



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΠΜΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ



ΜΠΑΤΣΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

Επιβλέπων: Γεώργιος Αποστολόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Γ. Αποστολόπουλο, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεσή της. Επιπλέον, για την πολύτιμη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της, για την εξαιρετική συνεργασία μας, αλλά και για τις γενικότερες γνώσεις που μου μετέδωσε, τον κ. Γ. Αμμολοχίτη, μέλος ΕΔΙΠ, για τις χρήσιμες παρατηρήσεις του, καθώς και τους υποψήφιους διδάκτορες κ. Δ. Καραϊσκό και κ. Σ. Καριζώνη για τη συμβολή τους σε θέματα της εργασίας μου.

Παράλληλα, ευχαριστώ πολύ τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής: κ. Α. Μπενάρδο, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών ΕΜΠ και διευθυντή του ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και κατασκευή Υπογείων Έργων», καθώς και τον κ. Ζευγόλη, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών ΕΜΠ, για τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις τους.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για όλη τη στήριξη που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Αθήνα, Οκτώβριος 2021
Χρήστος Μπάτσος

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Σύνοψη

Στόχο της Διπλωματικής Εργασίας αποτέλεσε η απεικόνιση του υπεδάφους με τη χρήση γεωφυσικών μεθόδων σε οικόπεδο εντός αστικού περιβάλλοντος στη Λυκόβρυσης Αττικής, όπου πρόκειται να κατασκευαστεί υπόγειος χώρος στάθμευσης. Αφού πραγματοποιήθηκαν σε πρώτο στάδιο οι κατάλληλες μετρήσεις, ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων και η ερμηνεία τους με τις μεθόδους της ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων (MASW) και της ηλεκτρομαγνητικής ανάκλασης (γεωραντάρ). Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν δύο δισδιάστατα προφίλ ταχυτήτων V_s , κατά μήκος των μεγάλων πλευρών του οικοπέδου, ενώ εξάχθηκε και μία μονοδιάστατη τομή στο μέσο της μικρής πλευράς του. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν πέντε προφίλ του εδάφους με τη μέθοδο του γεωραντάρ, παράλληλα στα όρια του οικοπέδου. Με την κατάλληλη ερμηνεία των σεισμικών ταχυτήτων από τη μία και των ηλεκτρομαγνητικών ανακλάσεων από την άλλη, διαπιστώθηκε η στρωματογραφία του υπεδάφους, τόσο ως προς τη γεωμετρία των στρωμάτων, όσο και ως προς τα υλικά που τα αποτελούν. Παρατηρήθηκε ικανοποιητική συμφωνία των δύο μεθόδων, ο συνδυασμός των οποίων αποτυπώνει με αρκετή ευκρίνεια διάφορα στρώματα αργιλικής και αμμώδους σύστασης στα μικρότερα βάθη, τα οποία υπέρκεινται σε ένα πιο συμπαγές στρώμα, πιθανότατα κροκαλοπαγούς. Αξιοσημείωτη είναι η αντιστοιχία των ευρημάτων της έρευνας με τα δεδομένα δύο γεωτρήσεων στο πεδίο έρευνας, ενώ η στρωματογραφία που προέκυψε συμπίπτει με τα γεωλογικά δεδομένα της περιοχής.

Λέξεις κλειδιά: Μέθοδος ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων, MASW, γεωραντάρ, δισδιάστατη τομογραφία, αστικό περιβάλλον

GEOPHYSICAL INVESTIGATION OF SUBSOIL IN URBAN AREA IN TERMS OF GEOTECHNICAL INVESTIGATION

Abstract

The objective of this Diploma Thesis is to define the features of the subsoil, using geophysical methods in a field within urban environment at Lykovrysi of Attica, where an underground parking lot is planned to be constructed. Multichannel analysis of surface waves (MASW), combined with Ground penetrating radar (GPR) have been chosen to suitably proceed and analyse the data collected during the field measurements. Two pseudo 2-D S-wave velocity models, consisted of multiple 1-D profiles, have been acquired alongside the long borders of the field, while a 1-D profile has been achieved in the perpendicular direction. In advance, a total of five GPR profiles have been acquired parallel to the borders of the field, while three of them along the seismic lines. Both the S-wave velocities and the electromagnetic reflections, are a suitable tool to detect and map the near surface features of the subsoil. It appears that the combination of the two methods leads to a clear identification of clay and sand soil interfaces at shallow depth, while a more solid feature is located deeper. Finally, we observe that the results estimated in this geophysical survey, fit quite well with the geology expected at this specific area, as well as with the data gathered by two boreholes within the site.

Key words: Multichannel analysis of surface waves, MASW, Ground penetrating radar, GPR, 2-D tomography, urban environment

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

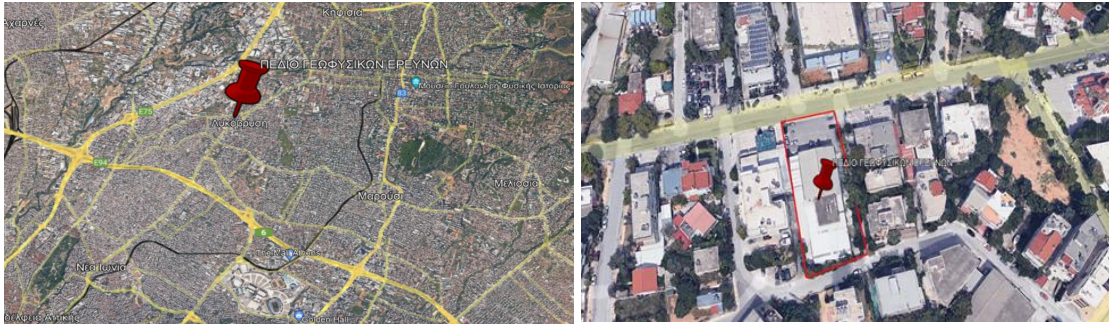
Στόχος της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας είναι ο προσδιορισμός της στρωματογραφίας σε οικόπεδο εντός αστικού περιβάλλοντος, στη Λυκόβρυση Αττικής, με τη χρήση γεωφυσικών ερευνών. Ειδικότερα, για τις ανάγκες γεωτεχνικής μελέτης, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν θα συμβάλει στην εξακρίβωση και στην ασφαλέστερη γενίκευση των σημειακών δεδομένων που έχουν ληφθεί από δύο γεωτρήσεις εντός του πεδίου έρευνας στο σύνολο του χώρου.

Για την επίτευξη του επιδιωκόμενου στόχου, αλλά και την όσο το δυνατόν ασφαλέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων, είναι απαραίτητη η επιλογή των κατάλληλων γεωφυσικών μεθόδων. Στο γεγονός αυτό συντέλεσε η βιβλιογραφική αναζήτηση ερευνών συναφών με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας σε διεθνές επίπεδο, παράλληλα με την καλή γνώση του θεωρητικού υποβάθρου στο οποίο στηρίζονται οι διάφορες γεωφυσικές μέθοδοι.

Επιλέχθηκε, ύστερα κι από αξιολόγηση διαφόρων ερευνών, ο συνδυασμός της μεθόδου πολλαπλών καναλιών ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων (MASW) και της μεθόδου της ηλεκτρομαγνητικής ανάκλασης (γεωραντάρ) για την εν λόγω έρευνα. Σε πρώτο στάδιο, εκτιμάται ότι σε μικρά βάθη, όπως αυτά που εξετάζονται στην περίπτωση αυτή, η στρωματογραφία του εδάφους μπορεί να απεικονιστεί με σεισμικές μεθόδους. Ο αναμενόμενος θόρυβος στο αστικό περιβάλλον όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις οδήγησε στην ανάλυση των ισχυρότερων επιφανειακών κυμάτων σε σύγκριση με τα κύματα P. Η παράλληλη επιλογή της μεθόδου του γεωραντάρ, η οποία χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα και την ευκολία των μετρήσεων, δύναται να ενισχύσει τα αποτελέσματα των σεισμικών και να συμβάλει στην ευκρινέστερη αποτύπωση διαφόρων δομών που μπορεί να υπάρχουν στα πρώτα μέτρα. Επιπλέον, τα υπάρχοντα δεδομένα για το πεδίο έρευνας μέσω γεωτρήσεων, καθώς και η γνωστή γεωλογία της περιοχής, καθιστούν την αξιολόγηση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων περισσότερο βέβαιη.

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Ο χώρος στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις βρίσκεται στη Λυκόβρυση Αττικής και αφορά ένα οικόπεδο επί της κεντρικής λεωφόρου Σοφοκλή Βενιζέλου. Στο οικόπεδο αυτό αναμένεται να πραγματοποιηθεί γεωτεχνική μελέτη για την κατασκευή υπόγειου χώρου στάθμευσης. Το γεγονός αυτό καθιστά σημαντική την εξακρίβωση αλλά και την ασφαλή γενίκευση, με τη συμβολή των γεωφυσικών μεθόδων, των δεδομένων των δύο γεωτρήσεων στο σύνολο του χώρου.



Εικόνα 1. Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής έρευνας

Χρησιμοποιήθηκε η σεισμική πηγή ESS-MINI GISCO, η οποία αποτελεί μια ισχυρή πηγή, εύκολα μεταφερόμενη και με την οποία πραγματοποιήθηκαν 37 κρούσεις σε διαφορετικές θέσεις εντός και εκτός των ορίων του οικοπέδου. Εξήντα γεώφωνα των 4,5 Hz τοποθετήθηκαν ανά πέντε περίπου μέτρα, πάνω σε ειδικά μολύβδινα βαρίδια με τρόπο ώστε να καλύπτεται το μεγαλύτερο μέρος του χώρου του οικοπέδου. Για την καταγραφή των σεισμικών κυμάτων στα γεώφωνα χρησιμοποιήθηκε σειсмоγράφος 60 καναλιών.



Εικόνα 2. Θέσεις τοποθέτησης των γεωφώνων(κόκκινες κουκίδες) και τα σημεία των κρούσεων(κίτρινα σημάκια) με τη σεισμική πηγή στο χώρο της έρευνας. Παράλληλα φαίνονται και τα σημεία των δύο γεωτρήσεων(πράσινα τρίγωνα)

Αναφορικά με τη μέθοδο του γεωραντάρ, ακολουθήθηκε παρόμοια λογική με τη μέθοδο MASW. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν πέντε τομές, οι τρεις εκ των οποίων είναι στη διεύθυνση

ανατολής- δύσης και οι δύο βορρά- νότου. Μάλιστα, τρεις από αυτές συμπίπτουν με τα τρία σεισμικά προφίλ που αναλύθηκαν.

Χρησιμοποιήθηκε η αντένα MALA των 250MHz, η οποία έχει μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης με στόχο να εξεταστεί σε όσο μεγαλύτερο βάθος η στρωματογραφία του υπεδάφους και να γίνει σύγκριση με τα αποτελέσματα της σεισμικής μεθόδου σε στο μεγαλύτερο δυνατό βάθος.

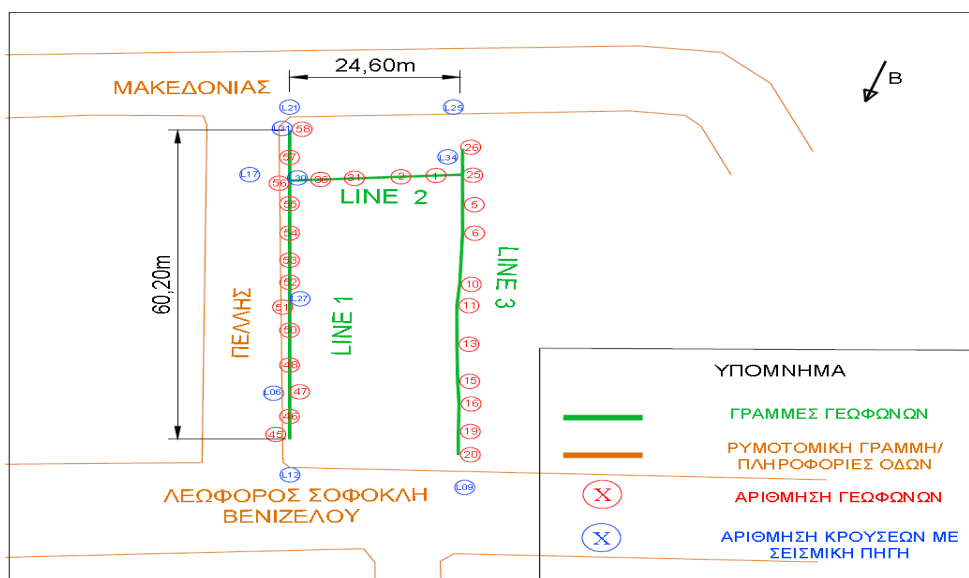


Εικόνα 3. Κάναβος μετρήσεων γεωραντάρ και δορυφορική απεικόνιση των πέντε ευθειών που ακολούθησε και οδήγησαν στη λήψη των αντίστοιχων τομών (κόκκινο χρώμα)

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Μέθοδος MASW

Η τελική επιλογή των γραμμών που αναλύθηκαν έγινε με βάση τη γεωμετρία του οικοπέδου. Επιλέχθηκαν, λοιπόν, τρεις γραμμές, εκ των οποίων οι δύο είναι παράλληλες στα όρια του οικοπέδου και στην κατεύθυνση Βορρά -Νότου και μία κάθετη στις παραπάνω και παράλληλη στη μικρότερη πλευρά του οικοπέδου (Εικόνα 4).



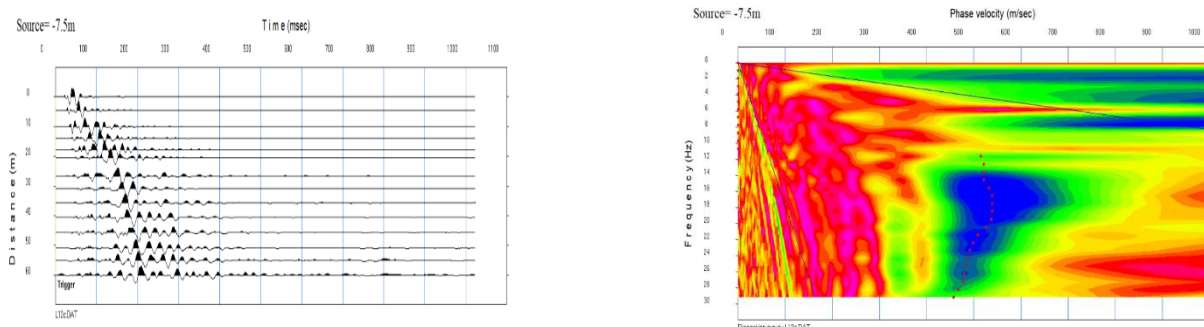
Εικόνα 4. Σκαρίφημα όπου φαίνεται η τελική επιλογή των τριών σεισμικών προφίλ προς ανάλυση με τη μέθοδο MASW, όπου διακρίνονται οι θέσεις των γεωφώνων και των χτυπημάτων που λήφθηκαν υπόψιν

Για την εκάστοτε σεισμική γραμμή που αναλύθηκε απομονώθηκαν συγκεκριμένα γεώφωνα, ενώ λήφθηκαν υπόψιν οι καταγραφές των κρούσεων από τις σεισμικές πηγές σε θέσεις που βρίσκονται στην ίδια περίπου ευθεία με τις εν λόγω γραμμές. Ανάλογα τη θέση της σεισμικής πηγής, η ανάλυση των δεδομένων παρέχει μία μονοδιάστατη απεικόνιση των ταχυτήτων των κυμάτων S συναρτήσει του βάθους, η οποία αναφέρεται στο μέσο αυτής. Με τη σύνθεση των χτυπημάτων σε διαφορετικές θέσεις εντός των γραμμών και την απομόνωση διαφορετικών γεωφώνων κάθε φορά, επιτυγχάνεται μία προσεγγιστική δισδιάστατη τομή στην οποία αποτυπώνεται η στρωματογραφία του υπεδάφους βάσει των μεταβολών των ταχυτήτων V_s . Λόγω του μικρού μήκους της γραμμής 2 και του μειωμένου αριθμού συνευθειακών κρούσεων, τα τελικά αποτελέσματα αφορούν το μέσο της γραμμής 2 και δεν έγινε προσεγγιστική δισδιάστατη τομή.

Για την επεξεργασία των σεισμικών κυμάτων χρησιμοποιήθηκε το κατάλληλο λογισμικό SeisImager της εταιρείας EG&G GEOMETRICS. Το πρώτο βήμα για την επεξεργασία είναι η μελέτη των σειсмоγραμμάτων της κάθε καταγραφής, η απομόνωση των κατάλληλων γεωφώνων στο συνολικό διάγραμμα και η προσθήκη των σωστών αποστάσεων μεταξύ τους, αλλά και ως προς την πηγή. Έχοντας τα ίχνη των σεισμικών κυμάτων για τα γεώφωνα που μας ενδιαφέρουν, εντοπίζονται οι πρώτες αφίξεις των επιφανειακών κυμάτων στο εκάστοτε γεώφωνο.

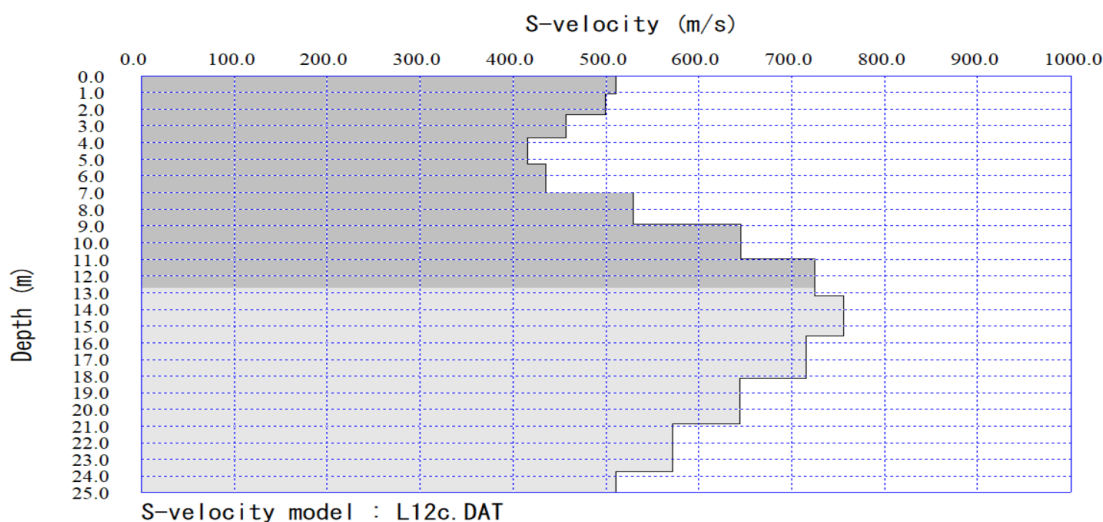
Στη συνέχεια μετατρέπεται το σεισμόγραμμα το οποίο δείχνει την καταγραφή των κυμάτων σε κάθε θέση ως προς το χρόνο, σε διάγραμμα συχνοτήτων ως προς ταχύτητες. Με τη σωστή ανάλυση της εικόνας επιλέγεται η καμπύλη διασποράς συχνοτήτων για το κάθε χτύπημα. Τέλος, με την αντιστροφή της καμπύλης διασποράς συχνοτήτων προκύπτει η κατανομή των ταχυτήτων V_s συναρτήσει του βάθους για την ίδια θέση.

Για την ανάλυση της σεισμικής γραμμής 1 απομονώθηκαν 13 γεώφωνα τα οποία και τη σχηματίζουν και η οποία έχει μήκος 60,20m. Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα στο σειсмоγράφο από πέντε κρούσεις συνευθειακές περίπου με τη γραμμή.



Εικόνα 5. Ενδεικτικό σεισμόγραμμα για την πηγή στη θέση $X = -7,5m$ και η αντίστοιχη καμπύλη διασποράς συχνοτήτων που επιλέχθηκε (κόκκινες τελείες)

Η αντιστροφή της επιλεγμένης καμπύλης διασποράς συχνοτήτων για την εν λόγω θέση θα δώσει και το τελικό μοντέλο ταχυτήτων στο μέσο της γραμμής, διαδικασία που ακολουθήθηκε για κάθε διαφορετική σεισμική κρούση.



Εικόνα 6. MASW - Τελικό μοντέλο ταχυτήτων

Στο τελικό μοντέλο ταχυτήτων έχουμε μία καθαρή εικόνα για τις μεταβολές των ταχυτήτων των κυμάτων S, οι οποίες υποδηλώνουν τις μεταβολές στην ακαμψία του εδάφους και επομένως μπορούμε να σχηματίσουμε μία εικόνα για τη στρωματογραφία.

Η ίδια επεξεργασία πραγματοποιήθηκε και για κάθε θέση της σεισμικής πηγής που αναλύθηκε και στις άλλες 2 γραμμές. Αντίστοιχα για τη Γραμμή 2 μήκους 24,60m, χρησιμοποιήθηκαν 2 σεισμικές πηγές και 6 γεώφωνα. Τέλος, για τη σεισμική Γραμμή 3 μήκους 59,50m χρησιμοποιήθηκαν 3 σεισμικές πηγές, ενώ αποτελείται από 11 γεώφωνα.

Μέθοδος Γεωραντάρ

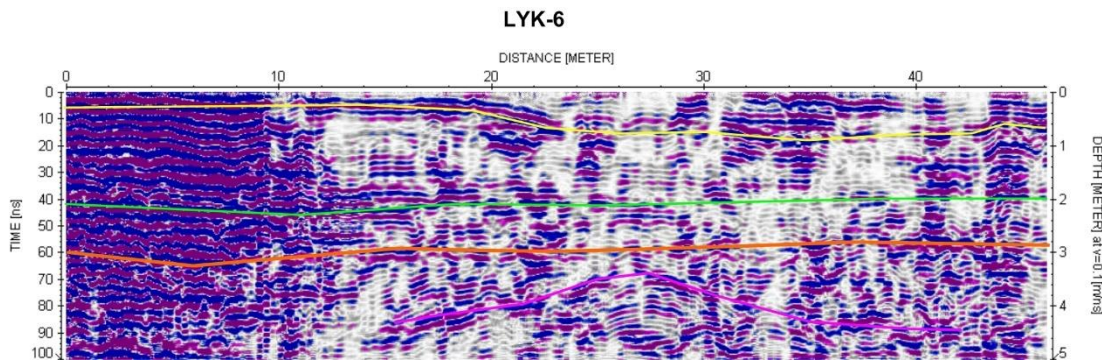
Τη λήψη των δεδομένων από το πεδίο, ακολούθησε η επεξεργασία τους με τη χρήση του προγράμματος REFLEXW της Sandmeier Scientific Software.

Οι τελικές τομές του γεωραντάρ, οι οποίες αποτελούν ραδιογράμματα που παρουσιάζονται είτε με τη συμβατική μορφή ανακλάσεων σημάτων είτε με την ανάλυση πλάτους σημάτων, προέκυψαν ύστερα από την επεξεργασία των αρχικών δεδομένων.

Τα στάδια της επεξεργασίας ήταν τα εξής:

- Subtract mean (dewow):
- Correct max phase
- Move start-time
- Bandpass butterworth
- Background removal
- Spectral whitening
- Kirchhoff migration

Προέκυψαν έτσι οι πέντε τομές στις οποίες έπειτα κι από την παραπάνω επεξεργασία ήταν εμφανείς διάφορες ασυνέχειες, λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων που παρατηρούνται και υποδεικνύουν τη διαφορά στην αγωγιμότητα του υλικού κάθε στρώματος.



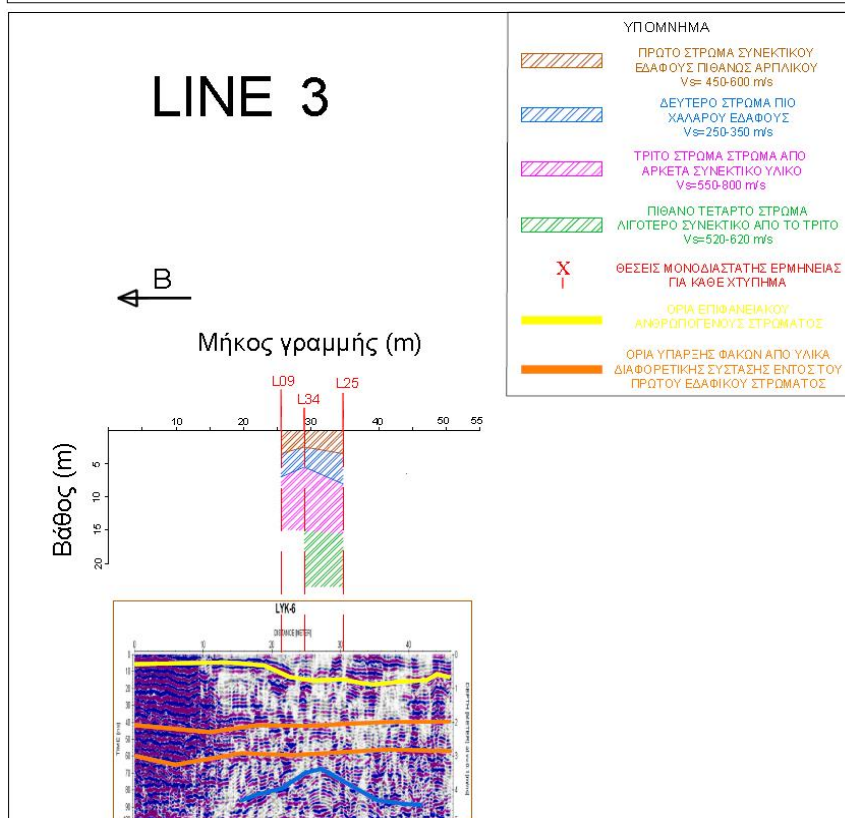
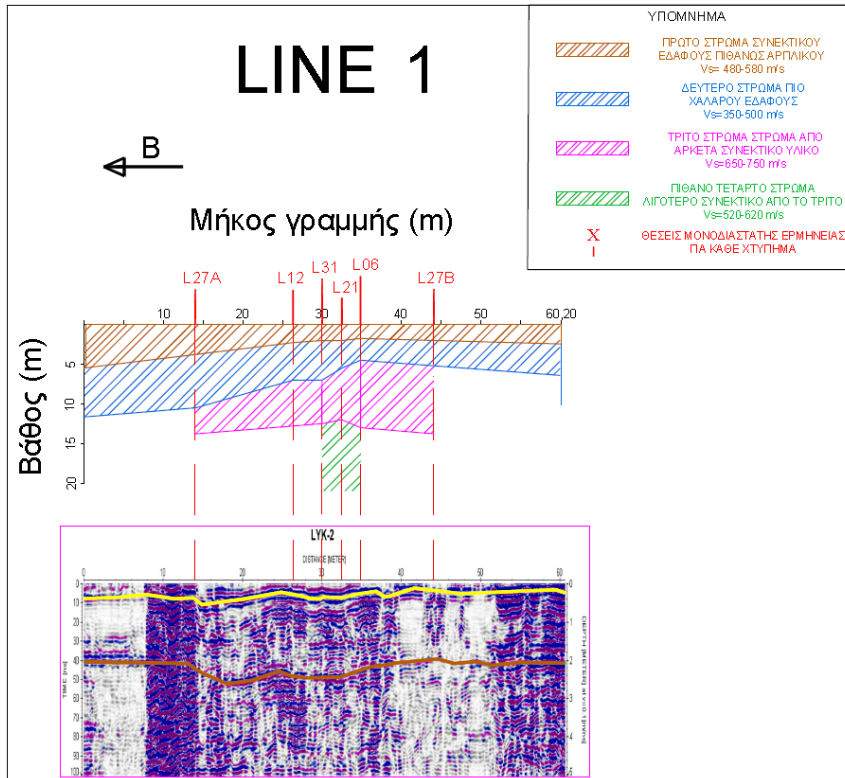
Εικόνα 7. Ενδεικτική τομή γεωραντάρ στην ανατολική πλευρά του οικοπέδου, η οποία σχεδόν συμπίπτει με τη σεισμική γραμμή 3, στην οποία με τις χρωματιστές γραμμές σημειώνονται οι διάφορες ασυνέχειες που υποδηλώνουν αλλαγή στρώματος.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Καταρχάς, από την ανάλυση των επιφανειακών σεισμικών κυμάτων, γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη τεσσάρων στρωμάτων. Το επιφανειακό στρώμα που αποτελείται από ένα αρκετά συνεκτικό υλικό ($V_s=500-600\text{m/s}$), πιθανώς αργιλικό, εκτείνεται σε βάθος περί των 2,5 με 5 μέτρων και ακολουθείται από ένα χαλαρότερο εδαφικό υλικό λιγότερο συνεκτικό ($V_s=350-500\text{m/s}$). Ένα ιδιαίτερα συμπαγές εδαφικό υλικό, αναμένεται σε βάθος που ποικίλει από 5 έως 10 μέτρα ($V_s=650-800\text{m/s}$), το οποίο υπέρκειται σε ένα ελαφρώς λιγότερο συνεκτικό το οποίο διακρίνεται σε βάθη μεγαλύτερα των 13 μέτρων ($V_s=500-600\text{m/s}$). Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων έχει βαρύτητα έως τα βάθη των 12 με 16 μέτρων, με αποτέλεσμα η προσπάθεια επεξήγησης της στρωματογραφίας σε μεγαλύτερα βάθη να είναι αβάσιμη.

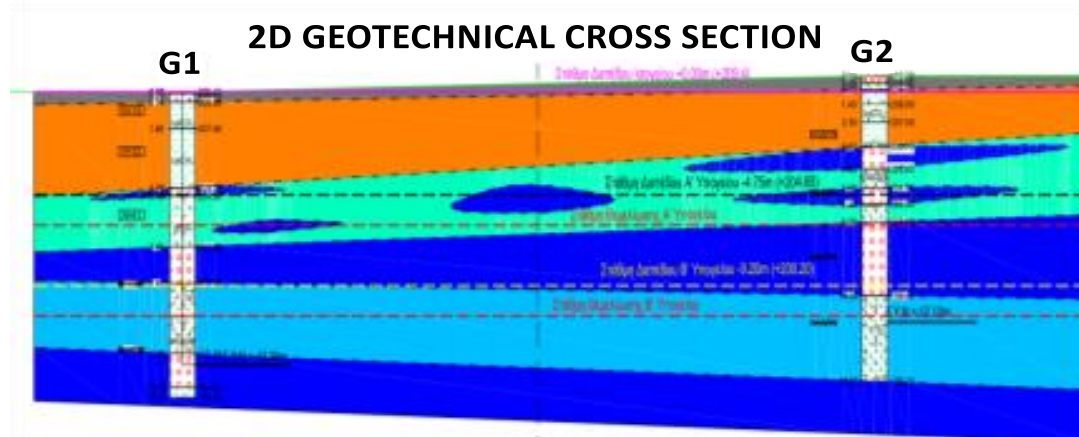
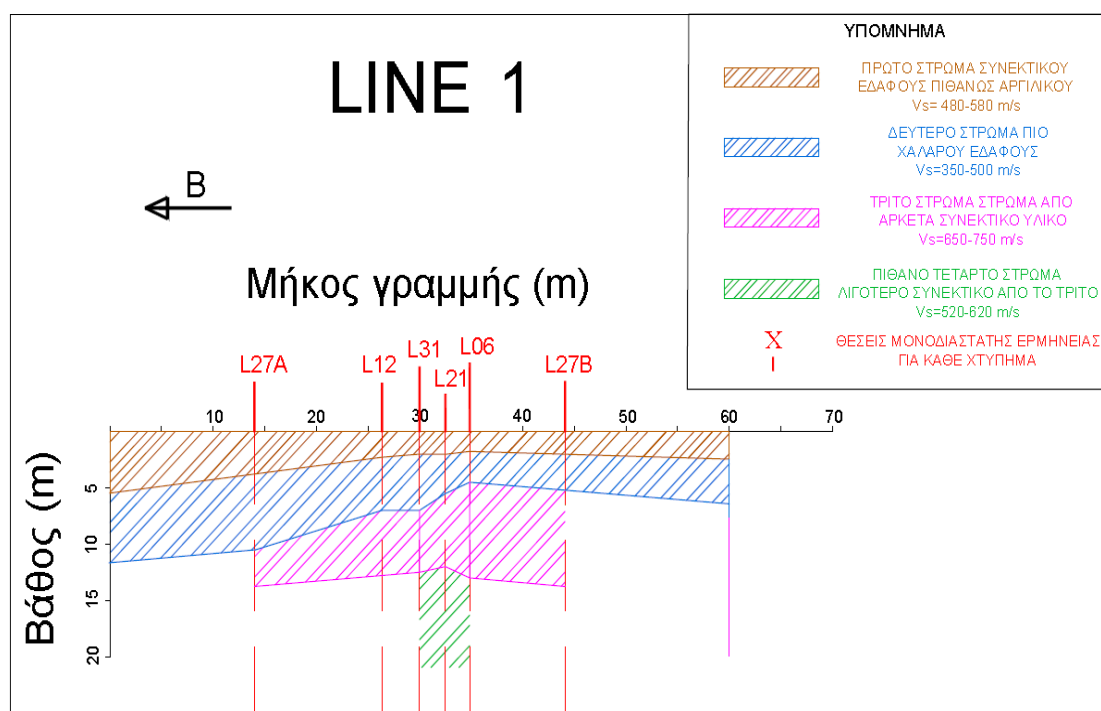
Εν συνεχεία, στα ραδογράμματα από το GPR είναι ευδιάκριτη η ανθρωπογενής επίστρωση από ασφαλτικό υλικό ή σκυρόδεμα στα πρώτα 0,3-0,8 μέτρα του εδάφους του οικοπέδου (κίτρινη γραμμή), ενώ επίσης δεν παρατηρούνται άλλες δομές. Στις εικόνες από το γεωραντάρ το πρώτο επιφανειακό στρώμα φαίνεται να εκτείνεται σε βάθος που ποικίλει από 2,80m έως 3,50m κατά μήκος της μικρής πλευράς του οικοπέδου με διεύθυνση ανατολή προς δύση. Εντός του του πρώτου στρώματος διακρίνονται φακοί υλικού διαφορετικής σύστασης σε βάθος περίπου 2,5m έως και 3,5m. Στην τομή της δυτικής πλευράς του οικοπέδου εντοπίζεται το πιθανό δεύτερο στρώμα περί το μέσο της πλευράς, σε βάθος 3,5- 4,5m, με εμφανή την αλλαγή κλίσης του, μιας και υπάρχει ανύψωση του στρώματος αυτού στο κέντρο της τομής.

Οι σεισμικές τομές της παρακάτω εικόνας (Εικόνα 8) παρατίθενται σε αντιστοιχία με τις τομές του γεωραντάρ, ώστε να γίνει εύκολα αντιληπτή η συμφωνία των αποτελεσμάτων στα πρώτα πέντε περίπου μέτρα.



Εικόνα 8. Σεισμική τομή και τομή γεωραντάρ κατά μήκος της δυτικής (Line1) και ανατολικής (Line3) πλευράς του οικοπέδου

Αναφορικά με τα δεδομένα των γεωτρήσεων, μπορεί να ειπωθεί ότι η αντιστοιχία των αποτελεσμάτων των γεωφυσικών μεθόδων κρίνεται ικανοποιητική, όπως φαίνεται και στη επόμενη εικόνα.



LEGEND

- man made backfill
- I Sandy Clay
- IIa Gravelly Clay to gravelly sandy clay
- IIb conglomerate
- IIc Gravelly clay to well graded clayey gravels

Εικόνα 9. Αντιστοιχία αποτελεσμάτων σεισμικής μεθόδου με τη στρωματογραφία που προέκυψε από τις δύο γεωτρήσεις, όπου φαίνονται οι εναλλαγές αργιλικών και αμμώδων εδαφών, οι φακοί εντός του δευτέρου στρώματος της αργίλου και το κροκαλοπαγές στρώμα που ακολουθεί

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα τελικά αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε, η επιλογή του συνδυασμού της σεισμικής μεθόδου MASW και της μεθόδου του γεωραντάρ κρίνεται αξιόπιστη με βάση τα γεωλογικά δεδομένα της περιοχής, καθώς και τα δεδομένα των δύο γεωτρήσεων. Η ερμηνεία της μεθόδου του γεωραντάρ συμφωνεί με την ερμηνεία της σεισμικής μεθόδου ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων, ενώ δίνει και μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα του υπεδάφους στα πρώτα μέτρα. Η γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε, εφόσον έρχεται σε συμφωνία με τις σημειακές γεωτρήσεις καθιστά ασφαλέστερη τη γενίκευση των αποτελεσμάτων των γεωτρήσεων σε όλο το εύρος του οικοπέδου. Τέλος η μέθοδος MASW λόγω του ισχυρού σήματος των επιφανειακών κυμάτων, επισκιάζει τον εξωτερικό θόρυβο και κρίνεται κατάλληλη για μετρήσεις σε περιβάλλον πόλης, ενώ με βάση τα αποτελέσματα υπερτερεί της μεθόδου της σεισμικής διάθλασης η οποία δε θα έδινε αποτελέσματα, μιας και η μείωση των ταχυτήτων V_s από το δεύτερο στο τρίτο στρώμα θα ευθυνόταν για την κρυφή ζώνη που θα παρατηρούταν.

GEOPHYSICAL INVESTIGATION OF SUBSOIL IN URBAN AREA IN TERMS OF GEOTECHNICAL INVESTIGATION

SUMMARY

INTRODUCTION

The objective of this Diploma Thesis is to define the features of the subsoil, using geophysical methods in a field within urban environment at Lykovrysi of Attiki. In particular, the interpretation of the results expected, can confirm the reliability of the data acquired from two boreholes within the survey site, while they can lead to a safe generalization of them in the whole area of the field.

In order to achieve the objective of this survey, in the most accurate way possible, it is vital to choose the appropriate geophysical methods. The research of case studies carried worldwide, which are related to the subject of the present survey, can contribute to the right methodology that will be followed, alongside with the good knowledge of the theoretical background on which the various geophysical methods are based.

After evaluating various researches, the combination of the multi-channel surface wave analysis (MASW), and the Ground Penetrating Radar (GPR) was chosen for the research to be carried out. Firstly, it is believed that in depths investigated in an urban environment, such those considered in this case, the surface wave analysis method is suitable to detect and map near-surface features. Since the external noise of an urban area is highly expected to affect the data acquisition, we only use surface waves for dispersion analysis due to its high signal-to-noise ratio in the observed data and greater penetrating depth compared to P waves. In addition to MASW, GPR profiles were acquired to provide a better accuracy of the results, concerning the features of shallower depths. The urban environment and high building density surely required non-invasive methods for shallow applications and GPR site measurements are fast and easy to be held. Finally, the already known geology of the wider area and the data obtained from the boreholes can secure the results of the two methods.

DATA ACQUISITION ON SITE

Field measurements were performed at a private field, located on the Sofoklis Venizelos central avenue at Lykovrusi of Attiki. A geotechnical study is expected to be carried out concerning an underground parking lot, which is planned to be constructed. Thus, the results of the geophysical survey are of great significance for the investigation of the subsoil parameters that affect the foundation of the construction.

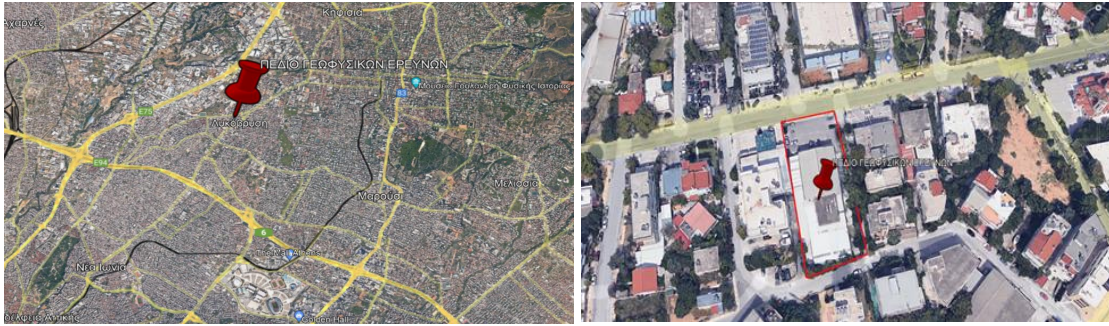


Figure 1. Plan view of the location of the survey site

The seismic source ESS-MINI GISCO, which is a powerful easily transportable source, was used to a total of 37 different source points inside and outside the boundaries of the plot. The size of the test area was approximately 60m×30m (Fig. 1b), with a total of 60 4.5 Hz geophones spaced at 5m and placed in a way to cover most of the field area. A 60-channel seismograph was used to record seismic waves on geophones.



Figure 2. Configuration of the field measurement, red circles represent the approximate location of receivers and yellow stars the location of the seismic sources. The exact position of the two boreholes are represented with the green triangle

Regarding the GPR method, a similar approach has been followed in order to cover the same spaces. A total of five GPR profiles were acquired, three of which are in the East-West direction

and two in the North-South direction. In fact, three of them coincide with the three seismic lines analyzed with the surface wave analysis.

The GPR data was collected using the 250MHz MALA antenna, since deeper penetration was chosen over high resolution in order to investigate the structure of the subsoil as deep as possible and to compare the results with those of the seismic method at the greatest possible depth.



Figure 3. Configuration of GPR profiles where the exact coordinates of GPR profiles can be seen and plan view of the area

DATA PROCESSING AND ANALYSIS

MASW

The final selection of the lines analyzed was based on the geometry of the field. Therefore, three profiles were selected, two of which are parallel to the boundaries of the field in the direction North-South and one perpendicular to the above and parallel to the smaller side of the field (Figure 4).

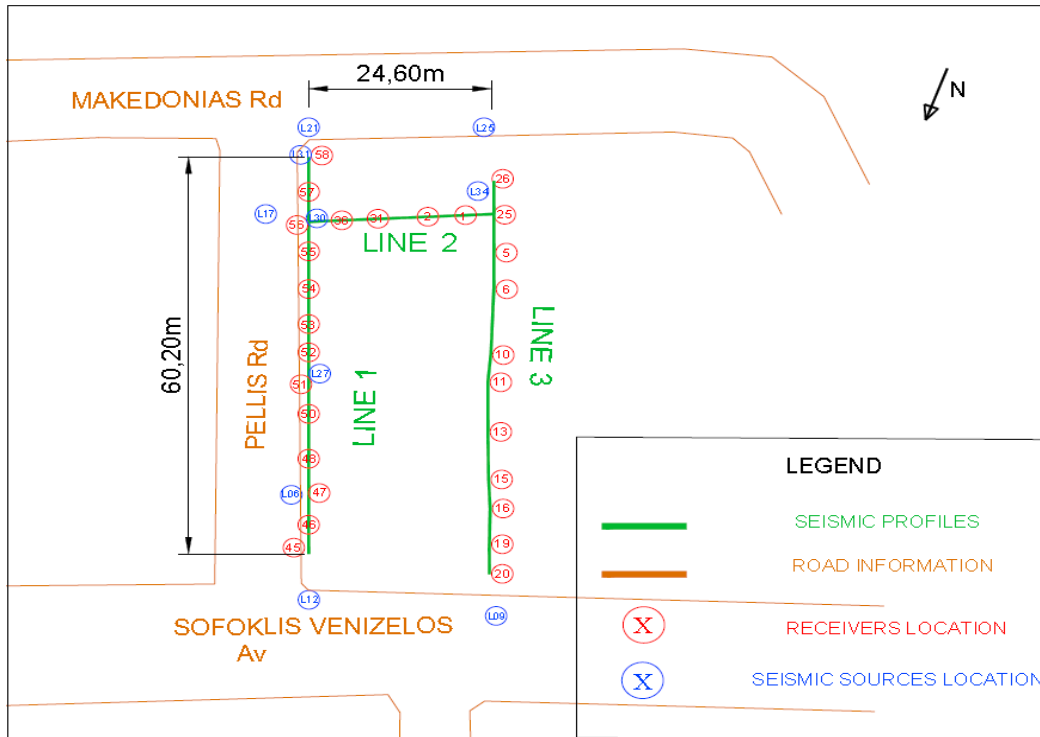


Figure 4. The three seismic profiles analyzed (green lines). The receivers (red circles) that consist the lines and the seismic sources (blue circles) are visible as well

For the analysis of each and every profile that we aim to investigate, a specific number of receivers being in the same line were only taken into account, while the seismic wavefields were produced by seismic sources that are located approximately in the same line with the receivers. In order to achieve the dispersion analysis of each recorded wavefield we use appropriate the software SeisImager of EG&G GEOMETRICS. At first, we define the right distances between the geophones placed and the seismic source. The data of the initial x-t domain is being transformed into the frequency- velocity domain. The next step is the evaluation of the dispersion curve and the final selection for every seismic source, which depends on the resolution of the image. The resolution of dispersion images can be modified and improved via the software so that the extracted dispersion curve will be as more accurate as possible.

Via the SeisImager software the inversion of the picked dispersion curves is crucial for the final 1-D S-wave velocity profil, which indicates the V_S distribution through different depths. The 1D inversion result is placed at the same location of the corresponding dispersion curve. By grouping various 1-D S-wave velocity profiles via linear interpolation we can obtain a 2-D velocity model. The S-wave velocities are highly related with the stiffness of the subsoil materials, meaning that the right evaluation and interpretation of the S-velocities, we have reached to, can lead to significant conclusions about the definition of geological features. By aligning the results of multiple shot gathers, a pseudo 2-D S-wave velocity image can be obtained.

For example, the analysis of the seismic line 1, with a total length of 60,20m, consists of 5 dispersion curves, concerning 5 different seismic source locations, while a total number of 13 receivers were used.

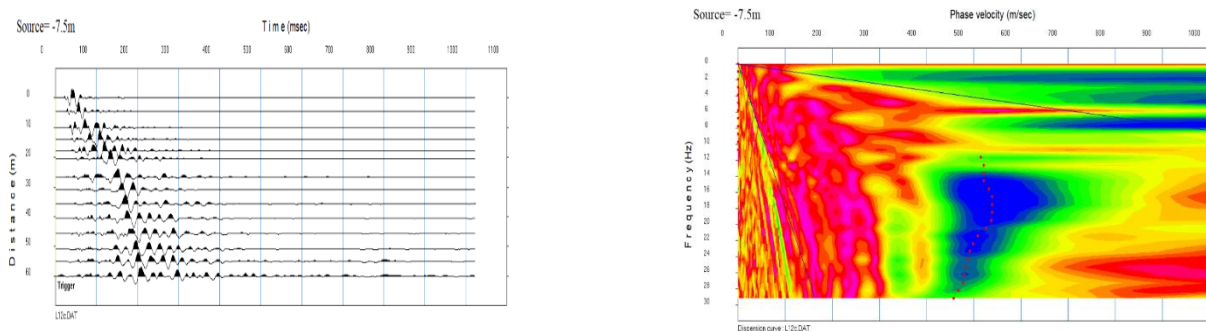


Figure 5. Observed data generated by the seismic source located at X= -7,5m and the picked dispersion curve (red dots)

The inversion of the dispersion curve lead to the 1-D S-wave velocity that refers to the center of the line.

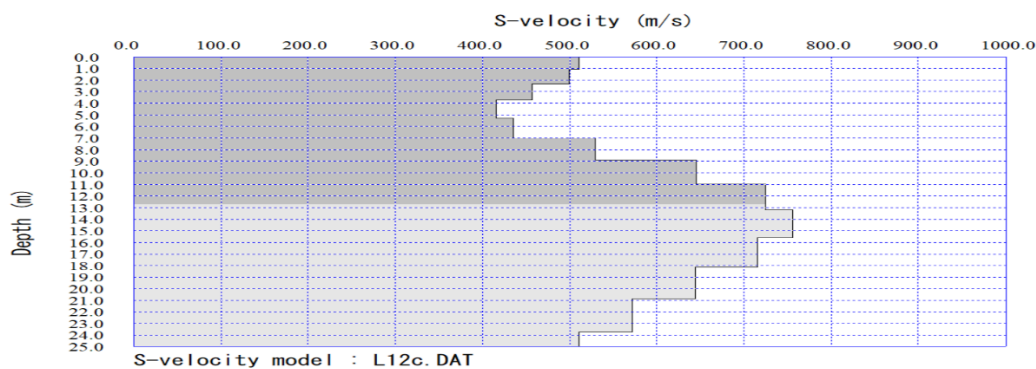


Figure 6. MASW – S-wave Velocity model

In the final velocity model, consisted of five 1-D profiles, we have a clear picture of the changes in the velocities of the S waves, which indicates the changes in the stiffness of the ground and therefore we can form a clear image of the subsoil features.

The same procedure has been followed in the other two seismic lines, collecting and analysing the data of the relative seismic sources. As far as the seismic line 2 concerned, a 1-D S-velocity model has been acquired due to the significant small length of the line.

GPR

The gathering of the GPR data from the test site, followed a procedure using the software REFLEXW of Sandmeier Scientific Software. The processing steps were focused on amplitude recovery and filtering, with the aim to attenuate the environmental noise. The exact procedure steps made were the following:

- ❖ Subtrack mean (dewow)
- ❖ Correct max phase
- ❖ Move start-time
- ❖ Energy decay
- ❖ Bandpass butterworth
- ❖ Background removal
- ❖ Spectral whitening
- ❖ Kirchhoff migration

A total of five GPR profiles acquired where, several reflection signals could be associated with clay/sand and stiffer soil interfaces.

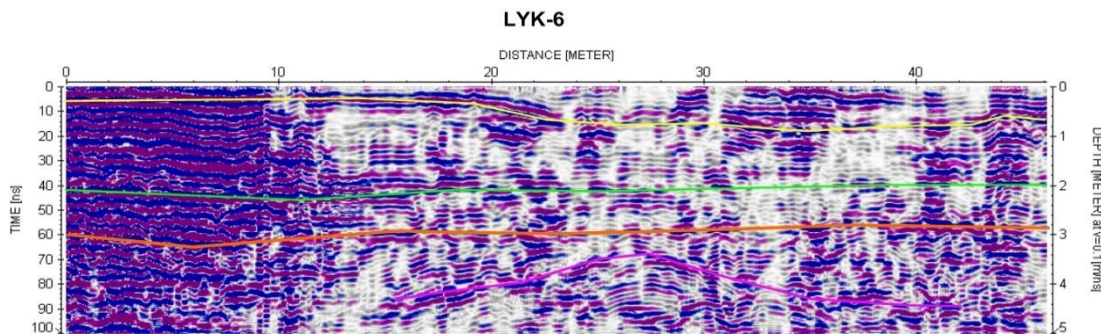


Figure 7. GPR profile located at the east side of the field in the same position with seismic line 3. The lines in color indicate the subsoil features alternations

DISCUSSION

First of all, the analysis of surface waves reveals the existence of four different layers. The surface layer consisting of a fairly cohesive material ($VS = 500-600\text{m/s}$), probably clay, extends to a depth of about 2.5 to 5 meters and is followed by a looser soil material less cohesive ($VS = 350-500\text{m/s}$). A highly compact soil material is expected at a depth varying from 5 to 10 meters ($VS = 650-800\text{m/s}$), which is lays on a slightly less cohesive one, which is shown at depths greater than 13 meters ($VS = 500-600\text{m/s}$). The seismic method cannot lead to reliable assumptions at further depths.

The GPR profiles indicate a manmade backfill in the first 0.3-0.8 meters of the from the surface (yellow line), while also no other structures are observed. In the GPR images, the first surface layer appears to extend to a depth ranging from 2.80m to 3.50m along the small side of the field from east to west. Inside the first layer, lenses of material of different composition can be seen at a depth of about 2.5m up to 3.5m. A possible second layer could be located at the profile acquired at the west side of the field, around the middle of the side at a depth of 3.5-4.5m, with an obvious change in its slope, since there is an elevation of this layer in the center of the section.

The 2-D seismic sections in the following two images are presented in correspondence with the GPR profiles, so that we can see that the results of the two methods in the first five meters fit quite well.

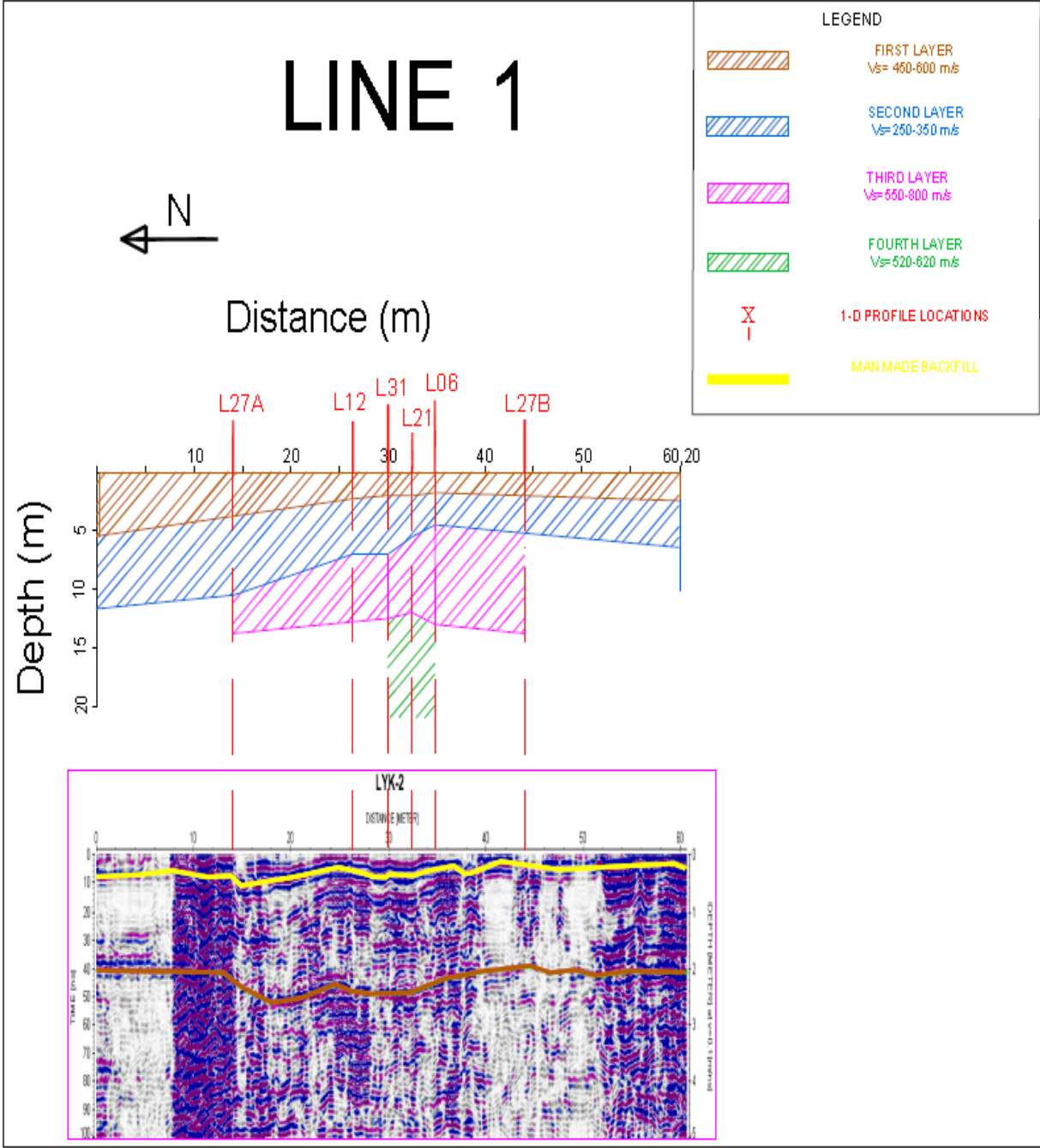


Figure 8. 2-D seismic model compared with GPR model alongside the east side (Line1)

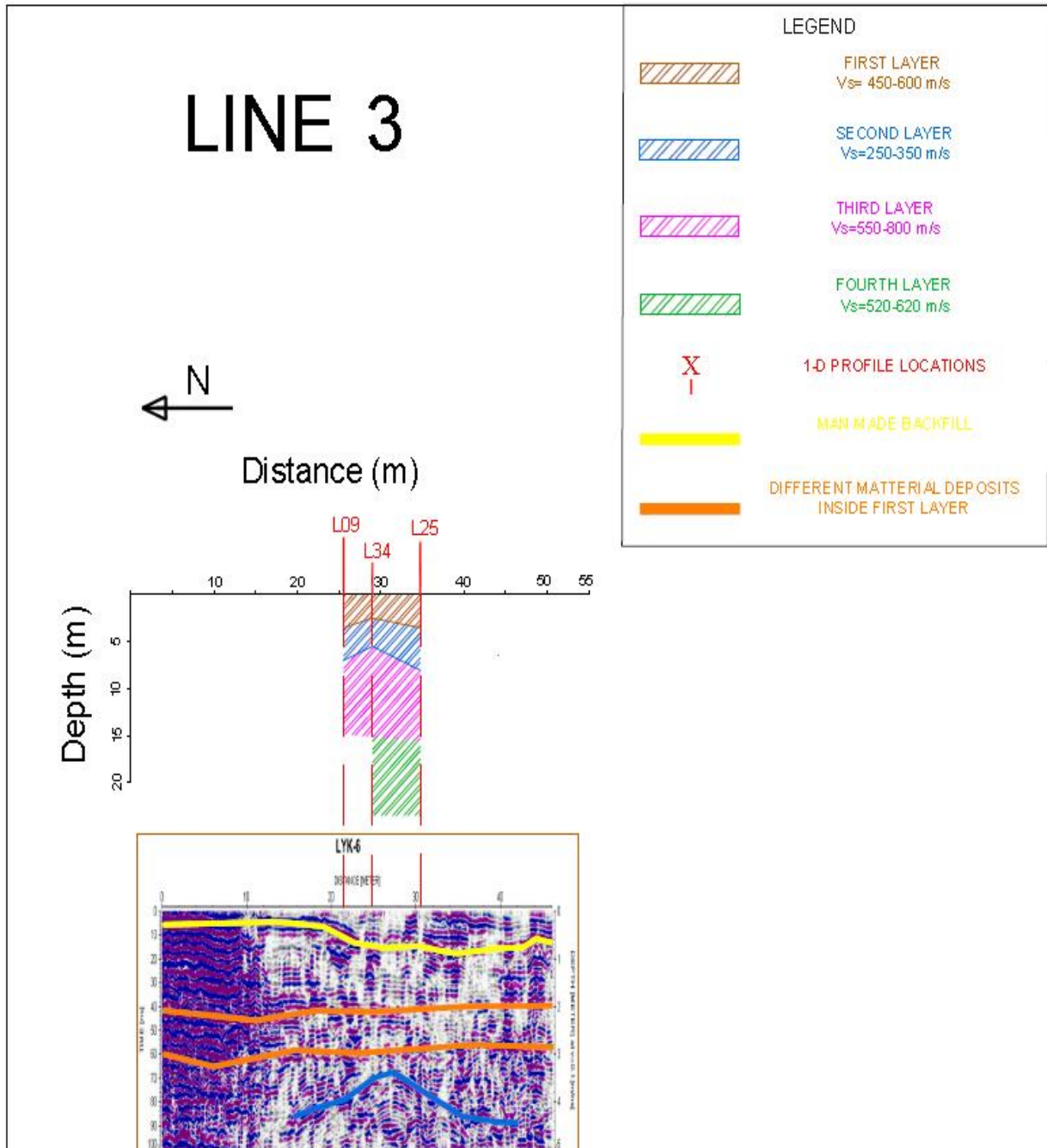
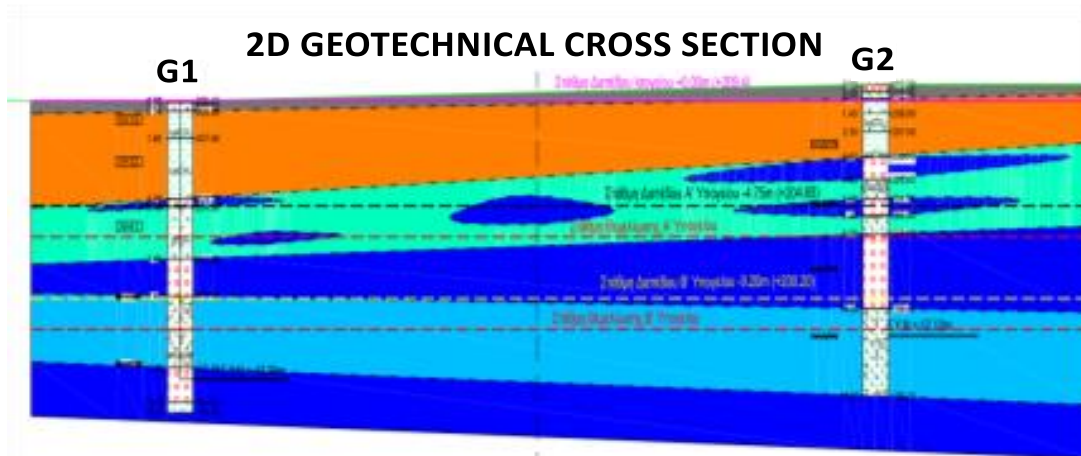
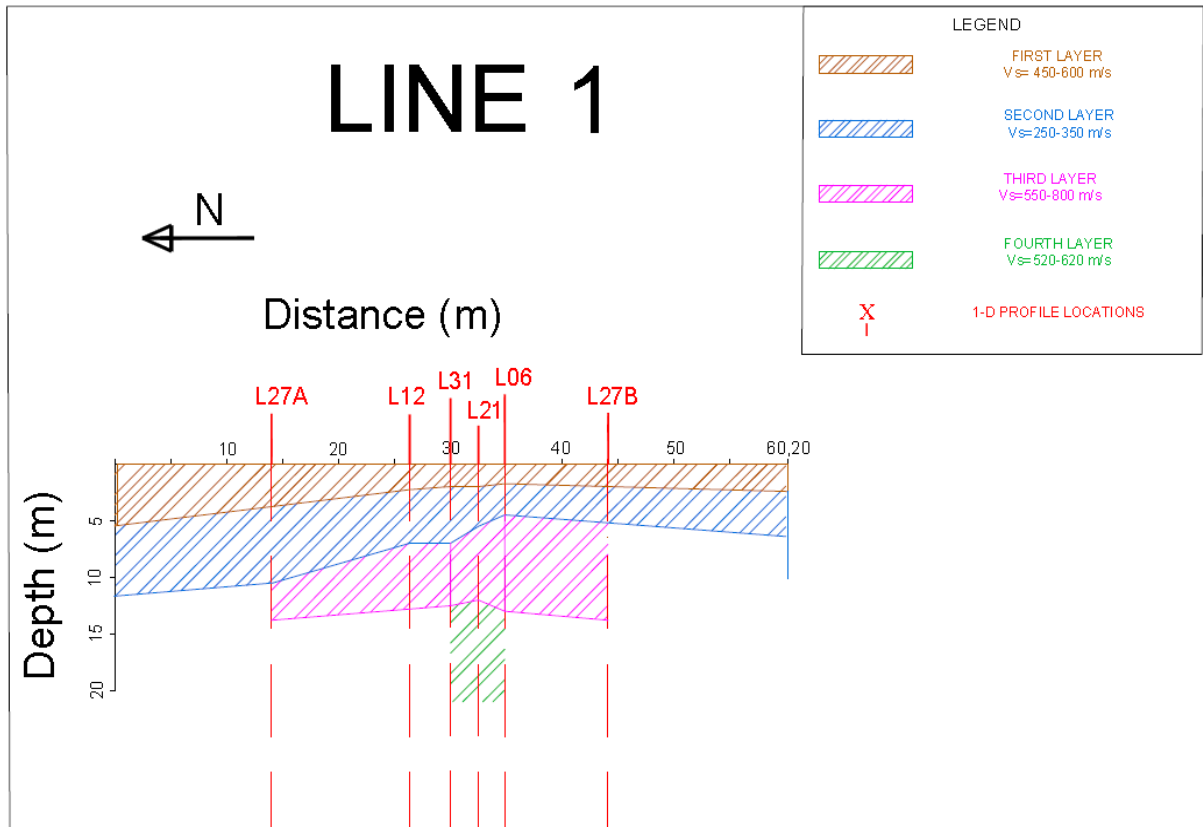


Figure 9. 2-D seismic model compared with GPR model alongside the west side (Line3) of the field

Also, it can be said that the correspondence of the results of the geophysical methods with the data obtained from the two boreholes, is considered satisfactory.



LEGEND

- man made backfill
- I Sandy Clay
- IIa Gravelly Clay to gravelly sandy clay
- IIb conglomerate
- IIc Gravelly clay to well graded clayey gravels

Figure 10. Comparison of 2-D seismic model in the east side (Line1) of the field with the boreholes data gathered where the clay/sand interfaces are visible, well as the deposits of conglomerate in the second layer.

CONCLUSIONS

On the basis of the geophysical survey carried out in the urban environment of Lykovrysi in Attiki, we conclude that the combination of Multichannel analysis of surface waves, with the GPR, is a valid and fast method to investigate and map the subsoil. Both methods lead to similar results, concerning the shallow depths, while the GPR method allows us to obtain further information. Furthermore, the already studied geology of the area, in addition to the data gathered by the two boreholes in the field of the survey, indicates that the results of the geophysical survey are reliable. The conclusions made in this analysis are able to contribute to the geotechnical survey concerning the foundation and construction of an underground parking lot. We can assume finally that the MASW method that has been used has been proved suitable for the urban environment of the area, eliminating the influence of the external noise, while according to the results the analysis of P waves would not have led to suitable results due to the reduction of the velocities of successive layers.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	5
1.2	ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	5

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1	ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ.....	7
2.1.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	7
2.1.2	ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ	8
2.1.3	ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ.....	10
2.1.3.1	Κύματα χώρου (Body waves)	10
2.1.3.2	Επιφανειακά κύματα.....	11
2.1.3.3	Ταχύτητες Διάδοσης των Σεισμικών Κυμάτων στα Διάφορα Πετρώματα.....	12
2.1.3.4	Εξασθένιση της Σεισμικής Ενέργειας.....	14
2.1.4	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	14
2.1.5	ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ.....	15
2.1.6	ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΣΕ ΜΕΣΟ ΜΕ ΣΤΡΩΣΕΙΣ.....	16
2.1.7	ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΘΛΑΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ ΥΠΟ ΓΩΝΙΑ....	18
2.1.8	ΟΡΙΑΚΑ ΔΙΑΘΛΩΜΕΝΑ ΚΥΜΑΤΑ.....	19
2.1.9	ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ.....	19
2.1.10	ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗ.....	20
2.1.11	ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ.....	21
2.1.11.1	Γενικά.....	21

2.1.11.2	Εργασίες Υπαίθρου.....	21
2.1.11.3	Πηγές Θορύβου.....	22
2.1.11.4	Καταγραφείς της εδαφικής κίνησης.....	23
2.1.11.5	Δρομοχρονικές καμπύλες.....	24
2.1.11.6	Προσδιορισμός της δομής του υπεδάφους.....	25
2.1.12	MASW (MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES)	32
2.2	ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ – GPR (GROUND PENETRATING RADAR)	38
2.2.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	38
2.2.2	ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ.....	40
2.2.3	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΥΠΑΙΘΡΟ.....	41
3.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ	
	ΕΛΑΦΟΥΣ ΣΤΗ ΔΙΕΘΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	
3.1	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ, ΕΚΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ	
	ΠΟΤΑΜΙΟΥ ΛΙΜΑΝΙΟΥ ΤΗΣ ΎΣΤΙΑ (ΙΤΑΛΙΑ) ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ	
	ΜΕΘΟΔΩΝ	44
3.1.1	ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	44
3.1.2	ΣΕΙΣΜΙΚΑ.....	45
3.1.3	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ.....	46
3.1.4	GPR.....	47
3.1.5	VIBRACORING.....	47
3.1.6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	47
3.1.7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	52

3.2	GPR ΚΑΙ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟ ΧΩΡΙΟ MIRABELLO (ΣΕΙΣΜΟΣ ΕΝΤΑΣΗΣ 5.9R, 2012).....	53
3.2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	53
3.2.2	ΜΕΘΟΔΟΙ	54
3.2.3	ΣΥΖΗΤΗΣΗ	57
3.2.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	61
3.3	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ S ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΙΚΡΟΥ ΒΑΘΟΥΣ 9 ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΣΕ ΤΡΙΣΔΙΑΤΑΤΗ ΜΟΡΦΗ, ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΚΥΜΑΤΩΝ RAYLEIGH – ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΔΙΟΥ.....	62
3.3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	62
3.3.2	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	64
3.3.3	3-D ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ MASW.....	64
3.3.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ 3-D ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΛΛΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ.....	66
3.3.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	67
4.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ ΣΤΗ ΛΥΚΟΒΡΥΣΗ	
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	69
4.2	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	70
4.3	ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ.....	73
4.3.1	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	73

4.3.2	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	75
4.3.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	77
4.3.4	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	95
4.4	ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ.....	97
4.4.1	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	97
4.4.2	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	99
4.4.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	100
4.4.4	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	102
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
5.1	ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	104
5.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	107
6.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	108

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική ανασκόπηση

Η επιστήμη της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής αναλύει και χρησιμοποιεί φυσικά φαινόμενα που υφίστανται ή δημιουργούνται στη Γη, κάνει μετρήσεις των χαρακτηριστικών μεγεθών αυτών στην επιφάνεια, στον αέρα ή μέσα στη Γη, με σκοπό την αποτύπωση της μορφής του υπεδάφους που χαρακτηρίζεται κάθε φορά από συγκεκριμένες φυσικές ιδιότητες. Τέτοια φυσικά φαινόμενα είναι ο ηλεκτρισμός, ο μαγνητισμός, η βαρύτητα, ο ηλεκτρομαγνητισμός, η διάδοση σεισμικών κυμάτων κλπ., ενώ χαρακτηριστικές φυσικές ιδιότητες είναι αντίστοιχα η πυκνότητα, η μαγνητική επιδεκτικότητα, η διηλεκτρική σταθερά, η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, η αγωγιμότητα και το αντίστροφο της, η ειδική αντίσταση, κλπ.

Με λίγα λόγια, σκοπός της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής είναι ο εντοπισμός και η απεικόνιση δομών στο στερεό φλοιό της Γης, τόσο επιφανειακών (σε βάθος μερικών μέτρων) όσο και βαθύτερων (σε ορισμένες περιπτώσεις μέχρι και μερικές χιλιάδες μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, όπως στην περίπτωση ερευνών για υδρογονάνθρακες). Επί του πρακτέου, η σημασία της απεικόνισης όλων αυτών των δομών με τη χρήση των γεωφυσικών μεθόδων είναι μεγάλη καθώς βοηθάει στον εντοπισμό κοιτασμάτων πετρελαίου, υδροφόρων σχηματισμών, αρχαιοτήτων, κοιτασμάτων μεταλλεύματος. Τέλος, σημαντική είναι η συμβολή των γεωφυσικών ερευνών σε στην αντιμετώπιση ζητημάτων γεωτεχνικής φύσεως.

Σε αυτά τα ζητήματα μπορεί να δώσει λύση η εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων, παρέχοντας σημαντικές πληροφορίες για το υπέδαφος και καθιστώντας πραγματοποιήσιμη και ασφαλή την κατασκευή δομικών έργων και λοιπών κατασκευών. Αυτό συμβαίνει, διότι αποτελούν φθηνές μεθόδους, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν σε περιβάλλοντα μειωμένου χώρου, είναι μη καταστρεπτικές και είναι γρήγορες στην εφαρμογή τους. Πολλές φορές, μάλιστα, η εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων συμπληρώνει την υπάρχουσα γεωλογική γνώση, και ο συνδυασμός τους με γεωτεχνικές μεθόδους, είναι απαραίτητος για την εύρεση λύσης.

1.2 Στόχος και αντικείμενο της εργασίας

Ο επιδιωκόμενος στόχος της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας είναι ο προσδιορισμός της στρωματογραφίας σε οικόπεδο στη Λυκόβρυση Αττικής, με τη χρήση γεωφυσικών ερευνών. Ειδικότερα, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν θα συμβάλει στην εξακρίβωση και στην ασφαλέστερη γενίκευση των δεδομένων που έχουν ληφθεί από δύο γεωτρήσεις εντός του πεδίου έρευνας για τις ανάγκες γεωτεχνικής μελέτης.

Τον καθορισμό του επιδιωκόμενου στόχου ακολούθησε η βιβλιογραφική αναζήτηση συναφών γεωφυσικών ερευνών με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας σε διεθνές επίπεδο. Από τις περιπτώσεις των ερευνών που εξετάστηκαν αντλήθηκαν χρήσιμες πληροφορίες, αφενός μεν για την επιλογή των μεθόδων που εφαρμόστηκαν, αφετέρου δε για την αξιοπιστία και την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας χρησιμοποιήθηκαν η σεισμική μέθοδος και η μέθοδος του γεωραντάρ.

Αναφορικά με τις σεισμικές μετρήσεις τα δεδομένα επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν με τη μέθοδο των επιφανειακών κυμάτων(MASW), η οποία και προτιμήθηκε της μεθόδου της σεισμικής διάθλασης λόγω του σημαντικού θορύβου που αναμένεται σε συνθήκες αστικού περιβάλλοντος. Βέβαια, ανεξάρτητα από αυτό, στην πορεία της επεξεργασίας, λόγω μη συνεχόμενης αύξησης των ταχυτήτων VS των στρωμάτων με την αύξηση του βάθους, δημιουργείται «τυφλή ζώνη». Το γεγονός αυτό οδηγεί σε υπερεκτίμηση του πάχους των στρωμάτων και ενισχύει την ορθότητα της επιλογής της μεθόδου MASW.

Επιπρόσθετα, με την επιλογή της μεθόδου του γεωραντάρ επιτυγχάνεται η περαιτέρω εξακρίβωση και συμπλήρωση της ερμηνείας των αποτελεσμάτων της σεισμικής μεθόδου αναφορικά με τα μικρότερα βάθη. Παρέχεται έτσι μεγαλύτερη ασφάλεια στον προσδιορισμό της στρωματογραφίας του υπεδάφους, ενώ παράλληλα γίνεται και έλεγχος για ανθρωπογενείς δομές.

Στην συνέχεια αναλύονται τα θεωρητικά στοιχεία των μεθόδων, μελέτες περιπτώσεων οι οποίες αναφέρονται σε παρόμοιες έρευνες, θα γίνει παρουσίαση της γεωλογίας της περιοχής έρευνας. Τέλος, θα παρουσιαστεί η διαδικασία της επεξεργασίας των δεδομένων των μετρήσεων και τα αποτελέσματα της εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων, συνοδευόμενα από συμπεράσματα και το σχολιασμό τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Σεισμική μέθοδος

Οι σεισμικές μέθοδοι, οι οποίες εφαρμόζονται κυρίως στη σεισμική έρευνα, αποτελούν ενεργητικές γεωφυσικές μεθόδους. Η κίνηση του εδάφους, που προκαλείται από κάποια πηγή στη σεισμική διασκόπηση, μετριέται σε διαφορετικές αποστάσεις από την πηγή. Οι σεισμικές μέθοδοι είναι οι σημαντικότερες γεωφυσικές τεχνικές, τόσο λόγω του κόστους, όσο και από το πλήθος των επιστημόνων που καταπιάνονται με αυτές. Από τα κυριότερα πλεονεκτήματά τους είναι η μεγάλη τους ακρίβεια και ανάλυση, καθώς και η διεισδυτικότητα τους. Οι σεισμικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως στην αναζήτηση πετρελαίου, όπου η όρυξη μιας ερευνητικής γεώτρησης σπάνια αποφασίζεται χωρίς τη λήψη σεισμικών δεδομένων. Οι σεισμικές μέθοδοι είναι επίσης πολύ χρήσιμες σε γεωτεχνικές μελέτες, όπου χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του βάθους του βραχώδους υποβάθρου, κατά τη θεμελίωση μεγάλων τεχνικών έργων, καθώς επίσης και για τον εντοπισμό δομών, όπως υπόγεια κανάλια, όπου μπορεί να βρίσκονται συγκεντρωμένα βαρέα ορυκτά.

2.1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα σεισμικά κύματα είναι φορείς που μεταφέρουν πληροφορία για τη δομή του εσωτερικού της Γης. Τα κύματα αυτά προκαλούν την ταλάντωση των υλικών σημείων, γεγονός που σημαίνει ότι τα σωματίδια της ύλης απομακρύνονται από τη θέση ισορροπίας τους προσωρινά, κινούμενα μπροστά – πίσω μέχρι να σταματήσουν. Η ικανότητα του υλικού να παραμορφωθεί προσωρινά με το πέρασμα των σεισμικών κυμάτων μπορεί να περιγραφεί από τις ελαστικές ιδιότητες του. Αυτές οι φυσικές ιδιότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το διαχωρισμό των διαφορετικών υλικών. Οι ελαστικές σταθερές επιδρούν στις ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων μέσα από τα υλικά αυτά.

Κυρίως χρησιμοποιούνται ελεγχόμενες σεισμικές πηγές, οι οποίες παρέχουν πληροφορίες τόσο για τις σεισμικές ταχύτητες, όσο και για τη στρωματογραφία του φλοιού της Γης. Η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη χαρτογράφηση του υποβάθρου, τα πάχη του φλοιού και τη σεισμική ταχύτητα του ανωτέρου μανδύα της Γης. Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης απεικονίζει καλύτερα και με λεπτομέρεια τη στρωματογραφική δομή των ιζηματογενών λεκανών και δίνει μια γενική δομή για το βαθύτερο φλοιό της Γης. Η σεισμική ταχύτητα για βαθύτερα μέρη της Γης υπολογίζεται με τη μελέτη των σεισμικών κυμάτων που προέρχονται από ένα μεγάλο σεισμό.

2.1.2 ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ

Οι σεισμικές μέθοδοι στηρίζονται στη διάδοση κυμάτων σε ελαστικό μέσο. Ένα ελαστικό μέσο ορίζεται ως εξής:

- Ισότροπο, όταν σε κάθε σημείο του όλα τα ανύσματα σεισμικής ταχύτητας έχουν το ίδιο μέτρο, ανεξάρτητα από τη φορά τους.
- Ομοιογενές, όταν έχουμε ίσα ανύσματα σεισμικής ταχύτητας σε όλα του τα σημεία.

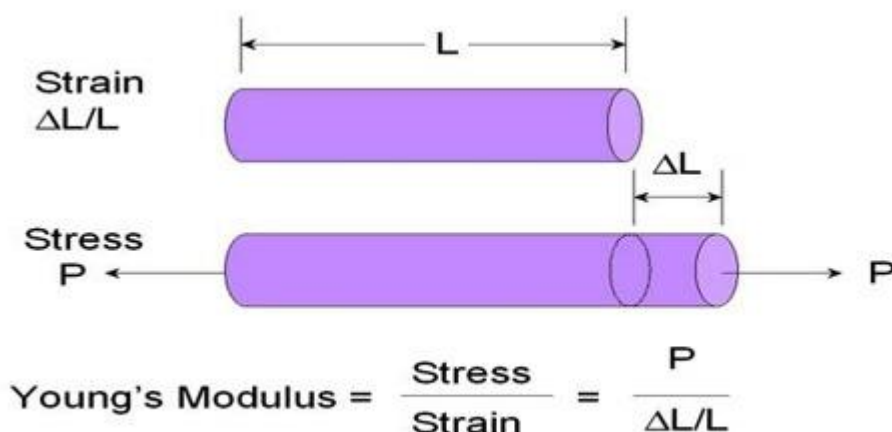
Χάρη απλοποίησης της περιγραφής της διάδοσης σεισμικών κυμάτων, το μέσο διάδοσης θεωρείται ομοιογενές και ισότροπο, δηλαδή η διάδοση των σεισμικών ακτινών είναι ίδια ανεξάρτητα της κατεύθυνσης και της θέσης στο μέσο.

Ο τρόπος και η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων μέσω των υλικών ελέγχεται από τις ελαστικές ιδιότητες τους. Τα υλικά που υπακούουν στο νόμο του Hook είναι ελαστικά με γραμμική σχέση ανάμεσα στην τάση και την παραμόρφωση.

Μέτρο του Young ή μέτρο διαμήκους ελαστικότητας E

Είναι το μέτρο του λόγου της τάσης προς την παραμόρφωση και δίνεται από τη σχέση:

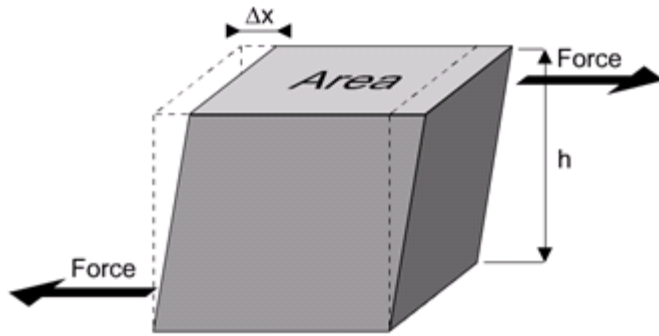
$$E = \frac{F/A}{\Delta l/l} = \frac{F * l}{A * \Delta l}$$



Εικόνα 10. Μέτρο ελαστικότητας

Το αντίστροφο του E, δηλαδή το 1/E, ονομάζεται συντελεστής ελαστικότητας.

1. Μέτρο Ακαμψίας ή Διατμητικής Ελαστικότητας, κ (Rigidity ή Shear modulus). Είναι το μέτρο του λόγου τάσης προς την παραμόρφωση, που έχει σαν αποτέλεσμα να παραμορφωθεί το σώμα χωρίς την αλλαγή του όγκου του.



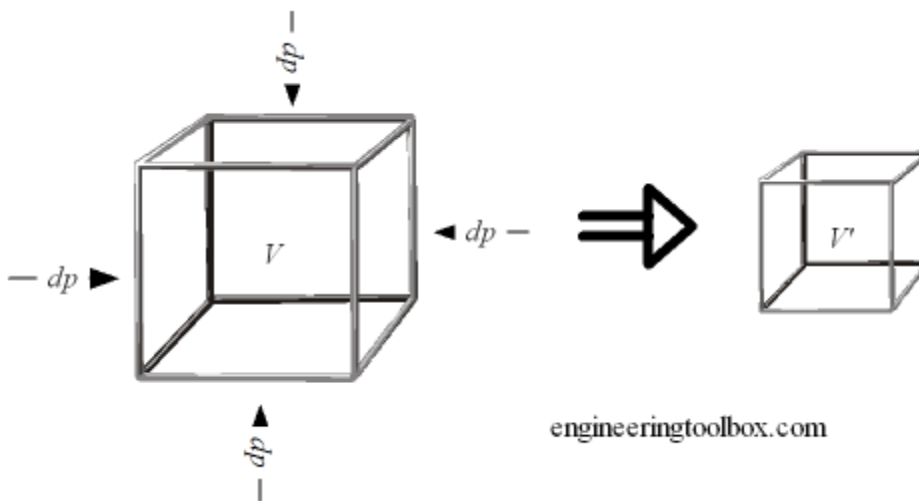
Εικόνα 11. Μέτρο ακαμψίας

$$\mu = \frac{F/A}{\tan\theta}$$

Μέτρο κυβικής ελαστικότητας, k (B modulus)

Είναι το μέτρο του λόγου τάσης προς την παραμόρφωση, με αποτέλεσμα τη μεταβολή του όγκου που δίνεται από τη σχέση:

$$k = \frac{F/A}{\Delta V/V} = \frac{F * V}{\Delta V * A}$$



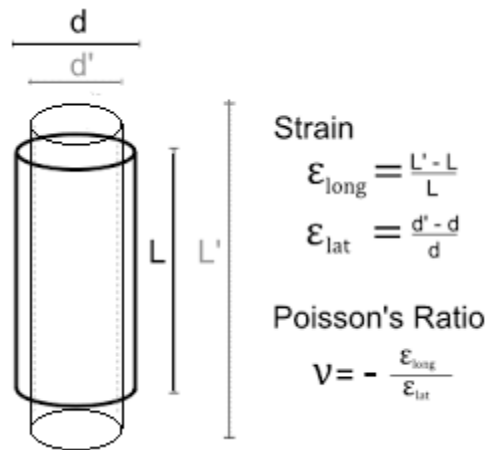
Εικόνα 12. Μέτρο κυβικής ελαστικότητας

Το αντίστροφο του k , δηλαδή το $1/k$, ονομάζεται συντελεστής συμπίεστότητας.

- Λόγος του Poisson, σ .

Είναι το μέτρο της μεταβολής του σχήματος ενός ελαστικού σώματος και εκφράζεται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l}$$



Εικόνα 13. Λόγος του Poisson

Ο λόγος του Poisson δεν μπορεί ποτέ να ξεπεράσει την τιμή 0,5. Για τα περισσότερα πετρώματα είναι περίπου 0,25. Οι τιμές κυμαίνονται από 0,05 για τα πολύ σκληρά μέχρι 0,45 για τα πολύ μαλακά – χαλαρά υλικά.

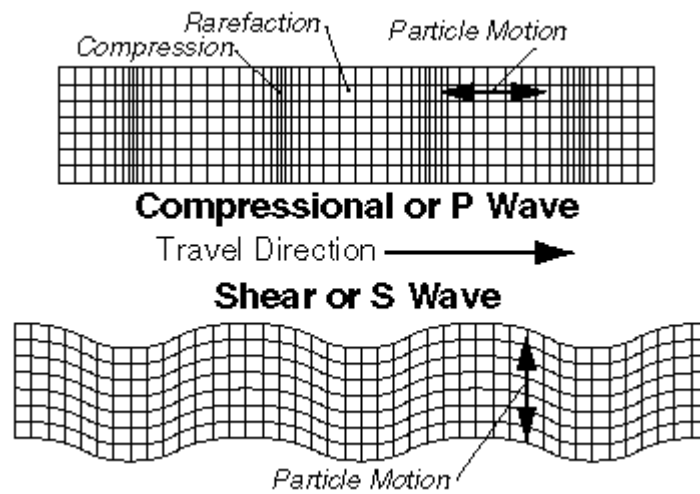
2.1.3 ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

2.1.3.1 Κύματα χώρου (Body waves)

Εφόσον κάθε ελαστικό μέσο μπορεί να υποστεί δύο είδη παραμορφώσεων, τη συμπίεστική και την εφαπτομενική, έτσι και όλα τα ελαστικά κύματα είναι δύο ειδών, τα επιμήκη και τα εγκάρσια.

- Επιμήκη κύματα.
Είναι κύματα τα οποία σχετίζονται με τη μεταβολή του όγκου ή της πυκνότητας του μέσου διάδοσης. Λέγονται και P κύματα και είναι τα πρώτα που φθάνουν και καταγράφονται στους σεισμολογικούς σταθμούς. Διαδίδονται και σε στερεό και σε υγρό μέσο και δεν είναι τόσο καταστρεπτικά όσο τα εγκάρσια κύματα.
Λέγονται επίσης και κύματα συμπίεσης, γιατί δημιουργούν διαδοχικές συμπίεσεις και αραιώσεις στα υλικά σημεία του μέσου διάδοσης, παράλληλες προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος.
- Εγκάρσια κύματα.
Είναι κύματα τα οποία διαδίδονται με διατμητική μόνο ελαστική παραμόρφωση του μέσου διάδοσης, δηλαδή τα υλικά σημεία πολώνονται σε ορθή γωνία προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Λέγονται και S κύματα και φθάνουν μετά τα P στους σταθμούς καταγραφής. Δεδομένου ότι τα υγρά δεν επιδέχονται διατμητικές

τάσεις, τα εγκάρσια κύματα δεν διαδίδονται σε υγρό μέσο, σε ρευστοποιημένο δε μέσο το πλάτος τους μειώνεται σημαντικά (Βασικές Έννοιες Σεισμολογίας, Κ. Σπυράκος, Ε. Τουτουδάκη).



Εικόνα 14. Κύματα S και P

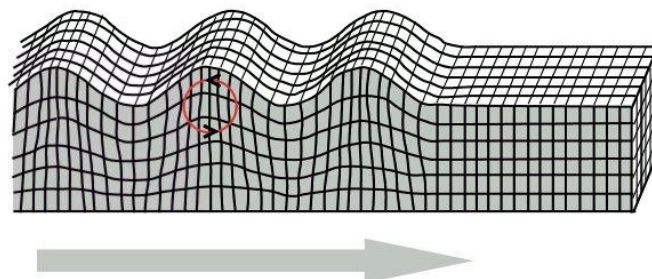
2.1.3.2 Επιφανειακά κύματα

Είναι τα κύματα τα οποία περιορίζονται στην ελεύθερη επιφάνεια της Γης, τα πλάτη τους δηλαδή είναι μεγάλα, κοντά στην επιφάνεια της γης και ελαττώνονται όσο αυξάνεται το βάθος. Λόγω της μικρής τους συχνότητας, του αυξημένου πλάτους και της μεγάλης τους διάρκειας είναι ιδιαίτερος καταστροφικά. Τα κύματα αυτά έχουν τη μικρότερη ταχύτητα διάδοσης από όλα τα είδη σεισμικών κυμάτων και διακρίνονται σε δύο τύπους, στα κύματα Rayleigh και τα Love.

- **Κύματα Rayleigh**

Κατά τη διάδοση των κυμάτων αυτών τα υλικά σημεία του μέσου μετάδοσης διαγράφουν ελλειπτικές τροχιές των οποίων οι μεγάλοι άξονες είναι κατακόρυφοι προς την διεύθυνση μετάδοσης του κύματος οι δε μικροί παράλληλοι προς αυτήν. Το πλάτος ταλάντωσης μειώνεται εκθετικά με το βάθος, λόγω δε μικρότερης ταχύτητας καταγράφονται από τα οριζόντια και κατακόρυφα σεισμόμετρα πάντα τελευταία.

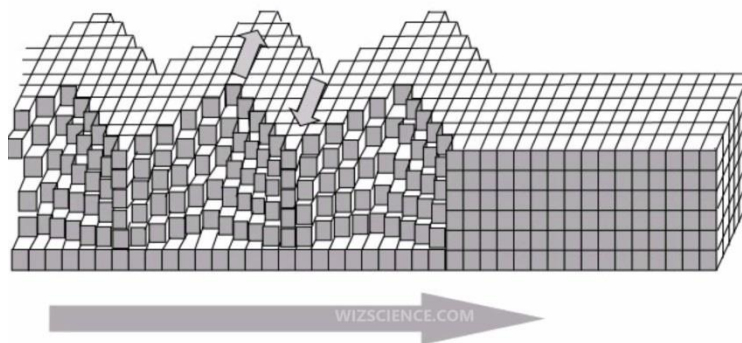
Rayleigh Wave



Εικόνα 15. Κύμα Rayleigh

- **Κύματα Love**
Για τη δημιουργία τους είναι απαραίτητη η ύπαρξη στρώματος ορισμένου πάχους πάνω σε ημιχώρο. Κατά τη διάδοσή τους τα υλικά σημεία του μέσου κινούνται με οριζόντιες ταλαντώσεις κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης, πρόκειται δηλαδή για κύματα οριζοντίως πολωμένα. Επειδή ακριβώς δεν διαθέτουν κατακόρυφη συνιστώσα, καταγράφονται μόνο από τους οριζόντιους σειсмоγράφους (Βασικές Έννοιες Σεισμολογίας, Κ. Σπυράκος, Ε. Τουτουδάκη).

Love Wave



Εικόνα 16. Κύμα Love

2.1.3.3 Ταχύτητες Διάδοσης των Σεισμικών Κυμάτων στα Διάφορα Πετρώματα

Λόγω των διαφορών που παρουσιάζουν ως προς τη σύνθεση, τη δομή, το πορώδες, το σχήμα των κόκκων, το βαθμό διάταξής τους και τα ρευστά, τα διάφορα πετρώματα διαφέρουν ως προς τις ελαστικές τους παραμέτρους και τις πυκνότητες τους με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό τους. Η γνώση της ταχύτητας των διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων των στρωμάτων είναι σημαντική γιατί χρησιμοποιείται στις σεισμικές έρευνες για τη μετατροπή των χρόνων διάδοσης σε βάθος και γιατί δίνει την πρώτη ένδειξη για τους σχηματισμούς και τη λιθολογία του υπεδάφους, αλλά και τη φύση των ρευστών στους πόρους τους.

Μελέτες πάνω στις ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στα πετρώματα οδηγούν στους εξής εμπειρικούς κανόνες:

1. Η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων P αυξάνει με την πίεση (δραστικά πάνω από τα 100MPa).
2. Οι σεισμικές ταχύτητες στον ψαμμίτη και στο σχιστόλιθο δείχνουν συστηματική αύξηση με το βάθος και την ηλικία του σχηματισμού λόγω προοδευτικής συμπύκνωσης και συγκόλλησης.
3. Στη μεγάλη σειρά των ιζηματογενών πετρωμάτων η ταχύτητα των σεισμικών

κυμάτων P σχετίζεται με την πυκνότητα και έτσι η πυκνότητα των σχηματισμών σε πολύ μεγάλο βάθος είναι δυνατόν να υπολογιστεί μέσω των ταχυτήτων που βρίσκονται με σεισμικές μεθόδους.

Στη μεγάλη σειρά ιζηματογενών πετρωμάτων η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων P σχετίζεται με την πυκνότητα. Έτσι, η πυκνότητα σχηματισμών σε μεγάλο βάθος είναι δυνατόν να υπολογιστεί μέσω των ταχυτήτων που ευρίσκονται με σεισμικές μεθόδους.

Υλικό	V _p (Km/s)
Μη στρωματοωμένα πετρώματα	
Άμμος (ξηρή)	0.2 – 1.0
Άμμος (κορεσμένη)	1.5 – 2.0
Άργιλος	1.0 – 2.5
Μόνιμο στρώμα πάγου	3.5 – 4.0
Ιζηματογενή πετρώματα	
Ψαμμίτες	2.0 – 6.0
Τεταρτογενής Ψαμμίτης	2.0 – 2.5
Ανθρακούχος Ψαμμίτης	4.0 – 4.5
Κάμβριος Χαλαζίτης	5.5 – 6.0
Ασβεστόλιθοι	2.0 – 6.0
Κρητιδικός Ασβεστόλιθος	2.0 – 2.5
Βιοκλαστικός Ασβεστόλιθος	3.0 – 4.0
Ανθρακούχος Ασβεστόλιθος	5.0 – 5.5
Δολομίτες	2.5 – 6.5
Ορυκτό Άλας	4.5 – 5.0
Ανυδρίτης	4.5 – 6.5
Γύψος	2.0 – 3.5
Πυριγενή / Μεταμορφωμένα Πετρώματα	
Γρανίτης	5.5 – 6.0
Γάββρος	6.5 – 7.0
Υπερμαφικά πετρώματα	7.5 – 8.5
Σερπεντινίτης	5.5 – 6.5
Ρευστά πόρων	
Αέρας	0.3
Νερό	1.4 – 1.5
Πάγος	3.4
Πετρέλαιο	1.3 – 1.4
Άλλα υλικά	
Χάλυβας	6.1
Σίδηρος	5.8
Αλουμίνιο	6.6
Σκυρόδεμα	3.6

Πίνακας 1. Σεισμικές ταχύτητες των P κυμάτων για διάφορα υλικά

2.1.3.4 Εξασθένιση της Σεισμικής Ενέργειας

Καθώς ένας σεισμικός παλμός διαδίδεται, η αρχική ενέργεια E η οποία μεταδίδεται από την πηγή, διανέμεται σε μία σφαίρα με διαρκώς αυξανόμενη ακτίνα. Εάν η ακτίνα της σφαίρας είναι r , η ποσότητα της ενέργειας που περιλαμβάνεται σε μια μοναδιαία περιοχή της, είναι $E/4\pi r^2$. Κατά μήκος μιας ακτινικής διαδρομής λοιπόν, η ενέργεια της ακτίνας μειώνεται συναρτήσει του r^{-2} , λόγω της επίδρασης της γεωμετρικής διάδοσης της ενέργειας, ενώ το πλάτος του κύματος, το οποίο σε ομογενές υλικό είναι ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας της ενέργειας του κύματος, μειώνεται συναρτήσει του αντιστρόφου της ακτίνας.

Μια επιπλέον αιτία απώλειας ενέργειας, κατά μήκος μιας σεισμικής ακτίνας, οφείλεται στην ατελή ελαστικότητα του εδάφους, όσον αφορά στην απόκρισή του στη διέλευση σεισμικών κυμάτων. Η ελαστική ενέργεια απορροφάται βαθμιαία από το μέσο, λόγω εσωτερικών απωλειών τριβής, γεγονός το οποίο οδηγεί τελικά στην πλήρη εξαφάνισή της. Ο συντελεστής απορρόφησης α εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας το οποίο χάθηκε, κατά τη μετάδοση του σεισμικού παλμού, σε απόσταση ίση με ένα πλήρες μήκος κύματος λ .

Για το εύρος των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στη σεισμική διασκόπηση, ο συντελεστής απορρόφησης θεωρείται ότι είναι ανεξάρτητος της συχνότητας. Εάν η ποσότητα απορρόφησης ανά μήκος κύματος είναι σταθερή, είναι προφανές ότι τα κύματα υψηλών συχνοτήτων εξασθενούν ταχύτερα από αυτά που χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες συχνότητες, συναρτήσει του χρόνου ή της απόστασης.

2.1.4 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Συγκριτικά με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στη βαρυτομετρική, τη μαγνητική ή ακόμα και στη γεωηλεκτρική διασκόπηση, η πολυπλοκότητα και το μέγεθος του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στη σεισμική διασκόπηση είναι εντυπωσιακά. Ένα τυπικό σύστημα απόκτησης σεισμικών δεδομένων αποτελείται από τα παρακάτω:

1. Σεισμική πηγή (Seismic Source) - Πρόκειται για συσκευές που διοχετεύουν σεισμική ενέργεια στο έδαφος. Μπορεί να διαφέρουν πολύ σε μέγεθος και πολυπλοκότητα. Όλες όμως έχουν τα εξής κοινά χαρακτηριστικά:
 - Μεγάλη ταχύτητα επανάληψης εκπομπής κύματος.
 - Σταθερότητα στη μορφή της κυματομορφής.
 - Μεγάλη ασφάλεια και μικρό κόστος συντήρησης.
 - Ικανότητα για απόδοση αρκετής ενέργειας.
 - Μικρή χρονική διάρκεια του σεισμικού κύματος.
 - Ελαχιστοποίηση του προκαλούμενου σεισμικού θορύβου.
2. Σεισμικοί Φωρατές – Αποτελούν διατάξεις οι οποίες μετατρέπουν τις σεισμικές δονήσεις σε ηλεκτρικό σήμα. Οι σεισμικοί φωρατές ξηράς (γεώφωνα)

βασίζονται στο ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο, ενώ οι θαλάσσιοι σεισμικοί φωρατές (υδρόφωνα) βασίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

i. Γεώφωνα

Αποτελούνται από ένα κινούμενο πηνίο και ένα μόνιμο μαγνήτη, στερεωμένο στο στέλεχος του οργάνου. Μόλις τα σεισμικά κύματα φτάσουν στο γεώφωνο, προκαλείται μια σχετική κίνηση του πηνίου ως προς το μαγνήτη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρεγερτικής δύναμης στα άκρα του πηνίου που είναι ανάλογη της ταχύτητας κίνησης του εδάφους (Αποστολόπουλος, 2008).

ii. Υδρόφωνα

Οι διατάξεις αυτές χρησιμεύουν για την ανίχνευση των κυμάτων πίεσης που προκαλούν οι θαλάσσιες σεισμικές πηγές. Οι μεταβολές πίεσης διαβιβάζονται μέσω του κελύφους του οργάνου επάνω σε λεπτά φύλλα χαλαζία, αναπτύσσοντας έτσι πιεζοηλεκτρικές τάσεις που είναι ανάλογες των μεταβολών πίεσης. Επομένως τα υδρόφωνα μετρούν επιταχύνσεις παρά ταχύτητες. Τα υδρόφωνα ευρίσκονται μέσα σε κατάλληλα σεισμικά καλώδια, τα οποία σύρονται μαζί με συστοιχίες αεροβόλων από κατάλληλα διαμορφωμένα πλοία.

- 3. Σύστημα Καταγραφής (Recording System) – Σειсмоγράφοι**, οι οποίοι αποτελούν συσκευές καταγραφής των σημάτων όπου κάθε γεώφωνο αντιστοιχεί σε κάθε κανάλι. Για γεωτεχνικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται σειсмоγράφοι 24 καναλιών που έχουν και δυνατότητες ενίσχυσης του σήματος ή εφαρμογής φίλτρων ανάλογα με το είδος του θορύβου.

2.1.5 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

1. Εκρηκτικά

Συνήθως στη Γεωφυσική χρησιμοποιούνται δύο τύποι: Τρινιτροτολουόλιο και Νιτρικό αμμώνιο. Τα εκρηκτικά συνήθως τοποθετούνται μέσα σε γεωτρήσεις, κάτω από το επιφανειακό στρώμα ή τον υδροφόρο ορίζοντα, για να ελαχιστοποιηθεί ο θόρυβος και να αυξηθεί η διάδοση της σεισμικής ενέργειας.

2. Σφυρί και Πίπτον Βάρος

Το σεισμικό σφυρί έχει βάρος 3 ή 5 kg. Στην περίπτωση αυτή ο χειριστής κραδαίνει το έδαφος. Αντί να χτυπάει απευθείας το έδαφος, είναι πιο σύνθητες, για καλύτερη ζεύξη, να χτυπάει μια μεταλλική πλάκα που βρίσκεται ακουμπισμένη (με καλή επαφή) στο έδαφος. Η σφύρα συνήθως συνδέεται με το σύστημα καταγραφής με καλώδιο. Μία ισχυρότερη σε απόδοση πηγή κρούσης είναι το πίπτον βάρος (dropping weight) το οποίο αποτελείται από ένα μεταλλικό δίσκο διαμέτρου 60 cm περίπου και βάρους 120 έως 150 kg ο οποίος πέπτει ελεύθερα από ύψος 2m περίπου και κρούει στο έδαφος.

3. Vibroseis

Το σύστημα είναι τοποθετημένο σε κατάλληλο φορτηγό. Το φορτηγό ανυψώνεται στηριζόμενο σε μια μεταλλική πλάκα που εφάπτεται του εδάφους. Χρησιμοποιούνται υδραυλικοί δονητές και η δόνηση μεταφέρεται στην πλάκα.

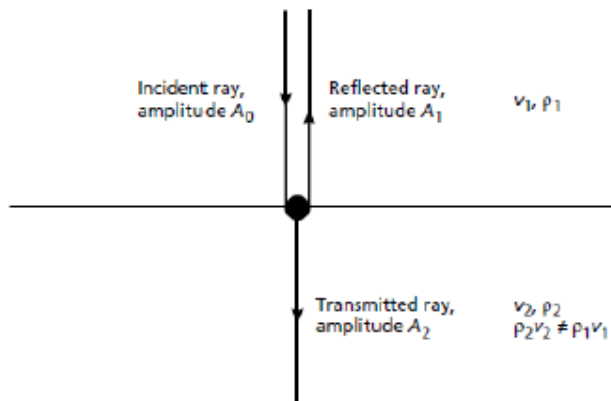
4. Αεροβόλα (Airgun)

Αποτελούν τις πιο συνηθισμένες θαλάσσιες σεισμικές πηγές. Περιέχουν αέρα σε θάλαμο υπό μεγάλη πίεση (10-15 MPa) ο οποίος εκτονώνεται στο νερό και προκαλεί δονήσεις. Υπάρχουν αεροβόλα διαφόρων διαστάσεων ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η παραγωγή κυμάτων διαφόρων συχνοτήτων και ενεργειών.

2.1.6 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΣΕ ΜΕΣΟ ΜΕ ΣΤΡΩΣΕΙΣ

Στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο στρώσεων πετρωμάτων παρουσιάζεται αλλαγή στην ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, η οποία οφείλεται στις διαφορετικές φυσικές ιδιότητες των στρωμάτων.

Σε μια τέτοια διεπιφάνεια η ενέργεια ενός σεισμικού παλμού διαιρείται σε διερχόμενους και ανακλώμενους σεισμικούς παλμούς. Τα σχετικά πλάτη των παλμών αυτών, σε σχέση με τις ταχύτητες και τις πυκνότητες των δύο στρωμάτων, δίνονται από τις εξισώσεις του Zoeppritz. (Telford et al. 1976)



Εικόνα 17. Κατακόρυφα προσπίπτουσα σεισμική ακτίνα (Keary & Brooks)

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 17, μια διερχόμενη σεισμική ακτίνα, πλάτους A_2 κινείται μέσα από τη διεπιφάνεια, με την ίδια διεύθυνση με αυτή της προσπίπτουσας ακτίνας, ενώ μια ανακλώμενη ακτίνα, πλάτους A_1 και αντίθετης διεύθυνσης, επιστρέφει στην επιφάνεια.

Η ολική ενέργεια της διερχόμενης και ανακλώμενης σεισμικής ακτίνας θα πρέπει να ισούται με την ενέργεια της αρχικά προσπίπτουσας ακτίνας. Οι σχετικές αναλογίες της ενέργειας που διέρχεται και αυτής που ανακλάται καθορίζονται από την αντίθεση ακουστικής εμπέδησης (Z) κατά μήκος της διεπιφάνειας. Η ακουστική εμπέδηση ενός πετρώματος είναι το γινόμενο της πυκνότητάς του επί την ταχύτητα των P-κυμάτων που το χαρακτηρίζει. Δηλαδή:

$$Z = \rho \cdot v$$

Ο συντελεστής ανάκλασης (R) είναι ο λόγος του πλάτους A_1 της ανακλώμενης ακτίνας προς το πλάτος A_0 της προσπίπτουσας. Δηλαδή:

$$R = \frac{A_1}{A_0}$$

Για μια κατακόρυφα προσπίπτουσα ακτίνα, ο συντελεστής R με τη λύση των εξισώσεων του Zoeppritz, γράφεται:

$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} R = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}$$

Όπου:

ρ_1, ρ_2 : οι πυκνότητες του πρώτου και δεύτερου στρώματος αντίστοιχα,

v_1, v_2 : οι ταχύτητες των P-κυμάτων πρώτου και δεύτερου στρώματος,

Z_1, Z_2 : οι ακουστικές εμπεδήσεις πρώτου και δεύτερου στρώματος.

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι: $-1 \leq R \leq +1$

Αρνητικές τιμές για το R συνεπάγονται αλλαγή φάσης κατά π (180°) στην ανακλώμενη ακτίνα.

Ο συντελεστής διάδοσης (T) είναι ο λόγος του πλάτους A_2 της διερχόμενης ακτίνας, προς το πλάτος A_0 της προσπίπτουσας. Δηλαδή: $T = A_2/A_0$

Για μια κατακόρυφα προσπίπτουσα ακτίνα, ο συντελεστής T με τη λύση των εξισώσεων του Zoeppritz, γράφεται:

$$T = \frac{2\rho_1 v_1}{v_2 \rho_2 + \rho_1 v_1} \Rightarrow T = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

Οι συντελεστές ανάκλασης και διάδοσης εκφράζονται μερικές φορές, συναρτήσει της ενέργειας αντί του πλάτους των σεισμικών κυμάτων. Εάν η ένταση της ενέργειας ορίζεται ως η ποσότητα της ενέργειας η οποία διέρχεται από μια μοναδιαία περιοχή, κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, σε μοναδιαίο χρόνο, έτσι ώστε I_0, I_1 και I_2 να είναι οι εντάσεις της προσπίπτουσας, ανακλώμενης και διερχόμενης ενέργειας αντίστοιχα, έχουμε:

$$R' = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}\right)^2$$

$$T' = \frac{I_2}{I_0} \Rightarrow T' = \left(\frac{4Z_1Z_2}{Z_2 + Z_1}\right)^2$$

Όπου:

R' και T' : οι συντελεστές ανάκλασης και διάδοσης αντίστοιχα εκφρασμένοι συναρτήσει της ενέργειας.

Εάν ο συντελεστής ανάκλασης έχει μηδενική τιμή, όλη η προσπίπτουσα ενέργεια διέρχεται από τη διεπιφάνεια. Αυτή είναι η περίπτωση της μη ύπαρξης διαφοράς των ακουστικών εμπεδήσεων κατά μήκος μιας διεπιφάνειας ($Z_2 = Z_1$), ακόμη και εάν οι τιμές της πυκνότητας και της συχνότητας των P-κυμάτων διαφέρουν στα δύο στρώματα.

Εάν ο συντελεστής ανάκλασης ισούται με -1 ή $+1$, όλη η προσπίπτουσα ενέργεια ανακλάται. Μια καλή προσέγγιση της περίπτωσης αυτής αποτελεί η ελεύθερη επιφάνεια υδάτινου στρώματος ($R \approx -0,9995$).

Οι τιμές του συντελεστή R για διεπιφάνειες μεταξύ διάφορων τύπων πετρωμάτων, σπάνια υπερβαίνουν το $\pm 0,5$ και συνήθως είναι μικρότερες από $\pm 0,2$. Ως εκ τούτου, το σύνολο της σεισμικής ενέργειας η οποία προσπίπτει σε ένα πέτρωμα διαδίδεται, ενώ ένα μικρό ποσοστό αυτής ανακλάται.

Ο υπολογισμός του συντελεστή ανάκλασης από τις ταχύτητες διάδοσης των P-κυμάτων είναι εφικτός, με τη χρήση της ακόλουθης εμπειρικής σχέσης (Gardner et al. 1974 και Meckel & Nath. 1977):

$$R = 0,625 \cdot \ln(v_1/v_2)$$

2.1.7 ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΘΛΑΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ ΥΠΟ ΓΩΝΙΑ

Όταν ένα P-κύμα προσπίπτει υπό γωνία σε μια διεπιφάνεια, στην οποία παρουσιάζεται αντίθεση ακουστικών εμπεδήσεων, οι ανακλώμενες σεισμικές ακτίνες δημιουργούνται, όπως και στην περίπτωση της κατακόρυφης πρόσπτωσης. Επιπλέον, ένα μέρος της σεισμικής ενέργειας πρόσπτωσης των P-κυμάτων μετατρέπεται σε ανακλώμενα και διερχόμενα S-κύματα, τα οποία πολώνονται σε ένα κάθετο επίπεδο.

$$\sin\theta_1/v_1 = \sin\theta_2/v_2 \Rightarrow \sin\theta_1/\sin\theta_2 = v_1/v_2$$

Ας σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι αν $v_2 > v_1$, η σεισμική ακτίνα διαθλάται σχηματίζοντας με την κατακόρυφο γωνία, μεγαλύτερη από τη γωνία πρόσπτωσης.

Ο νόμος του Snell εφαρμόζεται και στην ανακλώμενη ακτίνα και η εφαρμογή του οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η γωνία πρόσπτωσης ισούται με τη γωνία ανάκλασης.

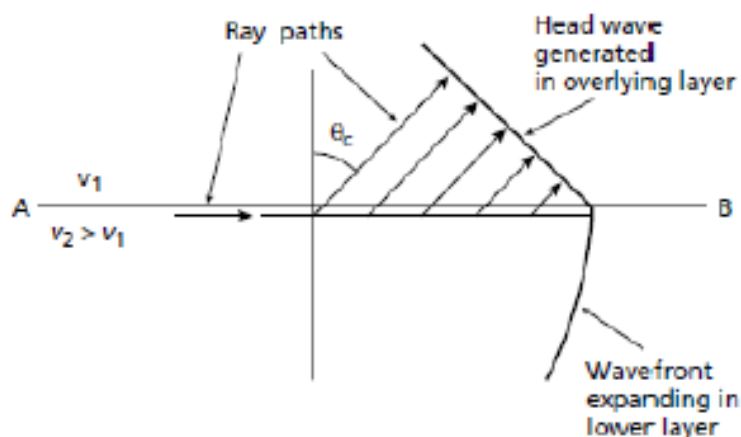
2.1.8 ΟΡΙΑΚΑ ΔΙΑΘΛΩΜΕΝΑ ΚΥΜΑΤΑ

Όταν η σεισμική ταχύτητα ενός στρώματος είναι μεγαλύτερη από αυτή του υπερκειμένου, υπάρχει μια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, η οποία είναι γνωστή ως οριακή γωνία θ_c , για την οποία η γωνία διάθλασης είναι ίση με 90° . Το γεγονός αυτό δημιουργεί μια διαθλώμενη ακτίνα, η οποία κινείται κατά μήκος της διεπιφάνειας με τη μεγαλύτερη ταχύτητα v_2 . Για οποιαδήποτε μεγαλύτερη γωνία πρόσπτωσης συμβαίνει πλήρης εσωτερική ανάκλαση της ενέργειας πρόσπτωσης.

Η οριακή γωνία θ_c δίνεται από τη σχέση:

$$\sin\theta_c/v_1 = \sin 90^\circ/v_2 \Rightarrow \sin\theta_c = v_1/v_2 \Rightarrow \theta_c = \sin^{-1}(v_1/v_2)$$

Το πέρασμα της ακτίνας, η οποία έχει υποστεί οριακή διάθλαση στην κορυφή του υποκειμένου στρώματος, προκαλεί μια διαταραχή στο ανώτερο στρώμα, η οποία κινείται με ταχύτητα v_2 , δηλαδή μεγαλύτερη από τη σεισμική ταχύτητα v_1 του ανωτέρου στρώματος. Η διαταραχή αυτή, η οποία ονομάζεται οριακά διαθλώμενο ή μετωπικό κύμα, διέρχεται υπό γωνία διαμέσου του ανωτέρου στρώματος προς την επιφάνεια, επιστρέφοντας τη σεισμική ενέργεια σε αυτήν.



Εικόνα 18. Μετωπικά κύματα

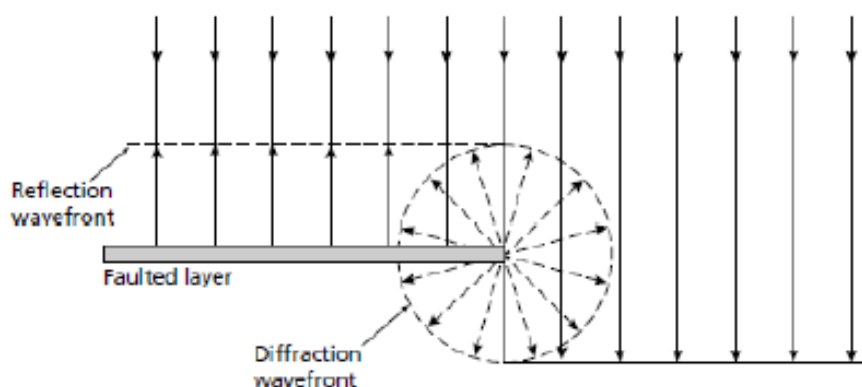
2.1.9 ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ

Κατά την προηγούμενη προσέγγιση της ανάκλασης και διάθλασης της σεισμικής ενέργειας σε διεπιφάνειες, οι οποίες παρουσιάζουν αντιθέσεις ακουστικής εμπέδησης, υποτέθηκε ότι οι διεπιφάνειες αυτές ήταν ασυνεχείς και χαρακτηρίζονταν από μικρή καμπυλότητα.

Σε απότομες ασυνέχειες διεπιφανειών, ή σχηματισμούς, των οποίων η ακτίνα καμπυλότητας είναι μικρότερη από το μήκος κύματος των κυμάτων πρόσπτωσης, οι νόμοι της ανάκλασης και διάθλασης δεν είναι πλέον έγκυροι. Τέτοια φαινόμενα

προκαλούν μια ακτινική διασπορά της προσπίπτουσας σεισμικής ενέργειας, γνωστή και ως περίθλαση. Συνήθεις πηγές περίθλασης στο έδαφος είναι τα άκρα των ρωγματωμένων στρωμάτων καθώς και μικρού μεγέθους, απομονωμένα αντικείμενα, όπως ογκόλιθοι σε ένα κατά τ' άλλα ομογενές στρώμα.

Φάσεις περίθλασης συχνά παρατηρούνται σε σεισμικές καταγραφές και μερικές φορές είναι πραγματικά δύσκολο να διαχωριστούν από τις ανακλώμενες και διαθλώμενες φάσεις.



Εικόνα 19. Περίθλαση στο άκρο ρωγματωμένου στρώματος (Keary & Brooks)

2.1.10 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗ

Υπάρχουν, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δύο βασικές τεχνικές σεισμικής διασκόπησης του υπεδάφους. Αυτές είναι:

Σεισμική Διάθλαση: Κατά την εφαρμογή της μεθόδου σεισμικής διάθλασης οι χρόνοι άφιξης της αρχικής εδαφικής κίνησης, η οποία παράγεται από μία πηγή, καταγράφεται σε διάφορες αποστάσεις, οι επόμενες αφίξεις απορρίπτονται. Κατά συνέπεια, το σύνολο των δεδομένων που λαμβάνονται με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης, αποτελείται από μια σειρά χρόνων συναρτήσεων των αποστάσεων. Οι χρόνοι αυτοί, στη συνέχεια, ερμηνεύονται σε σχέση με το βάθος των υπογείων επιφανειών ασυνέχειας, καθώς και τις ταχύτητες με τις οποίες η κίνηση ταξιδεύει μέσα σε κάθε στρώμα. Οι ταχύτητες αυτές ελέγχονται από ένα σύνολο φυσικών σταθερών, οι οποίες ονομάζονται ελαστικές παράμετροι και είναι χαρακτηριστικές του υλικού.

Σεισμική Ανάκλαση: Κατά την εφαρμογή της μεθόδου της σεισμικής ανάκλασης, η ανάλυση εστιάζεται στην ενέργεια που καταφθάνει μετά την αρχική εδαφική κίνηση. Ειδικότερα, η ανάλυση επικεντρώνεται στην εδαφική κίνηση, η οποία δημιουργείται από σεισμικά κύματα που έχουν ανακλαστεί από τις υπόγειες επιφάνειες ασυνέχειας. Από την άποψη αυτή, η μελέτη της ανάκλασης είναι μια ιδιαίτερα εξειδικευμένη έκδοση της ηχητικής βυθοσκόπησης, η οποία χρησιμοποιείται από τα υποβρύχια, τα πλοία και τα συστήματα ραντάρ. Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης, εκτός από τους χρόνους άφιξης, χρησιμοποιεί επίσης, το μέγεθος και το σχήμα της εδαφικής κίνησης, προκειμένου να δώσει πληροφορίες για το υπέδαφος. Οι υπόγειες δομές, μπορεί να

είναι πολύπλοκες ως προς το σχήμα τους, αλλά όπως και στην περίπτωση της σεισμικής διάθλασης, ερμηνεύονται σε σχέση με τις ασυνέχειες που χωρίζουν υλικά με διαφορετικές ελαστικές παραμέτρους.

2.1.11 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

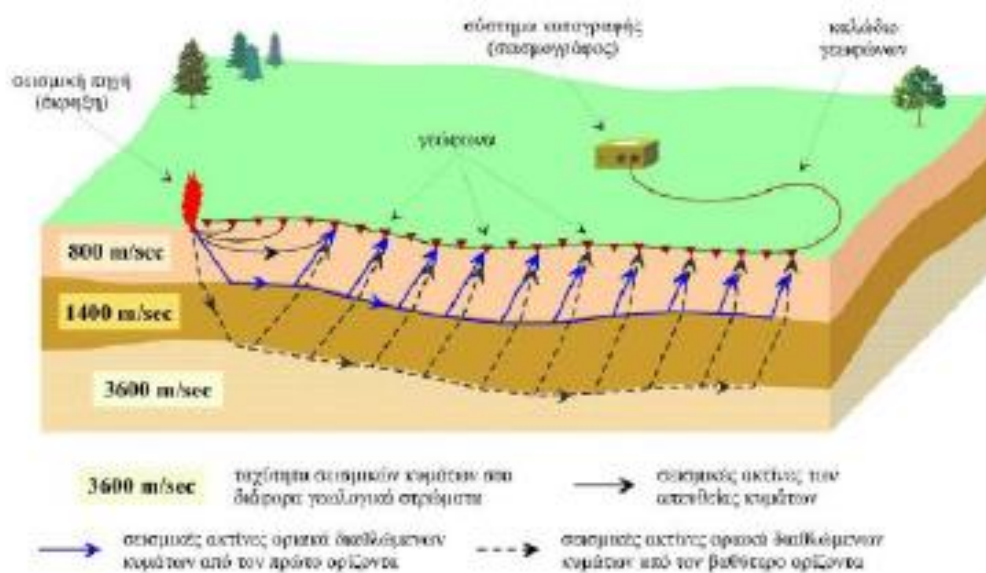
2.1.11.1 Γενικά

Από μία σεισμική πηγή, αναχωρεί ένα σεισμικό κύμα το οποίο καταφτάνει σε γεώφωνο, που είναι τοποθετημένο σε συγκεκριμένη θέση στην επιφάνεια της Γης, με τη μορφή τριών διαφορετικών τύπων κυμάτων, τα οποία κινούνται ακολουθώντας διαφορετικές διαδρομές. Τα κύματα αυτά είναι:

- Το απευθείας κύμα, το οποίο διανύει την απόσταση πηγή – γεώφωνο με την ταχύτητα του επιφανειακού στρώματος.
- Το ανακλώμενο κύμα, το οποίο φτάνει στο γεώφωνο μετά από ανάκλαση στη διεπιφάνεια, κινούμενο με την ταχύτητα του επιφανειακού στρώματος.
- Το οριακά διαθλώμενο κύμα, το οποίο φτάνει στο γεώφωνο, διανύοντας ένα τμήμα της διαδρομής του (κατερχόμενος και ανερχόμενος κλάδος) με την ταχύτητα του επιφανειακού στρώματος και το υπόλοιπο (οριζόντιος κλάδος) με την ταχύτητα του υποκείμενου στρώματος.

2.1.11.2 Εργασίες Υπαιθρου

Μια διάταξη, εγκατεστημένη στην ύπαιθρο για τη συλλογή σεισμικών δεδομένων, παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Εικόνα 2. Διάταξη για τη συλλογή σεισμικών δεδομένων στην ύπαιθρο (Λούης,2004)

Μια σειρά γεωφώνων, τοποθετημένα σε συγκεκριμένες μεταξύ τους αποστάσεις, είναι συνδεδεμένα με κοινό πολύκλωνο καλώδιο, το καλώδιο γεωφώνων, το οποίο

μεταφέρει την πληροφορία που λαμβάνει ο κάθε δέκτης στο σύστημα καταγραφής (σειсмоγράφο). Για την παραγωγή σεισμικών κυμάτων διεγείρεται μια σεισμική πηγή. Η διεγερση αυτή πραγματοποιείται, συνήθως, στα άκρα της γραμμής του αναπτύγματος των γεωφώνων, καθώς και σε άλλες επιλεγμένες θέσεις κατά μήκος του αναπτύγματος.

Η απόσταση μεταξύ των γεωφώνων και κατά συνέπεια το συνολικό μήκος του αναπτύγματος ποικίλλει, ανάλογα με το είδος του προς επίλυση προβλήματος. Για τη διερεύνηση ρηχών δομών, όπως είναι για παράδειγμα ο εντοπισμός του βραχώδους υποβάθρου, η απόσταση μεταξύ των γεωφώνων είναι της τάξης των μερικών μέτρων. Αντίθετα, για τη διερεύνηση βαθέων δομών με παγκόσμιο επιστημονικό ενδιαφέρον, όπως είναι για παράδειγμα ο υπολογισμός του βάθους της ασυνέχειας Moho, η απόσταση μεταξύ των γεωφώνων είναι της τάξης των εκατοντάδων ή ακόμα και χιλιάδων μέτρων.

Όσον αφορά στην τοποθέτηση των πηγών με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται και ο προσδιορισμός της κλίσης τυχόν κεκλιμένων στρωμάτων, χρησιμοποιείται συνδυασμός των εξής μεθόδων:

Της συμβατικής μεθόδου (Conventional reversed profile with end shots), η οποία περιλαμβάνει πυροδότηση της πηγής και στα δύο άκρα της γραμμής του αναπτύγματος των γεωφώνων, ενώ καταγράφονται οι σεισμικές αφίξεις κατά μήκος της γραμμής και από τις δύο πυροδοτήσεις.

Της μεθόδου διαίρεσης του αναπτύγματος (Split-profile method – Johnson 1976), η οποία περιλαμβάνει την καταγραφή προς τα έξω και προς τις δύο κατευθύνσεις, από ένα κεντρικό σημείο πυροδότησης.

Αυτό που προκύπτει είναι η πραγματοποίηση τριών πυροδοτήσεων κατά μήκος της σεισμικής γραμμής (μία σε κάθε άκρο και μία στο κέντρο). Με την κεντρική πυροδότηση επιδιώκεται ο προσδιορισμός της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων μέσα στο πρώτο επιφανειακό στρώμα, ενώ με τη συμβατική μέθοδο ο προσδιορισμός της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων μέσα στο επόμενο ή στα επόμενα στρώματα.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, εάν το πάχος για παράδειγμα του πρώτου στρώματος είναι πολύ μεγάλο, οπότε ο εντοπισμός του δεύτερου στρώματος καθίσταται δυσχερής, ενδέχεται να πραγματοποιηθούν ακόμα δύο πυροδοτήσεις, έξω από τη γραμμή διασκόπησης. Για την πραγματοποίησή τους, προεκτείνουμε νοητά τη σεισμική γραμμή και προς τα δύο άκρα της, κατά μήκος ίσο περίπου με το μήκος της γραμμής.

2.1.11.3 Πηγές Θορύβου

Όπως σε όλες τις γεωφυσικές μεθόδους, έτσι και στις σεισμικές, ο θόρυβος μπορεί να αλλοιώσει τις σεισμικές παρατηρήσεις. Επειδή, όμως, ελέγχουμε τη σεισμική πηγή, μπορούμε να ελέγξουμε και μερικούς τύπους θορύβου. Έτσι, ο θόρυβος χωρίζεται σε δύο είδη:

1. Συναφής θόρυβος

Τα επιφανειακά κύματα είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα συναφή θορύβου, καθώς είναι κύματα χαμηλής συχνότητας και μεγάλου πλάτους και καλύπτουν τα κύματα από ανάκλαση. Αποφεύγονται χρησιμοποιώντας φίλτρο χαμηλής αποκοπής.

2. Μη συναφής θόρυβος

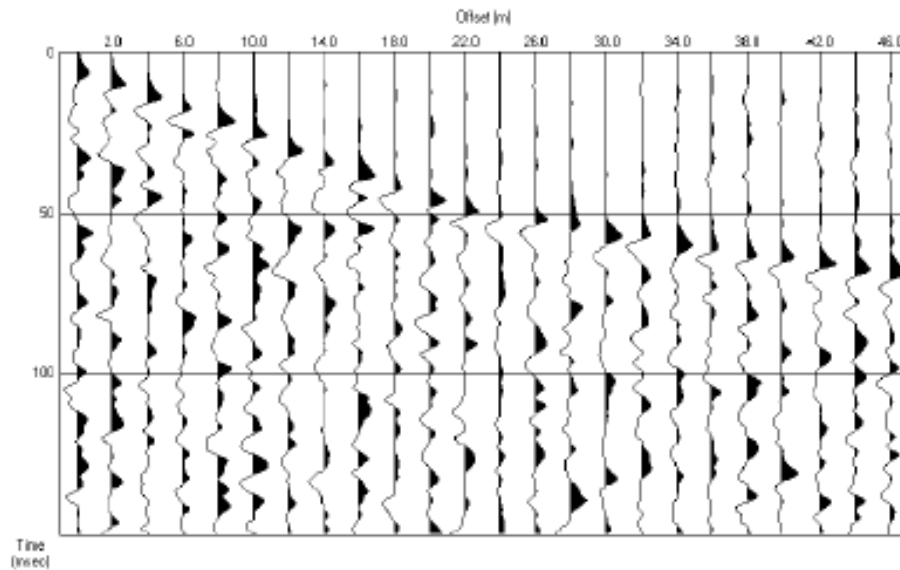
- Τυχαίος θόρυβος συχνότητας μικρότερης των 10 Hz.
- Άνεμος και κύματα της θάλασσας.
- Ανθρώπινος θόρυβος, αυτοκίνητα, μηχανές, πλοία και αεροπλάνα.
- Ηλεκτρική επίδραση από τα σύρματα της ΔΕΗ και τις ηλεκτρικές καταιγίδες.
- Θόρυβος οργάνου.
- Σκεδάσεις, που οφείλονται στο ανάγλυφο.

2.1.11.4 Καταγραφείς της εδαφικής κίνησης

Όταν τα σεισμικά κύματα αλληλοεπιδρούν με μία επιφάνεια ασυνέχειας του υπεδάφους, ένα μέρος της ενέργειας διαβιβάζεται μέσω της ασυμφωνίας, ένα μέρος ανακλάται από την επιφάνεια ασυμφωνίας, και αν οι ταχύτητες των μέσων που χωρίζει η ασυμφωνία απεικονίζουν μία αύξηση στην ταχύτητα του διαδιδόμενου κύματος, ένα μέρος της ενέργειας διαβιβάζεται κατά μήκος της επιφάνειας ασυμφωνίας με μορφή οριακά διαθλώμενων κυμάτων.

Η εδαφική κίνηση, η οποία προκαλείται από τα σεισμικά κύματα καταγράφεται από τα γεώφωνα. Η καταγραφή αυτή της εδαφικής κίνησης παρουσιάζεται με τη μορφή διαγραμμάτων, στα οποία απεικονίζεται το ιστορικό της εδαφικής κίνησης σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Τα διαγράμματα αυτά, τα οποία ονομάζονται σειсмоγράμματα, είναι διαγράμματα του πλάτους της εδαφικής κίνησης συναρτήσει του χρόνου.

Ωστόσο, επειδή η γνώση του ιστορικού της εδαφικής κίνησης σε κάποια συγκεκριμένη θέση δεν είναι από μόνη της αρκετή για να επιτρέψει την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη δομή του υπεδάφους, η εδαφική κίνηση καταγράφεται σε πολλούς δέκτες και, κατά συνέπεια, απεικονίζεται ως συνάρτηση του χρόνου και της απόστασης από την πηγή.



Εικόνα 31. Σεισμική καταγραφή κοινής πηγής

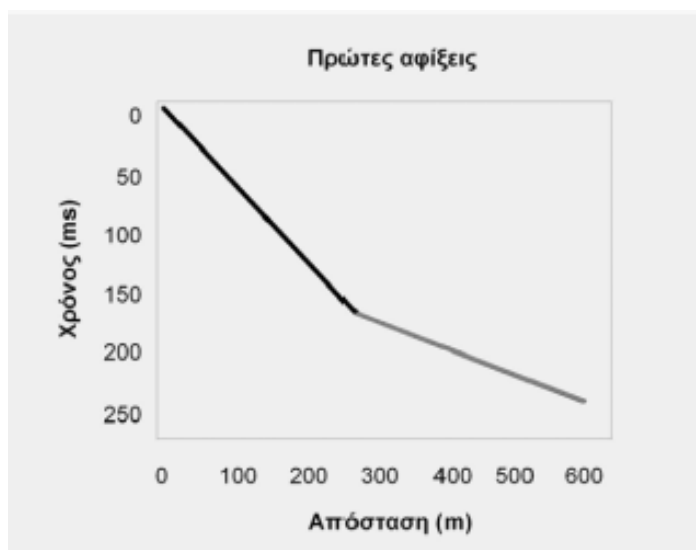
Στην Εικόνα 21 παρουσιάζονται οι καταγραφές 24 γεωφώνων, τοποθετημένων σε σειρά, ανά 2m. Στο διάγραμμα αυτά, ο χρόνος σημειώνεται στον κατακόρυφο άξονα και η απόσταση από την πηγή στον οριζόντιο, ενώ για κάθε κατάλληλη απόσταση πηγής – δέκτη έχει σχεδιαστεί το αντίστοιχο σεισμόγραμμα, το οποίο ονομάζεται σεισμικό ίχνος (seismic trace). Τα διαγράμματα αυτού του τύπου συνήθως καλούνται σεισμικές καταγραφές κοινής πηγής (common shot seismic records) και το βασικότερο πλεονέκτημα, το οποίο παρουσιάζουν, είναι ότι παρέχουν τη δυνατότητα παρατήρησης της μεταβολής του χρόνου διαδρομής, καθώς μεταβάλλεται η απόσταση. Η μεταβολή αυτή του χρόνου συναρτήσει της απόστασης αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως χρονική απόκλιση (moveout), ενώ από το διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι αφίξεις με μεγάλες χρονικές αποκλίσεις παρουσιάζουν σαφώς μεγαλύτερη κλίση από αυτές με μικρότερες.

2.1.11.5 Δρομοχρονικές καμπύλες

Δρομοχρονικές καμπύλες ή καμπύλες Χρόνων Διαδρομής (Time -Travel Curves) καλούνται τα διαγράμματα των χρόνων άφιξης των διαφόρων κυμάτων που καταγράφονται συναρτήσει της απόστασης από την πηγή.

Η χάραξη των δρομοχρονικών καμπυλών των σεισμικών αφίξεων (P-κύματα) σαν συνάρτηση της απόστασης των σταθμών (γεωφωνα) από τη σεισμική πηγή είναι ο κύριος στόχος μας στη σεισμική μέθοδο της διάθλασης. Επομένως, αν και καταγράφουμε ολόκληρο το ιστορικό χρονικό της εδαφικής κίνησης σε έναν αριθμό σταθμών, στη μέθοδο της διάθλασης, το μόνο πράγμα που μας ενδιαφέρει να πάρουμε από τις καταγραφές αυτές είναι ο χρόνος διαδρομής της πρώτης άφιξης του σεισμικού κύματος που καταγράφεται σε κάθε γεωφώνο. Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει

ότι η πρώτη άφιξη σε ένα γεώφωνο σχετίζεται με το απευθείας κύμα όταν η απόσταση του γεώφωνου από τη σεισμική πηγή παραμένει μικρότερη της απόστασης x_c , η οποία είναι πολύ σημαντική και ονομάζεται κρίσιμη απόσταση. Από το ίδιο παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η πρώτη άφιξη σε ένα γεώφωνο θα σχετίζεται με το οριακά διαθλώμενο κύμα όταν η απόσταση του από την πηγή παραμένει μεγαλύτερη της οριακής απόστασης x_c . Από το ίδιο διάγραμμα προκύπτει ακόμα ότι για καμία απόσταση γεώφωνου από την πηγή, η πρώτη άφιξη δεν θα μπορούσε να σχετίζεται με ανακλώμενο κύμα, όταν η απόσταση του γεώφωνου από την πηγή είναι μεγαλύτερη από x_c .



Εικόνα 4. Δρομοχρονική καμπύλη πρώτων αφίξεων (Thomasm Boyd,1999)

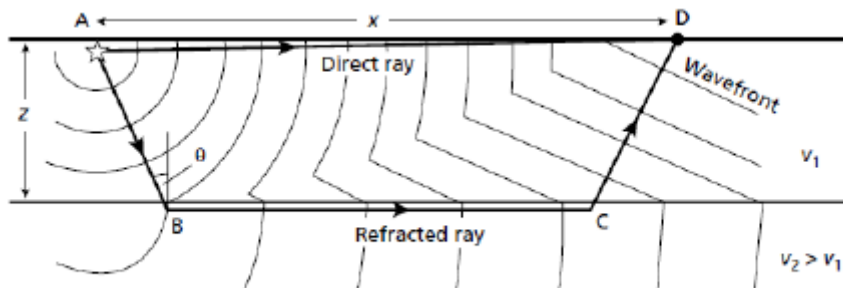
Για να περάσουμε από τα σειсмоγράμματα στις δρομοχρονικές καμπύλες των πρώτων αφίξεων, πρέπει να καθορίσουμε τη χρονική στιγμή στην οποία ξεκινά η εδαφική κίνηση σε κάθε σειсмоγράμμα. Αν, όμως, έχει καταγραφεί οποιουδήποτε είδους θόρυβος πριν το χρόνο της πρώτης άφιξης, τότε μπορεί να είναι πολύ δύσκολο να επιλέξουμε τον χρόνο αυτό. Στην πράξη, η επιλογή του χρόνου άφιξης των πρώτων κυμάτων θεωρείται πιο πολύ ως διαδικασία ερμηνείας παρά ως διαδικασία συλλογής δεδομένων.

2.1.11.6 Προσδιορισμός της δομής του υπεδάφους

Περίπτωση δύο στρωμάτων με οριζόντια διεπιφάνεια

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι διαδοχικές θέσεις του μετώπου του κύματος, το οποίο προέρχεται από μία σεισμική πηγή που βρίσκεται στο σημείο A. Οι θέσεις αυτές σχετίζονται με την άμεση κίνηση της σεισμικής ενέργειας μέσω του ανώτερου στρώματος, καθώς και την κίνηση της οριακά διαθλώμενης ενέργειας στο υποκείμενο στρώμα. Το απευθείας και το διαθλώμενο κύμα κατευθύνονται προς έναν δέκτη, ο οποίος βρίσκεται στο σημείο D και απέχει απόσταση x από την πηγή. Οι ταχύτητες των στρωμάτων

είναι v_1 και v_2 αντίστοιχα, με $v_2 > v_1$, και η διεπιφάνεια των δύο στρωμάτων βρίσκεται σε βάθος z .



Εικόνα 23. Μοντέλο στρώματος πάνω από ημιχώρο με οριζόντια διεπιφάνεια (Keary & Brooks)

Το απευθείας κύμα ταξιδεύει οριζόντια κατά μήκος της επιφάνειας του ανώτερου στρώματος, από το A στο D, με ταχύτητα v_1 , ακολουθώντας διαδρομές που σχηματίζουν γωνία θ – ίση με την κρίσιμη – με το κατακόρυφο επίπεδο. Τέλος, το ίδιο κύμα διασχίζει την οριζόντια απόσταση BC, με ταχύτητα v_2 , μεγαλύτερη της v_1 .

Ο συνολικός χρόνος διαδρομής, κατά μήκος της οριακά διαθλώμενης σεισμικής ακτίνας ABCD, δίνεται από τη σχέση:

$$t = t_{AB} + t_{BC} + t_{CD} \Rightarrow$$

$$t = \frac{z}{v_1 \cos \theta} + \frac{(x - 2z \tan \theta)}{v_2} + \frac{z}{v_1 \cos \theta} \Rightarrow$$

$$t = \frac{(x - 2z \tan \theta)}{v_2} + \frac{2z}{v_1 \cos \theta}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι:

$$\sin \theta = v_1 / v_2 \text{ (Νόμος του Snell)}$$

και ότι:

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}}$$

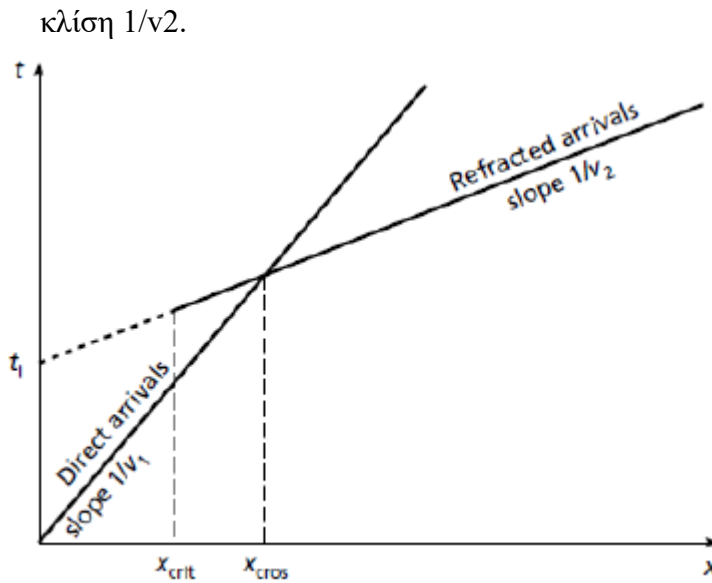
Έχουμε:

$$t = \frac{x \sin \theta}{v_1} + \frac{2z \cos \theta}{v_1}$$

ή εναλλακτικά:

$$t = \frac{x}{v_2} + \frac{2z \sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \Rightarrow t = \frac{x}{v_2} + ti$$

Όπου, εάν σχεδιάσουμε το διάγραμμα του χρόνου (t) συναρτήσεως της απόστασης (x), τι είναι η απόσταση που ορίζει στον άξονα των χρόνων η προς τα πίσω προέκταση του κλάδου της δρομοχρονικής καμπύλης, ο οποίος έχει



Εικόνα 24. Δρομοχρονική καμπύλη μοντέλου δύο στρωμάτων (Keary & Brooks)

Ο χρόνος t_i είναι γνωστός ως χρόνος συνάντησης και εκφράζει το χρόνο στον οποίο θα παρατηρηθεί η διαθλώμενη άφιξη, σε μηδενική απόσταση από την πηγή. Ο χρόνος t_i δίνεται από τη σχέση:

$$t_i = \frac{2z\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2}$$

Επιλύοντας αυτή τη σχέση ως προς το βάθος z , έχουμε:

$$z = \frac{t_i v_1 v_2}{2\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}$$

Έτσι, με την ανάλυση των δρομοχρονικών καμπυλών των απευθείας και διαθλώμενων αφίξεων, μπορούν να ληφθούν οι ταχύτητες v_1 και v_2 , οι οποίες ισούνται με το αντίστροφο της κλίσης των δρομοχρονικών καμπυλών, ενώ από το χρόνο συνάντησης t_i μπορεί να προσδιοριστεί το βάθος της διεπιφάνειας z . Στην κρίσιμη απόσταση οι χρόνοι διαδρομής του απευθείας και διαθλώμενου κύματος είναι ίσοι. Δηλαδή:

$$\frac{x_{cros}}{v_1} = \frac{x_{cros}}{v_2} + \frac{2z\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2}$$

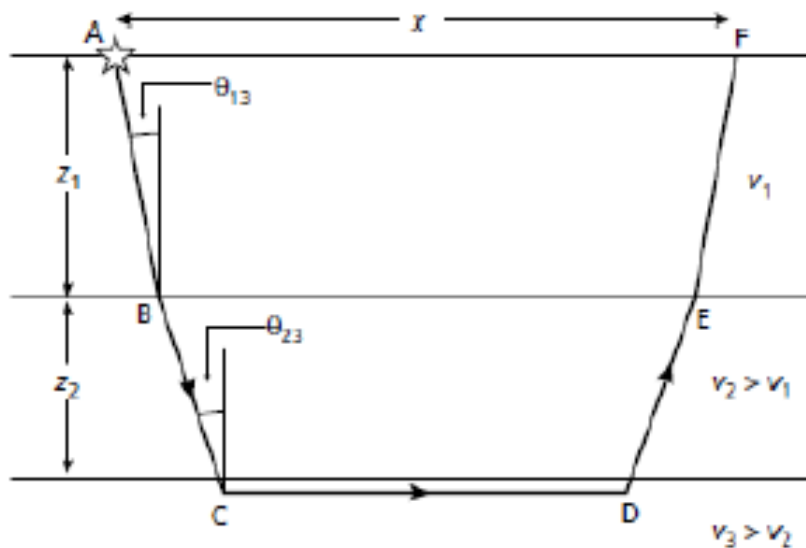
Επιλύοντας ως προς x_{cros}

$$x_{cros} = 2z \sqrt{\frac{v_2 + v_1}{v_2 - v_1}}$$

Από την εξίσωση αυτή καθίσταται προφανές ότι η κρίσιμη απόσταση είναι πάντα μεγαλύτερη από το διπλάσιο του βάθους της διεπιφάνειας.

Περίπτωση τριών στρωμάτων με οριζόντιες διεπιφάνειες

Η γεωμετρία της σεισμικής ακτίνας, στην περίπτωση της οριακής διάθλασης στη δεύτερη διεπιφάνεια, παρουσιάζεται στο σχήμα. Οι σεισμικές ταχύτητες των τριών στρωμάτων είναι v_1 , $v_2(>v_1)$, και $v_3(>v_2)$. Η γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας στην πρώτη διεπιφάνεια είναι θ_1 ενώ στη δεύτερη θ_2 (κρίσιμη γωνία). Τα πάχη των στρωμάτων 1 και 2 είναι z_1 και z_2 αντίστοιχα.



Εικόνα 25. Μοντέλο τριών στρωμάτων πάνω από ημιχώρο με οριζόντιες διεπιφάνειες (Keary & Brooks)

Ο χρόνος διαδρομής κατά μήκος της διαθλώμενης ακτίνας ABCDEF δίνεται από τη σχέση:

$$t = \frac{x \sin \theta_1}{v_1} + \frac{2z_1 \sin \theta_1}{v_1} + \frac{2z_2 \cos \theta_2}{v_2}$$

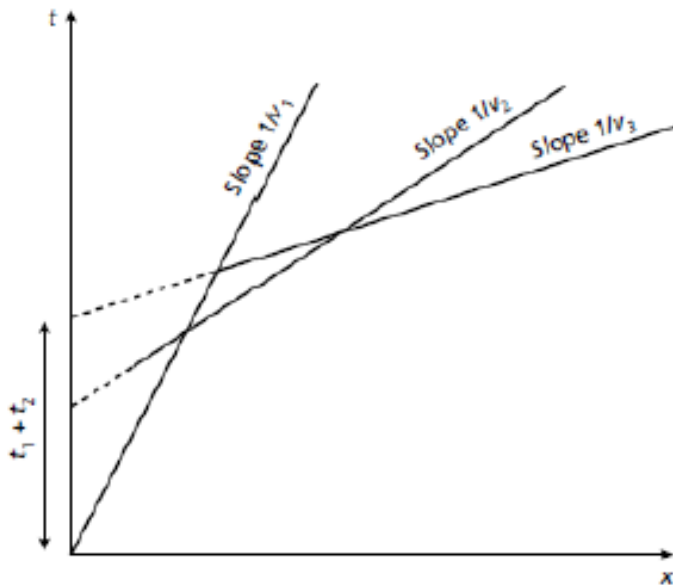
Όπου:

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{v_1}{v_2}\right) \text{ και } \theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

Επομένως:

$$t = \frac{x \sin \theta_1}{v_1} + t_{i1} + t_{i2}$$

όπου t_{i1} είναι ο χρόνος της συνάντησης της δρομοχρονικής καμπύλης των οριακά διαθλώμενων αφίξεων της ανώτερης διεπιφάνειας και t_{i2} η διαφορά μεταξύ του t_{i1} και του χρόνου συνάντησης της δρομοχρονικής καμπύλης των οριακά διαθλώμενων αφίξεων της κατώτερης διεπιφάνειας.



Εικόνα 26. Δρομοχρονική καμπύλη μοντέλου τριών στρωμάτων (Keary & Brooks)

Η ερμηνεία των δρομοχρονικών καμπυλών, στην περίπτωση των τριών στρωμάτων, πραγματοποιείται μέσω της αρχικής ερμηνείας των δύο πρώτων στρωμάτων. Αφού έχουν προσδιοριστεί τα z_1 και v_2 στη συνέχεια υπολογίζονται τα z_2 και v_1 .

Περίπτωση πολλών στρωμάτων με οριζόντιες διεπιφάνειες

Γενικά, ο χρόνος διαδρομής t_n ενός κύματος, οριακά διαθλώμενου στην ανώτερη επιφάνεια n -οστού στρώματος, δίνεται από τη σχέση:

$$t_n = \frac{x \sin \theta_i}{v_i} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2z_i - \cos \theta_i}{v_i}$$

όπου:

$$\theta_i = \sin^{-1} \left(\frac{v_i}{v_n} \right)$$

Η εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαδοχικά προκειμένου να υπολογισθούν τα πάχη μιας σειράς οριζοντίων στρωμάτων, τα οποία αναπαρίστανται μέσω δρομοχρονικών καμπύλων διαθλώμενων αφίξεων.

Περίπτωση κεκλιμένης ασυνέχειας

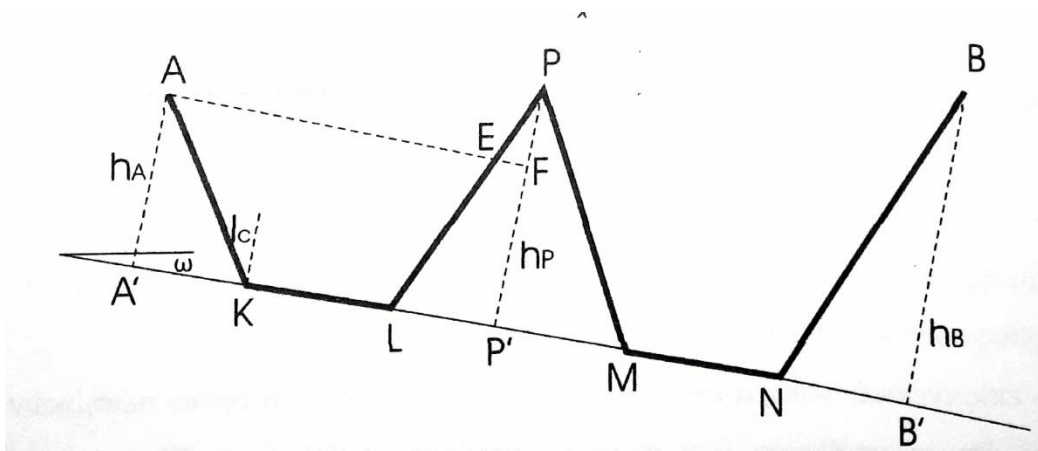
Αυτή είναι η πιο συνηθισμένη περίπτωση, δεδομένου ότι οι διάφορες γεωλογικές ασυνέχειες σπάνια είναι παράλληλες η μία με την άλλη. Ας υποθέσουμε την περίπτωση δύο στρωμάτων, με την επιφάνεια της ασυνέχειας

να κατέρχεται προς το μέρος των γεωφώνων. Από το σημείο, που αντιστοιχεί στη θέση της σεισμικής πηγής, φέρουμε παράλληλη γραμμή προς τη σεισμική ασυνέχεια. Τότε, ο κλάδος AKLE αντιστοιχεί σε περίπτωση δύο οριζοντίων στρωμάτων, επομένως για να υπολογίσουμε τον ολικό χρόνο διαδρομής του εκπεμπόμενου από τη σεισμική πηγή κύματος προς το σεισμικό φωρατή P, αρκεί να προσθέσουμε τους χρόνους διαδρομής από το A στο E που δίδεται από τη σχέση:

$$t_{AKLE} = \frac{2AA' \cos ic}{v_1} + \frac{AE}{v_2}$$

και το χρόνο διάδοσης από το E στο P που είναι:

$$t_{EP} = \frac{EP}{v_1}$$



Εικόνα 27. Κεκλιμένη επιφάνεια ασυνέχειας

Από τη γεωμετρία του σχήματος έχουμε:

$$PF = x \sin \omega \text{ και } AF = x \cos \omega$$

$$EP = PF \tan ic = x \sin \omega \tan ic \text{ και } EP = \frac{PF}{\cos ic} = \frac{x \sin \omega}{\cos ic}$$

$$AE = AF - EF = x(\cos \omega - \sin \omega \tan ic)$$

Έτσι, τελικά, ο χρόνος t_{AKLP} , που λέγεται και “χρόνος για προς τα κάτω κλίση” (Down Dip) και που συμβολίζεται με td δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} td &= \frac{2hA \cos ic}{v_1} + \frac{x(\cos \omega - \sin \omega \tan ic)}{v_2} + \frac{x \sin \omega}{v_1 \cos ic} \\ &= \frac{2hA \cos ic}{v_1} + \frac{x}{v_2} (\sin ic \cos \omega + \cos ic \sin \omega + \\ td &= \frac{2hA \cos ic}{v_1} + \frac{x \sin(ic + \omega)}{v_2} \end{aligned}$$

Η παραπάνω σχέση παριστάνει ευθεία με κλίση:

$$\frac{\sin(ic + \omega)}{v1} = \frac{\sin(ic + \omega)}{v2 \sin ic} = \frac{1}{v2d}$$

Είναι φανερό ότι η κλίση που υπολογίζεται από την ανωτέρω εξίσωση δεν αντιστοιχεί στην πραγματική ταχύτητα του δεύτερου στρώματος, γι' αυτό και καλείται φαινόμενη ταχύτητα.

Έχουμε:

$$\frac{v2d}{v2} = \frac{\sin ic}{\sin (ic + \omega)} < 1$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι για την περίπτωση που η ασυνέχεια κλίνει προς τη μία μεριά των σεισμικών φωρατών (προς τα κάτω), η μετρούμενη φαινόμενη ταχύτητα είναι πάντοτε μικρότερη της πραγματικής και όσο πιο μεγάλη είναι η κλίση της ασυνέχειας, τόσο πιο μικρή γίνεται η φαινόμενη ταχύτητα.

Για την περίπτωση που η ασυνέχεια κλίνει προς τη μεριά της σεισμικής πηγής, ο “χρόνος για κλίση προς τα πάνω” (Up Dip), που συμβολίζεται με tu δίνεται από τη σχέση:

$$tu = \frac{2hB \cos ic}{v1} + \frac{x \sin (ic + \omega)}{v1}$$

Και αντίστοιχα:

$$\frac{v2u}{v2} = \frac{\sin ic}{\sin (ic + \omega)} > 1$$

που σημαίνει ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η μετρούμενη φαινόμενη ταχύτητα είναι πάντοτε μεγαλύτερη της πραγματικής και ότι όσο μεγαλώνει η κλίση της ασυνέχειας, τόσο μεγαλώνει η φαινόμενη ταχύτητα.

Υπολογισμός της κλίσης και των πραγματικών ταχυτήτων

$$\sin(ic + \omega) = \frac{v1}{v2d} \Rightarrow ic + \omega = \arcsin \left(\frac{v1}{v2d} \right)$$

$$\sin(ic - \omega) = \frac{v1}{v2u} \Rightarrow ic - \omega = \arcsin \left(\frac{v1}{v2u} \right)$$

Επομένως:

$$ic = \frac{\arcsin \left(\frac{v1}{v2d} \right) + \arcsin \left(\frac{v1}{v2u} \right)}{2}$$

$$ic = \frac{\arcsin \left(\frac{v1}{v2d} \right) - \arcsin \left(\frac{v1}{v2u} \right)}{2}$$

και η ταχύτητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$v2 = \frac{v1}{\sin i c}$$

Τα βάθη κάθετα στην υπό κλίση ασυνέχεια h_A και h_B δίνονται από τις σχέσεις:

$$h_A = \frac{v1 t1 d}{2 \cos i c}$$

Και:

$$h_B = \frac{v1 t1 u}{2 \cos i c}$$

2.1.12 MASW (MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES)

Γενικά

Η μέθοδος πολλαπλών καναλιών ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων (MASW) είναι μια από τις σεισμικές μεθόδους έρευνας που αξιολογούν την ελαστική συμπεριφορά (ακαμψία) του εδάφους για σκοπούς αντιμετώπισης γεωτεχνικών κυρίως προβλημάτων. Η MASW μετράει πρώτα τα επιφανειακά σεισμικά κύματα που παράγονται από διάφορους τύπους σεισμικών πηγών, όπως το σφυρί. Αναλύεται η διάδοση, οι ταχύτητες αυτών των επιφανειακών κυμάτων και τελικά αφαιρούνται οι διακυμάνσεις της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων (V_s) κάτω από την επιφάνεια της έρευνας που κατά κύριο λόγο επηρεάζει την αναλυόμενη ταχύτητα διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων. Η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων (V_s) είναι μία από τις ελαστικές σταθερές του εδάφους και σχετίζεται στενά με το μέτρο ελαστικότητας του Young. Υπό τις περισσότερες περιστάσεις, το V_s είναι ένας άμεσος δείκτης της αντοχής του εδάφους και επομένως χρησιμοποιείται συνήθως για να αποδίδει τη φέρουσα ικανότητα του. Μετά από μια σχετικά απλή διαδικασία, οι τελικές πληροφορίες V_s παρέχονται σε μια, δύο και τρεις διαστάσεις.

Ιστορικά στοιχεία

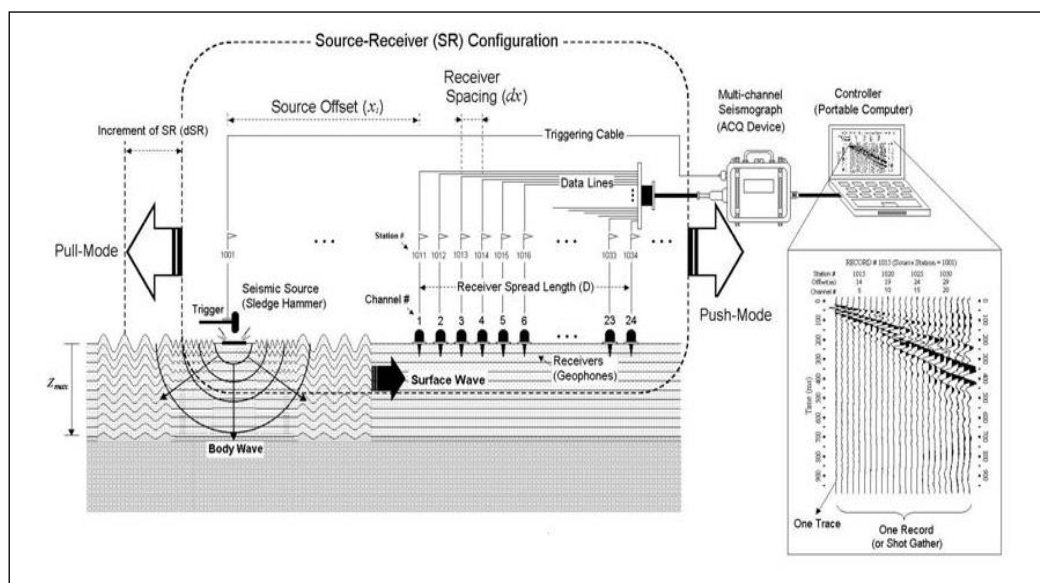
Τον 20ο αιώνα όταν ο Jones (1961) και άλλοι ερευνητές χρησιμοποίησαν μικρές δονήσεις σαν κύμα, στα μέσα της δεκαετίας του 1980 υπήρξε μια έκρηξη διάδοσης της μεθόδου όταν οι ψηφιακοί υπολογιστές έγιναν δημοφιλείς. Η MASW αναπτύχθηκε πάνω από μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο επιφανειακών κυμάτων που ονομάζεται φασματική ανάλυση επιφανειακών κυμάτων (SASW), που εισήχθη κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Σε αντίθεση με τη SASW, η οποία είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιεί δύο δέκτες, η MASW υιοθέτησε την έννοια των πολλαπλών δεκτών (24 ή περισσότερων καναλιών), που χρησιμοποιούνται ιστορικά στη σεισμική έρευνα για τους φυσικούς πόρους.

Η πρώτη καταγεγραμμένη χρήση της πολυκάναλης προσέγγισης για την ανάλυση επιφανειακών κυμάτων εντοπίζεται στις αρχές της δεκαετίας του 1980, όταν έρευνες στις Κάτω Χώρες χρησιμοποίησαν ένα 24-κάναλο σύστημα δεκτών για την εξαγωγή των προφίλ ταχύτητας διατμητικών κυμάτων των παραθαλάσσιων περιοχών. Έκτοτε η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως σε προβλήματα γεωτεχνικού χαρακτήρα δίνοντας αξιόπιστα και καλής ποιότητας αποτελέσματα.

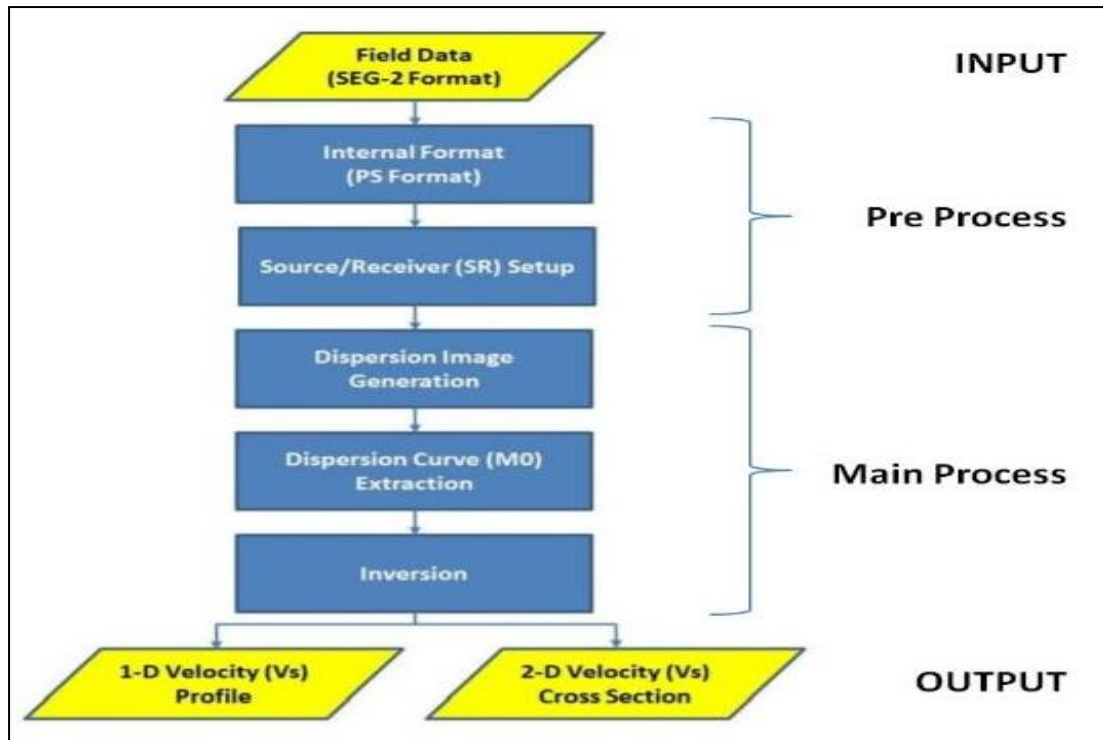
Διαδικασία εφαρμογής μεθόδου

Η συνήθης διαδικασία για έρευνες (1-D, 2-D, και 3-D) MASW αποτελείται κυρίως από τρία βήματα :

- Απόκτηση δεδομένων: Απόκτηση πολυκαναλικών δεδομένων πεδίου
- Ανάλυση δεδομένων (Βήμα 1): Ανάλυση διασποράς που εξάγει μία καμπύλη διασποράς από ένα πεδίο εγγραφής
- Ανάλυση δεδομένων (Βήμα 2): Αντίστροφη και υπολογισμός διατμητικής ταχύτητας κυμάτων (V_s) συναρτήσε του βάθους (αποκαλούμενο 1-D V_s προφίλ) που δίνει την πλησιέστερη θεωρητική καμπύλη διασποράς προς τη μετρούμενη καμπύλη (ένα προφίλ 1-D V_s από κάθε καμπύλη).



Εικόνα 28. Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου MASW

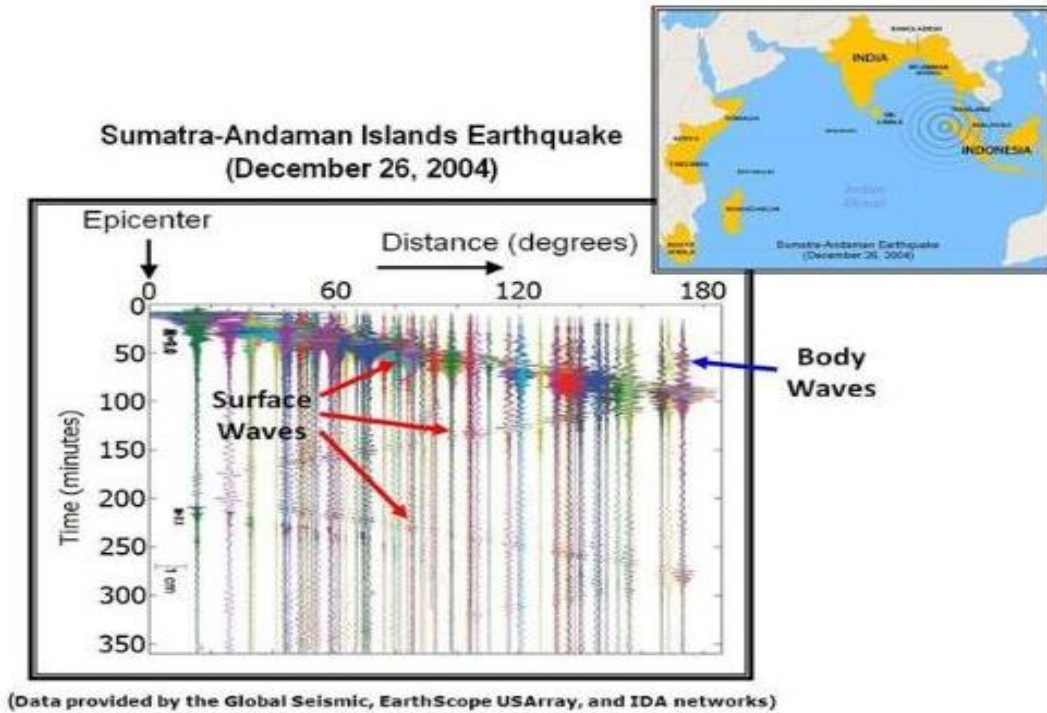


Εικόνα 5. Διάγραμμα επεξεργασίας δεδομένων με τη μέθοδο MASW

Πλεονεκτήματα της μεθόδου MASW

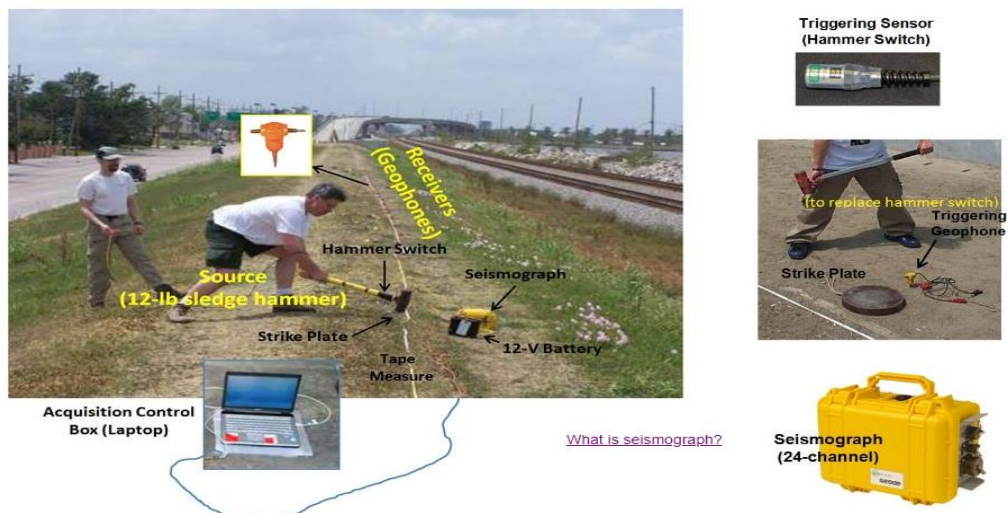
Σε αντίθεση με τη μέθοδο διάθλασης των S κυμάτων που προσπαθεί να μετρήσει απευθείας ταχύτητες των S κυμάτων, κάτι που είναι δύσκολο λόγω των εμποδίων στη διατήρηση σωστού σήματος σε σχέση με το θόρυβο κατά τη διάρκεια της απόκτησης των δεδομένων και στην επεξεργασία, η μέθοδος MASW δίνει επιθυμητά και ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Η απόκτηση των δεδομένων είναι αρκετά πιο ανεκτική στην επιλογή των παραμέτρων σε σχέση με άλλες σεισμικές μεθόδους, λόγω της ευκολότερης επίτευξης του λόγου σήματος προς θόρυβο. Αυτός ο επιθυμητός λόγος σήματος - θορύβου είναι λόγω του ότι τα επιφανειακά σεισμικά κύματα είναι τα ισχυρότερα κύματα και μπορούν να ταξιδέψουν μεγαλύτερη απόσταση σε σχέση με τις άλλες κυματομορφές χωρίς να υποστούν “μόλυνση” από θόρυβο. (Εικόνα 28)

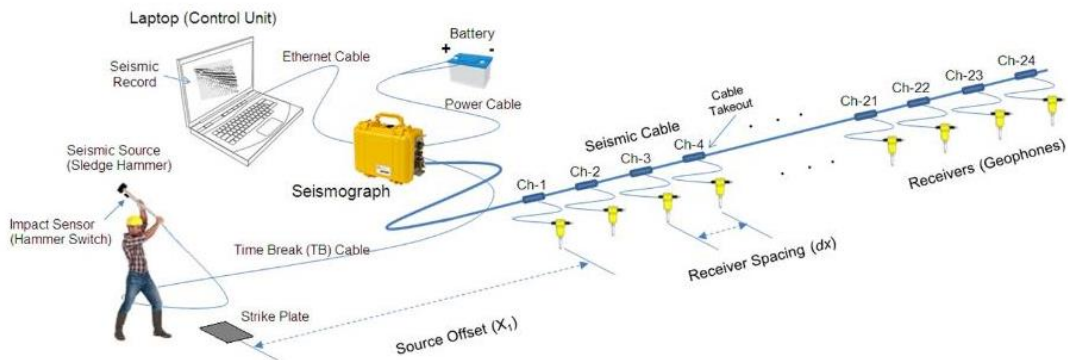


Εικόνα 30. Καταγραφές σεισμών στον πλανήτη που δείχνουν ισχυρά επιφανειακά κύματα

Συσκευές για την έρευνα με χρήση MASW
 Κάθε πολυκαναλικό σύστημα απόκτησης σεισμικών δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έρευνες με MASW. Για παράδειγμα, το σύστημα για σεισμική διάθλαση και ανάκλαση μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς μεταποιήσεις, ή με διαφορετικά γεώφωνα. Το σχήμα παρακάτω παρουσιάζει τη διαμόρφωση των απαραίτητων συσκευών.



Εικόνα 31. Χρησιμοποιούμενες συσκευές



Εικόνα 32. Διάταξη των συσκευών

MASW - Εφαρμογές

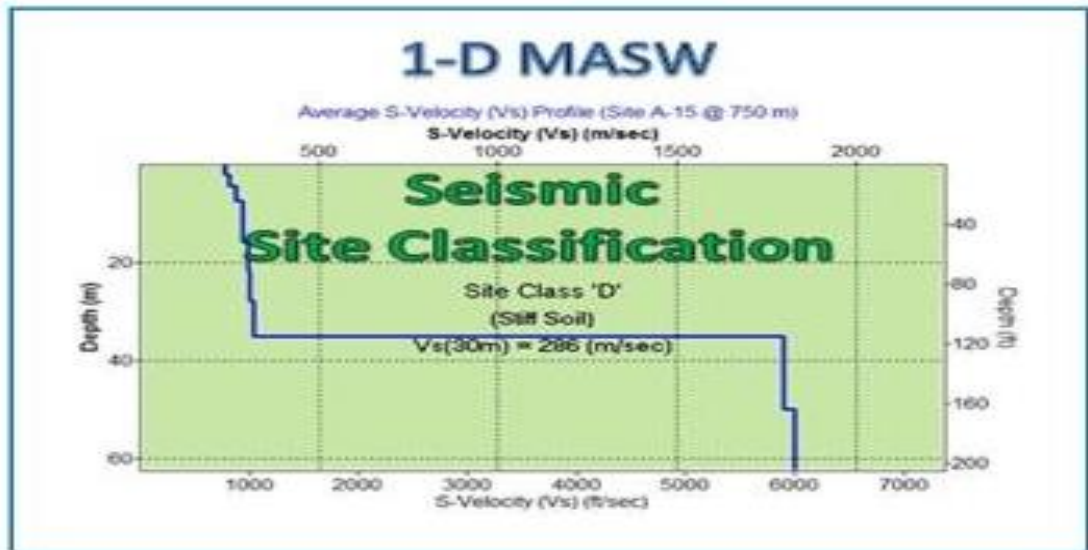
Οι πληροφορίες για την ταχύτητα V_s των υπεδαφικών υλικών σχετίζονται απευθείας με την ακαμψία τους, η οποία είναι η βασική ιδιότητα που υπάρχει σε όλα τα γεωτεχνικά μηχανικά έργα. Υπό αυτήν την έννοια, η μέθοδος MASW μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε γεωτεχνικό μηχανικό έργο που απαιτεί υπεδαφική χαρτογράφηση της ακαμψίας σε 1-D, 2-D, και 3-D μορφές.

Η πιο κοινή εφαρμογή είναι η χαρτογράφηση του υποβάθρου που οριοθετεί μεταξύ εδάφους και υποβάθρου με τη σημαντική αύξηση της ταχύτητας V_s (π.χ. από 300 m/sec σε 1000 m/sec).

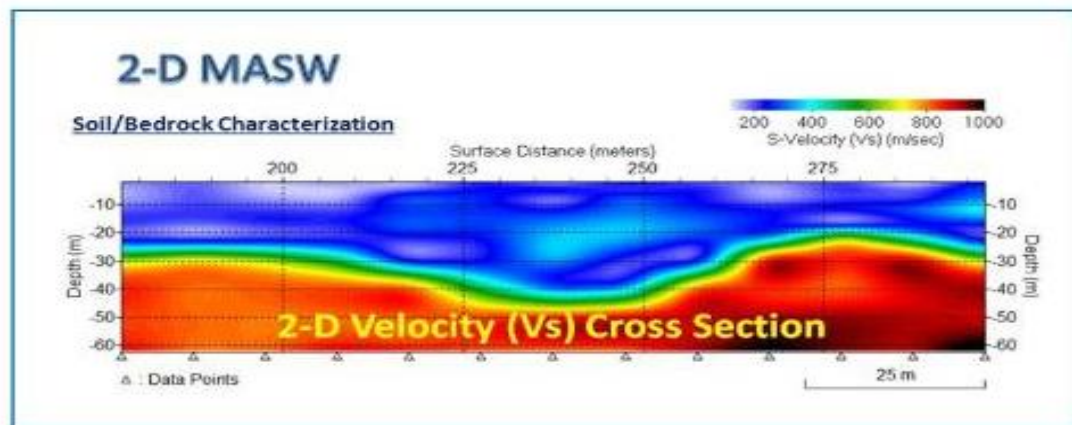
Ο χαρακτηρισμός μιας περιοχής απαιτεί μία εκτίμηση της μέσης ταχύτητας V_s για τα πρώτα 30 m (ή 100 ft) βάθος. Αυτή είναι η πιο κοινή 1-D εφαρμογή της μεθόδου MASW.

Γενικά, οι εφαρμογές της MASW μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

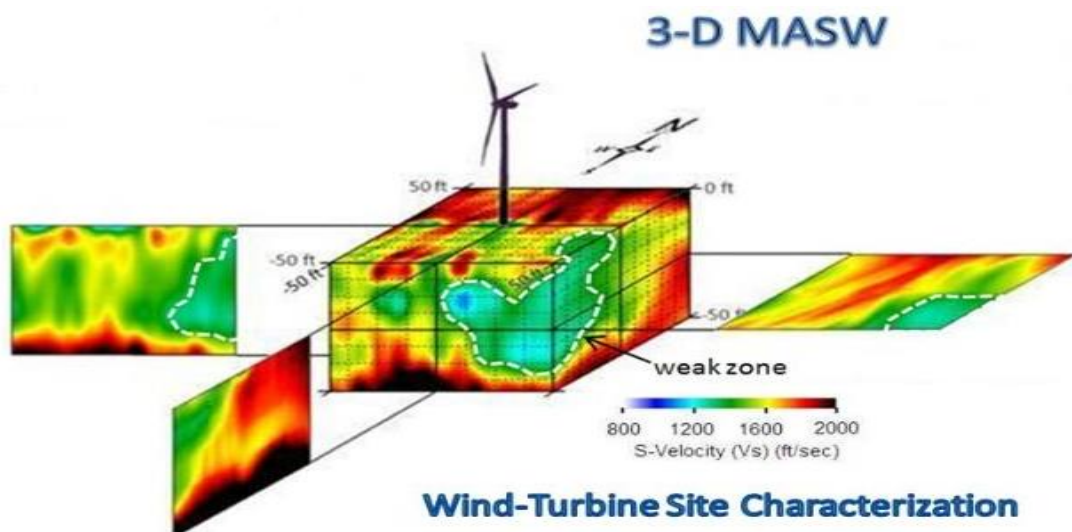
- Χαρτογράφηση του εδάφους-υποβάθρου,
- Χαρακτηρισμός της περιοχής,
- Εντοπισμός ανωμαλιών.



Εικόνα 6. Χαρακτηρισμός υπεδάφους



Εικόνα 7. Χαρτογράφηση υπόβαθρου υπεδάφους



Εικόνα 8. Τρισδιάστατη απεικόνιση υπεδάφους

Η πιο κοινή διαδικασία για (1-D, 2-D, και 3-D) MASW έρευνες αποτελείται από τρία βήματα.

1. Απόκτηση δεδομένων: απόκτηση πολυκαναλικών καταγραφών.
2. Ανάλυση δεδομένων (βήμα 1^ο): Ανάλυση διασποράς δημιουργώντας καμπύλη διασποράς από καταγραφή πεδίου, και
3. Ανάλυση δεδομένων (βήμα 2^ο): Αναστροφή και υπολογισμός της ταχύτητας Vs με το βάθος που παρέχει θεωρητική καμπύλη διασποράς, αρκετά κοντά με την καμπύλη από τις καταγραφές πεδίου.

Στη συνέχεια κατασκευάζεται ένας χάρτης 2-D για την ταχύτητα Vs, τοποθετώντας κάθε προφίλ 1-D Vs ταχύτητας σε μια τοποθεσία επιφάνειας που αντιστοιχεί στη μέση της σεισμικής γραμμής.

2.2 Γεωραντάρ-GPR (Ground Penetrating Radar)

2.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η μέθοδος του γεωραντάρ είναι μια σχετικά νέα τεχνική, η οποία αναπτύχθηκε εμπορικά κατά τη δεκαετία του 1970. Ανήκει στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους και βασίζεται στην ανάκλαση υψηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από 8MHz έως 4GHz, σε ασυνέχειες μέσω των οποίων η διηλεκτρική σταθερά και η αγωγιμότητα μεταβάλλονται. Ενώ η σεισμικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται συχνά για την χαρτογράφηση επιφανειακών στρωμάτων άλλα δεν διαθέτουν την ακρίβεια (εντοπισμός υπόγειων κατασκευών με μήκος μικρότερο του 1m) που χρειάζεται σε πολλές εφαρμογές. Το γεωραντάρ είναι η κατάλληλη γεωφυσική μέθοδος σε αυτές τις περιπτώσεις. Η μέθοδος του γεωραντάρ ανήκει στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους. Το γεωραντάρ αποτελείται από μια κεραία που λειτουργεί σαν πομπός, ο οποίος εκπέμπει έναν μικρής διάρκειας ηλεκτρομαγνητικό παλμό. Ο παλμός αυτός ανακλάται από αντικείμενα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, και κατόπιν λαμβάνεται από κεραία δέκτη.

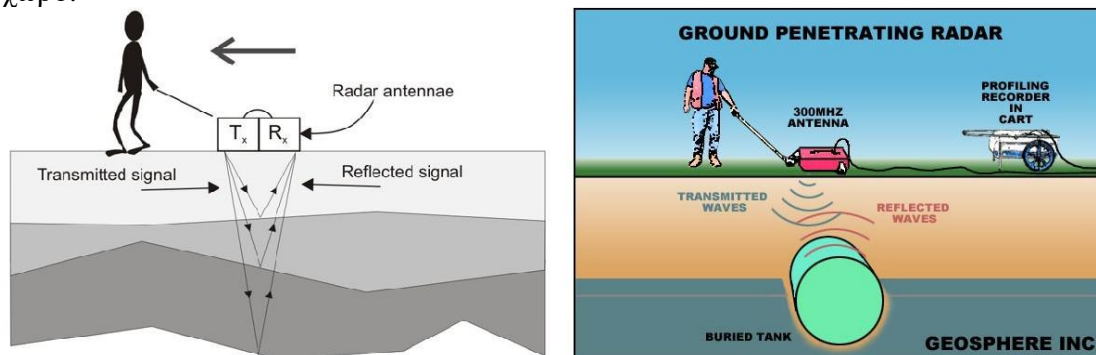
Υλικό	K	σ (mS/m)	ν (m/ns)
Αέρας	1	0	0,3
Αποσταγμένο νερό	80	0,01	0,033
Γλυκό νερό	80	0,5	0,033
Θαλασσινό νερό	80	3×10^3	0,01
Ξηρά άμμος	3-5	0,01	0,15
Διαποτισμένη άμμος	20-30	0,1-1	0,06
Ασβεστόλιθος	4-8	0,5-2	0,12

Σχιστόλιθος	5-15	1-100	0,09
Ιλύς	5-30	1-100	0,07
Άργιλος	5-40	2-1000	0,06
Γρανίτης	4-6	0,01-1	0,13
Ξηρό άλας	5-6	0,01-1	0,13
Πάγος	3-4	0,01	0,16

Πίνακας 2 Ταχύτητες διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, v , τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς, K , και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, σ , για διάφορους τύπους υλικών

Η μέθοδος του γεωραντάρ αποτελεί μια μη καταστρεπτική τεχνική και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε αστικά και σε λοιπά ευαίσθητα περιβάλλοντα. Έχει πολλές γεωλογικές εφαρμογές, όπως η απεικόνιση σε υψηλή ανάλυση ρηχών εδαφικών δομών και πετρωμάτων, αποτύπωση στρωματογραφίας, εντοπισμό θαμμένων καναλιών και χαρτογράφηση ταμιευτήρων νερού, καθώς και εκτίμηση του βάθους των υδροφόρων οριζώντων. Εκτός όμως από γεωλογικές εφαρμογές βρίσκει χρήση και σε άλλους τομείς, όπως στον τομέα της αρχαιολογίας, όπου χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό θαμμένων τοιχίων ή λοιπών κοιλοτήτων. Επίσης, χρησιμοποιείται και σε εγκληματολογικές έρευνες, όπου εντοπίζονται πρόσφατα διαταραγμένα εδάφη σε περιπτώσεις που κρίνεται αναγκαίο.

Όσον αφορά τη βασική αρχή της μεθόδου, ένας πομπός εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό κύμα μέσα στο έδαφος. Όταν το κύμα αυτό συναντήσει μία μεταβολή στις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του εδάφους, είτε λόγω κάποιου βυθισμένου αντικειμένου είτε λόγω της εναλλαγής δύο μέσων με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, μέρος αυτού ανακλάται πίσω προς το δέκτη. Ακολουθώντας διάφορες παραμέτρους διαδικασίας μέτρησης και επεξεργασίας εξασφαλίζουμε την δυνατότητα να έχουμε ανακλώμενο σήμα επιστροφής λόγω παρουσίας κάποιου αντικειμένου. Το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά αυτό του σήματος, εξαρτώνται από τη γεωμετρία και την αντίθεση στις ιδιότητες του αντικειμένου με τον περιβάλλοντα χώρο.



Εικόνα 36. Σχηματική απεικόνιση της βασικής αρχής της λειτουργίας του γεωραντάρ. ανάκλαση του σήματος λόγω: Α) εναλλαγής στρωμάτων (αριστερά), Β) θαμμένου αντικειμένου (δεξιά)

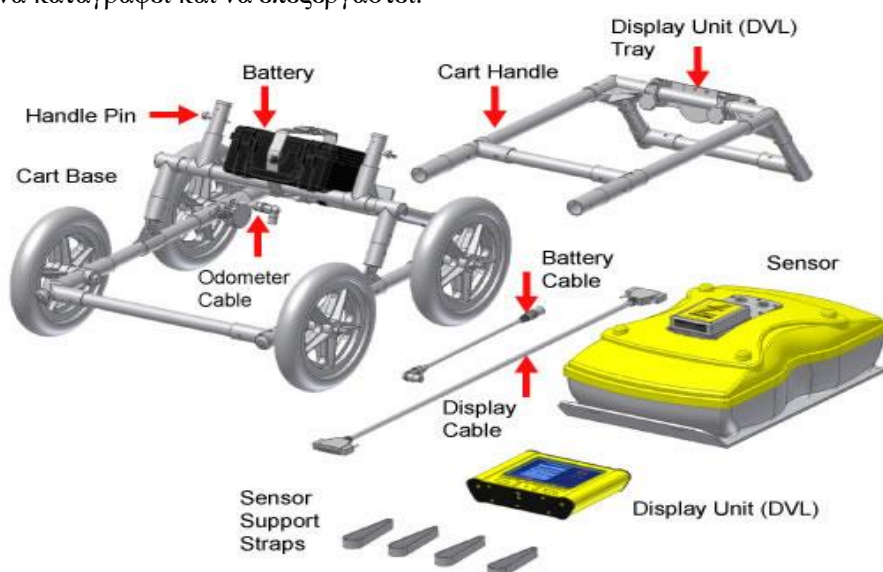
Ο χρόνος που χρειάζεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα για να διαδοθεί από τον πομπό στο δέκτη ανεξαρτήτως της διαδρομής του, ονομάζεται χρόνος διαδρομής. Βασική μονάδα μέτρησης του χρόνου διαδρομής είναι το νάνο-δευτερόλεπτο (ns).

Ο δέκτης καταγράφει τα κύματα που ταξιδεύουν απευθείας από τον πομπό στον δέκτη μέσω του αέρα. Αυτά τα κύματα, αφενός μεν φτάνουν πρώτα, επειδή η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα είναι μεγαλύτερη από ότι σε οποιοδήποτε υλικό, αφετέρου δεν έχουν μεγάλο πλάτος, αφού δεν υφίσταται εξασθένιση. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα κύματα που διαδίδονται στο υπέδαφος. Η καταγραφή του πλάτους των κυμάτων σε σχέση με το χρόνο διαδρομής ονομάζεται ίχνος. Όταν το κύμα συναντήσει υλικό με διαφορετική ηλεκτρική διαπερατότητα, αλλάζει κατεύθυνση δηλαδή διαθλάται ή ανακλάται. Περίθλαση συμβαίνει όταν το κύμα συναντήσει εμπόδια μικρού μεγέθους, τα οποία αναγκάζουν να διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Αντήχηση συμβαίνει, όταν το κύμα «παγιδευτεί» σε κάποιο γεωλογικό στρώμα. Σε τέτοιες περιπτώσεις το κύμα ανακλάται πολλές φορές με συνέπεια τη δημιουργία πολλαπλών ανακλάσεων.

2.2.2 ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

Τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα γεωραντάρ είναι τα ακόλουθα:

- Ένα ηλεκτρικό κύκλωμα (πηγή) που μπορεί να παραγάγει χρονικά κυμαινόμενες τάσεις στο εκάστοτε απαιτούμενο φάσμα συχνοτήτων με ελεγχόμενο και καταγράψιμο τρόπο.
- Μια κεραία πομπός που μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε ένα ακτινοβολούμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα (ραδιοκύματα), το οποίο μπορεί να διεισδύσει δια του υπεδάφους στο στόχο. Η κεραία πομπός, μετασχηματίζει τα ηλεκτρικής τάσης σήματα σε εξωτερικά διαδιδόμενη ενέργεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.
- Ένα σύστημα ανίχνευσης (δέκτης), που αποτελείται συνήθως από μία κεραία και ηλεκτρονικά στοιχεία κυκλώματος, που μπορούν να ανιχνεύσουν τα ανακλώμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και να μετασχηματίσουν σε μια ηλεκτρική τάση που μπορεί να καταγραφεί και να επεξεργαστεί.



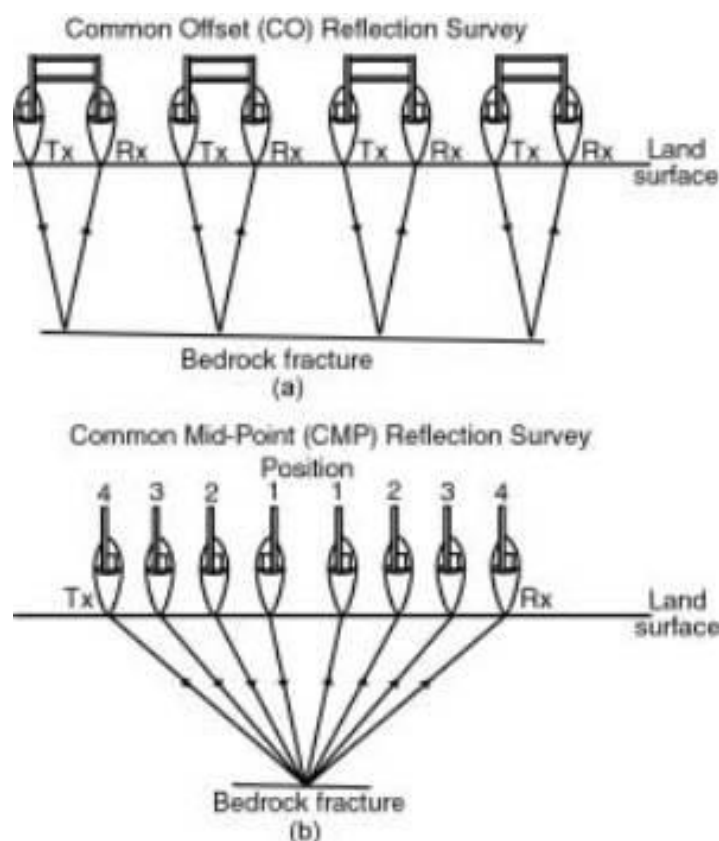
Εικόνα 37. Σχηματική απεικόνιση ενδεικτικών στοιχείων ενός συστήματος γεωραντάρ τοποθετημένου σε φορείο (www.gprlocates.com)

2.2.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΥΠΑΙΘΡΟ

Υπάρχουν δύο διατάξεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να πραγματοποιηθούν οι γεωφυσικές έρευνες με γεωραντάρ:

- I. Η τυπική διάταξη (Common Offset)
- II. Η μέθοδος του κοινού μεσαίου σημείου (Common-Midpoint, CMP)

Στην τυπική διάταξη λειτουργίας ενός συστήματος γεωραντάρ (common offset) ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται σε σταθερή μεταξύ τους απόσταση και μετακινούνται κατά την γραμμική διασκόπηση συλλέγοντας συνεχώς δεδομένα. Συνήθως ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται μέσα σε κουτί θωρακισμένο για μέγιστη κατευθυντικότητα προς τα κάτω και για αποφυγή διάδοσης επιφανειακών κυμάτων.



Εικόνα 38. Σχηματική Απεικόνιση της τυπικής διάταξης (πάνω), της διάταξης του κοινού μεσαίου σημείου (κάτω)

Κατά την έναρξη των μετρήσεων καθορίζουμε την συχνότητα λειτουργίας (operating frequency), το χρονικό παράθυρο (time-window), την χρονική διάφορα μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (temporal sampling interval), την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (spatial sampling interval ή station spacing) και τέλος την θέση των γραμμών διασκόπησης και την πυκνότητά τους (line location and spacing).

Όσο μικρότερη είναι η συχνότητα λειτουργίας των κεραιών του συστήματος γεωραντάρ που χρησιμοποιείται, τόσο μεγαλύτερη είναι η διείσδυση σε βάθος με σαφή όμως μείωση στην ανάλυση που επιτυγχάνεται δηλαδή στην διακριτική ικανότητα ανίχνευσης μεταξύ δύο σημείων του υπεδάφους.

Η μέθοδος του κοινού μεσαίου σημείου (Common-Midpoint), χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης του σήματος του γεωραντάρ ως προς το βάθος μεταβάλλοντας την απόσταση των κεραιών κατά μια καθορισμένη απόσταση κάθε φορά, κρατώντας σταθερό το κέντρο της διάταξης και μετρώντας τις αντίστοιχες μεταβολές του χρόνου από και προς το σημείο ανάκλασης .



Εικόνα 39. Απεικόνιση ολοκληρωμένου συστήματος Γεωραντάρ, όπως αυτό χρησιμοποιήθηκε κατά τη Γεωφυσική Έρευνα στην περιοχή της Λυκόβρυσης

Βάθος και Ανάλυση

Το βάθος και η ανάλυση του γεωραντάρ εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες. Η ταχύτητα και η πυκνότητα δειγματοληψίας εξαρτώνται από τις ρυθμίσεις του οργάνου και την μέθοδο έρευνας, ενώ τόσο η ευαισθησία σε βάθος όσο και η χωρική ανάλυση εξαρτώνται από τις συνθήκες του εδάφους(υγρασία, τύπος ιζημάτων) και τη συχνότητα της κεραίας.

Η ευαισθησία σε βάθος είναι άμεσα συνδεδεμένη με την αγωγιμότητα του εδάφους. Το μεγαλύτερο ποσοστό του εδάφους είναι έστω και λίγο αγώγιμο και έτσι μέρος της ενέργειας που διοχετεύεται, μετριάζεται ή μετατρέπεται σε ηλεκτρικά ρεύματα και διασκορπίζεται προτού φθάσει στο δέκτη (Conyers, 2004). Καθώς τα ραδιοκύματα κινούνται βαθύτερα μέσα στο έδαφος, όλο και λιγότερη ενέργεια μπορεί να υποστεί ανάκλαση με αποτέλεσμα να υπάρχει μία απώλεια σήματος αναλογικά με το βάθος. Για να αντιμετωπιστεί η απώλεια αυτή, το σήμα που λαμβάνεται, ενισχύεται, ώστε να είναι δυνατή η ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Conyers, 2004).

Ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το βαθμό απώλειας είναι η υγρασία. Η διάδοση του σήματος επιδεινώνεται από την παρουσία ηλεκτρολυτών και αργιλικών ορυκτών, τα οποία συχνά κατακρατούν υγρασία ακόμα και σε πολύ ξηρά περιβάλλοντα. Επιπροσθέτως, η θεώρηση ότι η διεξαγωγή μετρήσεων σε ξηρά περιβάλλοντα με την μέθοδο του γεωραντάρ είναι ιδανική, δεν αποτελεί πάντα σωστό κανόνα καθώς με την παρουσία άλατος και σε συνδυασμό με μικρή μόνο περιεκτικότητα σε υγρασία μπορεί να δημιουργήσει υψηλή αγωγιμότητα και επομένως σημαντική απώλεια σήματος.

Ο άλλος παράγοντας ο οποίος επηρεάζει το βάθος και τη χωρική ανάλυση είναι η πυκνότητα. Μια κεραία πολύ χαμηλής συχνότητας, όπως των 50 MHz, μπορεί να στείλει σήμα μέχρι και τα 50 m, ή και περισσότερο, μέσα στο έδαφος, αυτό όμως θα είχε σαν αποτέλεσμα μια πολύ φτωχή χωρική ανάλυση (Conyers, 2004). Αντίθετα με μια κεραία υψηλότερης

συχνότητας όπως μιας των 1000 MHz , παρόλο που η χωρική ανάλυση θα ήταν σαφώς καλύτερη και λεπτομερέστερη, το βάθος διασκόπησης θα περιοριζόταν σε μερικά εκατοστά.

Πλεονεκτήματα του Γεωραντάρ

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η ταχύτητα διεξαγωγής των μετρήσεων και η υψηλή ανάλυση των αποτελεσμάτων και ειδικότερα σε μικρά βάθη. Όταν τα προφίλ των μετρήσεων βρίσκονται κοντά σε γεωτρήσεις ή άλλες πηγές που παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την στρωματογραφία, τα πρωτογενή δεδομένα μπορούν, αν αναλυθούν σε σωστή κλίμακα, να ερμηνευθούν σε πραγματικό χρόνο παράλληλα με τις μετρήσεις.

Σε εδάφη που χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές αγωγιμότητας, η διασκόπηση μπορεί να φθάσει μέχρι τα 15-20 m σε βάθος με τη χρήση κεραιών χαμηλής συχνότητας. Ωστόσο το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η διασκόπηση σε μικρά βάθη, μέχρι τα 5-6 m, όπου μπορεί να παρέχει ανάλυση και απεικόνιση των υπεδαφικών σχηματισμών της τάξης κάποιων εκατοστών, βέβαια με τη χρήση κεραιών υψηλότερων συχνοτήτων.

Μειονεκτήματα του Γεωραντάρ

Η επιτυχία στην εφαρμογή της μεθόδου αυτής εξαρτάται από την εκάστοτε τοποθεσία. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους είναι ο κύριος περιοριστικός παράγοντας ως προς το βάθος διεξόδου. Χαρακτηριστικά, το βάθος αυτό μπορεί να είναι εξαιρετικά περιορισμένο αν η αγωγιμότητα του εδάφους είναι υψηλή ($> 30 \text{ mS/m}$). Μάλιστα, αν η περιοχή έρευνας καλύπτεται από ένα αργιλικό στρώμα, τότε αυτό πρέπει να αφαιρεθεί προκειμένου να μπορεί να εφαρμοσθεί αποτελεσματικά η συγκεκριμένη μέθοδος. Αυτό συμβαίνει γιατί η ικανότητα διασκόπησης του γεωραντάρ κάτω από τα αγωγίμα αυτά στρώματα μπορεί να είναι ακόμη και μηδενική.

Ένας άλλος παράγοντας που δρα περιοριστικά ως προς το βάθος έρευνας είναι ο διασκορπισμός των ραδιοκυμάτων εξαιτίας μεγάλων χάλικων ή τεμαχίων πετρώματος. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση κεραιάς χαμηλότερης συχνότητας.

Η αδυναμία εφαρμογής του γεωραντάρ σε ανώμαλα εδάφη αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της μεθόδου. Για να υπάρχει κατευθυντικότητα των κυμάτων προς το εσωτερικό του εδάφους, πρέπει η κεραία να βρίσκεται σε στενή επαφή με την επιφάνειά του και για αυτόν το λόγο, το έδαφος δε θα πρέπει να είναι ιδιαιτέρως τραχύ ή να περιλαμβάνει αντικείμενα όπως δέντρα, φράκτες ή και όγκους πετρωμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Εφαρμογή Γεωφυσικών Μεθόδων για την αποτύπωση του εδάφους στη Διεθνή Βιβλιογραφία

3.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ, ΕΚΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΙΟΥ ΛΙΜΑΝΙΟΥ ΤΗΣ ΌΣΤΙΑ (ΙΤΑΛΙΑ) ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Tina Wunderlich a, Dennis Wilken a*, Ercan Erkul a*, Wolfgang Rabbel a*, Andreas Vott b*,*

Peter Fischer b, Hanna Hadler b*, Michael Heinzelmann c**

a Institute of Geosciences, Christian-Albrechts-University of Kiel, Otto-Hahn-Platz 1, 24118, Kiel, Germany

b Institute of Geography, Johannes Gutenberg-University of Mainz, Johann-Joachim-Becher-Weg 21, 55099, Mainz, Germany

c Institute for Archaeology, University of Cologne, Albertus-Magnus-Platz, 50923, Cologne, Germany

3.1.1 Σκοπός και προσέγγιση

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε αφορά τη διερεύνηση του αρχαίου λιμανιού της Όστια στην Ιταλία, στην όχθη του Τίβερη. Συντελέστηκε συνδυασμός γεωφυσικών και γεωαρχαιολογικών ερευνών για τον προσδιορισμό της έκτασης της λεκάνης του λιμανιού, τα χαρακτηριστικά της ιζηματογενούς πλήρωσης του και την εύρεση τυχών ανθρωπογενών δομών / κτισμάτων στην περιοχή. Οι γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η τομογραφία ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης (ERT), το γεωραντάρ (GPR) και η σεισμική μέθοδος με αξιοποίηση των κυμάτων S και P. Η έκταση και το σχήμα της λεκάνης του λιμανιού προσδιορίστηκαν από τα προφίλ που προέκυψαν από την ηλεκτρική τομογραφία (ERT). Ακόμα τα προφίλ ERT συνδυάστηκαν σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο δείχνοντας ότι η πρώιμη λεκάνη της λιμνοθάλασσας του λιμανιού είχε διαστάσεις τουλάχιστον 100 m πλάτος και 50 m μήκος.

Το νότιο σύνορο του λιμανιού επιβεβαιώθηκε από τις μετρήσεις GPR, που απεικονίζουν με σαφήνεια τη μετάβαση από το έδαφος στο νερό (λεκάνη κατάκλισης) και την αρχή μιας αρχαίας χερσαίας οικοδομικής κατασκευής. Στα ανατολικά σύνορά του θα μπορούσε να είναι ένας ενοποιημένος ορίζοντας χαρτογραφημένος σε βάθος 2-3 m σύμφωνα με την ανάλυση των κυμάτων P. Αυτός ο ορίζοντας πιθανότατα να αντιπροσωπεύει ένα οικοδόμημα (ράμπα), ένα μικρό μέρος του οποίου είχε ανασκαφεί σε προηγούμενη έρευνα. Η ιζηματογενής πλήρωση της πρώιμης λεκάνης του λιμανιού διερευνήθηκε με ένα συνδυασμό vibrocoring, ERT και σεισμικών.

Τα προφίλ της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση της στρωματογραφίας και χρησίμευσαν σαν παρεμβολή μεταξύ των θέσεων που υπήρχαν

δείγματα από γεωτρήσεις (vibracore), όπου παρατηρείται με ακρίβεια η στρωματογραφία. Αποδείχθηκε ότι μια ιζηματογενής στρώση, η οποία είναι σημαντική για την ανάπτυξη του λιμανιού, δεν θα μπορούσε να αποτυπωθεί από την ηλεκτρική τομογραφία, αλλά εμφανίζεται σαφώς στα προφίλ σεισμικής ταχύτητας σε συνάρτηση με το βάθος. Πρόκειται για ένα λεπτό χονδρόκοκκο στρώμα υψηλής ενέργειας σε βάθος 1-2 m, το οποίο προκλήθηκε από τσουνάμι, σύμφωνα με προηγούμενη μελέτη. Αυτό το στρώμα διαχωρίζει δύο φάσεις του λιμανιού: μια παλαιότερη λιμναία φάση από κάτω και μια νεότερη φάση ποτάμιας απόθεσης πάνω από αυτό. Το στρώμα υψηλής ενέργειας αντιπροσωπεύει μια λεπτή ζώνη, όπου υπάρχει 100% αύξηση της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων σε σύγκριση με τις πιο λεπτές στρώσεις στις οποίες είναι ενσωματωμένο.

Οι στόχοι της γεωφυσικής-γεωαρχαιολογικής προσέγγισης - εξερεύνησης του λιμανιού της Όστια, που παρουσιάζεται εδώ είναι:

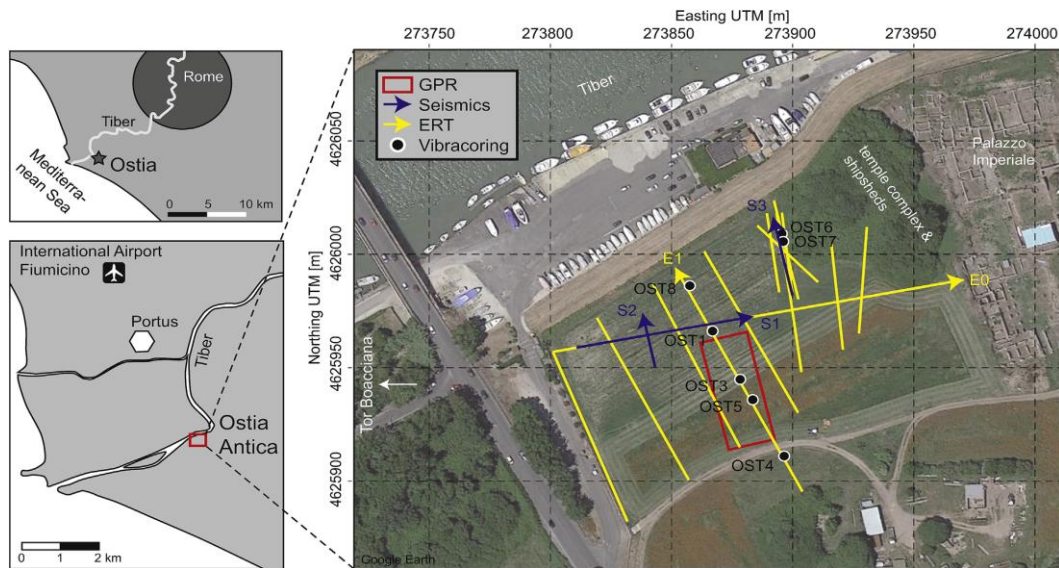
- 1) ο προσδιορισμός της έκτασης της λιμενικής λεκάνης
- 2) ο προσδιορισμός της στρωματογραφίας της ιζηματογενούς πλήρωσης και του βάθους του λιμανιού
- 3) η αναζήτηση αρχαίων λιμενικών κατασκευών γύρω από το λιμάνι.

Γεωφυσικές μέθοδοι

3.1.2 Σεισμικά

Τρία σεισμικά προφίλ αποκτήθηκαν στην περιοχή του λιμανιού παράλληλα με τα προφίλ ERT. Για τις τομές χρησιμοποιήθηκαν τρεις Geode 24 καναλιών σειсмоγράφοι (της Geometrics) και οριζόντια γεώφωνα των 10 Hz με μεταξύ τους απόσταση 1 m για τα προφίλ S1 και S2 και γεώφωνα 10 Hz με απόσταση 0,2 m για το προφίλ S3. Στα προφίλ S1 και S2 τα διατμητικά κύματα και τα επιφανειακά κύματα Love δημιουργήθηκαν με πλευρικό χτύπημα μιας μικρής οριζόντιας χαλύβδινης μπάρας με σφυρί. Τα κύματα P για την S3 παράχθηκαν με κάθετο χτύπημα μιας χαλύβδινης πλάκας που βρισκόταν στο έδαφος.

Τα κύματα Love που καταγράφηκαν στα προφίλ S1 και S2 ερμηνεύτηκαν χρησιμοποιώντας την προσέγγιση MASW. Ωστόσο, το προφίλ S3 είναι μια διαφορετική περίπτωση, καθώς εδώ χρησιμοποιήθηκαν τα κύματα P.



Εικόνα 40. Χάρτης περιοχής λιμανιού της Όστια με επισήμανση των σεισμικών, ηλεκτρικών και γεωραντάρ τομών

3.1.3 Ηλεκτρική τομογραφία

Δεκατρία γεωηλεκτρικά προφίλ που καλύπτουν ολόκληρη την περιοχή του λιμανιού καταγράφηκαν χρησιμοποιώντας το Syscal R1 Plus Switch 48 (Iris Instruments) και το RESECS (GeoServe) με διαστήματα μεταξύ των ηλεκτροδίων 0,75 m, 1 m και 2 m. Σε αυτά τα προφίλ χρησιμοποιήθηκαν διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων (dipole-dipole, Wenner alpha και Schlumberger) και συνδυάστηκαν σε μια τομογραφία (αντιστροφή). Σε αυτές τις αναστροφές ένα αρχικό μοντέλο ειδικών αντιστάσεων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των αντίστοιχων θεωρητικών δεδομένων χρησιμοποιώντας μοντελοποίηση. Το θεωρητικό σύνολο δεδομένων συγκρίνεται με το μετρημένο σύνολο δεδομένων και αξιολογείται με βάση το βαθμό συμφωνίας μεταξύ των δύο. Το αρχικό μοντέλο μεταβάλλεται προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η τιμή του σφάλματος με έναν επαναληπτικό τρόπο. Το μοντέλο με το ελάχιστο λάθος είναι που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό που θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει την ειδική αντίσταση του υπεδάφους. Η θέση και το ύψος κάθε ηλεκτροδίου μετρούνται με συσκευή Topcon HiPer Pro DGPS (FC-250) και Leica DGPS σε UTM συντεταγμένες (date WGS1984).

Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας οι διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων συνδυάστηκαν και τα ύψη ηλεκτροδίων ανατέθηκαν στα δεδομένα. Σε ένα πρώτο βήμα συγκρίθηκαν οι μετρήσεις και των δύο οργάνων, οι οποίες δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές και έτσι και τα δύο σύνολα δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό στην ακόλουθη μελέτη. Για τη 2D τομογραφική αντιστροφή εφαρμόστηκε το λογισμικό BERT. Στο τέλος όλα τα ανεστραμμένα 2D προφίλ συνδυάστηκαν και απεικονίστηκαν σε ένα 3D.

Η ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται κυρίως από την ηλεκτρική αντίσταση του υγρού των πόρων και συνεπώς της αλατότητας του και του κορεσμού των πόρων. Για ιζήματα με ίσο πορώδες και κορεσμό, εκείνο με την υψηλότερη αλατότητα θα

δείξει χαμηλότερη αντίσταση σε σύγκριση με το άλλο με χαμηλή αλατότητα. Ένας επιπλέον παράγοντας είναι η περιεκτικότητα σε άργιλο, η οποία έχει μια πρόσθετη επιφανειακή αγωγιμότητα, που οδηγεί σε χαμηλότερη ειδική αντίσταση του ιζήματος.

3.1.4 GPR

Οι μετρήσεις GPR εφαρμόστηκαν στην περιοχή γύρω από το λιμάνι για την χαρτογράφηση πιθανών αρχαίων ανθρωπογενών δομών και τον εντοπισμό των συνόρων της λεκάνης του λιμανιού. Χρησιμοποιήθηκε μια κεραία 200 MHz και το GSSI SIR-3000. Τα προφίλ αποκτήθηκαν κάθε 0,3 m με 100 σαρώσεις / s και σε μια χρονική περίοδο 100 ns. Η επεξεργασία αποτελείται από (1) προσαρμογή σε μηδενικό χρόνο χρησιμοποιώντας το πρώτο σήμα του ευθέως κύματος, (2) έλεγχος για διαφορές στην ταχύτητα διασταυρώνοντας τις συντεταγμένες των σημαδιών με σκοπό τη δημιουργία κανάβου 0.02 m, (3) μετατροπή των συντεταγμένων από τοπικές σε συντεταγμένες UTM, (4) μετατόπιση των οριζοντίων γραμμών αφαιρώντας ένα μέσο ίχνος και (5) τοποθέτηση των παράλληλων προφίλ με παρεμβολή σε έναν κύβο 3D και διαμερισμός σε κομμάτια, χρονικά. Η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων προσδιορίστηκε από τη μία μέτρηση CMP (κοινό μέσο σημείο) και βρέθηκε ότι είναι 10 cm/ns.

3.1.5 Vibracoring

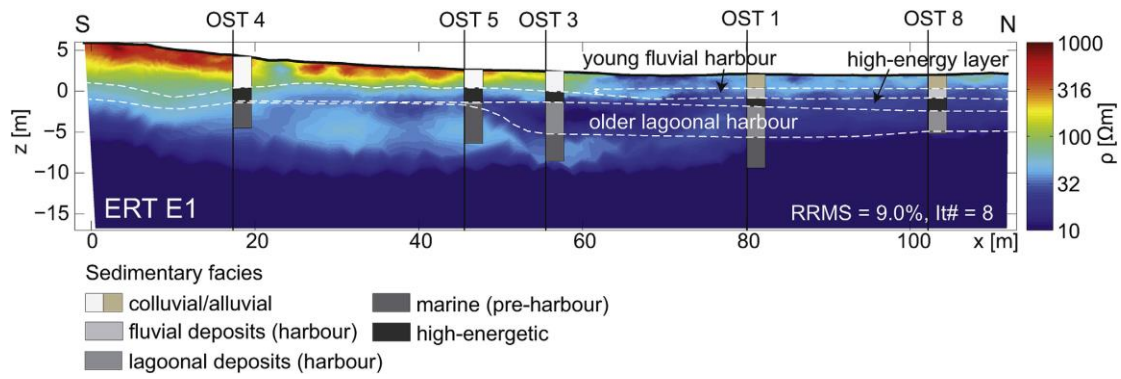
Διεξήχθει διάτρηση για να μελετηθεί η στρωματογραφία της λεκάνης και ως βάση για την αξιολόγηση των γεωφυσικών μεθόδων. Οκτώ πυρήνες διατρήθηκαν μέχρι 12 μέτρα το πολύ κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, χρησιμοποιώντας μια αυτοκινούμενη πλατφόρμα γεώτρησης (Nordmeyer RS 0 / 2.3). Τα δείγματα (Vibracores) φωτογραφήθηκαν και καταγράφηκε η δομή τους.

3.1.6 Αποτελέσματα

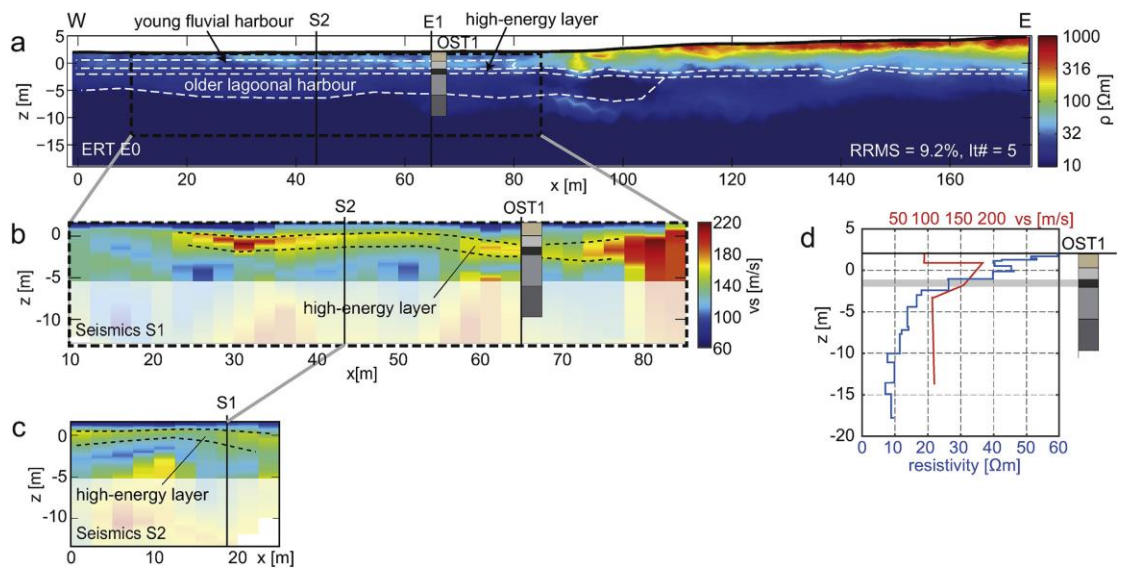
Η στρωματογραφία εξάχθηκε από το συνδυασμό των γεωφυσικών μεθόδων (ηλεκτρικά, σεισμικά) και των πυρήνων που διατρήθηκαν κατά μήκος δύο χαρακτηριστικών τομών (E1 και E0 / S1, [Εικόνα 40](#)). Παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων ERT του προφίλ E1, που διασχίζει τη λεκάνη από το νότο προς το βορά, με τα δείγματα των πυρήνων από τις γεωτρήσεις ([Εικόνα 41](#)). Η υψηλή ειδική αντίσταση του ανώτερου στρώματος αντιστοιχεί σε μια απόκλιση που οφείλεται σε προσχωσιγενή ιζήματα χαμηλότερων αντιστάσεων μεταξύ των θέσεων δειγματοληψίας OST 3 και OST 1. Τα OST 1 και 8 δείχνουν σαφώς ένα στρώμα άμμου που κυριαρχεί σε όλο το μήκος σε βάθος 1.7-2.7 m κάτω από την επιφάνεια, το οποίο έχει πάχος 1 m και αντιστοιχεί σε αποθέσεις του ποταμού και στις υποκείμενες αποθέσεις. Κάτω από αυτό το στρώμα το μέγεθος των κόκκων αυξάνεται σημαντικά και μια ζώνη υψηλής ενέργειας ακολουθεί κατά μήκος ολόκληρου του προφίλ, πάλι περίπου 1 m. Στο βόρειο μισό του προφίλ σχηματίζεται ένα στρώμα ιζηματογενών αποθέσεων, με περίπου 3m πάχος, που ερμηνεύεται ως παλαιότερη φάση με βάση σε βάθος περίπου 7,6 m κάτω από την επιφάνεια. Στο νότιο τμήμα του προφίλ, η επαφή μεταξύ των αλουβιακών αποθέσεων και της ζώνης υψηλής ενέργειας μπορούν να αναγνωριστούν στην ηλεκτρική τομογραφία από την έντονη μείωση της αντίστασης

(από > 300 Ωm έως <100 Ωm). Τα ιζήματα του ποταμιού, της λιμναίας λεκάνης ποτάμιων λιμνιών και η ζώνη υψηλής ενέργειας παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές ηλεκτρικής αντίστασης σε διάφορα σημεία, οπότε δεν αξιοποιήθηκε εδώ η ηλεκτρική τομογραφία.

Η ιζηματογενής κάλυψη των ποτάμιων αποθέσεων χαρακτηρίζεται από ελαφρώς υψηλότερη αντίσταση, αλλά μια σαφής διεπαφή μεταξύ τους δεν μπορεί να διακριθεί. Το όριο από τα λιμναία έως τα υποκείμενα θαλάσσια ιζήματα ανιχνεύεται από μια ισχυρή μείωση των τιμών ειδικής αντίστασης (<10 Ω+m) μεταξύ vibracore OST 1 και 8. Στις θέσεις OST 4, 5 και 3 τα θαλάσσια ιζήματα φαίνονται στην ERT ως αντιστάσεις γύρω στα 50 Ωm, όμως περίπου στα 9 m κάτω από τη στάθμη της θάλασσας οι αντιστάσεις μειώνονται ακόμα περισσότερο έως <10 Ωm. Οι χαμηλότερες αντιστάσεις σε αυτό το στρώμα προς τα βόρεια μπορούν να εξηγηθούν από τα υπόγεια ύδατα με αυξημένη αλατότητα που προέρχονται από τον ποταμό, ο οποίος συνδέεται με τη Μεσόγειο. Στην ERT μια άλλη διεπαφή είναι ορατή στα 10 m περίπου, που χωρίζει μια περιοχή με πολύ χαμηλή ειδική αντίσταση (<5 Ωm) από κάτω. Δυστυχώς δεν υπάρχουν δεδομένα vibracoring εδώ, και έτσι δεν μπορούμε να ερμηνεύσουμε αυτό το στρώμα. Το προφίλ ERT E0 (Εικόνα 42a) που εκτείνεται από δυτικά προς ανατολικά δείχνει τις ίδιες δομές και αντιστάσεις όπως το προφίλ E1. Η λεκάνη βρίσκεται στα δυτικά του προφίλ. Καλύπτεται από τα προσχωσιγενή ιζήματα που υποδεικνύονται με τιμές αντίστασης περίπου 30 Ωm. Το στρώμα υψηλής ενέργειας δεν είναι εμφανές στην ERT λόγω του μικρού πάχους του και της χαμηλής αντίθεσης του σε ειδική ηλεκτρική αντίσταση (Εικόνα 42d). Το τμήμα του λιμένα καλύπτεται επίσης από ένα σεισμικό προφίλ (S1 στην Εικόνα 40). Το σχετικό προφίλ διατμητικής ταχύτητας (Εικόνα 42b) είναι περισσότερο αποκαλυπτικό από το προφίλ ηλεκτρικής αντίστασης και δείχνει μια οριζόντια ζώνη αυξημένης ταχύτητας (> 150 m / s) με μεταβαλλόμενο βάθος από 1- 4 m κάτω από την επιφάνεια και πάχος περίπου 1-2 m. Η σύγκριση με τα δεδομένα της δειγματοληψίας (vibracore) OST 1 δείχνει ότι αυτό το στρώμα υψηλής σεισμικής ταχύτητας ταιριάζει με τη ζώνη υψηλής ενέργειας που χωρίζει τις δύο φάσεις του λιμανιού (τις λιμναίες αποθέσεις από τις ποτάμιες). Και εντοπίζεται κατά μήκος όλου του προφίλ. Η άμεση σύγκριση μεταξύ σεισμικών ταχυτήτων και στρωματογραφίας (από τους πυρήνες) στην Εικόνα 32d δείχνουν ότι το στρώμα υψηλής σεισμικής ταχύτητας είναι γενικά παχύτερο σε σύγκριση με αυτό που προκύπτει από τα δεδομένα των γεωτρήσεων. Αυτό οφείλεται στην πιο χονδροειδή ανάλυση που δίνουν τα σεισμικά δεδομένα. Στα 7 m περίπου οι ταχύτητες δείχνουν σε ορισμένα σημεία απότομη αύξηση, η οποία μπορεί να συσχετιστεί με τη μετάβαση από λεπτόκοκκα λιμναία ιζήματα σε χονδρόκοκκους θαλάσσιους σχηματισμούς σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της ERT και των γεωτρήσεων.



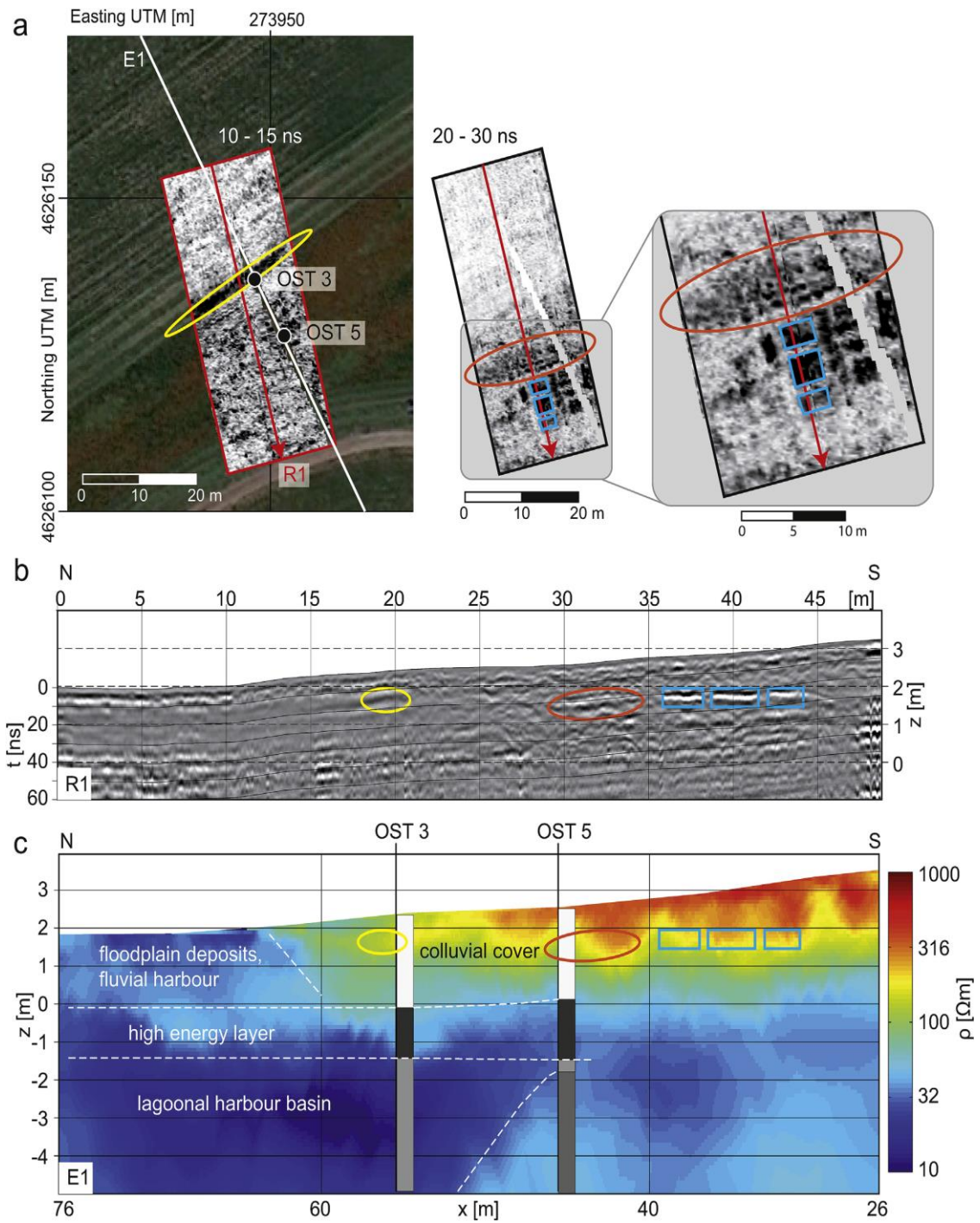
Εικόνα 41. Ηλεκτρικό προφίλ τομής E1 και γεωτρητικών δεδομένων



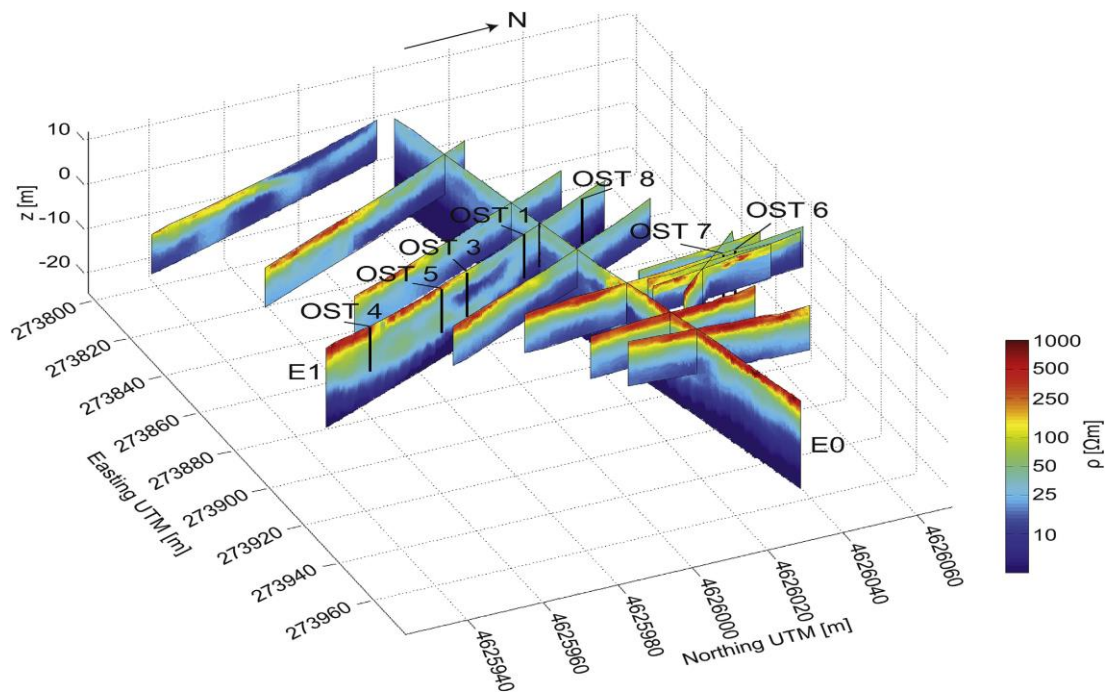
Εικόνα 42. Σύγκριση ηλεκτρικού προφίλ E0 και σεισμικού προφίλ S1 (a & b). Σεισμικό προφίλ S2 (c). Σύγκριση ταχύτητας διατμητικών κυμάτων και ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο σημείο δηγματοληψίας OST1 (d)

Η συνοριακή περιοχή της λιμενικής λεκάνης διερευνήθηκε λεπτομερέστερα με το GPR. Η περιοχή που ερευνάται βρίσκεται στα νότια της πρώην λιμενικής λεκάνης. Δύο τομές GPR αυτής της περιοχής εμφανίζονται στην Εικόνα 43a. Η πρώτη τομή δείχνει τη δομή του υπεδάφους στα 0,5 - 0,75 m όπου είναι ορατή μια στενή ζώνη υψηλής αντανακλαστικής ενέργειας που διασχίζει την περιοχή από τα νοτιοδυτικά προς τα βορειοανατολικά κοντά στην τοποθεσία δειγματοληψίας OST 3. Μια σύγκριση με το κάθετο ραδιόγραμμα R1 (Εικόνα 43b) δείχνει μια ελαφρά βυθιζόμενη (περίπου 3 m) ευρεία ανάκλαση. Η δεύτερη τομή δείχνει μια δομή σε βάθος 1-1,5 m. Αρκετά ορθογώνια αντικείμενα εμφανίζονται με πολλαπλές ανακλάσεις (σημειωμένα με μπλε κουτιά) και μια ζώνη αυξημένης ανακλαστικότητας σε σύγκριση με το βόρειο τμήμα της περιοχής (που σημειώνεται με πορτοκαλί κύκλο) είναι ορατή. Οι ορθογώνιες δομές αντιστοιχούν σε ισχυρές ανακλάσεις στην κατακόρυφη τομή R1, οι οποίες διαχωρίζονται σαφώς από χαμηλά ανακλαστικά κενά πλάτους 0,5 m. Μετά από τοπογραφική διόρθωση αυτές οι ανακλάσεις εμφανίζονται αυστηρά οριζόντιες. Έτσι

μπορεί να θεωρηθεί ανθρωπογενούς προέλευσης, δηλαδή οικοδομικές κατασκευές / συντρίμια. Η περιοχή που σημειώνεται με πορτοκαλί δείχνει μια σχεδόν οριζόντια ανάκλαση, αλλά όχι τόσο ισχυρή, όπως στα μπλε κουτιά. Θεωρούμε όλες αυτές τις δομές ως υπολείμματα κτιρίων ή υποδομών επειδή βρίσκονται σε ίδιο βάθος (1 m), που αντιστοιχεί στο αρχαίο κατασκευαστικό επίπεδο. Η λεκάνη του λιμανιού είναι αναγνωρίσιμη στα αποτελέσματα του GPR ως περιοχή χαμηλής ανακλαστικότητας και μειωμένης αναλογίας σήματος / θορύβου (S / N) κάτω από 40 ns. Η μείωση του λόγου S / N προκαλείται από χαμηλές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης που οδηγούν σε αυξημένη εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Στα ηλεκτρικά το προφίλ E1 χρησιμοποιείται για σύγκριση (Εικόνα 43c). Το προφίλ E1 βρίσκεται κοντά αλλά όχι ακριβώς στην ίδια θέση με την τομή R1. Οι κατασκευές παραμένουν σαφώς απεικονισμένες από το GPR, δεν διακρίνονται καλά από την ERT αλλά εξακολουθούν να εμφανίζονται ως τοπικές πυκνώσεις στα 1,5 m με 2 m. Η τοποθεσία της γραμμής GPR (σημειωμένη με κίτρινο χρώμα) συμπίπτει με τη (σταδιακή) μετάβαση από τις αλλούβιες αποθέσεις στην περιοχή της πλημμυρικής ζώνης. Επομένως, υποθέτουμε ότι η γραμμή GPR δείχνει την πρώιμη ακτογραμμή. Για τον προσδιορισμό των διαφορετικών πλευρικών εκτάσεων και των δύο, του λιμανιού και του ποτάμιου λιμανιού, όλα τα προφίλ ERT αντιστράφηκαν με τις ίδιες ρυθμίσεις παραμέτρων επεξεργασίας και εμφανίζονται σε ένα τρισδιάστατο σχήμα (3D) (Εικόνα 44). Το 3D σχήμα δείχνει το αλλούβιο στρώμα στο νότο και ανατολικά ζώνες υψηλής ηλεκτρικής αντίστασης (κόκκινο και κίτρινο) και την παλιά λιμναία απόθεση (σκούρο μπλε) πλευρικά περίπου 10 m, προτού μεταβεί σταδιακά σε αλλούβιες αποθέσεις (πράσινο). Η έκταση της λεκάνης προς βορρά και δύση δεν μπορεί να προσδιοριστεί λόγω των σύγχρονων κατασκευών, όπως ένας χώρος στάθμευσης στα δυτικά και ένας ποταμόδρομος στο βορρά.



Εικόνα 9. Σύγκριση δεδομένων GPR και ERT : a) GPR τομές με σημειωμένες ανωμαλίες b) ραδόγραμμα R1 με σημειωμένες ανωμαλίες c) μέρος του προφίλ Y1 της ειδικής αντίστασης και απλοποιημένα δεδομένα στρωματογραφίας



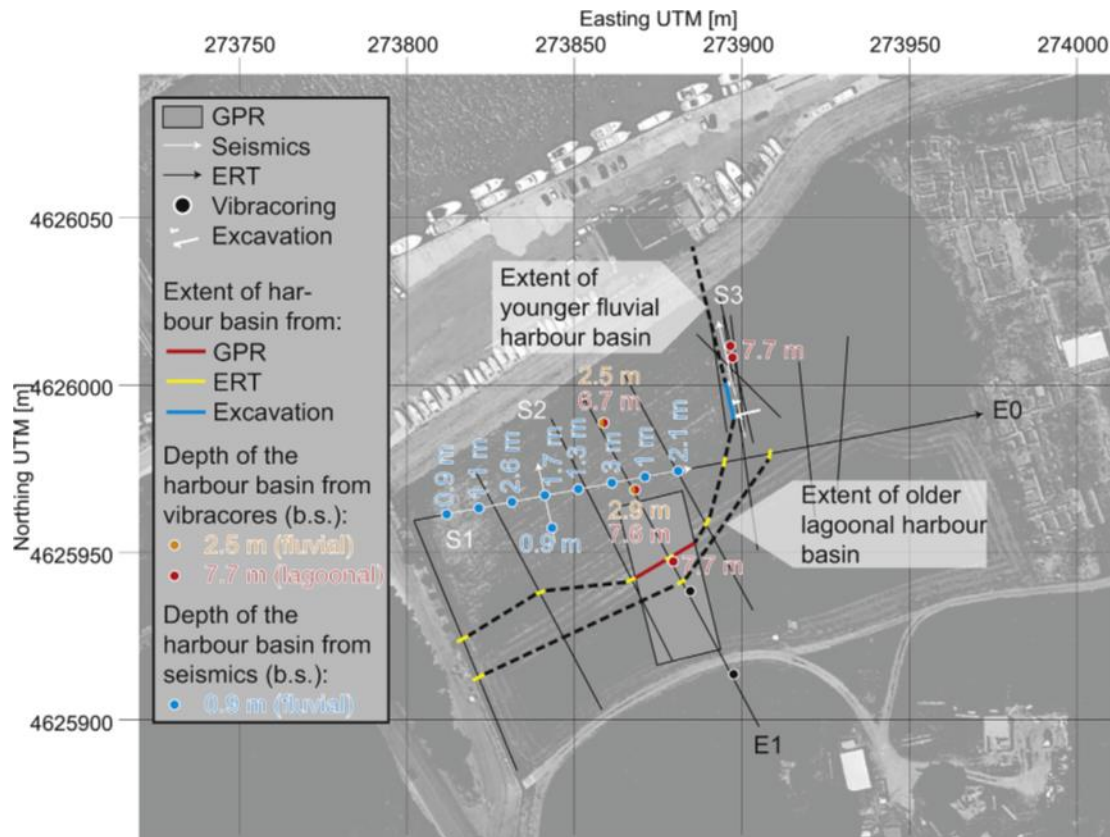
Εικόνα 10. Τρισδιάστατη απεικόνιση των ηλεκτρικών τομών ειδικής αντίστασης (οι θέσεις των γεωτρήσεων διακρίνονται με μαύρες γραμμές)

3.1.7 Συμπεράσματα

Το λιμάνι της Όστια διερευνήθηκε με βάση ένα συνδυασμό σεισμικών, ERT, GPR και δειγματοληψιών και προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Στρωματογραφία και πλήρωση της λεκάνης: Το λιμάνι αποτελείται από δύο φάσεις: α) μια παλαιότερη λιμναία φάση με τη βάση της σε περίπου 7.6 m βάθος και β) νεότερη φάση που χαρακτηρίζεται από ποτάμια ιζήματα με τη βάση τους σε περίπου 2,7 m κάτω από την επιφάνεια. Οι δύο φάσεις διαχωρίζονται μεταξύ τους από μια λεπτή χονδρόκοκκη υψηλής ενέργειας ζώνη, η οποία δημιουργήθηκε από ένα τσουνάμι. Αυτή η στρώση είναι αναγνωρίσιμη στα προφίλ σεισμικών και έχει πάχος 1-2 m και εμφανίζει 100% αυξημένες ταχύτητες διατμητικών κυμάτων. Η μελέτη αυτή είναι η πρώτη που δείχνει ότι τα σεισμικά κύματα διάτμησης έχουν τη δυνατότητα να χαρτογραφήσουν ένα σχετικά λεπτό στρώμα με σημαντικά πιο χονδροειδές υλικό, το οποίο σχετίζεται με το τσουνάμι και έχει ταυτοποιηθεί με γεωτρήσεις. Με οδηγό τους πυρήνες της δειγματοληψίας οι δύο φάσεις του λιμένα μπορούν να εντοπιστούν στην τομογραφία της ERT, αλλά η ERT αποτυγχάνει από μόνη της να αποδώσει τη ζώνη υψηλής ενέργειας λόγω του μικρού της πάχους και της χαμηλής αντίθεσης αντίστασης της.
2. Πλευρική έκταση της λεκάνης απορροής: Με βάση τα γεωτρητικά δεδομένα και τις ERT μπορεί να κατασκευαστεί ένα προφίλ (3D) ενός μοντέλου λιμενικής λεκάνης, που δείχνει μικρές διαφορές στις πλευρικές επεκτάσεις των δύο φάσεων. Τα όρια ορίζονται σαφώς στα ανατολικά και στα νότια. Η ελάχιστη έκταση της λεκάνης είναι περίπου 100 m x 50 m. Το παλαιότερο λιμάνι έφτανε τα 8-15 m πιο νότια και ανατολικά. Και οι δύο φάσεις της λεκάνης μπορούν να επεκταθούν περισσότερο προς τα δυτικά και προς τα βόρεια, όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις λόγω αδυναμίας

εκτέλεσης τους. Στο νότο μια σαφώς καθορισμένη αιχμή εμφανίζεται στις τομές GPR που πιθανότατα υποδεικνύει τα σύνορα της νεότερης λεκάνης.



Εικόνα 11. Διαστάσεις των δύο λεκανών βάσει των γεωφυσικών δεδομένων διαφόρων μεθόδων

3.2 GPR ΚΑΙ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟ ΧΩΡΙΟ MIRABELLO (ΣΕΙΣΜΟΣ ΕΝΤΑΣΗΣ 5.9R, 2012)

Luca Baradello *, Flavio Accaino
Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS), Borgo Grotta Gigante 42/c, 34010 Sgonico, Trieste, Italy

3.2.1 Εισαγωγή

Ιδιαίτερα σημαντική έχει αποτελέσει η εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων σε αστικό περιβάλλον για τη διερεύνηση της επιρροής του σεισμού μεγέθους 5.9R το 2012 στο έδαφος στην περιοχή του Mirabello της Βόρειας Ιταλίας. Συνέπεια του σεισμού αποτέλεσε το φαινόμενο της ρευστοποίησης της άμμου, το οποίο και οδήγησε στη δημιουργία επιφανειακών ρηγμάτων και κατ' επέκταση σε διάφορες ζημιές σε κτίρια της περιοχής.

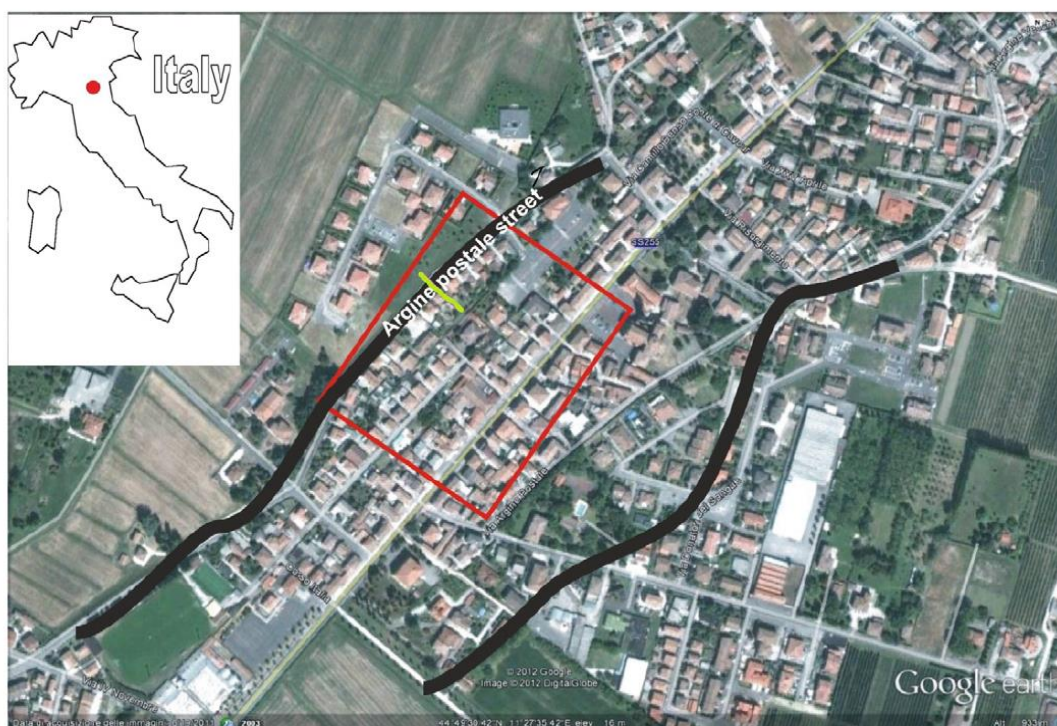
Οι παραπάνω καταστροφές οφείλονται στην επιφανειακή γεωλογία της περιοχής, η οποία αποτελείται από αλουβιακές αποθέσεις οι οποίες επίκεινται σε βραχώδη στρώματα που εντοπίζονται αρκετά μέτρα βαθύτερα. Η ύπαρξη κορεσμένης άμμου στα

άνωτερα στρώματα, λόγω του υδροφόρου ορίζοντα που παρατηρείται κοντά στην επιφάνεια, οδηγεί στο φαινόμενο της ρευστοποίησης της άμμου. Κατά το εν λόγω φαινόμενο, λόγω των ισχυρών σεισμικών κυμάτων, η άμμος χάνει σημαντικό μέρος της διατμητικής αντοχής της και συμπεριφέρεται ως ρευστό με αποτέλεσμα να δημιουργούνται διακλάσεις κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

Για την ανάλυση της επιρροής της ρευστοποίησης στο υπέδαφος της περιοχής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar) και η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης. Αφενός μεν μέσω των τομών που προέκυψαν με τη χρήση του γεωραντάρ αποτυπώνονται επιφανειακές ασυνέχειες, αφετέρου δε, με τη χρήση των σεισμικών μεθόδων ερευνώνται βαθύτερες τομές, ενώ παράλληλα παρέχεται η δυνατότητα της συσχέτισης των επιφανειακών ασυνεχειών που εντοπίζονται με το γεωραντάρ με βαθύτερα ρήγματα της περιοχής που εντοπίζονται με τις σεισμικές μεθόδους.

3.2.2 Μέθοδοι

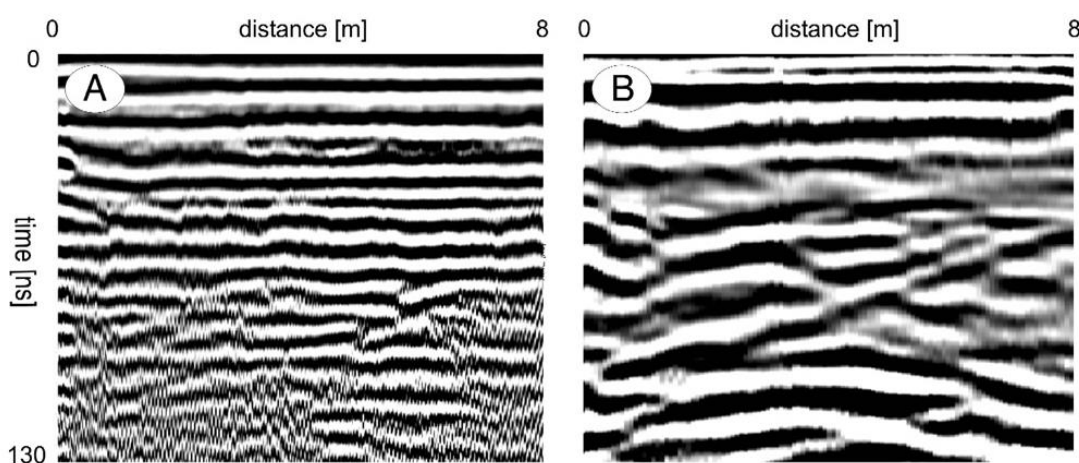
Εντοπίστηκε μία συγκεκριμένη περιοχή στο Mirabello, όπου και παρατηρήθηκαν σημαντικές καταστροφές σε κτίρια λόγω της ανύψωσης, των καθιζήσεων και των διαφορικών μετακινήσεων του εδάφους, αποτέλεσμα της ρευστοποίησης που προκλήθηκε από τη σεισμική δόνηση. Για τη χαρτογράφηση του υπεδάφους της συγκεκριμένης περιοχής πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές έρευνες με τη χρήση GPR και σεισμικών τομογράφων κατά μήκος της οδού Agrine Postale (Εικόνα 46).



Εικόνα 46. Χάρτης γεωφυσικών ερευνών (κόκκινο τετράγωνο) στο χωριό Mirabello. Οι μαύρες γραμμές υποδηλώνουν τις όχθες ενός παλαιού ποταμού (Reno river) και η κίτρινη γραμμή το σεισμικό προφίλ.

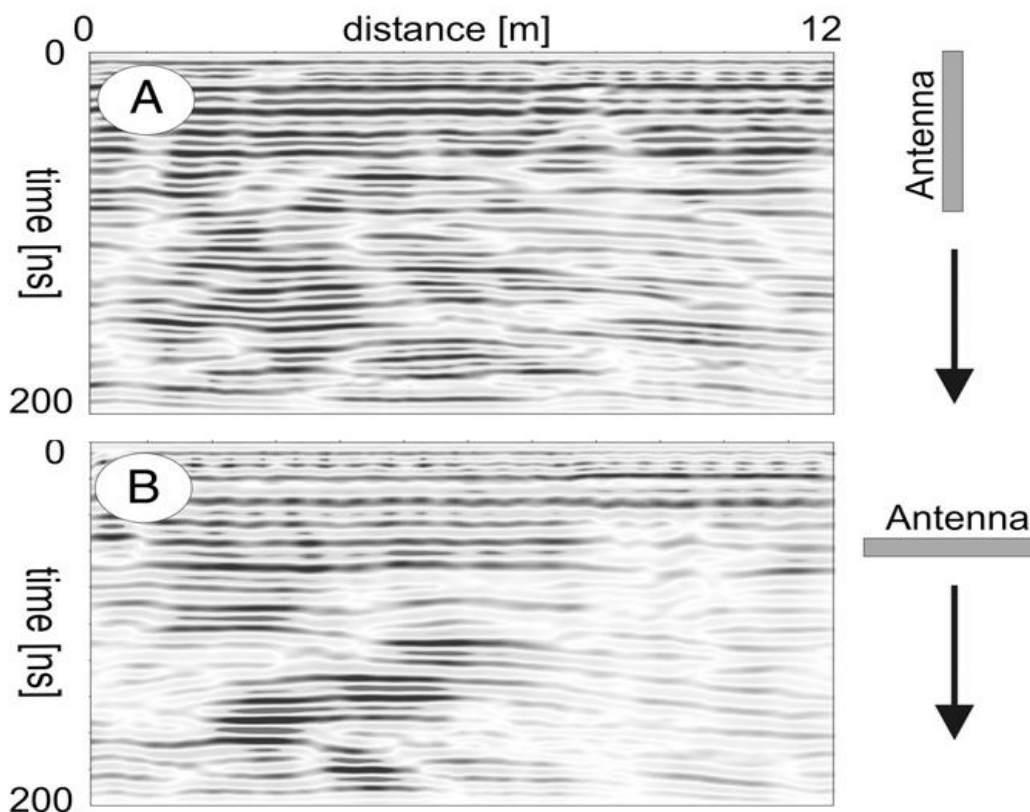
Για τη μέθοδο του γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκε το σύστημα GSSI SIR 2000 Georadar στις συχνότητες των 100, 200, 400 MHz. Οι υψηλές συχνότητες παρείχαν μεγαλύτερη λεπτομέρεια στα αποτελέσματα, ενώ οι μικρότερες παρείχαν περισσότερη διεισδυτικότητα σε βάθος, αλλά με χαμηλότερη ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Στη συγκεκριμένη έρευνα τα συλλεχθέντα προφίλ εδάφους στις υψηλές συχνότητες αφορούν μικρά βάθη διείσδυσης, ενώ φαίνεται να επηρεάστηκαν από θόρυβο, ο οποίος οφείλεται στην παράλληλη ύπαρξη συνεκτικού υλικού στο υπέδαφος. Έγινε προσπάθεια για την εξάλειψη του θορύβου των μετρήσεων στις υψηλότερες συχνότητες με διάφορες τεχνικές, ωστόσο δεν επιτεύχθηκε η διατήρηση των πραγματικών χαρακτηριστικών του εδάφους σε συνδυασμό με την εισαγωγή πλασματικών αλλαγών φάσης, με αποτέλεσμα η ερμηνεία των αποτελεσμάτων αναφορικά με τις ασυνέχειες να μην μπορεί να θεωρηθεί έγκυρη.



Εικόνα 47. Τομές που συλλέχθηκαν με το GPR στο ίδιο σημείο με κεραίες 200MHz(A) και 100 MHz(B). Ο σχετικός θόρυβος στην υψηλότερη συχνότητα αποκρύπτει το στόχο και αποτρέπει τη διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο έδαφος.

Για την καλύτερη αποτύπωση των ασυνεχειών ως προς τα σημεία τα οποία εντοπίζονται, το μέγεθος και τη διεύθυνσή τους, τα δεδομένα συλλέχθηκαν κατευθύνοντας την κεραία του γεωραντάρ τόσο παράλληλα όσο και εγκάρσια. Αυτό έγινε διότι η ποιότητα της απεικόνισης του υπεδάφους εξαρτάται από το πως η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εισέρχεται στις ασυνέχειες του εδάφους λόγω τη ρευστοποίησης που προκλήθηκε.



Εικόνα 48 Τομή από το γεωραντάρ που αποκτήθηκε με μονοστατική κεραία 100MHz: A) Παράλληλα και B) εγκάρσια.

Στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 48) φαίνονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν με το γεωραντάρ σε συχνότητα 100MHz, με δύο διαφορετικές κάθετες μεταξύ τους κατεύθυνσης κεραίας. Η κεραία που ρυμουλκήθηκε με το δίπολο παράλληλα προς την κατεύθυνση της τομής ανίχνευσε με μεγαλύτερη ακρίβεια το διαχωρισμό των στρωμάτων άμμου εντός του αργιλικού εδάφους.

Σε συνδυασμό με τις τομές του γεωραντάρ, επί της οδού Agrine Postale, πραγματοποιήθηκαν σεισμικές μετρήσεις. Η σεισμική τομή καταγράφηκε από την αλουβιακή πεδιάδα (δυτικά) κάθετα στην κοίτη του παλαιοποταμού (ανατολικά). Για την επίτευξη υψηλών συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκε σφυρί ως σεισμική πηγή και γεώφωνα με φυσική συχνότητα 100 MHz. Τα γεώφωνα τοποθετήθηκαν ανά 2 μέτρα ενώ το μήκος της διάταξης τους ήταν 75 μέτρα. Τέλος οι σεισμικές κρούσεις πραγματοποιήθηκαν ανά 2 μέτρα, κατά μήκος της γραμμής..

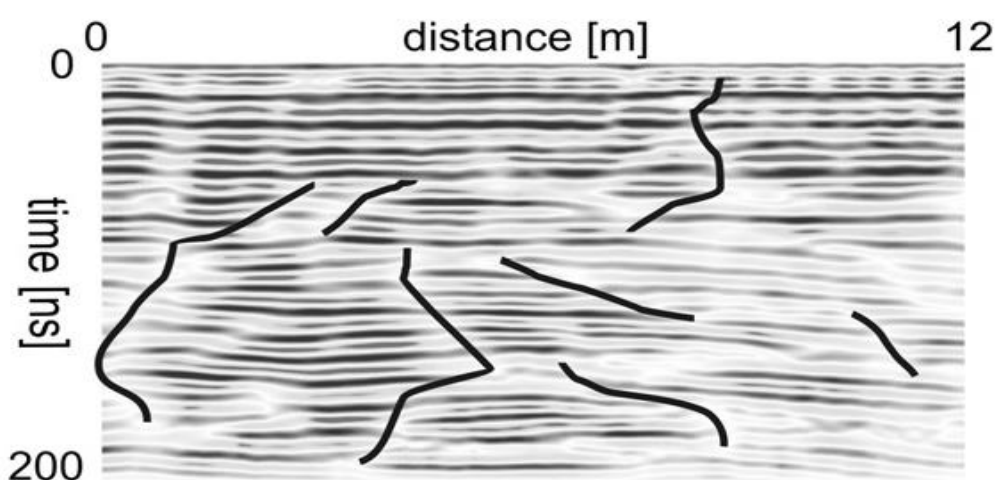
Για την αποτύπωση των δεδομένων αναφορικά με τις επιφανειακές δομές του υπεδάφους πραγματοποιήθηκε αντιστροφή των πρώτων αφίξεων του σεισμικού τομογράφου.



Εικόνα 49. Φωτογραφία της τάφρου που εντοπίζεται στο πεδίο έρευνας στο Mirabello και στην οποία είναι εμφανείς ασυνέχειες λόγω της ρευστοποίησης

3.2.3 Συζήτηση

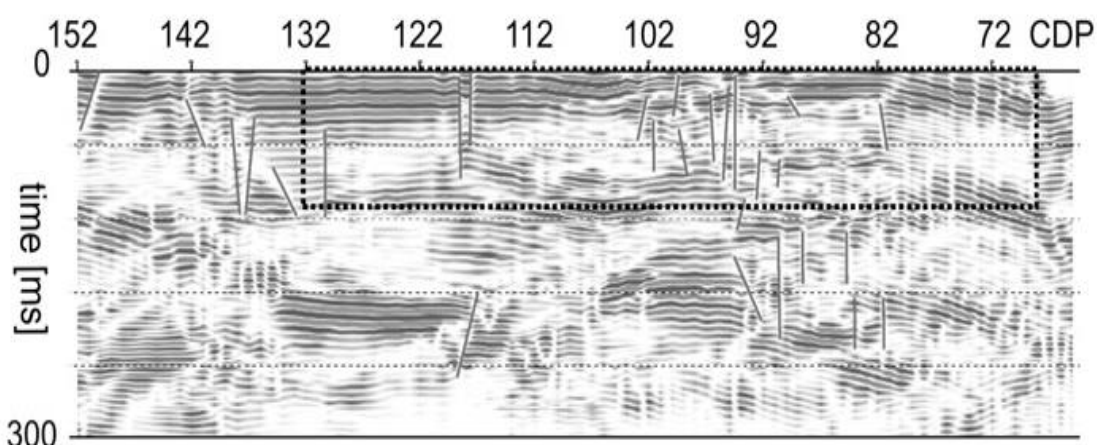
Όλες οι επεξεργασμένες τομές από το γεωραντάρ απεικονίζουν ανακλώμενα σήματα που μπορούν να μεταφραστούν ως διεπαφές των αργιλικών και των αμμώδων στρωμάτων. Οι διεπαφές αυτές δεν είναι παράλληλες στην επιφάνεια και μπορούμε να πούμε ότι σχετίζονται με εναλλασσόμενες επιφάνειες διάβρωσης και παλαιότερες καθιζίσεις. Ένα καλό παράδειγμα της ανωτέρω γεωμετρίας απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 50).



Εικόνα 50. Τομή από το γεωραντάρ με κεραία 100 MHz(εγκάρσια), όπου είναι εμφανείς, λόγω των αλλαγών φάσης(μαύρες γραμμές), διάφορες ασυνέχειες στις οποίες έχει διηθηθεί άμμος και συνδέονται με τη διαδικασία της ρευστοποίησης λόγω σεισμού

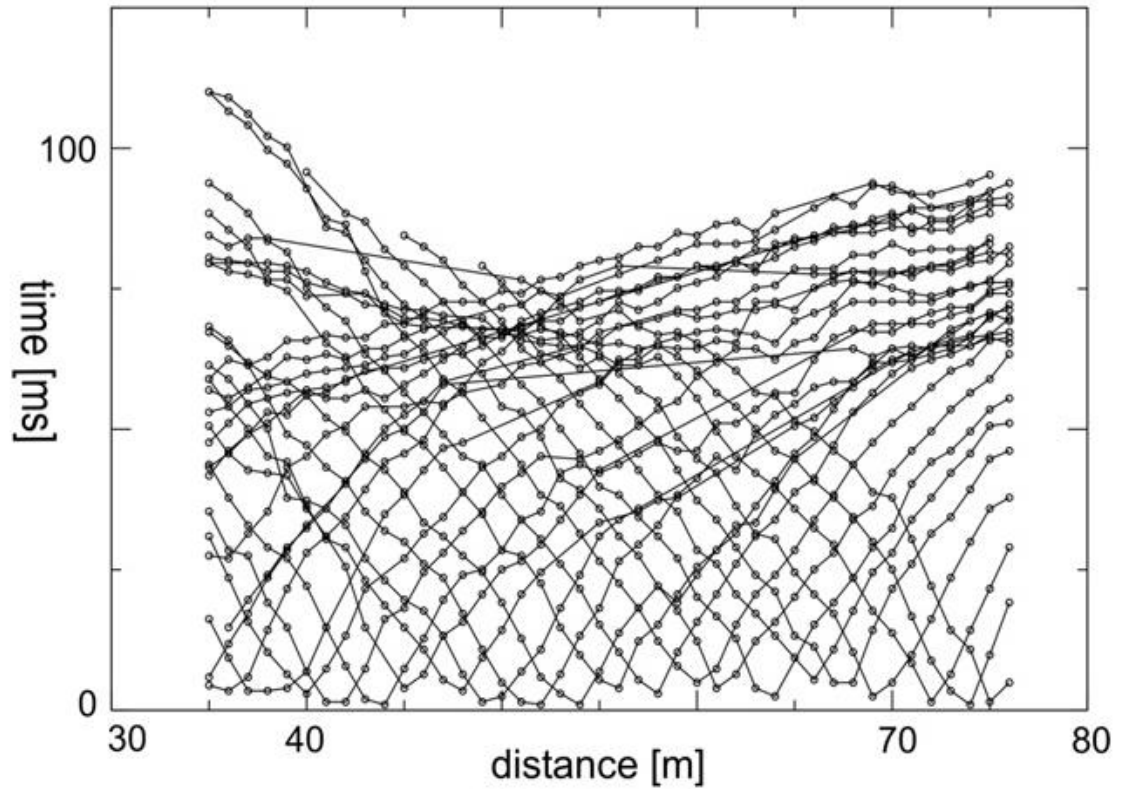
Η τομή από το GPR δείχνει μία σειρά από κυματοειδείς ανακλάσεις που συνδέονται με τις εναλλαγές στρωμάτων άμμου και αργίλου. Σε ορισμένες περιπτώσεις (μαύρες γραμμές) οι εναλλαγές αυτές υποδηλώνουν το φαινόμενο της ρευστοποίησης που έχει προκληθεί από το σεισμό. Αν και χαμηλότερης ανάλυσης, η κεραία των 100MHz προτιμήθηκε για την εν λόγω έρευνα, μιας και καθιστά περισσότερο ευκρινείς τις ασυνέχειες που έχουν προκληθεί. Οι ασυνέχειες αυτές προκαλούν απότομη αλλαγή στις ηλεκτρικές και διηλεκτρικές σταθερές των υλικών του υπεδάφους, οι οποίες ανιχνεύονται από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Είναι μεγάλη η πιθανότητα, να έχει υπάρξει ροή νερού αναμειγμένου με άμμο προς την επιφάνεια διαμέσου των συγκεκριμένων ρηγμάτων.

Η σεισμική τομή δείχνει την παρουσία ασυνεχών ανακλάσεων έως 0,15 sec. Αρκετά ρήγματα εμφανίζονται και στην επιφάνεια όπως φαίνεται και παρακάτω στην [Εικόνα 51](#), ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι η επιφανειακή εικόνα του πεδίου συνάδει με τα αποτελέσματα της μέτρησης. Στο σημείο που αντιστοιχεί στο Common Depth Point των 140m, υπήρχε διαφυγή νερού, ενώ στο αντίστοιχο σημείο των 95m ήταν εμφανές ένα ρήγμα. Είναι επίσης ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι πέραν των επιφανειακών ασυνεχειών αναγνωρίζονται βαθύτερα ρήγματα (0,1sec), γεγονός το οποίο υποδηλώνει τη συσχέτιση στη δημιουργία των βαθύτερων με τα επιφανειακά ρήγματα.

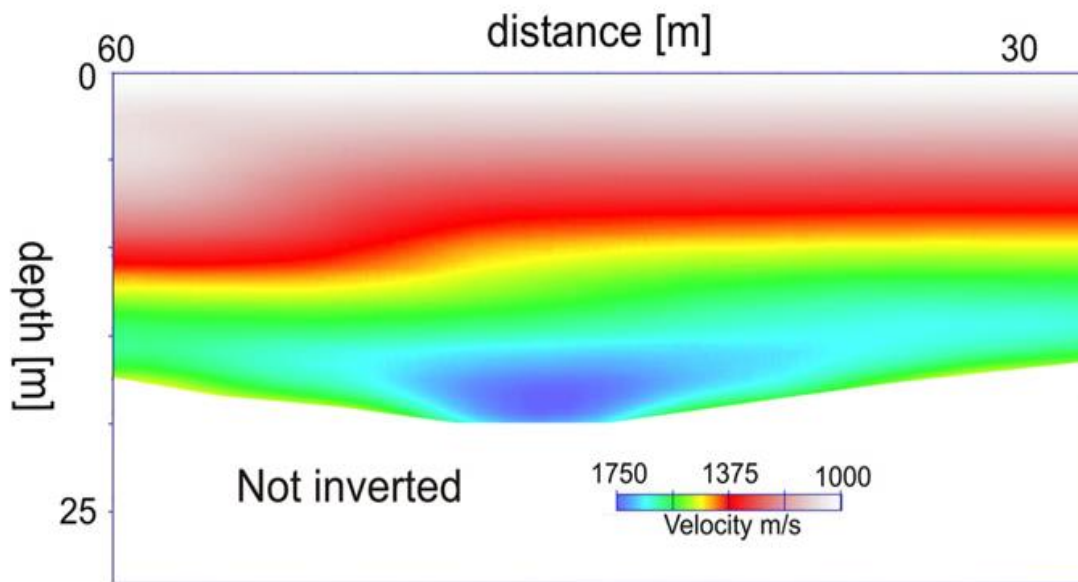


[Εικόνα 51](#). Σεισμική τομή μετά από επεξεργασία. Το μαύρο ορθογώνιο υποδηλώνει το πεδίο διεξαγωγής μετρήσεων με GPR.

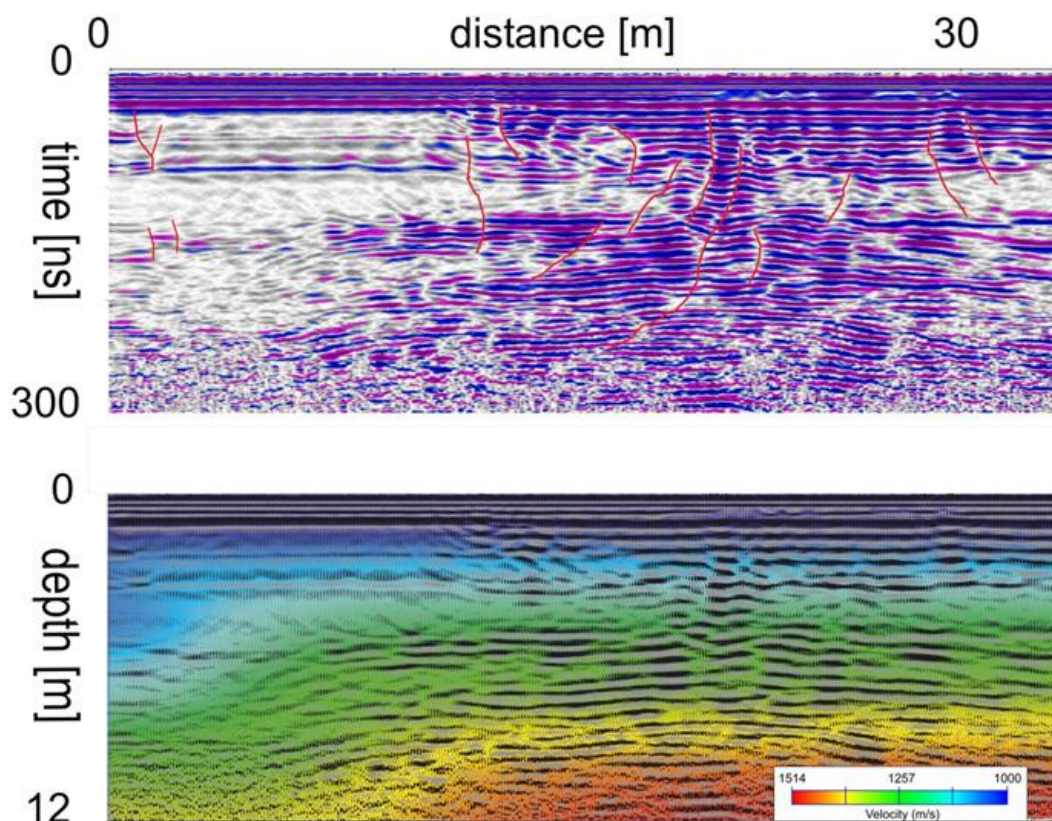
Το πεδίο ταχυτήτων από την τομογραφική αντιστροφή των πρώτων αφίξεων, και οι επιλεγμένες πρώτες αφίξεις, φαίνονται στις [Εικόνες 52 και 53](#). Το μέγιστο το βάθος που ερευνήθηκε είναι περίπου 20 μέτρα στο κεντρικό τμήμα της σεισμικής γραμμής, ενώ το εύρος ταχύτητας κυμαίνεται από 1,7 km / s (περίπου 17-18 m σε βάθος) έως περίπου 1 km / s στο τμήμα κοντά στην επιφάνεια.



Εικόνα 52. Πρώτες αφίξεις σεισμικών κυμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την τομογραφική αντιστροφή



Εικόνα 53. Εύρος ταχυτήτων που προκύπτει από την αντιστροφή των πρώτων αφίξεων



Εικόνα 54. Η τομή από το GPR σε αντιστοιχία με τη σεισμική τομή και το εύρος ταχυτήτων στο υπέδαφος που προέκυψαν από την αντιστροφή των πρώτων αφίξεων. Οι κόκκινες γραμμές δείχνουν τις ασυνέχειες που προκύπτουν από την αλλαγή φάσης

Στην Εικόνα 54 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα από το γεωραντάρ συνάδουν με τα αποτελέσματα του σεισμικού μοντέλου, δεδομένου ότι η ηλεκτρομαγνητικές ανακλάσεις που καταγράφονται έρχονται σε συμφωνία με τις αλλαγές ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων εντός του εδάφους.

Μεταξύ των 4 και 8 μέτρων παρατηρείται, βάσει της σεισμικής τομογραφίας μία αλλαγή στην ταχύτητα διάδοσης. Στην τομή από το γεωραντάρ η ανωμαλία αυτή φαίνεται μέσω των αλλαγών του ηλεκτρομαγνητικού σήματος. Στο αριστερά μέρος της παραπάνω φωτογραφίας παρατηρείται εξασθένηση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος με αποτέλεσμα να μην είναι αναγνωρίσιμες οι ανακλάσεις, γεγονός που πιθανότατα σχετίζεται με την ύπαρξη υλικού υψηλής αγωγιμότητας. Η χαμηλότερη σεισμική ταχύτητα μεταξύ βάθους 4 και 8 λεπτών πιθανώς σχετίζεται με αυξανόμενη λάσπη που έχει υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Οι σεισμικές ταχύτητες αποκαλύπτουν ότι το νερό βρίσκεται πιθανότατα σε βάθος περίπου 10-12 μ. Αυτό μπορεί εύκολα να εξηγηθεί επειδή η γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε ένα μήνα μετά το σεισμό και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα μειώθηκε, λόγω της θερμής περιόδου, σε σχέση με την χρονική στιγμή του σεισμού, οπότε και είχε παρατηρηθεί 4m πιο κοντά στην επιφάνεια.

3.2.4 Συμπεράσματα

Με βάση τη γεωφυσική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο Mirabello το καλοκαίρι του 2012 (ένα μήνα μετά τον σεισμό των 5.9R) συμπεραίνεται ότι η μέθοδος του GPR είναι μια έγκυρη και γρήγορη μέθοδος διερεύνησης του φαινομένου της ρευστοποίησης, μίας διαδικασίας δηλαδή η οποία οφείλεται σε μια ισχυρή σεισμική δόνηση. Η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων της έρευνας εξαρτάται από την ηλεκτρομαγνητική συχνότητα της κεραίας που χρησιμοποιείται. Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η παρουσία αργιλικού, υψηλά αγώγιμου, υλικού, κοντά στην επιφάνεια του εδάφους που απορροφά το σήμα που μεταδίδεται προς το υπέδαφος. Στην παρούσα έρευνα τα ρήγματα και οι διαρροές νερού μέσω αυτών ερμηνεύονται εύκολα, ακολουθώντας τις αλλαγές φάσης του ανακλώμενου σήματος που λαμβάνεται με την κεραία των 100 MHz.

Από την άλλη πλευρά, η σεισμική μέθοδος μας επιτρέπει να εξάγουμε πληροφορίες για τις βαθύτερες δομές. Το κύριο συμπέρασμα είναι ότι τα επιφανειακά ρήγματα σχετίζονται με βαθύτερα και επομένως δεν αποτελούν συνέπεια μόνο της ρευστοποίησης που προκλήθηκε λόγω του σεισμού.

Με την παράλληλη διεξαγωγή των σεισμικών μεθόδων και της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου του γεωραντάρ μας επιτρέπεται να ορίσουμε και να ερμηνεύσουμε με πιο ολοκληρωμένο τρόπο τις δομές του υπεδάφους. Η κατανομή και το σχήμα των ασυνεχειών στην άμμο δύναται να έχει πολύ χρήσιμα οφέλη στη συντήρηση και την επισκευή των κτιρίων που έχουν υποστεί ζημιές.

3.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ S ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΙΚΡΟΥ ΒΑΘΟΥΣ 9 ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΣΕ ΤΡΙΣΔΙΑΤΑΤΗ ΜΟΡΦΗ, ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΚΥΜΑΤΩΝ RAYLEIGH – ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΛΙΟΥ

YUDI PAN *, SVENJA SCHANENG, TILMAN STEINWEG, THOMAS BOHLEN

KARLSRUHE INSTITUTE OF TECHNOLOGY (KIT), GEOPHYSICAL INSTITUTE, KARLSRUHE, GERMANY.

3.3.1 Εισαγωγή και λήψη μετρήσεων

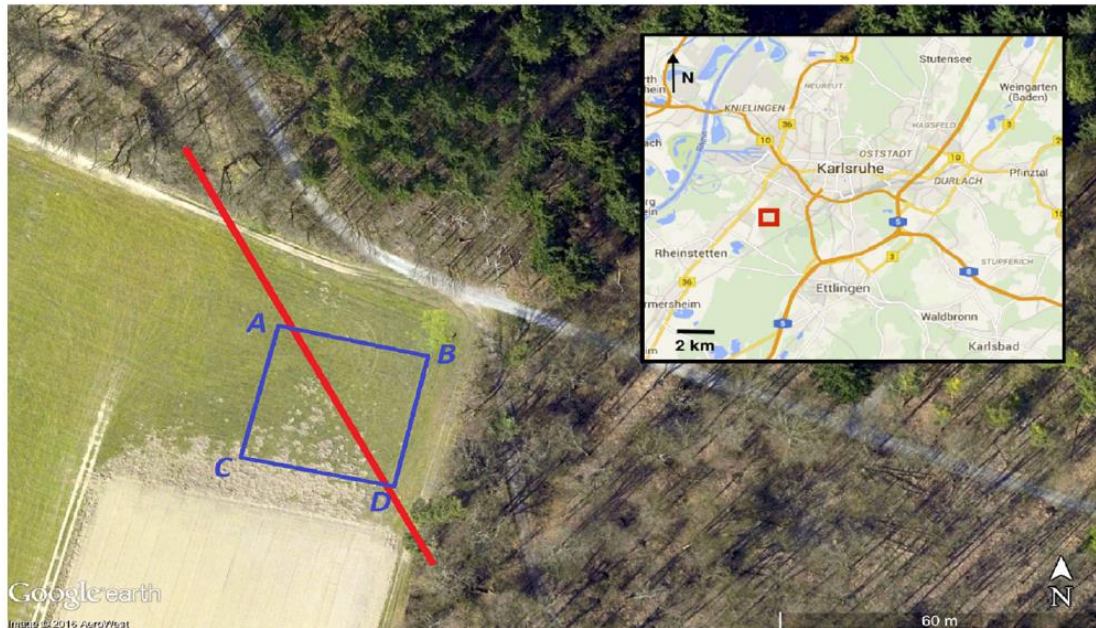
Τόσο τα κύματα Rayleigh και όσο και τα Love, κυριαρχούν στα μικρά βάθη των πεδίων μέτρησης σεισμικών μεθόδων, γεγονός που καθιστά την επεξεργασία και την ανάλυση τους ιδιαίτερα χρήσιμη στον προσδιορισμό της διατμητικής ταχύτητας των στρωμάτων κοντά στην επιφάνεια. Η μέθοδος MASW, μέσω της οποίας επεξεργάζονται τα επιφανειακά κύματα, αποτελεί μία αποδοτική μέθοδο που χρησιμοποιείται ευρέως στις σεισμικές μετρήσεις.

Το κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η μετατροπή των δεδομένων που λαμβάνονται από τα σειсмоγράμματα και σχετίζονται με τη χρονική καταγραφή των κυματικών αρίξεων στο χώρο, σε δεδομένα ταχυτήτων. Επιτυγχάνεται, λοιπόν, μέσω της αντιστροφής της καμπύλης διασποράς των συχνοτήτων, η δημιουργία ενός μονοδιάστατου προφίλ ταχυτήτων V_s συναρτήσεως του βάθους. Με την ανάλυση πολλαπλών σημείων απ' όπου εκπέμπονται τα σεισμικά κύματα προκύπτουν διάφορα τέτοια μονοδιάστατα προφίλ ταχυτήτων, τα οποία συνθέτουν μία προσεγγιστική διδιάστατη τομογραφία του εδάφους. Ερμηνεύοντας κατάλληλα τις σεισμικές ταχύτητες και τη μεταβολή τους ως προς το βάθος, καταλήγουμε σε μία απεικόνιση της στρωματογραφίας του υπεδάφους.

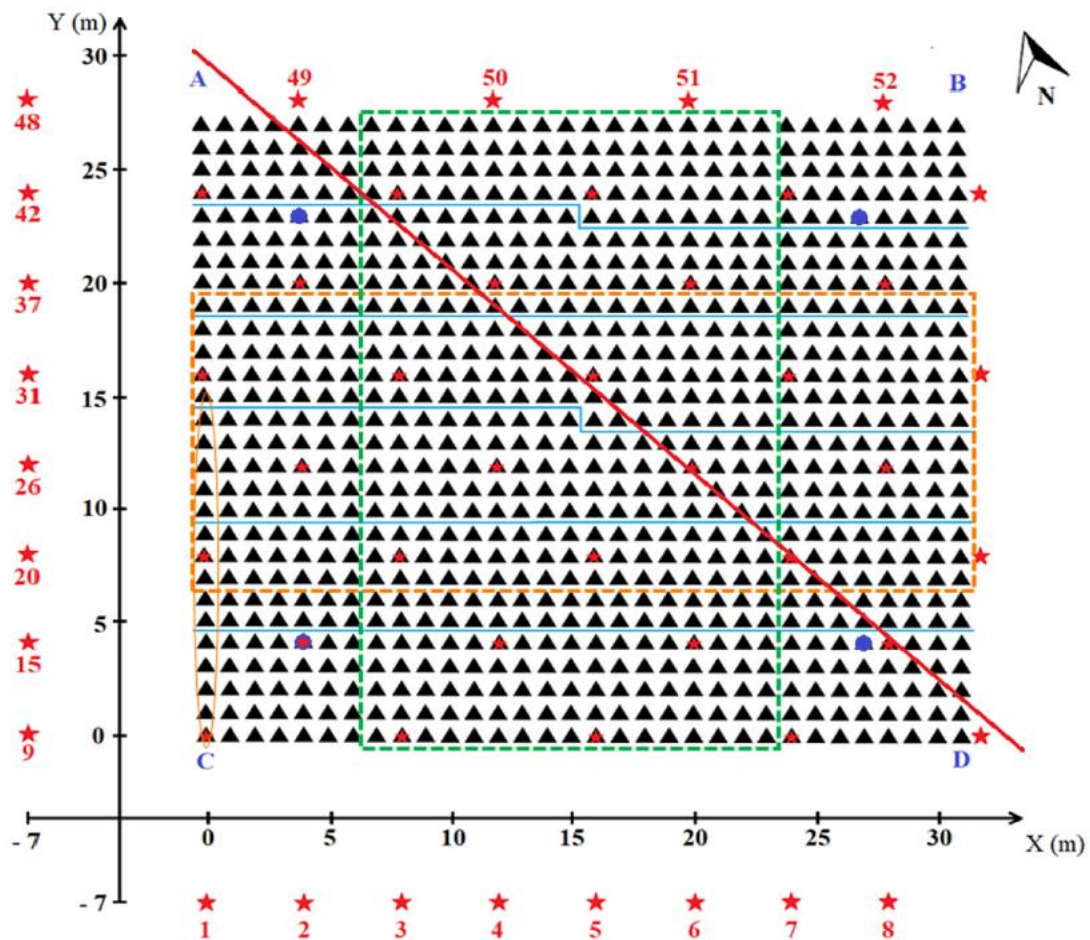
Η συγκεκριμένη έρευνα, μέσω της τρισδιάστατης ανάλυσης MASW, εστιάζει στην οριοθέτηση τριγωνικής τάφρου, κατασκευασμένη περί το 1700μ.Χ. που βρίσκεται κοντά στην πόλη Rheinstetten της Γερμανίας. Η τάφρος στο σημείο της έρευνας καλύπτεται από ιζηματογενείς αποθέσεις του ποταμού Ρήνου. Πιο συγκεκριμένα η θέση της τάφρου εκτιμήθηκε μέσω της τρισδιάστατης απεικόνισης μίας έκτασης διαστάσεων 31x27m.

Για τις ανάγκες της έρευνας χρησιμοποιήθηκαν 896 συνολικά γεώφωνα, τοποθετημένα σε κάρναβο 1x1m και 52 διαφορετικά σημεία σεισμικής πηγής. Η αποτύπωση του υποβάθρου της περιοχής και κατ' επέκταση και της τάφρου επιτεύχθηκε ύστερα από τη συγκέντρωση 241 μονοδιάστατων σεισμικών προφίλ, τα οποία και συνθέτουν την τρισδιάστατη τομογραφία.

Για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης έρευνας, πραγματοποιήθηκε η σύγκριση τους με τα αποτελέσματα έρευνας με τη μέθοδο του γεωραντάρ.



Εικόνα 55. Δορυφορική απεικόνιση πεδίου έρευνας το οποίο περικλείεται στο μπλε ορθογώνιο, ενώ η θέση της τριγωνικής τάφρου παριστάνεται με την κόκκινη γραμμή

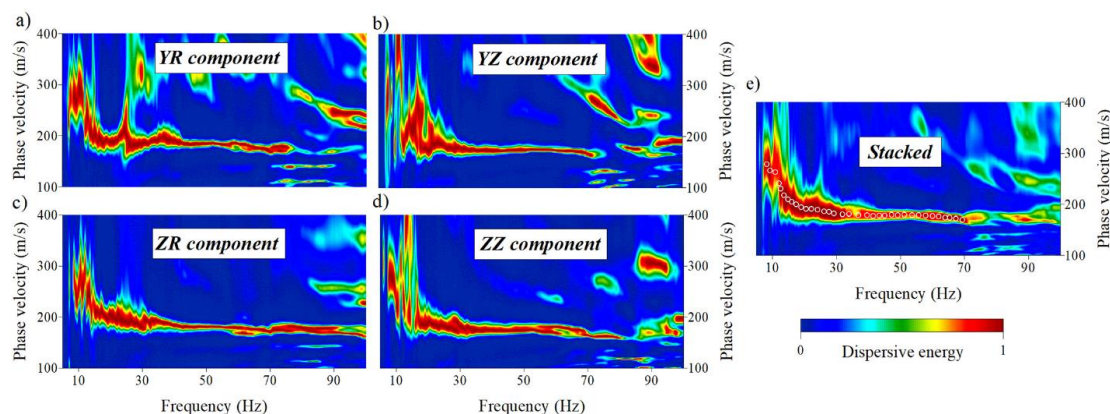


Εικόνα 56. Σχηματική απεικόνιση των σεισμικών μετρήσεων όπου με αστερίσκους φαίνεται η θέση των πηγών και με τρίγωνα τα γεώφωνα. Με κόκκινη γραμμή παριστάνεται η αναμενόμενη θέση της τάφρου

3.3.2 Διαδικασία επεξεργασίας των μετρήσεων

Τα σεισμικά επιφανειακά κύματα διαδίδονται σε τρεις διαφορετικές διευθύνσεις, ανάλογα και με τον τύπο του κύματος. Επιπροσθέτως, τα χρησιμοποιούμενα γεώφωνα καταγράφουν τις κυματικές αφίξεις σε τρεις διαφορετικές διευθύνσεις. Σε πρώτο στάδιο, λοιπόν, είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός των κυμάτων Rayleigh, των οποίων η διάδοση λαμβάνει χώρα παράλληλα με το επίπεδο διάδοσης, από τα κύματα Love. Ο λόγος που η έρευνα γίνεται μόνο με τα κύματα Rayleigh είναι η μεγαλύτερη σε βάθος διείσδυσή τους και το ισχυρό σήμα τους το οποίο και επισκιάζει τον εξωτερικό θόρυβο.

Με τη συνάθροιση των τεσσάρων διαφορετικών συνιστωσών που καταγράφονται από τα γεώφωνα των επιλεγμένων γραμμών, καταλήγουμε στην καμπύλη συχνοτήτων όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω [Εικόνα 57](#). Για την επεξεργασία των δεδομένων είναι απαραίτητη η εισαγωγή των σωστών γεωμετρικών αποστάσεων των γεωφώνων από τις εκάστοτε σεισμικές πηγές.



Εικόνα 57. Καμπύλες συχνοτήτων των κυμάτων Rayleigh όπως προκύπτουν από τη σεισμική πηγή 1 και καταγράφονται από τα 16 γεώφωνα της γραμμής 1. Στα a,b,c,d φαίνονται οι καμπύλες διασποράς της κάθε συνιστώσας ενώ στο e φαίνεται η καμπύλη διασποράς μετά τη συγχώνευση τους.

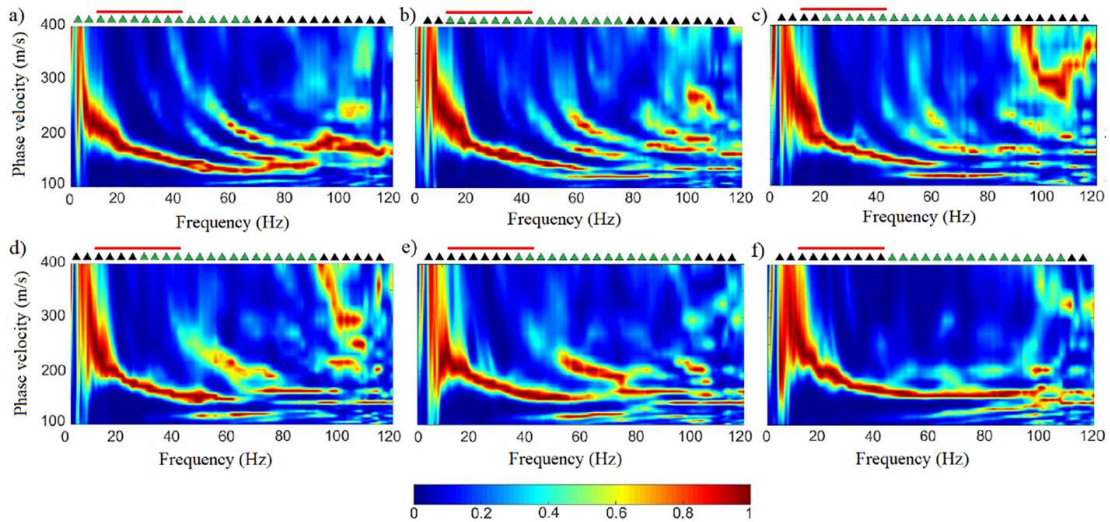
Κάθε σεισμική πηγή χρησιμοποιήθηκε για δύο γραμμές γεωφώνων, με τις οποίες βρίσκεται συννευθιακά ή περίπου συννευθιακά. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 8 σεισμικές πηγές, τα σεισμικά κύματα κάθε μίας εκ των οποίων διαχωρίστηκαν σε επτά τμήματα, απομονώνοντας συγκεκριμένα γεώφωνα κατά μήκος των γραμμών κάθε φορά. Τέλος, πραγματοποιήθηκε η αντιστροφή των καμπύλων διασποράς για να προκύψει η σωστή τομογραφία με τα σωστά βάθη.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για την αποτελεσματικότερη κάλυψη της περιοχής που αναμένεται η εύρεση της αναζητούμενης τάφρου, πραγματοποιήθηκε πύκνωση των μετρήσεων περί το κέντρο του συνολικού πεδίου έρευνας.

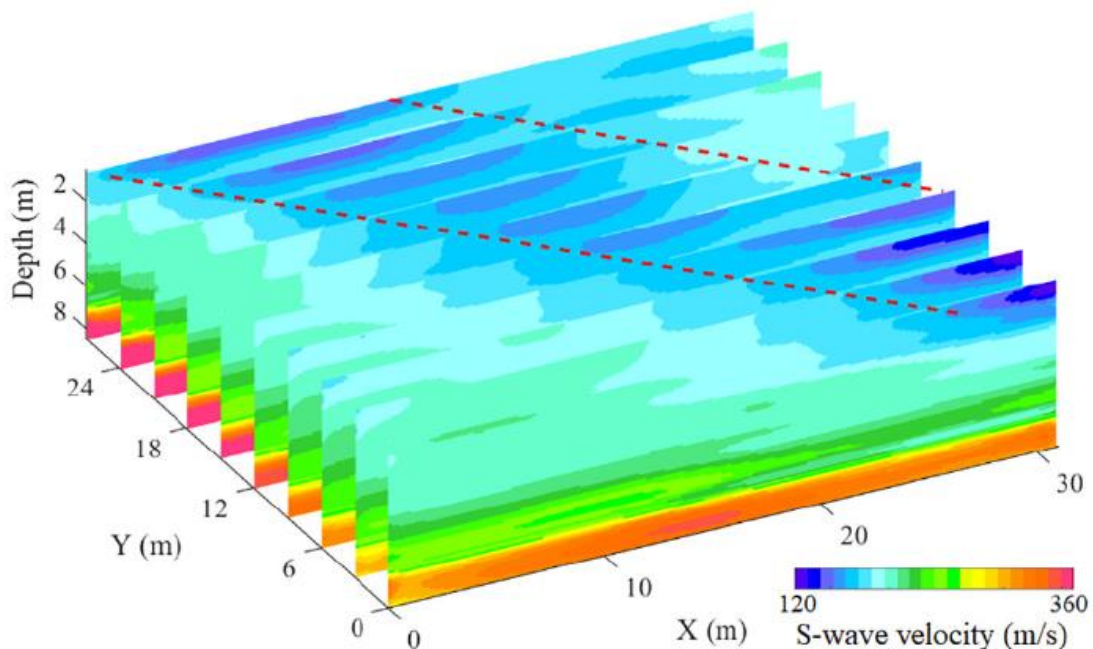
3.3.3 3-D μοντέλο ταχυτήτων της μεθόδου MASW

Η επεξεργασία των δεδομένων που καταγράφηκαν οδήγησε σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο ταχυτήτων V_s μέσω της συνάθροισης πολλών δισδιάστατων προφίλ. Γίνεται εύκολα αντιληπτή μια γραμμική δομή χαμηλών ταχυτήτων κοντά στην επιφάνεια, η οποία αποτελεί και την αναζητούμενη τάφρο. Οι χαμηλές ταχύτητες εξηγούν την

ύπαρξη της τάφρου, καθώς σχετίζονται με την απόθεση χαλαρών εδαφικών υλικών εντός αυτής κατά το παρελθόν. Αναφορικά με το γενικό υπόβαθρο της περιοχής, οι ταχύτητες των διατμητικών κυμάτων S αυξάνονται με το βάθος, υποδεικνύοντας την ύπαρξη βραχώδους στρώματος στα εφτά περίπου μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους.



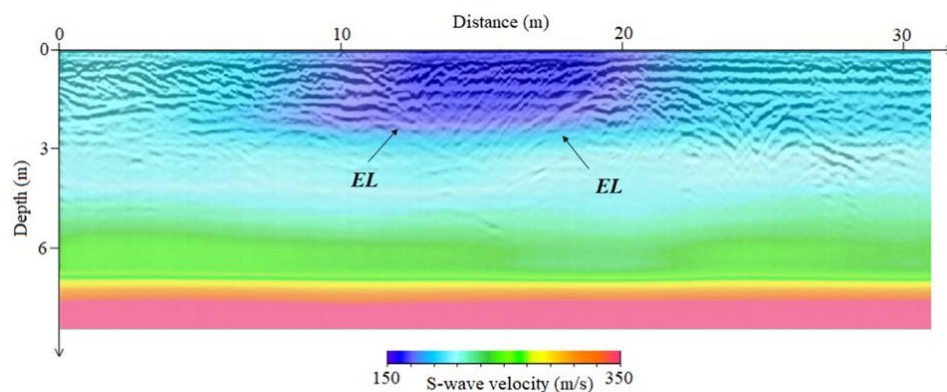
Εικόνα 58. Καμπύλες συχνοτήτων όπως καταγράφηκαν από τα γεώφωνα της γραμμής στη θέση X=28m και αφορούν κύματα από τη σεισμική πηγή 8. Τα πράσινα τρίγωνα αφορούν τα γεώφωνα που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε ξεχωριστή καμπύλη ενώ η κόκκινη γραμμή υποδηλώνει τη θέση της τάφρου.



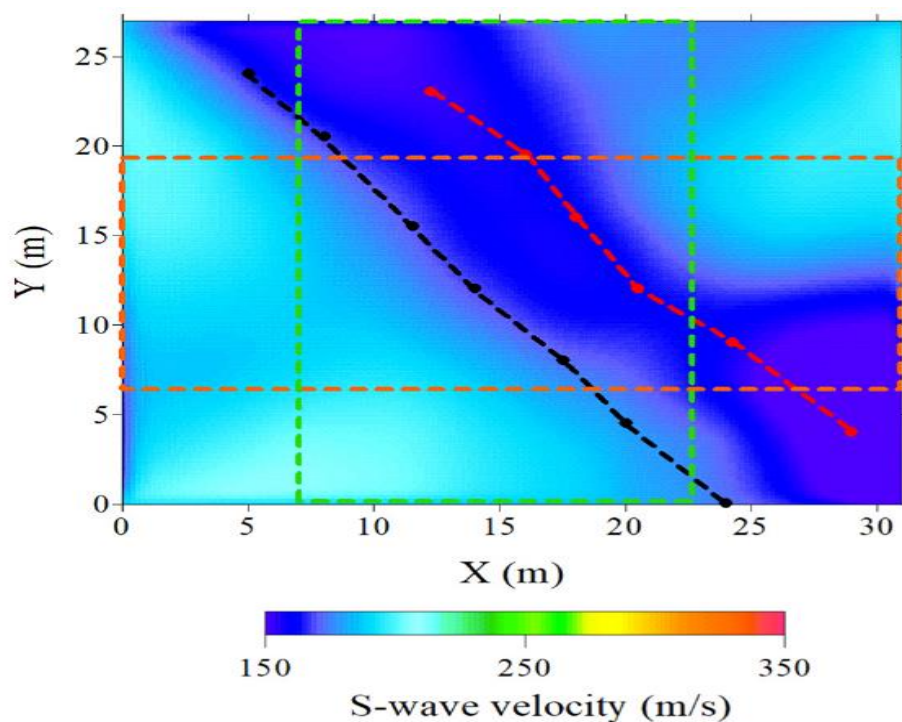
Εικόνα 59. Το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο ταχυτήτων που προκύπτει από την ανάλυση MASW, με την αποτύπωση των επιμέρους δισδιάστατων προφίλ που το συνθέτουν. Με διακεκομμένη κόκκινη γραμμή παρουσιάζεται η θέση της τάφρου.

3.3.4 Σύγκριση του 3-D μοντέλου ταχυτήτων με μοντέλα άλλων μεθόδων

Ενδιαφέρουσα είναι η συσχέτιση των αποτελεσμάτων της μεθόδου MASW με τα αποτελέσματα της μεθόδου του γεωραντάρ, διότι παρατηρείται σημαντική συμφωνία μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα και με τις δύο μεθόδους η τριγωνική τάφρος φαίνεται να έχει άνοιγμα 8m και βάθος 3m. Μία διαφορά στα μοντέλα των δύο μεθόδων έγκειται στο γεγονός ότι η τάφρος οριοθετείται με τη μέθοδο MASW 1,5m πιο βορειοανατολικά σε σχέση με αυτή του γεωραντάρ, γεγονός που πιθανότατα να αιτιολογείται από την τοποθέτηση των σεισμικών πηγών στη νοτιοδυτική πλευρά, επηρεάζοντας έτσι την ευκρίνεια των αποτελεσμάτων προς τη βορειοανατολική κατεύθυνση.

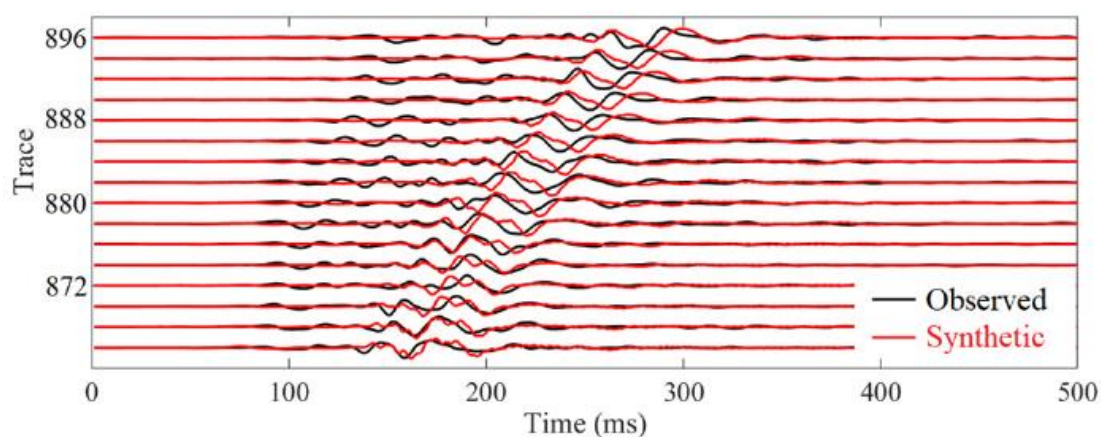


Εικόνα 60. Σύγκριση δισδιάστατου προφίλ της μεθόδου MASW με τη μέθοδο του γεωραντάρ στη θέση Y=16m.

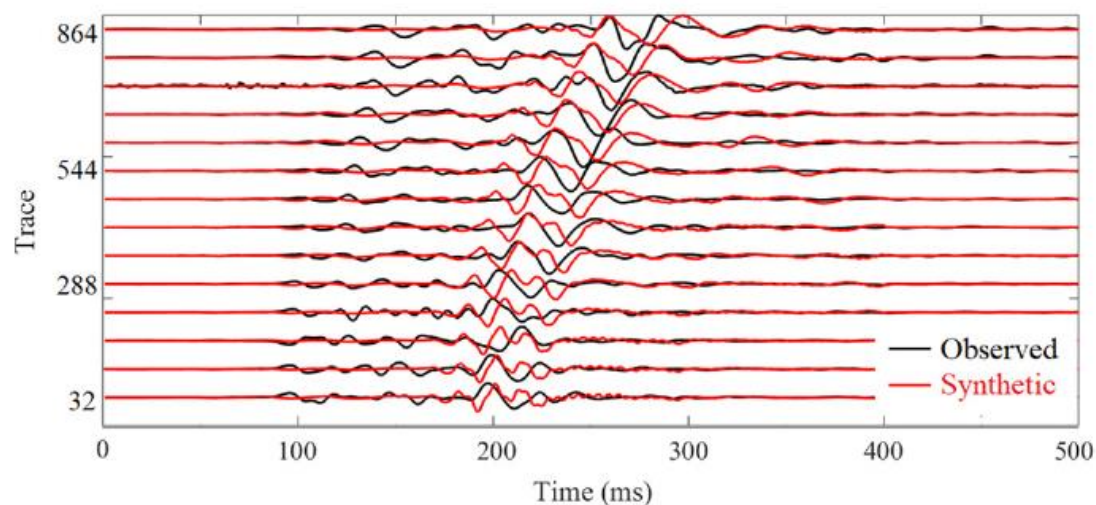


Εικόνα 61. 3-D μοντέλο μεθόδου MASW με την τοποθέτηση των ορίων της τάφρου εντός αυτού όπως προέκυψαν από τη μέθοδο του γεωραντάρ(κόκκινες και μαύρες διακεκομμένες γραμμές).

Πραγματοποιήθηκε, με στόχο την ασφαλέστερη απόδειξη της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων της μεθόδου των επιφανειακών κυμάτων, επιπρόσθετη ανάλυση των κυμάτων P. Είναι αξιοσημείωτη στο σημείο αυτό η υψηλή συσχέτιση των δύο διαφορετικών αναλύσεων, δεδομένου ότι η αντιστροφή των πρώτων αφίξεων των κυμάτων P οδηγεί σε παρόμοια ερμηνεία της θέσης της τάφρου, όπως φαίνεται και στην [Εικόνα 62](#)



a



b

Εικόνα 62. Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου MASW με τα αποτελέσματα της ανάλυσης των κυμάτων P, με τη σεισμική πηγή στη θέση (0,0) στα γεώφωνα a) της γραμμής με $X=0$, $Y=27\text{m}$ και b) της γραμμής με $X=31\text{m}$, $Y=0\text{m}$

3.3.5 Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη γεωφυσική έρευνα πραγματοποιείται την απεικόνιση μίας τριγωνικής τάφρου που βρίσκεται στο υπέδαφος και βρίσκεται κοντά στην πόλη Rheinstetten της Γερμανίας. Συλλέγοντας τα δεδομένα των σεισμικών κυμάτων στις διευθύνσεις που αναμένεται να κυριαρχήσουν τα κύματα Rayleigh δημιουργήθηκαν μοντέλα

ταχυτήτων V_s μέσω της αντιστροφής της καμπύλης συχνοτήτων. Πολλαπλά δισδιάστατα προφίλ ταχυτήτων συνθέτουν το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο που επιτεύχθηκε για το πεδίο έρευνας. Παράλληλα με την αποτύπωση του εδάφους, τα τελικά μοντέλα καθιστούν σαφή και ευδιάκριτα τα όρια της τάφρου στο χώρο. Ωστόσο, η σύγκριση τους με τη μέθοδο του γεωραντάρ και της ανάλυσης των κυμάτων P, είναι αυτή που καθιστά έγκυρη την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης MASW, λόγω της συμφωνίας που παρατηρείται μεταξύ τους. Επομένως, η επιλογή της μεθόδου για την απεικόνιση του υποβάθρου του εδάφους σε μικρότερα βάθη κρίνεται επιτυχής.

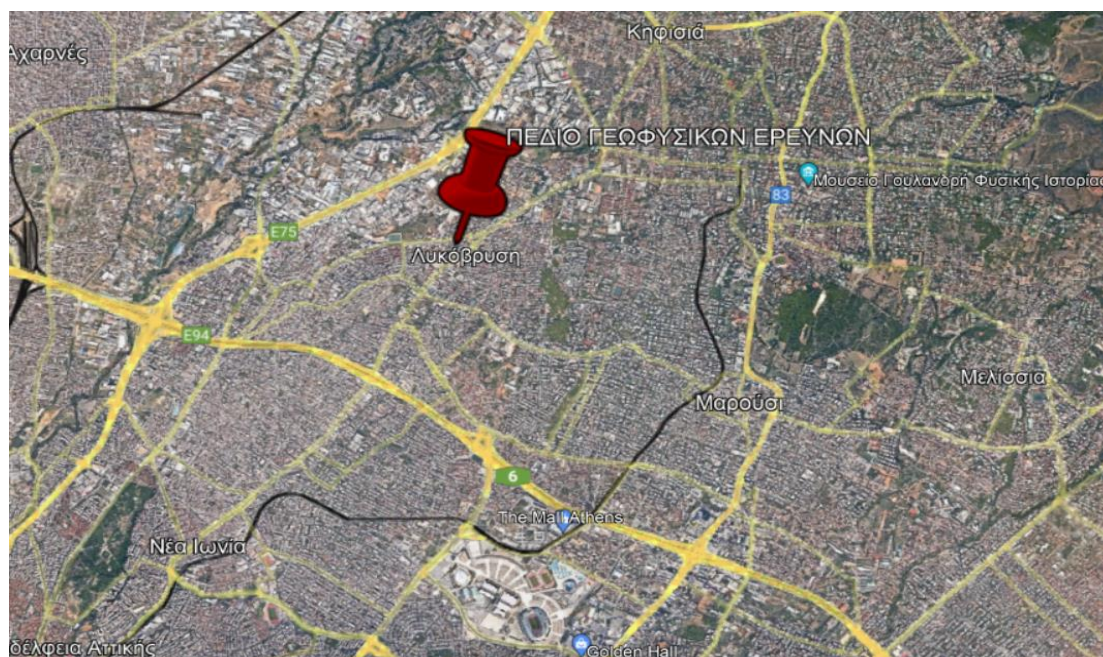
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ ΣΤΗ ΛΥΚΟΒΡΥΣΗ

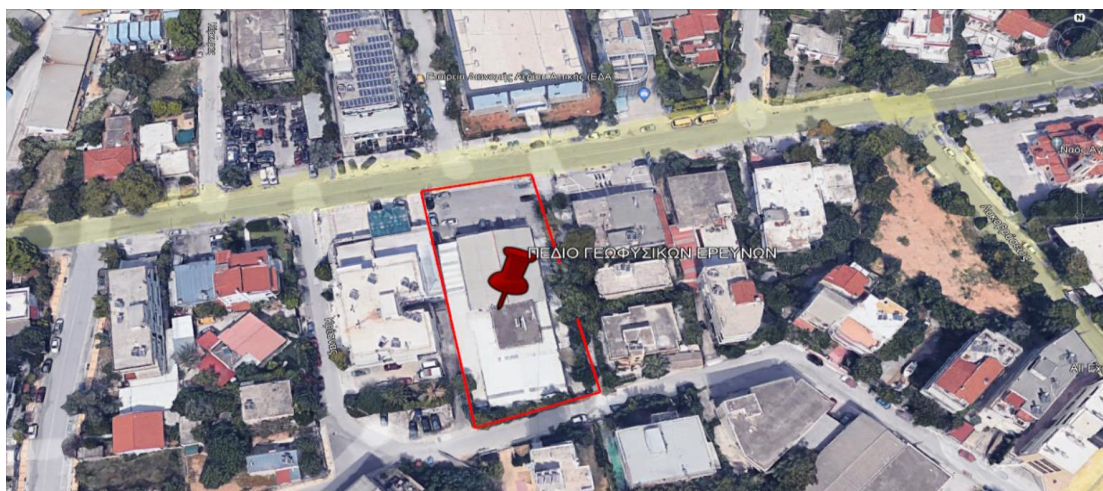
4.1 Εισαγωγή

Η παρούσα γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε σε οικοπέδο επί της Λεωφόρου Σοφοκλή Βενιζέλου, στην περιοχή της Λυκόβρυσης. Με τα στοιχεία που θα προκύψουν από την έρευνα αυτή, μπορεί να αποτυπωθεί η στρωματογραφία του υπεδάφους του εν λόγω οικοπέδου και να εντοπιστούν τυχούσες δομές σε αυτό. Με τον τρόπο αυτό γίνεται μία προσπάθεια εξακρίβωσης των στοιχείων που έχουν ληφθεί από τις δύο γεωτρήσεις, με στόχο την ασφαλέστερη γενίκευση των σημειακών δεδομένων που υπάρχουν σε ολόκληρο το εύρος του οικοπέδου. Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά και τη γεωμετρία των στρωμάτων, θα πραγματοποιηθεί γεωτεχνική μελέτη, η οποία αποσκοπεί στην ασφαλή θεμελίωση και υλοποίηση υπόγειας κατασκευής στο συγκεκριμένο χώρο.

Αρχικά, έγινε χρήση της μέθοδου πολλαπλών καναλιών ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων (MASW). Σε δεύτερο στάδιο, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη μέθοδο της ηλεκτρομαγνητικής ανάκλασης ή αλλιώς με τη μέθοδο του γεωραντάρ, με στόχο την καλύτερη αποτύπωση του υπεδάφους σε μικρότερα βάθη και την ενίσχυση των αποτελεσμάτων της σεισμικής μεθόδου.



Εικόνα 63. Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής έρευνας και της ευρύτερης περιοχής



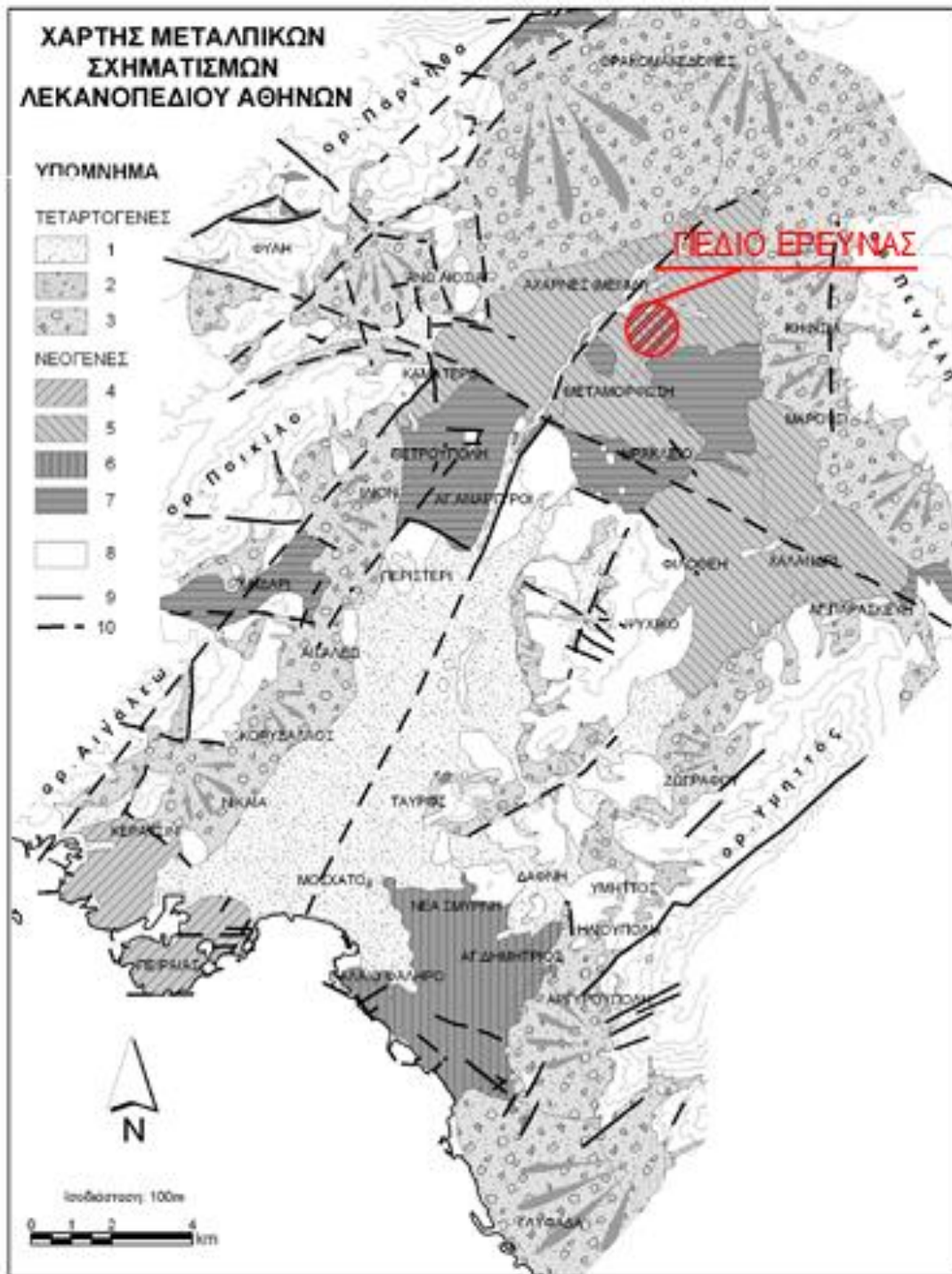
Εικόνα 64. Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής έρευνας όπου είναι διακριτά τα όρια του οικοπέδου

4.2 Γεωλογικό υπόβαθρο

Η περιοχή της Λυκόβρυσης τοποθετείται γεωγραφικά στο λεκανοπέδιο Αθηνών. Το λεκανοπέδιο των Αθηνών, βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα της Αττικής, έχει έκταση 540 km², μήκος περίπου 22 km από ΒΑ προς τα ΝΔ και πλάτος 11Km εγκάρσια. Οι σχηματισμοί που λαμβάνουν μέρος στη γεωλογική δομή του λεκανοπεδίου, διακρίνονται σε αλπικούς και μεταλπικούς. Οι αλπικοί εντοπίζονται στους ορεινούς όγκους που περιβάλλουν το λεκανοπέδιο αλλά και στους μικρούς λόφους που αναπτύσσονται μέσα σε αυτό, ενώ οι μεταλπικοί πληρούν το εσωτερικό του λεκανοπεδίου, όπου καλύπτουν ασύμφωνα τους υποκείμενους αλπικούς σχηματισμούς.

Αναφορικά με τη γεωλογία της περιοχής έρευνας, η οποία εντοπίζεται στο εσωτερικό του λεκανοπεδίου, αναμένονται μεταλπικοί σχηματισμοί του Νεογενούς, επί των οποίων επικάθονται τεταρτογενείς αποθέσεις, στις οποίες συμμετέχουν τα φερτά υλικά των ποταμών του Λεκανοπεδίου, οι ποτάμιες αναβαθμίδες, οι πλευρικές αποθέσεις κορημάτων, τα ριπίδια και οι κώνοι κορημάτων των περιφερειακών ορεινών όγκων. Πιο συγκεκριμένα, όπως απεικονίζεται και στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 65), αναμένεται να υπάρχουν στο υπέδαφος της περιοχής της Λυκόβρυσης πλειοκαινικοί ηπειρωτικοί σχηματισμοί, οι οποίοι υπέρκεινται των χερσαίων σχηματισμών του Μειόκαινου.

Εμφανίζονται στην περιοχή της Μεταμόρφωσης, ανατολικά των Αχαρνών, στη Φιλοθέη, το Μαρούσι, το Χαλάνδρι και περίξ αυτών. Πρόκειται για σχηματισμούς από άμμους και αργίλους με ήπιες κλίσεις, οι οποίοι διαφοροποιούνται σημαντικά από λιθοοψική και γεωμετρική άποψη από τους υποκείμενους ανωμειοκαινικούς ηπειρωτικούς σχηματισμούς, στους οποίους έχουν αποθεθεί ασύμφωνα, αποτελώντας ένα "κάλυμμα" το οποίο ομογενοποίησε και εξομάλυνε το υπάρχον παλαιοανάγλυφο. Είναι γενικά αδιατάρακτα ή λίγο διαταραγμένα ιζήματα με κλίσεις που σπάνια ξεπερνούν τις 5°, αποτελούμενα από άμμους και αργίλους με αραιές, μη ρυθμικές και περιορισμένης έκτασης παρεμβολές λιγνιτικών οριζόντων πολύ μικρού πάχους (5-20 cm). Το χρώμα τους είναι ερυθρωπό, πορτοκαλί ή ανοιχτό κίτρινο και το πάχος τους είναι λίγες δεκάδες μέτρα. Στην ακολουθία των σχηματισμών συμμετέχουν λευκές και κίτρινες μάργες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, αλλά και χαλαρά πολύμεικτα κροκαλοπαγή και ψαμίτες.



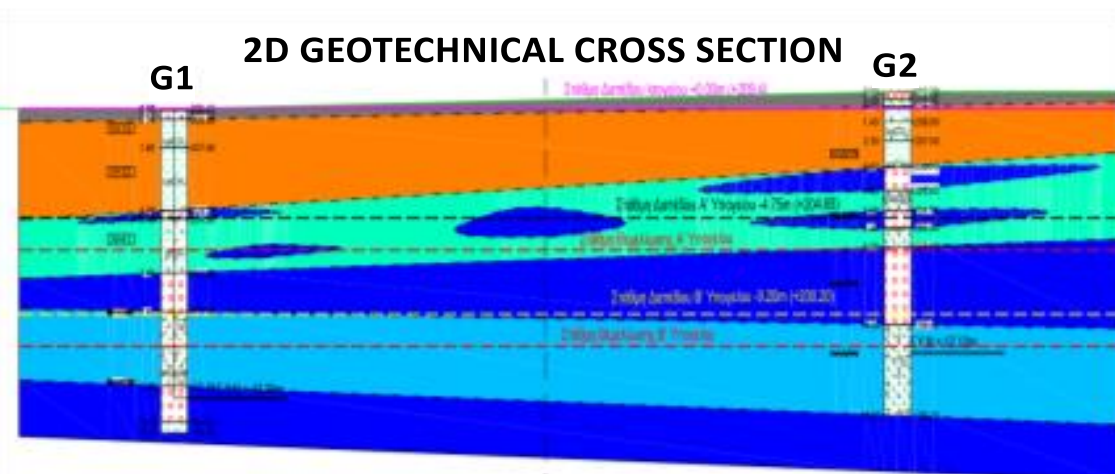
Εικόνα 65. Χάρτης μεταλλικών σχηματισμών λεκανοπεδίου Αθηνών. (1. Αλλούβια, 2. Πλευρικά κορήματα, 3. Πλευρικά κορήματα και ριπίδια, 4. Πλειοκαινικοί θαλάσσιοι σχηματισμοί, 5. Πλειοκαινικοί ηπειρωτικοί σχηματισμοί, 6. Ανωμειοκαινικοί σχηματισμοί - παράκτιες και παράλιες φάσεις, 7. Ανωμειοκαινικοί ηπειρωτικοί σχηματισμοί, 8. Αλπικό υπόβαθρο, 9. Γεωλογικό όριο, 10. Ρήγμα και πιθανή προέκτασή του)

Πέραν όμως των στοιχείων για την ευρύτερη περιοχή της Λυκόβρυσης, πραγματοποιήθηκαν και δύο γεωτρήσεις στο ακριβές πεδίο όπου διεξάχθηκε η γεωφυσική έρευνα η οποία αναλύεται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Τα αποτελέσματα από τη δειγματοληψία των γεωτρήσεων συνάδουν με τα υπάρχοντα






γεωλογικά στοιχεία, δεδομένου ότι σε βάθος 12m εντοπίζονται αλληλουχίες αμμούχων αργίλων και κροκαλοπαγών των οποίων τα στρώματα εμφανίζουν μικρές κλίσεις. Τα δεδομένα που προέκυψαν από τις γεωτρήσεις παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 67).



Εικόνα 66. Απεικόνιση των δύο γεωτρήσεων που έχουν γίνει εντός του οικοπέδου που πραγματοποιήθηκε η γεωφυσική έρευνα



LEGEND

	man made backfill
	Sandy Clay
	Gravelly Clay to gravelly sandy clay
	conglomerate
	Gravelly clay to well graded clayey gravels

Εικόνα 67. Τομή του εδάφους με βάσει τις 2 γεωτρήσεις.

4.3 Σεισμική Μέθοδος

4.3.1 Εξοπλισμός και διαδικασία μετρήσεων

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν απόλυτα ενδεδειγμένος για την έρευνα σε συνθήκες αστικού περιβάλλοντος. Η σεισμική πηγή ESS-MINI GISCO αποτελεί μια ισχυρή πηγή, εύκολα μεταφερόμενη με δυνατότητα πραγματοποίησης επαναλαμβανόμενων κτυπημάτων, ώστε με χρήση της συμβολής των εκάστοτε σειсмоγραμμάτων να επιτυγχάνουμε καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο στα δεδομένα μας. Τα γεώφωνα ήταν 4,5 Hz, καθώς και για εξοικονόμηση χρόνου η τοποθέτηση τους δεν έγινε απευθείας στο σκυρόδεμα του δαπέδου, αλλά σε ειδικά μολύβδινα βαρίδια. Ακόμη χρησιμοποιήθηκε ο σειсмоγράφος Strataview της εταιρίας Geometrics με 60 κανάλια, καθώς και ειδικά καλώδια για τη σύνδεση των γεωφώνων με το σειсмоγράφο. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε γεωδαιτικό όργανο GPS για την ακριβή καταγραφή των αποστάσεων των γεωφώνων και των σημείων που έγιναν οι σεισμικές κρούσεις από την πηγή.



Εικόνα 68. Ο σειсмоγράφος που χρησιμοποιήθηκε



Εικόνα 69. Η σεισμική πηγή που χρησιμοποιήθηκε

Η τοποθέτηση των γεωφώνων έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορέσουμε να επεξεργαστούμε μετέπειτα τομές παράλληλες στα όρια του οικοπέδου, με στόχο να έχουμε δύο παράλληλες γραμμές, με κατεύθυνση από Βορρά προς Νότο, και μία κάθετη σε αυτές. Επιτυγχάνεται με τον τρόπο αυτό μία πιο ολοκληρωμένη απεικόνιση της στρωματογραφίας του υπεδάφους σε όλο το εύρος του οικοπέδου. Με τη χρήση των 60 γεωφώνων οι πιθανές τομές που μπορούσαν να ληφθούν ήταν αρκετές, με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα να επιλεγθούν προς περαιτέρω επεξεργασία αυτές που έχουν επηρεαστεί λιγότερο από τον εξωτερικό θόρυβο.

Οι αποστάσεις μεταξύ των γεωφώνων ήταν περίπου 5m για κάθε διαδοχικά γεώφωνα, καλύπτοντας έτσι ικανοποιητικά το χώρο του οικοπέδου, ενώ παράλληλα πραγματοποιήθηκαν 37 κρούσεις με τη σεισμική πηγή κατά μήκος των πιθανών γραμμών που θα προέκυπταν.

Η διάταξη των γεωφώνων και των κρούσεων στο πεδίο έρευνας φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 70).



Εικόνα 70. Θέσεις τοποθέτησης των γεωφώνων(κόκκινες κουκίδες) και τα σημεία των κρούσεων(κίτρινα σηματάκια) με τη σεισμική πηγή στο χώρο της έρευνας. Παράλληλα φαίνονται και τα σημεία των δύο γεωτρήσεων(πράσινα τρίγωνα)

4.3.2 Επεξεργασία των μετρήσεων

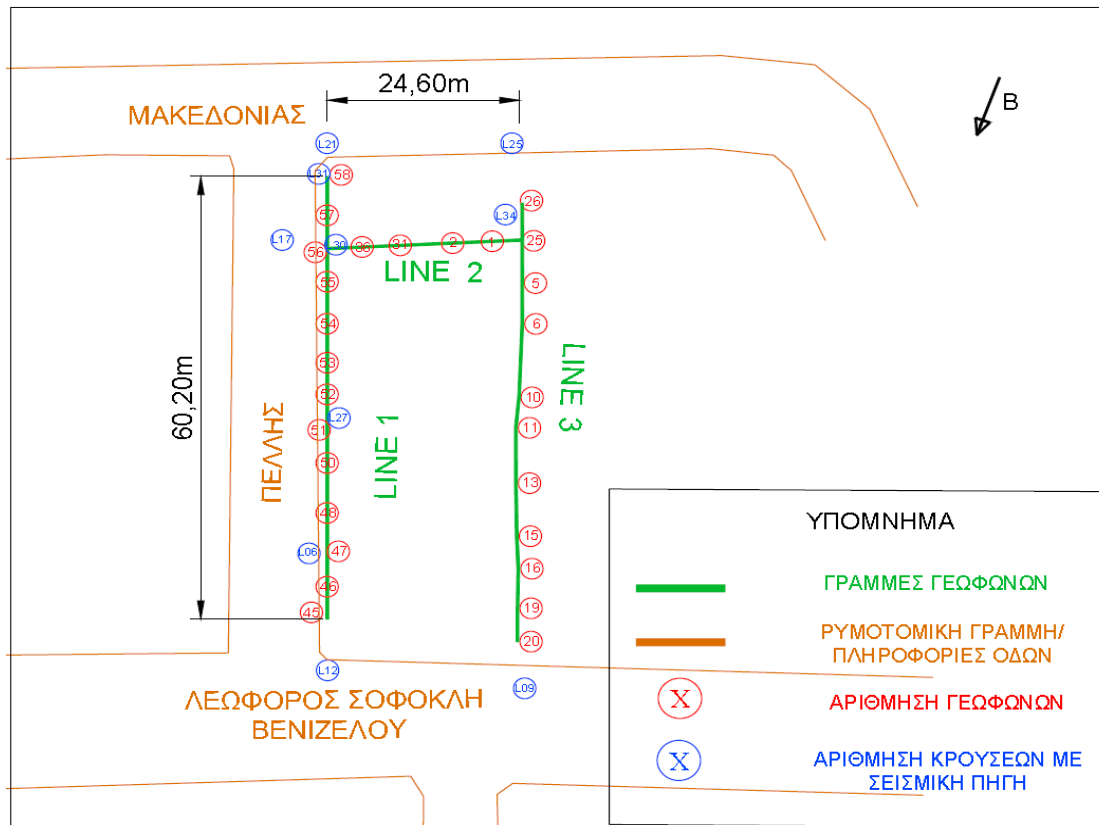
Παρά την καταλληλότητα του εξοπλισμού, οι δύσκολες αστικές και περιβαλλοντικές συνθήκες του πεδίου έρευνας που βρίσκεται σε κεντρική λεωφόρο της Λυκόβρυσης, η αυξημένη κυκλοφορία των διερχομένων οχημάτων και πεζών κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, όπως και η λειτουργία διαφόρων μηχανημάτων σε επιχειρήσεις πλησίον του χώρου, καθιστούν δύσκολο τον εντοπισμό της πρώτης άφιξης κύματος και την περεταίρω ερμηνεία του υποβάθρου με τη μέθοδο σεισμικής διάθλασης.

Επιπροσθέτως, αξίζει να σημειωθεί ότι φαινόμενο της τυφλής ζώνης που παρατηρήθηκε λόγω της ύπαρξης ενός στρώματος περισσότερο χαλαρού υλικού σε σχέση με το υπερκείμενο του ακυρώνει τη βασική αρχή εφαρμογής της μεθόδου

διάθλασης, που απαιτεί την αύξηση της σεισμικής ταχύτητας με την αύξηση του βάθους. Το παραπάνω επιβεβαιώνει και η προσπάθεια για ανάλυση με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης των κυμάτων P. Λαμβάνοντας τις πρώτες αφίξεις των σεισμικών κυμάτων κατά μήκος των γραμμών που επιλέχθηκαν δημιουργήθηκαν οι δρομοχρονικές καμπύλες. Ωστόσο δεν οδήγησαν σε ασφαλή συμπεράσματα, καθώς, εξαιρουμένων των πρώτων μέτρων, το λογισμικό αντιμετώπισε το πρόβλημα της «κρυφής» ζώνης αναγνωρίζοντας το υπεδάφος ως ένα ενιαίο στρώμα, ιδιαίτερα μεγάλης ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων.

Ο λόγος, επομένως, που επιλέχθηκε η επεξεργασία με την ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων (MASW) είναι να αποδοθεί με όσο το δυνατό καλύτερο τρόπο η δομή του υπεδάφους μέσω των ταχυτήτων των κυμάτων S των υπεδαφικών σχηματισμών. Με δεδομένο ότι το αποτέλεσμα της ερμηνείας MASW είναι η μονοδιάστατη αποτύπωση της αλλαγής της ταχύτητας εγκάρσιων κυμάτων με το βάθος κάτω από το μέσο της διάταξης των χρησιμοποιούμενων γεωφώνων, χρησιμοποιώντας διαφορετικές θέσεις σεισμικής πηγής αλλά και μέρος της διάταξης των γεωφώνων, οι μονοδιάστατες ερμηνείες σε κάθε περίπτωση μπορούν να δώσουν τελικά μια διδιάστατη σεισμική τομή ταχυτήτων των εγκάρσιων κυμάτων του υπεδάφους κατά μήκος των σεισμικών προφίλ που αναλύονται.

Λαμβάνοντας τα δεδομένα των μοντέλων των ταχυτήτων διάδοσης για τα διαδοχικά στρώματα του υπεδάφους, καθίσταται δυνατό να εξάγουμε πληροφορίες για το τι υλικό αποτελεί το κάθε ένα από αυτά και εν συνεχεία τι μηχανικές ιδιότητες αναμένεται να έχει. Για τις επιλεγθείσες προς ανάλυση σεισμικές γραμμές και τις αντίστοιχες κρούσεις, ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων προσφέρει μία ικανοποιητική απεικόνιση της στρωματογραφίας στο χώρο.



Εικόνα 71. Σκαρίφημα όπου φαίνεται η τελική επιλογή των τριών σεισμικών προφίλ προς ανάλυση με τη μέθοδο MASW, όπου διακρίνονται οι θέσεις των γεωφώνων και των χτυπημάτων που λήφθηκαν υπόψιν

Για την επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SeisImager της εταιρείας EG&G GEOMETRICS το οποίο παρέχεται από το εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τομέα Μεταλλευτικής. Το πρώτο βήμα για την επεξεργασία είναι η μελέτη των σειсмоγραμμάτων της κάθε καταγραφής, η απομόνωση των κατάλληλων γεωφώνων στο συνολικό διάγραμμα και η προσθήκη των σωστών αποστάσεων μεταξύ τους αλλά και ως προς την πηγή. Έχοντας τα ίχνη των σεισμικών κυμάτων για τα γεώφωνα που μας ενδιαφέρουν, εντοπίζονται οι πρώτες αφίξεις των επιφανειακών κυμάτων στο εκάστοτε γεώφωνο.

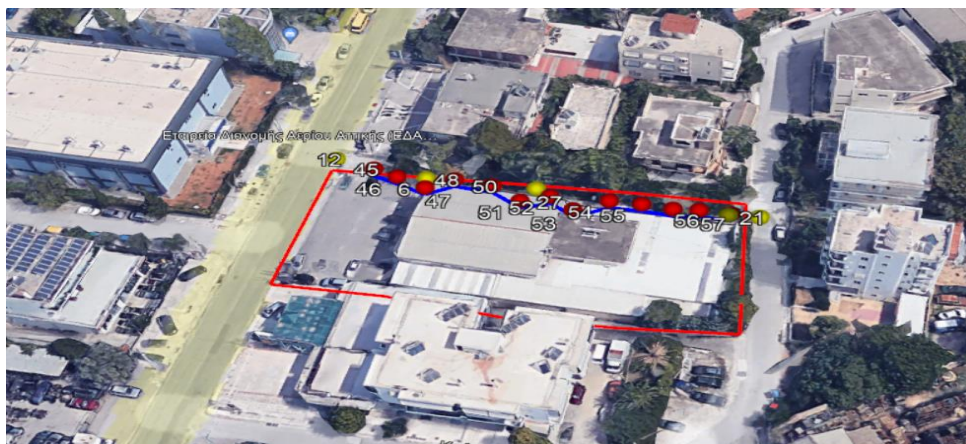
Στη συνέχεια μετατρέπεται το σειсмоγράμμο το οποίο δείχνει την καταγραφή των κυμάτων σε κάθε θέση ως προς το χρόνο σε διάγραμμα συχνότητας ως προς ταχύτητες. Με τη σωστή ανάλυση της εικόνας και επιλέγεται η καμπύλη διασποράς συχνότητας για το κάθε χτύπημα. Τέλος, με την αντιστροφή της καμπύλης διασποράς συχνότητας προκύπτει η κατανομή των ταχυτήτων V_s συναρτήσει του βάθους για την ίδια θέση.

4.3.3 Αποτελέσματα των μετρήσεων

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ 1

Για την ανάλυση της σεισμικής γραμμής 1 απομονώθηκαν 13 γεώφωνα τα οποία και τη σχηματίζουν και η οποία έχει μήκος 60,20m. Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα στο σειсмоγράφο από πέντε κρούσεις, εκ των οποίων οι δύο τοποθετούνται πολύ κοντά στα

άκρα της τομής(L06, L31), οι δύο λίγο πιο έξω αλλά συνευθειακά περίπου με αυτή(L12, L21), καθώς και ένα ακόμη στο μέσο της γραμμής(L27), το οποίο μας έδωσε δύο διαφορετικές απεικονίσεις των αλλαγών ταχυτήτων εκατέρωθεν αυτού.



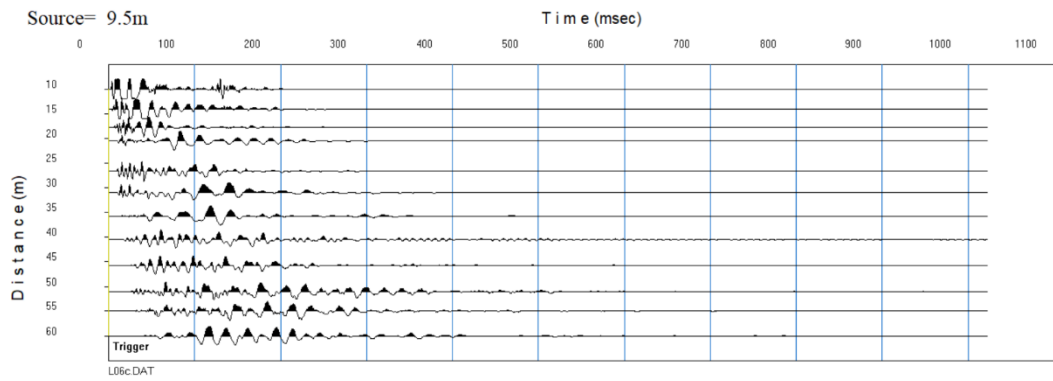
Εικόνα 72. Δορυφορική απεικόνιση της γραμμής 1 και των σημείων των σεισμικών κρούσεων



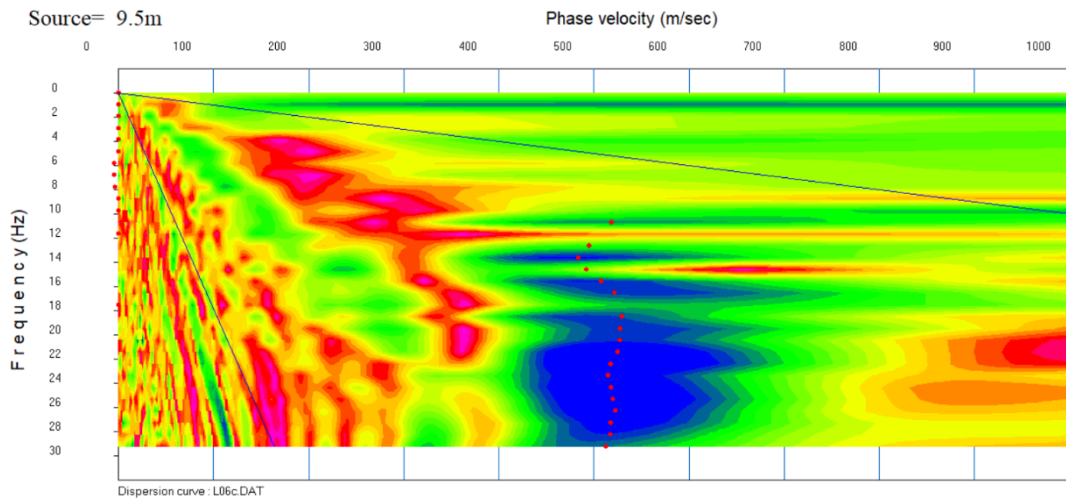
Εικόνα 73. Η διάταξη των γεωφώνων επί της γραμμής 1 στο πεδίο έρευνας συνδεδεμένα μεταξύ τους με καλώδια, ενώ στα αριστερά διακρίνονται και τα μολύβδινα βαρίδια

1) Κρούση πλησίον του ορίου της γραμμής από την πλευρά της λεωφόρου Σοφοκλή Βενιζέλου - L06

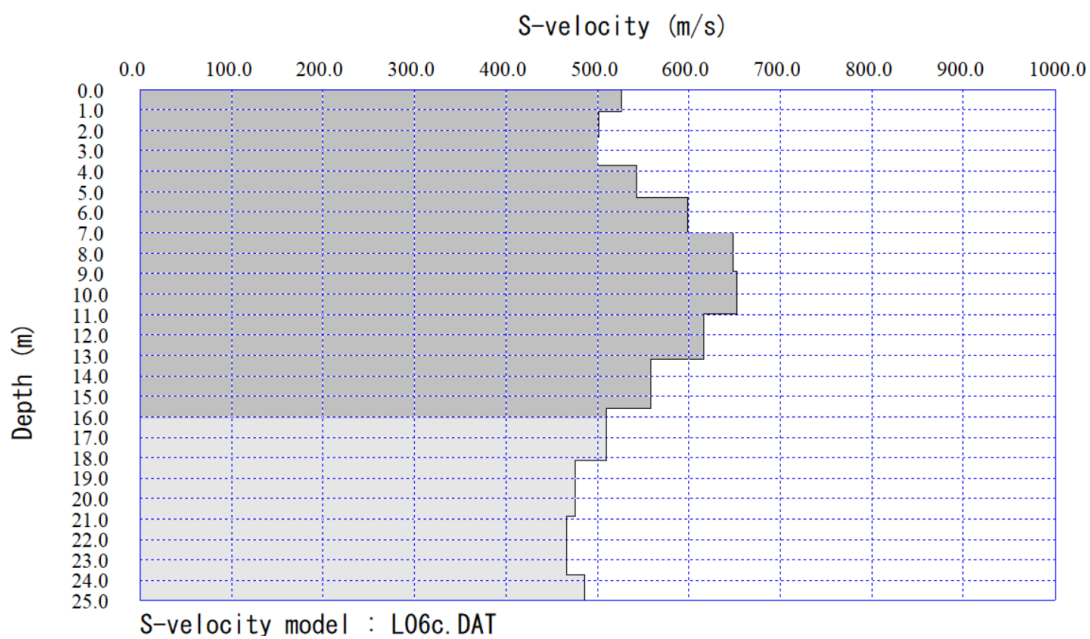
Ως προς την εισαγωγή των αποστάσεων, έχει ληφθεί ως θέση 0,00m η θέση του γεωφώνου 45 δηλαδή το άκρο της γραμμής που είναι πλησιέστερο στη Λεωφόρο Σοφοκλή Βενιζέλου, ενώ η θέση του χτυπήματος τοποθετείται 9,50m από αυτό.



Εικόνα 74. Σεισμόγραμμα με την πηγή στα 9,50m (L06)



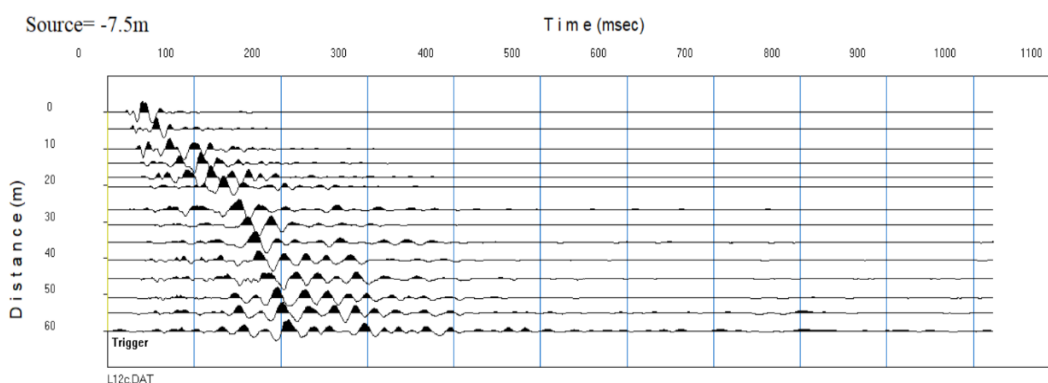
Εικόνα 75. MASW - Επεξεργασία (L06)



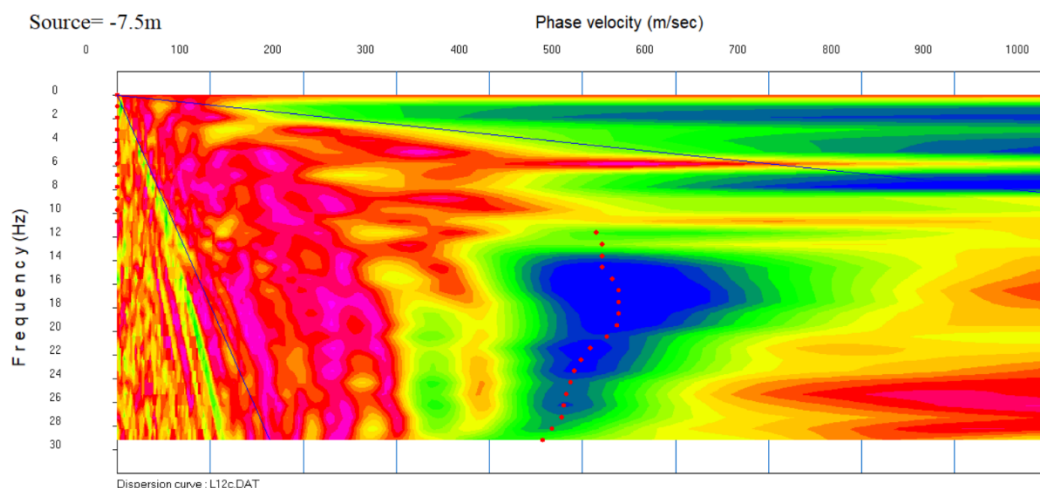
Εικόνα 76. MASW - Τελικό μοντέλο ταχυτήτων (L06)

2) Κρούση στο όριο του οικοπέδου με τη Λεωφόρο Σοφοκλή Βενιζέλου - L12

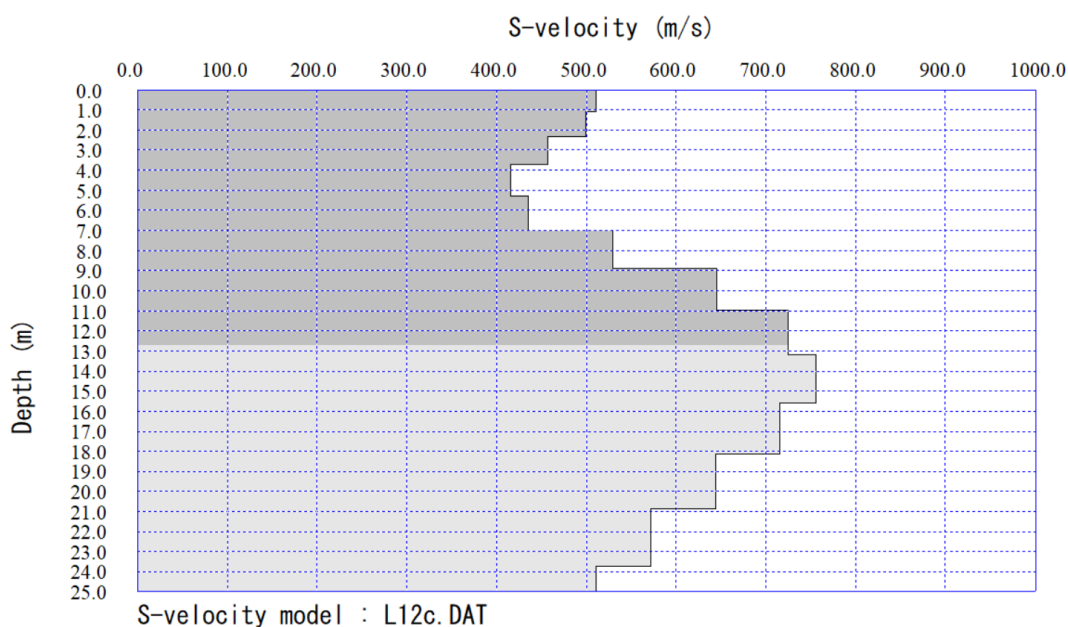
Ως προς την εισαγωγή των αποστάσεων, έχει ληφθεί ως θέση 0,00m η θέση του γεωφώνου 45 δηλαδή το άκρο της γραμμής που είναι πλησιέστερο στη Λεωφόρο Σοφοκλή Βενιζέλου, ενώ η θέση του χτυπήματος τοποθετείται 7,50m από το άκρο αυτό, αλλά εκτός της γραμμής, δηλαδή στα -7,50m.



Εικόνα 77. Σεισμόγραμμα με την πηγή στα -7,50m (L12)

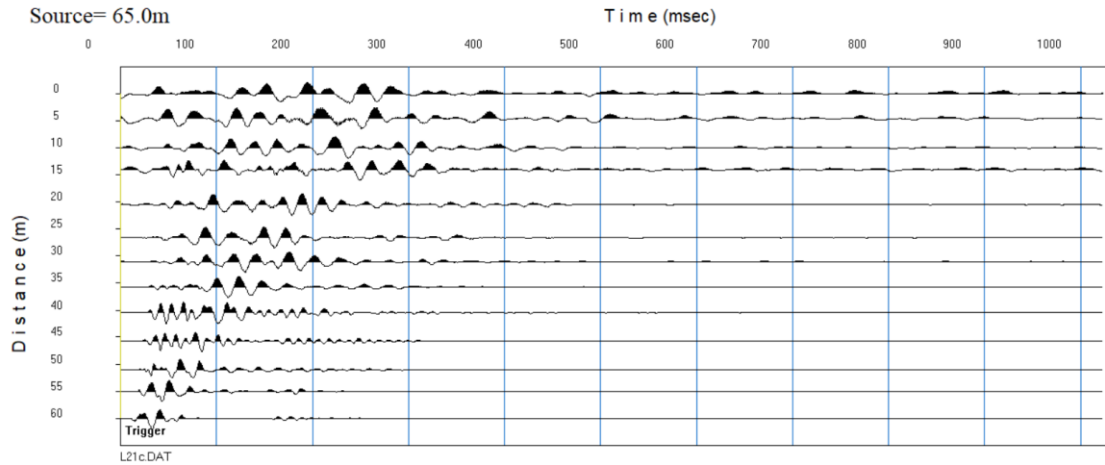


Εικόνα 78. MASW - Επεξεργασία (L12)

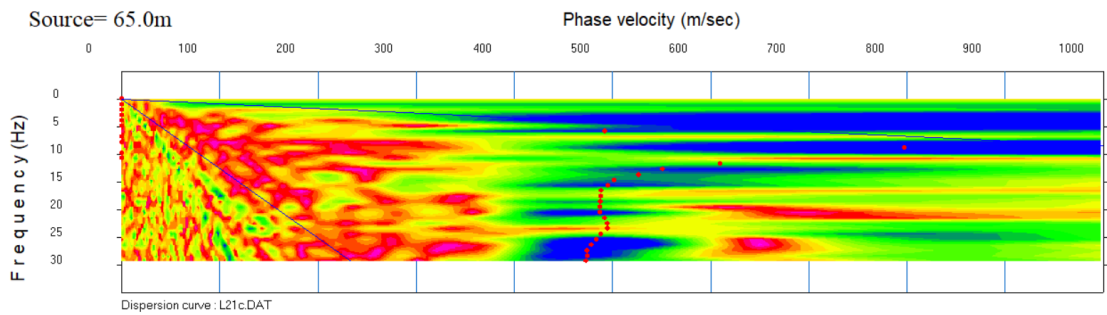


Εικόνα 79. MASW - Τελικό μοντέλο ταχυτήτων (L12)

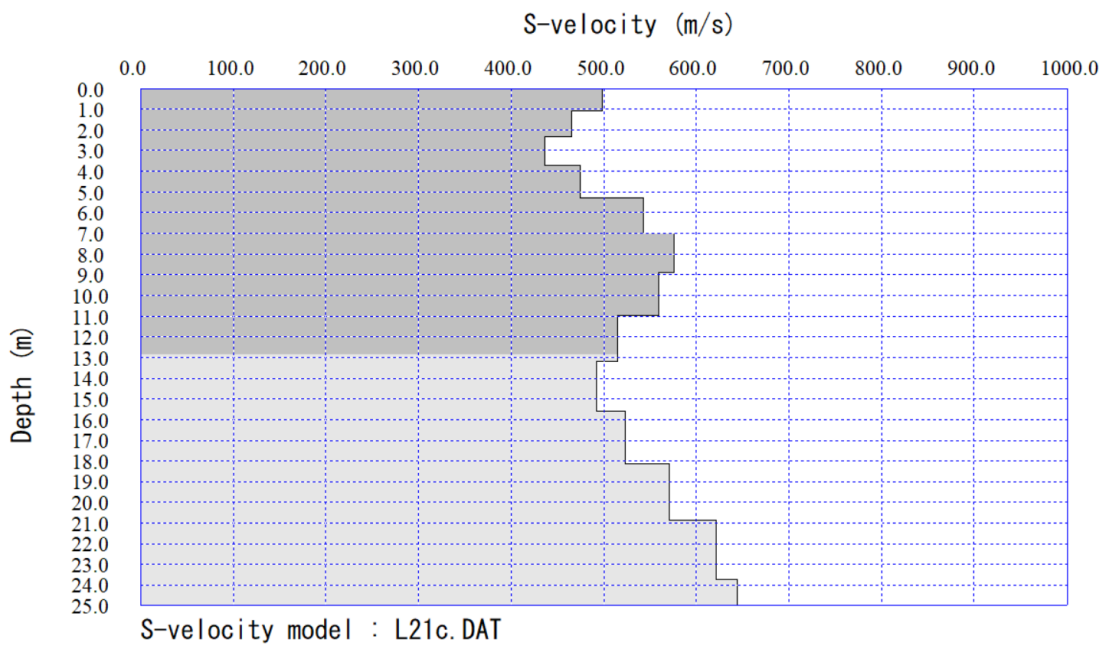
- 3) Κρούση στο άνω όριο του οικοπέδου με την οδό Μακεδονίας - L21
 Ως προς την εισαγωγή των αποστάσεων, έχει ληφθεί ως θέση 0,00m η θέση του γεωφώνου 45 δηλαδή το άκρο της γραμμής που είναι πλησιέστερο στη Λεωφόρο Σοφοκλή Βενιζέλου, ενώ η θέση του χτυπήματος τοποθετείται 65,0m από το άκρο αυτό.



Εικόνα 80. Σεισμόγραμμα με την πηγή στα 65,0m (L21)



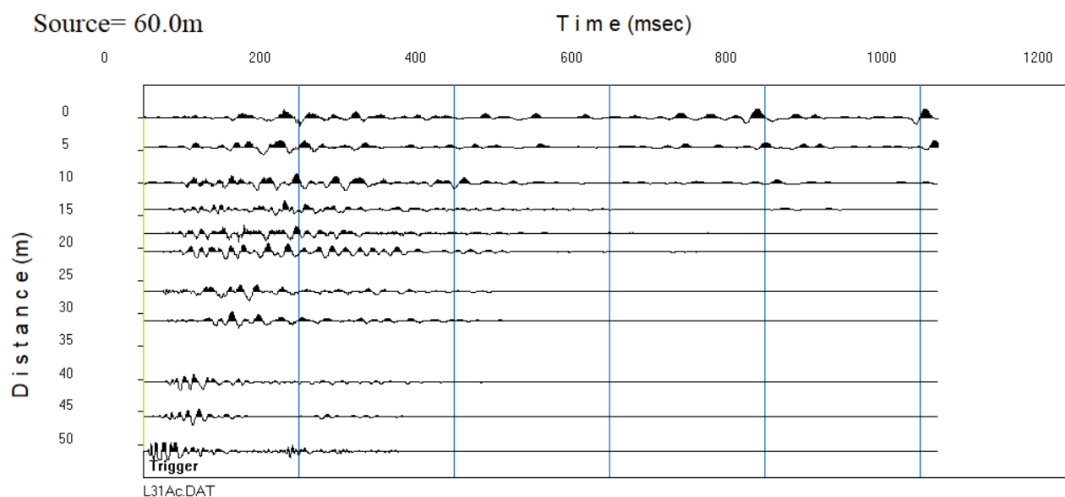
Εικόνα 81. MASW - Επεξεργασία (L21)



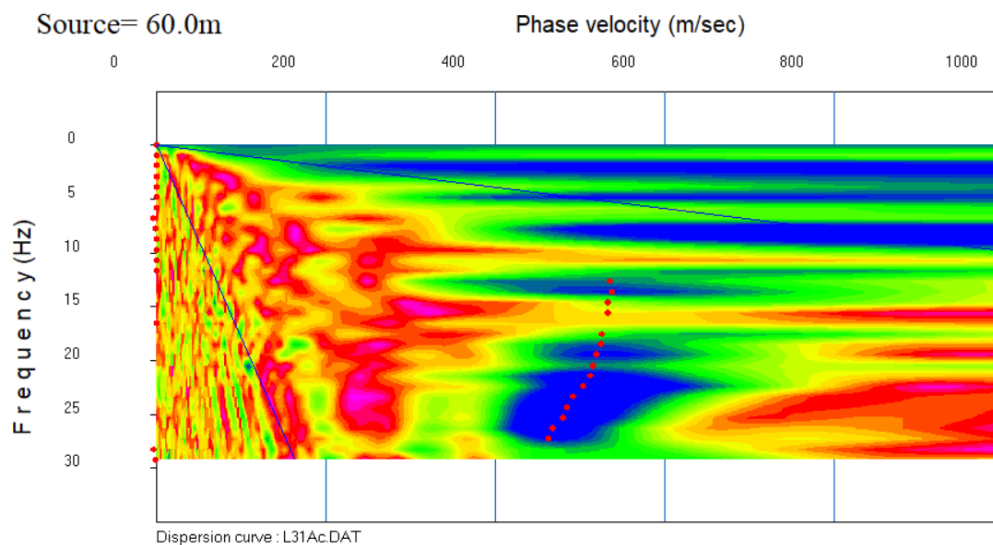
Εικόνα 82. MASW - Τελικό μοντέλο ταχυτήτων (L21)

4) Κρούση στο όριο της σεισμικής γραμμής προς την πλευρά της οδού Μακεδονίας - L31

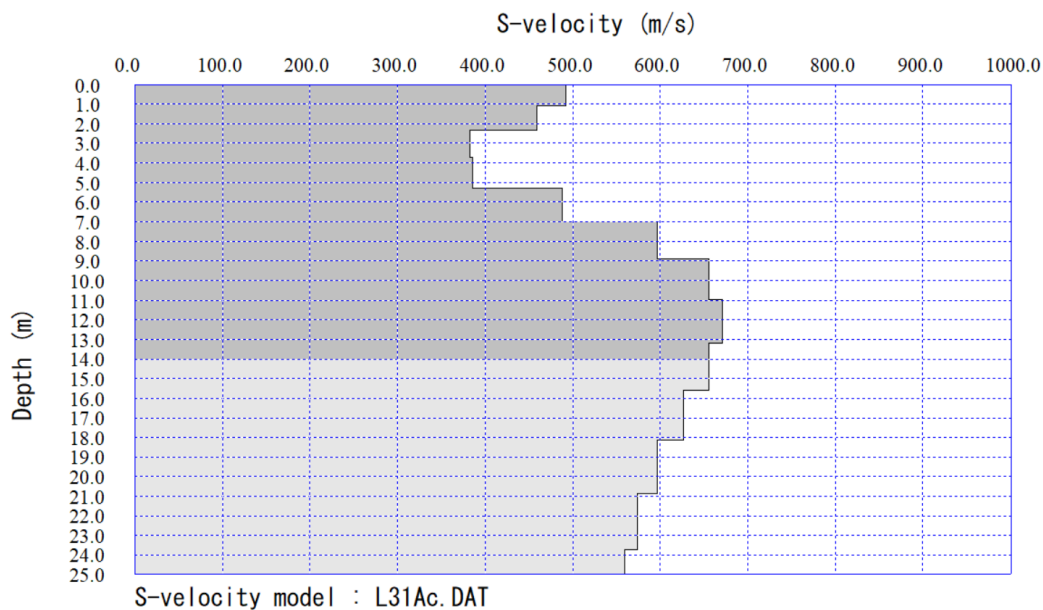
Ως προς την εισαγωγή των αποστάσεων, έχει ληφθεί ως θέση 0,00m η θέση του γεωφώνου 45 δηλαδή το άκρο της γραμμής που είναι πλησιέστερο στη Λεωφόρο Σοφοκλή Βενιζέλου, ενώ η θέση του χτυπήματος τοποθετείται 60,0m από το άκρο αυτό.



Εικόνα 83. Σεισμόγραμμα με την πηγή στα 60,0m (L31)



Εικόνα 84. MASW – Επεξεργασία (L31)

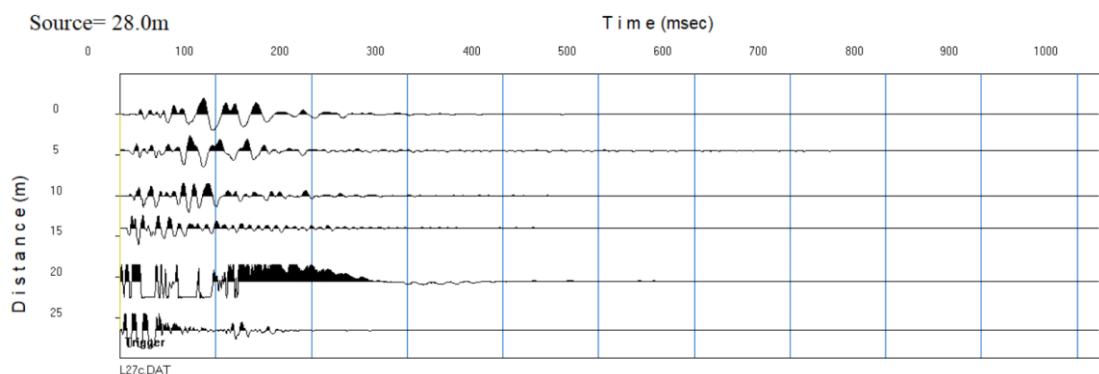


Εικόνα 85. MASW - Τελικό μοντέλο ταχυτήτων (L31)

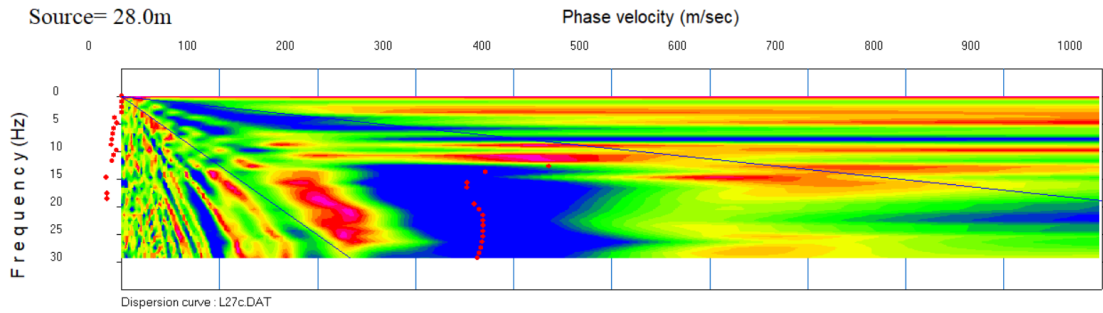
5) Κρούση στο μέσο της σεισμικής γραμμής - L27

Ως προς την εισαγωγή των αποστάσεων, έχει ληφθεί ως θέση 0,00m η θέση του γεωφώνου 45 δηλαδή το άκρο της γραμμής που είναι πλησιέστερο στη Λεωφόρο Σοφοκλή Βενιζέλου, ενώ η θέση του χτυπήματος τοποθετείται 28.0m από το άκρο αυτό, στο μέσο περίπου της γραμμής. Στην προκειμένη περίπτωση θα εξαχθούν δύο μοντέλα ταχυτήτων, εκ των οποίων το ένα θα αφορά το μέσο του τμήματος από το ένα άκρο έως τη θέση του χτυπήματος και το άλλο από το αντίθετο άκρο έως τη θέση του χτυπήματος.

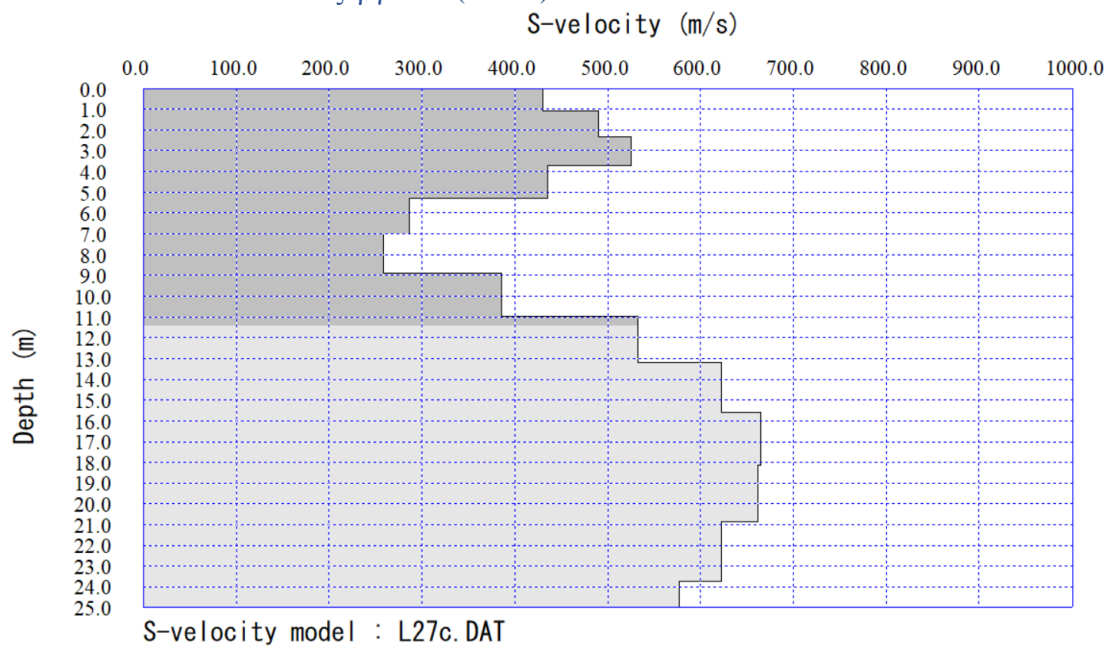
A. Από θέση 0,00m έως θέση 28,00m



Εικόνα 86. Σεισμόγραμμα με την πηγή στα 28.00m (L27A)

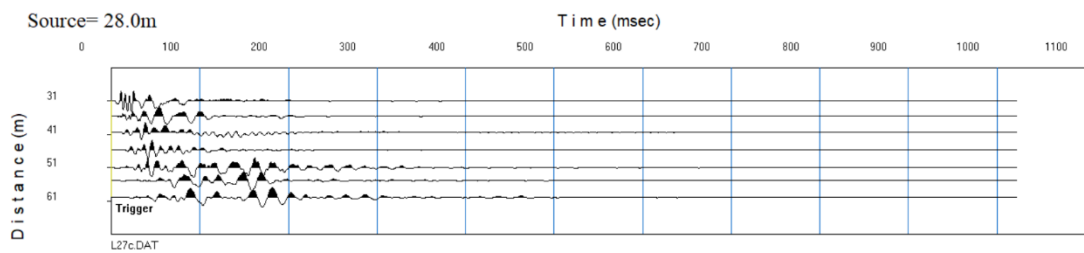


Εικόνα 87. MASW – Επεξεργασία (L27A)

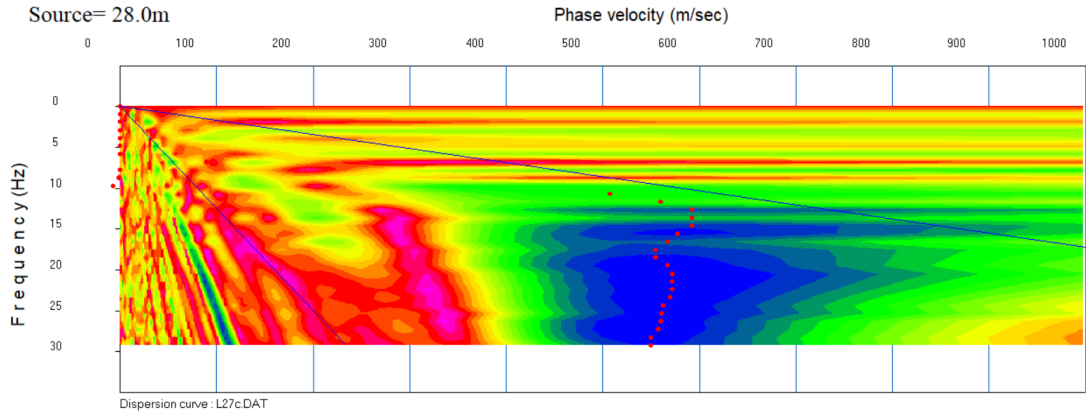


Εικόνα 88. MASW - Τελικό μοντέλο ταχυτήτων (L27A)

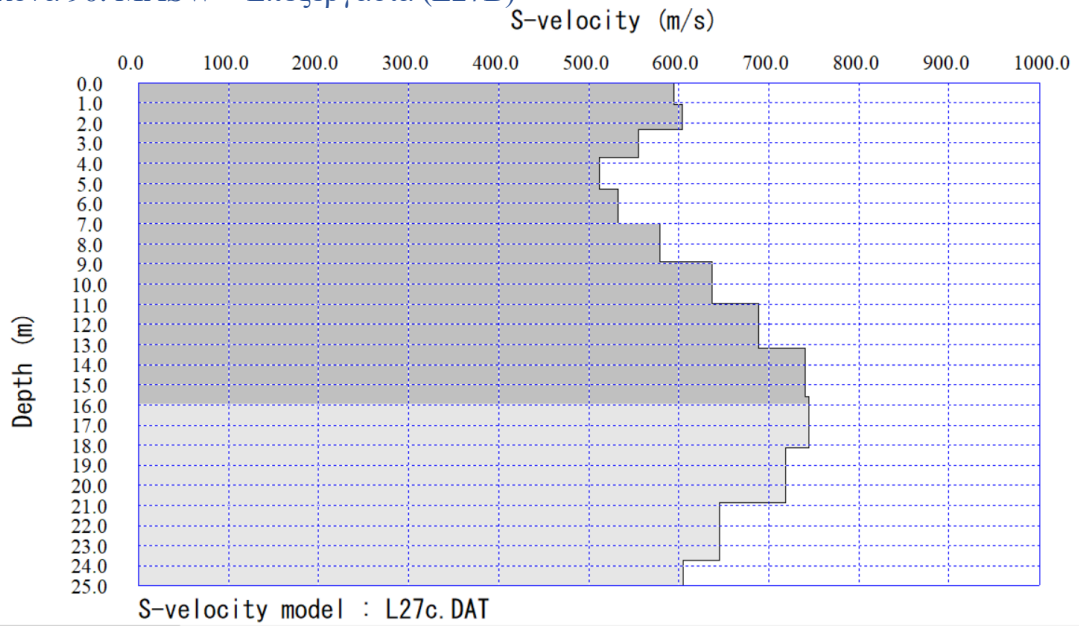
B. Από θέση 28,00m έως θέση 60,20m



Εικόνα 89. Σεισμόγραμμα με την πηγή στα 28.00m -τμήμα από το μέσο προς την οδό Μακεδονίας (L27A)



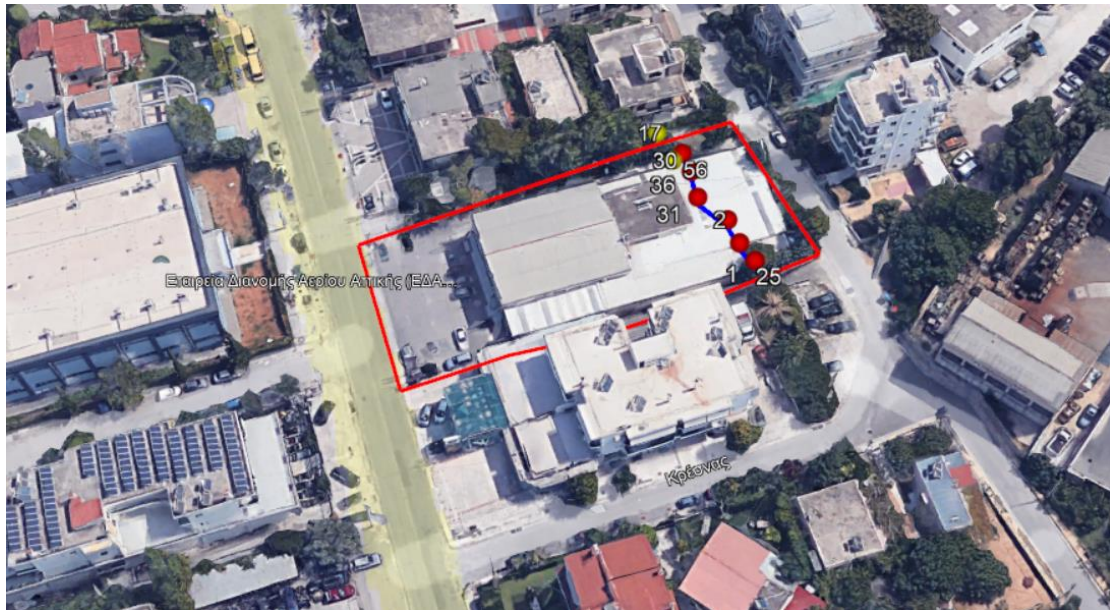
Εικόνα 90. MASW – Επεξεργασία (L27B)



Εικόνα 91. MASW - Τελικό μοντέλο ταχυτήτων (L27B)

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ 2

Για την ανάλυση της σεισμικής γραμμής 2 απομονώθηκαν 6 γεώφωνα τα οποία και τη σχηματίζουν και η οποία έχει μήκος 24,60m. Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα στο σειсмоγράφο από δύο κρούσεις, εκ των οποίων η πρώτη βρίσκεται πολύ κοντά στο ανατολικό άκρο της τομής(L30), ενώ η δεύτερη λίγο πιο έξω από το αντίστοιχο ανατολικό άκρο αλλά συνευθειακά περίπου με αυτή(L17).



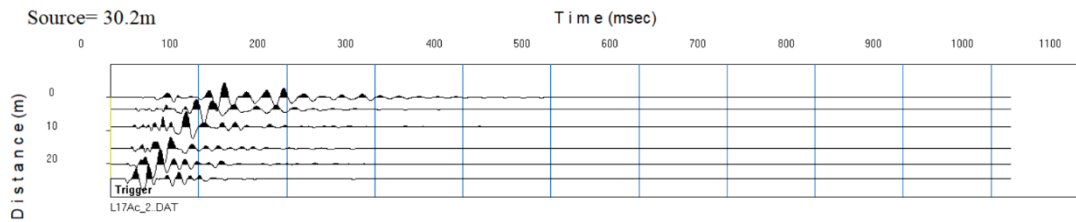
Εικόνα 92. Δορυφορική απεικόνιση της Γραμμής 2 και των σημείων των σεισμικών κρούσεων



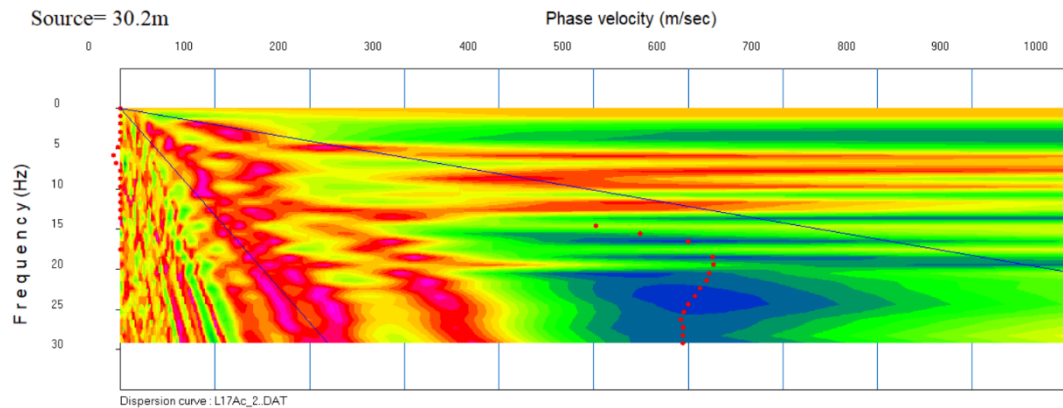
Εικόνα 93. Η διάταξη των γεωφώνων επί της γραμμής 2 στο πεδίο έρευνας συνδεδεμένα μεταξύ τους με καλώδια(από αριστερά προς τα δεξιά), ενώ διακρίνονται και τα μολύβδινα βαρίδια

- 1) Κρούση στο όριο του οικοπέδου στα ανατολικά, στην πλευρά της οδού Πέλλης L-17

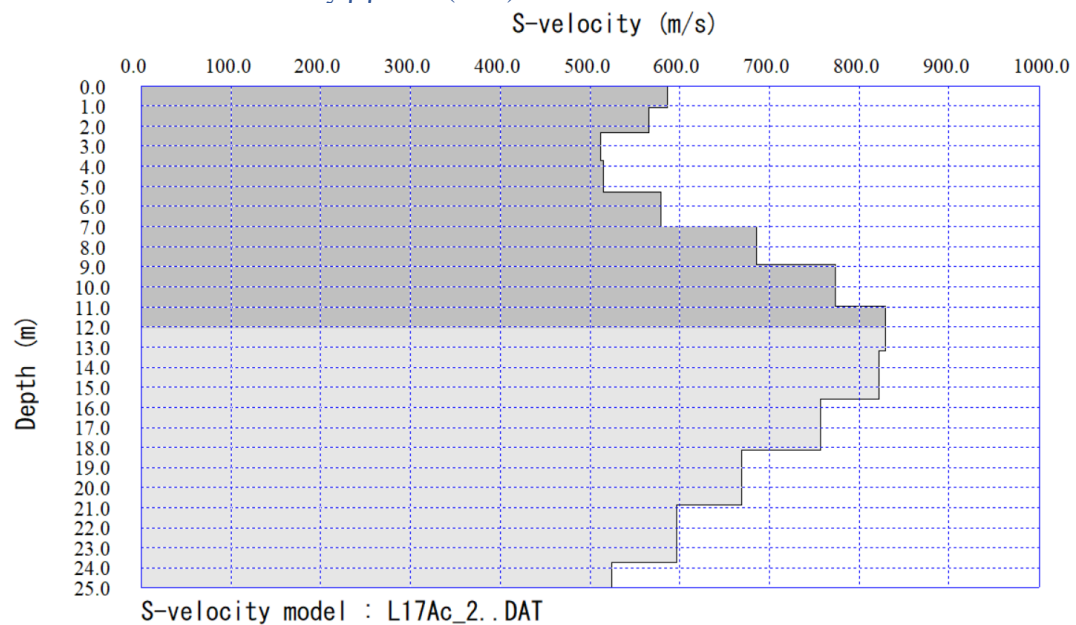
Ως προς την εισαγωγή των αποστάσεων, έχει ληφθεί ως θέση 0,00m η θέση του γεωφώνου 25, δηλαδή το άκρο της γραμμής που βρίσκεται στα δυτικά, ενώ η θέση του χτυπήματος τοποθετείται 30,20m από το άκρο αυτό



Εικόνα 94. Σεισμόγραμμα με την πηγή στα 30,20m (L17)



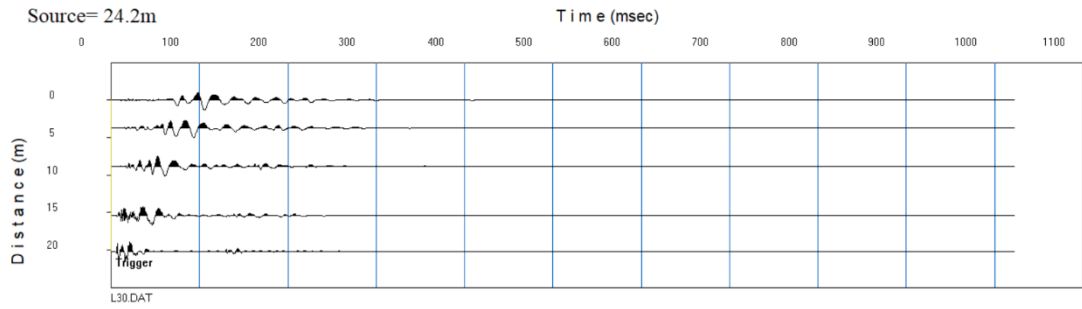
Εικόνα 95. MASW – Επεξεργασία (L17)



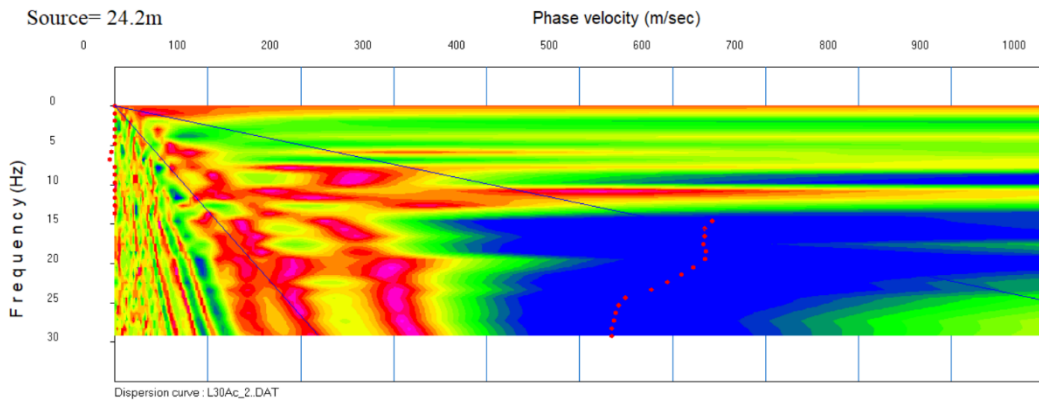
Εικόνα 96. MASW - Τελικό μοντέλο ταχυτήτων (L17)

- 2) Κρούση πλησίον του ορίου της γραμμής στα ανατολικά, από την πλευρά της οδού Πέλλης L-30

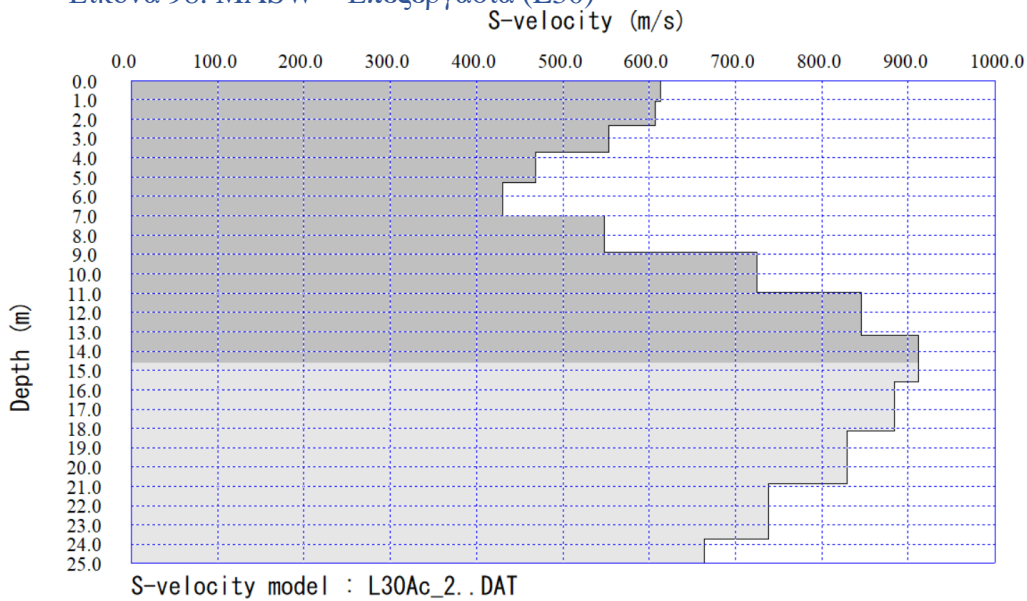
Ως προς την εισαγωγή των αποστάσεων, έχει ληφθεί ως θέση 0,00m η θέση του γεωφώνου 25, δηλαδή το άκρο της γραμμής που βρίσκεται στα δυτικά, ενώ η θέση του χτυπήματος τοποθετείται στο 24,20m από το άκρο αυτό.



Εικόνα 97. Σεισμόγραμμα με την πηγή στα 30,20m (L30)



Εικόνα 98. MASW – Επεξεργασία (L30)



Εικόνα 99. MASW - Τελικό μοντέλο ταχυτήτων (L30)

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ 3

Για την ανάλυση της σεισμικής γραμμής 3 απομονώθηκαν 11 γεώφωνα τα οποία και τη σχηματίζουν και η οποία έχει μήκος 59,50m. Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα στο σειсмоγράφο από τρεις κρούσεις, εκ των οποίων η πρώτη βρίσκεται πολύ κοντά στο ανατολικό νότιο της τομής(L34), η δεύτερη 10m εκτός αυτής από την πλευρά του νότιου άκρου προς την οδό Μακεδονίας(L25),

ενώ τέλος η τρίτη εξ αυτών 8,40m εκτός αυτής, αλλά από την πλευρά του βόρειου άκρου της προς τη Λεωφόρο Σοφοκλή Βενιζέλου(L09).



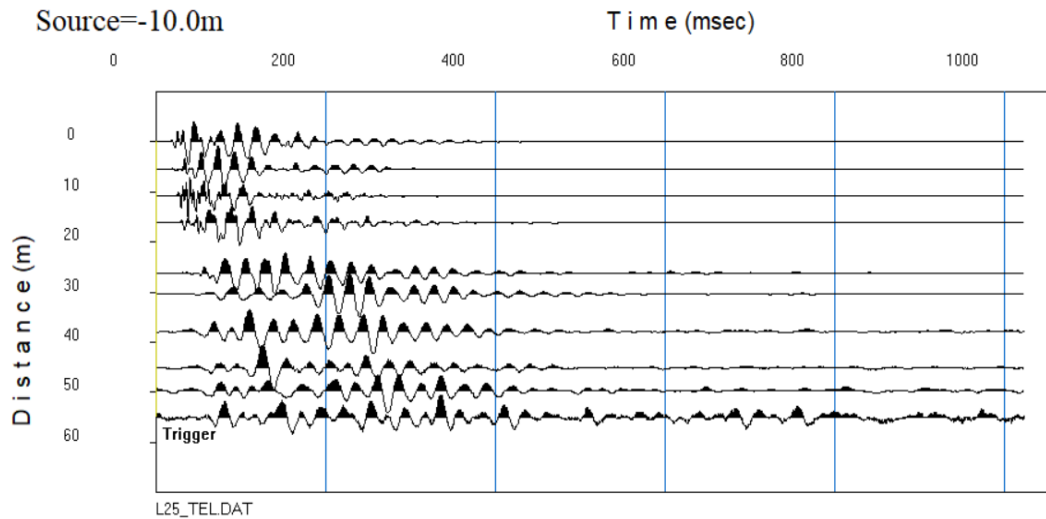
Εικόνα 100. Δορυφορική απεικόνιση της Γραμμής 3 και των σημείων των σεισμικών κρούσεων



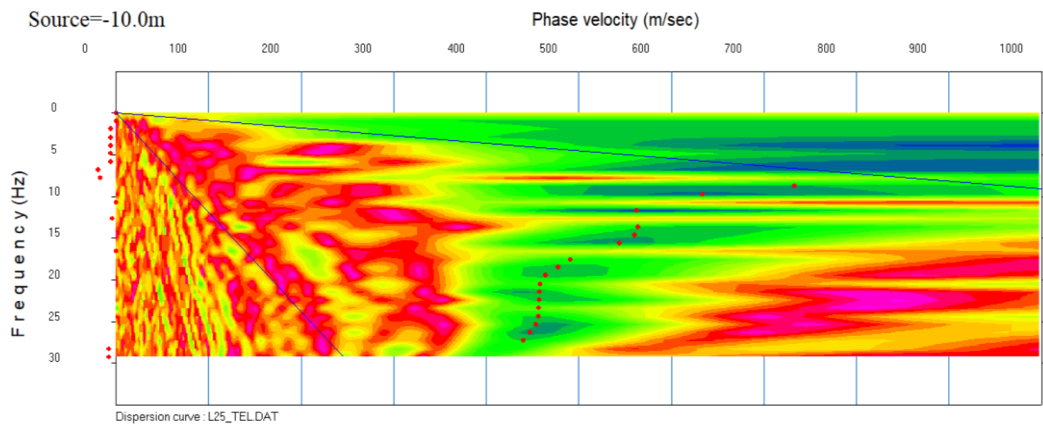
Εικόνα 101. Η διάταξη των γεωφώνων επί της γραμμής 3 στο πεδίο έρευνας συνδεδεμένα μεταξύ τους με καλώδια, ενώ διακρίνονται και τα μολύβδινα βαρίδια

- 1) Κρούση στο νότιο όριο του οικοπέδου, στην πλευρά της οδού Μακεδονίας L-25

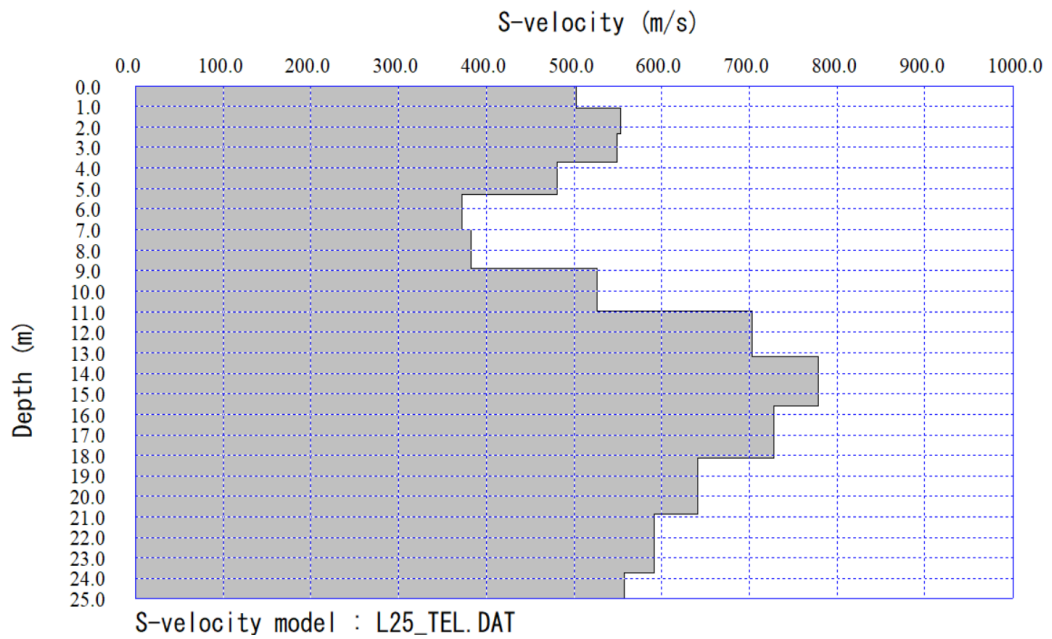
Ως προς την εισαγωγή των αποστάσεων, έχει ληφθεί ως θέση 0,00m η θέση του γεωφώνου 26, δηλαδή το άκρο της γραμμής που βρίσκεται στα νοτιότερα, ενώ η θέση του χτυπήματος τοποθετείται στο 10,0m εκτός της γραμμής αλλά συνευθειακά με αυτή προς νότια κατεύθυνση



Εικόνα 102. Σεισμόγραμμα με την πηγή στα -10,00m (L25)



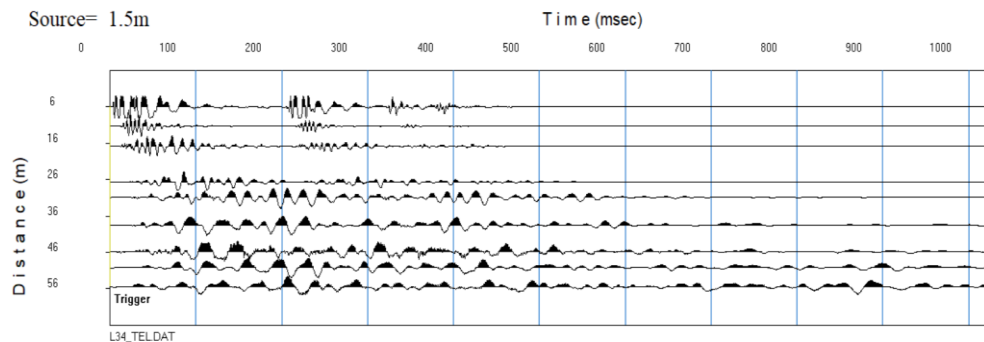
Εικόνα 103. MASW – Επεξεργασία (L25)



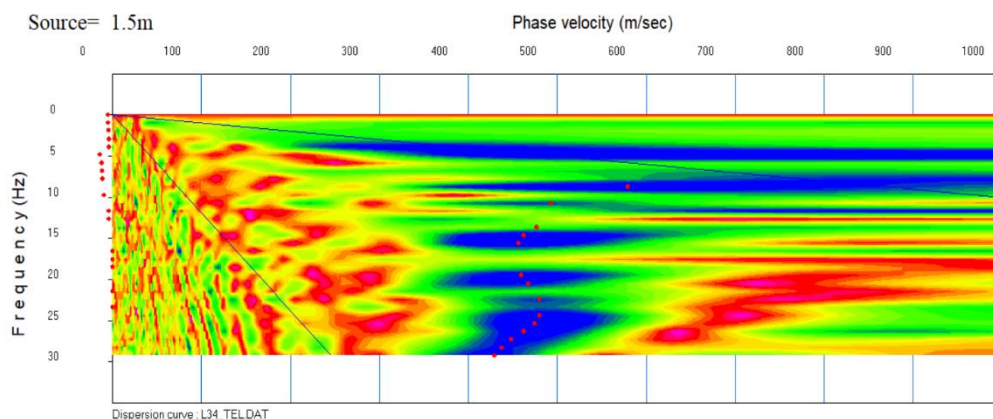
Εικόνα 104. MASW - Τελικό μοντέλο ταχυτήτων (L25)

- 2) Κρούση πλησίον του νότιου ορίου της γραμμής, από την πλευρά της οδού Μακεδονίας L-34

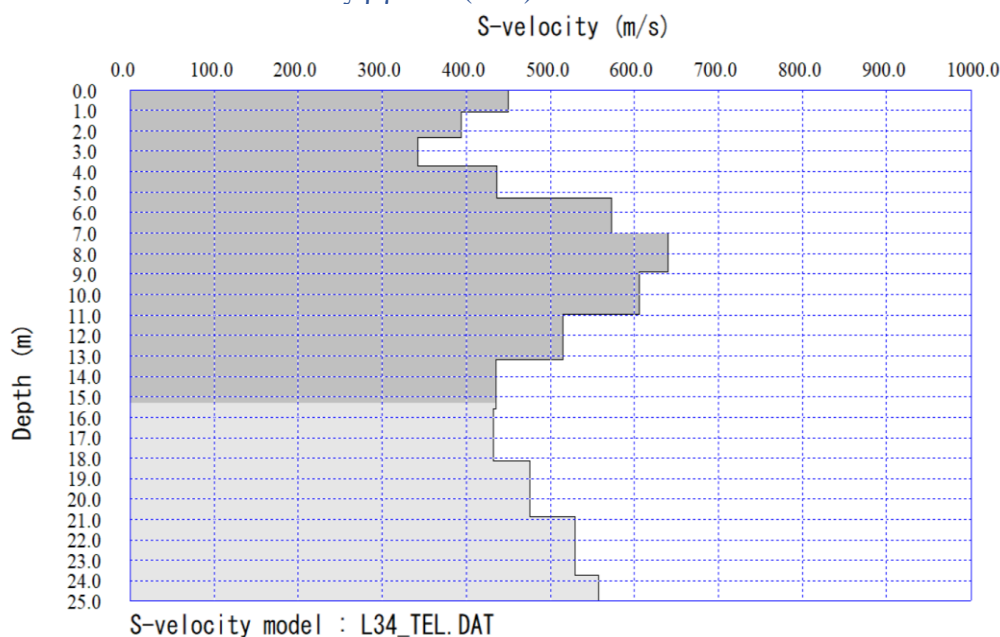
Ως προς την εισαγωγή των αποστάσεων, έχει ληφθεί ως θέση 0,00m η θέση του γεωφώνου 26, δηλαδή το άκρο της γραμμής που βρίσκεται στα νοτιότερα, ενώ η θέση του χτυπήματος τοποθετείται σε απόσταση 1,50m από το νότιο άκρο της γραμμής και εντός αυτής.



Εικόνα 105. Σεισμόγραμμα με την πηγή στα 1,50m (L34)



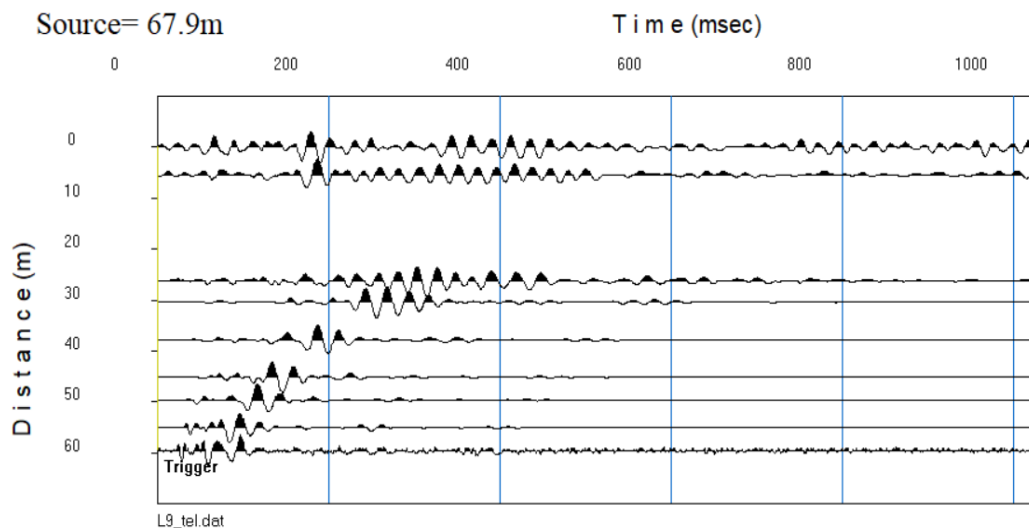
Εικόνα 106. MASW – Επεξεργασία (L34)



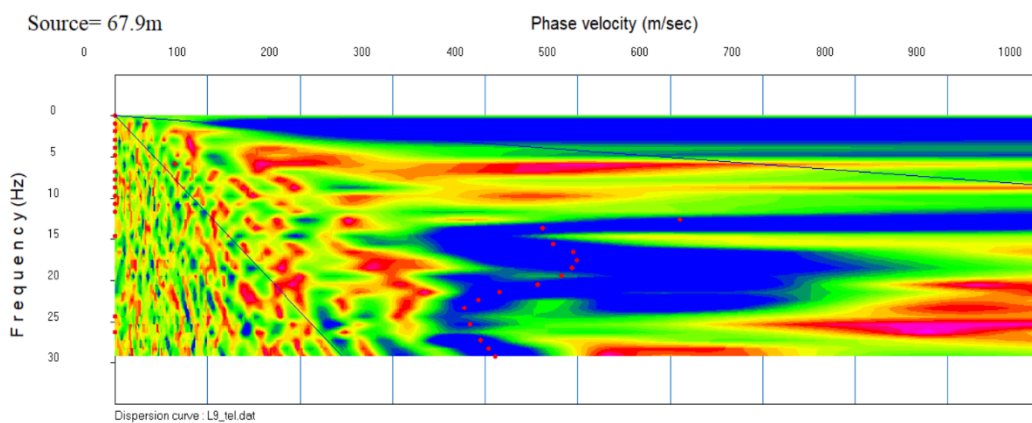
Εικόνα 107. MASW - Τελικό μοντέλο ταχυτήτων (L34)

- 3) Κρούση στο βόρειο όριο του οικοπέδου, στην πλευρά της Λεωφόρου Σοφοκλή Βενιζέλου L-09

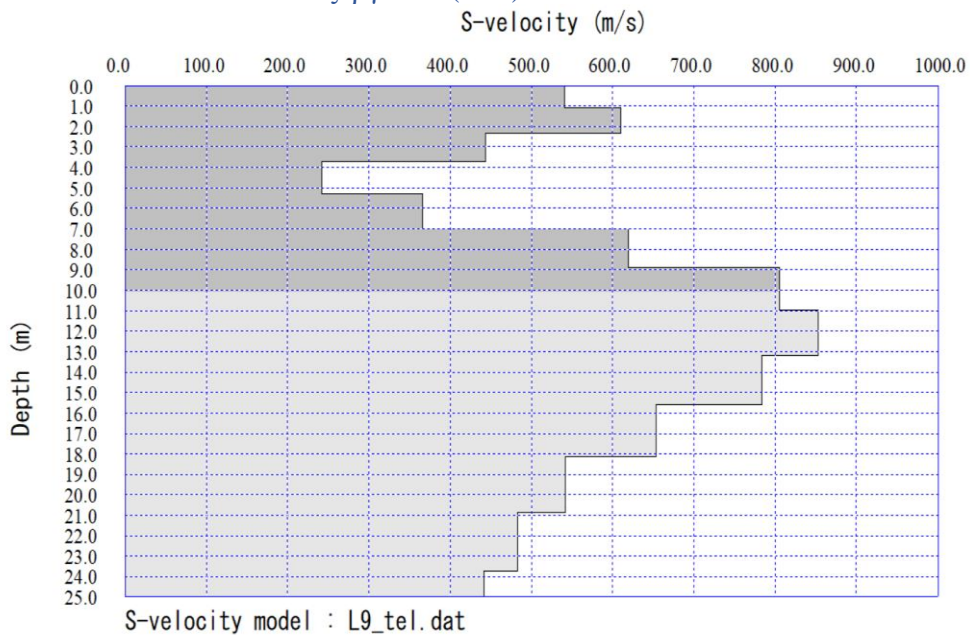
Ως προς την εισαγωγή των αποστάσεων, έχει ληφθεί ως θέση 0,00m η θέση του γεωφώνου 26, δηλαδή το άκρο της γραμμής που βρίσκεται στα νοτιότερα, ενώ η θέση του χτυπήματος τοποθετείται 69,70m από το γεώφωνο αυτό προς το βορρά και επομένως εκτός της γραμμής αλλά συνευθειακά με αυτή.



Εικόνα 108. Σεισμόγραμμα με την πηγή στα 67,90m (L09)



Εικόνα 109. MASW – Επεξεργασία (L09)



Εικόνα 110. MASW - Τελικό μοντέλο ταχυτήτων (L09)

4.3.4 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Με βάση τις σεισμικές ταχύτητες που προέκυψαν από την ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων, εκτιμήθηκε μία εικόνα της στρωματογραφίας που αναμένεται στο υπέδαφος.

Για όλες τις κρούσεις με τη σεισμική πηγή που λήφθηκαν υπόψιν για τη Γραμμή 1, παρατηρείται το ίδιο μοτίβο στη διακύμανση των ταχυτήτων διάδοσης των κυμάτων ως προς το βάθος.

Πιο συγκεκριμένα, βλέπουμε ότι στα πρώτα μέτρα αναμένεται ένα στρώμα υλικού με ταχύτητες διάδοσης κυμαίνονται από 480 m/s έως 580 m/s, γεγονός που υποδηλώνει ότι πιθανότατα πρόκειται για αργιλικό συνεκτικό έδαφος. Το πάχος του πρώτου στρώματος έχει ένα εύρος από 2 έως 5 μέτρα, με τα μεγαλύτερα βάθη να εμφανίζονται στη βόρεια πλευρά του οικοπέδου, δηλαδή προς την πλευρά της Λεωφόρου Σοφοκλή Βενιζέλου.

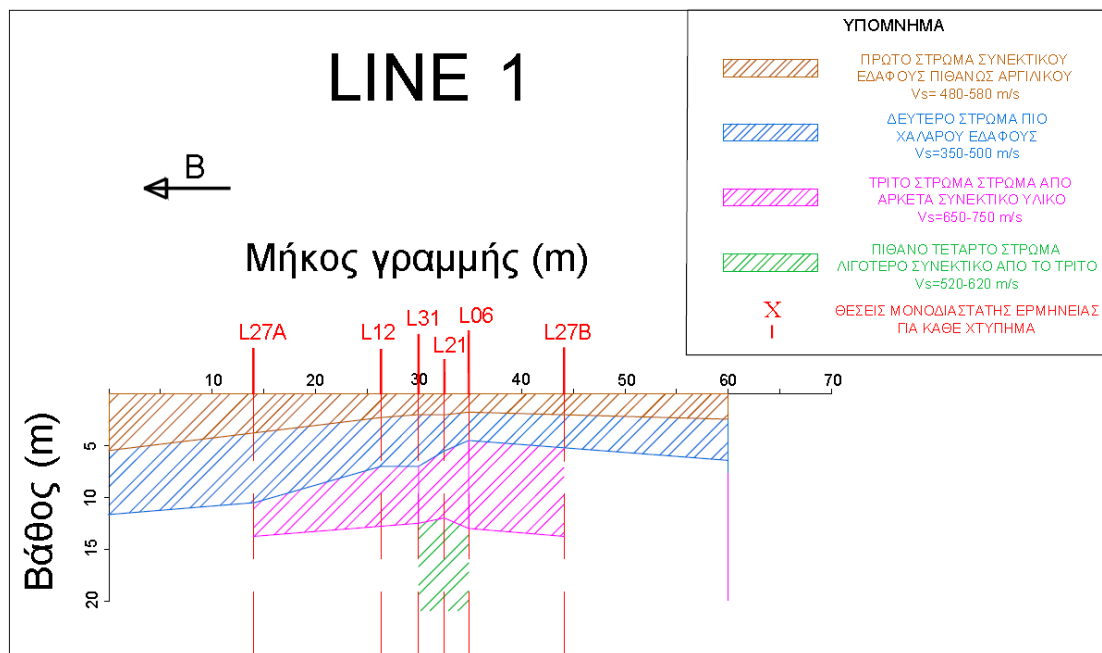
Σε όλες τις τομές εντοπίζεται μία ζώνη εδάφους, η οποία υπόκειται του επιφανειακού στρώματος, και φαίνεται λιγότερο συνεκτικό σε σχέση με αυτό. Διακρίνεται μία μείωση των ταχυτήτων διάδοσης σε σχέση με τα μικρότερα βάθη ($V_s=350-500$ m/s), υποδηλώνοντας την ύπαρξη περισσότερο χαλαρών εδαφών. Φαίνεται, επίσης, ότι το βάθος στο οποίο εκτείνεται, μεταβάλλεται στο εύρος των 7 έως 11 μέτρων κατά μήκος της γραμμής, ακολουθώντας περίπου την κλίση του υπερκείμενου πιο συνεκτικού στρώματος.

Τέλος, βαθύτερα από τη ζώνη του πιο χαλαρού εδαφικού στρώματος, οι αυξημένες σεισμικές ταχύτητες υποδηλώνουν την ύπαρξη ενός αρκετά σκληρού εδάφους, με σημαντική συνοχή ($V_s=650-750$ m/s). Συμπεραίνεται για το στρώμα αυτό, χωρίς μεγάλη βεβαιότητα λόγω της προαναφερθείσας κρυφής ζώνης, ότι συναντάται σε βάθη από 7 έως 11 μέτρα, διατηρώντας την κλίση των υπερκείμενων στρωμάτων.

Η ανάλυση των κρούσεων L06, L21, L31 δείχνει ότι κάτω από το αρκετά σκληρό τρίτο στρώμα και σε βάθος περίπου 12 με 13 μέτρα, υπάρχει πιθανότητα ύπαρξης ενός λιγότερο συνεκτικού εδάφους, χωρίς ωστόσο να παρατηρείται μεγάλη μείωση των σεισμικών ταχυτήτων. Όσον αφορά τις τομές των υπόλοιπων κρούσεων, αν και εντοπίζεται και σε αυτές τις περιπτώσεις το παραπάνω τέταρτο στρώμα, η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων οριοθετείται εντός του τρίτου στρώματος.

Με βάση τα τελικά μοντέλων ταχυτήτων που προκύπτουν στο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων έχει βαρύτητα έως τα βάθη των 12 με 16 μέτρων, με αποτέλεσμα η ερμηνεία των ταχυτήτων σε μεγαλύτερα βάθη να είναι αβέβαιη. Επιπροσθέτως, αξίζει να σημειωθεί ότι η μη αύξηση των σεισμικών ταχυτήτων μεταξύ του πρώτου και δεύτερου διαδοχικού στρώματος που εντοπίζεται με την ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων, υποδηλώνει ότι η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης θα οδηγούσε στην ύπαρξη κρυφής ζώνης και η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων θα ήταν αδύνατη.

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 111), απεικονίζεται κατά μήκος της γραμμής η στρωματογραφία που έχει εκτιμηθεί με βάση τον συνδυασμό των ερμηνευμένων αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα διαφορετικά σημεία κρούσης που επιλέχθηκαν.

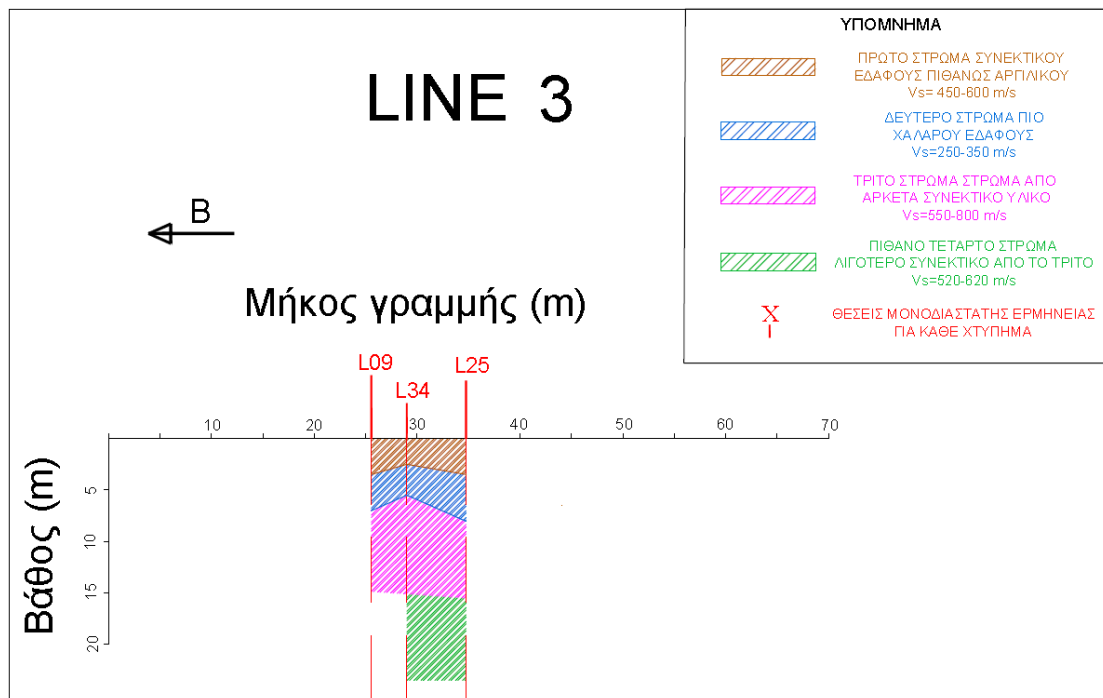


Εικόνα 111. Δισδιάστατη προσεγγιστική τομή του υπεδάφους κατά μήκος της Γραμμής 1 με βάση το συνδυασμό των αποτελεσμάτων της 1-D ανάλυσης MASW για τις διάφορες θέσεις χτυπημάτων

Αναφορικά με τη Γραμμή 2, τα αποτελέσματα από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε συνάδουν με τα αποτελέσματα της Γραμμής 1. Όπως φαίνεται από τις σεισμικές ταχύτητες που προέκυψαν, στο μέσο της γραμμής παρατηρείται η ύπαρξη ενός ανώτερου αρκετά συνεκτικού εδάφους με ταχύτητες $V_s=600$ m/s. Το επιφανειακό αυτό στρώμα ακολουθείται από ένα στρώμα που αποτελείται από περισσότερο χαλαρό υλικό με ταχύτητες διάδοσης 420 και 520 m/s. Ένα στρώμα εδάφους αποτελούμενο από αρκετά συνεκτικό υλικό αναμένεται στη συνέχεια., δεδομένων των αυξημένων ταχυτήτων της τάξης των 700 και 800 m/s που παρατηρούνται. Το βάθος που εκτείνεται το πρώτο στρώμα είναι περίπου 3m, ενώ το επακόλουθο δείχνει να εκτείνεται έως τα 8 περίπου μέτρα, υποδηλώνοντας το βάθος που αναμένεται να εντοπισθεί το αρκετά συνεκτικότερο στρώμα που έπεται.

Τέλος, παρόμοια είναι και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων για τη Γραμμή 3, τα οποία αναφέρονται σε ένα τμήμα περί το μέσο της γραμμής. Το πρώτο αρκετά συνεκτικό στρώμα εντοπίζεται στα 3-5 περίπου πρώτα μέτρα, με σεισμικές ταχύτητες που ανήκουν στο εύρος των 450-600 m/s. Ακολουθεί ένα πιο χαλαρό υλικό έως και βάθος που κυμαίνεται από 5 έως 8 m, όπου και ξεκινά ένα πάρα πολύ συνεκτικό και σκληρό έδαφος με ταχύτητες από 600 έως 800 m/s. Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο μέσο του τμήματος, διακρίνεται η αλλαγή από το υλικό του τρίτου στρώματος που προαναφέρθηκε, σε ένα λιγότερο συνεκτικό αλλά αρκετά συμπαγές υλικό, δεδομένης της μείωσης των σεισμικών ταχυτήτων των κυμάτων S σε 500-600 m/s.

Στην παρακάτω εικόνα(Εικόνα 112), απεικονίζεται σε ένα τμήμα περί το μέσο της γραμμής η στρωματογραφία που έχει εκτιμηθεί με βάση τον συνδυασμό των ερμηνευμένων αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα τρία διαφορετικά σημεία κρούσης που επιλέχθηκαν.



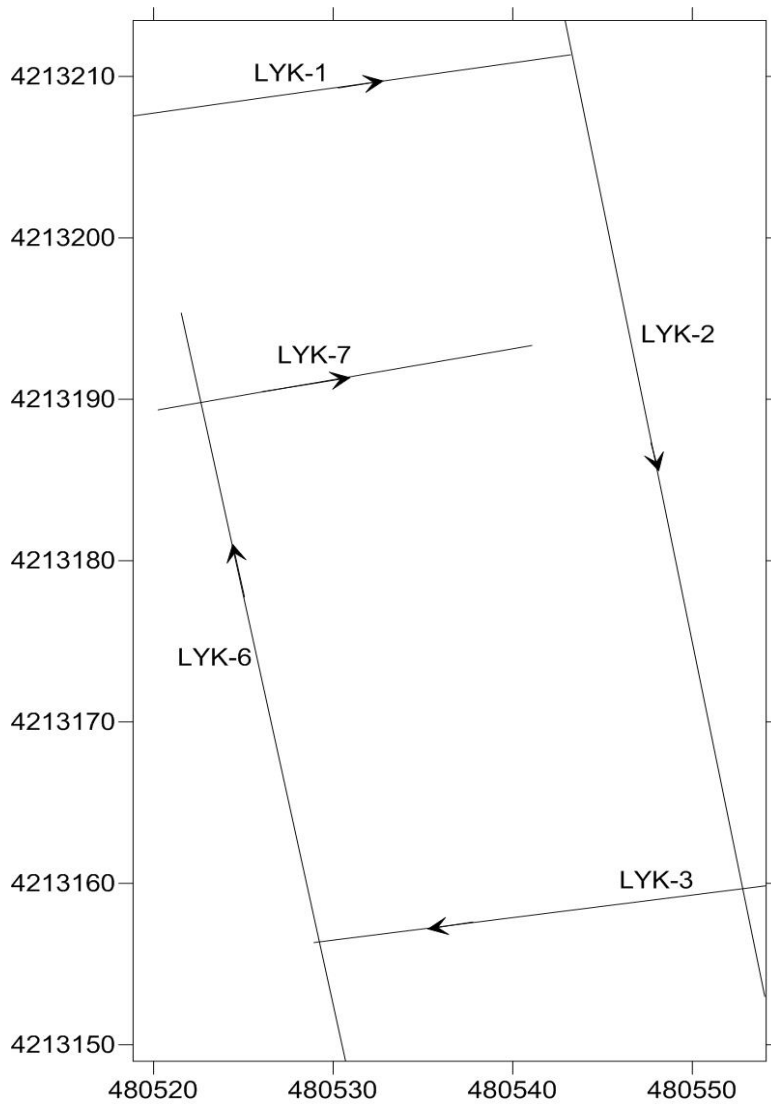
Εικόνα 112. Δισδιάστατη προσεγγιστική τομή του υπεδάφους περί του μέσου της Γραμμής 2 με βάση το συνδυασμό των αποτελεσμάτων της 1-D ανάλυσης MASW για τις τρεις θέσεις χτυπημάτων

4.4 Μέθοδος του Γεωραντάρ

4.4.1 Εξοπλισμός και διαδικασία μετρήσεων

Η τελευταία μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν η μέθοδος της ηλεκτρομαγνητικής ανάκλασης, ή αλλιώς η μέθοδος του γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar-GPR). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 5 τομές, οι τρεις εκ των οποίων είναι στη διεύθυνση ανατολής- δύσης και οι δύο βορρά- νότου. Μάλιστα τρεις από αυτές συμπίπτουν με τα τρία σεισμικά προφίλ που αναλύθηκαν.

Χρησιμοποιήθηκε η αντένα MALA των 250MHz, η οποία έχει μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης με στόχο να εξεταστεί σε όσο μεγαλύτερο βάθος η στρωματογραφία του υπεδάφους και να γίνει σύγκριση με τα αποτελέσματα της σεισμικής μεθόδου σε στο μεγαλύτερο δυνατό βάθος. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε γεωδαιτικό όργανο GPS για την τοπογραφική αποτύπωση της πορείας που ακολούθησε το γεωραντάρ και κατ' επέκταση των προφίλ που λήφθηκαν.



Εικόνα 113. Κάναβος μετρήσεων με το γεωραντάρ με τις ακριβείς συντεταγμένες τους



Εικόνα 114. Δορυφορική απεικόνιση των πέντε ευθειών που ακολούθησε το γεωραντάρ και οδήγησαν στη λήψη των αντίστοιχων τομών (κόκκινο χρώμα)



Εικόνα 115. Μέτρηση στο πεδίο της έρευνας με το γεωραντάρ

4.4.2 Επεξεργασία των μετρήσεων

Τη λήψη των δεδομένων από το πεδίο, ακολούθησε η επεξεργασία τους από τον επιβλέποντα καθηγητή, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα REFLEXW της Sandmeier Scientific Software.

Οι τελικές τομές του γεωραντάρ, οι οποίες αποτελούν ραδιογράμματα που παρουσιάζονται είτε με τη συμβατική μορφή ανακλάσεων σημάτων είτε με την ανάλυση πλάτους σημάτων προέκυψαν ύστερα από την επεξεργασία των αρχικών δεδομένων.

Τα στάδια της επεξεργασίας ήταν τα εξής:

- Subtrack mean (dewow): Αφαιρείται μία μη γραμμική ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, η οποία δε σχετίζεται με τα δεδομένα
- Correct max phase
- Move start-time: Διορθώνεται ο χρόνος εκκίνησης βάσει της σωστής θέσης
- Energy decay: Ενισχύεται το σήμα που έχει ληφθεί
- Bandpass butterworth : Πρόκειται για φίλτρο με το οποίο απορρίπτονται από τις συχνότητες που επιστρέφονται στο δέκτη όσες είναι εκτός του φάσματος των 70 – 300 MHz.
- Background removal: Αφαιρείται οποιοσδήποτε εξωτερικός θόρυβος αναγνωρίζεται

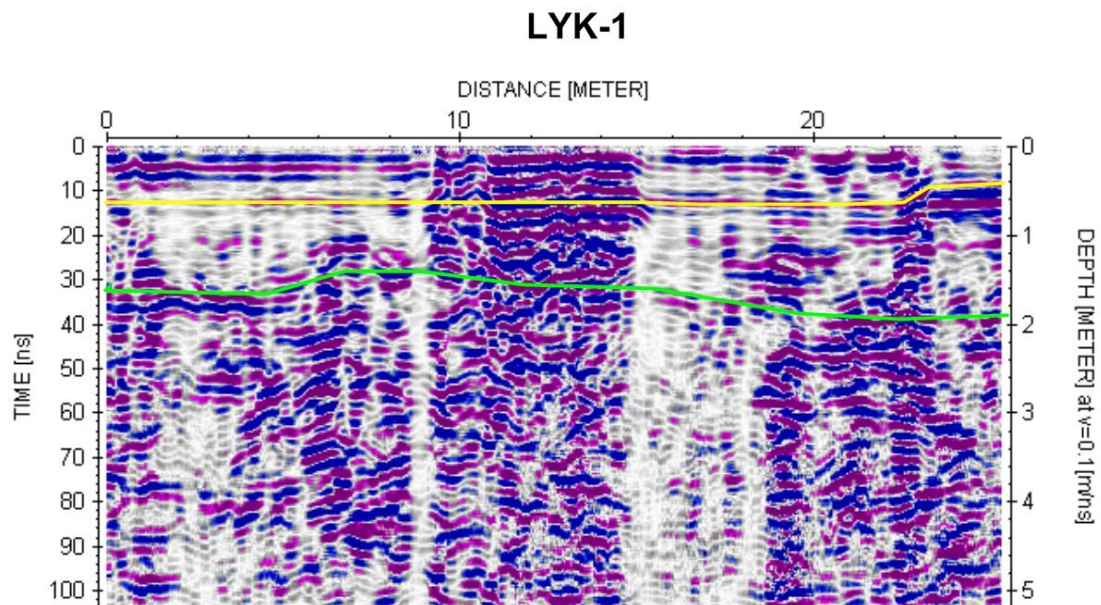
- Spectral whitening: Επιτυγχάνεται η διεύρυνση του φασματικού εύρους για να επιτευχθεί καλύτερη απεικόνιση παρά τη χαμηλή συχνότητα που χρησιμοποιήθηκε και προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα ως προς το βάθος.
- Kirchhoff migration: Διόρθωση των θέσεων από τις οποίες προκύπτουν οι ανακλάσεις λόγω τις υπάρχουσας κλίσης.

4.4.3 Αποτελέσματα των μετρήσεων

Οι τελικές τομές που προέκυψαν με τη μέθοδο του γεωραντάρ είναι οι εξής:

1) Τομή LYK – 1

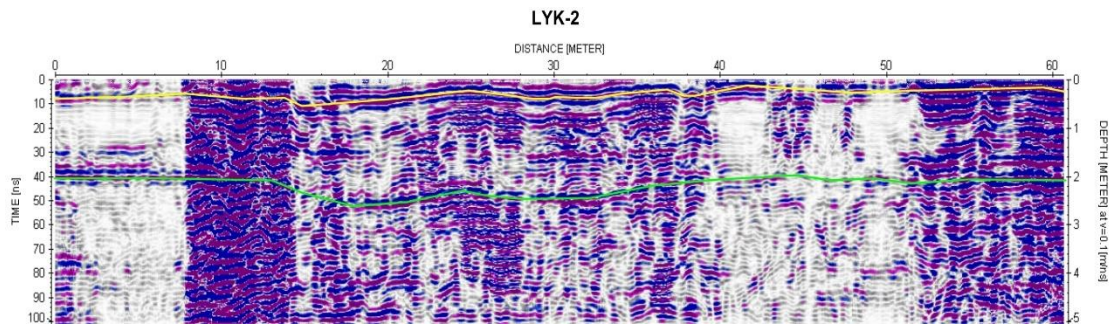
Τοποθετείται στη βόρεια πλευρά του οικοπέδου, πλησίον του ορίου του οικοπέδου στη Λεωφόρο Σοφοκλή Βενιζέλου και έχει διεύθυνση από ανατολή προς δύση.



Εικόνα 116. Τομή LYK - 1

2) Τομή LYK – 2

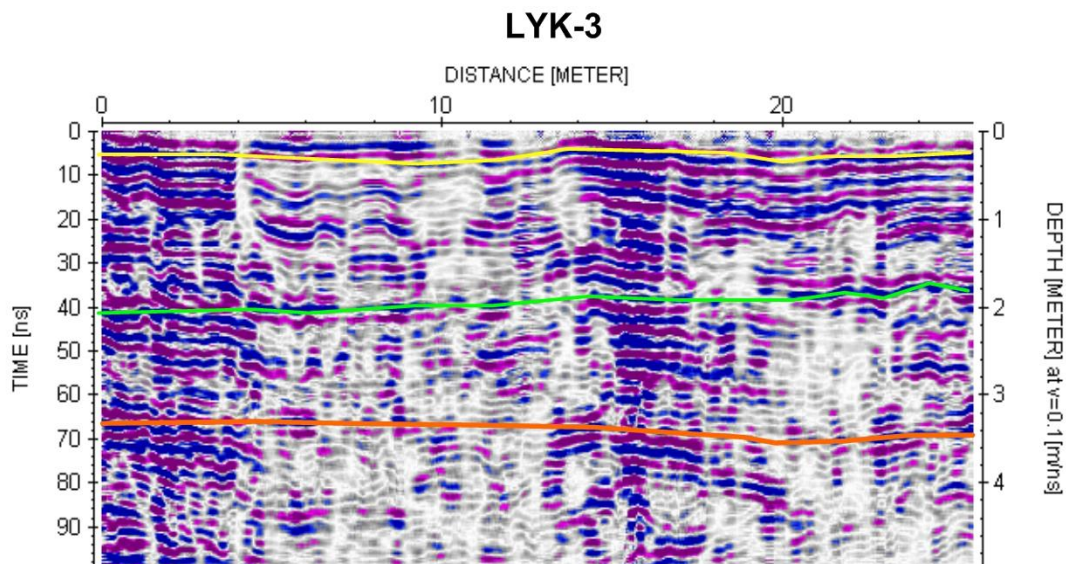
Τοποθετείται στην ανατολική πλευρά του οικοπέδου, πλησίον του ορίου του οικοπέδου στην οδό Πέλλης και έχει διεύθυνση από βορρά προς νότο. Σχεδόν συμπίπτει με τη σεισμική Γραμμή 1.



Εικόνα 117. Τομή LYK - 2

3) Τομή LYK – 3

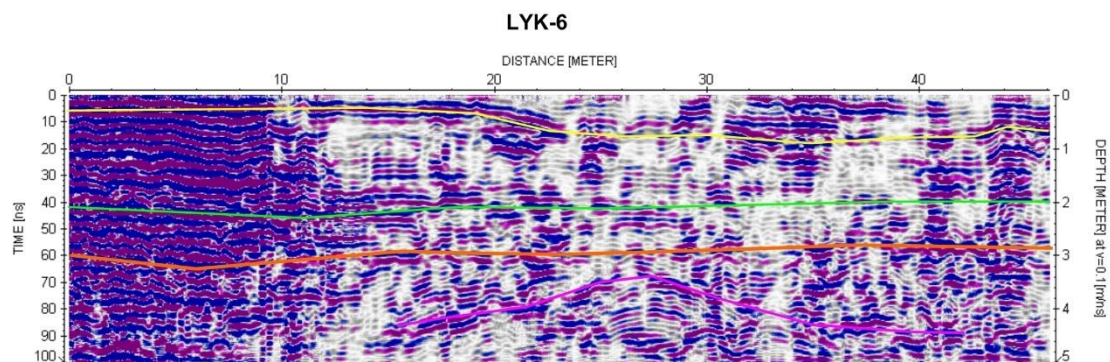
Τοποθετείται στη νότια πλευρά του οικοπέδου, πλησίον του ορίου του οικοπέδου στην οδό Μακεδονίας και έχει διεύθυνση από δύση προς ανατολή. Σχεδόν συμπίπτει με τη σεισμική Γραμμή 2.



Εικόνα 118. Τομή LYK - 3

4) Τομή LYK – 6

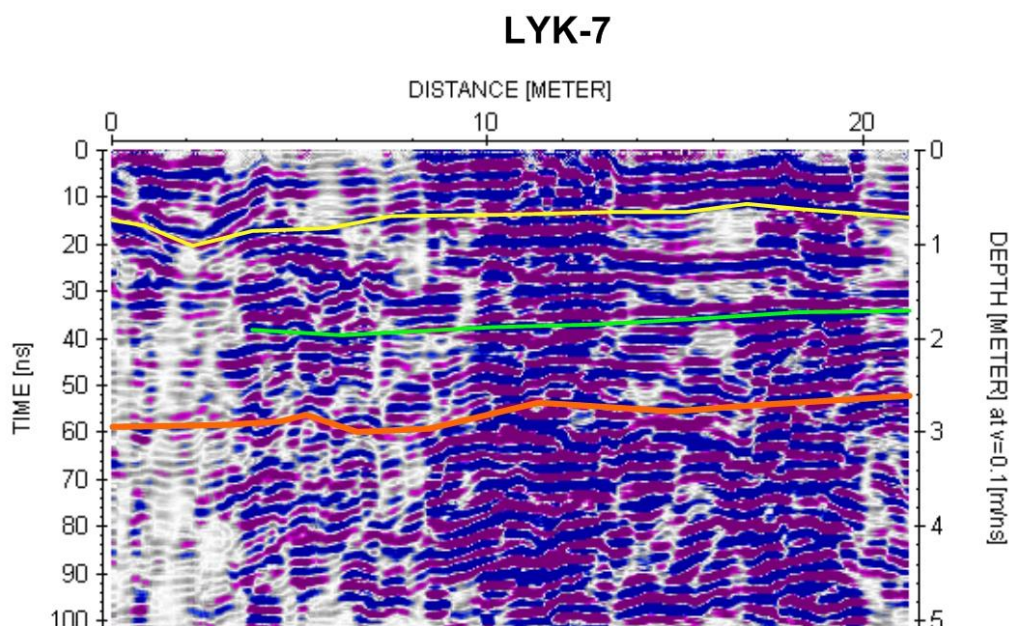
Τοποθετείται στην δυτική πλευρά του οικοπέδου, πλησίον του ορίου του οικοπέδου με διπλανό οικόπεδο και έχει διεύθυνση από νότο προς βορρά. Σχεδόν συμπίπτει με τη σεισμική Γραμμή 3.



Εικόνα 119. Τομή LYK - 6

5) Τομή LYK – 7

Τοποθετείται στη βόρεια πλευρά του οικοπέδου, πλησίον του ορίου του οικοπέδου στη Λεωφόρο Σοφοκλή Βενιζέλου αλλά πιο εσωτερικά σε σχέση με την τομή LYK -1, ενώ έχει διεύθυνση από ανατολή προς δύση.



Εικόνα 120. Τομή LYK - 7

4.4.4 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Σε όλα τα ραδογράμματα παρουσιάζονται κάποιες ασυνέχειες που διαχωρίζουν χώρους διαφορετικής σύστασης του υπεδάφους. Οι ασυνέχειες αυτές σημειώνονται με σειρά από την επιφάνεια προς τα κάτω με κίτρινο, πράσινο, πορτοκαλί και ροζ χρώμα, έτσι ώστε να γίνεται εύκολα αναγνωρίσιμος ο διαχωρισμός των πιθανών στρωμάτων του υπεδάφους.

Καταρχάς, στις μικρότερες σε μήκος τομές, δηλαδή στις LYK-1, LYK-3 και LYK-7, οι οποίες καλύπτουν τη διεύθυνση ανατολή – δύση παρατηρείται ένα λεπτό πρώτο στρώμα που φτάνει μέχρι ένα μικρό βάθος από 0,30m με 0,60m. Αυτό κρίνεται λογικό, μιας και πρόκειται για ανθρωπογενή παρέμβαση είτε λόγω της ασφάλτου είτε λόγω του δαπέδου από σκυρόδεμα που εντοπίζεται στο οικόπεδο. Στη συνέχεια, εντοπίζεται σε βάθος 2m περίπου και στις τρεις τομές μία δεύτερη ασυνέχεια, υποδηλώνοντας την ύπαρξη ενός δεύτερου πιθανού στρώματος. Στις τομές LYK-7 και LYK- 3 παρατηρείται η ύπαρξη μίας τρίτης ασυνέχειας σε βάθος 2,70m και 3,30m αντίστοιχα, οριοθετώντας έτσι το δεύτερο στρώμα του υπεδάφους. Στοιχεία για μεγαλύτερα βάθη στις εν λόγω τομές δεν βρίσκονται. Το μικρό πάχος του δεύτερου στρώματος, έτσι όπως προκύπτει από τις διαδοχικές ασυνέχειες που βρέθηκαν στις εν λόγω τομές, πιθανώς να ερμηνεύεται ως ύπαρξη σποραδικών φακών εντός του πρώτου στρώματος από υλικό διαφορετικής αγωγιμότητας και επομένως σύστασης.

Παρόμοια είναι η ερμηνεία των ραδογραμμάτων αναφορικά με τις τομές LYK-2 και LYK-6, στο ανατολικό και δυτικό αντίστοιχα σύνορο του οικοπέδου. Διακρίνεται και στις δύο περιπτώσεις η ανθρωπογενής επιφανειακή κατασκευή από σκυρόδεμα ή ασφαλτο με πάχος που ποικίλει από 0,30m έως και 0,70m. Συνεχίζοντας σε βάθος,

εντοπίζεται στα 2 περίπου μέτρα η επόμενη ασυνέχεια. Στην τομή LYK-2 δε διακρίνεται κάποια άλλη ασυνέχεια σε μεγαλύτερα βάθη σε αντίθεση με την τομή LYK-6 στη δυτική πλευρά του οικοπέδου όπου και διακρίνονται άλλες δύο. Η πρώτη που συναντάται εξ αυτών και τρίτη από την επιφάνεια του εδάφους τοποθετείται στα 3m περίπου, όπως και στις εγκάρσιες σε αυτή τομές LYK-3 και LYK-7. Ομοίως με προηγουμένως, είναι πιθανό, το στρώμα που περικλείεται από την δεύτερη και τρίτη ασυνέχεια να μεταφραστεί ως ένα λεπτό στρώμα υλικού διαφορετικής σύστασης που συναντάται στο εσωτερικό του πρώτου στρώματος που υπόκειται της ανθρωπογενούς κατασκευής. Ωστόσο, η διαφοροποίηση της συγκεκριμένης τομής με τις τέσσερις άλλες, έγκειται στο γεγονός ότι διακρίνεται μία τέταρτη ασυνέχεια στο κεντρικό τμήμα της πλευράς σε μήκος 25 περίπου μέτρων. Το βάθος της ασυνέχειας ποικίλει από 3,5m έως 4,5m, δίνοντας μία εικόνα για το που συναντάται το δεύτερο στρώμα του υπεδάφους. Ως προς τη γεωμετρία του στρώματος αυτού, παρατηρείται μία ανύψωση στο κέντρο της τομής, μιας και η κλίση του εκατέρωθεν του σημείου ανύψωσης είναι αντίθετη. Τονίζεται, επίσης, ότι δεν εντοπίστηκαν άλλες δομές, πιθανώς ανθρωπογενείς, στο υπέδαφος που ερευνήθηκε με τη μέθοδο του γεωραντάρ.

Συνοψίζοντας, με τις τομές του γεωραντάρ, εντοπίζονται:

- Ένα επιφανειακό στρώμα μικρού πάχους (0,3-0,8m) το οποίο αποτελεί ανθρωπογενή παρέμβαση για την επίστρωση του χώρου από σκυρόδεμα ή μπετό.
- Το πρώτο επιφανειακό στρώμα το οποίο εκτείνεται σε βάθος που ποικίλει από 2,80m έως 3,50m κατά μήκος της μικρής πλευράς του οικοπέδου με διεύθυνση ανατολή προς δύση.
- Εντός του του πρώτου στρώματος πιθανώς να διακρίνονται φακοί υλικού διαφορετικής σύστασης σε βάθος περίπου 2,5m έως και 3,5m
- Στην τομή LYL- 6 εντοπίζεται το πιθανό δεύτερο στρώμα περί το μέσο της ανατολικής πλευράς του οικοπέδου σε βάθος 3,5- 4,5m, με εμφανή την αλλαγή κλίσης του, μιας και υπάρχει ανύψωση του στρώματος αυτού στο κέντρο της τομής.
- Η κλίση του πρώτου στρώματος είναι σχετικά σταθερή ενώ του δευτέρου φαίνεται να αλλάζει περί το μέσο της μεγάλης πλευράς στη διεύθυνση βορά-νότου

Αξίζει σε αυτό το σημείο να επισημανθεί η ικανοποιητική συσχέτιση των αποτελεσμάτων της μεθόδου της ηλεκτρομαγνητικής ανάκλασης με τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τη μέθοδο MASW για τα μικρότερα βάθη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ

5.1 Σύνοψη των αποτελεσμάτων και ερμηνεία

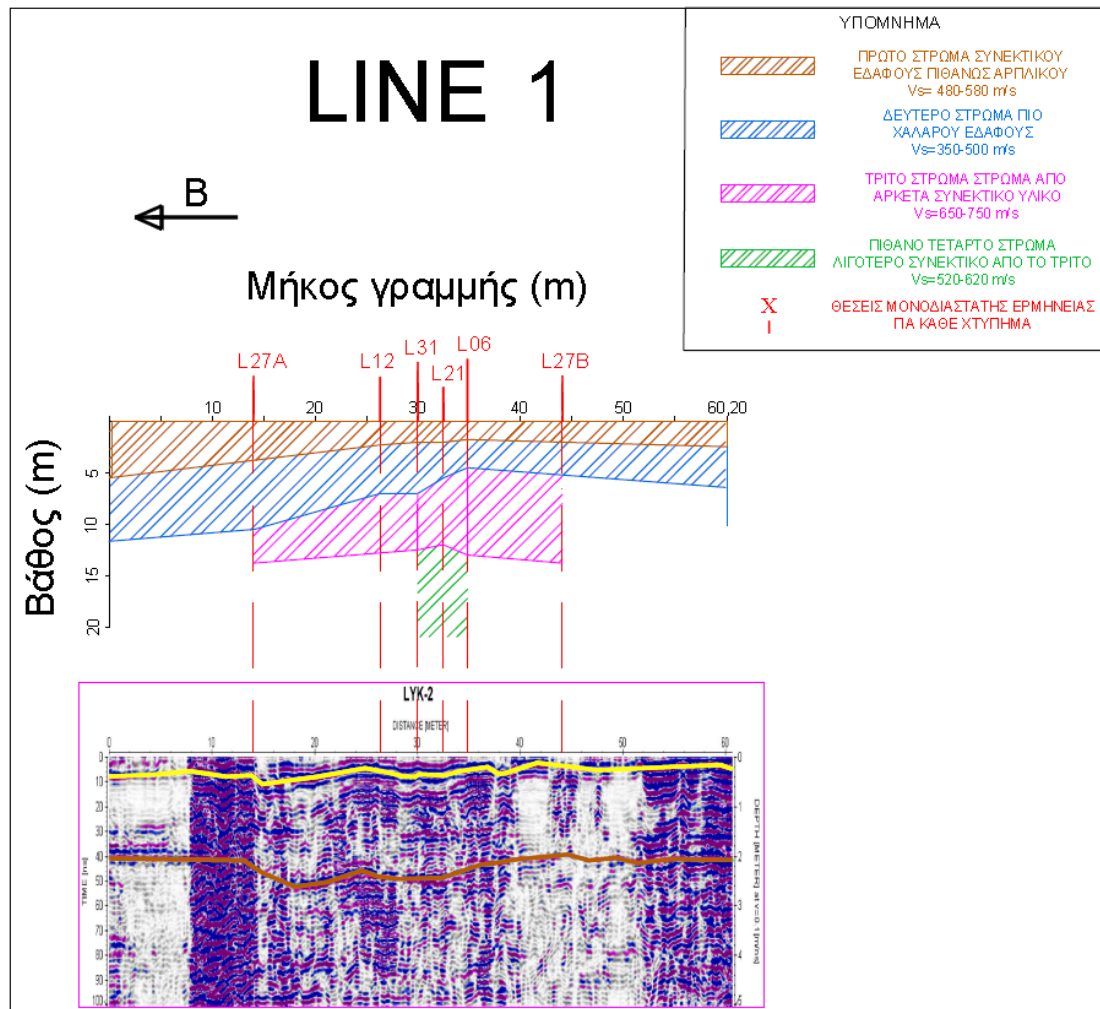
Ο επιδιωκόμενος στόχος της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας είναι ο προσδιορισμός της στρωματογραφίας σε οικόπεδο στη Λυκόβρυση Αττικής, μέσω γεωφυσικών ερευνών. Ειδικότερα, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν θα συμβάλλει στην εξακρίβωση και στην ασφαλέστερη γενίκευση των δεδομένων που έχουν ληφθεί από δύο γεωτρήσεις εντός του πεδίου έρευνας για τις ανάγκες γεωτεχνικής μελέτης.

Τον καθορισμό του επιδιωκόμενου στόχου ακολούθησε η βιβλιογραφική αναζήτηση συναφών γεωτεχνικών ερευνών με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας σε διεθνές επίπεδο. Από τις περιπτώσεις των ερευνών που εξετάστηκαν αντλήθηκαν χρήσιμες πληροφορίες, αφενός μεν για την επιλογή των μεθόδων που εφαρμόστηκαν, αφετέρου δε για την αξιοπιστία και την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας χρησιμοποιήθηκαν η σεισμική μέθοδος και η μέθοδος του γεωραντάρ.

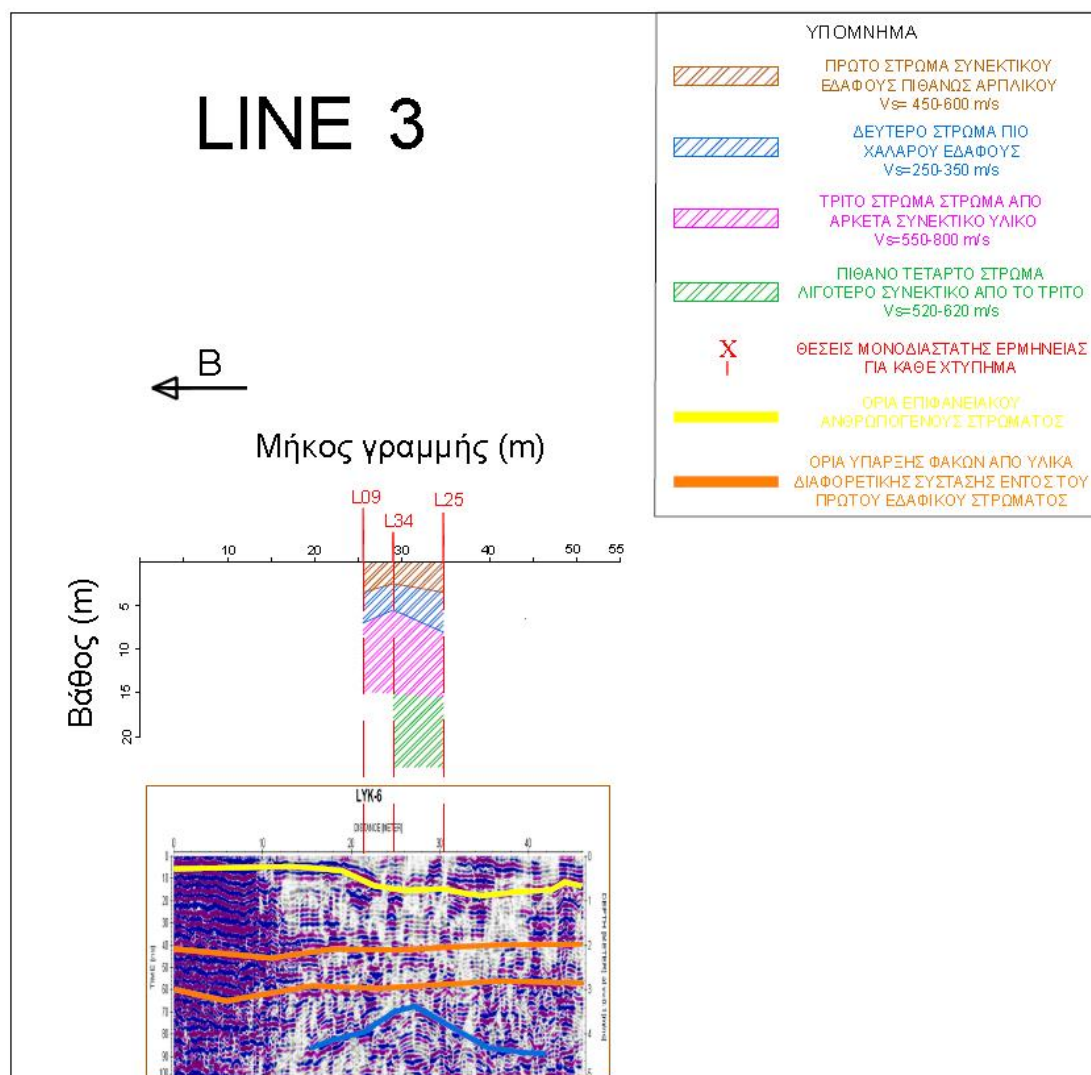
Αναφορικά με τις σεισμικές μετρήσεις τα δεδομένα επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν με τη μέθοδο των επιφανειακών κυμάτων(MASW), η οποία και προτιμήθηκε της μεθόδου της σεισμικής διάθλασης λόγω του σημαντικού θορύβου που αναμένεται σε συνθήκες αστικού περιβάλλοντος. Βέβαια, ανεξάρτητα από αυτό, στην πορεία της επεξεργασίας, λόγω μη συνεχόμενης αύξησης των ταχυτήτων V_s των στρωμάτων με την αύξηση του βάθους, δημιουργείται «τυφλή ζώνη». Το γεγονός αυτό οδηγεί σε υπερεκτίμηση του πάχους των στρωμάτων και ενισχύει την ορθότητα της επιλογής της μεθόδου MASW.

Επιπρόσθετα, με την επιλογή της μεθόδου του γεωραντάρ επιτυγχάνεται η περαιτέρω εξακρίβωση και συμπλήρωση στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων της σεισμικής μεθόδου για τα μικρότερα βάθη. Παρέχεται έτσι μεγαλύτερη ασφάλεια στον προσδιορισμό της στρωματογραφίας του υπεδάφους, ενώ παράλληλα γίνεται και έλεγχος για ανθρωπογενείς δομές.

Αφού, λοιπόν, πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις στο χώρο του οικοπέδου, πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των συλλεχθέντων δεδομένων. Δημιουργήθηκαν δύο σεισμικές 2-D τομές στη μεγάλη διεύθυνση του οικοπέδου, μέσω του συνδυασμού των επιμέρους μοναδιάστατων τομών, στις οποίες οι μεταβολές στις σεισμικές ταχύτητες V_s υποδεικνύουν την αναμενόμενη στρωματογραφία, ενώ αναλύθηκαν και μετρήσεις στη μικρή διεύθυνση του οικοπέδου η οποίες οδήγησαν σε μία 1-D τομή στο μέσο αυτής. Όσον αφορά τη μέθοδο της ηλεκτρομαγνητικής ανάκλασης αποκτήθηκαν πέντε σεισμικά προφίλ, τρία εκ των οποίων συμπίπτουν με τις σεισμικές τομές, στα οποία λόγω της διαφοράς της ηλεκτρικής αγωγιμότητας παρουσιάζεται η στρωματογραφία των πρώτων μέτρων του υπεδάφους.



Εικόνα 121. Σεισμική τομή και τομή γεωραντάρ κατά μήκος της δυτικής πλευράς του οικοπέδου



Εικόνα 122. Σεισμική τομή και τομή γεωραντάρ κατά μήκος της ανατολικής πλευράς του οικοπέδου

Από την ανάλυση των επιφανειακών σεισμικών κυμάτων των γραμμών 1 και 3 γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη τεσσάρων στρωμάτων. Το επιφανειακό στρώμα με βάση τις ταχύτητες των κυμάτων S που προκύπτουν, αποτελείται από ένα αρκετά συνεκτικό υλικό, πιθανώς αργιλικό, εκτείνεται σε βάθος περί των 2 με 5 μέτρων και ακολουθείται από ένα χαλαρότερο εδαφικό υλικό λιγότερο συνεκτικό. Ένα ιδιαίτερα συμπαγές εδαφικό υλικό, αναμένεται σε βάθος από 5 έως 10 μέτρα, το οποίο υπέρκειται σε ένα ελαφρώς λιγότερο συνεκτικό το οποίο διακρίνεται σε βάθη μεγαλύτερα των 13 μέτρων.

Οι σεισμικές τομές στις παραπάνω δύο εικόνες παρατίθενται σε αντιστοιχία με τις τομές του γεωραντάρ, ώστε να γίνει εύκολα αντιληπτή η συμφωνία των αποτελεσμάτων στα πρώτα πέντε περίπου μέτρα.

Συμπληρωματικά, στα ραδογράμματα από το GPR είναι ευδιάκριτη η ανθρωπογενής επίστρωση από ασφαλτικό υλικό ή σκυρόδεμα στα πρώτα 0,3-0,8 μέτρα του εδάφους του οικοπέδου (κίτρινη γραμμή), ενώ επίσης δεν παρατηρούνται άλλες δομές. Στις εικόνες από το γεωραντάρ το πρώτο επιφανειακό στρώμα φαίνεται να εκτείνεται σε βάθος που ποικίλει από 2,80m έως 3,50m κατά μήκος της μικρής πλευράς του οικοπέδου με διεύθυνση ανατολή προς δύση. Εντός του του πρώτου στρώματος

διακρίνονται φακοί υλικού διαφορετικής σύστασης σε βάθος περίπου 2,5m έως και 3,5m. Στην τομή της δυτικής πλευράς του οικοπέδου εντοπίζεται το πιθανό δεύτερο στρώμα περί το μέσο της ανατολικής πλευράς του οικοπέδου σε βάθος 3,5- 4,5m, με εμφανή την αλλαγή κλίσης του, μιας και υπάρχει ανύψωση του στρώματος αυτού στο κέντρο της τομής.

Οι σεισμική ανάλυση της τομής κάθετης στις δύο παραπάνω, επέφερε παρόμοια ερμηνεία της στρωματογραφίας. Παρατηρείται ότι το πρώτο στρώμα να εκτείνεται έως το βάθος των 2,5m-3m με το επακόλουθο πιο χαλαρό στρώμα να φτάνει έως τα 8 με 9 περίπου μέτρα και να ακολουθείται από ένα αρκετά συμπαγές και συνεκτικό τρίτο στρώμα. Το βάθος του πρώτου στρώματος όπως προέκυψε από τη σεισμική μέθοδο συνάδει με τις ενδείξεις της μεθόδου του γεωραντάρ.

5.2 Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας σε σχέση με τους στόχους που θέλαμε να επιτευχθούν, την εφαρμογή των μεθόδων και την διαδικασία λήψης και επεξεργασίας των δεδομένων προκύπτουν τα παρακάτω χρήσιμα συμπεράσματα.

- Επιβεβαιώνεται η αξιοπιστία των μετρήσεων με βάση το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής. Οι πλειοκαινικοί σχηματισμοί που αναμένονται στη Λυκόβρυση και αποτελούνται από αργίλους και ψαμμιτοκροκαλοπαγή με ενδιαστρώσεις άμμων, ταιριάζουν με τις ταχύτητες V_s των στρωμάτων που εντοπίστηκαν από τη γεωφυσική έρευνα.
- Η στρωματογραφία του υπεδάφους, όπως προέκυψε με τη γεωφυσική έρευνα, έρχεται σε ικανοποιητική συμφωνία με τα άμεσα και απτά δεδομένα των δύο γεωτρήσεων εντός του χώρου.
- Δίνεται η δυνατότητα ασφαλέστερης επέκτασης των δεδομένων των σημειακών γεωτρήσεων σε ολόκληρο το εύρος του οικοπέδου, παρέχοντας μεγαλύτερη βεβαιότητα στην εγκυρότητα της γεωτεχνικής μελέτης που θα διεξαχθεί.
- Ο αναμενόμενος επιφανειακός θόρυβος και η παρουσία «τυφλής ζώνης» αντιμετωπίστηκαν με την εφαρμογή της μεθόδου MASW και την απόρριψη της μεθόδου της σεισμικής διάθλασης.
- Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων που επιλέχθηκαν κρίνεται ικανοποιητικός, καθώς τα αποτελέσματα της μεθόδου του γεωραντάρ συμφωνούν και συμπληρώνουν τα αποτελέσματα της σεισμικής μεθόδου MASW, αναφορικά με τα μικρότερα βάθη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αποστολόπουλος Γ., 2015, Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής. Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Παπαζάχος, Β, 2015, Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη γεωφυσική, Εκδόσεις ΖΗΤΗ

Σπυράκος, Κ, Τουτουδάκη, Ε. Βασικές Έννοιες Σεισμολογίας, σημειώσεις Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Παπανικολάου Δ., Μπάση Ε.-Κ., Κράνης Χ. και Δανάμος Γ, Παλαιογραφική εξέλιξη του λεκανοπεδίου Αθηνών από το Μειόκαινο έως σήμερα

Σμυρνιού Ε., 2016, Γεωφυσική Έρευνα στον Πειραιά για τον Εντοπισμό Στρωματογραφίας και πιθανών Ανθρωπογενών Δομών, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Καραϊσκος Δ., 2017, Βελτιστοποίηση εκμετάλλευσης μαρμάρου με τη βοήθεια γεωφυσικών μεθόδων, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Καμηλάκης Α., Στεργίου Α., 2018, Γεωφυσική έρευνα στο λιμάνι της νήσου Κω, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

SeisImager/2D, Manual Version 3.1, 2005

T. Wunderlich, D. Wilken, +5 authors M. Heinzelmann, 2017, The river harbour of Ostia Antica - stratigraphy, extent and harbour infrastructure from combined geophysical measurements and drillings

Luca Baradello , Flavio Accaino, GPR and high resolution seismic integrated methods to understand the liquefaction phenomena in the Mirabello Village (earthquake ML 5.9, 2012)

Yudi Pan, Svenja Schaneng, Tilman Steinweg, Thomas Bohlen, Estimating S-wave velocities from 3D 9-component shallow seismic data using local Rayleigh-wave dispersion curves – A field study

Introduction to MASW, <http://www.kgs.ku.edu/software/surfseis/active.html>

Multichannel Analysis of Surface Waves, <http://www.masw.com>

Εδαφομηχανική ΑΤΕ, 2021, Γεωτεχνική έρευνα στην περιοχή της Λυκόβρυσης

