η ταχύτητα σε κάθε κόμβο για κάθε αρχείο δεδομένων, για την παραγωγή των αντίστοιχων αρχείων πλέγματος. Το αρχείο δεδομένων περιέχει τιμές ταχύτητας στις θέσεις όπου ελήφθησαν οι μετρήσεις (σημεία δεδομένων), ενώ το αρχείο πλέγματος περιέχει τιμές στους κόμβους.

Το Surfer παρέχει πλήθος μεθόδων παρεμβολής, για τη δημιουργία αρχείων πλέγματος (gridding methods). Οι μέθοδοι αυτές είναι:

- *Αντίστροφης απόστασης (inverse distance)*. Είναι μία από τις πιο γρήγορες σε εφαρμογή μέθοδο. Χρησιμοποιεί τη μέθοδο του σταθμισμένου μέσου, για τον προσδιορισμό των τιμών των κόμβων και συμπεριφέρεται ως παρεμβολέας εξομάλυνσης, είτε ως παρεμβολέας ακριβείας. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η τάση να δημιουργεί κηλίδες (bull's eye). Οι κηλίδες είναι μεμονωμένες περιοχές του χάρτη, στις οποίες οι τιμές της μεταβλητής διαφοροποιούνται σημαντικά από τις γενικές τάσεις.
- *Kriging*. Αναδεικνύει τις τάσεις που υπάρχουν στα δεδομένα. Βασίζεται στο βαριόγραμμα το οποίο ορίζεται από μία συνάρτηση, με την οποία υπολογίζονται οι συντελεστές βαρύτητας των δεδομένων, για τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος δεδομένων. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μικρή ταχύτητα εφαρμογής της όταν το πλήθος των δεδομένων είναι μεγάλο.
- *Ελάχιστης καμπυλότητας (minimum curvature)*. Παράγει χάρτες ομαλών επιφανειών και εφαρμόζεται γρήγορα για τα περισσότερα σύνολα δεδομένων.
- *Μέθοδος των πλησιέστερων σημείων (nearest neighbor)*. Προτιμάται όταν τα δεδομένα είναι ομοιόμορφα ταξινομημένα (π.χ. δεδομένα από κάναβο μετρήσεων).
- *Πολυωνυμική παλινδρόμηση (polynomial regression)*. Η μέθοδος επεξεργάζεται τα δεδομένα, ώστε να τονίζονται οι τάσεις μεγάλης κλίμακας. Χρησιμοποιείται στην ανάλυση τάσεων σε χάρτες επιφανειών. Είναι γρήγορη σε εφαρμογή για οποιοδήποτε πλήθος δεδομένων. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η απώλεια των τοπικών λεπτομερειών στα παραγόμενα αρχεία πλέγματος.
- *Ακτινικές συναρτήσεις βάσης (radial basis functions)*. Εμφανίζει ομοιότητες με τη μέθοδο Kriging. Αποδίδει σωστά τις τάσεις στα περισσότερα σύνολα δεδομένων.
- *Shepard*. Είναι όμοια με την μέθοδο της αντίστροφης απόστασης, με μικρότερη όμως τάση για δημιουργία κηλίδων, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιείται εξομάλυνση.
- *Τριγωνοποίηση γραμμικής παρεμβολής*. Εφαρμόζεται με μεγάλη ταχύτητα σε όλα τα σύνολα δεδομένων. Πλεονέκτημα της τριγωνοποίησης (όταν το πλήθος των δεδομένων είναι μεγάλο), είναι η διατήρηση των ορίων μεταξύ ομάδων δεδομένων,

που εμφανίζονται μέσα στο σύνολο των δεδομένων. Για παράδειγμα, εάν ένα ρήγμα οριοθετείται από ένα σημαντικό πλήθος δεδομένων και από τις δύο πλευρές του (δύο ομάδες δεδομένων), τότε στο αρχείο πλέγματος που θα παραχθεί, θα εμφανιστεί η ασυνέχεια.

Οι μέθοδοι παρεμβολής ακριβείας παράγουν αρχεία πλέγματος στα οποία οι τιμές των κόμβων είναι ίδιες με τις τιμές των δεδομένων, όταν οι συντεταγμένες τους ταυτίζονται. Αυτό συμβαίνει διότι τα σημεία δεδομένων που ταυτίζονται με τους κόμβους φέρουν συντελεστές βαρύτητας μονάδα, ενώ τα υπόλοιπα σημεία δεδομένων λαμβάνουν συντελεστή βαρύτητας μηδέν.

Οι μέθοδοι παρεμβολής εξομάλυνσης χρησιμοποιούνται όταν υπάρχει αβεβαιότητα για την ακρίβεια των δεδομένων. Για το λόγο αυτό, ο συντελεστής βαρύτητας που λαμβάνει τιμή μονάδα, δεν αποδίδεται σε κανένα σημείο δεδομένων ακόμη και όταν αυτό συμπίπτει με κόμβο.

Για την εκτίμηση του πεδίου της σεισμικής ταχύτητας επιλέχθηκε η γεωστατιστική μέθοδος Kriging (βέλτιστο γραμμικό φίλτρο). Το πεδίο ταχύτητας εκτιμάται σε σημεία-κόμβους (σημειακή εκτίμηση) όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις, βάσει της συμπεριφοράς σε γειτονικά μετρημένα σημεία. Η διαφορά της μεθόδου Kriging από τις υπόλοιπες μεθόδους, είναι ότι στηρίζεται σε ένα μοντέλο πιθανοτήτων. Το μοντέλο βαριογράμματος χρησιμοποιείται ως συνάρτηση βάρους και εκφράζει τη χωρική εξάρτηση. Εξαιτίας αυτού, τα βάρη του Kriging αντικατοπτρίζουν το χωρικό συσχετισμό των τιμών της σεισμικής ταχύτητας. Η εκτίμηση σε μια άγνωστη θέση υπολογίζεται με τη χρήση του γραμμικού ζυγισμένου μέσου (Μέθοδος Κανονικού Kriging):

$$Z_o^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (4.1)$$

όπου Z_o^* είναι η εκτίμηση της τιμής στον κόμβο, $Z(x_i)$ είναι η δεδομένη τιμή στη θέση (x_i) και λ_i είναι το βάρος που αποδίδεται σε κάθε τιμή. Όσο πιο κοντά βρίσκεται ένας κόμβος σ' ένα σημείο δεδομένων, τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής βάρους λ που λαμβάνει. Οι συντελεστές λ_i έχουν άθροισμα μονάδα:

$$\sum_i^N \lambda_i = 1 \text{ (συνθήκη αμεροληψίας)} \quad (4.2)$$

Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της εκτίμησης (διακύμανση Kriging), υπό τον περιορισμό της σχέσης 4.2. Η ελάχιστη τιμή της διακύμανσης Kriging σημείου-

σημείου δίνεται ως εξής:

$$\sigma_K^2 = \text{Var}(Z_0^* - Z_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i - x_0) + \mu \quad (4.3)$$

όπου μ είναι ο συντελεστής Lagrange και $\gamma(x_i - x_0)$ είναι η μέση τιμή του τετραγώνου της διακύμανσης σημείου-σημείου (σε όρους βαριογράμματος). Το σύστημα Kriging αναπαρίσταται με μορφή πινάκων και επιλύεται με το πρόγραμμα Surfer. Με αυτό τον τρόπο, εκτιμώνται οι τιμές στους κόμβους και δημιουργείται το υπολογιστικό πλέγμα.

4.5.2 Βαριόγραμμα

Το βαριόγραμμα είναι το βασικό γεωστατιστικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για να μετρηθεί η μεταβολή μιας χωρικής μεταβλητής. Ορίζεται από τη σχέση:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \left[\{Z(x+h) - Z(x)\}^2 \right] \quad (4.4)$$

όπου $\gamma(h)$ είναι η τιμή του βαριογράμματος, $Z(x+h)$ είναι η τιμή της μεταβλητής στη θέση $x+h$, $Z(x)$ είναι η τιμή της μεταβλητής στη θέση x και $E []$ είναι η μέση τιμή. Οι θέσεις $(x+h)$ και x είναι στο n -διάστατο χώρο (στην περίπτωση που εξετάζεται εδώ, $n=2$), όπου το $(x+h)$ απέχει από το x μια διανυσματική απόσταση h . Επομένως, το βαριόγραμμα ορίζεται σε σχέση με ένα ζεύγος σημείων και είναι συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των σημείων δεδομένων (και όχι της θέσης τους στο χώρο).

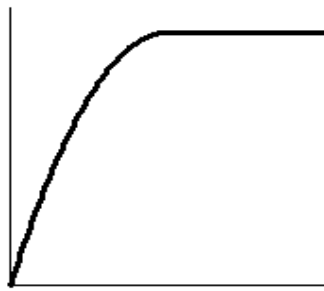
Το πειραματικό βαριόγραμμα, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας N ζεύγη δεδομένων ως εξής:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[\{Z(x_i + h) - Z(x_i)\}^2 \right] \quad (4.5)$$

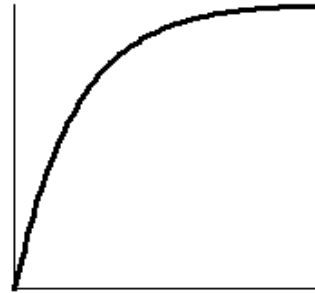
Για τη χρήση του βαριογράμματος στην εκτίμηση kriging πρέπει να προσαρμοστεί μια μαθηματική συνάρτηση - ένα μοντέλο βαριογράμματος - στο πειραματικό βαριόγραμμα. Το λογισμικό Surfer περιέχει τέτοια μοντέλα για την επιλογή του βέλτιστου (σχήμα 4.42, πίνακας 4.3), του μοντέλου δηλαδή αυτού που ταιριάζει περισσότερο στην κατανομή των δεδομένων. Στα περισσότερα βαριογράμματα πραγματοποιείται συνδυασμός ορισμένων μοντέλων (σχήματα 4.38-4.41) για να αποδοθεί με καλύτερη ακρίβεια η χωρική εξάρτηση.

Για να εκτιμηθεί η ποιότητα της προσαρμογής (δηλαδή της προσέγγισης του μοντέλου με το πειραματικό βαριόγραμμα), χρησιμοποιείται η διαδικασία της διασταυρωμένης επαλήθευσης (cross validation). Τα δεδομένα κατανέμονται σε δύο σύνολα, το σύνολο μετρήσεων και το σύνολο ελέγχου. Το βαριόγραμμα υπολογίζεται

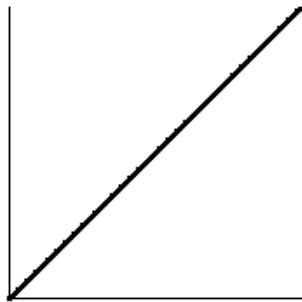
χρησιμοποιώντας τα δεδομένα στα σημεία του συνόλου μετρήσεων. Οι τιμές του πεδίου στα σημεία ελέγχου υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή (kriging) βάσει του βέλτιστου μοντέλου βαριογράμματος και ελέγχεται η εγγύτητά τους στις τιμές του δείγματος.



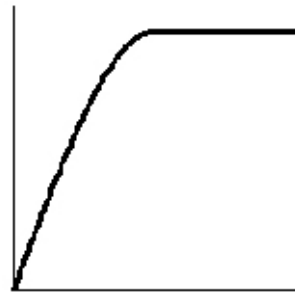
Σχήμα 4.38: Τετραγωνικό μοντέλο



Σχήμα 4.39: Εκθετικό μοντέλο



Σχήμα 4.40: Γραμμικό μοντέλο



Σχήμα 4.41: Σφαιρικό μοντέλο

Οι σημαντικότερες παράμετροι που ενσωματώνει το μοντέλο βαριογράμματος είναι το φαινόμενο κόκκου, η ανισοτροπία, το μήκος συσχέτισης και η τιμή οροφής.

Η ανισοτροπία επιδρά στους συντελεστές βαρύτητας των σημείων δεδομένων, κατά τη δημιουργία των αρχείων πλέγματος. Στην πιο συνηθισμένη περίπτωση, η ανισοτροπία απεικονίζεται ως έλλειψη και ορίζεται από δύο άξονες, κάθετους μεταξύ τους. Ο λόγος και η γωνία ανισοτροπίας καθορίζουν το μήκος των αξόνων και το σχήμα της έλλειψης. Ειδικότερα, ο λόγος ανισοτροπίας καθορίζει τη σχέση των συντελεστών βαρύτητας των αξόνων, ενώ η γωνία προσδιορίζει την κλίση των αξόνων ανισοτροπίας ως προς το καρτεσιανό σύστημα αναφοράς.

Το φαινόμενο κόκκου (nugget effect) χρησιμοποιείται όταν υπάρχουν ασυνέχειες μεταξύ των δεδομένων. Ορίζεται από δύο παραμέτρους: το σφάλμα διακύμανσης (error variance) και την μικρομεταβλητότητα (micro variance). Η πρώτη καθορίζει το εύρος

της διακύμανσης του σφάλματος των μετρήσεων και η δεύτερη τις διακυμάνσεις μικρής κλίμακας. Όσο πιο έντονο είναι το φαινόμενο κόκκου, τόσο πιο έντονη είναι η εξομάλυνση στο παραγόμενο πλέγμα.

Το μήκος συσχέτισης προσδιορίζει τη μέγιστη απόσταση εντός της οποίας δύο σημεία είναι συσχετισμένα.

4.5.3 Δημιουργία Νέου Κανάβου και Χάρτη

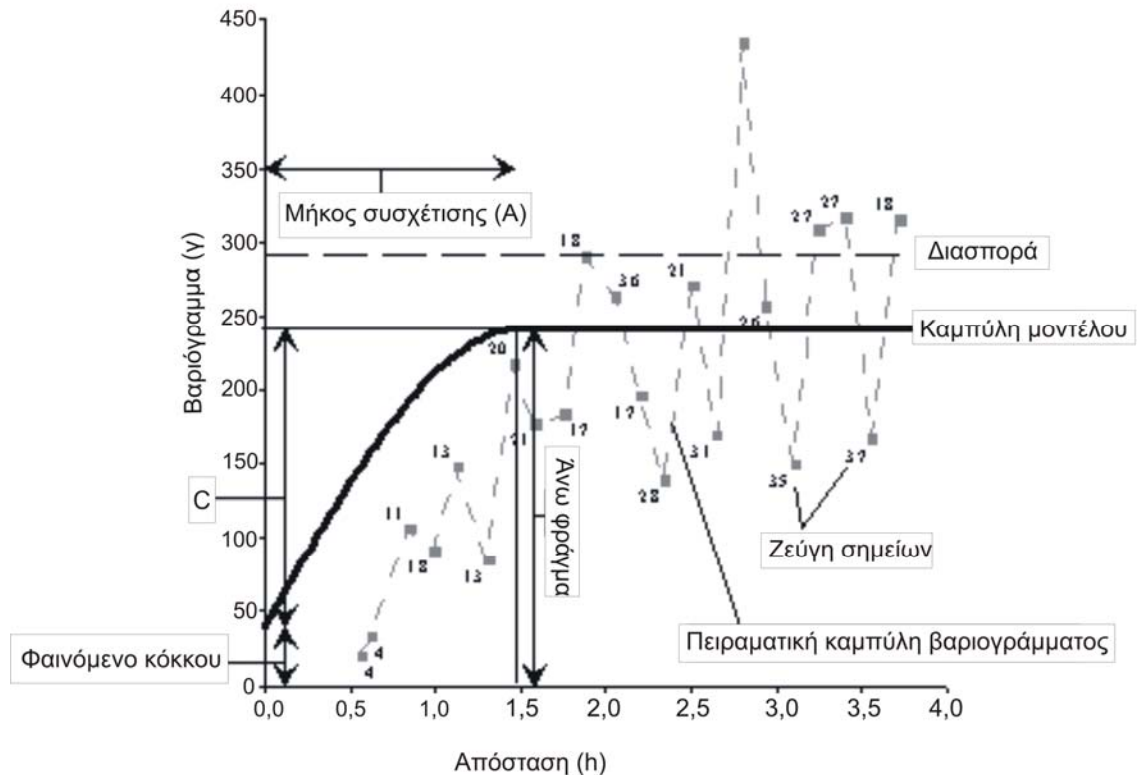
Δημιουργείται νέος κανάβος για κάθε αρχείο δεδομένων με τη μέθοδο kriging (βέλτιστο γραμμικό φίλτρο), επιλέγοντας το βέλτιστο μοντέλο βαριογράμματος.

Για τη δημιουργία χάρτη (Image Map) επιλέγεται το υπολογιστικό πλέγμα που κατασκευάστηκε με βάση το βέλτιστο μοντέλο βαριογράμματος.

Οι χάρτες είναι δύο διαστάσεων και χρησιμοποιούν χρωματικές κλίμακες, για την γραφική απεικόνιση των τιμών της μεταβλητής V (σεισμική ταχύτητα). Τα χρώματα συνδέονται με ποσοστιαίες μονάδες, οι οποίες σχετίζονται με την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή της ταχύτητας, των αρχείων πλέγματος. Η χρωματική κλίμακα συμπληρώνεται με κατάλληλα χρώματα, έτσι ώστε η απεικόνιση των ενδιάμεσων τιμών της ταχύτητας να είναι χρωματικά ομαλή. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τα σημεία αγκύρωσης, τα οποία αντιστοιχούν σε συγκεκριμένο χρώμα της ποσοστιαίας κλίμακας.

Πίνακας 4.3: Επεξήγηση παραμέτρων του βαριογράμματος (σχήμα 4.42).

Παράμετρος	Επεξήγηση παραμέτρου
Φαινόμενο κόκκου (nugget effect)	δείχνει την ύπαρξη ασυνεχούς συμπεριφοράς της χωρομεταβλητής σε μικρές αποστάσεις
Παράμετρος κλίμακας C (scale)	ασύμπτωτη της καμπύλης του μοντέλου (χωρίς το φαινόμενο κόκκου) ή οριακή τιμή του βαριογράμματος
Άνω φράγμα (sill)	συνολικό εύρος τιμών του βαριογράμματος. Το γραμμικό και το λογαριθμικό μοντέλο δεν παρουσιάζουν άνω φράγμα
Μήκος συσχέτισης A (length)	προσδιορίζει τη μέγιστη απόσταση εντός της οποίας δύο σημεία είναι συσχετισμένα (ορισμένα μοντέλα βαριογράμματος δεν έχουν μήκος συσχέτισης π.χ. γραμμικό μοντέλο)
Διασπορά (variance)	τετράγωνο της τυπικής απόκλισης της εκτίμησης από τη μέση εκτίμηση
Ζεύγη (pairs)	αριθμός ζευγών των σημείων για κάθε απόσταση του πειραματικού βαριογράμματος
Καμπύλη μοντέλου (model curve)	δείχνει το σχήμα του μοντέλου βαριογράμματος
Πειραματική καμπύλη (experimental curve)	ενώνει τα ζεύγη των σημείων του πειραματικού βαριογράμματος



Σχήμα 4.42: Παράδειγμα μοντέλου βαριογράμματος.

4.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SURFER

Η απεικόνιση των τιμών της σεισμικής ταχύτητας V (m/sec) έγινε για τις ακόλουθες ζώνες βάθους: 0-2 m, 2-4 m, 4-6 m. Υπολογίζεται η μέση ταχύτητα για κάθε ζώνη βάθους και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία χάρτη ταχυτήτων. Παρατηρείται ότι με την αύξηση του βάθους εμφανίζονται μεγαλύτερες σεισμικές ταχύτητες.

Απεικονίζονται όλες οι σεισμικές γραμμές μελέτης και τα αναπτύγματά τους (σχήματα 4.43, 4.46, 4.49). Αφαιρούνται τα αναπτύγματα 156, 157, 158 και σχεδιάζονται χάρτες για τις ίδιες ζώνες βάθους (σχήματα 4.44, 4.47, 4.50). Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για την περίπτωση αφαίρεσης του αναπτύγματος 167 (σχήματα 4.45, 4.48, 4.51). Στον πίνακα 4.4 παρατίθενται οι συντεταγμένες (ΕΓΣΑ '87) των αναπτυγμάτων που αφαιρέθηκαν. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των δεδομένων, τόσο πιο αξιόπιστο είναι το αποτέλεσμα που προκύπτει από το λογισμικό Surfer. Οι ζώνες βάθους απεικονίζονται ως εξής:

- Ζώνη βάθους 0-2 m: σχήματα 4.43-4.45.
- Ζώνη βάθους 2-4 m: σχήματα 4.46-4.48.

- Ζώνη βάθους 4-6 m: σχήματα 4.49-4.51.

Στη συνέχεια, οι τιμές των ταχυτήτων που υπολογίζονται από το λογισμικό Surfer, για τα αναπτύγματα που αφαιρέθηκαν και συγκρίνονται με τις πραγματικές τιμές (ενότητα 4.6.4) για να διαπιστωθεί η ακρίβεια στην εκτίμηση της σεισμικής ταχύτητας.

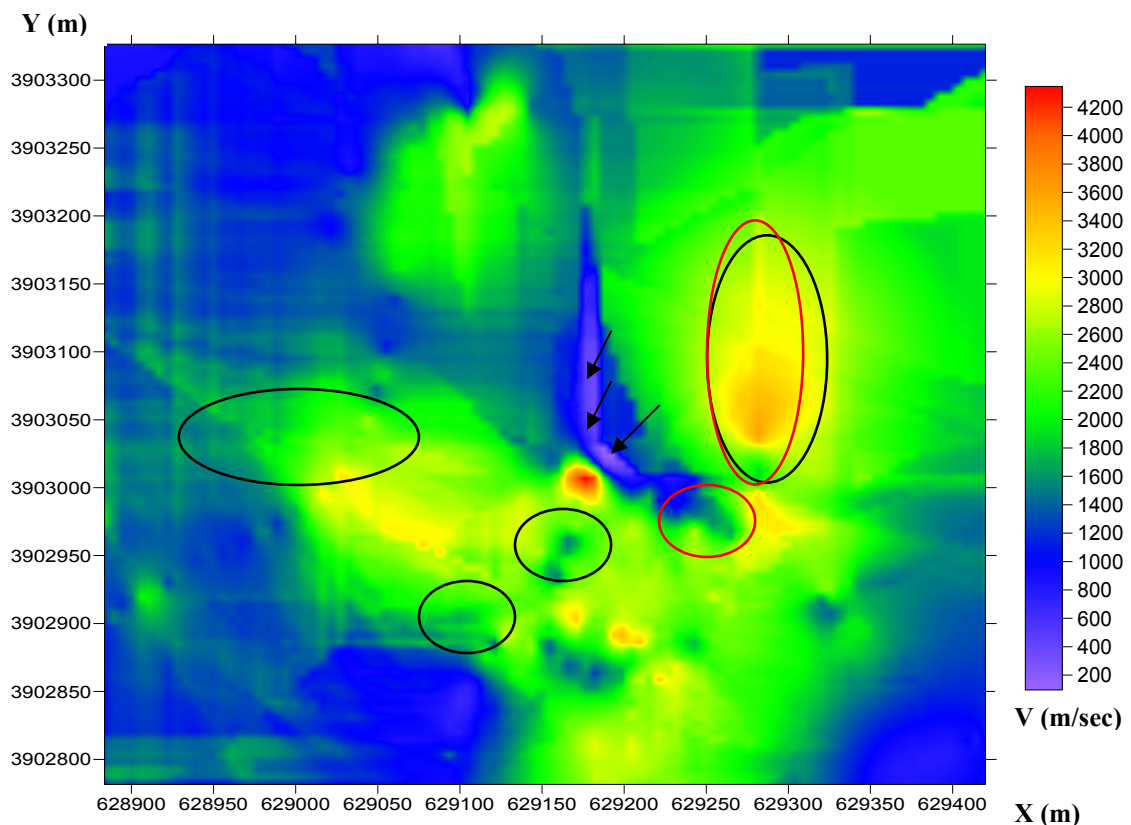
Στο παράρτημα Β παρατίθενται οι ίδιοι χάρτες σεισμικής ταχύτητας συνδυασμένοι με το τοπογραφικό σχέδιο της περιοχής μελέτης, η συγκεντρωτική απεικόνιση της ταχύτητας διάδοσης των Ρ-κυμάτων για όλες τις ζώνες βάθους και η τρισδιάστατη απεικόνιση της ταχύτητας διάδοσης των Ρ-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-179 για τη ζώνη βάθους 0-2 m.

Πίνακας 4.4: Συντεταγμένες των αναπτυγμάτων που αφαιρέθηκαν.

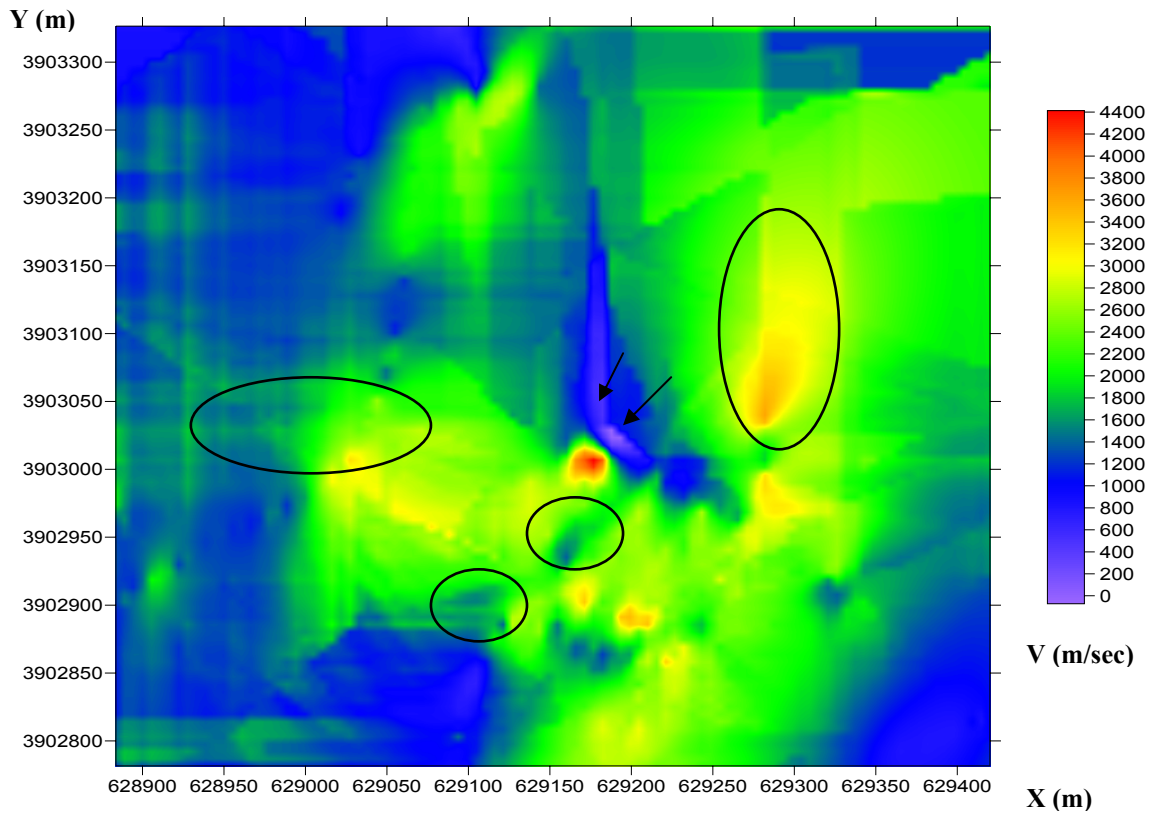
Ανάπτυγμα 156		Ανάπτυγμα 157	
X	Y	X	Y
629168,325	3902966,279	629163,495	3902945,021
629167,882	3902964,329	629164,473	3902944,815
629167,439	3902962,379	629166,430	3902944,404
629166,996	3902960,428	629168,388	3902943,993
629166,552	3902958,478	629170,345	3902943,582
629166,109	3902956,528	629172,302	3902943,171
629165,888	3902955,553	629174,259	3902942,759
629165,666	3902954,577	629175,238	3902942,554
629165,223	3902952,627	629176,217	3902942,348
629164,780	3902950,677	629178,174	3902941,937
629164,337	3902948,727	629180,131	3902941,526
629163,893	3902946,776	629182,089	3902941,114
629163,450	3902944,826	629184,046	3902940,703
629163,229	3902943,851	629186,003	3902940,292
		629186,982	3902940,086
Ανάπτυγμα 158		Ανάπτυγμα 167	
X	Y	X	Y
629183,687	3902938,514	629266,893	3902964,128
629185,527	3902939,298	629266,009	3902964,595
629187,367	3902940,081	629264,241	3902965,529
629189,207	3902940,864	629262,473	3902966,464
629191,048	3902941,648	629260,704	3902967,398
629192,888	3902942,431	629258,936	3902968,333
629193,808	3902942,822	629257,168	3902969,267
629194,728	3902943,214	629256,284	3902969,734
629196,568	3902943,997	629255,400	3902970,202
629198,409	3902944,781	629253,631	3902971,136
629200,249	3902945,564	629251,863	3902972,070
629202,089	3902946,347	629250,095	3902973,005
629203,929	3902947,130	629248,326	3902973,939
		629246,558	3902974,874

4.6.1 Ζώνη Βάθους 0-2 m

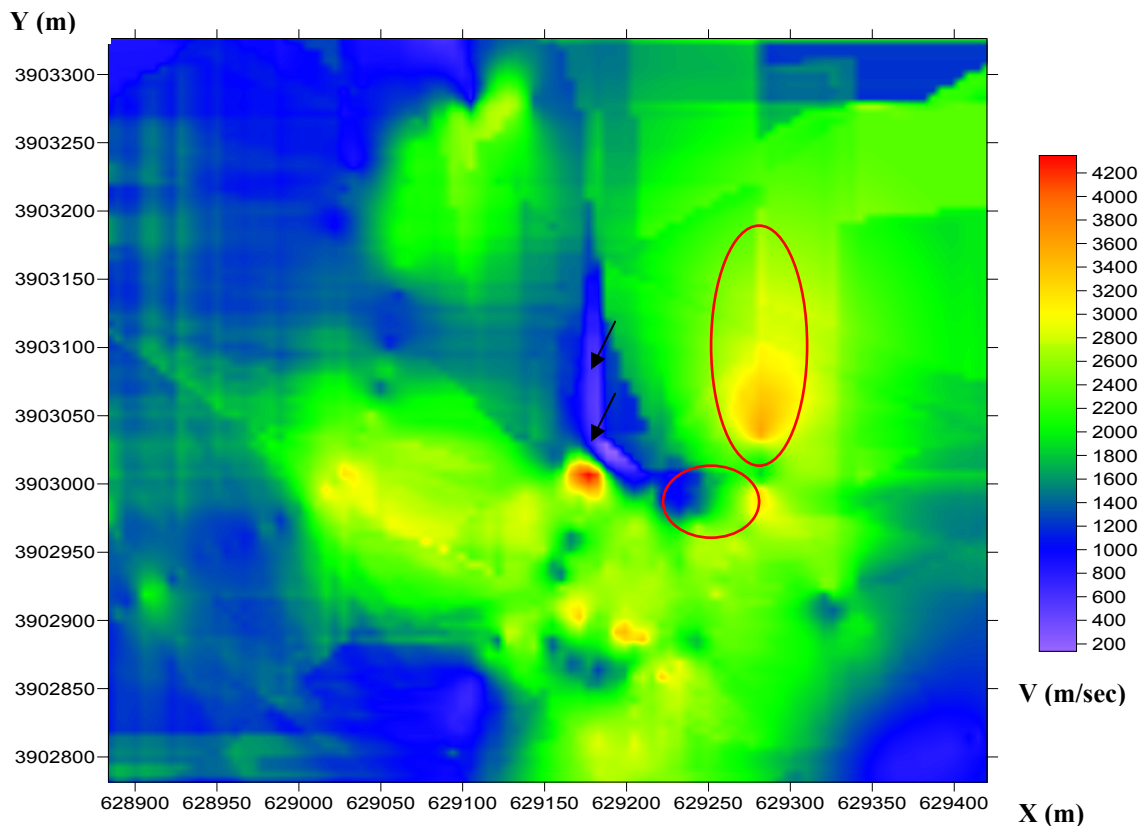
Στη ζώνη βάθους 0-2 m, το εύρος της σεισμικής ταχύτητας κυμαίνεται κυρίως από 600 έως 3000 m/sec. Οι ταχύτητες κάτω από 250 m/sec, που εμφανίζονται στους χάρτες (η περιοχή υποδεικνύεται με βέλη), είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας παρεμβολής, και δεν αντιστοιχούν σε πραγματικούς σχηματισμούς. Παρατηρείται ότι με την αφαίρεση δεδομένων, τα όρια των σεισμικών ταχυτήτων (μέγιστη και ελάχιστη τιμή) που υπολογίζονται από το λογισμικό Surfer, διαφέρουν. Τα σχήματα έλλειψης δείχνουν τις κυριότερες διαφορές που προκύπτουν στην απεικόνιση των σεισμικών ταχυτήτων (σχήμα 4.43), μετά από την αφαίρεση των αναπτυγμάτων (σχήματα 4.44-4.45). Με μαύρο χρώμα εντοπίζονται οι διαφορές μεταξύ του σχήματος 4.43 και 4.44 ενώ με κόκκινο χρώμα εντοπίζονται οι διαφορές μεταξύ του σχήματος 4.43 και 4.45.



Σχήμα 4.43: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-179 για τη ζώνη βάθους 0-2 m. Μήκος συσχέτισης: 215,6 m.



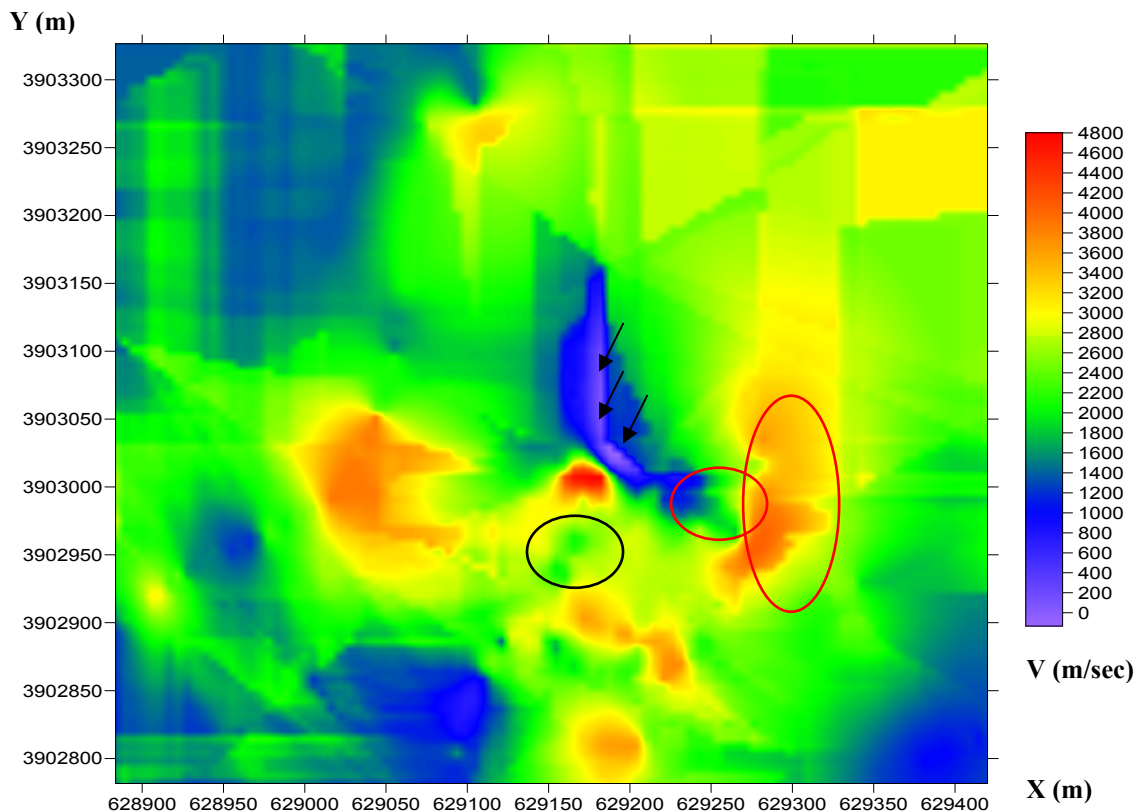
Σχήμα 4.44: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-155, 159-179 για τη ζώνη βάθους 0-2 m. Μήκος συσχέτισης: 282 m.



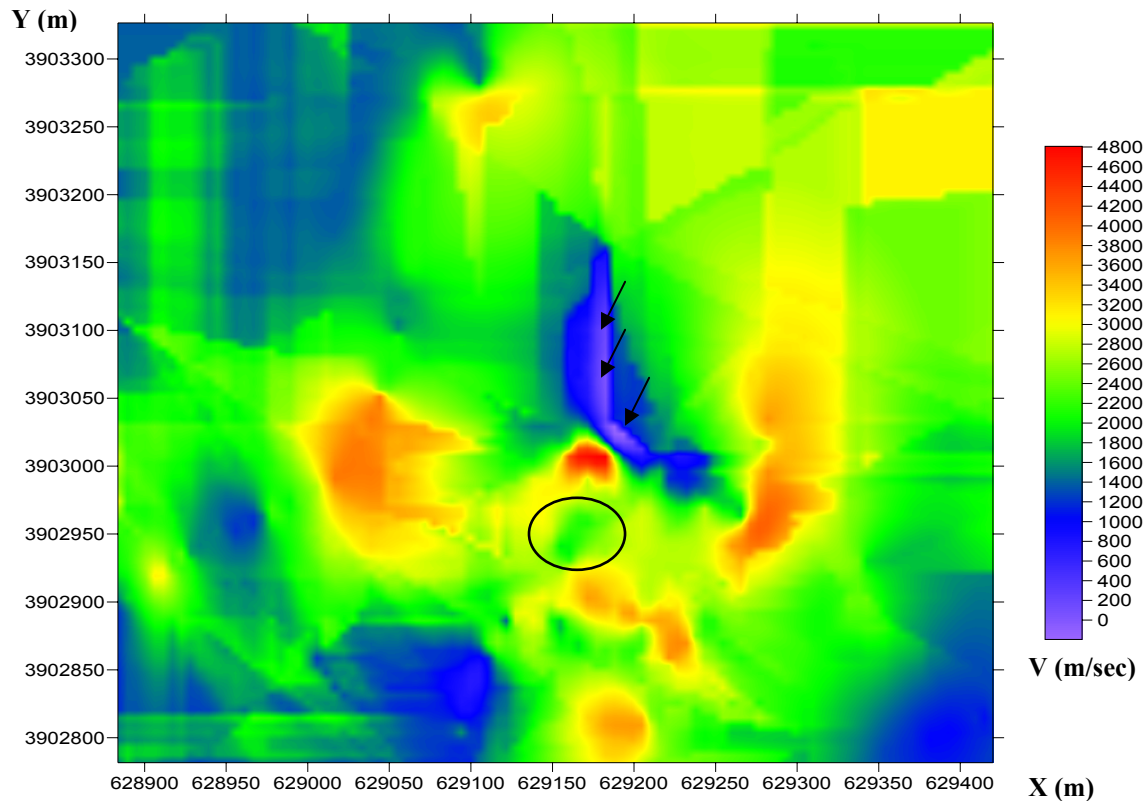
Σχήμα 4.45: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-166, 168-179 για τη ζώνη βάθους 0-2 m. Μήκος συσχέτισης: 230,9 m.

4.6.2 Ζώνη Βάθους 2-4 m

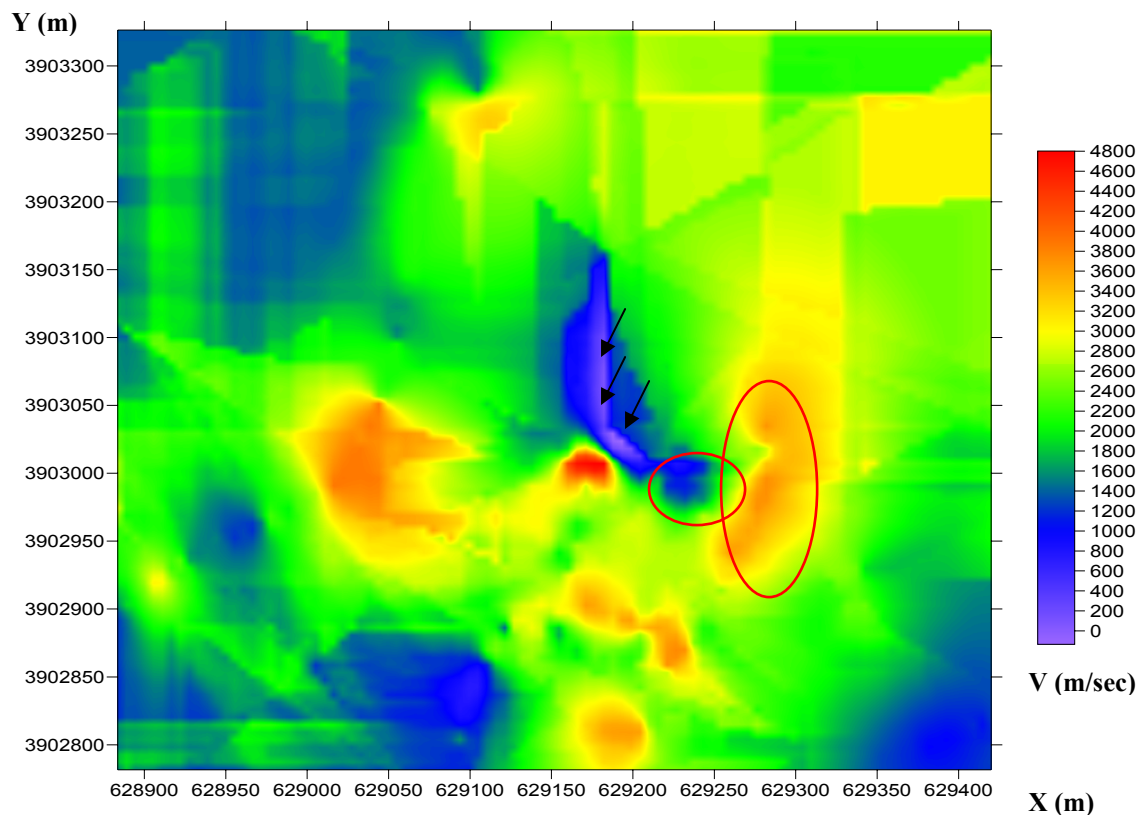
Στη ζώνη βάθους 2-4 m, το εύρος της σεισμικής ταχύτητας κυμαίνεται κυρίως από 800 έως 4200 m/sec. Οι ταχύτητες κάτω από 250 m/sec, που εμφανίζονται στους χάρτες (η περιοχή υποδεικνύεται με βέλη), είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας παρεμβολής, και δεν αντιστοιχούν σε πραγματικούς σχηματισμούς. Παρατηρείται ότι με την αφαίρεση δεδομένων, τα όρια των σεισμικών ταχυτήτων (μέγιστη και ελάχιστη τιμή) που υπολογίζονται από το λογισμικό Surfer, διαφέρουν. Τα σχήματα έλλειψης δείχνουν τις κυριότερες διαφορές που προκύπτουν στην απεικόνιση των σεισμικών ταχυτήτων (σχήμα 4.46) μετά από την αφαίρεση των αναπτυγμάτων (σχήματα 4.47-4.48). Με μαύρο χρώμα εντοπίζονται οι διαφορές μεταξύ του σχήματος 4.46 και 4.47 ενώ με κόκκινο χρώμα εντοπίζονται οι διαφορές μεταξύ του σχήματος 4.46 και 4.48.



Σχήμα 4.46: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-179 για τη ζώνη βάθους 2-4 m. Μήκος συσχέτισης: 187,8 m.



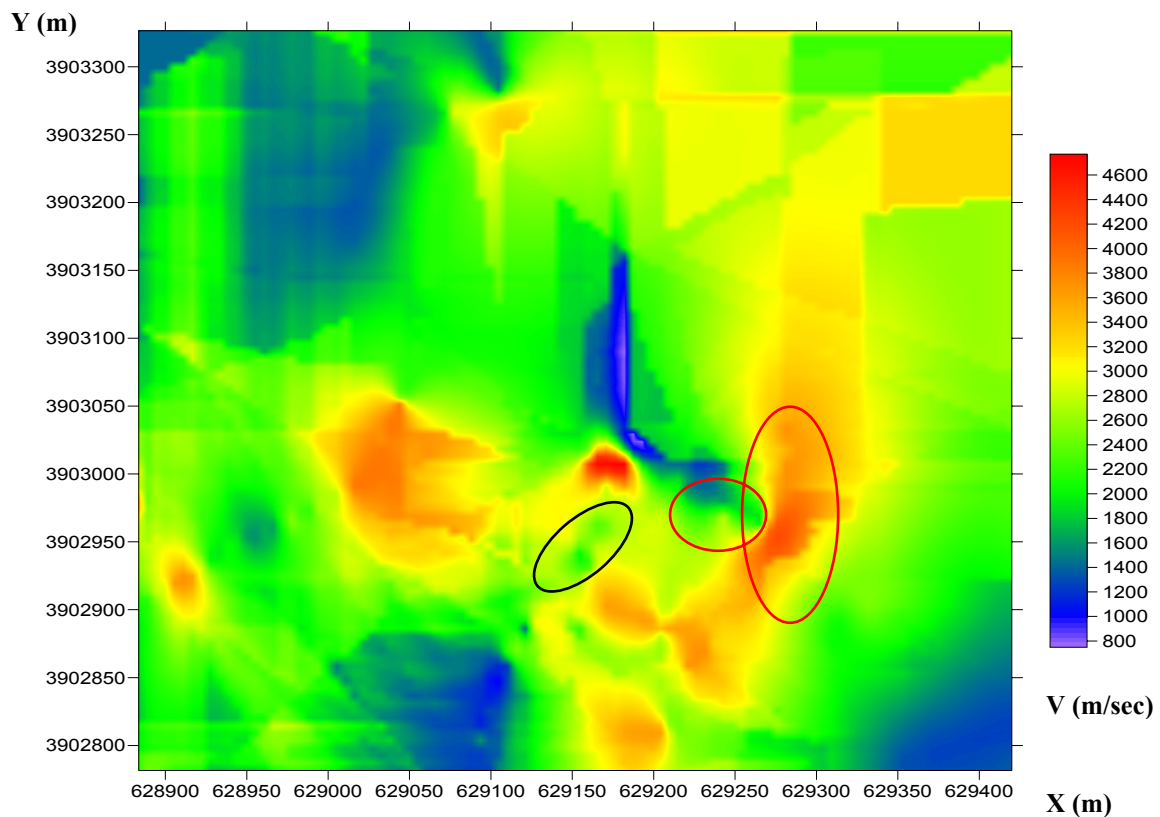
Σχήμα 4.47: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-155, 159-179 για τη ζώνη βάθους 2-4 m. Μήκος συσχέτισης: 190 m.



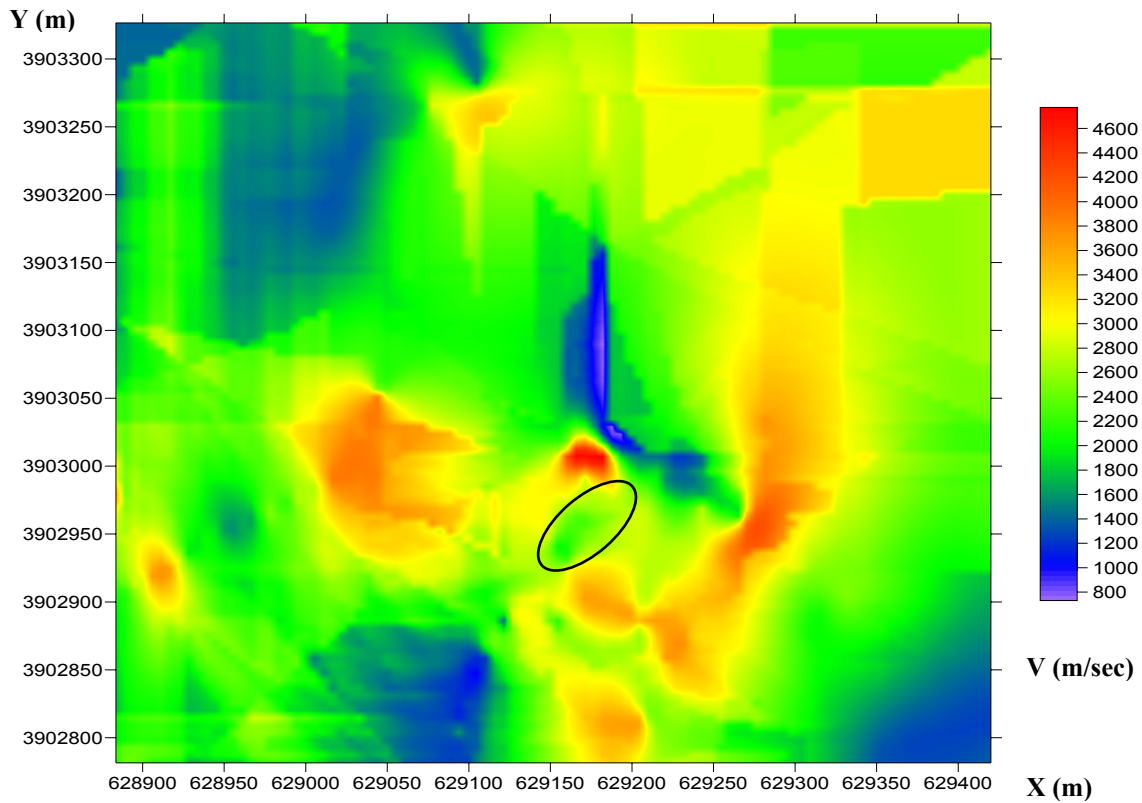
Σχήμα 4.48: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-166, 168-179 για τη ζώνη βάθους 2-4 m. Μήκος συσχέτισης: 188,8 m.

4.6.3 Ζώνη Βάθους 4-6 m

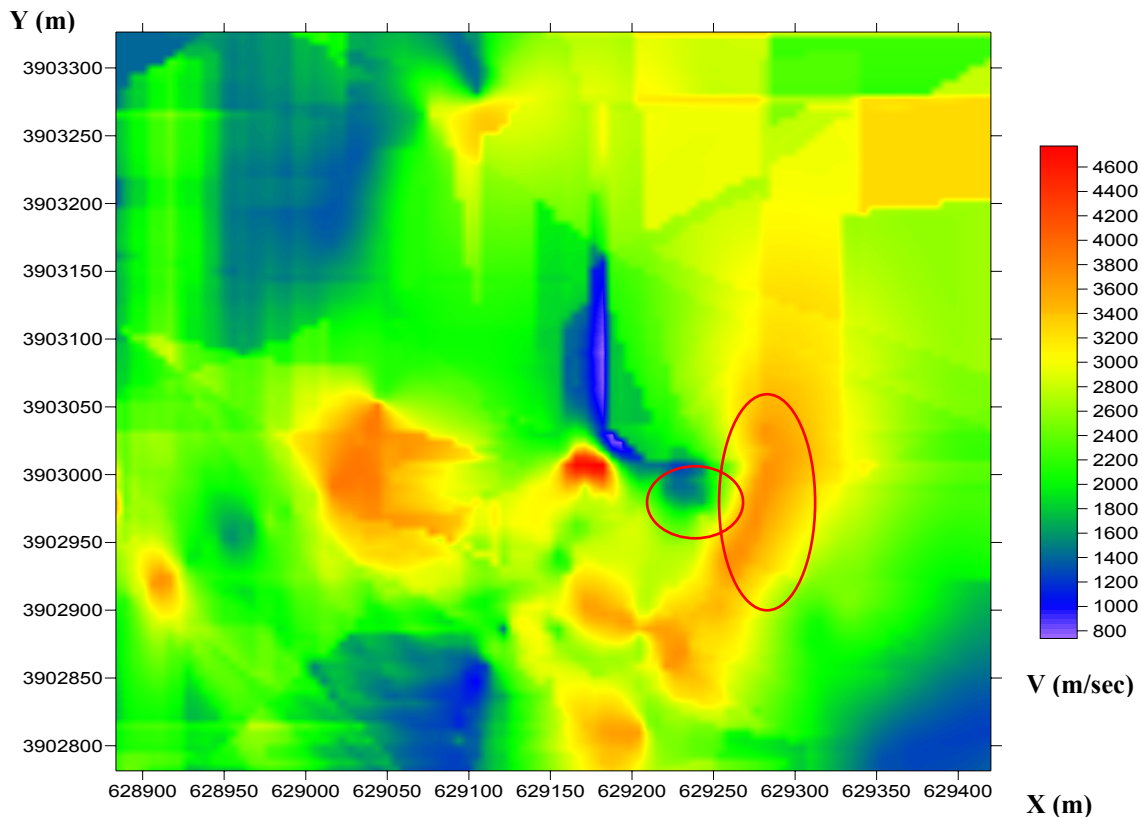
Στη ζώνη βάθους 4-6 m, το εύρος της σεισμικής ταχύτητας κυμαίνεται κυρίως από 1000 έως 4400 m/sec. Οι ταχύτητες κάτω από 250 m/sec, που εμφανίζονται στους χάρτες (η περιοχή υποδεικνύεται με βέλη), είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας παρεμβολής, και δεν αντιστοιχούν σε πραγματικούς σχηματισμούς. Παρατηρείται ότι με την αφαίρεση δεδομένων, τα όρια των σεισμικών ταχυτήτων (μέγιστη και ελάχιστη τιμή) που υπολογίζονται από το λογισμικό Surfer, διαφέρουν. Τα σχήματα έλλειψης δείχνουν τις κυριότερες διαφορές που προκύπτουν στην απεικόνιση των σεισμικών ταχυτήτων (σχήμα 4.49) μετά από την αφαίρεση των αναπτυγμάτων (σχήματα 4.50-4.51). Με μαύρο χρώμα εντοπίζονται οι διαφορές μεταξύ του σχήματος 4.49 και 4.50 ενώ με κόκκινο χρώμα εντοπίζονται οι διαφορές μεταξύ του σχήματος 4.49 και 4.51.



Σχήμα 4.49: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-179 για τη ζώνη βάθους 4-6 m. Μήκος συσχέτισης: 225,9 m.



Σχήμα 4.50: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-155,159-179 για τη ζώνη βάθους 4-6 m. Μήκος συσχέτισης: 112 m.



Σχήμα 4.51: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-166,168-179 για τη ζώνη βάθους 4-6 m. Μήκος συσχέτισης: 228,4 m.

4.6.4 Σύγκριση Τιμών της Σεισμικής Ταχύτητας για τα Αναπτύγματα που Αφαιρέθηκαν

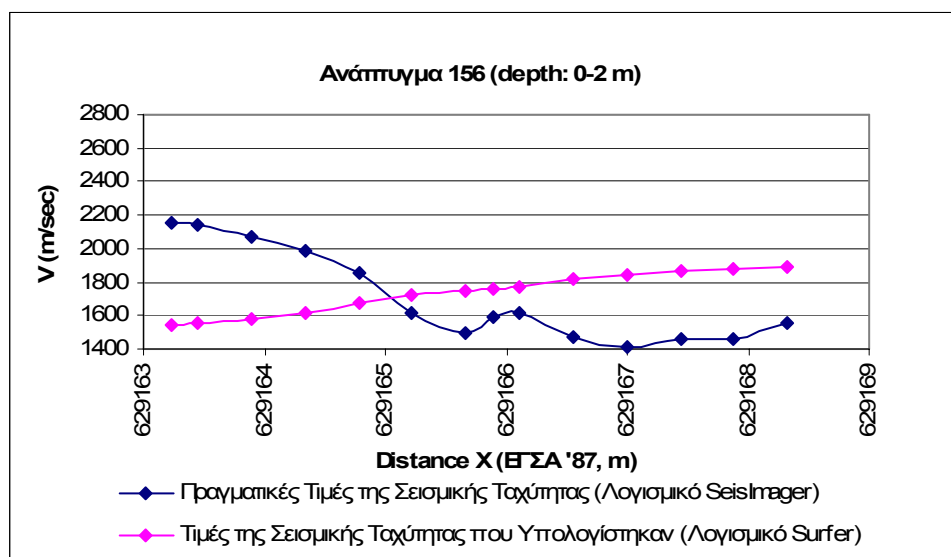
Οι τιμές της σεισμικής ταχύτητας που υπολογίζονται από το λογισμικό Surfer στα σημεία αφαίρεσης των αναπτυγμάτων, δεν ταυτίζονται με τις πραγματικές τιμές (λογισμικό SeisImager). Σε ορισμένα σημεία, παρατηρούνται μικρές διαφορές μεταξύ των τιμών, ενώ σε άλλα οι τιμές που υπολογίζονται αποκλίνουν σημαντικά από τις πραγματικές. Ακολουθεί η σύγκριση των τιμών για τα αναπτύγματα 156 (σχήματα 4.52-4.54), 157-158 (σχήματα 4.55-4.57) και 167 (σχήματα 4.58-4.60).

► Ανάπτυγμα 156

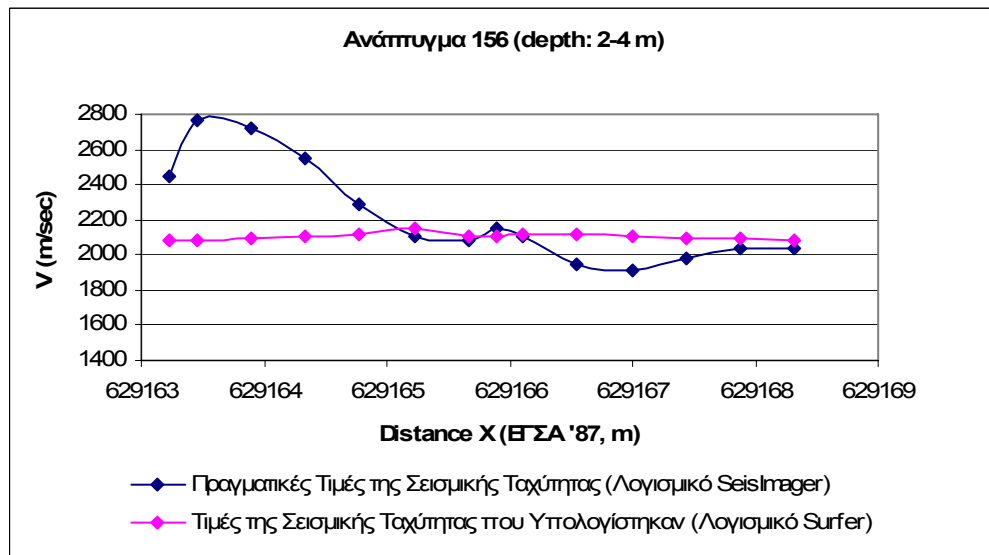
Στη ζώνη βάθους 0-2 m, η μέση εκτιμητέα σεισμική ταχύτητα είναι 1700 m/sec (σχήμα 4.52).

Στη ζώνη βάθους 2-4 m, οι τιμές της σεισμικής ταχύτητας που υπολογίζονται από το λογισμικό Surfer παρουσιάζουν ομοιογένεια και συγκεντρώνονται γύρω από μία κεντρική τιμή 2100 m/sec, ενώ οι πραγματικές τιμές (λογισμικό SeisImager) παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση (σχήμα 4.53).

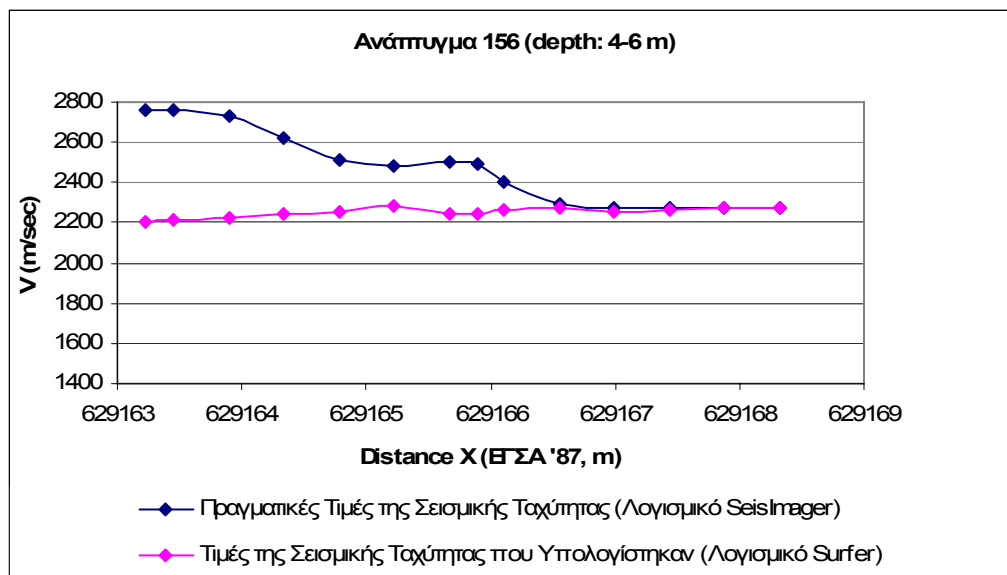
Στη ζώνη βάθους 4-6 m, οι τιμές της σεισμικής ταχύτητας που υπολογίζονται από το λογισμικό Surfer παρουσιάζουν ομοιογένεια και συγκεντρώνονται γύρω από μία κεντρική τιμή 2250 m/sec, ενώ οι πραγματικές τιμές (λογισμικό SeisImager) παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση (σχήμα 4.54). Παρατηρείται πολύ μικρή διαφορά μεταξύ των τιμών για εύρος συντεταγμένων X, από 629166,552 m μέχρι 629168,325 m.



Σχήμα 4.52: Σύγκριση τιμών της σεισμικής ταχύτητας για το ανάπτυγμα 156 και τη ζώνη βάθους 0-2 m.



Σχήμα 4.53: Σύγκριση τιμών της σεισμικής ταχύτητας για το ανάπτυγμα 156 και τη ζώνη βάθους 2-4 m.



Σχήμα 4.54: Σύγκριση τιμών της σεισμικής ταχύτητας για το ανάπτυγμα 156 και τη ζώνη βάθους 4-6 m.

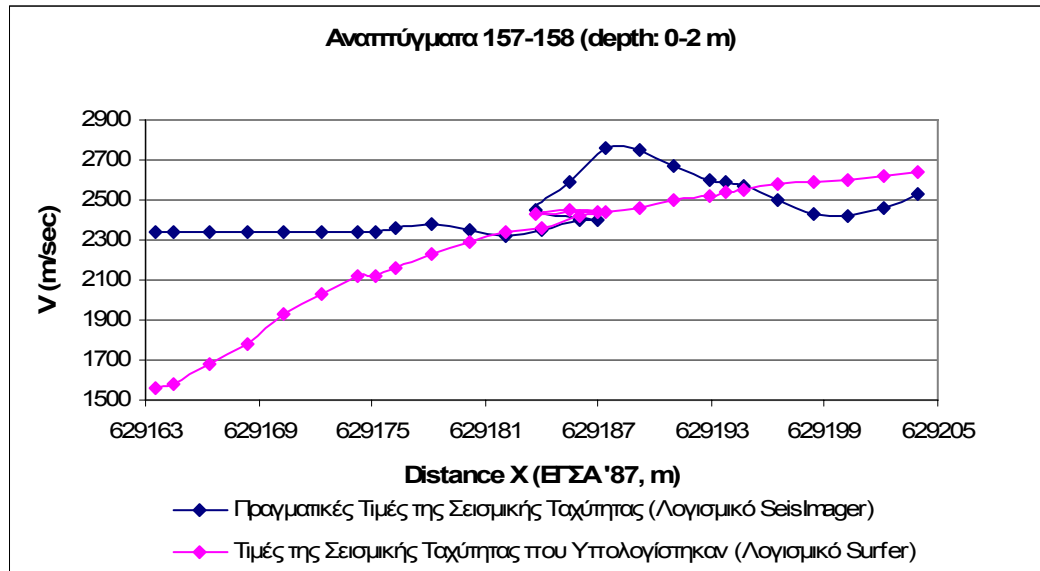
► Αναπτύγματα 157-158 (αλληλεπικάλυψη κατά 2 m)

Στη ζώνη βάθους 0-2 m, παρατηρείται μικρή διαφορά μεταξύ των τιμών της σεισμικής ταχύτητας στην περιοχή αλληλεπικάλυψης, ενώ στα υπόλοιπα σημεία οι τιμές που υπολογίζονται αποκλίνουν από τις πραγματικές. Μία μέση εκτιμητέα σεισμική ταχύτητα για το ανάπτυγμα 158, είναι 2550 m/sec (σχήμα 4.55).

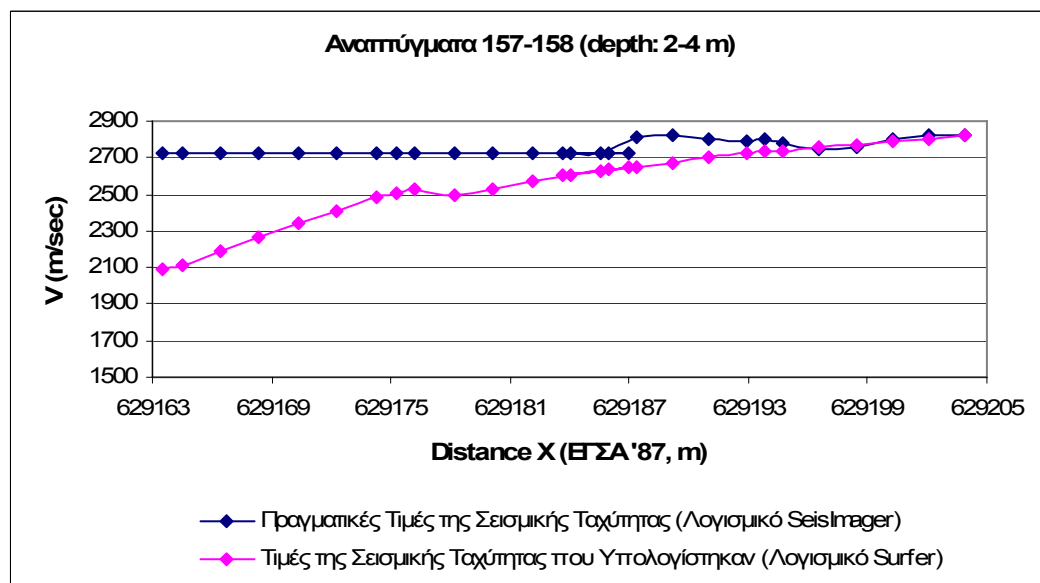
Στη ζώνη βάθους 2-4 m, οι πραγματικές τιμές της σεισμικής ταχύτητας (λογισμικό SeisImager) παρουσιάζουν ομοιογένεια και συγκεντρώνονται γύρω από μία κεντρική τιμή 2800 m/sec, ενώ οι τιμές που υπολογίζονται από το λογισμικό Surfer,

παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση (σχήμα 4.56).

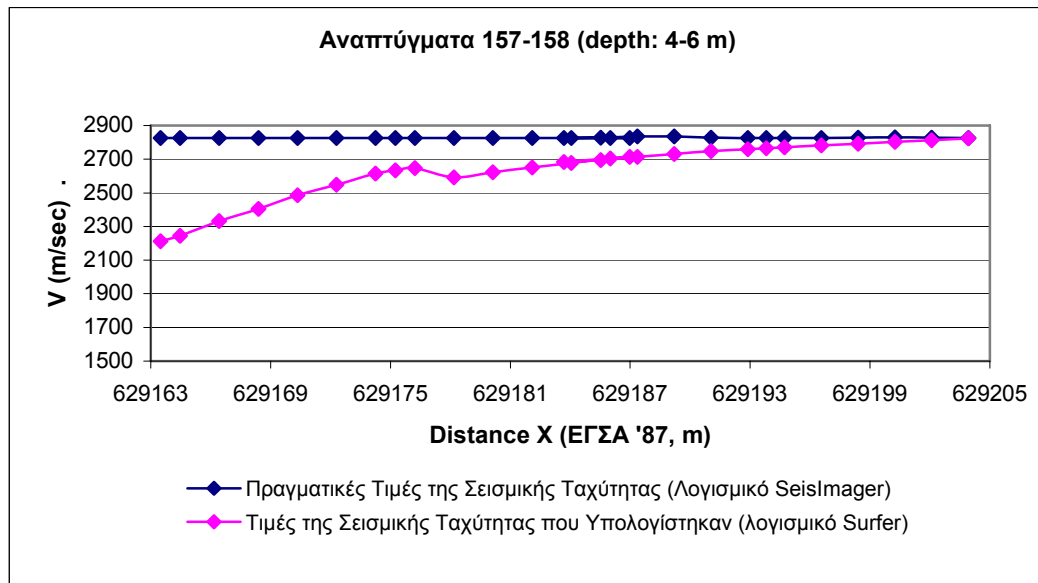
Στη ζώνη βάθους 4-6 m, οι πραγματικές τιμές της σεισμικής ταχύτητας παρουσιάζουν ομοιογένεια και συγκεντρώνονται γύρω από μία κεντρική τιμή 2830 m/sec, ενώ οι τιμές που υπολογίζονται (λογισμικό Surfer) παρουσιάζουν διακύμανση (σχήμα 4.57). Παρατηρείται μικρή διαφορά μεταξύ των τιμών για εύρος συντεταγμένων X από 629198,409 m μέχρι 629202,089 m.



Σχήμα 4.55: Σύγκριση τιμών της σεισμικής ταχύτητας για τα αναπτύγματα 157-158 και τη ζώνη βάθους 0-2 m.



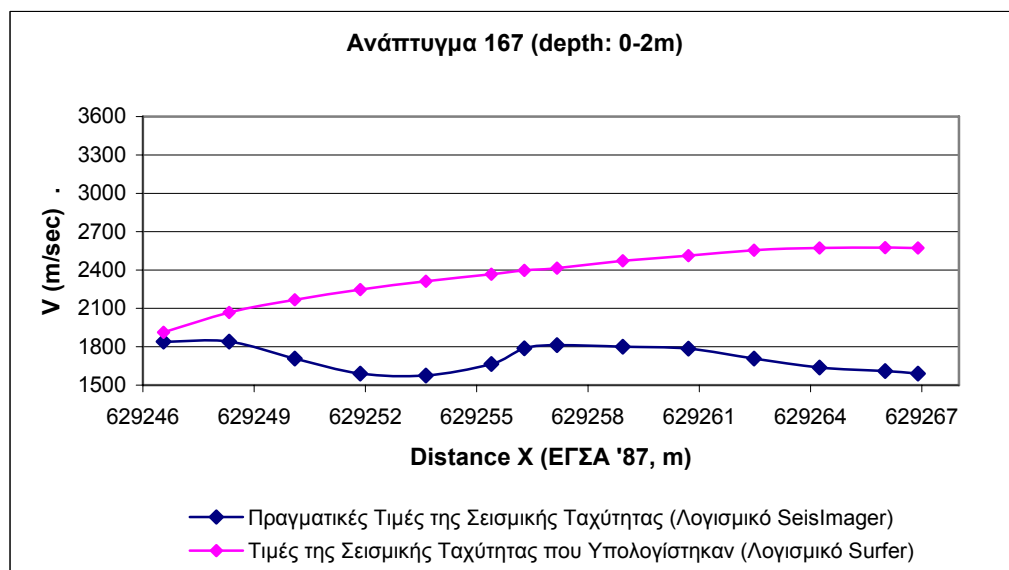
Σχήμα 4.56: Σύγκριση τιμών της σεισμικής ταχύτητας για τα αναπτύγματα 157-158 και τη ζώνη βάθους 2-4 m.



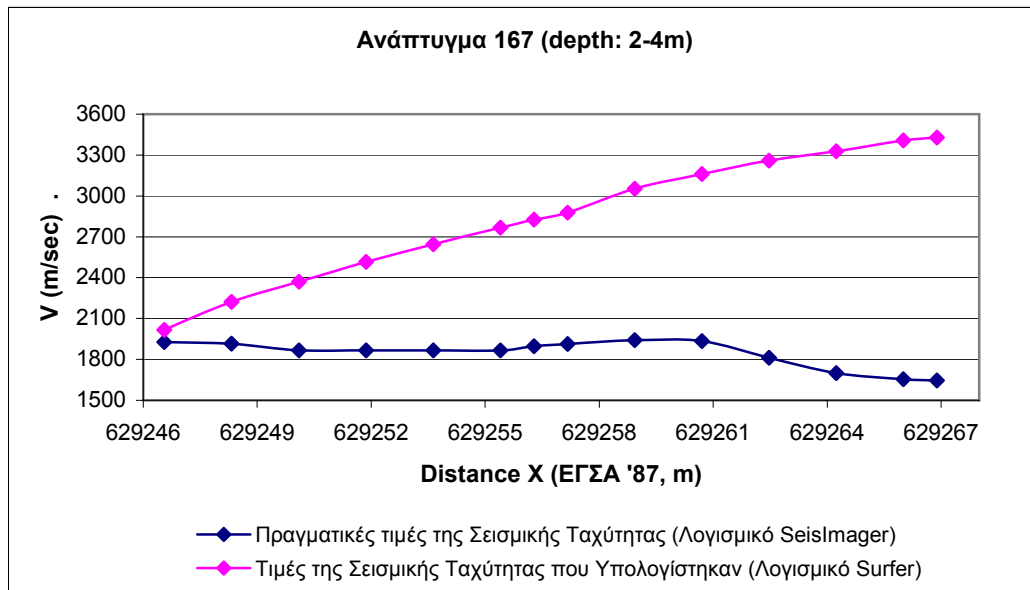
Σχήμα 4.57: Σύγκριση τιμών της σεισμικής ταχύτητας για τα αναπτύγματα 157-158 και τη ζώνη βάθους 4-6 m.

▶ *Ανάπτυγμα 167*

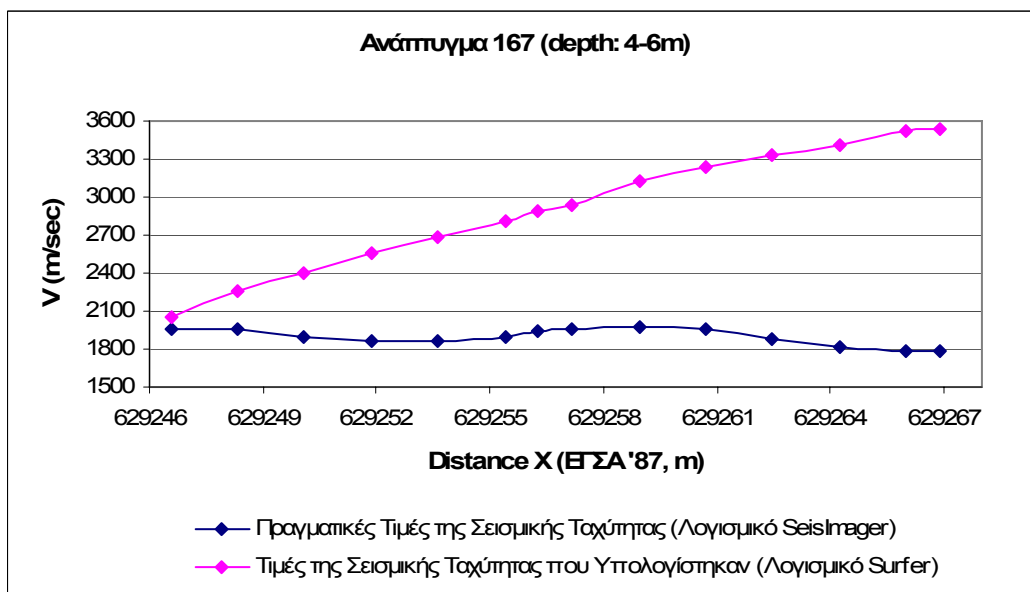
Οι τιμές της σεισμικής ταχύτητας που υπολογίζονται από το λογισμικό Surfer δεν ακολουθούν τις πραγματικές τιμές (λογισμικό SeisImager). Παρατηρείται ότι σε ένα μόνο σημείο ($X=629246,558$ m) οι τιμές έχουν μικρή απόκλιση ενώ στη συνέχεια του αναπτύγματος, αποκλίνουν σημαντικά (σχήματα 4.58-4.60).



Σχήμα 4.58: Σύγκριση τιμών της σεισμικής ταχύτητας για το ανάπτυγμα 167 και τη ζώνη βάθους 0-2 m.



Σχήμα 4.59: Σύγκριση τιμών της σεισμικής ταχύτητας για το ανάπτυγμα 167 και τη ζώνη βάθους 2-4 m.



Σχήμα 4.60: Σύγκριση τιμών της σεισμικής ταχύτητας για το ανάπτυγμα 167 και τη ζώνη βάθους 4-6 m.

5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΓΕΩΪΛΙΚΩΝ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ

Στην παρούσα μελέτη, η κατανομή της ταχύτητας των P-κυμάτων στους επιφανειακούς σχηματισμούς σχετίζεται με την ποσοστιαία κατανομή των βραχωδών (ή αντίστοιχα των γαιωδών) γεωϋλικών στο υπέδαφος.

Ειδικότερα, η μέση ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων σε ανομοιογενές υλικό εξαρτάται από την ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων σε κάθε γεωϋλικό, καθώς και από το ποσοστό των γεωϋλικών αυτών στον προς εξέταση σχηματισμό. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, όπου οι επιφανειακοί σχηματισμοί αποτελούνται από δύο (2) γεωϋλικά (αλλουβιακές αποθέσεις και δολομιτικό ασβεστόλιθο), η μέση ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων (\bar{V}_p) θα δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{V}_p = R_{\%} \times V_{\text{Rock}} + (1 - R_{\%}) \times V_{\text{Soil}} \quad (5.1)$$

όπου $R_{\%}$ είναι το ποσοστό της βραχομάζας στον σχηματισμό, V_{Rock} είναι η ταχύτητα διάδοσης των P-κυμάτων στην βραχομάζα και V_{Soil} είναι η ταχύτητα διάδοσης των P-κυμάτων στις αλλουβιακές αποθέσεις.

Επομένως, σε κάθε θέση, το εκατοστιαίο ποσοστό της βραχομάζας στον σχηματισμό θα δίδεται από τη σχέση:

$$R_{\%} = \frac{\bar{V}_p - V_{\text{Soil}}}{V_{\text{Rock}} - V_{\text{Soil}}} \times 100 \quad (5.2)$$

όπου πλέον η ταχύτητα \bar{V}_p είναι η προσδιοριζόμενη από την σεισμική διάθλαση ταχύτητα.

Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές (Reynolds, 1997), από εκτεταμένες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί από το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής στο Οροπέδιο του Ομαλού Κρήτης, αλλά και από τα αποτελέσματα της σεισμικής διάθλασης στην συγκεκριμένη περιοχή, αντιπροσωπευτική ταχύτητα διάδοσης των P-κυμάτων στις γαιώδεις (αλλουβιακές) αποθέσεις, θεωρείται η τιμή των **550 m/sec**. Αντίστοιχα, ως ταχύτητα διάδοσης των P-κυμάτων στην βραχομάζα του δολομιτικού ασβεστόλιθου, θεωρείται η τιμή των **2000 m/sec**.

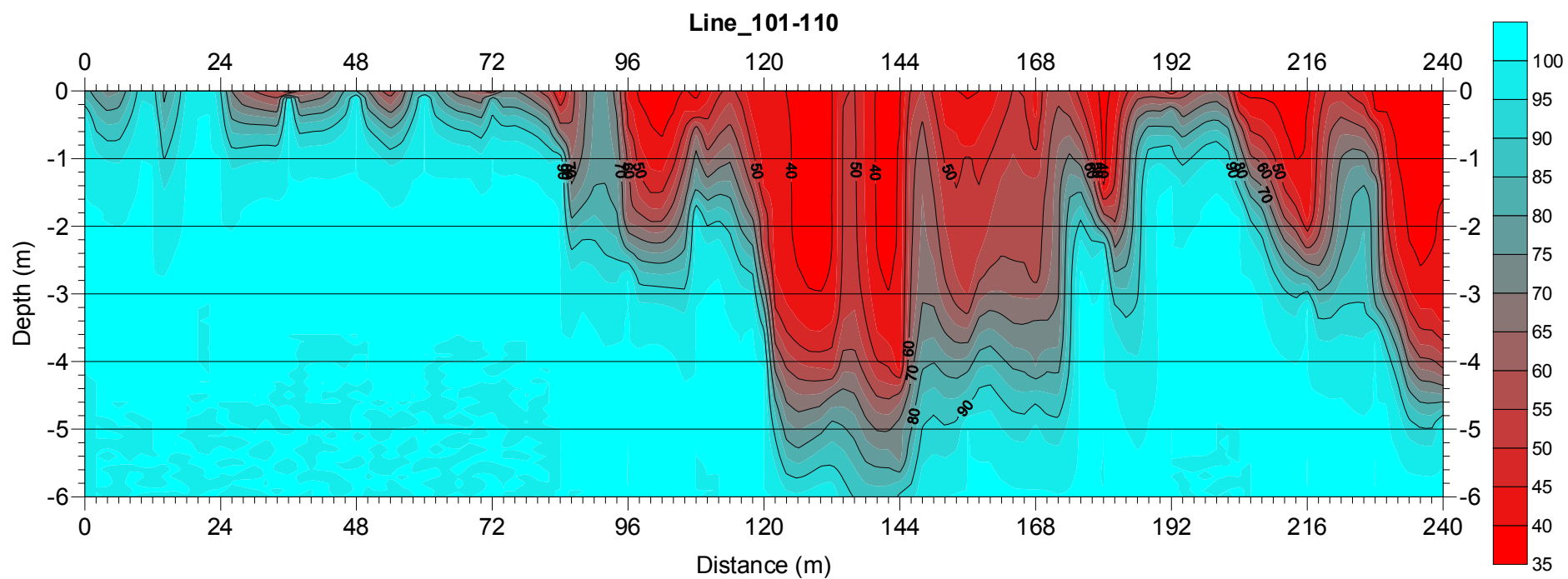
Με βάση τα παραπάνω, η εξίσωση (5.2) γίνεται:

$$R_{\%} = \frac{\bar{V}_p - 550}{2000 - 550} \times 100 \Rightarrow R_{\%} = \frac{\bar{V}_p - 550}{1450} \times 100 \quad (5.3)$$

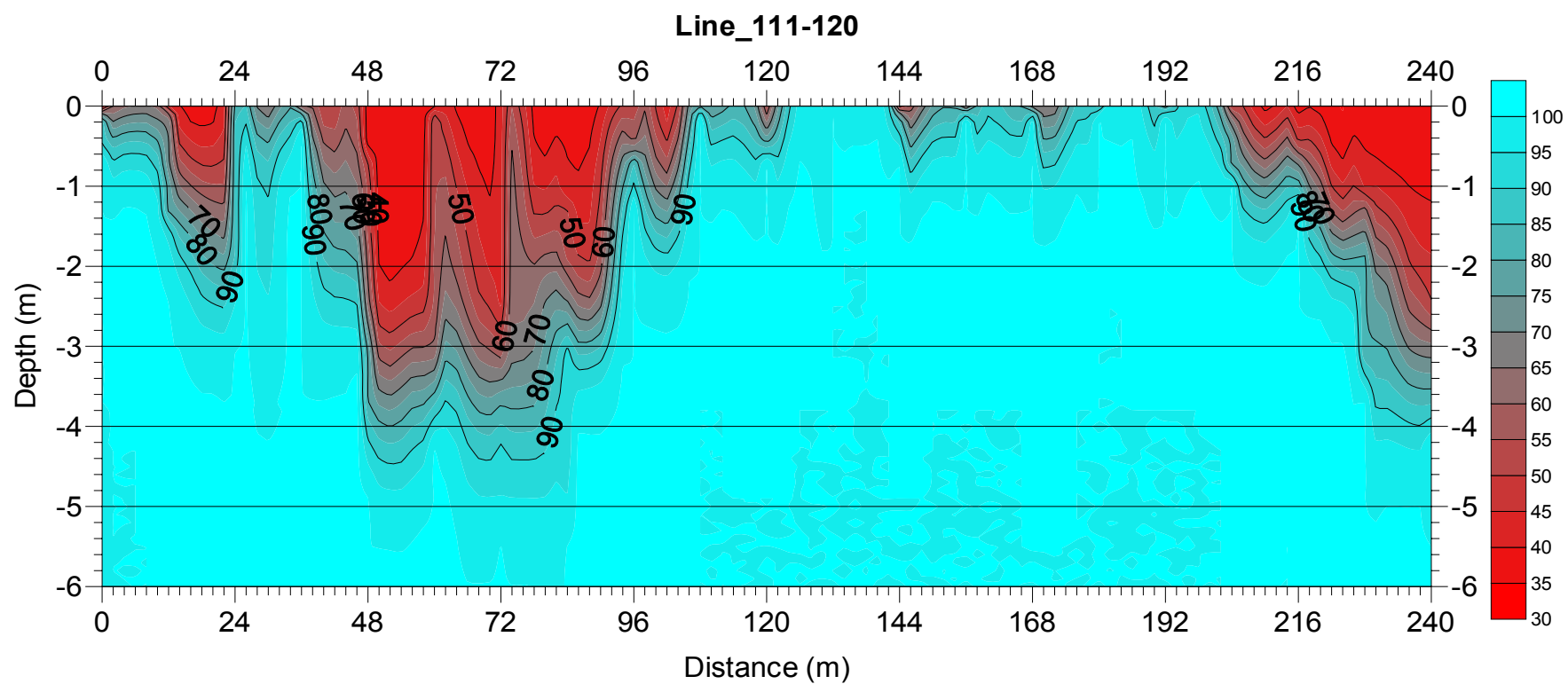
Με βάση την εξίσωση (5.3) υπολογίστηκαν για κάθε σεισμική τομή τα αντίστοιχα ποσοστά των βραχωδών γεωϋλικών στο υπέδαφος. Για υπολογισμένες ταχύτητες μεγαλύτερες ή ίσες με 2000 m/sec το ποσοστό της βραχομάζας δεν υπερβαίνει το 100 %, ενώ για ταχύτητες μικρότερες ή ίσες με 550 m/sec το ποσοστό της βραχομάζας θεωρείται 0 %.

5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΓΕΩΪΛΙΚΩΝ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ

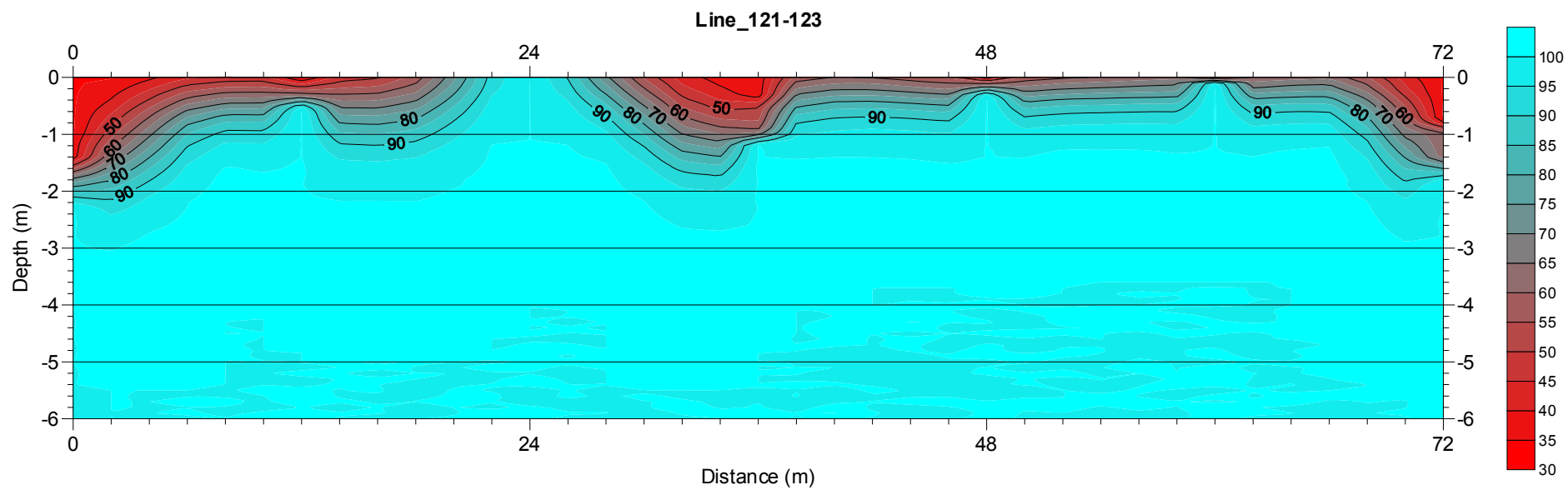
Τα αποτελέσματα του υπολογισμού της κατανομής της βραχομάζας στους επιφανειακούς σχηματισμούς της περιοχής μελέτης συνοψίζονται για την κάθε γραμμή μελέτης στα Σχήματα 5.1 έως 5.19, αντίστοιχα.



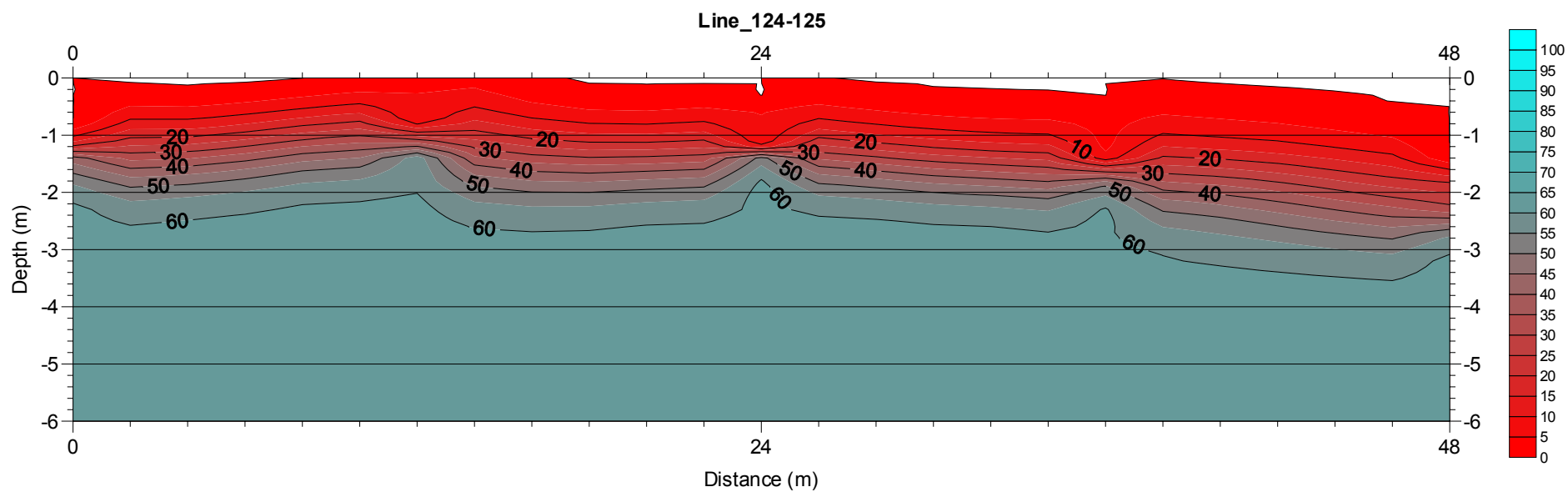
Σχήμα 5.1: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_101-110.



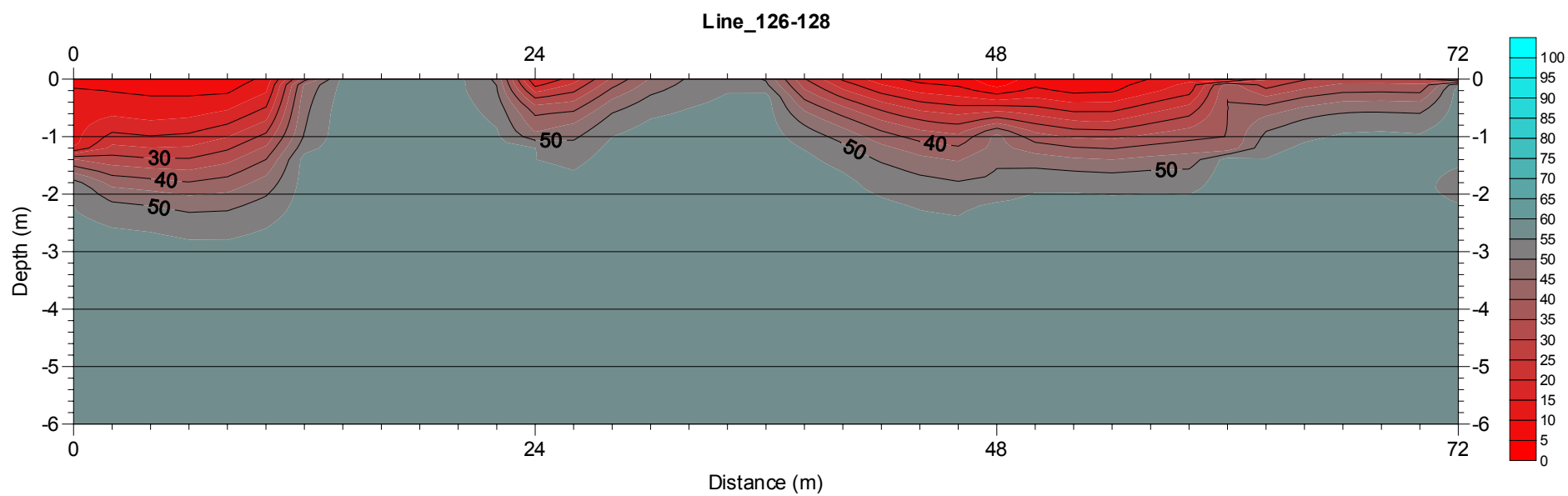
Σχήμα 5.2: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_111-120.



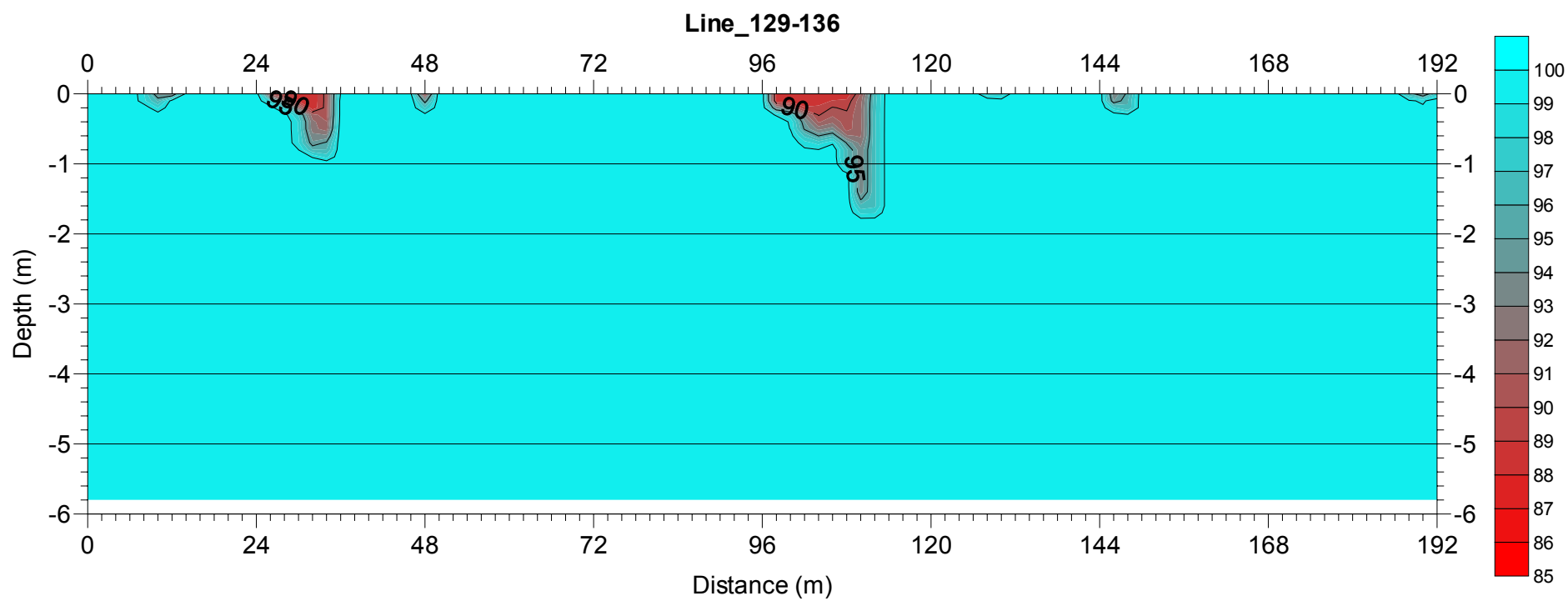
Σχήμα 5.3: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_121-123.



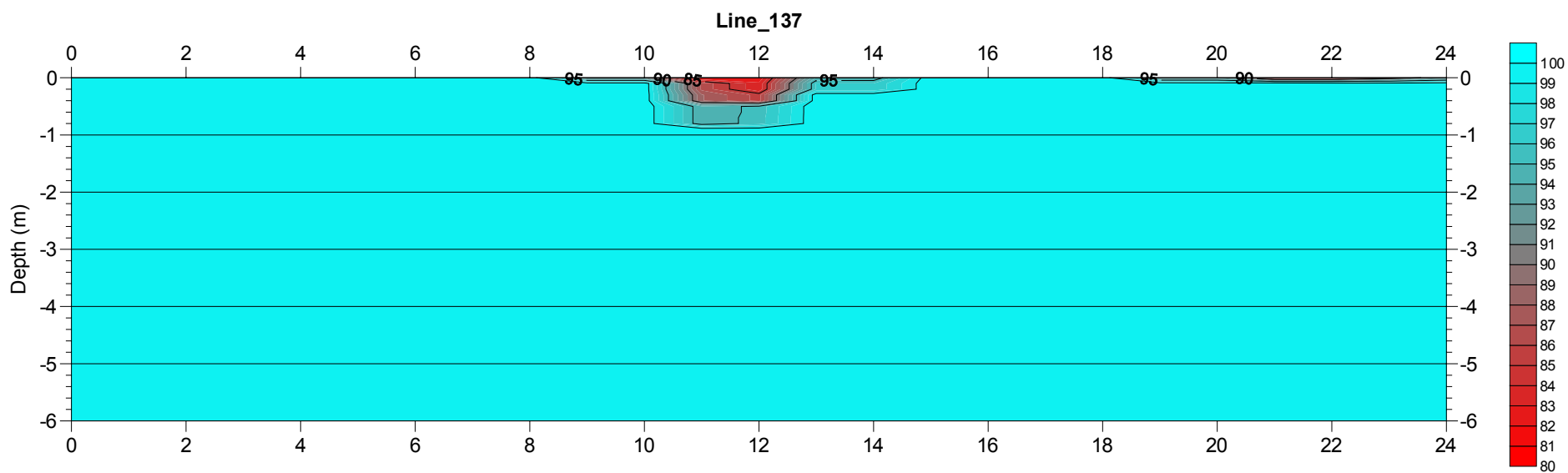
Σχήμα 5.4: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_124-125.



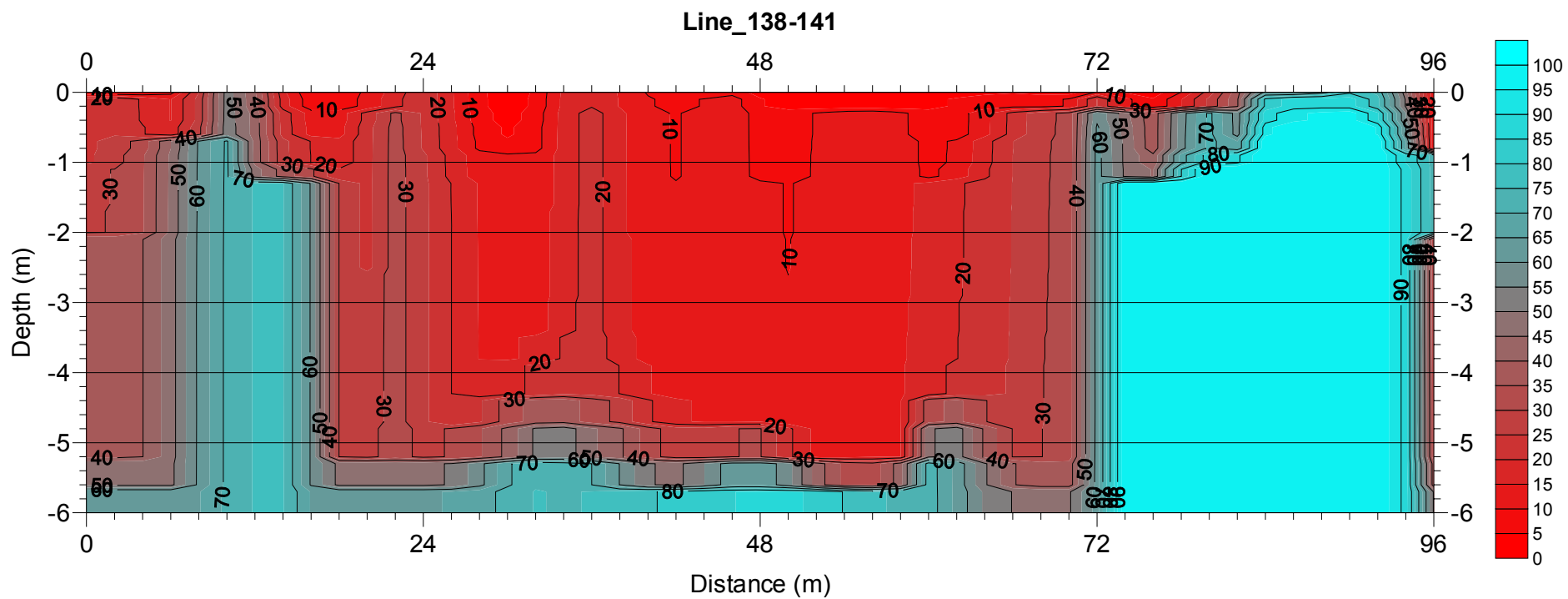
Σχήμα 5.5: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_126-128.



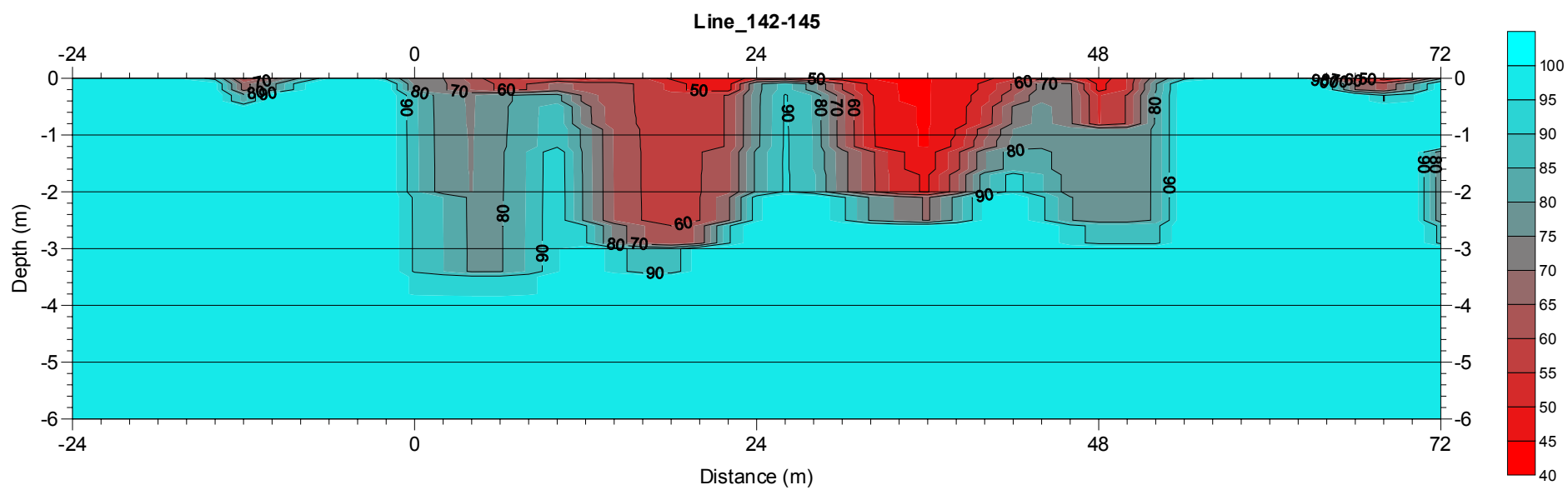
Σχήμα 5.6: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_129-136.



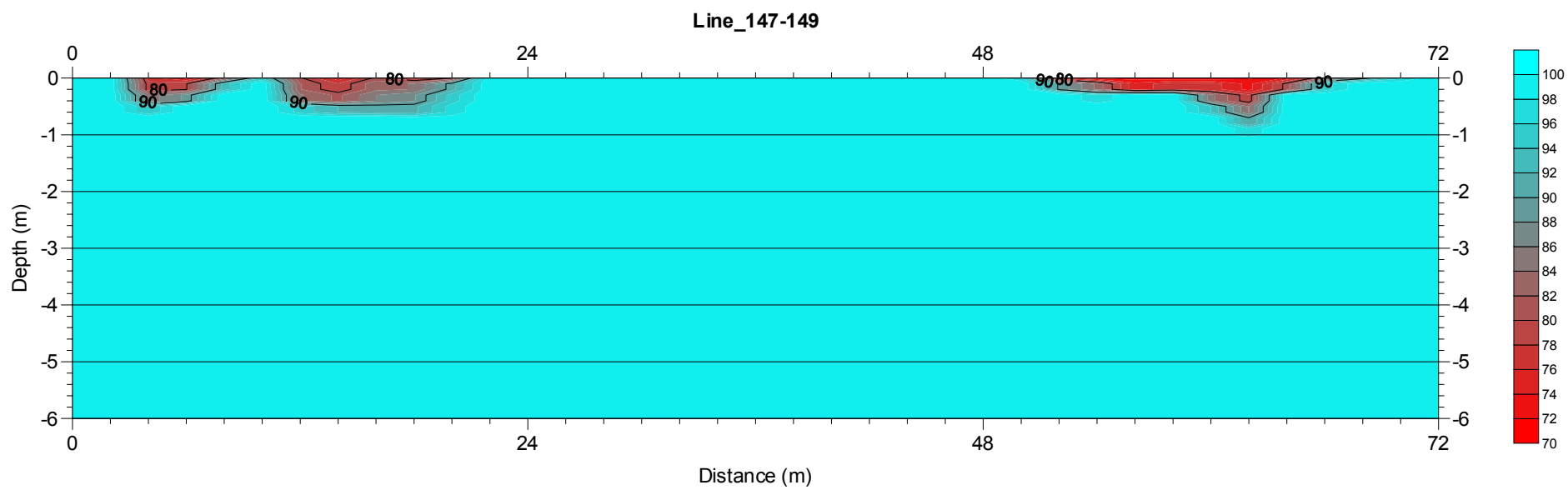
Σχήμα 5.7: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_137



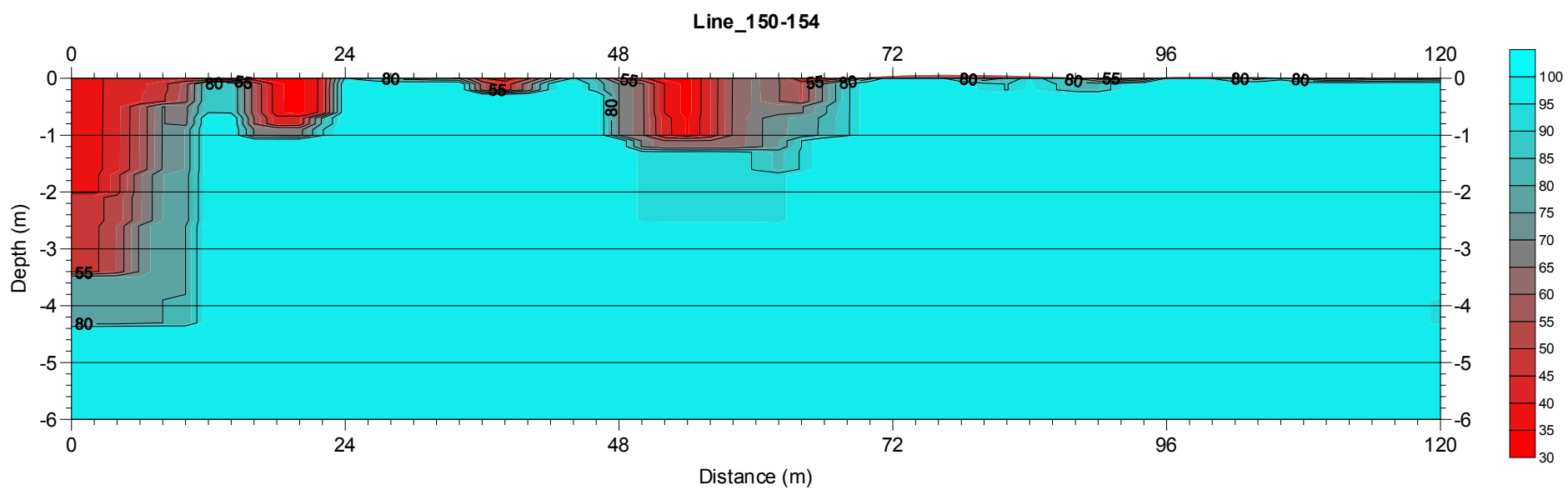
Σχήμα 5.8: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_138-141



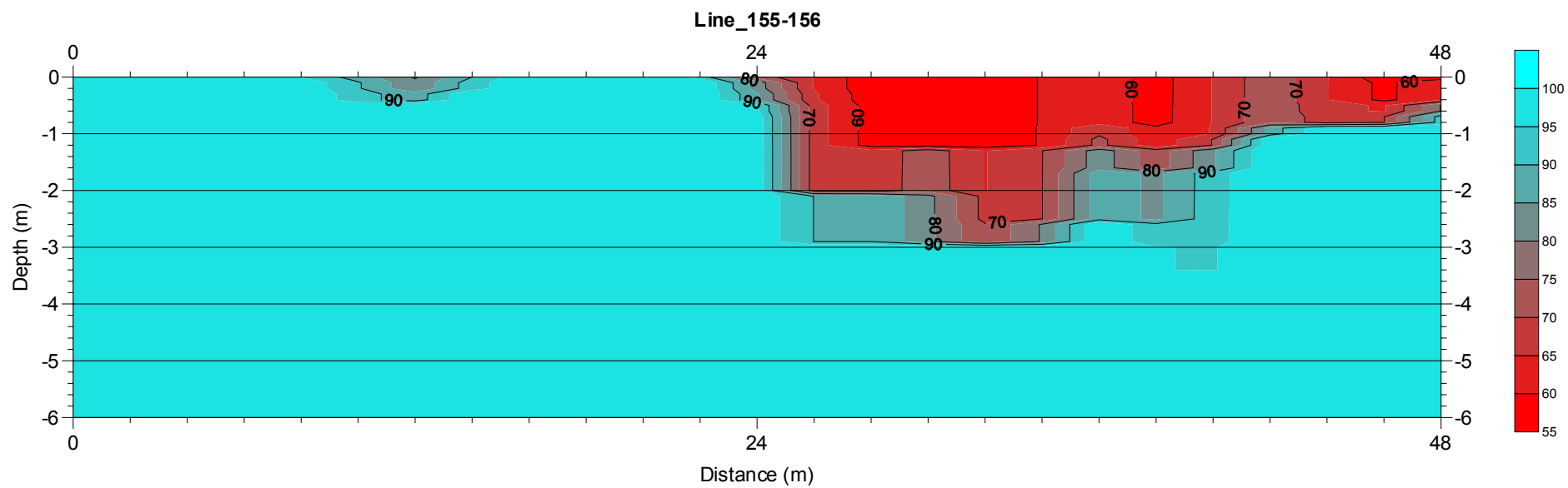
Σχήμα 5.9: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_142-145.



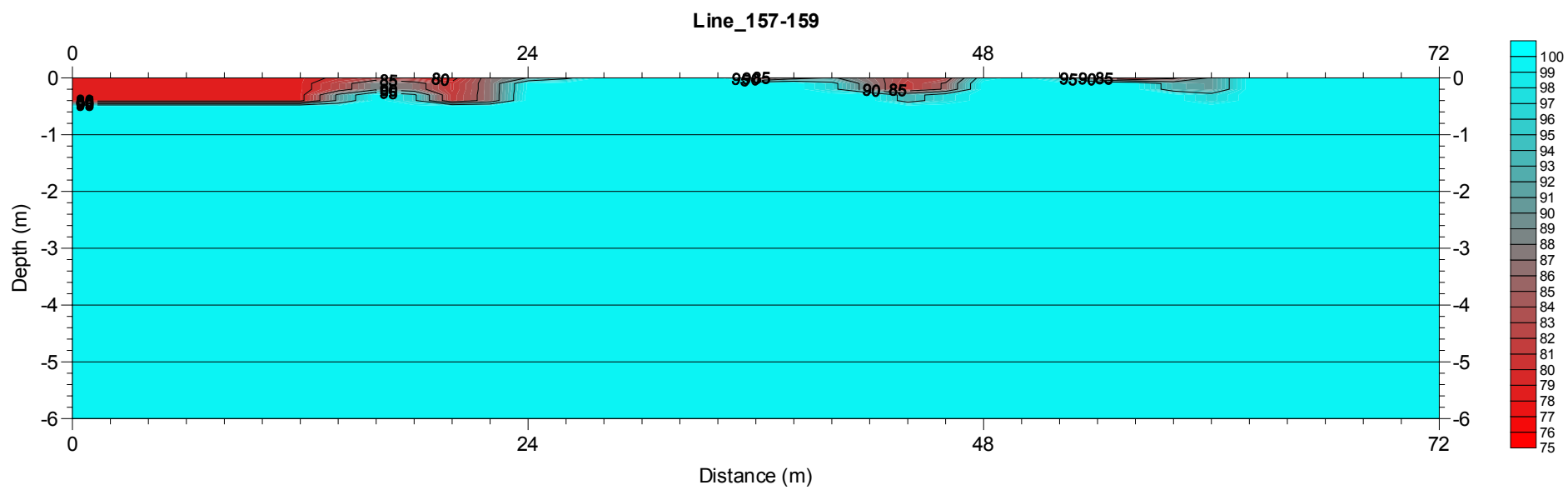
Σχήμα 5.10: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_147-149.



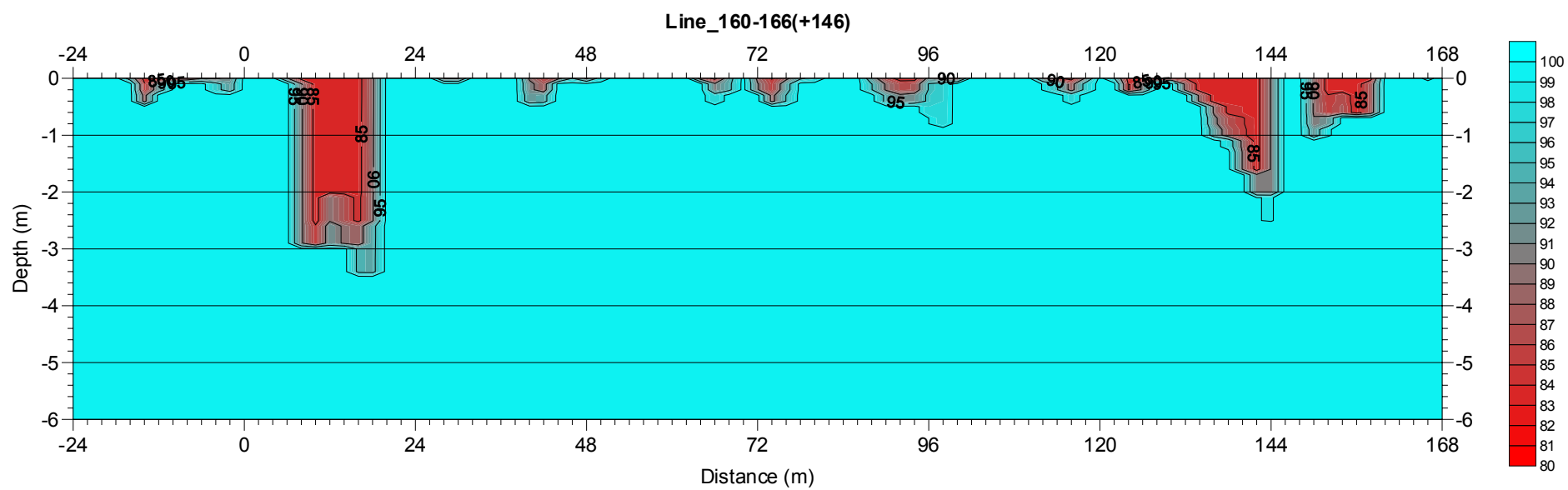
Σχήμα 5.11: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_150-154.



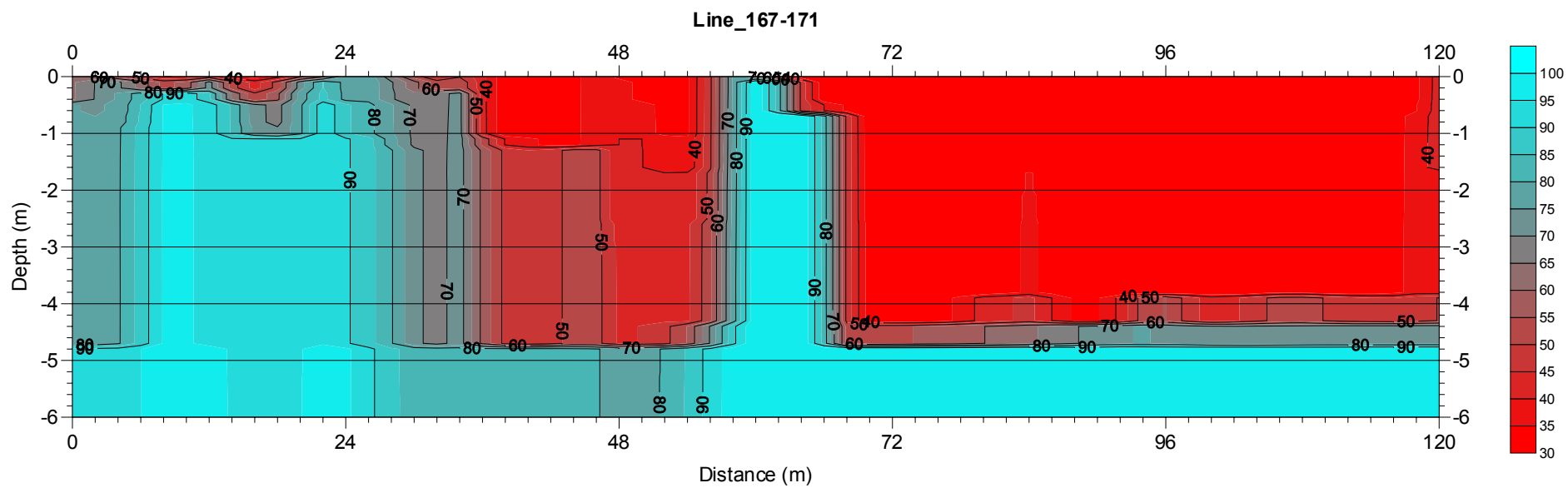
Σχήμα 5.12: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_155-156.



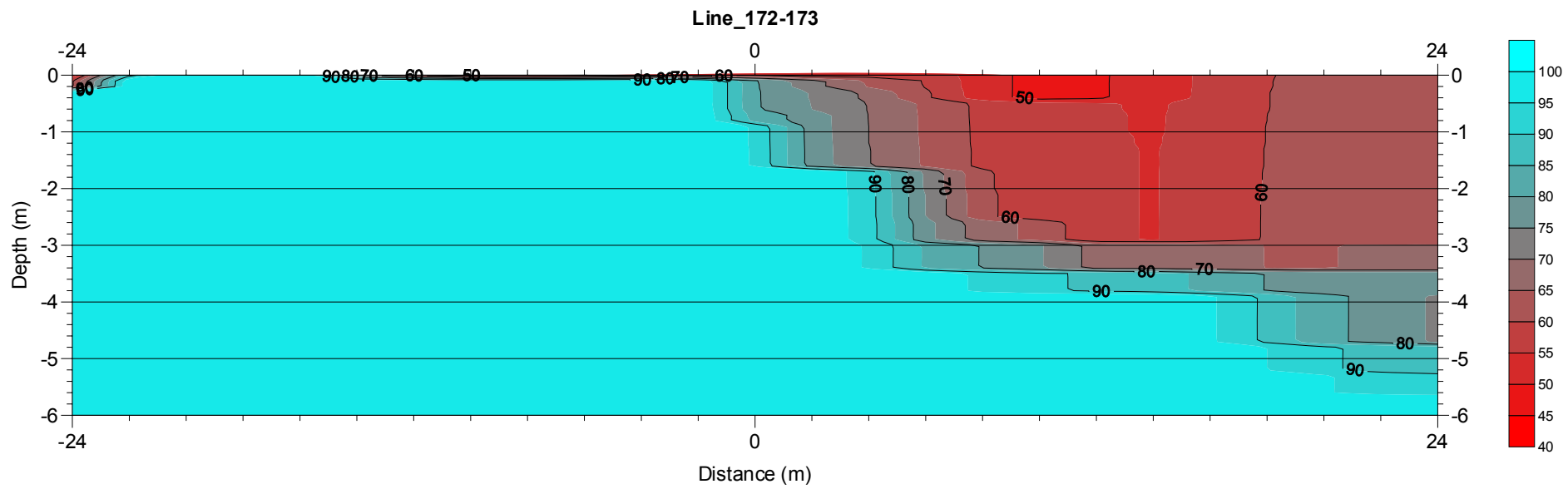
Σχήμα 5.13: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_157-159.



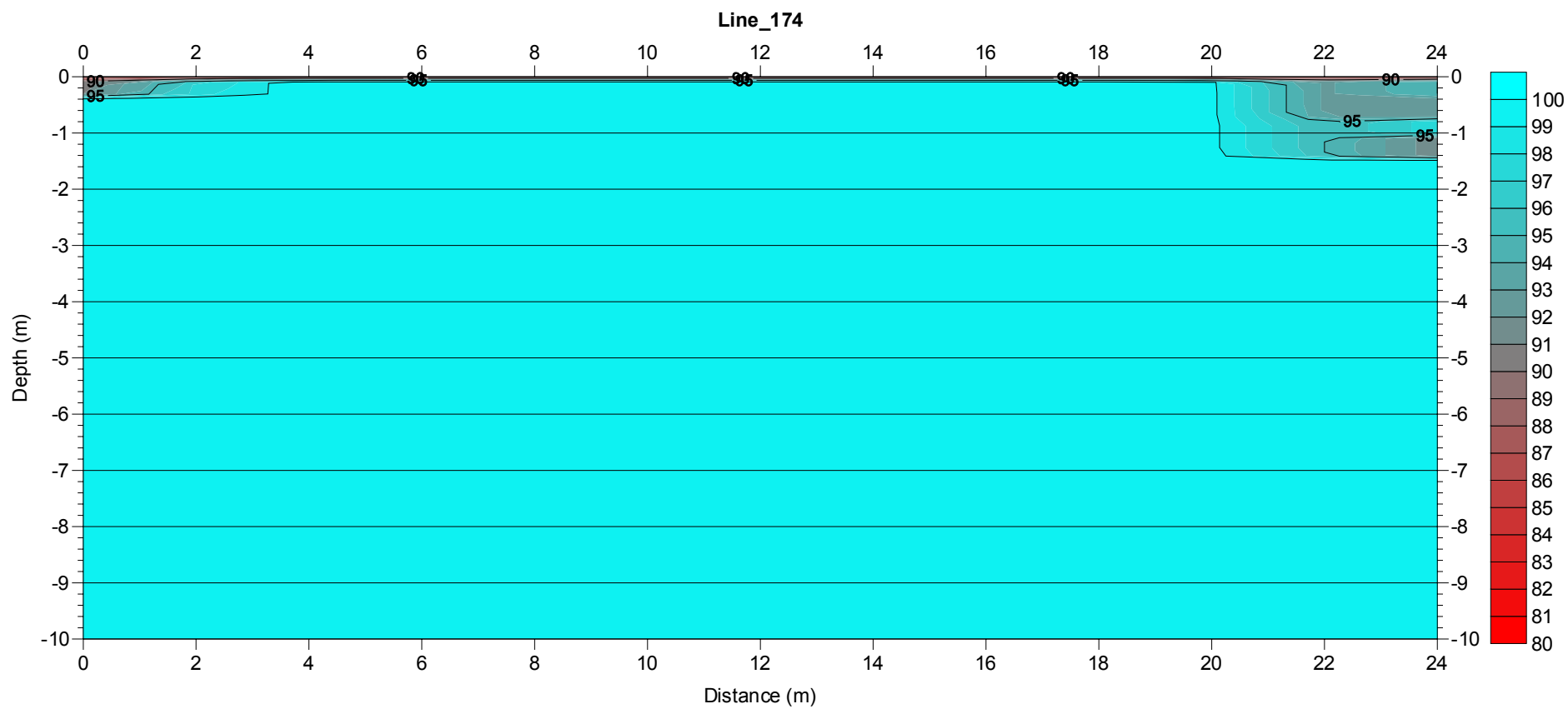
Σχήμα 5.14: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_160-166(+146).



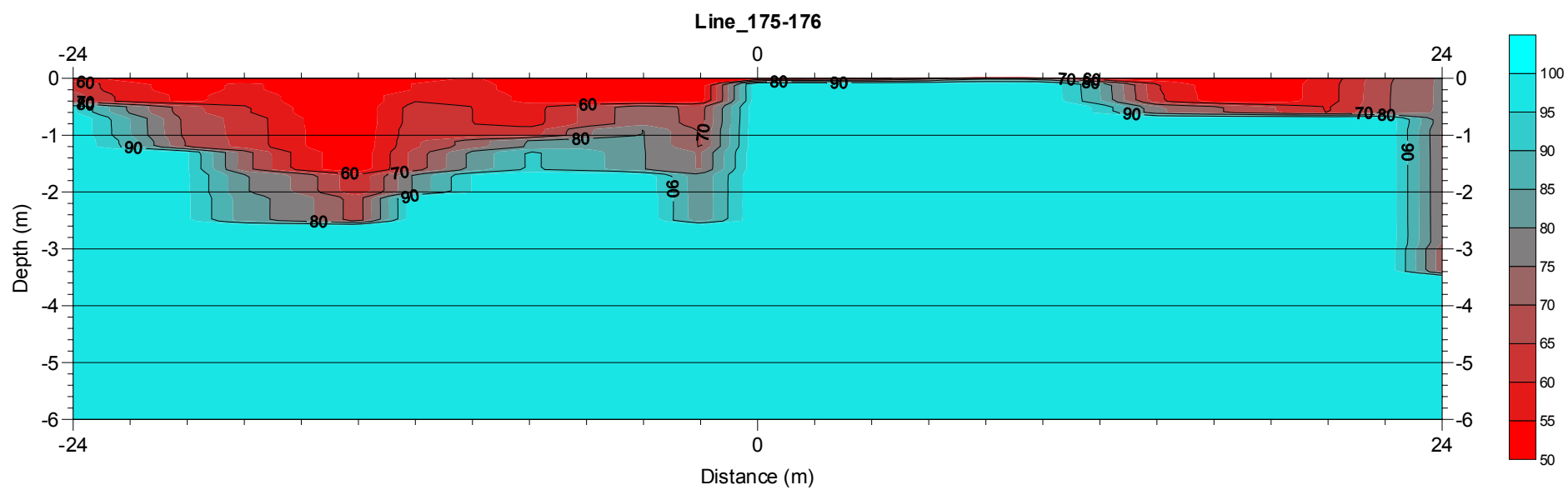
Σχήμα 5.15: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_167-171.



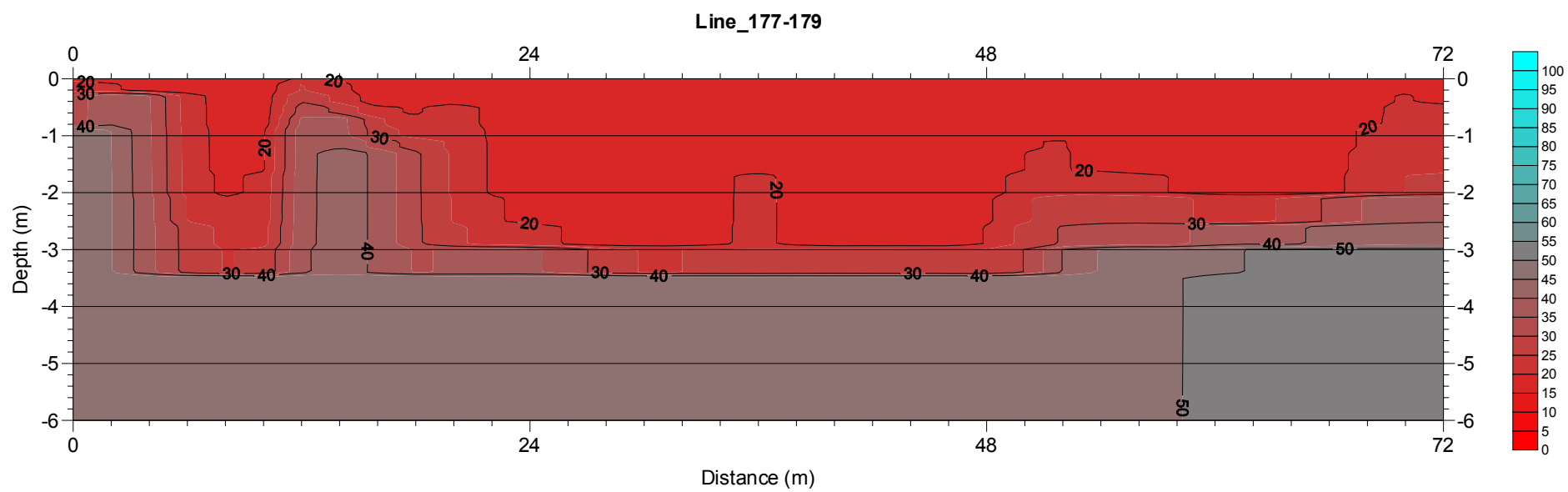
Σχήμα 5.16: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_172-173.



Σχήμα 5.17: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_174.



Σχήμα 5.18: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_175-176.



Σχήμα 5.19: Εκατοστιαία κατανομή της βραχομάζας στο υπέδαφος για την γραμμή μελέτης Line_177-179.

5.2 ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΓΕΩΪΛΙΚΩΝ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ

Με βάση τις τομές της κατανομής των βραχωδών γεωϋλικών στους επιφανειακούς σχηματισμούς, προκύπτουν τα εξής:

- Ο δολομιτικός ασβεστόλιθος εμφανίζεται από την επιφάνεια του εδάφους και στις θέσεις όπου έχει διαβρωθεί πληρώνεται από αλλουβιακές αποθέσεις.
- Ελάχιστες είναι οι θέσεις όπου εντοπίστηκαν υψηλές συγκεντρώσεις από εδαφικό κάλυμμα (αλλουβιακές αποθέσεις) με πάχος μεγαλύτερο των 2 m.
- Στις περισσότερες γραμμές μελέτης, η βραχομάζα καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος των επιφανειακών σχηματισμών με ποσοστό που πολλές φορές υπερβαίνει το 70%. Ειδικότερα, το ποσοστό του βράχου που κατανέμεται από την επιφάνεια έως και βάθος 2 m είναι:
 - (i) μικρότερο του 50 % για μήκος γραμμών μελέτης 288 m.
 - (ii) μεταξύ 50 και 90 % για μήκος γραμμών μελέτης 1032 m.
 - (iii) μεγαλύτερο του 90 % για μήκος γραμμών μελέτης 576 m.

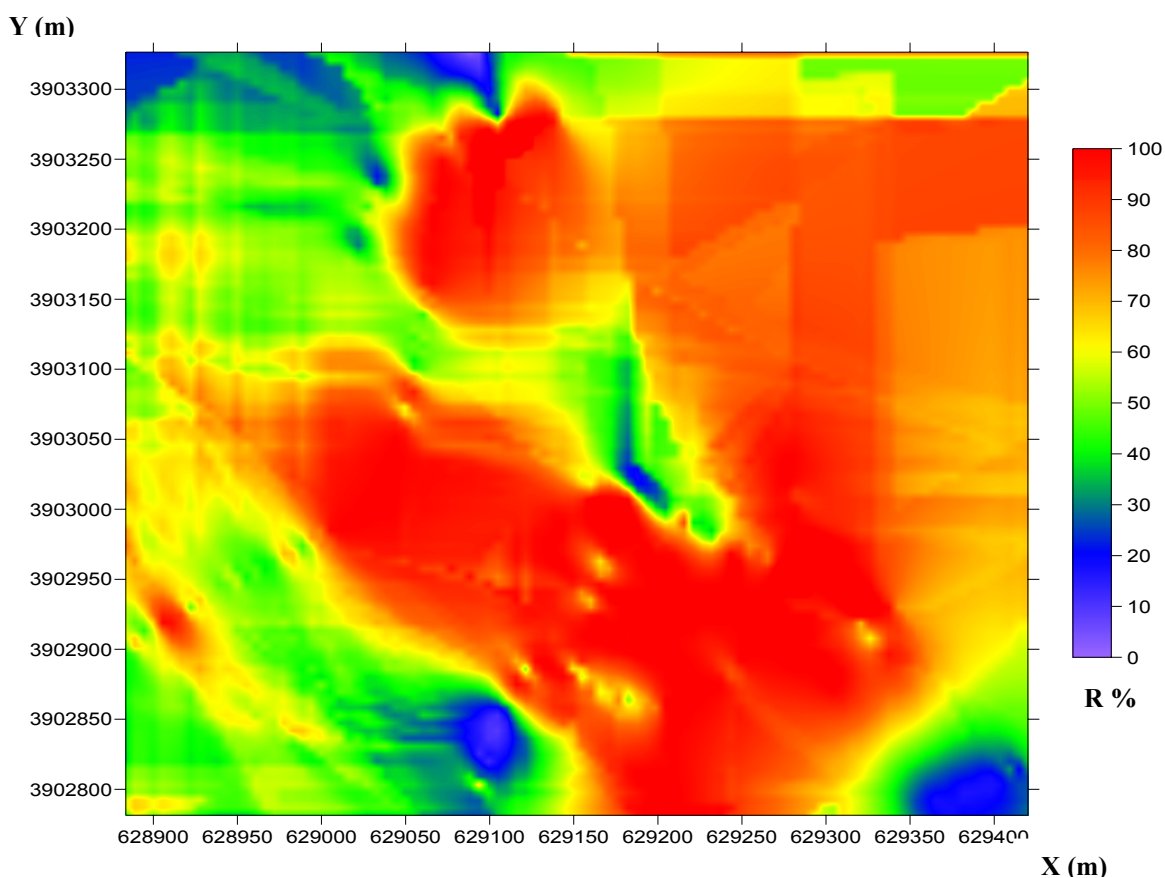
Η μέση τιμή του ποσοστού της βραχομάζας που κατανέμεται από την επιφάνεια έως και βάθος 2 m για το σύνολο των γραμμών μελέτης (1896 m) είναι 75.2 %.

Η μέση τιμή του ποσοστού της βραχομάζας που κατανέμεται από την επιφάνεια έως και βάθος 2 m για κάθε γραμμή μελέτης παρατίθεται αναλυτικά στον Πίνακα 5.1. Ακολουθεί ο χάρτης απεικόνισης (λογισμικό Surfer) του ποσοστού της βραχομάζας για το ίδιο βάθος (σχήμα 5.20).

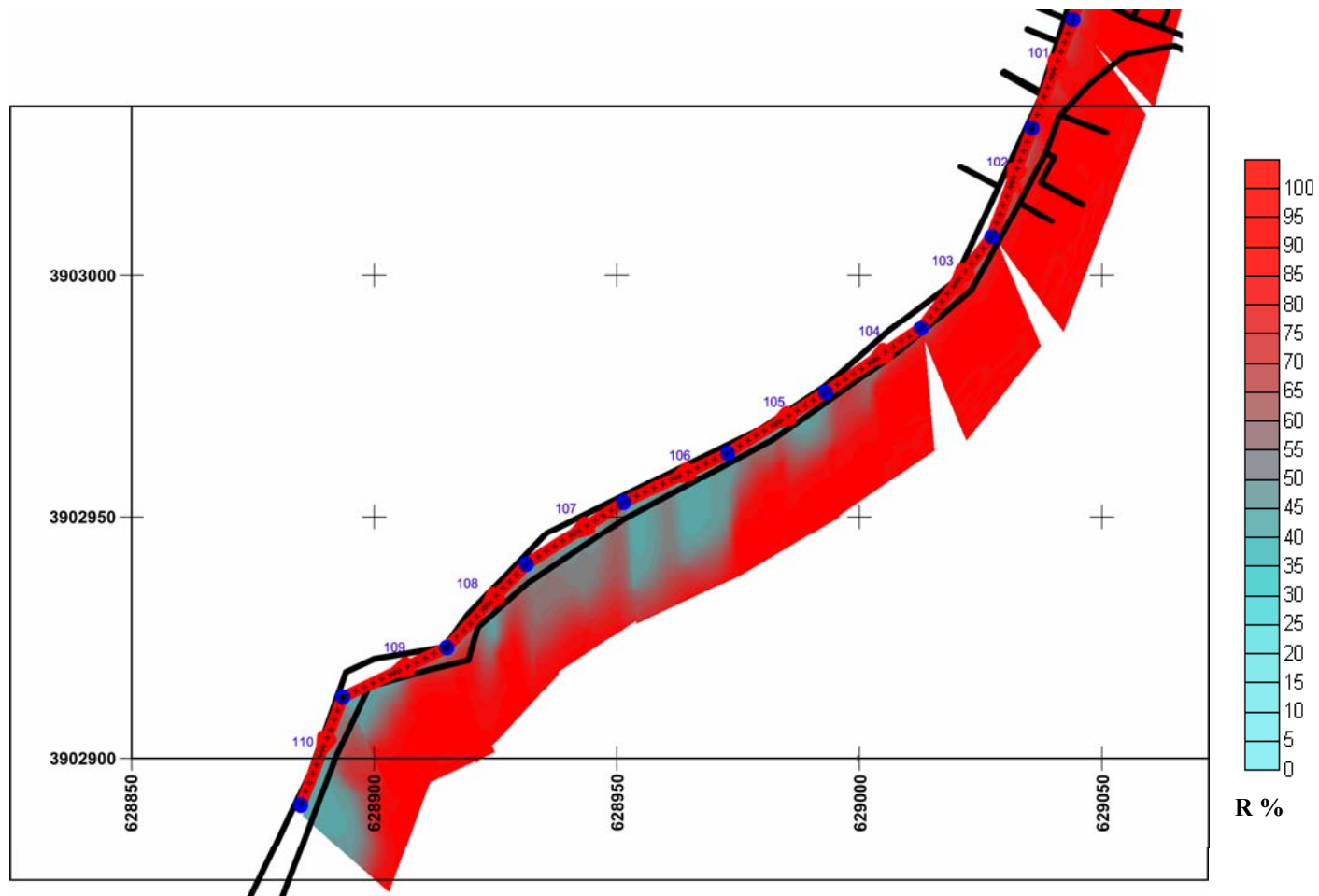
Στα Σχήματα 5.21 έως 5.24 απεικονίζονται τμηματικά τα αναπτύγματα πηγής-γεωφώνων τοποθετημένα σε τοπογραφικό χάρτη της περιοχής μελέτης, σε συνδυασμό με τις τομές κατανομής της βραχομάζας. Οι συντεταγμένες αναφέρονται στο γεωδαιτικό σύστημα ΕΓΣΑ 87'. Η χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε στις τομές των σχημάτων 5.21-5.24 είναι διαφορετική από αυτή των τομών των σχημάτων 5.1-5.19. Στις τομές 5.21-5.24, η κόκκινη περιοχή αντιστοιχεί σε μεγάλες ταχύτητες (για υπολογισμένες ταχύτητες μεγαλύτερες ή ίσες με 2000 m/sec το ποσοστό της βραχομάζας δεν υπερβαίνει το 100 %) και η γαλάζια περιοχή αντιστοιχεί σε μικρές ταχύτητες (για ταχύτητες μικρότερες ή ίσες με 550 m/sec το ποσοστό της βραχομάζας θεωρείται 0 %).

Πίνακας 5.1: Μέση τιμή του ποσοστού της βραχομάζας που κατανέμεται από την επιφάνεια έως και βάθος 2 m για κάθε γραμμή μελέτης.

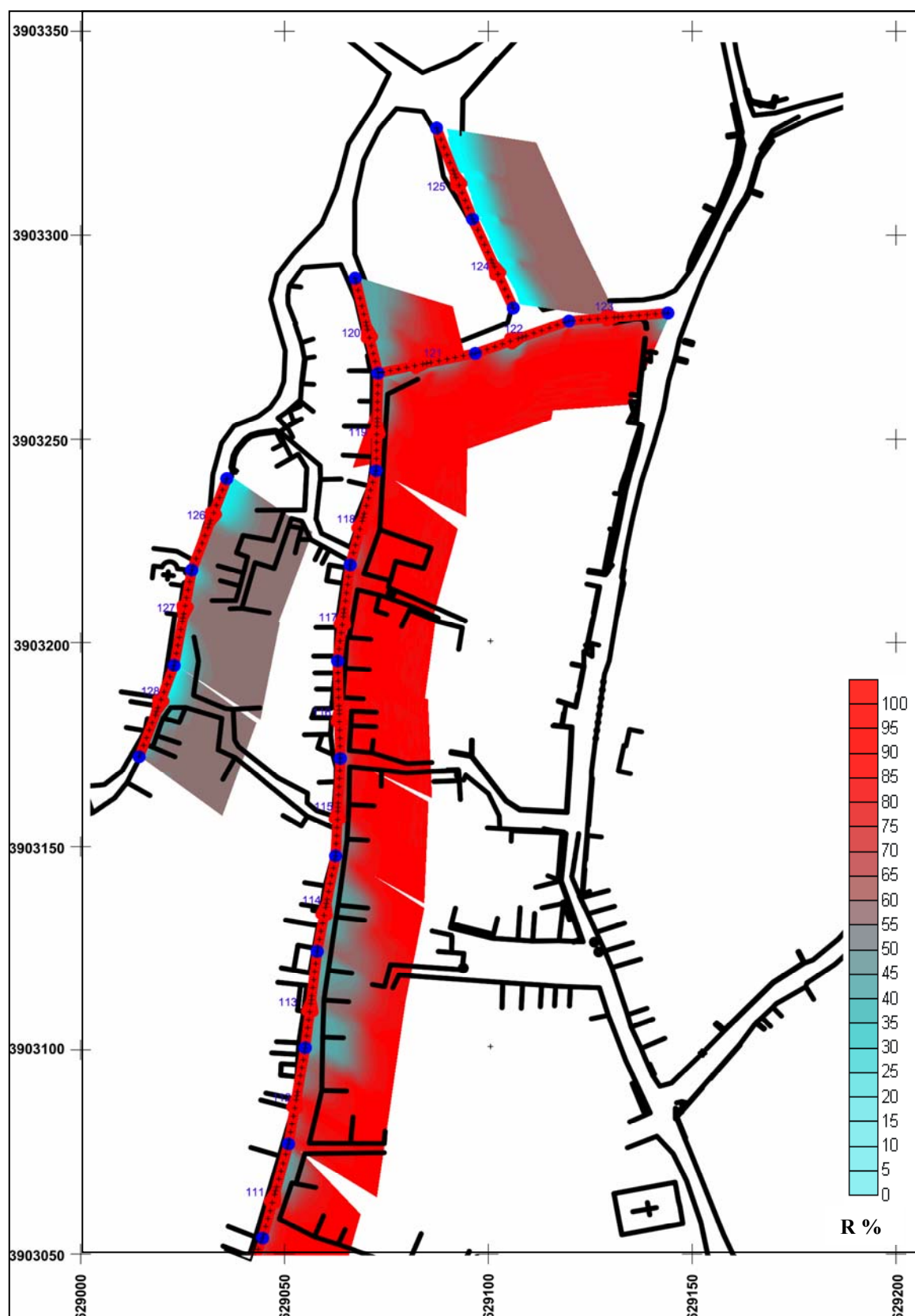
Κωδικός Σεισμικής Γραμμής	Αναπτύγματα	Μήκος Γραμμής (m)	Μέσο ποσοστό βραχομάζας (%)
Line 101-110	101 – 110	240	69,7
Line 111-120	111 – 120	240	77,5
Line 121-123	121 – 123	72	82,9
Line 124-125	124 – 125	48	16,6
Line 126-128	126 – 128	72	42,8
Line 129-136	129 – 136	192	99,4
Line 137	137	24	98,8
Line 138-141	138 – 141	96	35,3
Line 142-145	142 – 145	96	81,4
Line 147-149	147 – 149	72	97,8
Line 150-154	150 – 154	120	86,6
Line 155-156	155 – 156	48	85,9
Line 157-159	157 – 159	72	97,6
Line 160-166(+146)	146 + 160 – 166	192	97,4
Line 167-171	167 – 171	120	51,2
Line 172-173	172 – 173	48	78,9
Line 174	174	24	97,6
Line 175-176	175 – 176	48	79,7
Line 177-179	177 – 179	72	21,2



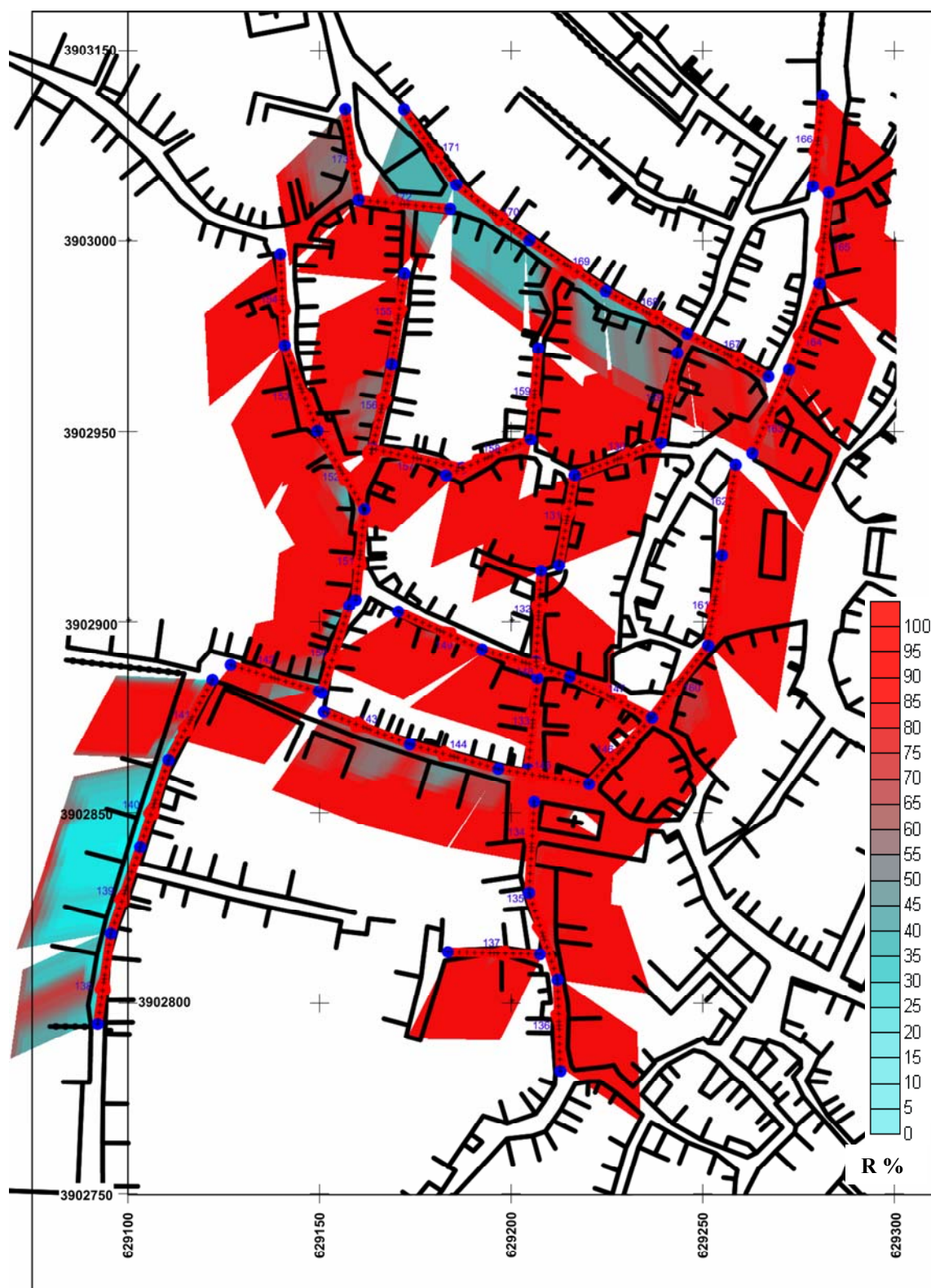
Σχήμα 5.20: Χάρτης απεικόνισης του ποσοστού βραχομάζας για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-179 για τη ζώνη βάθους 0-2 m. Μήκος συσχέτισης: 96,8 m.



Σχήμα 5.21: Απεικόνιση των αναπτυγμάτων πηγής-γεωφώνων 101-110 και των τομών κατανομής βραχομάζας (τρίτη διάσταση υπό κλίμακα 1:250).



Σχήμα 5.22: Απεικόνιση των αναπτυγμάτων πηγής-γεωφώνων 111-120, 121-123, 124-125, 126-128 και των τομών κατανομής βραχομάζας (τρίτη διάσταση υπό κλίμακα 1:250).



Σχήμα 5.23: Απεικόνιση των αναπτυγμάτων πηγής-γεωφώνων 129-136, 137, 138-141, 142-145, 147-149, 150-154, 155-156, 157-159, 160-166(+146), 167-171, 172-173 και των τομών κατανομής βραχομάζας (τρίτη διάσταση υπό κλίμακα 1:250).



Σχήμα 5.24: Απεικόνιση των αναπτυγμάτων πηγής-γεωφώνων 174, 175-176, 177-179 και των τομών κατανομής βραχομάζας (τρίτη διάσταση υπό κλίμακα 1:250).

5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η μεθοδολογία προσδιορισμού της επιδεκτικότητας ενός πετρώματος σε εξόρυξη, με χρήση μηχανοκίνητου άροτρου (riprability) με βάση τις ταχύτητες διάδοσης των P-κυμάτων, είναι αρκετά διαδεδομένη.

Χαρακτηριστικά, η Caterpillar, αλλά και άλλες εταιρείες κατασκευής χωματουργικών μηχανημάτων, έχει εκδώσει πίνακες (Caterpillar, 1981) με τους οποίους ένα γεωυλικό χαρακτηρίζεται εύκολα ή δύσκολα εξορύξιμο με την χρήση μηχανοκίνητου άροτρου, ανάλογα με την ταχύτητα με την οποία διαδίδονται τα P-κύματα διαμέσου του γεωυλικού αυτού.

Επίσης εκτενέστερες μελέτες, που έχουν δημοσιευτεί σε επιστημονικά περιοδικά, σχετίζουν την επιδεκτικότητα σε εξόρυξη με χρήση μηχανοκίνητου άροτρου, πλήθους πετρωμάτων όχι μόνο με την ταχύτητα διάδοσης των P-κυμάτων, αλλά και με άλλες γεωτεχνικές παραμέτρους (όπως την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας κ.α.) (MacGregor, et al 1994).

Ειδικότερα, οι MacGregor et al (1994), σχετίζουν την επιδεκτικότητα σε εξόρυξη με χρήση μηχανοκίνητου άροτρου με την παραγωγικότητα (σε m^3/hr) και αναφέρουν ότι πετρώματα με ταχύτητες μεγαλύτερες από 2000 m/sec παρουσιάζουν δυσκολία στην εξόρυξη με χρήση μηχανοκίνητου άροτρου ή/και απαιτούν εκρηκτικά, και έχουν μικρή έως πολύ μικρή παραγωγικότητα.

Όταν η σεισμική ταχύτητα δεν είναι διαθέσιμη, τότε χρησιμοποιούνται νομογράμματα που βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα και σχετίζουν την ταχύτητα με παραμέτρους που μπορούν εύκολα να καθοριστούν. Μετά την εκτίμηση της ταχύτητας, επιλέγεται ένα πεδίο τιμών που βρίσκεται ανάμεσα στο 80 % και στο 125 % της εκτίμησης.

Ακόμη, έχουν προταθεί μέθοδοι βαθμονόμησης και συστήματα ταξινόμησης που αποτελούν τη βάση για την επιλογή της μεθόδου εξόρυξης και των μηχανημάτων, και οδηγούν σε συμπεράσματα για την αναγκαιότητα ή όχι, χρήσης εκρηκτικών. Σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης που προτάθηκε από τον Weaver (1975), ένα γεωυλικό χαρακτηρίζεται δύσκολα εξορύξιμο όταν η σεισμική ταχύτητα λαμβάνει την τιμή των 2150 m/sec, ενώ για την ίδια περίπτωση, οι Singh et al. (1987), εκτιμούν ότι η τιμή της ταχύτητας είναι 2500 m/sec.

Ορισμένα κριτήρια για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου, είναι τα εξής (Koczanowski et al, 1991):

- Εκτιμήσεις που βασίζονται μόνο στη σεισμική ταχύτητα, δεν είναι αξιόπιστες.
- Καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν, όταν συνδυάζονται οι γεωλογικές παράμετροι με τη σεισμική ταχύτητα.
- Οι πίνακες της εταιρείας Caterpillar (1989), αξιολογούν τα δεδομένα με μικρότερη αυστηρότητα από την απαιτούμενη. Προτείνεται η χρήση μηχανήματος που αντιστοιχεί στην αμέσως πιο δύσκολη περίπτωση.
- Η μέθοδος Weaver (1975) θεωρείται ότι παράγει καλές εκτιμήσεις.
- Η μέθοδος Minty και Kearns (1983), είναι αρκετά αυστηρή και δεν καταλήγει στη σωστή επιλογή μηχανήματος.
- Η μέθοδος Pells (1985) παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα, όταν χρησιμοποιείται για ψαμμίτη.

Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές (MacGregor et al, 1994), ενδείκνυται η μεθοδολογία που συνδυάζει τις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν ένα πέτρωμα και τα στοιχεία εξόρυξης. Βασική προϋπόθεση για το σωστό σχεδιασμό της εξόρυξης, είναι η έρευνα της περιοχής και η συλλογή αντιπροσωπευτικών δειγμάτων, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν σε εργαστηριακές δοκιμές.

Η έρευνα περιλαμβάνει: α) συλλογή γεωφυσικών, γεωλογικών δεδομένων και δεδομένων εξόρυξης από διάφορες τοποθεσίες για τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων πληροφοριών, β) ανάλυση της βάσης δεδομένων για τον προσδιορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν τη διαδικασία εξόρυξης και γ) εργαστηριακές δοκιμές για τον καθορισμό της σχέσης μεταξύ της αντοχής του πετρώματος και της εξόρυξης.

Μετά τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν τους σχηματισμούς της περιοχής, ακολουθεί η χρήση των συστημάτων ταξινόμησης και των διαγραμμάτων, με τα οποία σχετίζονται τα χαρακτηριστικά του πετρώματος (φυσικά, γεωλογικά και μηχανικά), με την ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων. Τα πετρώματα κατατάσσονται σε κατηγορίες, κάθε μια από τις οποίες αντιστοιχεί σε ένα τύπο μηχανήματος. Με αυτό τον τρόπο, επιλέγεται ο εξοπλισμός της εξόρυξης σύμφωνα με δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί στο πεδίο.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

► Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Atkinson, T., (1971), Selection of open-pit excavating and loading equipment. Trans. Ins. of Mining and Metallurgy. Vol. 80: A101-129.
2. Bailey, A.D., (1975), Rock types and seismic velocity versus rippability. Highway Geol. Symp. Proc. , 26: 135-142.
3. Bieniawski, Z. T., (1976), Rock mass classification in rock engineering, In: Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, Balkema, Rotterdam, Volume 1, 97-106.
4. Caterpillar Tractor Company, (1982), Caterpillar Performance Handbook, Edition 13, Section 1-10, Peoria, Illinois, October.
5. Caterpillar Tractor Company, (1983), Handbok of Ripping, 7th Edition, Peoria, Illinois, U.S.A.
6. Caterpillar Tractor Company, (1988), Handbook of Ripping, 8th Edition, December.
7. Caterpillar Tractor Company, (1989), Performance Handbook, 14th Edition, October.
8. Caterpillar Performance Handbook, (1986), Caterpillar Inc., 17th Edition, Peoria, Illinois, U.S.A.
9. Chevassu, G., (1978), Provision by seismic refrarction of the weathering distribution and the earth moving methods in granite sites (in French), International Congress of the International Association of Engineering Geologists, Section 4, Vol. 1, September.
10. Church, H. K., (1981), Excavation Handbook, McGraw Hill Inc., U.S.A.
11. Franklin, J. A., (1970), Observations and tests for engineering description and mapping of rocks, Second International Congress on Rock Mechanics, ISRM, Belgrade, September 11-16.
12. Franklin, J. A., Broch, E., and Walton, G., (1971), Logging the mechanical character of rock, Trans. Inst. of Mining and Metallurgy, Vol. 80: A1-9.
13. Hadjigeorgiou, J., and Scoble, M. J., (1990), Ground characterization for assessment of ease of excavation, In: Singhal, R. K., and Vavra, M., (eds),

- Proceedings of the 4th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Calgary, Balkema, Rotterdam, 323-331.
14. Karpuz, C., (1990), A classification System for excavation of surface coal measure rock, Mining Science and Technology.
 15. Karpuz, C., Pasamehmetoglu, A. G., Bozdog, T. and Muftuoglu, Y., (1990), "Rippability assessment in surface coalmining", 2nd International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Calgary, 7-9 November, p. 315-322. Publ. Rotterdam, A. A. Balkema.
 16. Kirsten, H. A. D., (1982), A classification system for excavation in natural materials, The Civil Engineer in South Africa, 24, July, 293-308.
 17. Kirsten, H. A. D., (1983), Efficient use on construction of tractor mounted rippers, The Civil Engineer in South Africa, May Issue.
 18. Koczanowski, M., Mostyn, G. and MacGregor, F., (1991), "An expert system for rock rippability assessment", 7th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Aachen, 16-20 September, Vol. 1, p. 275-279. Publ. Rotterdam, A. A. Balkema.
 19. Komatsu Ltd., (1982), Specifications and Application Handbook, 6th Edition, Akasaka, Minato-Ku, Tokyo, Japan.
 20. MacGregor, F., Fell, R., Mostyn, G. R., Hocking, G. and McNally, G., (1994), "The estimation of rock rippability", Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 27, p. 123-144.
 21. McCann, D.M. and Fenning, P. J., (1995), "Estimation of rippability and excavation conditions from seismic velocity measurements", Geological Society of London, Engineering Special Publication, Vol. 10, p. 335-343.
 22. Minty, E. J., and Kearns, G. K., (1983), Rock mass workability, Collected Case Studies in Engineering Geology, Hydrogeology, Environmental Geology, (Eds Knight, M. J., Minty, E. J., and Smith, R. B.), p.59-81.
 23. Muftuoglu, Y. V., (1983), A study of factors affecting diggability in British Surface Coal Mines. Ph.D. Thesis, University of Nottingham, England.
 24. Pells, P. J. N., (1985), Engineering properties of the Hawkesbury Sandstone, Chapter 4 of Engineering Geology of the Sydney Region, (Ed. Pells, P. J. N.), p.179-197.
 25. Reynolds, M. J., (1997), An introduction to applied and environmental geophysics, John Wiley & Sons Ltd, Chichester.

26. Scoble, M. J., and Muftuoglu, Y. V., (1984), Derivation of a diggability index for surface mine equipment selection, Mining Science and Technology, 1, 305-322.
27. SeisImager, (2003), Εγχειρίδιο Χρήσης Λογισμικού, Manual, Version 3.0, OYO Corporation.
28. Singh, R. N., Denby, B., and Egretli, I., (1987), Development of a new rippability index for coal measures excavations, Proc. 28th US Sym. on Rock Mech., Tucson: 935-943.
29. Smith, H. J., (1986), Estimating rippability of rock mass classification, Proc. 27th US Sym. on Rock Mech. University of Alabama: 443-448.
30. Surfer, Εγχειρίδιο Χρήσης Λογισμικού, (ηλεκτρονική μορφή), Version 8.0, Golden Software, Inc.
31. Weaver, J. M., (1975), Geological Factors Significant in the assessment of rippability, Civil Engineering in South Africa, Vol. 17: 313-316.

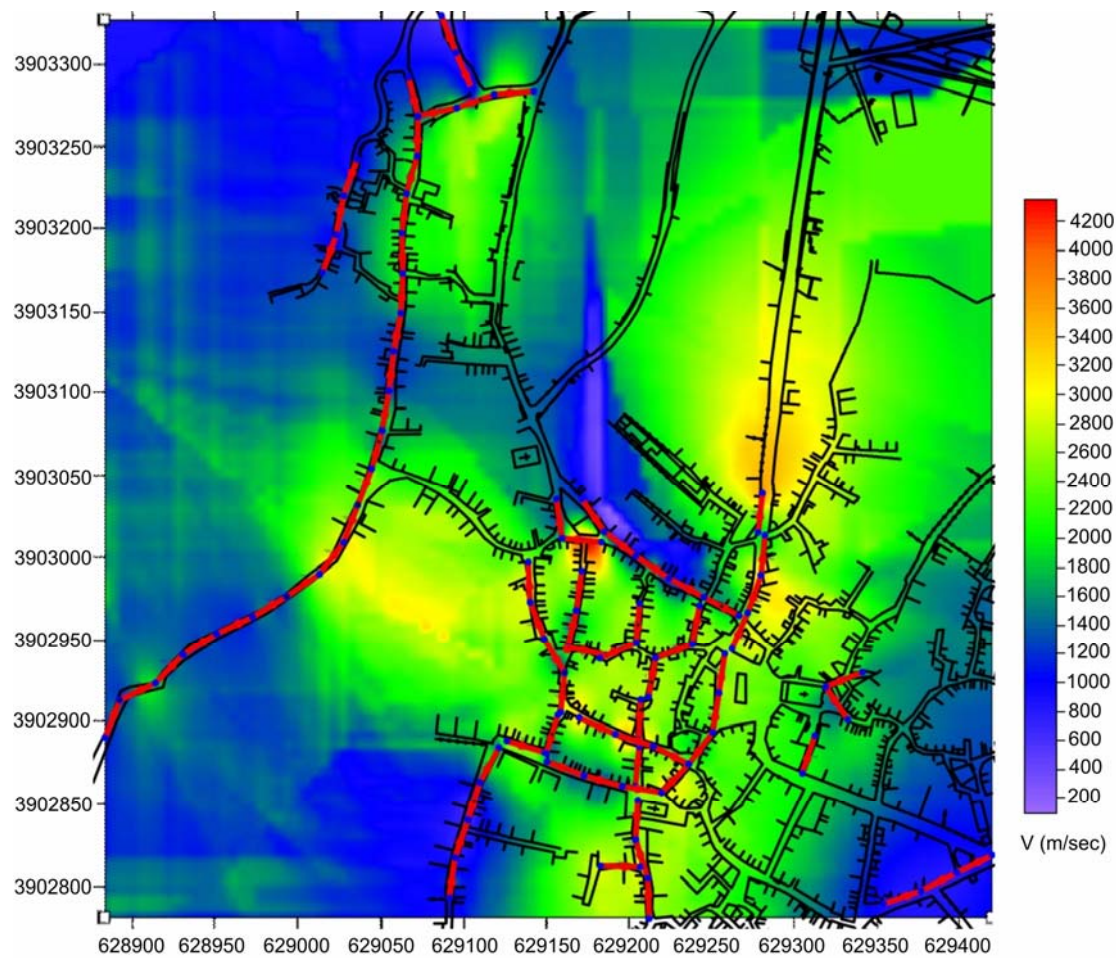
▶ Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αγιουτάντης, Ζ.Γ., (2002), Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδοτικός Όμιλος Ίων, Αθήνα.
2. Βαφειδης, Α., (1993), Εφαρμοσμένη Γεωφυσική – 1: Σεισμικές Μέθοδοι, Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
3. Βαφειδης, Α., (2005), Γεωφυσική Διασκόπηση για την Εκτίμηση Σεισμικής Ταχύτητας Επιφανειακών Σχηματισμών σε Περιοχή του Μοχού Ηρακλείου, Έκθεση Γεωφυσικής Έρευνας, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής.
4. Πουλιούδης, Γ., (1999), Γεωφυσική Διασκόπηση στον Αρχαιολογικό Χώρο της Ιτάνου με τη Μέθοδο του Υπεδάφειου Ραντάρ, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής.
5. Καπαγερίδης Ι.Κ., (2006), Εισαγωγή στη Γεωστατιστική, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.
6. Χριστόπουλος Δ.Θ., (2003), Εισαγωγή στην Έρευνα Κοιτασμάτων, Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

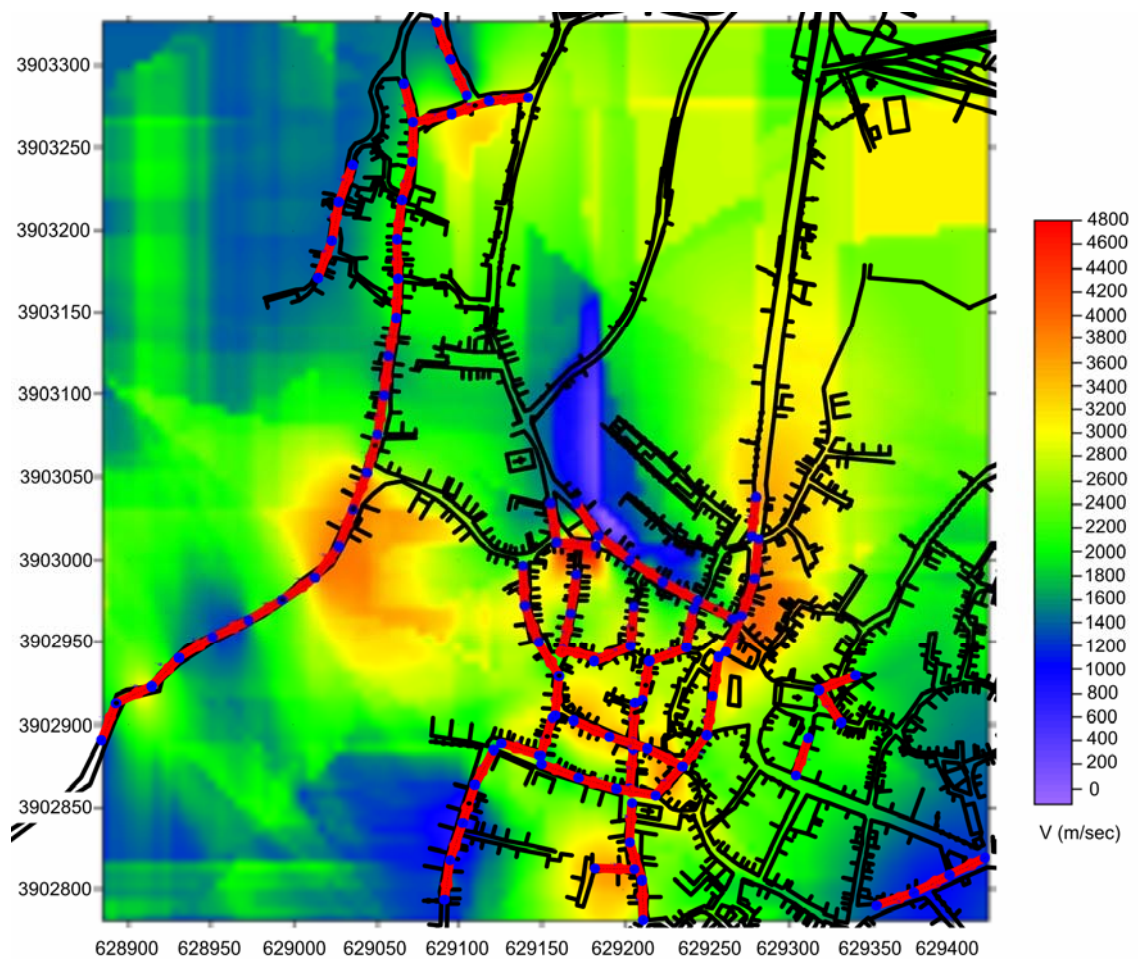
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΧΑΡΤΕΣ

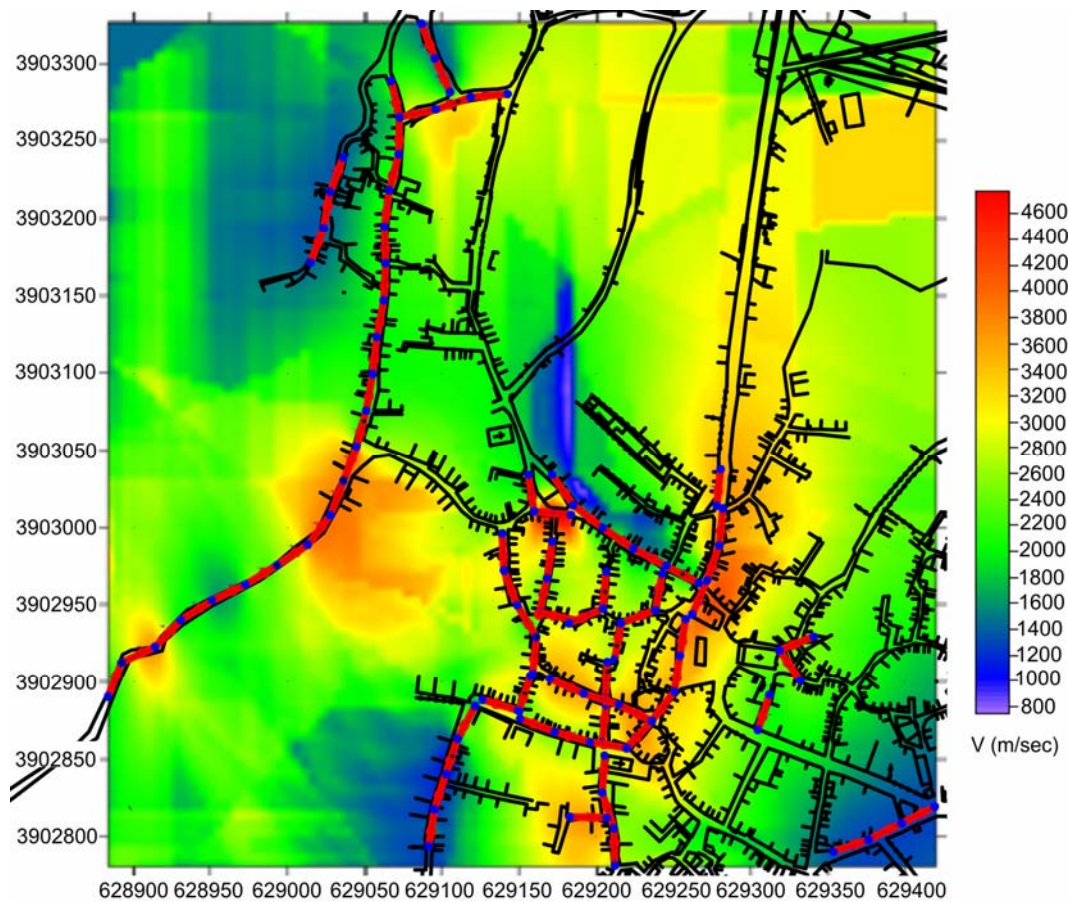
LINES_101-179



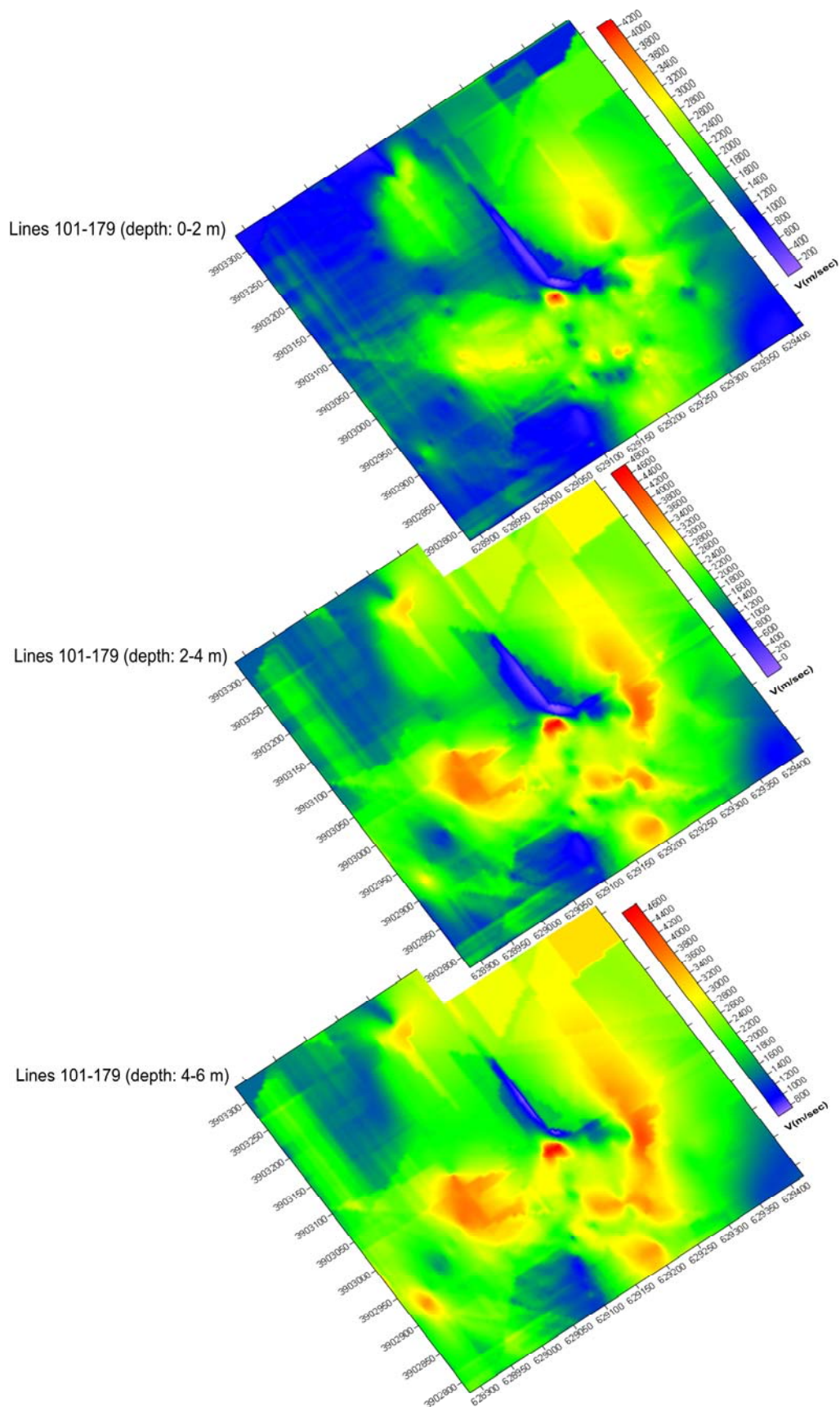
Σχήμα 1: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-179 για τη ζώνη βάθους 0-2 m, συνδυασμένος με την τοπογραφία της περιοχής μελέτης (ΕΓΣΑ '87). Μήκος συσχέτισης: 215,6 m.



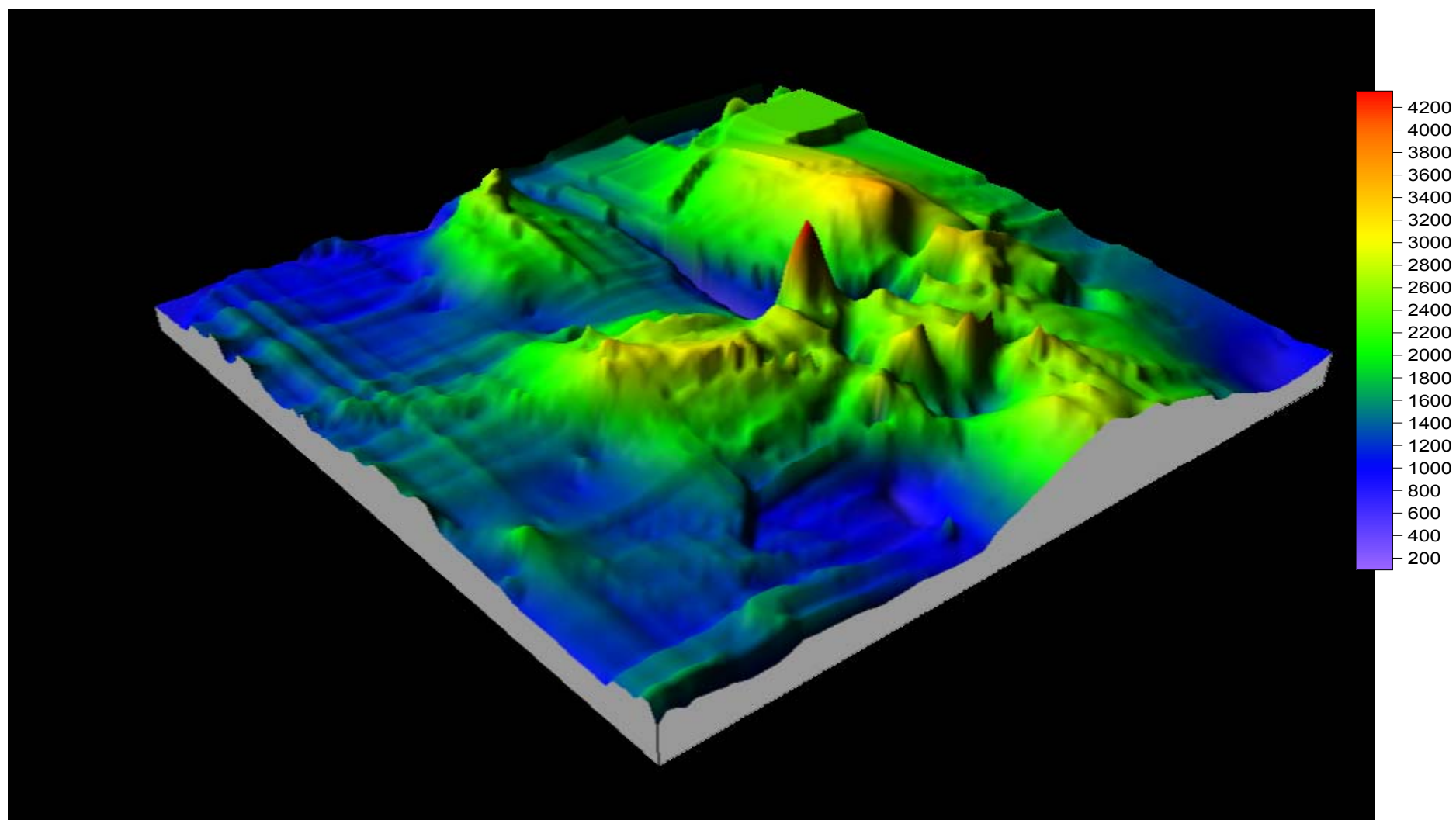
Σχήμα 2: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-179 για τη ζώνη βάθους 2-4 m, συνδυασμένος με την τοπογραφία της περιοχής μελέτης (ΕΓΣΑ 87). Μήκος συσχέτισης: 187,8 m.



Σχήμα 3: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-179 για τη ζώνη βάθους 4-6 m, συνδυασμένος με την τοπογραφία της περιοχής μελέτης (ΕΓΣΑ 87). Μήκος συσχέτισης: 225,9 m.

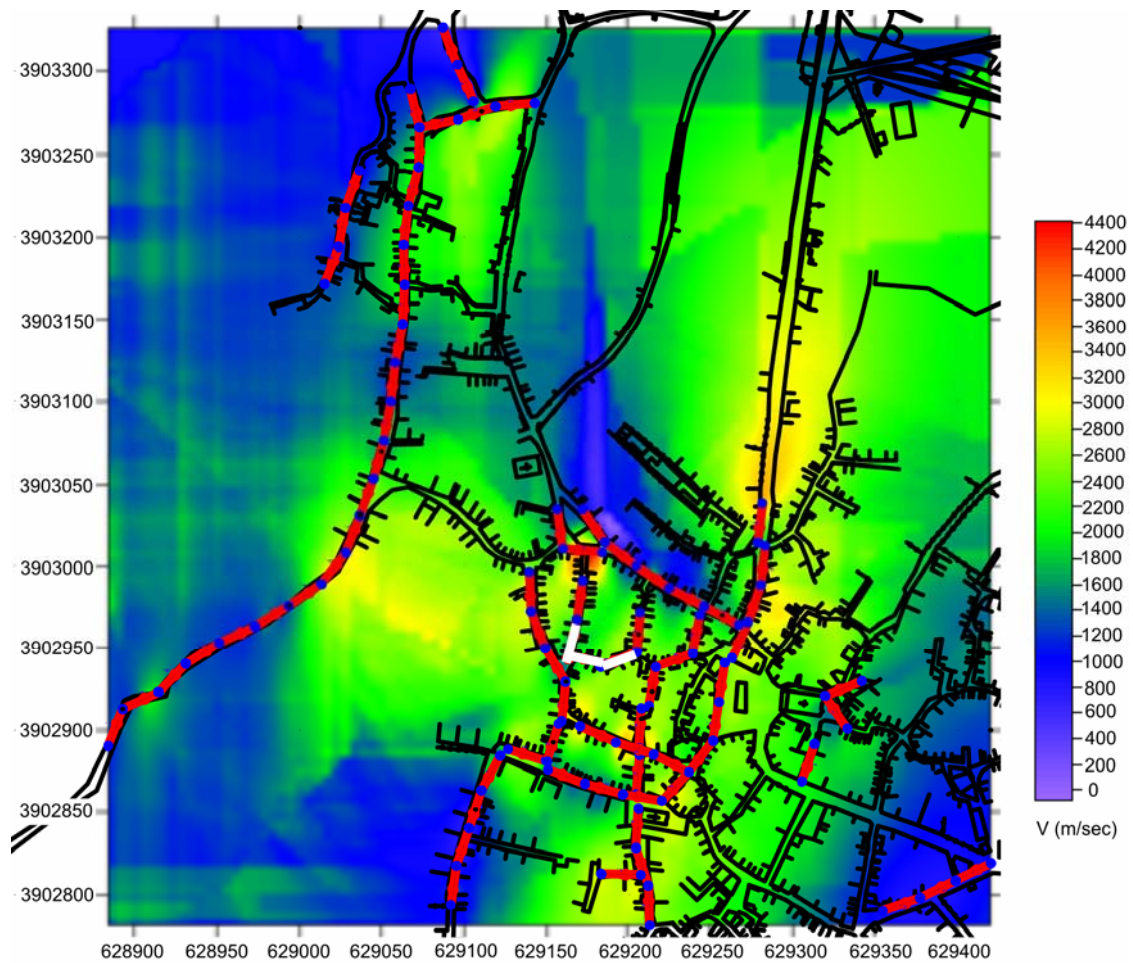


Σχήμα 4: Συγκεντρωτική απεικόνιση της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-179.

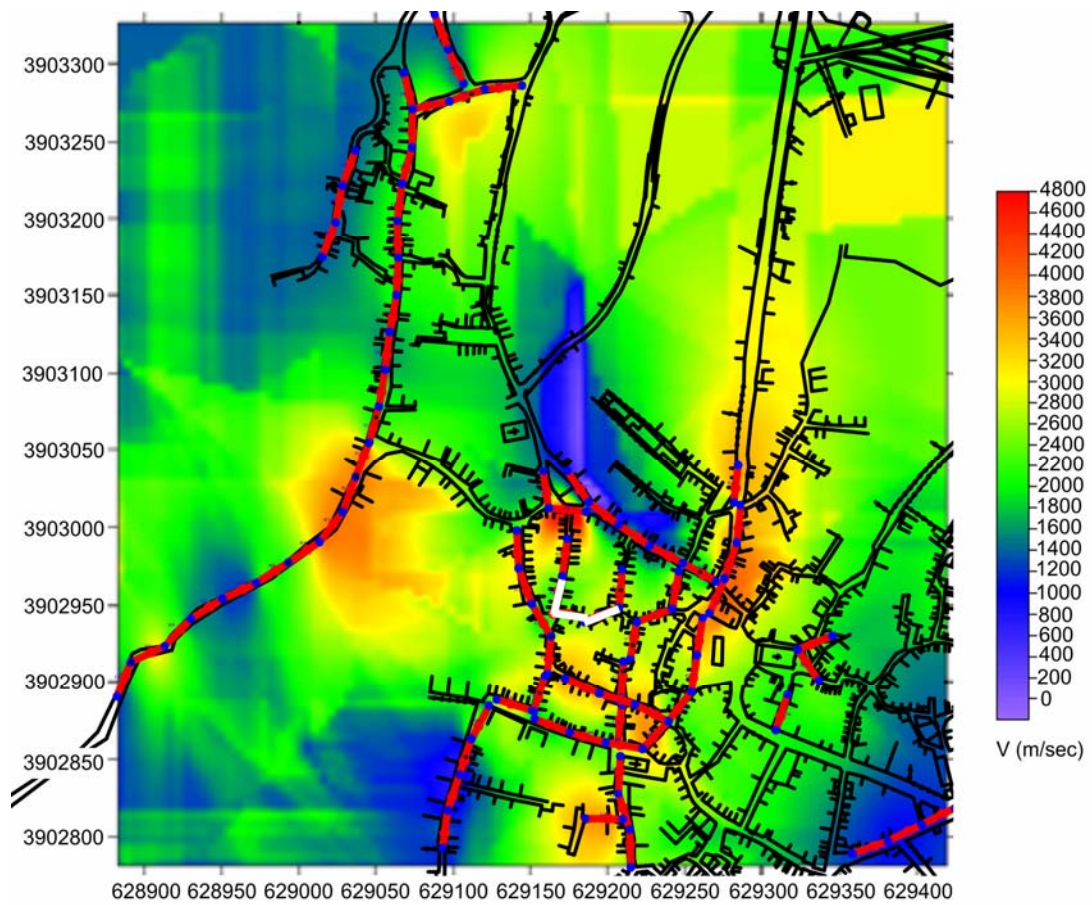


Σχήμα 5: Τρισδιάστατη απεικόνιση της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-179, για τη ζώνη βάθους 0-2 m.

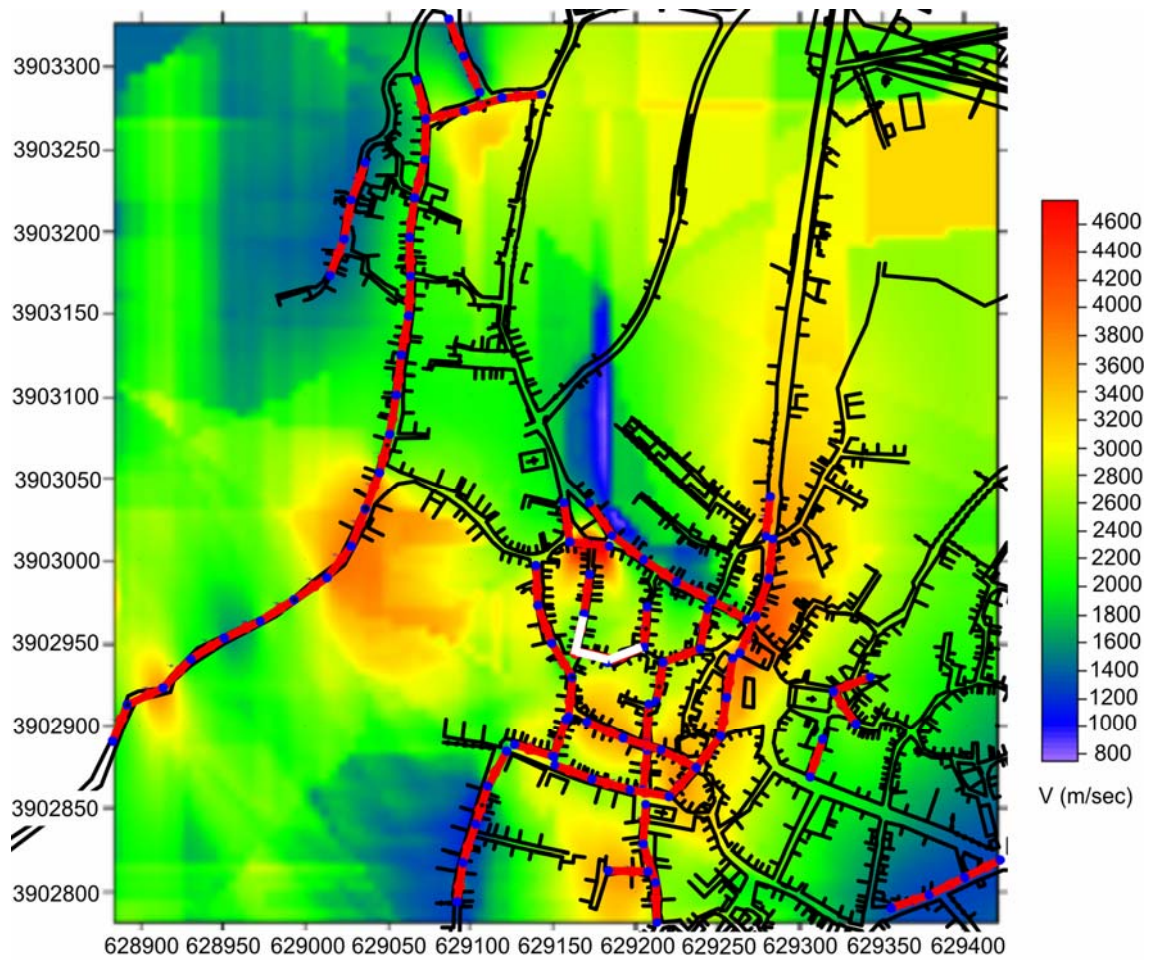
LINES_101-155,159-179



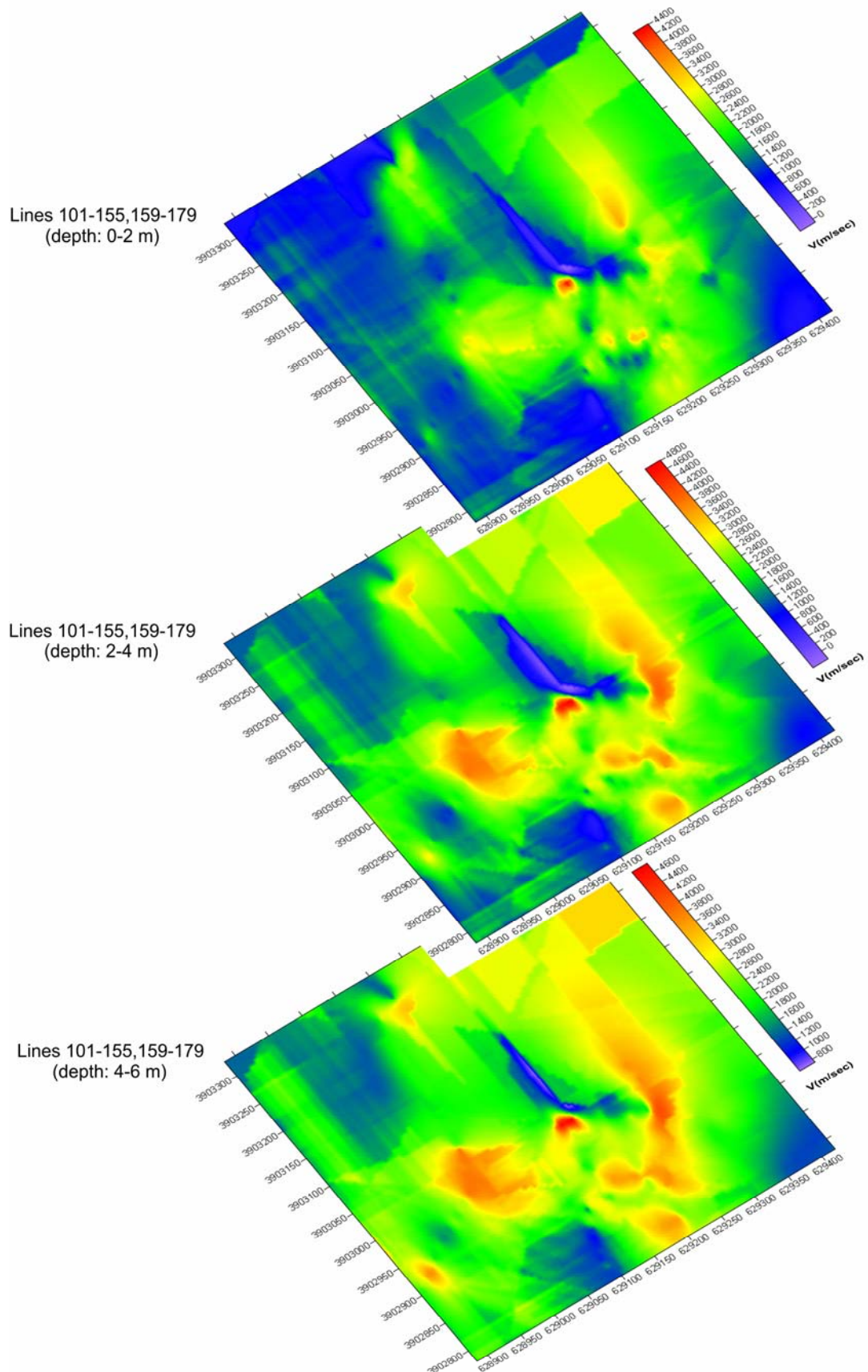
Σχήμα 6: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των Ρ-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-155, 159-179 για τη ζώνη βάθους 0-2 m, συνδυασμένος με την τοπογραφία της περιοχής μελέτης (ΕΓΣΑ '87). Με άσπρο χρώμα, τονίζονται τα αναπτύγματα που αφαιρέθηκαν από τον υπολογισμό των ταχυτήτων. Μήκος συσχέτισης: 282 m.



Σχήμα 7: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-155, 159-179 για τη ζώνη βάθους 2-4 m, συνδυασμένος με την τοπογραφία της περιοχής μελέτης (ΕΓΣΑ '87). Με άσπρο χρώμα, τονίζονται τα αναπτύγματα που αφαιρέθηκαν από τον υπολογισμό των ταχυτήτων. Μήκος συσχέτισης: 190 m.

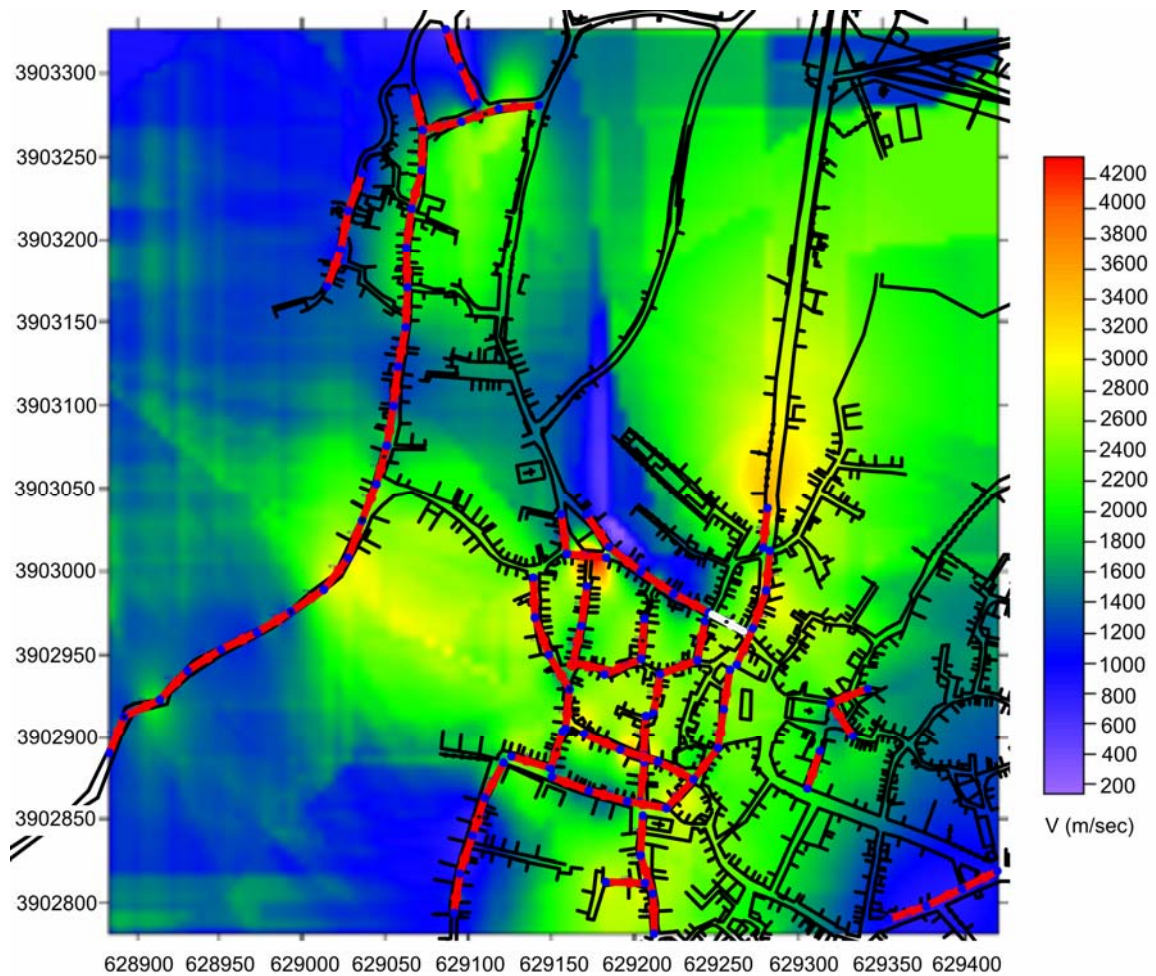


Σχήμα 8: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-155, 159-179 για τη ζώνη βάθους 4-6 m, συνδυασμένος με την τοπογραφία της περιοχής μελέτης (ΕΓΣΑ '87). Με άσπρο χρώμα, τονίζονται τα αναπτύγματα που αφαιρέθηκαν από τον υπολογισμό των ταχυτήτων. Μήκος συσχέτισης: 112 m.

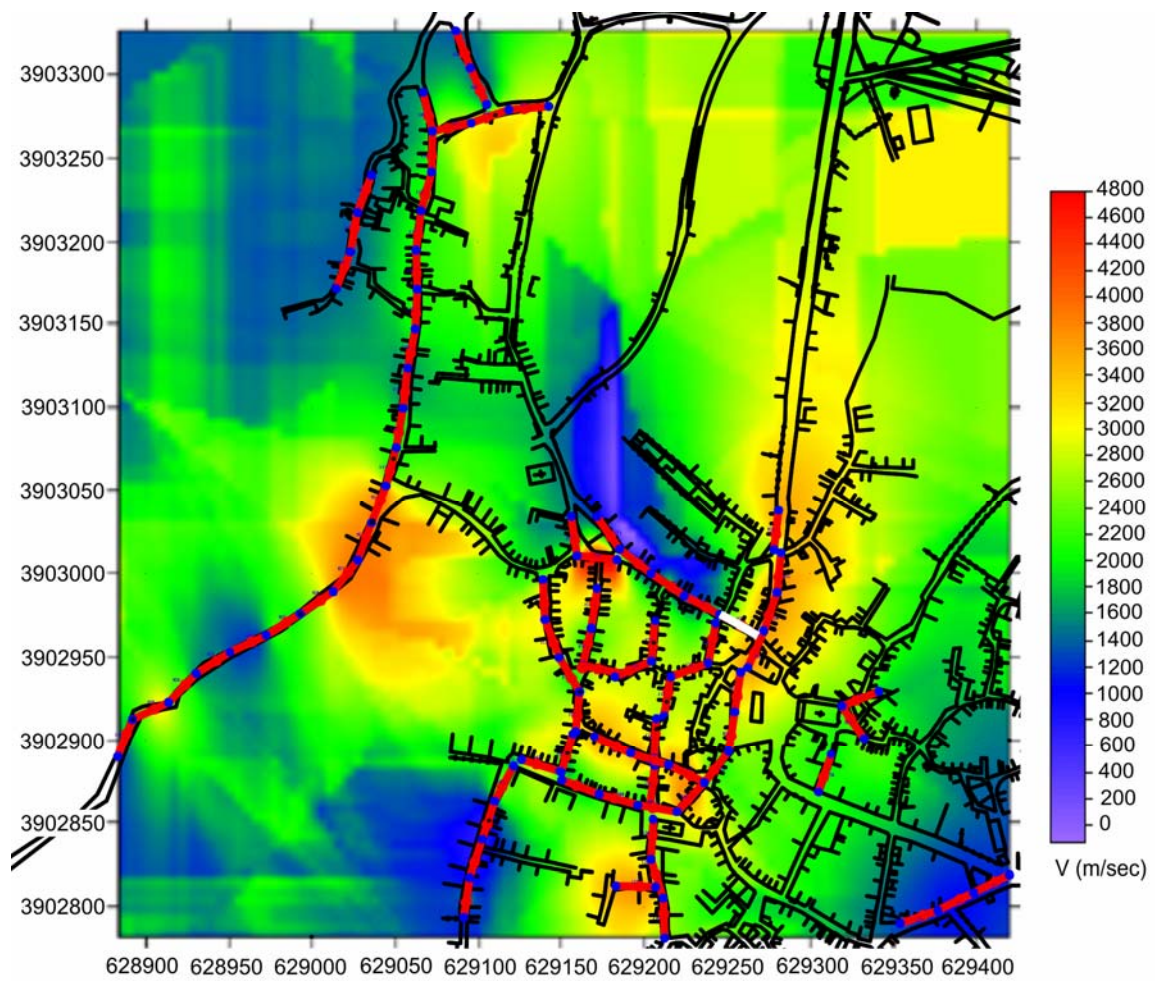


Σχήμα 9: Συγκεντρωτική απεικόνιση της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_ 101-155, 159-179.

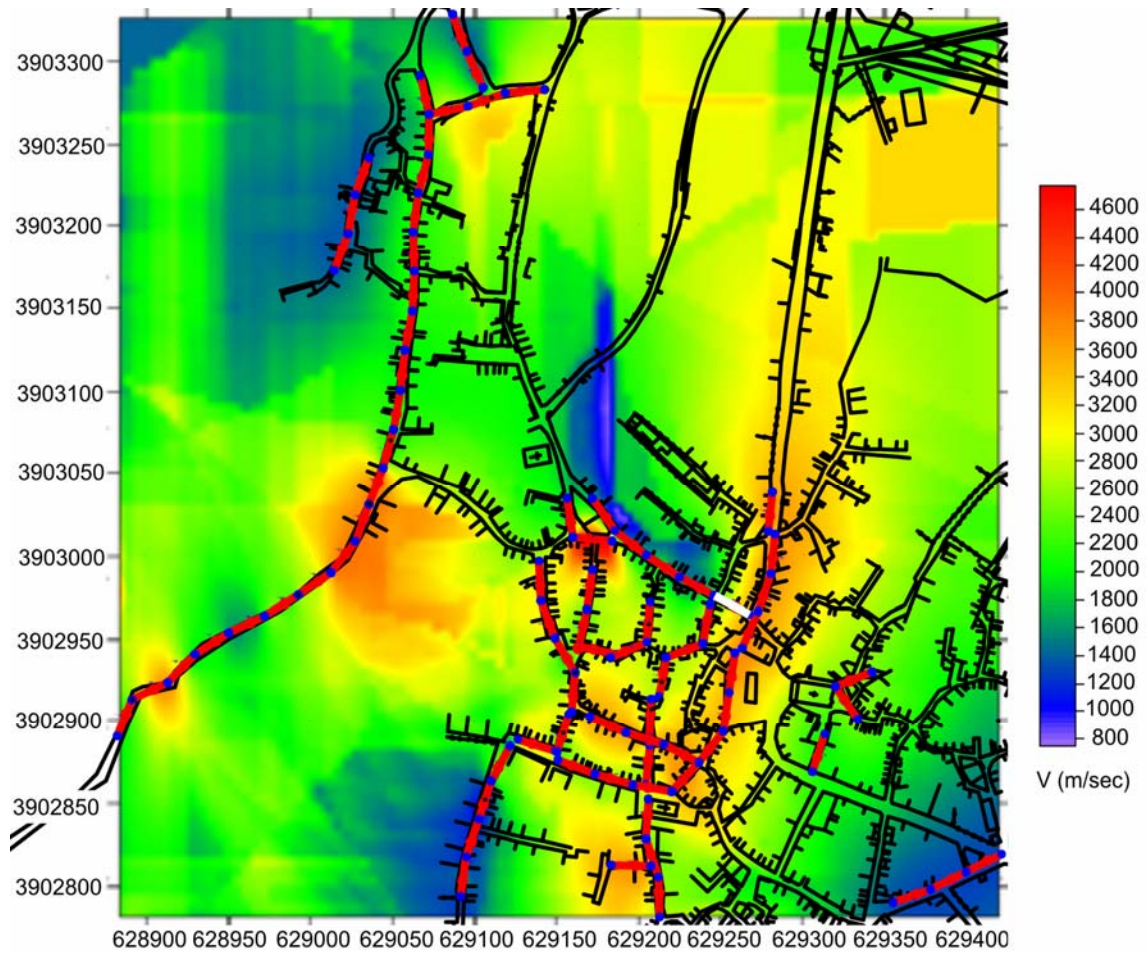
LINES_101-166,168-179



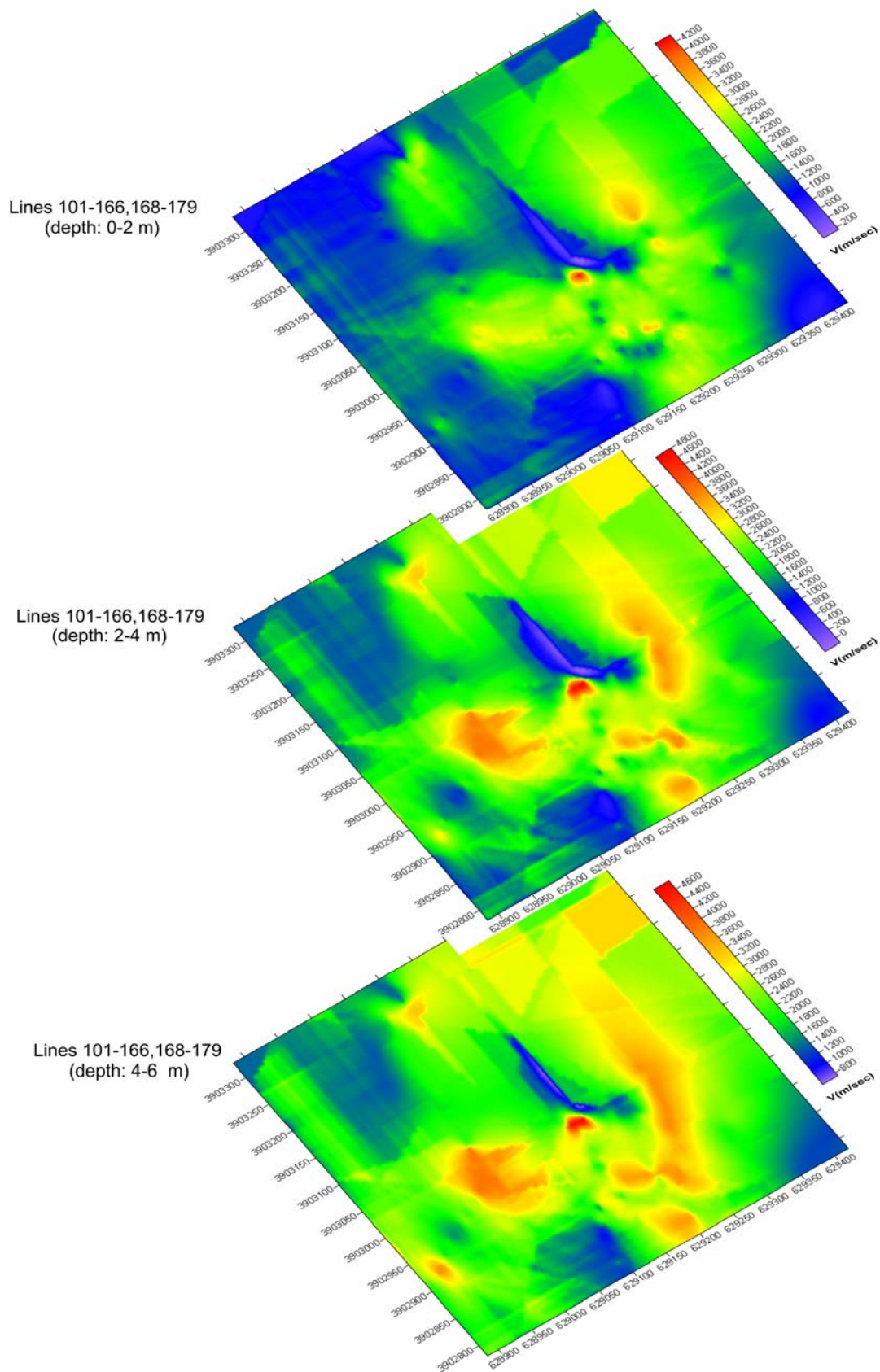
Σχήμα 10: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-166, 168-179 για τη ζώνη βάθους 0-2 m, συνδυασμένος με την τοπογραφία της περιοχής μελέτης (ΕΓΣΑ '87). Με άσπρο χρώμα, τονίζεται το ανάπτυγμα που αφαιρέθηκε από τον υπολογισμό των ταχυτήτων. Μήκος συσχέτισης: 230,9 m.



Σχήμα 11: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-166, 168-179 για τη ζώνη βάθους 2-4 m, συνδυασμένος με την τοπογραφία της περιοχής μελέτης (ΕΓΣΑ '87). Με άσπρο χρώμα, τονίζεται το ανάπτυγμα που αφαιρέθηκε από τον υπολογισμό των ταχυτήτων. Μήκος συσχέτισης: 188,8 m.



Σχήμα 12: Χάρτης εικόνας της ταχύτητας διάδοσης των Ρ-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_101-166, 168-179 για τη ζώνη βάθους 4-6 m, συνδυασμένος με την τοπογραφία της περιοχής μελέτης (ΕΓΣΑ '87). Με άσπρο χρώμα, τονίζεται το ανάπτυγμα που αφαιρέθηκε από τον υπολογισμό των ταχυτήτων. Μήκος συσχέτισης: 228,4 m.



Σχήμα 13: Συγκεντρωτική απεικόνιση της ταχύτητας διάδοσης των P-κυμάτων για τις σεισμικές γραμμές μελέτης Lines_ 101-166, 168-179.