



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΠΑΣΧΑΛΙΑ ΤΣΙΑΛΟΥΚΗ

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΤΟΠΙΚΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΕ
ΣΤΑΘΜΟ ΤΟΥ ΕΘΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΩΝ ΣΤΗ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2020





ΠΑΣΧΑΛΙΑ ΤΣΙΑΛΟΥΚΗ

Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5234

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΤΟΠΙΚΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΕ ΣΤΑΘΜΟ
ΤΟΥ ΕΘΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΩΝ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωφυσικής

Επιβλέποντες

Φίκος Ηλίας, *ΕΔΙΠ Τομέα Γεωφυσικής*

Θεοδουλίδης Νίκος, *Διευθυντής Ερευνών Α' ΙΤΣΑΚ*



© Πασχαλία Τσιαλούκη, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής, 2019
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΤΟΠΙΚΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΕ ΣΤΑΘΜΟ
ΤΟΥ ΕΘΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΩΝ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ– *Διπλωματική
Εργασία*

© Paschalia Tsialouki, School of Geology, Dept. of Geophysics, 2019
All rights reserved.

GEOPHYSICAL INVESTIGATION OF THE LOCAL SITE CONDITIONS AT A STATION
OF THE NATIONAL NETWORK OF ACCELEROGRAPHS IN THESSALONIKI– *Bachelor
Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.





ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	2
2.1 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗ	3
2.2 ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	5
2.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	7
2.4 ΕΛΑΦΙΚΟΣ Ή ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΜΙΚΡΟΘΟΡΥΒΟΣ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ	12
3.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	12
3.2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ	13
3.2.1. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗ	15
3.2.2. ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	17
3.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	22
3.4 ΕΛΑΦΙΚΟΣ Ή ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΜΙΚΡΟΘΟΡΥΒΟΣ	24
3.5 ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΟΥ	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	33
4.1 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ	33
4.2 ΕΛΑΦΙΚΟΣ Ή ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΜΙΚΡΟΘΟΡΥΒΟΣ	35
4.3 ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΟΥ	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	47
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	49
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	50



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας του τμήματος Γεωλογίας, τομέα Γεωφυσικής, από τη φοιτήτρια Τσιαλούκη Πασχαλιά υπό την εποπτεία του ΕΔΙΠ του Τομέα Γεωφυσικής ΑΠΘ Φίκου Ηλία και Θεοδουλίδη Νίκου, Διευθυντή Ερευνών Α στο ΙΤΣΑΚ.

Σκοπός της εργασίας είναι να μελετηθούν οι ιδιότητες των τοπικών εδαφικών συνθηκών σε σταθμό του Εθνικού Δικτύου Επιταχυνσιογράφων στη Θεσσαλονίκη, κοντά στο Δημαρχείο Σταυρούπολης, με τη χρήση μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης και να προταθεί ένα μοντέλο που θα περιγράφει τις συνθήκες αυτές ώστε να προκύψουν συμπεράσματα για τη σεισμική κίνηση και κατ' επέκταση το σεισμικό κίνδυνο της περιοχής.

Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν στο στρατόπεδο του Παύλου Μελά, στην περιοχή της Πολίχνης στη Θεσσαλονίκη, μετρήσεις Σεισμικής Διάθλασης, Πολυκάναλης Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων, Ηλεκτρικής αντίστασης με εφαρμογή της μεθόδου Ηλεκτρικής Τομογραφίας και Εδαφικού Μικροθορύβου με τη χρήση της μεθόδου του φασματικού λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφης συνιστώσας (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR). Επιπλέον, έγινε συλλογή κι επεξεργασία δεδομένων επιταχυνσιογράφου που κατέγραψε ο σταθμός της Σταυρούπολης, STL1, και εφαρμόστηκε και γι' αυτά η μέθοδος HVSR.

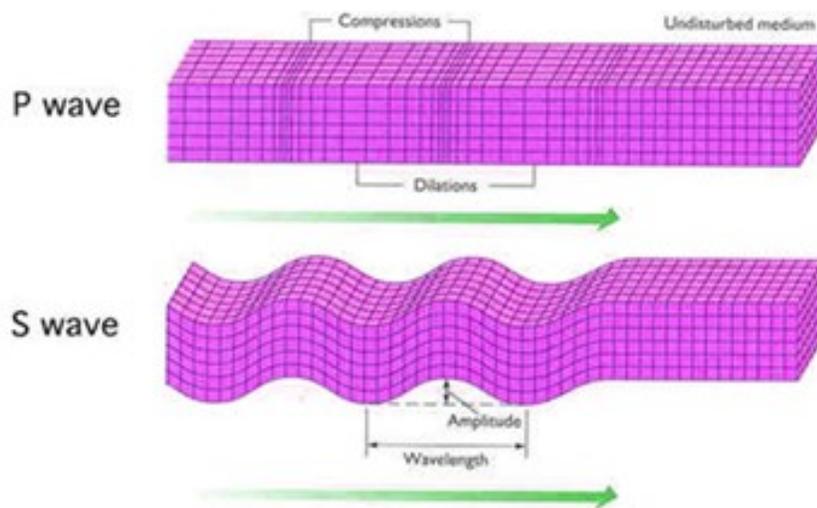
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι μέθοδοι σεισμικής διασκόπησης στοχεύουν μεταξύ άλλων και στον υπολογισμό των ταχυτήτων διάδοσης των ελαστικών κυμάτων στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης. Αυτό επιτυγχάνεται με παραγωγή τέτοιων κυμάτων τεχνητά και με μέτρηση των χρόνων διαδρομής τους στα επιφανειακά αυτά στρώματα. Ακολουθεί η κατασκευή καμπύλων χρόνων διαδρομής, δηλαδή διαγραμμάτων των χρόνων διαδρομής των κυμάτων σε σχέση με την οριζόντια απόσταση. Από αυτές μπορεί μετέπειτα να υπολογιστεί η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων σε συνάρτηση με το βάθος.

Τα ελαστικά κύματα που αναφέρθηκαν παραπάνω χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα κύματα χώρου και τα επιφανειακά κύματα.

Τα κύματα χώρου διακρίνονται σε επιμήκη και εγκάρσια. Τα Επιμήκη κύματα (ή κύματα Primary) ταλαντώνουν το μέσο διάδοσης κατά διεύθυνση παράλληλη της σεισμικής ακτίνας και με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται διαδοχικές πυκνώσεις και αραιώσεις στο μέσο διάδοσης (Σχήμα 2.1). Η ταχύτητα των κυμάτων αυτών είναι μεγαλύτερη από των υπόλοιπων ελαστικών κυμάτων και γι' αυτό είναι αυτά που φθάνουν και αναγράφονται πρώτα από τα όργανα καταγραφής.

Τα Εγκάρσια κύματα (ή κύματα Secondary) ταλαντώνουν το μέσο διάδοσης κατά διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης προκαλώντας διατμητική παραμόρφωση σε αυτό (Σχήμα 2.1). Η ταχύτητά τους είναι μικρότερη από την ταχύτητα των κυμάτων P και γι' αυτό γράφονται μετά από αυτά. Επιπλέον, τα εγκάρσια κύματα δεν διαδίδονται σε ρευστά μέσα (υγρά ή αέρια).

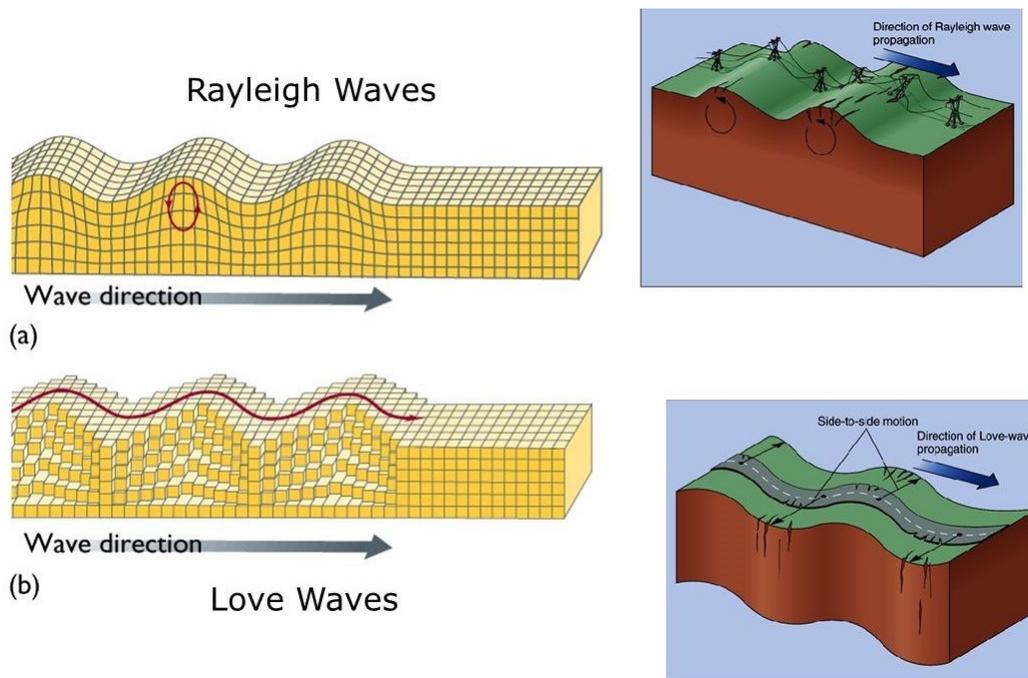


Σχήμα 2.1. Απεικόνιση κίνησης επιμήκων (επάνω) κι εγκαρσίων (κάτω) κυμάτων στο χώρο.

Τα επιφανειακά κύματα διακρίνονται στα κύματα Rayleigh και στα κύματα Love. Τα κύματα Rayleigh διαδίδονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε το μέσο διάδοσης να διαγράφει ελλείψεις με τον μεγάλο άξονα να είναι ο κατακόρυφος και τον μικρό να είναι παράλληλος προς τη διεύθυνση διάδοσης (Σχήμα 2.2). Αναγνωρίζονται στο σεισμόγραμμα στην κατακόρυφη και ακτινική συνιστώσα. Όπως προαναφέρθηκε, η ταχύτητά τους είναι μικρότερη από αυτή των κυμάτων

χώρου και για το λόγο αυτό φθάνουν και αναγράφονται μετά τα κύματα P και S. Τα κύματα Rayleigh έχουν ένα ακόμη αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό, ότι παθαίνουν σκέδαση. Κατά την σκέδαση, λόγω ανομοιογένειας υλικού στο μέσο διάδοσης, η ταχύτητα διάδοσης του κύματος μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται και η περιόδός του.

Τα κύματα Love αναγκάζουν τα σημεία του μέσου διάδοσης να διαγράψουν οριζόντιες ταλαντώσεις κάθετες προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (Σχήμα 2.2). Τα κύματα αυτά έχουν μόνο οριζόντια συνιστώσα (SH), προκαλούν μόνο εγκάρσια κίνηση αλλά πάντα σε οριζόντιο επίπεδο και επομένως καταγράφονται μόνο από οριζόντια σεισμόμετρα.



Σχήμα 2.2. Απεικόνιση κυμάτων Rayleigh (a) και Love (b) στον χώρο.

2.1 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗ

Η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης αποτελεί μία από τις βασικότερες σεισμικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης (Σχήμα 2.3). Σκοπός της είναι ο υπολογισμός των χρόνων διαδρομής των απευθείας επιμήκων κυμάτων και των επιμήκων κυμάτων διάθλασης και η χρήση των καμπύλων χρόνων διαδρομής των κυμάτων αυτών, ώστε να διαμορφωθεί ένα μοντέλο ταχυτήτων των επιμήκων κυμάτων και παχών των επιφανειακών στρωμάτων του στερεού φλοιού με τη βοήθεια θεωρητικών σχέσεων.

Τα σεισμικά κύματα που μελετώνται με τη μέθοδο αυτή παράγονται τεχνητά στην επιφάνεια της Γης και μετά τη διάδοση τους στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού, επιστρέφουν στην επιφάνεια όπου γράφονται από ειδικά σεισμόμετρα, τα γεώφωνα.



Η μέθοδος αυτή έχει μικρότερο κόστος σε σχέση με τη μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης και παρέχει ικανοποιητικές πληροφορίες σε περιοχές που παρουσιάζουν περιορισμένες μορφολογικές ανωμαλίες.

Ωστόσο, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της είναι μικρότερη συγκριτικά με την ανάκλαση. Επιπλέον, παρουσιάζεται δυσκολία στις μετρήσεις όταν η απόσταση πηγής-γεώφωνων είναι σχετικά μεγάλη. Τέλος, ανωμαλίες στη δομή του εδάφους μπορεί να καταστήσουν τη μέθοδο της διάθλασης ακατάλληλη και μη αποτελεσματική. Τέτοιες περιπτώσεις είναι:

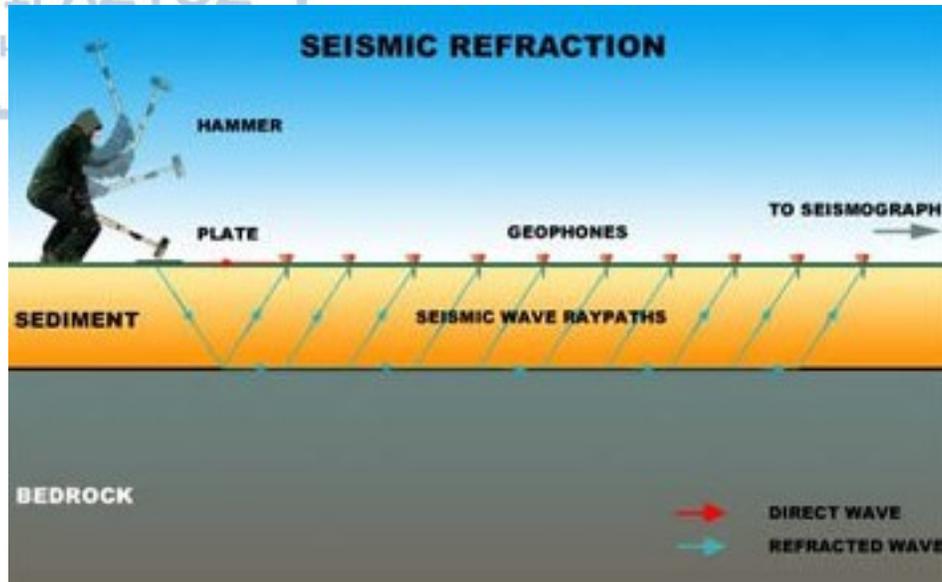
- η παρεμβολή στρώματος πολύ μικρού πάχους ή στρώματος με ταχύτητα ίση ή ελάχιστα μεγαλύτερη από το υπερκείμενο στρώμα και
- η παρεμβολή στρώματος με ταχύτητα μικρότερη από την ταχύτητα του υπερκείμενου στρώματος.

Οι συνηθέστερες δομές που συναντάμε κατά τη δημιουργία σεισμικών προφίλ διάθλασης είναι:

- α. Δομή ενός ή δύο οριζόντιων στρωμάτων
- β. Δομή πολλών οριζόντιων στρωμάτων
- γ. Στρώμα με κεκλιμένη την κάτω επιφάνεια
- δ. Δομή πολλών στρωμάτων με κεκλιμένες επιφάνειες
- ε. Στρώμα με μη επίπεδη την κάτω επιφάνεια

Στις εργασίες διάθλασης οι τρόποι διάταξης των γεωφώνων είναι οι εξής:

1. Η διάταξη τομής, όπου τα γεώφωνα και οι πηγές βρίσκονται στην ίδια οριζόντια γραμμή. Υπάρχουν τρία είδη τέτοιας διάταξης που χρησιμοποιούνται περισσότερο. Το πρώτο είναι η αντιστρεπτή διάταξη στην οποία υπάρχουν δύο πηγές και στο ενδιάμεσο τοποθετούνται τα γεώφωνα που γράφουν τα ελαστικά κύματα τα οποία παράγονται στα άκρα της τομής. Το δεύτερο είναι η διπλή ή διχασμένη διάταξη. Σε αυτήν τοποθετούνται γεώφωνα σε δύο σειρές και μία πηγή στο μέσο μεταξύ αυτών. Η τρίτη περίπτωση είναι αυτή της απλής συνεχούς διάταξης, στην οποία πραγματοποιούνται διαδοχικά χτυπήματα τα σημεία των οποίων μετακινούνται προς ορισμένη κατεύθυνση και τα γεώφωνα βρίσκονται στην ίδια γραμμή και προς την κατεύθυνση που μετακινούνται οι πηγές.
2. Η διάταξη βεντάλιας, η χρήση της οποίας είναι σχεδόν μηδαμινή πλέον αλλά ήταν σημαντική η συνεισφορά της στη σεισμική διάθλαση πετρελαίου.



Σχήμα 2.3. Σεισμική διάθλαση.

Συχνά παρατηρούνται σφάλματα στους χρόνους διαδρομής των ελαστικών κυμάτων. Τα αίτια αυτών μπορεί να είναι η υψομετρική διαφορά που υπάρχει μεταξύ των θέσεων όπου πραγματοποιούνται τα χτυπήματα και των θέσεων όπου είναι τοποθετημένοι οι σταθμοί αναγραφής ή η ύπαρξη λεπτού επιφανειακού στρώματος αποσαθρωμένων ιζημάτων, στο οποίο η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων είναι πολύ μικρή.

Η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης εφαρμόζεται για:

- ⇒ Την εύρεση παραμέτρων που συνδέονται με τη διακύμανση των ταχυτήτων διάδοσης των κυμάτων, με την πυκνότητα των στρωμάτων, τη σκληρότητα των πετρωμάτων και το μέτρο κυβικής και διατμητικής παραμόρφωσης,
- ⇒ Την εύρεση του βάθους του υποβάθρου και
- ⇒ Τον εντοπισμό υδροφόρου ορίζοντα.

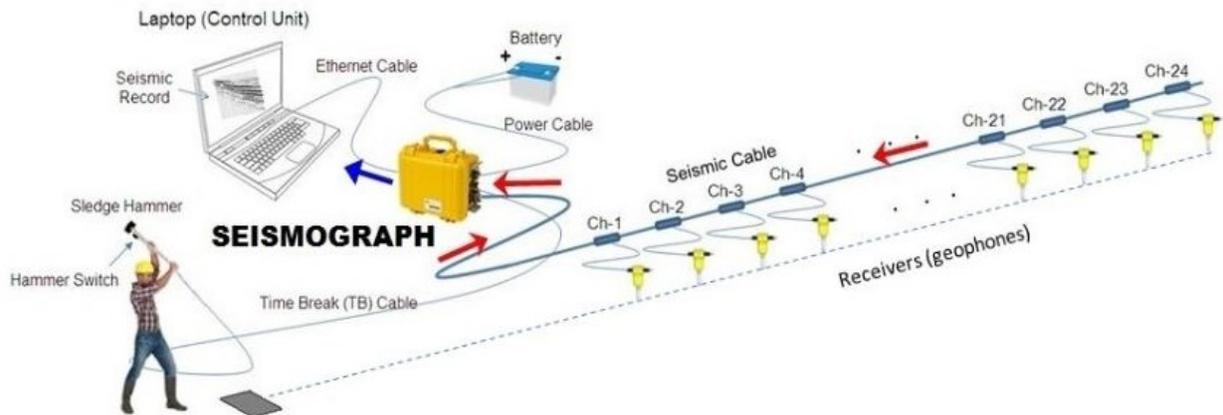
2.2 ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Η Πολυκάναλη Ανάλυση Επιφανειακών Κυμάτων (Multichannel Analysis of Surface Waves ή MASW) ανήκει στις σεισμικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και πρωτοεισάχθηκε από τους Park et al.

Η MASW διακρίνεται σε παθητική κι ενεργητική. Στην παθητική MASW τα κύματα που μελετώνται είναι επιφανειακά κύματα που προέρχονται από περιβαλλοντικό θόρυβο, από φυσικές πηγές ή ανθρώπινες δραστηριότητες (π.χ. κίνηση). Στην ενεργητική MASW μελετώνται τα επιφανειακά κύματα που παράγονται τεχνητά από διάφορων ειδών σεισμικές πηγές.

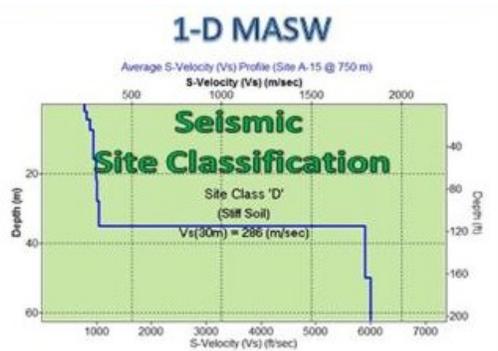
Η διαδικασία που ακολουθείται αποτελείται από τα εξής βήματα:

Αρχικά, συλλέγονται πολυκάναλες σεισμικές καταγραφές από διάφορες θέσεις. Πιο συγκεκριμένα, από κάποιο είδος πηγής (π.χ. βαριοπούλα) παράγονται επιφανειακά κύματα και αναλύεται η διάδοση των ταχυτήτων τους στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4. Πολυκάναλη Ανάλυση Επιφανειακών Κυμάτων (Multichannel Analysis of Surface Waves ή MASW).

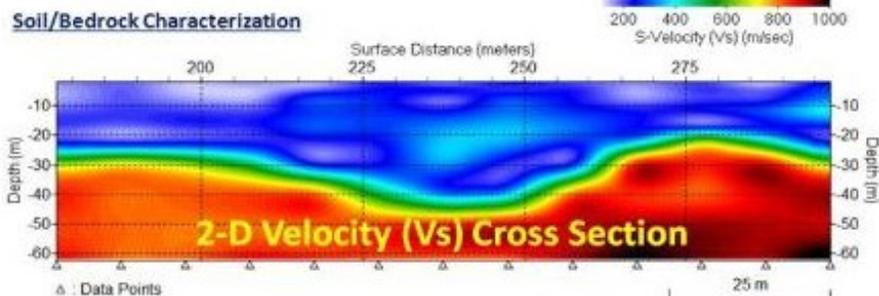
Στη συνέχεια, με επεξεργασία και αντιστροφή των καμπύλων σκέδασης των επιφανειακών κυμάτων από κάθε καταγραφή προκύπτει ένα μονοδιάστατο προφίλ των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) που ευθύνονται για το μοντέλο διάδοσης της ταχύτητας των επιφανειακών κυμάτων που αναλύθηκε (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5. 1-D προφίλ των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων.

Έπειτα, από το σύνολο των 1-D προφίλ των V_s κατασκευάζεται μια 2-D διατομή των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων (Σχήμα 2.6) από την οποία μπορούν να διεξαχθούν διάφορα συμπεράσματα, όπως για παράδειγμα πληροφορίες για τη δυσκαμψία του εδάφους.

2-D MASW



Σχήμα 2.6. 2-D προφίλ των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων.

Τα επιφανειακά σεισμικά κύματα ανήκουν στα ισχυρότερα σεισμικά κύματα καθώς μπορούν να ταξιδεύουν σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις από τα κύματα χώρου χωρίς παρεμβολές θορύβου. Έτσι προκύπτει μία ευνοϊκότερη αναλογία σήματος προς θόρυβο (S/N). Αυτή η υψηλότερη αναλογία S/N που επιτυγχάνεται εύκολα, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και καθιστά τη μέθοδο ιδιαίτερα χρήσιμη.

Οι κυριότερες εφαρμογές της είναι οι εξής:

- Η χαρτογράφηση του υποβάθρου,
- Ο χαρακτηρισμός σεισμικής θέσης,
- Ο εντοπισμός ανωμαλιών,
- Ο υπολογισμός της πυκνότητας και
- Η εκτίμηση βαθμού έγχυσης (Grouting Evaluation)

2.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για τον καθορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των σχηματισμών των επιφανειακών στρωμάτων του στερεού φλοιού της Γης.

Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- ❖ Σε εκείνες όπου μετρούνται ηλεκτρικά μεγέθη φυσικών ηλεκτρικών ρευμάτων ή πεδίων (π.χ. μέθοδος του φυσικού δυναμικού, μέθοδος των τελλουρικών ρευμάτων)
- ❖ Σε εκείνες όπου τα ηλεκτρικά μεγέθη που μετρούνται, εξαρτώνται από τεχνητά ηλεκτρικά ρεύματα ή πεδία (π.χ. μέθοδος της ειδικής αντίστασης, μέθοδος των ισοδυναμικών γραμμών, μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας).

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι εφαρμόζονται στην Τεχνική Γεωλογία, στην Υδρογεωλογία, σε μελέτες για αναζήτηση μεταλλευμάτων και γεωθερμικών πεδίων, στην Αρχαιομετρία, κλπ.

Η ποσότητα που μετριέται είναι η ηλεκτρική τάση V , η οποία δίνεται από το Νόμο του Ohm:

I: η ένταση του ρεύματος που εισάγεται

R: η ηλεκτρική αντίσταση

Η ηλεκτρική αντίσταση, R, περιγράφει την ιδιότητα του υλικού αλλά όχι και τις διαστάσεις του. Για το λόγο αυτό επιδιώκεται ο καθορισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ρ. Αυτή δίνεται από τον τύπο:

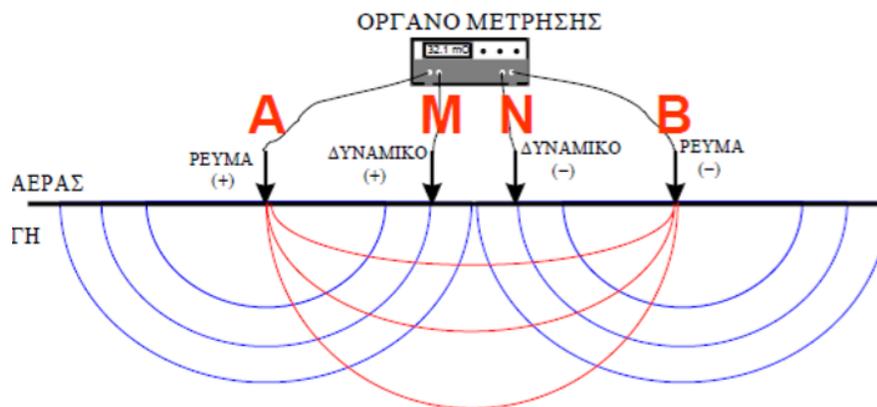
$$V = \frac{I \cdot \rho}{K}$$

όπου K: ο γεωμετρικός παράγοντας που εξαρτάται από τη γεωμετρία της διάταξης.

Μονάδα μέτρησης της ρ στο SI είναι το Ωm . Το αντίστροφό της, δηλαδή η ποσότητα $\sigma=1/\rho$, ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός σχηματισμού εξαρτάται από το πορώδες του, τη λιθολογία, τη γεωλογική του ηλικία, τυχόν ρωγμές που υπάρχουν στα κρυσταλλικά πετρώματα και τη θερμοκρασία του.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου της Ηλεκτρικής Τομογραφίας εισάγεται στο έδαφος συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα μέσω δύο ηλεκτροδίων ρεύματος A και B και μετριέται σε διάφορα σημεία η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο ηλεκτροδίων δυναμικού M και N. Με τις μετρήσεις αυτές του δυναμικού, μπορούμε να καθορίσουμε τις ιδιότητες του ηλεκτρικού πεδίου που παράγεται με τεχνητό τρόπο κι επομένως τη δομή του υπεδάφους, απ' την οποία επηρεάζεται το πεδίο.



Σχήμα 2.7. Βασική διάταξη ηλεκτροδίων ρεύματος-δυναμικού στην ηλεκτρική διασκόπηση.

Επειδή είναι δύσκολο να υπολογιστεί άμεσα η ειδική ηλεκτρική αντίσταση στο υπέδαφος, υπολογίζεται η φαινόμενη ειδική αντίσταση, ρ_a (Rho). Πρόκειται για μία φυσικώς ανύπαρκτη ποσότητα, μέσω της οποίας μπορεί να βρεθεί η τιμή της πραγματικής ειδικής αντίστασης των



διάφορων σχηματισμών. Ωστόσο, ο προσδιορισμός της ρ_a εξαρτάται από τη διάταξη των ηλεκτροδίων. Οι πιο συνηθισμένοι τρόποι διάταξης είναι οι εξής:

- Διάταξη Wenner

Σε αυτή τη διάταξη τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται συμμετρικά σε ίση απόσταση πάνω σε ορισμένη γραμμή, δηλαδή $AM=MN=MB=a$. Όταν πραγματοποιείται γεωφυσική διασκόπηση στον κατακόρυφο άξονα (ηλεκτρική βυθοσκόπηση) ορίζεται ένα κέντρο με βάση το οποίο διατάσσονται τα ηλεκτρόδια και αυξάνεται η « a » κατά ορισμένη κάθε φορά απόσταση. Σε διασκοπήσεις στον οριζόντιο άξονα (ηλεκτρική χαρτογράφηση), η απόσταση « a » δε μεταβάλλεται, τα ηλεκτρόδια μετακινούνται κατά μήκος οριζόντιας γραμμής και η τιμή της ρ_a υπολογίζεται στο κέντρο κάθε διάταξης.

- Διάταξη Schlumberger

Κατά τη διάταξη αυτή, η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος ($AB=2L$) είναι πολύ μεγαλύτερη από την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού ($MN=2l$ και $L \gg l$). Στην ηλεκτρική βυθοσκόπηση, μετακινούνται μόνο τα ηλεκτρόδια ρεύματος. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού παραμένουν σταθερά και σταδιακά αυξάνεται η απόσταση των A και B . Στην ηλεκτρική χαρτογράφηση, πραγματοποιείται μετακίνηση των τεσσάρων ηλεκτροδίων κατά μήκος τομής, όπως στην διάταξη Wenner.

- Διάταξη διπόλου-διπόλου

Στη διάταξη αυτή, η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι σταθερή ($AB=MN=a$). Το μόνο που αλλάζει είναι η απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού ($BM=na$). Κατά τη λήψη μετρήσεων, αυξάνεται σταδιακά η τιμή του n .

- Διάταξη πόλου-διπόλου

Η διάταξη αυτή είναι γνωστή και ως «διάταξη τριών σημείων» καθώς το ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετείται σε μεγάλη απόσταση από τα υπόλοιπα τρία ηλεκτρόδια.

- Διάταξη πόλου-πόλου

Σε αυτή τη διάταξη, το ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού και το ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος τοποθετούνται σε μεγάλη απόσταση από τα υπόλοιπα δύο ηλεκτρόδια.

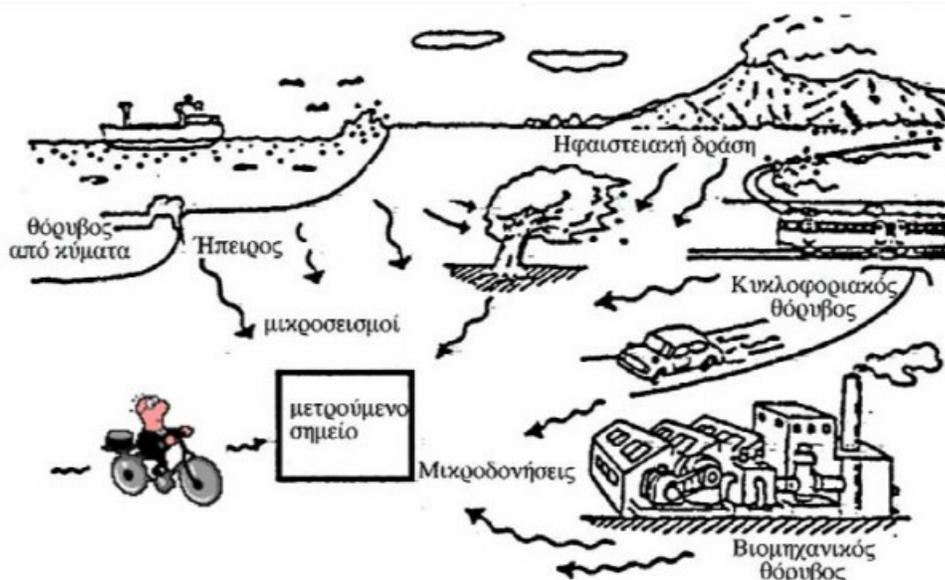
Η πρώτη ερμηνεία των δεδομένων πραγματοποιείται με κατασκευή ψευδοτομής. Η ψευδοτομή είναι μία απεικόνιση του υπεδάφους με τη χρήση των φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων, ρ_a . Ωστόσο, η Σχήμα που δίνει για την πραγματική ειδική αντίσταση, ρ , είναι αλλοιωμένη. Στην περίπτωση των παραδοσιακών δισδιάστατων μετρήσεων, εκτός από τη δυσκολία στην ερμηνεία της ψευδοτομής, η λήψη των δεδομένων είναι αργή κι επίπονη.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας συνέβαλε στην αυτοματοποιημένη λήψη μετρήσεων με καινούργια όργανα και στην εξέλιξη των αυτοματοποιημένων τεχνικών ερμηνείας. Ο συνδυασμός των δύο αυτών καινοτομιών αποτελεί την ηλεκτρική τομογραφία.

Η ηλεκτρική τομογραφία παρέχει μεγάλη ακρίβεια και ικανοποιητικά αποτελέσματα. Λόγω του μεγάλου πλήθους δεδομένων όμως είναι απαραίτητη η χρήση συστημάτων αυτοματοποιημένων πολυπλεκτών με πολυκάναλα καλώδια.

2.4 ΕΔΑΦΙΚΟΣ Ή ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΜΙΚΡΟΘΟΡΥΒΟΣ

Σαν εδαφικός θόρυβος ή μικροθόρυβος χαρακτηρίζονται οι εδαφικές δονήσεις που οφείλονται σε φυσικούς παράγοντες όπως τα θαλάσσια κύματα, οι παλίρροιες, ο άνεμος ή σε ανθρωπογενείς όπως οι αυτοκινητόδρομοι, οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις, κ.ά.



Σχήμα 2.8. Πηγές εδαφικού θορύβου

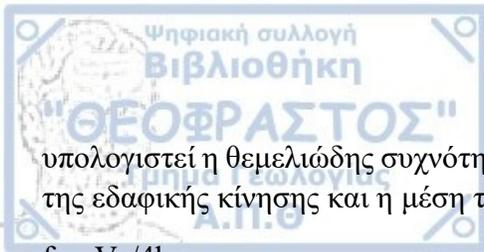
Ειδικότερα, ανάλογα με τη συχνότητα, ο εδαφικός θόρυβος οφείλεται σε:

- Θαλάσσια κύματα και μετεωρολογικές συνθήκες ($f < 0,5$ Hz)
- Άνεμο και τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες ($0,5 > f > 1$ Hz)
- Ανθρωπογενείς παράγοντες ($f > 1$ Hz)

Ο εδαφικός θόρυβος είναι δηλαδή ένας συνδυασμός κυμάτων και πιο συγκεκριμένα κυρίως επιφανειακών κυμάτων αλλά και κυμάτων χώρου με πολύ μικρά πλάτη (10^{-4} έως 10^{-2} mm). Εξαρτάται από την πηγή γένεσής του, τη διαδρομή διάδοσής του και τις εδαφικές συνθήκες.

Οι μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης που χρησιμοποιούν τον εδαφικό θόρυβο προτιμώνται από άλλες μεθόδους γιατί είναι πιο οικονομικές, γρήγορες και μπορούν να εφαρμοστούν χωρίς δυσκολία σε αστικές περιοχές.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε ήταν η μέθοδος του φασματικού λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφης συνιστώσας (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR). Μέσω αυτής μπορεί να



υπολογιστεί η θεμελιώδης συχνότητα του εδάφους (f_0), ένα κατώτερο όριο του πλάτους ενίσχυσης της εδαφικής κίνησης και η μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων για τα πρώτα 30m (V_{s30}).

$$f_0 = V_s/4h$$

όπου f_0 : η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα

V_s : η μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων στο εξεταζόμενο γεωλογικό στρώμα

h : το βάθος του υποβάθρου

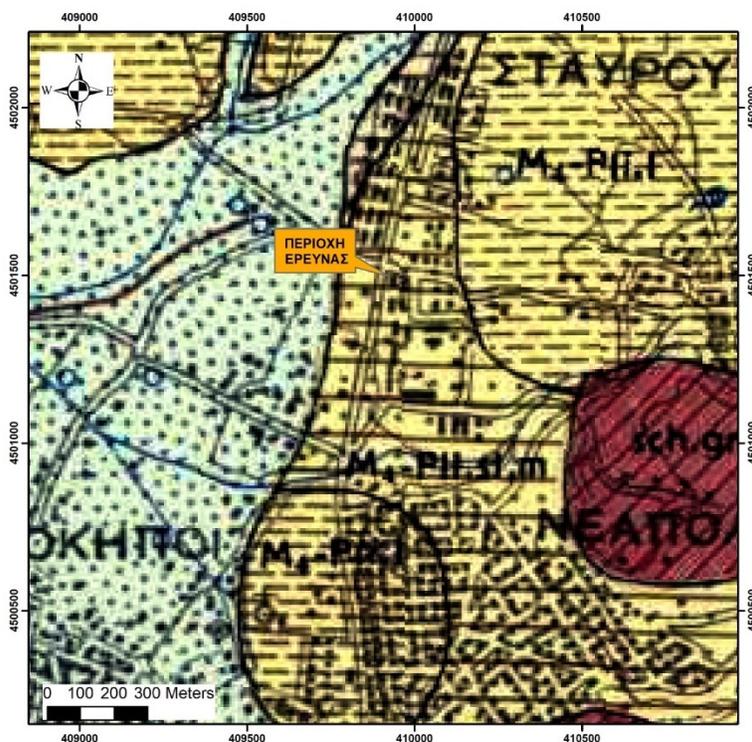
Η μέθοδος βασίζεται στην ύπαρξη επιφανειακού στρώματος πάνω από βραχώδη σχηματισμό ή ημιχώρο με διαφορετικές ιδιότητες (φυσικές και μηχανικές). Τότε η καμπύλη HVSR δίνει συνήθως ένα μέγιστο (peak) που αντιστοιχεί στην θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα των εδαφικών σχηματισμών στο σημείο μέτρησης (Nogoshi και Igarashi, 1971, Nakamura, 1989, Bard, 1999). Στην περίπτωση που γίνουν μετρήσεις πάνω σε βράχο ή οι ιδιότητες των σχηματισμών (υπερκειμένων και υποκειμένων) δεν διαφέρουν, η καμπύλη της μεθόδου HVSR δεν δίνει μέγιστα και είναι σχεδόν επίπεδη σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων.

Η περιοχή μελέτης είναι κοντά στο Στρατόπεδο Παύλου Μελά (Σχήμα 3.1) και βρίσκεται μεταξύ των περιοχών Νεάπολης, Αμπελοκήπων και Σταυρούπολης στη Θεσσαλονίκη επί της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς και της σειράς ερυθρών αργίλων του Νεογενούς (Ανώτερο Μειόκαινο-Κατώτερο Πλειόκαινο).

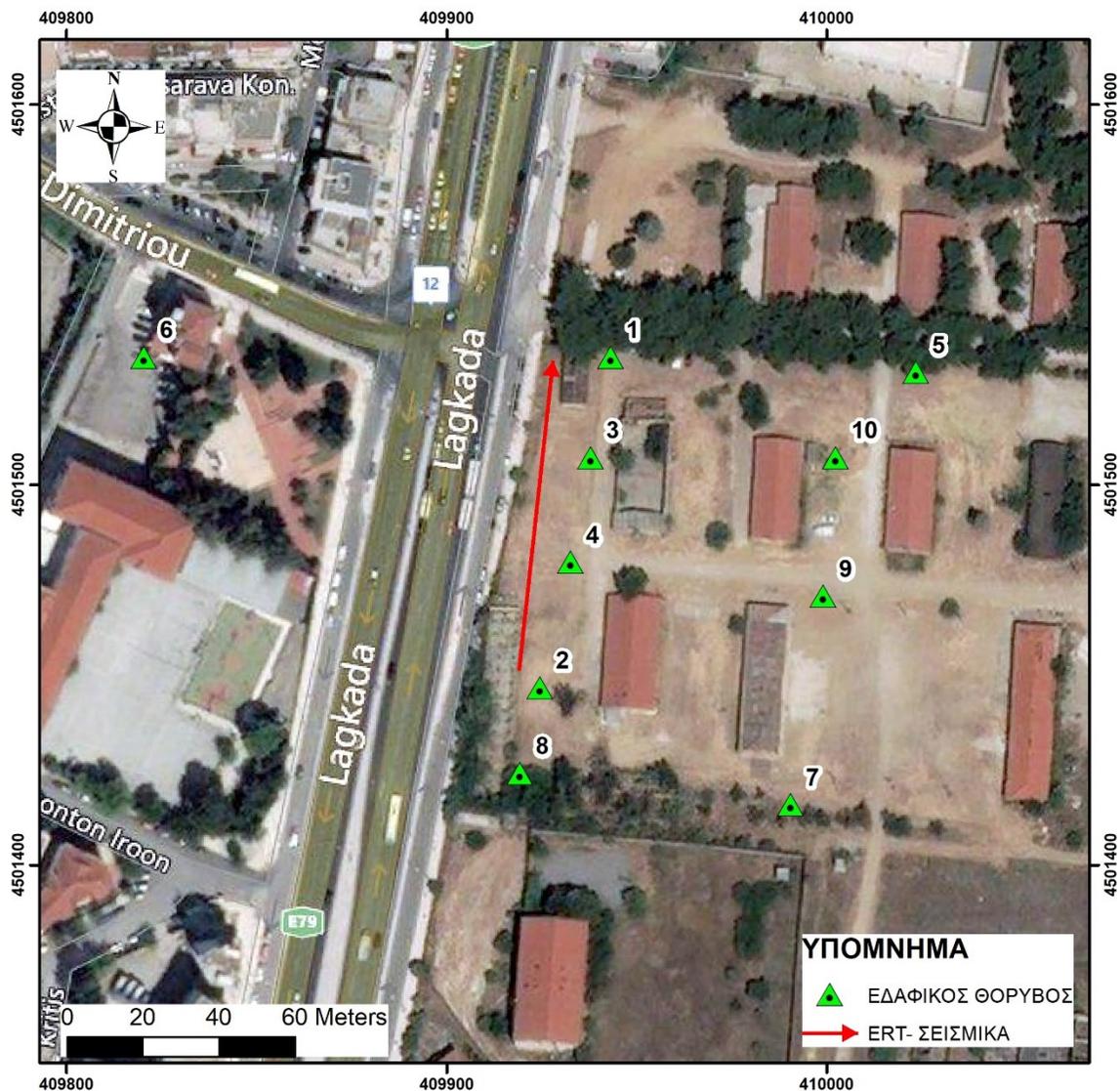
Η περιοχή οριοθετείται Δυτικά από νεότερες αδιαίρετες Ολοκαινικές αποθέσεις. Ωστόσο, στην ευρύτερη περιοχή μπορεί να παρατηρηθεί και ο Τριαδικοϊουρασικός ασβεστιτικός φλύσχος καθώς και ο λευκοκρατικός γνεύσιος του Μεσοζωικού που πιθανότατα αποτελεί και το υπόβαθρο.

Η παρουσία αμμούχων αργίλων βόρεια της περιοχής έρευνας μπορεί να υποδηλώνει την ύπαρξη υδρογραφικού δικτύου.

Έτσι, παρατηρώντας μόνο τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής μπορούμε να υποθέσουμε ότι δομείται από Τεταρτογενή και Νεογενή ιζήματα που πιθανότατα δεν έχουν υποστεί διαγένεση και υπέρκεινται των κρυσταλλικών μεταμορφωμένων και πιο συμπαγών πετρωμάτων του υποβάθρου.



Σχήμα 3.1. Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης. Με στοιχεία βασισμένα στον χάρτη του ΙΓΜΕ φύλλο Θεσσαλονίκης κλίμακας 1:50.000, επεξεργασία στο ArcGIS.



Σχήμα 3.2. Θέσεις των μετρήσεων στο στρατόπεδο Παύλου Μελά (Πολίχνη, Θεσσαλονίκη).

3.2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Για την πραγματοποίηση σεισμικής έρευνας με την εφαρμογή των μεθόδων Σεισμικής Διάθλασης και Πολυκάναλης Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων (MASW) χρησιμοποιήθηκε το πολυκάναλο όργανο της GEOMETRICS (Σχήμα 3.3) και 24 γεώφωνα συχνότητας 10Hz τα οποία τοποθετήθηκαν σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους (4 μέτρα). Το συνολικό ανάπτυγμα των γεωφώνων είχε μήκος 92 μέτρα.



Σχήμα 3.3. Όργανο της GEOMETRICS

Σαν μηχανισμός παραγωγής ελαστικών κυμάτων χρησιμοποιήθηκε ένα σφυρί (βαριοπούλα) με το οποίο πραγματοποιήθηκαν πολλαπλά χτυπήματα σε 27 shot points κατά μήκος της τομής.



Σχήμα 3.4. Τοποθέτηση γεωφώνων στην περιοχή μελέτης.

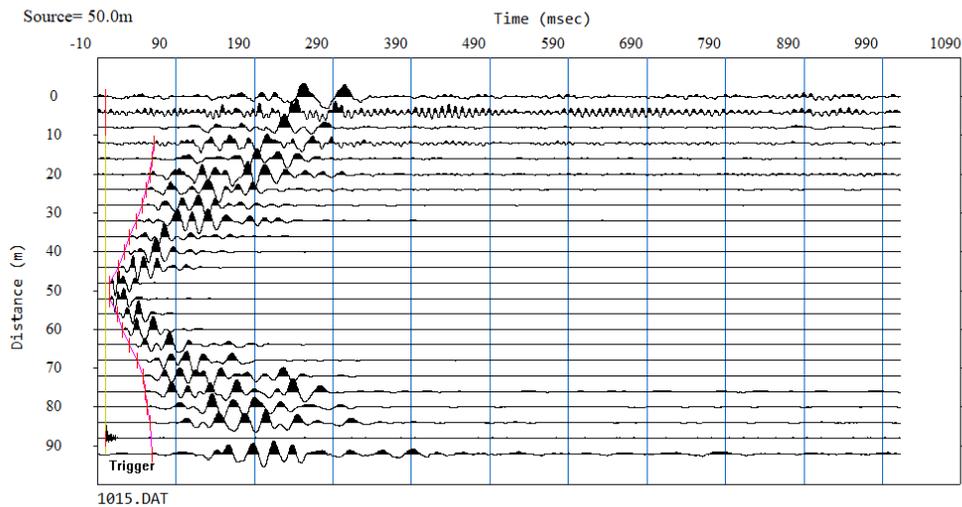


Σχήμα 3.5. Παραγωγή ελαστικών κυμάτων με τη χρήση σφυριού στην περιοχή μελέτης.

3.2.1. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗ

Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με το λογισμικό SeisImager 2D, το οποίο αποτελείται από τα επιμέρους προγράμματα Pickwin, Plotrefa, Surface Wave Analysis Wizard, WaveEq και GeoPlot.

Για την επεξεργασία των δεδομένων σεισμικής διάθλασης χρησιμοποιήσαμε τα προγράμματα Pickwin και Plotrefa. Αρχικά, σημειώσαμε για κάθε ένα από τα 27 shot points τις αφίξεις των πρώτων κυμάτων όπως φαίνεται στην Σχήμα 3.6.

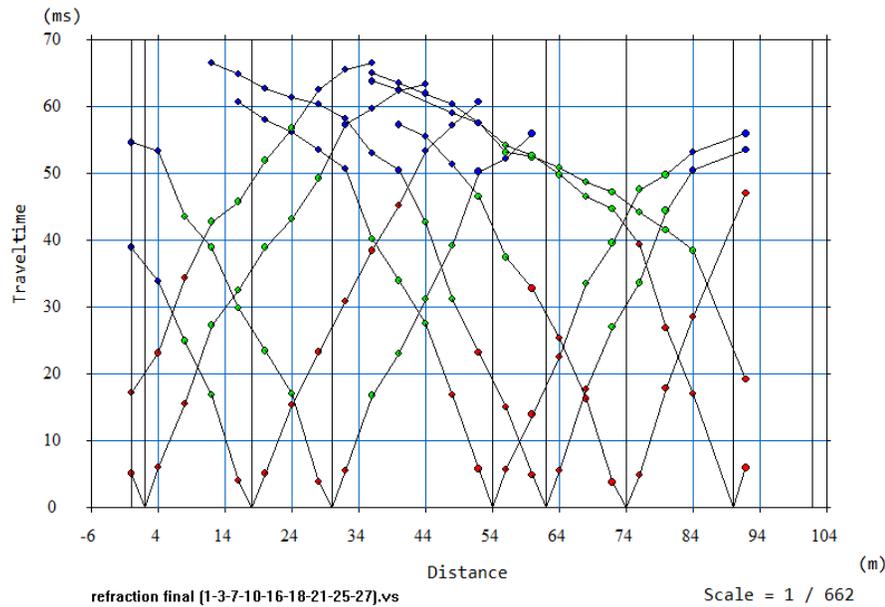


Σχήμα 3.6. Κυματομορφή των P κυμάτων με σημειωμένες τις πρώτες αφίξεις (κόκκινη γραμμή)

Ο εντοπισμός των πρώτων αφίξεων μπορεί να γίνει απευθείας από το πρόγραμμα ή χειροκίνητα επιλέγοντας με το ποντίκι το επιθυμητό σημείο. Στη δεύτερη περίπτωση, το πρόγραμμα διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τη διαδικασία αφού διαθέτει φίλτρα και εντολές όπως:

- ⇒ μεταβολή του πλάτους και του μήκους των κυματομορφών
- ⇒ μεταβολή του μεγέθους των αξόνων
- ⇒ εμφάνιση των θετικών ή των αρνητικών πλατών
- ⇒ ομοιόμορφη εξίσωση των μέγιστων πλατών

Στη συνέχεια, με το πρόγραμμα Plotrefa χαρτογραφήσαμε τις καμπύλες χρόνων διαδρομής σε ένα διάγραμμα (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7. Καμπύλες χρόνων διαδρομής των P κυμάτων.

Από το ίδιο διάγραμμα έγινε και ο εντοπισμός των στρωμάτων. Συγκεκριμένα, εκεί που φαίνεται να αλλάζει η κλίση των γραμμών έχουμε και αλλαγή στρώματος. Τα διαφορετικά στρώματα διακρίνονται και από το διαφορετικό χρώμα σημείων που υπάρχουν στο σχήμα.

Το τελευταίο βήμα της επεξεργασίας αποτελεί η παραγωγή του μοντέλου ταχυτήτων και παχών των διάφορων στρωμάτων της τομής μας. (Σχήμα 4.1)

3.2.2. ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Για την επεξεργασία των δεδομένων της MASW χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Surface Wave Analysis Wizard που στην πραγματικότητα οδηγεί στα Pickwin, WaveEq και Geoplot. Αρχικά, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, έγινε ανάλυση της διάδοσης των ταχυτήτων των επιφανειακών κυμάτων στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης.

Ανοίγοντας το Surface Wave Analysis Wizard επιλέγουμε το Active Source 2D MASW καθώς η μέθοδος που εφαρμόσαμε ήταν ενεργητική κι όχι παθητική.

Αφού φορτώσαμε τα 27 αρχεία (από τα 27 shot points) βάλουμε τις σωστές παραμέτρους για κάθε θέση (Σχήματα 3.8, 3.9, 3.10). Συγκεκριμένα, η στήλη Receiver περιέχει την απόσταση των γεωφώνων και η στήλη Source τη θέση όπου έγινε το κάθε ένα από τα 27 shots.

File list

Index	Edit	ID	Source(m)	1st receiver(m)	Receiver int.(m)	# of aux.
0	<input type="checkbox"/>	1001	-6	0	4	0
1	<input type="checkbox"/>	1002	-1	0	4	0
2	<input type="checkbox"/>	1003	2	0	4	0
3	<input type="checkbox"/>	1004	6	0	4	0
4	<input type="checkbox"/>	1005	10	0	4	0
5	<input type="checkbox"/>	1006	14	0	4	0
6	<input type="checkbox"/>	1007	18	0	4	0
7	<input type="checkbox"/>	1008	22	0	4	0
8	<input type="checkbox"/>	1009	26	0	4	0
9	<input type="checkbox"/>	1010	30	0	4	0

Apply source coordinates from file header
 Apply receiver coordinates from file header

Number of files: 27

Σχήμα 3.8. Χαρακτηριστικά των shotpoints 1-10.

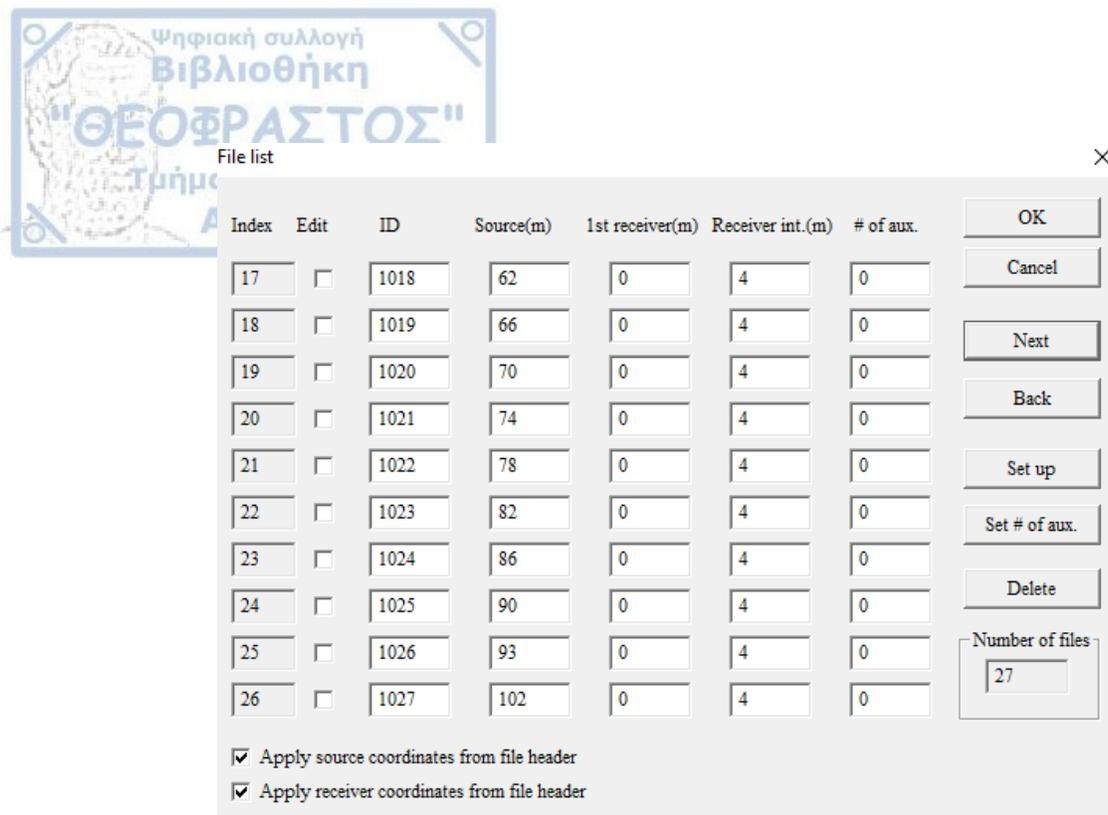
File list

Index	Edit	ID	Source(m)	1st receiver(m)	Receiver int.(m)	# of aux.
10	<input type="checkbox"/>	1011	34	0	4	0
11	<input type="checkbox"/>	1012	38	0	4	0
12	<input type="checkbox"/>	1013	42	0	4	0
13	<input type="checkbox"/>	1014	46	0	4	0
14	<input type="checkbox"/>	1015	50	0	4	0
15	<input type="checkbox"/>	1016	54	0	4	0
16	<input type="checkbox"/>	1017	58	0	4	0
17	<input type="checkbox"/>	1018	62	0	4	0
18	<input type="checkbox"/>	1019	66	0	4	0
19	<input type="checkbox"/>	1020	70	0	4	0

Apply source coordinates from file header
 Apply receiver coordinates from file header

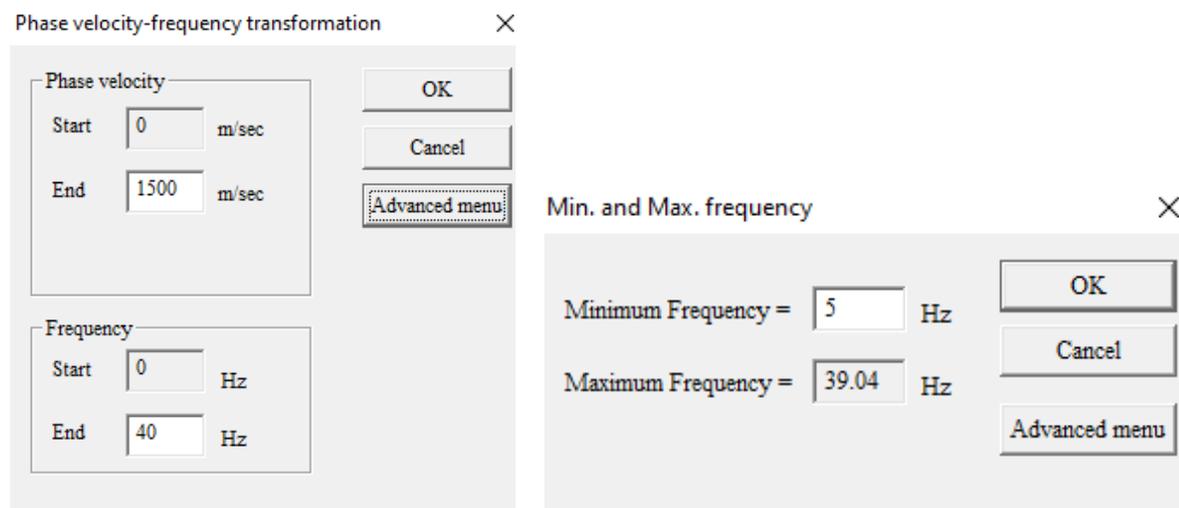
Number of files: 27

Σχήμα 3.9. Χαρακτηριστικά των shotpoints 11-20.



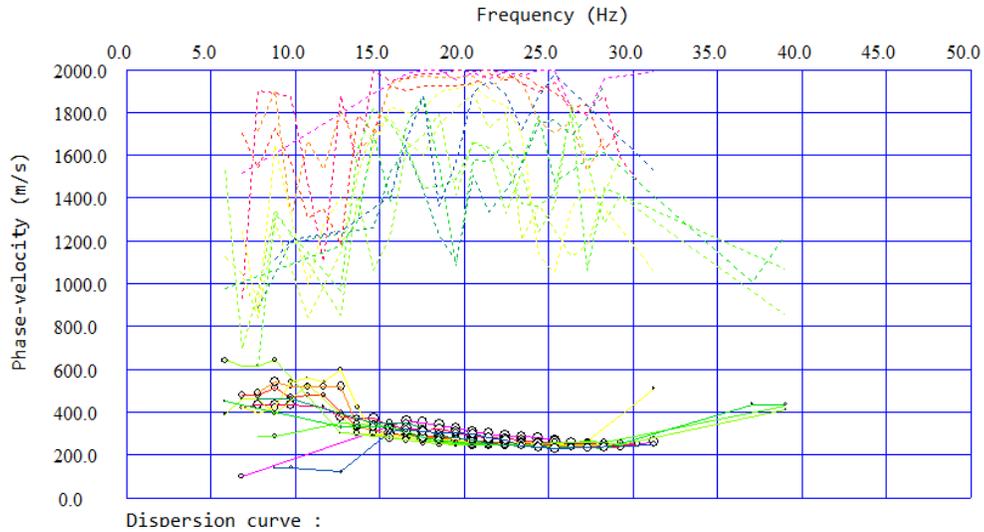
Σχήμα 3.10. Χαρακτηριστικά των shotpoints 21-27.

Οι τιμές που πήραμε για Phase Velocity και Frequency φαίνονται στην Σχήμα 3.11.



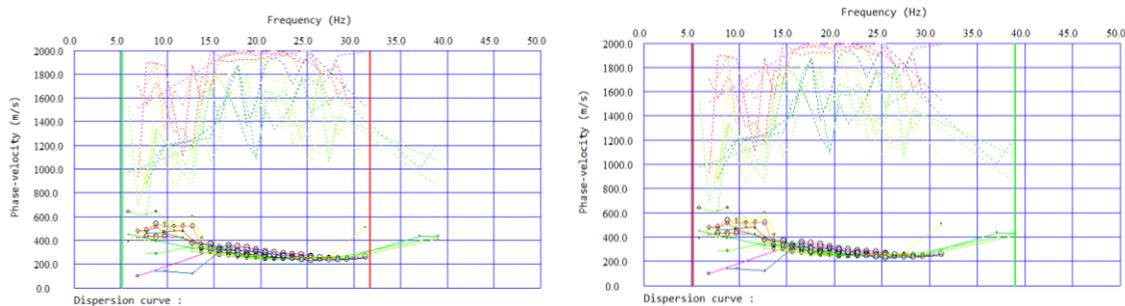
Σχήμα 3.11. Phase Velocity και Frequency.

Στη συνέχεια, στο πρόγραμμα WaveEq εμφανίζονται οι καμπύλες διασποράς (dispersion curves) των δεδομένων μας (Σχήμα 3.12).



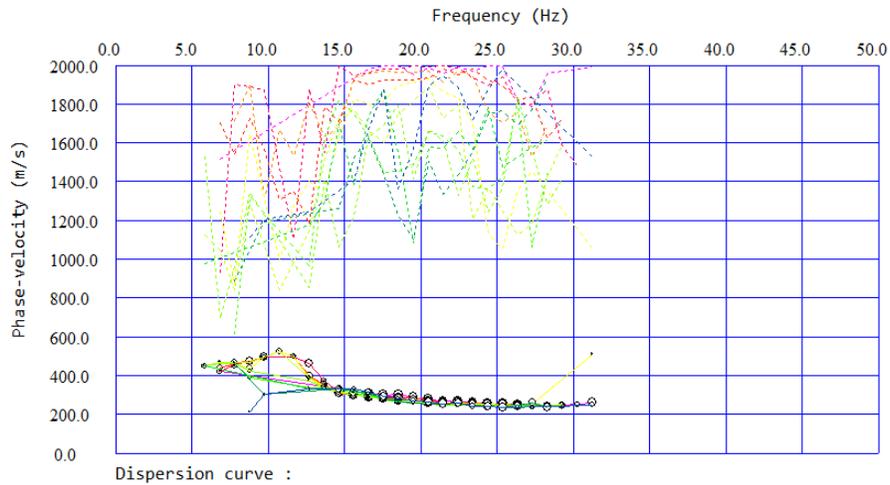
Σχήμα 3.12. Καμπύλες διασποράς.

Χρησιμοποιώντας τα βελάκια του πληκτρολογίου, μετακινήσαμε τις μπάρες που φαίνονται στην Σχήμα 3.13 ώστε να αφαιρέσουμε τα δεδομένα που δεν ταίριαζαν.

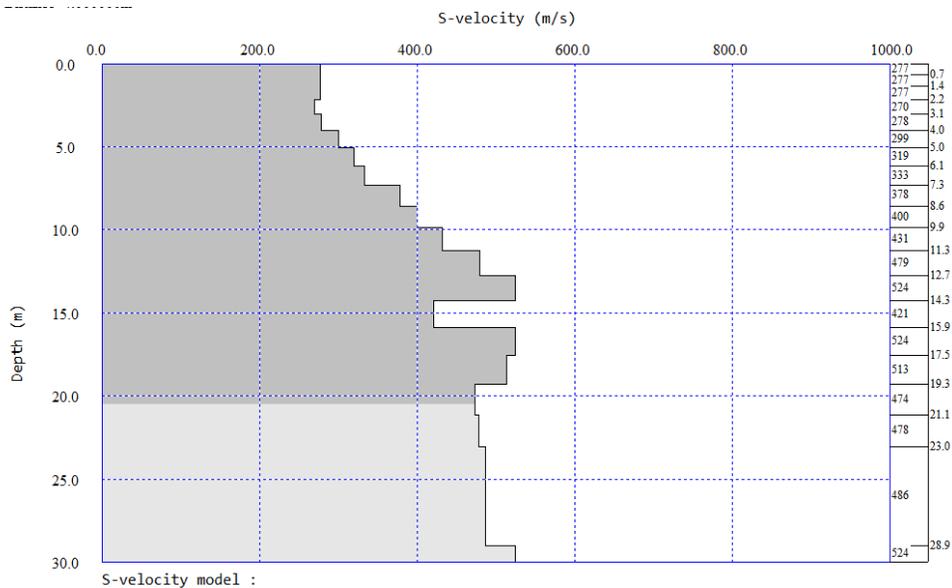


Σχήμα 3.13. Επεξεργασία καμπύλων διασποράς.

Ακολουθούν τα τελικά φιλτραρισμένα dispersion curves (Σχήμα 3.14) και το αρχικό προφίλ των ταχυτήτων των εγκάρσιων κυμάτων (V_s) (Σχήμα 3.15) που ευθύνονται για το μοντέλο διάδοσης της ταχύτητας των επιφανειακών κυμάτων που αναλύθηκε.

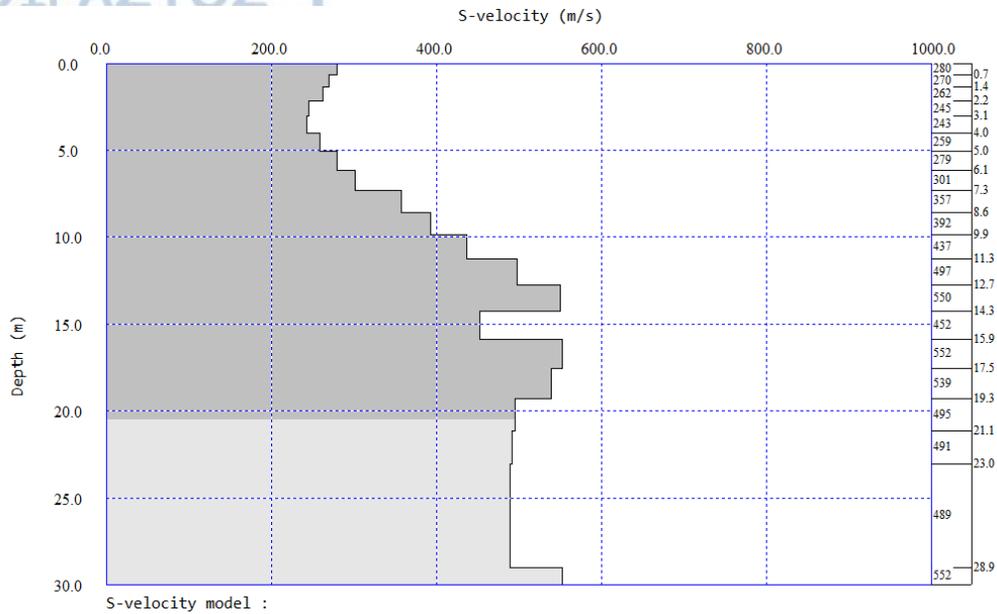


Σχήμα 3.14. Καμπύλες διασποράς μετά την επεξεργασία.



Σχήμα 3.15. Αρχικό προφίλ των ταχυτήτων των εγκάρσιων κυμάτων (V_s).

Ακολούθησε αντιστροφή των καμπύλων σκέδασης για την εύρεση ενός μοντέλου V_s (Σχήμα 3.16) που ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα μας.



Σχήμα 3.16 Τελικό μοντέλο V_s .

Τελευταίο βήμα της επεξεργασίας ήταν η κατασκευή μιας 2-D διατομής των ταχυτήτων των εγκάρσιων κυμάτων. Για την πραγματοποίηση αυτού, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Geoplot στο οποίο επεξεργαστήκαμε το τελικό μοντέλο με τη βοήθεια των διαφόρων φίλτρων που διατίθενται στο λογισμικό (Σχήμα 4.2).

3.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Η ηλεκτρική διασκόπηση στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του οργάνου SYSCAL της IRIS INSTRUMENTS (Σχήμα 3.17) και 24 ηλεκτροδίων, τα οποία τοποθετήθηκαν σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους (4 μέτρα).



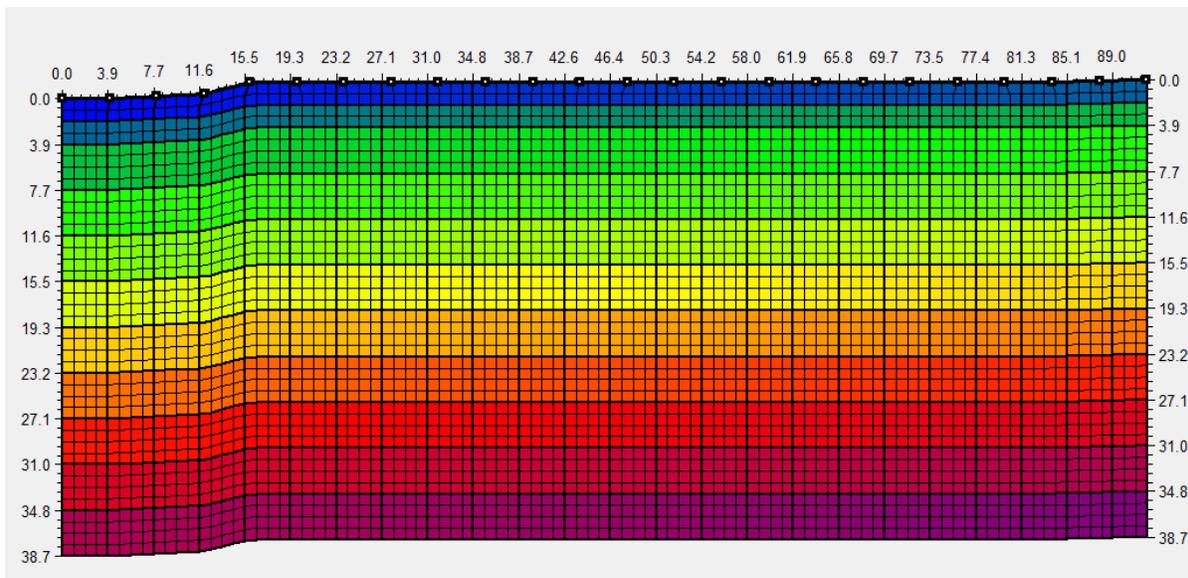
Σχήμα 3.17. Όργανο SYSCAL της IRIS INSTRUMENTS.

Το συνολικό ανάπτυγμα των ηλεκτροδίων είχε μήκος 92 μέτρα. Επιπλέον, διαθέταμε ειδικό πολυκάναλο καλώδιο με το οποίο συνδέαμε το όργανο μέτρησης με τα ηλεκτρόδια, μονωτικές ταινίες και μία μπαταρία 12V.



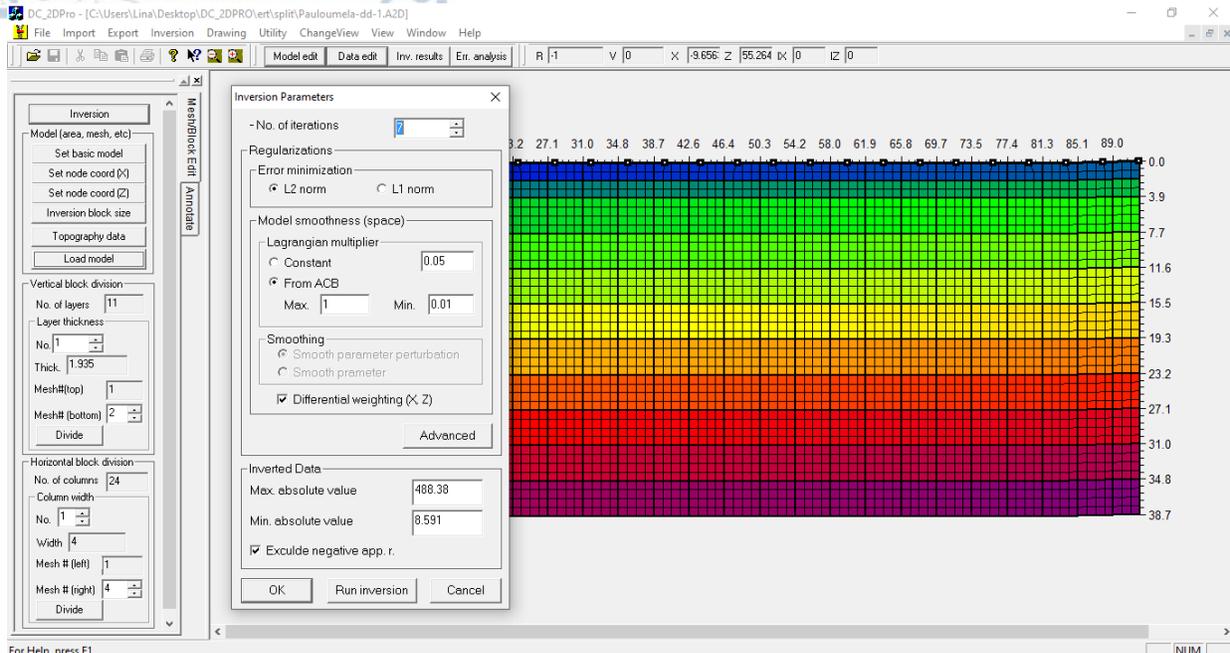
Σχήμα 3.18. Αρχική επεξεργασία στην περιοχή μελέτης.

Η επεξεργασία έγινε με το πρόγραμμα DC2DPRO. Εισάγοντας τα δεδομένα και την τοπογραφία της περιοχής παίρνουμε το ακόλουθο σχήμα στο οποίο φαίνεται η διαίρεση του υπό μελέτη χώρου σε πλήθος παραμέτρων (κελιών) για κάθε μια από τις οποίες θα υπολογιστεί η πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση κατά τη μαθηματική διαδικασία της αντιστροφής.



Σχήμα 3.19. Αρχικό σχήμα από εισαγωγή των ηλεκτρικών δεδομένων και της τοπογραφίας της περιοχής.

Στη συνέχεια επιλέγουμε κάποιες παραμέτρους (Σχήμα 3.20) που αφορούν επιλογές για την διαδικασία της αντιστροφής και την εκτελούμε.



Σχήμα 3.20. Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των ηλεκτρικών δεδομένων.

Σαν αποτέλεσμα παίρνουμε μία δισδιάστατη τομή η οποία περιγράφει την πραγματική κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η οποία θεωρητικά μας δίνει δεδομένα πολύ κοντά στα πραγματικά μας δεδομένα. (Σχήμα 4.3).

3.4 ΕΛΑΦΙΚΟΣ Ή ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΜΙΚΡΟΘΟΥΡΥΒΟΣ

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν 2 ομάδες μετρήσεων εδαφικού θορύβου, αρχικά σε 4 θέσεις και έπειτα σε άλλες 6 (σύνολο 10 θέσεις). Για τη λήψη δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν 2 σειсмоγράφοι (Lemartz 5s), 2 ψηφιοποιητές (City Shark II – 24 bits), 2 κεραίες απόλυτου χρόνου GPS (μία για κάθε σειсмоγράφο) και πυξίδα για τον προσανατολισμό των σειсмоγράφων (Σχήμα 3.21).

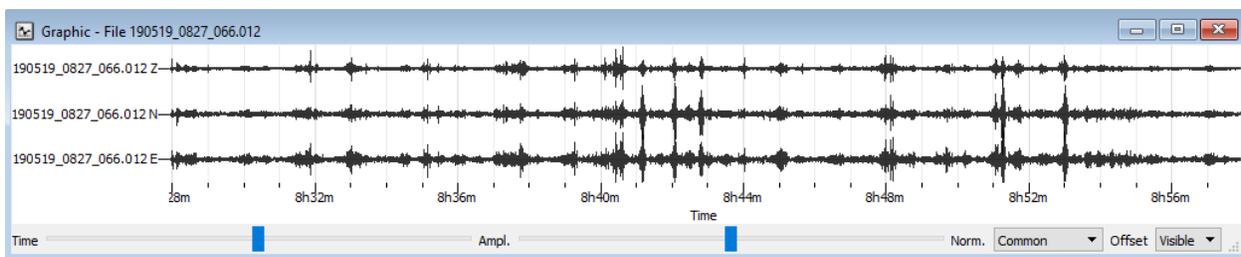


Σχήμα 3.21. Όργανα και τοποθέτηση αυτών στην περιοχή μελέτης για τη μέτρηση εδαφικού θορύβου.

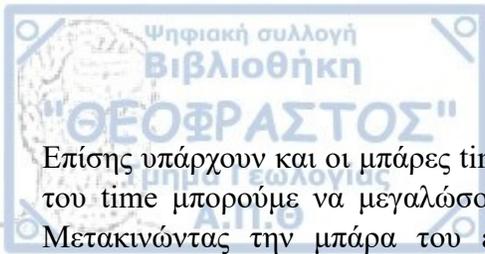
Οι μετρήσεις γίνονται ταυτόχρονα σε ζεύγη (θέσεις 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9-10) και με διάρκεια 30min (Σχήμα 3.2).

Μετά τη λήψη των δεδομένων, ακολούθησε επεξεργασία αυτών με τη χρήση του προγράμματος Geopsy (<http://www.geopsy.org/>).

Η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων εδαφικού θορύβου με το συγκεκριμένο λογισμικό αποτελείται από τα παρακάτω βήματα: Αρχικά, φορτώνοντας ένα αρχείο και επιλέγοντας το εικονίδιο graphic, βλέπουμε το γράφημα της μέτρησης (Σχήμα 3.22). Στο γράφημα υπάρχουν 3 κυματομορφές (η μία κάτω από την άλλη) που απεικονίζουν τις 3 συνιστώσες της εδαφικής κίνησης. Οι συνιστώσες αυτές είναι η κατακόρυφη Z (Vertical) και οι 2 οριζόντιες N (North) και E (East).



Σχήμα 3.22. Αρχικό γράφημα μέτρησης εδαφικού θορύβου.



Επίσης υπάρχουν και οι μπάρες time (χρόνος) και amplitude (εύρος). Μετακινώντας την μπάρα του time μπορούμε να μεγαλώσουμε ή να μικρύνουμε την κλίμακα του χρόνου (άξονας x). Μετακινώντας την μπάρα του amplitude μεγαλώνουμε ή μικραίνουμε την ενίσχυση της καταγραφής μας.

Στη συνέχεια με το εικονίδιο H/V ρυθμίζουμε τις παραμέτρους μας για αυτόματο υπολογισμό του λόγου H/V. Συγκεκριμένα οι παράμετροι που επιλέξαμε είναι οι εξείς:

- ⇒ Frequency Sampling: From 0.20 Hz To 20.00 Hz
- ⇒ Length (το μέγεθος των παραθύρων): 60.00s
- ⇒ STA (Short Time Average): 1.00s
- ⇒ LTA (Long Time Average): 30.00s
- ⇒ Smoothing type: Konno & Ohmachi
- ⇒ Smoothing constant: 40.00

Τα παραπάνω μας οδηγούν στον υπολογισμό του φασματικού λόγου (H/V)

-H (Horizontal): οριζόντια συνιστώσα περιβαλλοντικού θορύβου

-V (Vertical): κατακόρυφη συνιστώσα περιβαλλοντικού θορύβου

Το Geopsy μας δίνει τη δυνατότητα να αφαιρέσουμε κάποιο παράθυρο από το γράφημά μας ή να ξαναπροσθέσουμε σε αυτό κάποιο παράθυρο που πιθανόν είχαμε αφαιρέσει.

Για την επεξεργασία των δεδομένων ακολουθήθηκαν τα κριτήρια αξιοπιστίας του οδηγού SESAME (Site EffectS assessment using Ambient Excitations), τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.23.

Criteria for a reliable H/V curve

i) $f_0 > 10 / l_w$
and

ii) $n_c(f_0) > 200$
and

iii) $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$
or $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$

**Criteria for a clear H/V peak
(at least 5 out of 6 criteria fulfilled)**

i) $\exists f \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$

ii) $\exists f^* \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^*) < A_0/2$

iii) $A_0 > 2$

iv) $f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$

v) $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$

vi) $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

- l_w = window length
- n_w = number of windows selected for the average H/V curve
- $n_c = l_w \cdot n_w$, f_0 = number of significant cycles
- f = current frequency
- f_{sensor} = sensor cut-off frequency
- f_0 = H/V peak frequency
- σ_f = standard deviation of H/V peak frequency ($f_0 \pm \sigma_f$)
- $\varepsilon(f_0)$ = threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
- A_0 = H/V peak amplitude at frequency f_0
- $A_{H/V}(f)$ = H/V curve amplitude at frequency f
- f = frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f) < A_0/2$
- f^* = frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^*) < A_0/2$
- $\sigma_A(f)$ = "standard deviation" of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
- $\sigma_{\log H/V}(f)$ = standard deviation of the $\log A_{H/V}(f)$ curve, $\sigma_{\log H/V}(f)$ is an absolute value which should be added to or subtracted from the mean $\log A_{H/V}(f)$ curve
- $\theta(f_0)$ = threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$
- $V_{s,av}$ = average S-wave velocity of the total deposits
- $V_{s,surf}$ = S-wave velocity of the surface layer
- h = depth to bedrock
- h_{min} = lower-bound estimate of h

Threshold Values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Frequency range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.20 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Σχήμα 3.23. Κριτήρια αξιοπιστίας αποτελεσμάτων (SESAME guidelines).

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε δέκα φορές (μία για κάθε θέση). Ωστόσο, το φάσμα της θέσης 5 προέκυψε από την κάθετη και μία οριζόντια συνιστώσα. Συγκεκριμένα, επειδή το σήμα της συνιστώσας North δεν ήταν καθαρό, χρησιμοποιήσαμε μόνο την Vertical και την East (Σχήμα 3.24). Για το λόγο αυτό αρχικά χωρίσαμε την καταγραφή μας σε 3 διαφορετικά αρχεία (ένα για κάθε συνιστώσα) και κάναμε load μία φορά το αρχείο της Z (Vertical) και δύο φορές της E (East). Έπειτα, μετονομάσαμε την μία East σε North και εκτελέσαμε το λόγο H/V.



Σχήμα 3.24. Κυματομορφές 5ης θέσης πριν την επεξεργασία.

3.5 ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΟΥ

Λόγω του ότι η περιοχή μελέτης βρίσκεται κοντά στο σταθμό του δικτύου επιταχυνσιογράφων του ΙΤΣΑΚ (STL1) της Σταυρούπολης, συλλέξαμε σεισμικές καταγραφές του 2018 από το συγκεκριμένο σταθμό και επαναλάβαμε και σε αυτές τη μέθοδο του φασματικού λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφης συνιστώσας (HVSR). Ο στόχος ήταν να προσπαθήσουμε να συγκρίνουμε τους φασματικούς λόγους (H/V) που προέκυψαν από τα δεδομένα του εδαφικού θορύβου με εκείνους των πραγματικών σεισμικών δεδομένων.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ξεκίνησε με την κατασκευή ενός καταλόγου σεισμών. Αρχικά, συλλέχθηκαν δεδομένα από τους καταλόγους σεισμών του Σεισμολογικού Δικτύου του Τομέα Γεωφυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.

Τα χαρακτηριστικά των σεισμών που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στον Πίνακα 1. Πιο συγκεκριμένα αναφέρονται η ημερομηνία, ο χρόνος γένεσης, οι συντεταγμένες του επικέντρου, το εστιακό βάθος και το μέγεθος του κάθε σεισμού. Το σύνολο των σεισμών είναι δέκα στον αριθμό, με τον μικρότερο μεγέθους 3.4 και τον μεγαλύτερο 5.2 και η απόσταση από την εστία του κάθε σεισμού δεν ξεπερνάει τα 200km.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά σεισμικών καταγραφών που κατέγραψε ο σταθμός STL1

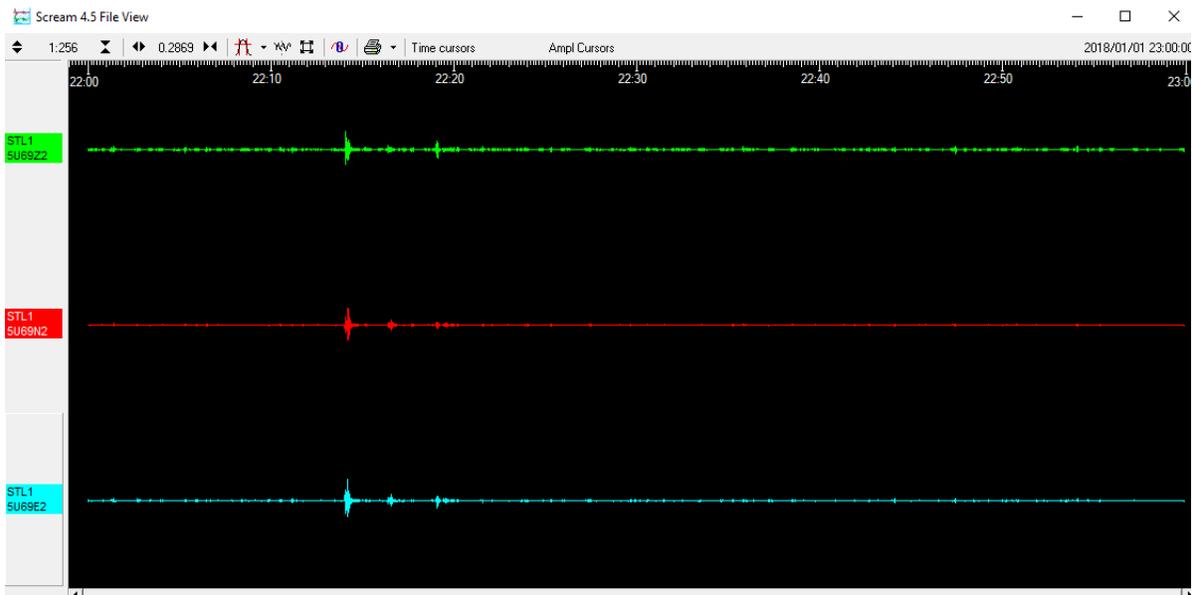
	File Name	Date	Time (GMT)	Latitude	Longitude	Depth (km)	Magnitude (ML)
1	20180101_221341	01/01/2018	22:13:52	41.192	22.875	10.10	3.9
2	20180102_042405	02/01/2018	04:24:18	41.182	22.892	13.60	4.7
3	20180102_173623	02/01/2018	17:36:34	41.182	22.860	11.00	4.0
4	20180221_234212	21/02/2018	23:42:00	41.953	24.942	09.00	4.4
5	20180421_002002	21/04/2018	00:20:07	39.947	23.717	10.30	4.6
6	20180625_082137	25/06/2018	08:21:55	40.712	23.323	07.60	4.2

7	20180625_082247	25/06/2018	08:23:09	40.706	23.294	07.20	3.4
8	20180625_082348	25/06/2018	08:24:06	40.694	23.325	05.80	3.7
9	20180831_071233	31/08/2018	07:12:25	39.279	21.619	11.70	5.2
10	20180831_082626	31/08/2018	08:26:23	39.362	21.597	06.80	4.2

Το δίκτυο του ΙΤΣΑΚ (Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών) διαθέτει 120 και πλέον επιταχυνσιογράφους Guralp που είναι εγκατεστημένοι σε όλο τον ελλαδικό χώρο και καταγράφουν σεισμικές δονήσεις και εδαφικό μικροθόρυβο. Συγκεκριμένα, καταγράφεται η σεισμική επιτάχυνση σε συνάρτηση με το χρόνο. Οι καταγραφές κάθε ημέρας χωρίζονται σε επιμέρους τμήματα της μίας ώρας και από κάθε σταθμό υπάρχουν τρία αρχεία, ένα για κάθε συνιστώσα (την κατακόρυφη συνιστώσα Z και τις δύο οριζόντιες North-N και East-E).

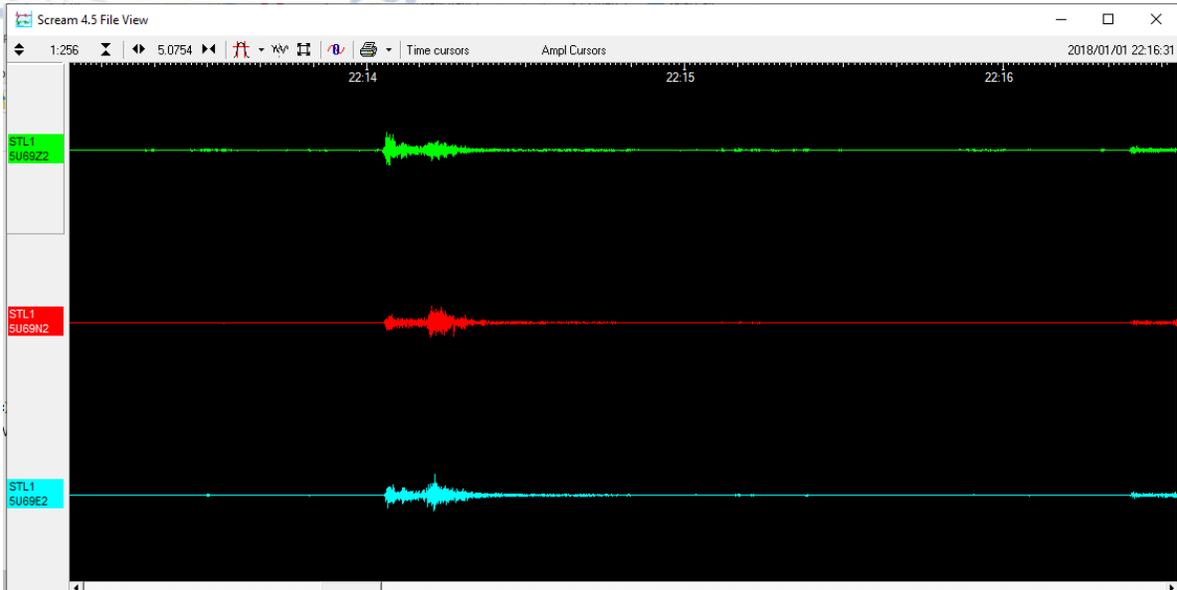
Για κάθε έναν από τους σεισμούς του καταλόγου συλλέχθηκαν οι καταγραφές από τη βάση δεδομένων του ΙΤΣΑΚ για το σταθμό STL1 και επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Scream 4.5 (<https://www.guralp.com/sw/scream.shtml>). Λόγω του ότι οι καταγραφές είναι μίας ώρας, έπρεπε να εντοπιστεί η έναρξη και λήξη για τον κάθε σεισμό και να αποθηκευτούν σαν ξεχωριστά αρχεία. Έτσι γινόταν ταυτόχρονη αποκοπή της σεισμικής δόνησης και από τις 3 συνιστώσες. Η καταγραφή που χρησιμοποιήθηκε ξεκινούσε 20sec πριν από την άφιξη των P κυμάτων και τελείωνε εκεί όπου η κυματομορφή φτάνει στο ίδιο επίπεδο με το θόρυβο. Στην περίπτωση που ακολουθούσε άλλος σεισμός, η αποκοπή της κυματομορφής τελείωνε αμέσως πριν την άφιξη των P κυμάτων του δεύτερου σεισμού.

Ανοίγοντας μία καταγραφή του σταθμού STL1 στο Scream παίρνουμε την Σχήμα 3.25.



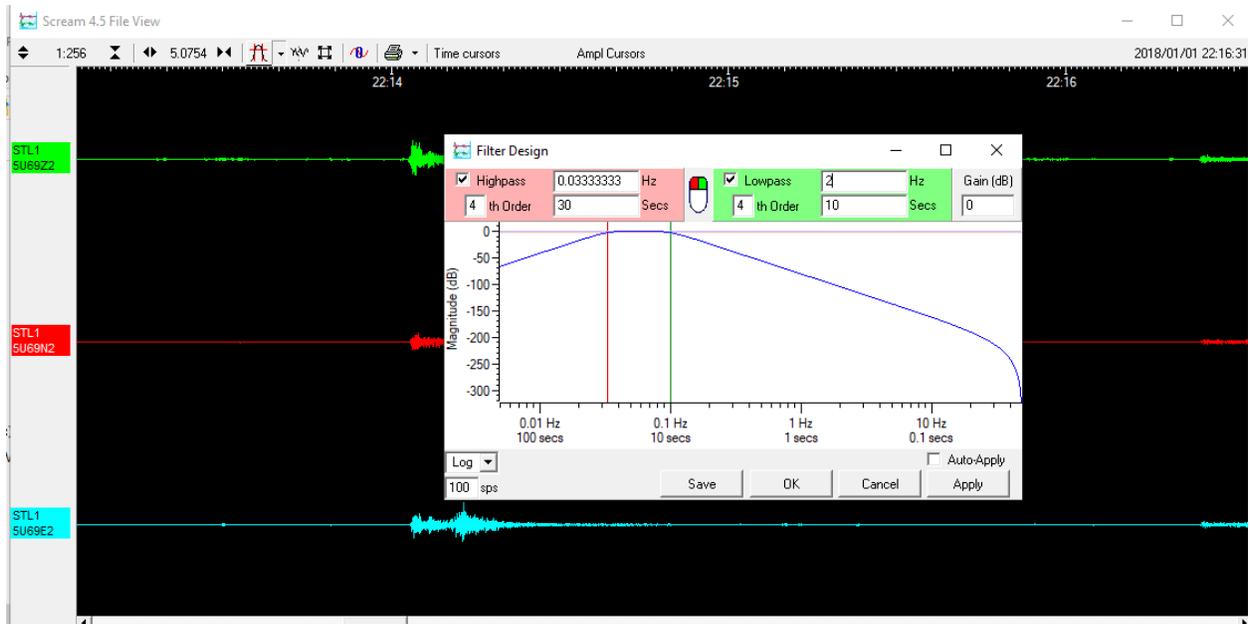
Σχήμα 3.25. Αρχική καταγραφή από το σταθμό STL1.

Στη συνέχεια επιλέγουμε το χρονικό παράθυρο που μας ενδιαφέρει για να εντοπίσουμε το σεισμό (Σχήμα 3.26).

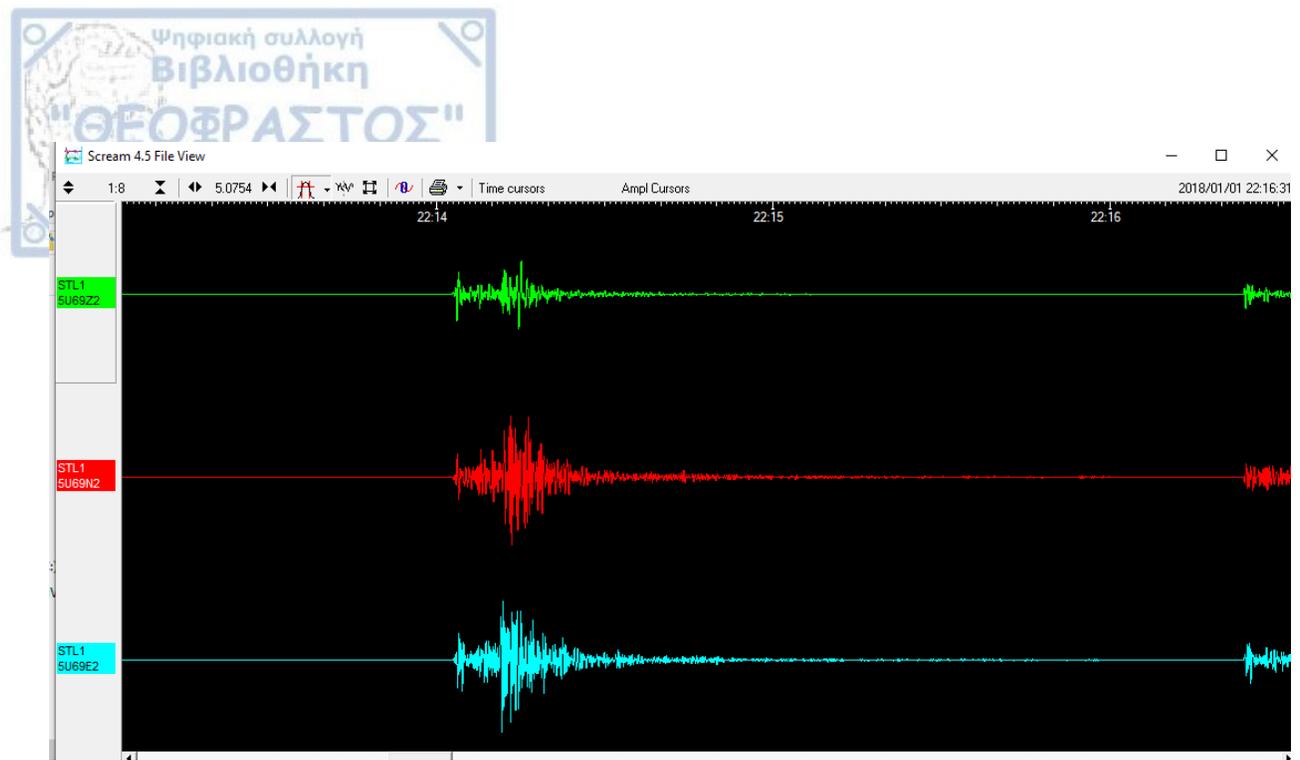


Σχήμα 3.26. Επιλογή του χρονικού παραθύρου που περιέχει τον σεισμό.

Για να απομακρύνουμε τον θόρυβο από τη καταγραφή και για να εντοπίσουμε ευκολότερα την έναρξη και λήξη του σεισμού αλλάζουμε το εύρος των συχνοτήτων (Σχήμα 3.27).

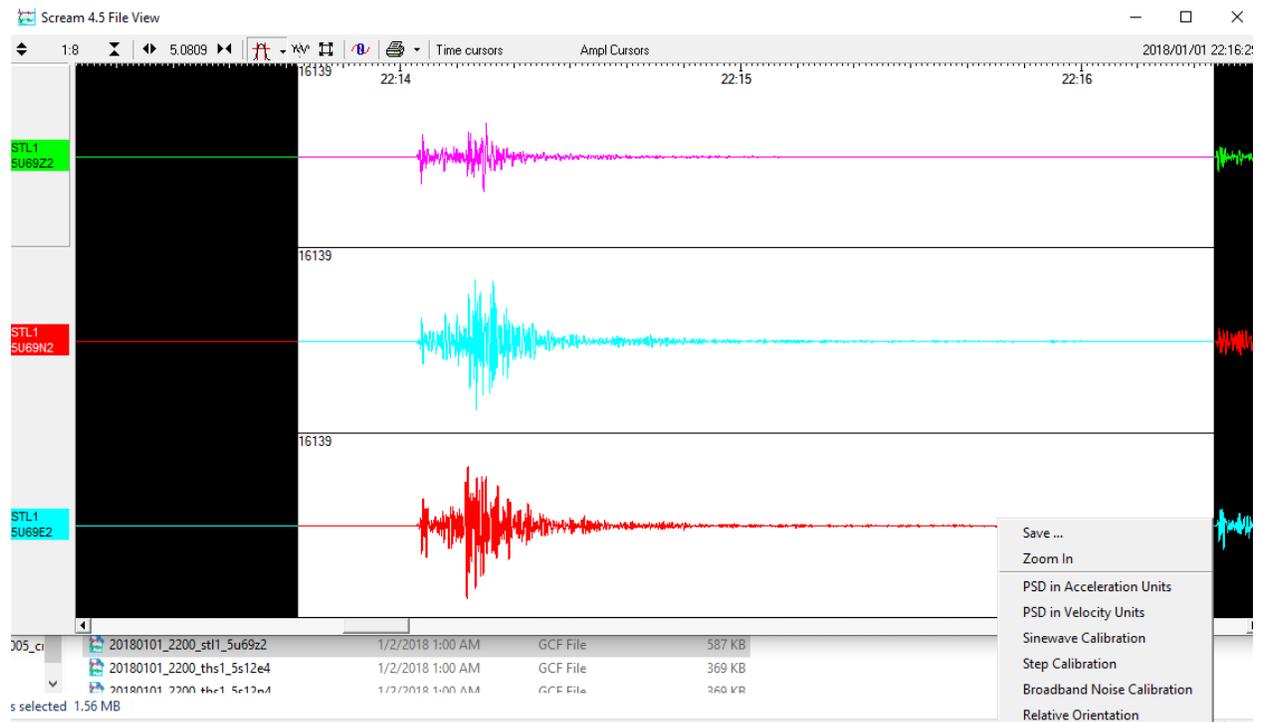


Σχήμα 3.27. Φιλτράρισμα καταγραφής με αλλαγή του εύρους συχνοτήτων.



Σχήμα 3.28. Καταγραφή μετά το φιλτράρισμα.

Τέλος, επιλέγουμε και αποθηκεύουμε το σεισμό (Σχήμα 3.29).



Εκόνια 3.29. Επιλογή και αποθήκευση του σεισμού.

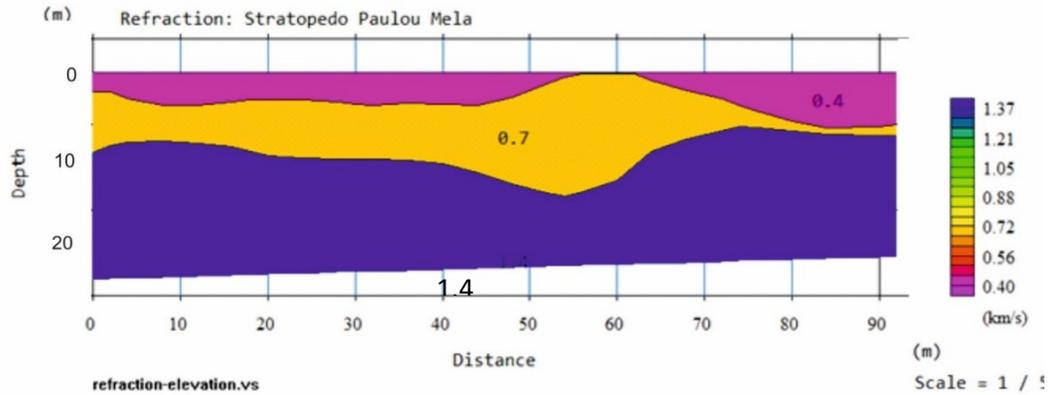
Στη συγκεκριμένη περίπτωση ακολουθεί μετασεισμός και κόψαμε την καταγραφή αμέσως πριν την άφιξη των P κυμάτων του μετασεισμού.



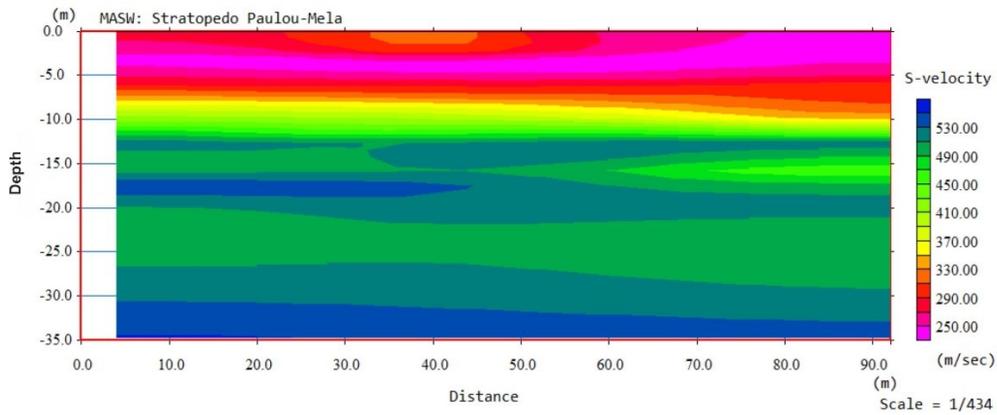
Έπειτα ακολούθησε η επεξεργασία των σεισμών με τη χρήση του προγράμματος Geopsy. Επαναλάβαμε τη μέθοδο HVSR ώστε να υπολογίσουμε τους φασματικούς λόγους H/V. Για κάθε σεισμό η διαδικασία έγινε δύο φορές: μία χρησιμοποιώντας όλη την καταγραφή και μία χρησιμοποιώντας μόνο τα S κύματα του σεισμού (Σχήμα 4.6).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

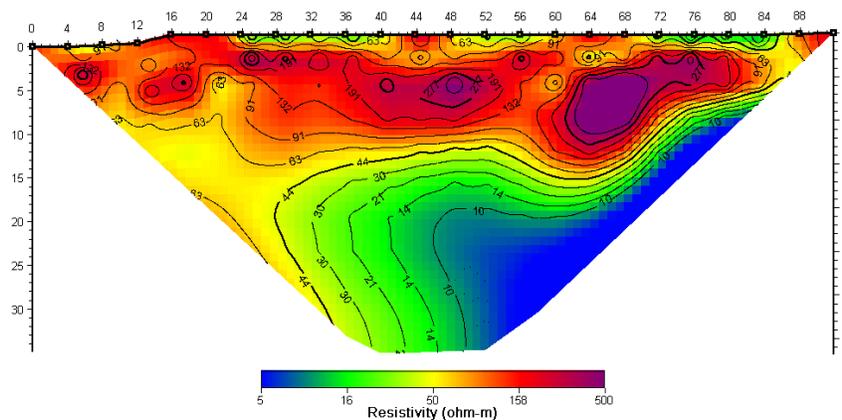
4.1 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ



Σχήμα 4.1. Μοντέλο ταχυτήτων επιμήκων κυμάτων και παχών των διάφορων στρωμάτων της τομής.



Σχήμα 4.2. 2-D διατομή των ταχυτήτων των εγκάρσιων κυμάτων.



Σχήμα 4.3. Αποτέλεσμα διάταξης Διπόλου-Διπόλου

Από το μοντέλο ταχυτήτων επιμήκων κυμάτων και παχών (Σχήμα 4.1) παρατηρούμε ένα επιφανειακό στρώμα πάχους 2 έως 5 μέτρων με ταχύτητα σεισμικών κυμάτων 0.4 km/sec. Βαθύτερα, ένα στρώμα κυμαινόμενου πάχους (έως και 10-15 μέτρων) με ταχύτητα 0.7 km/sec και σε μεγαλύτερα βάθη (κάτω από τα 10-15 μέτρα περίπου) εντοπίζεται ημιχώρος που η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων υπολογίζεται στα 1.4 km/sec. Με βάση την γεωλογική πληροφορία που έχουμε από τους χάρτες αλλά και την επιτόπια παρατήρηση υποθέτουμε πως οι ταχύτητες των 0.4 km/s αντιστοιχούν σε χαλαρές αποθέσεις αποτελούμενες από αδρομερή υλικά, χαλίκια, κροκάλες αλλά και πιθανά μπάζα από ανθρωπογενείς δραστηριότητες ενώ λίγο βαθύτερα η αύξηση της ταχύτητας στα 0.7 km/s υποδηλώνει τον περιορισμό των αδρόκοκκων υλικών και την μετάβαση σε πιο λεπτομερή υλικά με πιθανή παρουσία αργίλου. Τέλος ο βαθύτερος σχηματισμός με ταχύτητα 1.4 km/s πιθανά υποδηλώνει την παρουσία καλά συμπίεσμένης αργίλου.

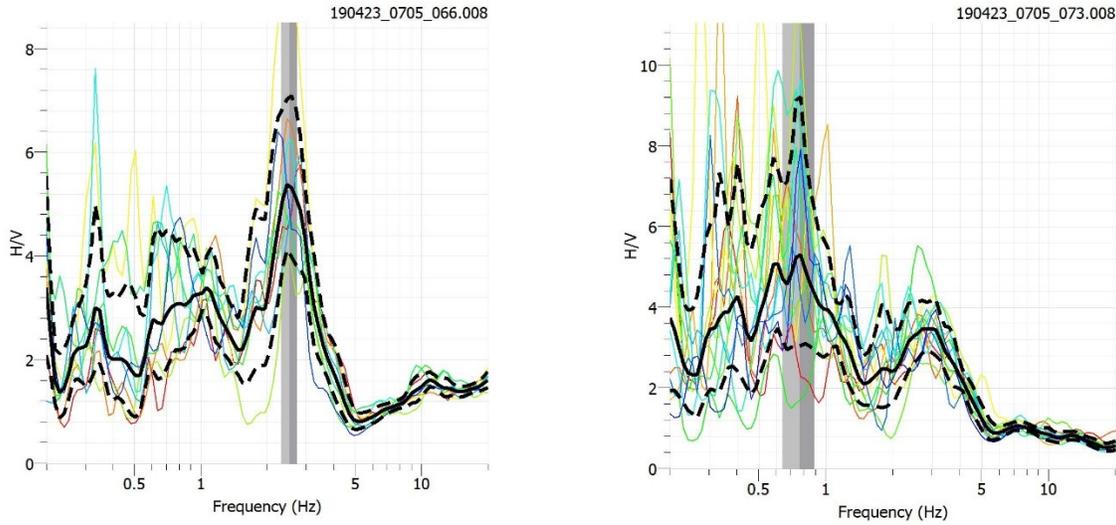
Η δισδιάσταση διατομή των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων (Σχήμα 4.2) δείχνει μια σταδιακή μετάβαση σε σχηματισμούς με μεγαλύτερες ταχύτητες. Προσπαθώντας να διακρίνουμε στρώματα διακρίνεται ένα επιφανειακό στρώμα πάχους 5 - 8 μέτρων περίπου και ταχύτητες από 0.2 km/sec έως 0.3 km/sec. Κάτω από τα 10 - 12 μέτρα διακρίνεται ένα πακέτο σχηματισμών με ταχύτητες μεγαλύτερες των 0.41 km/sec. Στο πακέτο αυτό είναι σαφής η ύπαρξη εναλλαγών στρωμάτων με μικρή διαφοροποίηση στην σύσταση (περιεκτικότητα σε άργιλο) γεγονός που οδηγεί στις αυξομειώσεις της ταχύτητας. Το πακέτο αυτό φαίνεται να συνεχίζεται μέχρι το βάθος των 30 μέτρων περίπου. Βαθύτερα και μέχρι τα 35 μέτρα, φαίνεται μια σταθεροποίηση της ταχύτητας σε τιμές μεγαλύτερες από 0.5 km/sec πιθανά σχετίζεται με αυξημένη παρουσία συνεκτικής αργίλου στα βάθη αυτά.

Τέλος, από την ηλεκτρική τομογραφία (Σχήμα 4.3) φαίνεται ότι η κατανομή των αντιστάσεων του εδάφους όπως υπολογίστηκε αναδεικνύει αρχικά την παρουσία αδρόκοκκων αδιαβάθμητων υλικών μέχρι περίπου τα πρώτα 10 μέτρα βάθους γεγονός που αποδίδεται με τις μεγάλες αντιστάσεις ($> 150 \text{ Ohm-m}$). Βαθύτερα υπάρχει μια μείωση των αντιστάσεων η οποία παρουσιάζει και μια εικόνα πλευρικής μετάβασης από καθαρά αργιλικούς σχηματισμούς (10 Ohm-m) στο βόρειο τμήμα της, δηλαδή από το τέλος της τομογραφίας μέχρι το 45^ο μέτρο περίπου. Νοτιότερα πιθανά ένα ποσοστό της αργίλου αντικαθίσταται από υλικά όπως άμμο και χαλίκια.

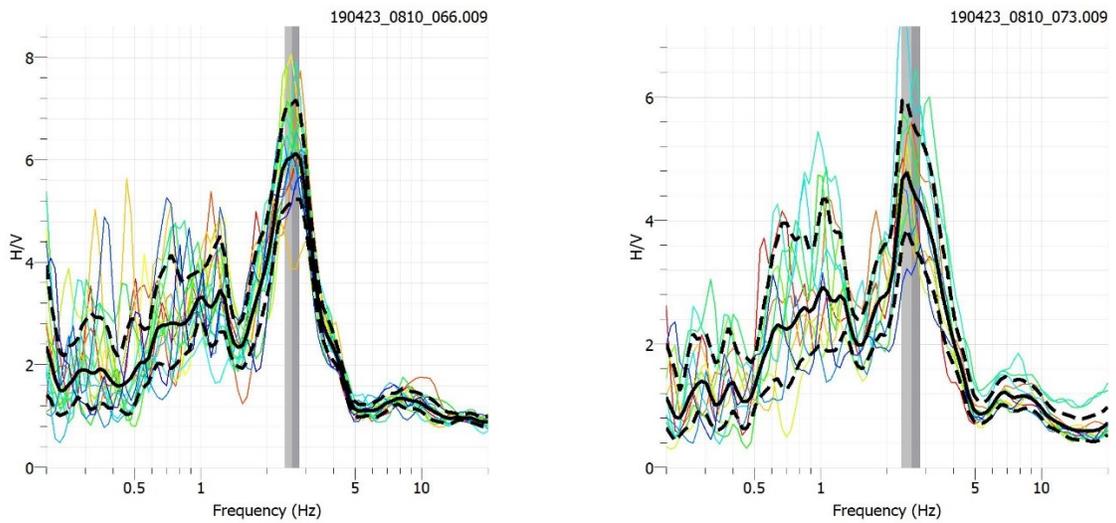
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των τριών αυτών μεθόδων, παρατηρούμε ότι όλες προτείνουν ένα παρόμοιο μοντέλο στο οποίο μπορούν να διακριθούν δύο πακέτα σχηματισμών. Το πρώτο και πιο επιφανειακό φτάνει περίπου μέχρι τα 10-12 μέτρα και το δεύτερο μέχρι βάθος 30 μέτρων προσεγγιστικά. Με αύξηση του βάθους, φαίνεται ότι αυξάνονται και οι ταχύτητες των επιμήκων κι εγκαρσίων κυμάτων, ενώ αντίθετα η αντίσταση μειώνεται. Επίσης, η ιδιομορφία του στρώματος με το κυμαινόμενο πάχος (Σχήμα 4.1) μπορεί να εντοπιστεί και στην ηλεκτρική τομογραφία (Σχήμα 4.3) και συγκεκριμένα, στην γραμμή ίσης αντίστασης των 60 Ohm-m. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά και σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη της περιοχής, φαίνεται ότι με αύξηση του βάθους μεταβαίνουμε από πιο αδρόκοκκα και χαλαρά υλικά σε λεπτομερή και συμπαγή άργιλο όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

4.2 ΕΔΑΦΙΚΟΣ Ή ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΜΙΚΡΟΘΟΥΡΥΒΟΣ

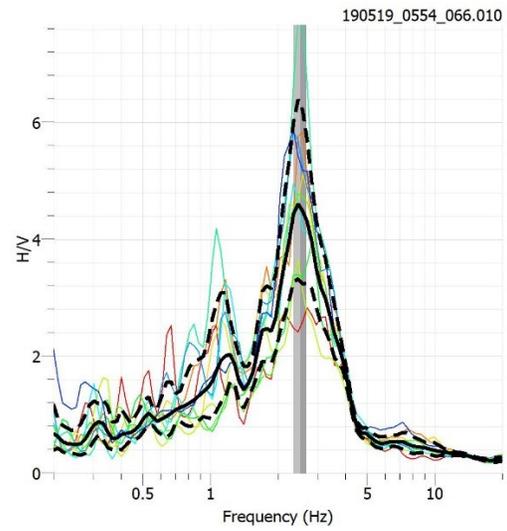
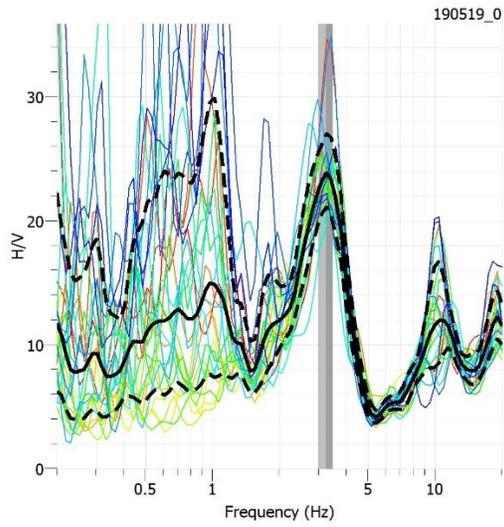
Από την επεξεργασία των καταγραφών με το πρόγραμμα Geopsy προέκυψαν οι ακόλουθοι φασματικοί λόγοι H/V:



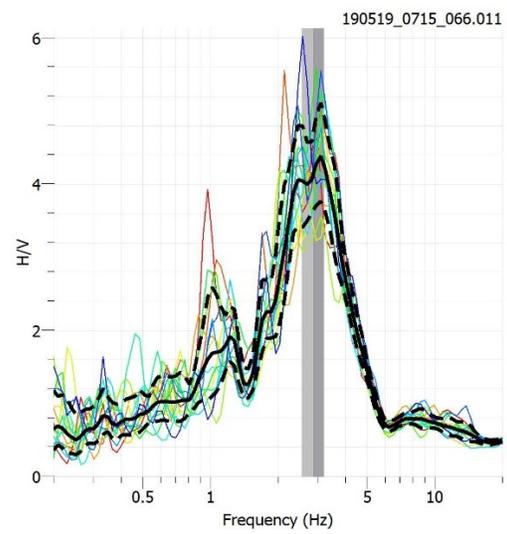
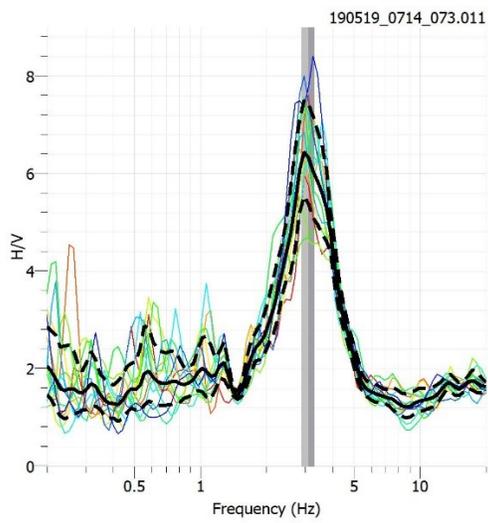
Σχήμα 4.4.1. Φάσματα εδαφικού θορύβου για τις θέσεις 1 (αριστερά) και 2 (δεξιά).



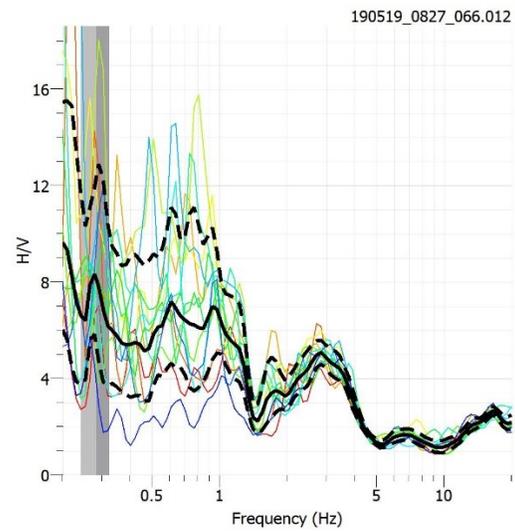
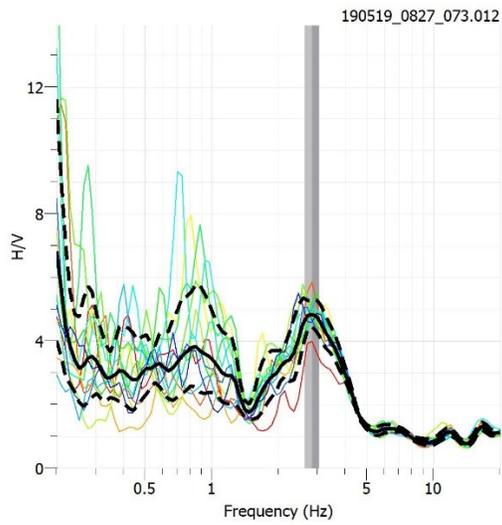
Σχήμα 4.4.2. Φάσματα εδαφικού θορύβου για τις θέσεις 3 (αριστερά) και 4 (δεξιά).



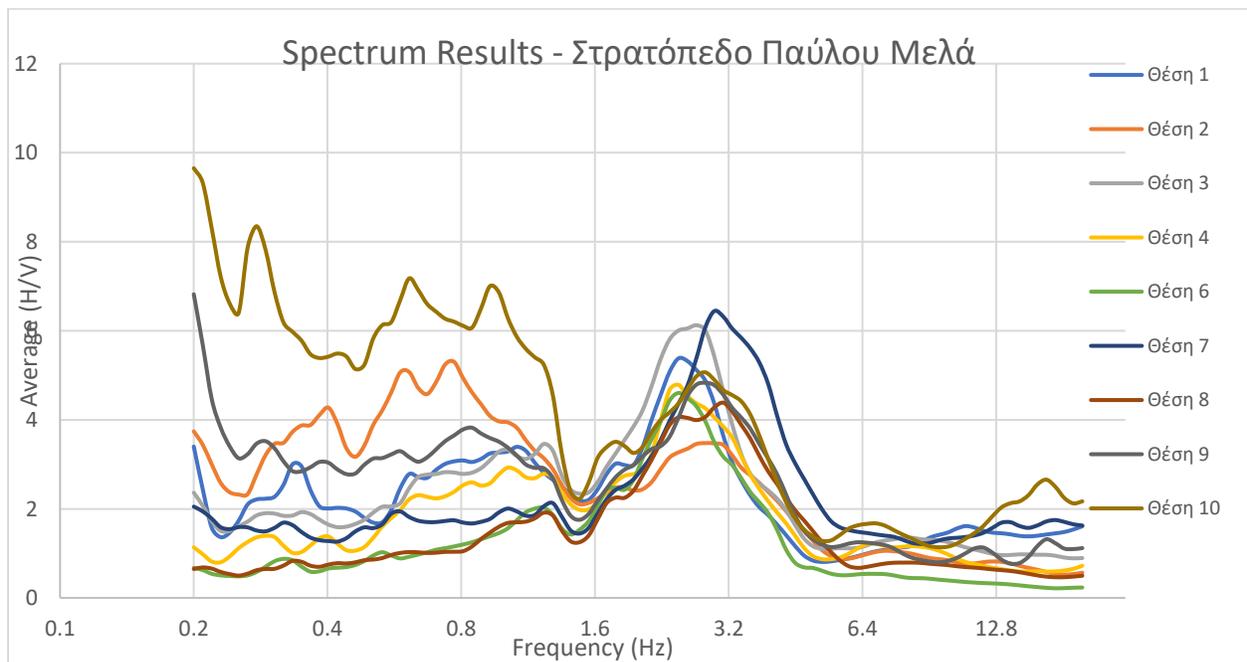
Σχήμα 4.4.3. Φάσματα εδαφικού θορύβου για τις θέσεις 5 (αριστερά) και 6 (δεξιά).



Σχήμα 4.4.4. Φάσματα εδαφικού θορύβου για τις θέσεις 7 (αριστερά) και 8 (δεξιά).



Σχήμα 4.4.5. Φάσματα εδαφικού θορύβου για τις θέσεις 9 (αριστερά) και 10 (δεξιά).



Σχήμα 4.5. Διάγραμμα των average H/V προς Frequency για όλες τις θέσεις.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά καταγραφών εδαφικού μικροθορύβου και φασματικού λόγου H/V

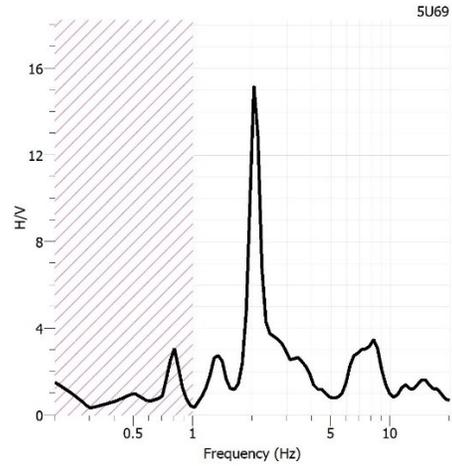
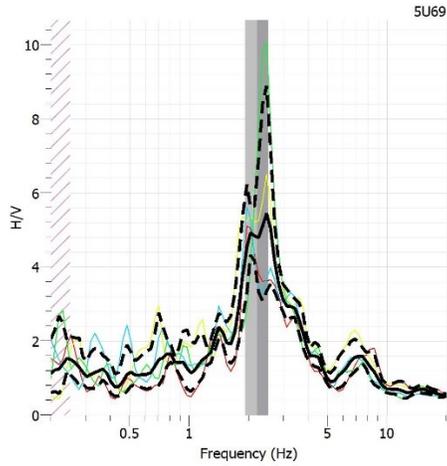
α/α	Όνομα αρχείου	f_0 (Hz) Θεμελιώδης	f_1 (Hz) Δεσπόζουσα	Αριθμός παραθύρων (βλ. Παράρτημα)	Μέγεθος παραθύρων	Min STA/LTA	Max STA/LTA
1	190423_0705_066.008	1.06734	2.46569	9	60.00s	0.20	3.00
2	190423_0705_073.008	0.770706	2.83495	13	60.00s	0.30	3.00
3	190423_0810_066.009	1.22718	2.7061	17	60.00s	0.20	3.00
4	190423_0810_073.009	1.01883	2.46569	11	60.00s	0.30	3.00
5	190519_0554_073.010 ή 190519_0	0.97252	3.2595	27	60.00s	0.50	2.00
6	190519_0554_066.010	1.22718	2.46569	10	60.00s	0.20	3.00
7	190519_0714_073.011	1.28561	2.96994	14	60.00s	0.30	3.00
8	190519_0715_066.011	1.22718	3.11135	15	60.00s	0.30	3.00
9	190519_0827_073.012	0.845849	2.83495	13	60.00s	0.30	3.00
10	190519_0827_066.012	0.276977	2.83495	13	60.00s	0.30	3.00

Από τους φασματικούς λόγους H/V που προέκυψαν, παρατηρούμε ότι υπάρχουν δύο εμφανείς κορυφές (peaks), άρα δύο συχνότητες. Η πρώτη είναι η θεμελιώδης συχνότητα και κυμαίνεται μεταξύ 0.7 Hz και 1.3 Hz και η δεύτερη είναι η δεσπόζουσα με τιμές 2.5 Hz-3.2 Hz. Η δεσπόζουσα συχνότητα αφορά έναν πιο επιφανειακό σχηματισμό (πιθανότατα το σχηματισμό ιζηματογενών αποθέσεων μέχρι τα 30 μέτρα περίπου) ενώ η θεμελιώδης συχνότητα έναν βαθύτερο σχηματισμό. Χρησιμοποιώντας τη σχέση $f_0 = V_s/4h$ (κεφάλαιο 2.4) με $f_0 = 1$ Hz και $V_s = 500$ m/sec (από τα αποτελέσματα της MASW) παίρνουμε ένα βάθος περίπου 125m. Δηλαδή μπορούμε να υποθέσουμε ότι το πακέτο σχηματισμών που ξεκινάει από τα 30 μέτρα περίπου, φθάνει μέχρι τα 125 μέτρα βάθος και κάτω από αυτό ακολουθεί το γεωλογικό υπόβαθρο των μεταμορφωμένων πετρωμάτων της περιοχής.

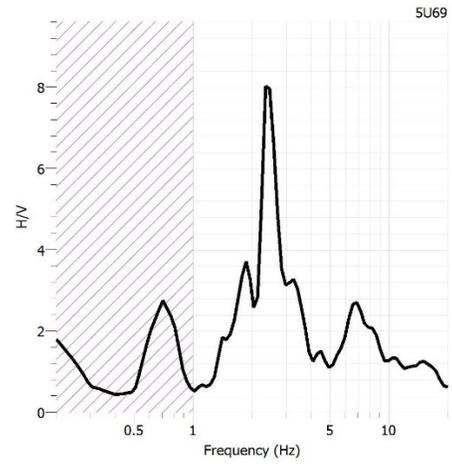
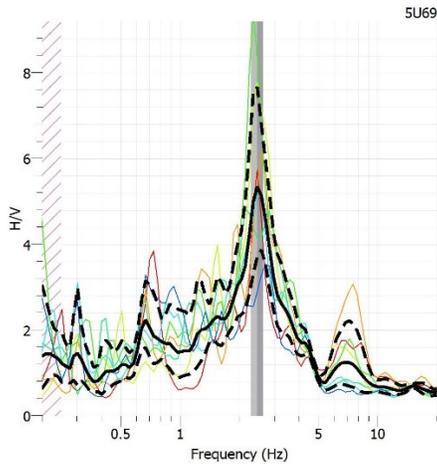
Όσον αφορά τα πλάτη των καταγραφών, παρατηρούμε μια σημαντική ασυμφωνία στο φασματικό λόγο της 5^{ης} θέσης (Σχήμα 4.4.3) σε σχέση με τις γειτονικές της γεγονός που μάλλον οφείλεται σε προβληματικές καταγραφές. Για το λόγο αυτό η θέση αυτή δεν χρησιμοποιήθηκε για την περαιτέρω αξιολόγηση των δεδομένων και δεν παρουσιάζεται και στο διάγραμμα των average H/V προς Frequency για όλες τις θέσεις (Σχήμα 4.5).

4.3 ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΟΥ

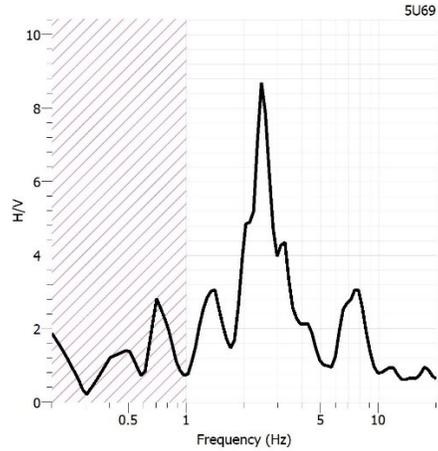
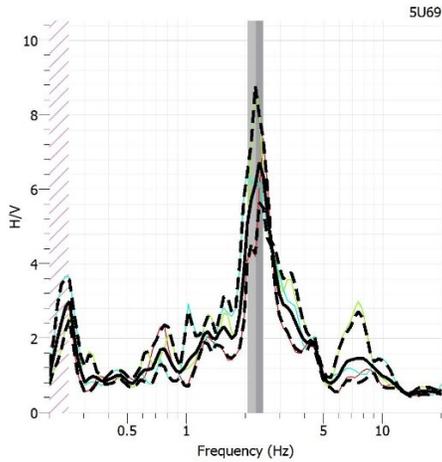
Από την επεξεργασία των σεισμικών καταγραφών με το πρόγραμμα Geopsy προέκυψαν οι ακόλουθοι φασματικοί λόγοι H/V:



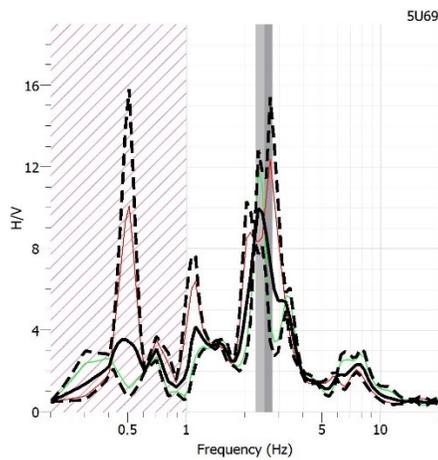
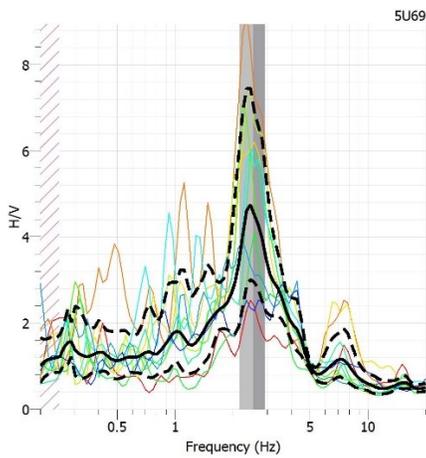
Σχήμα 4.6.1. Φάσματα σεισμού 1 ολόκληρης της καταγραφής (αριστερά) και των κυμάτων S (δεξιά) του σεισμού.



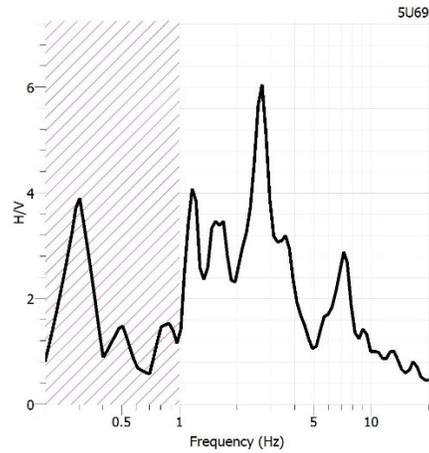
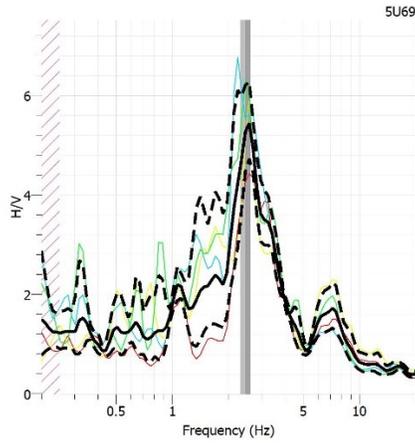
Σχήμα 4.6.2. Φάσματα σεισμού 2 ολόκληρης της καταγραφής (αριστερά) και των κυμάτων S (δεξιά) του σεισμού.



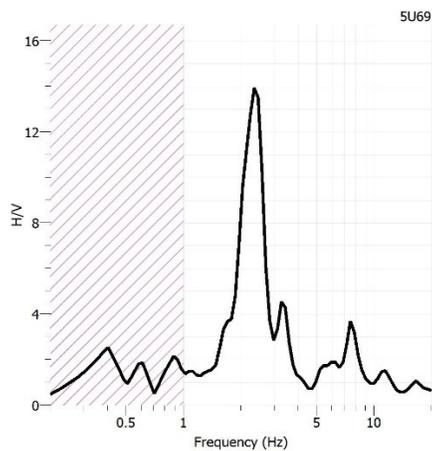
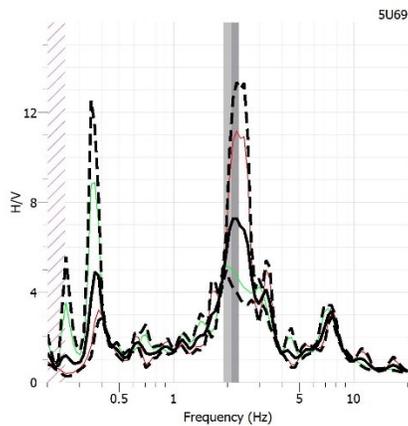
Σχήμα 4.6.3. Φάσματα σεισμού 3 ολόκληρης της καταγραφής (αριστερά) και των κυμάτων S (δεξιά) του σεισμού.



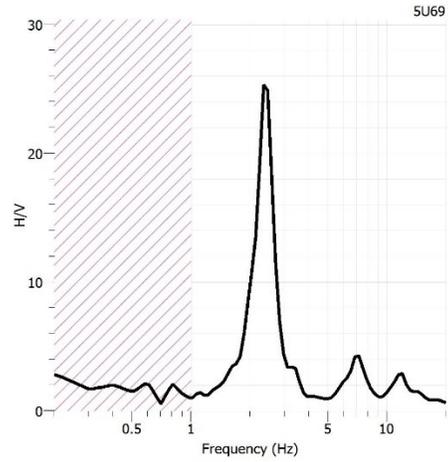
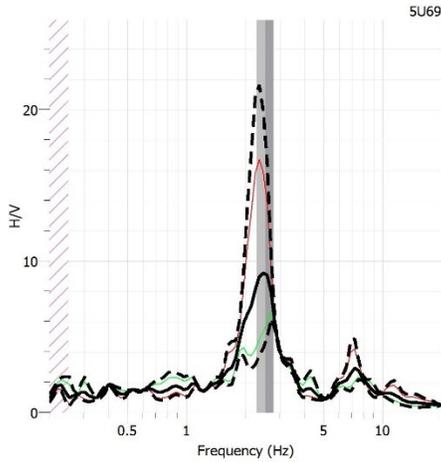
Σχήμα 4.6.4. Φάσματα σεισμού 4 ολόκληρης της καταγραφής (αριστερά) και των κυμάτων S (δεξιά) του σεισμού.



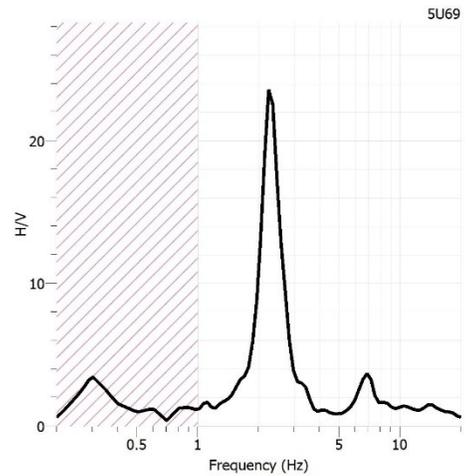
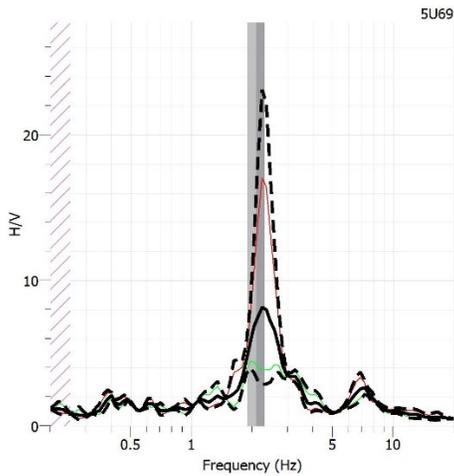
Σχήμα 4.6.5. Φάσματα σεισμού 5 ολόκληρης της καταγραφής (αριστερά) και των κυμάτων S (δεξιά) του σεισμού.



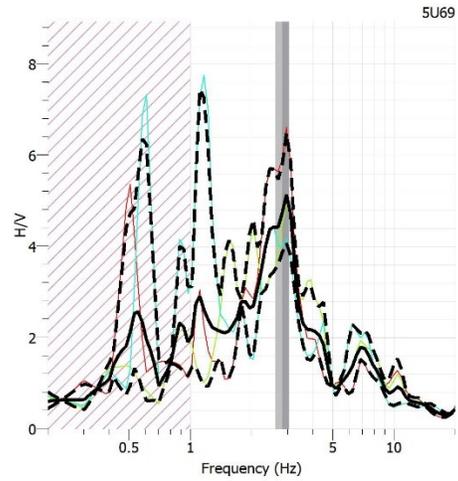
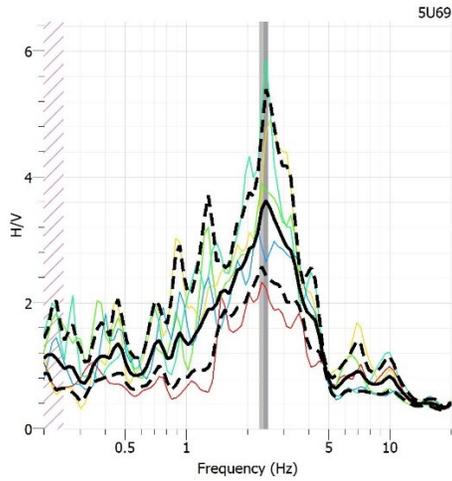
Σχήμα 4.6.6. Φάσματα σεισμού 6 ολόκληρης της καταγραφής (αριστερά) και των κυμάτων S (δεξιά) του σεισμού.



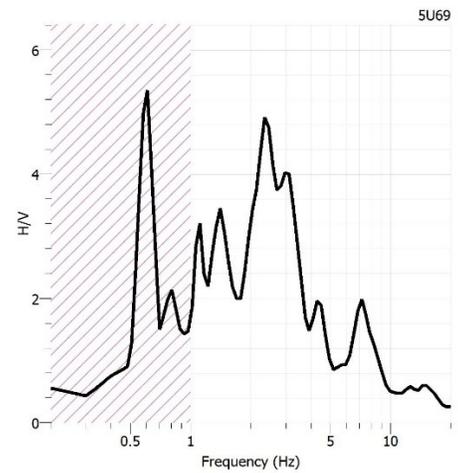
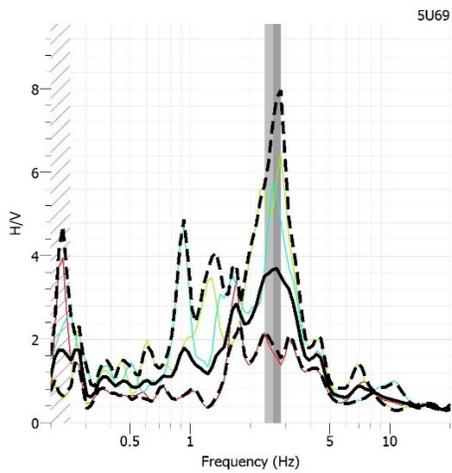
Σχήμα 4.6.7. Φάσματα σεισμού 7 ολόκληρης της καταγραφής (αριστερά) και των κυμάτων S (δεξιά) του σεισμού.



Σχήμα 4.6.8. Φάσματα σεισμού 8 ολόκληρης της καταγραφής (αριστερά) και των κυμάτων S (δεξιά) του σεισμού.



Σχήμα 4.6.9. Φάσματα σεισμού 9 ολόκληρης της καταγραφής (αριστερά) και των κυμάτων S (δεξιά) του σεισμού.



Σχήμα 4.6.10. Φάσματα σεισμού 10 ολόκληρης της καταγραφής (αριστερά) και των κυμάτων S (δεξιά) του σεισμού.

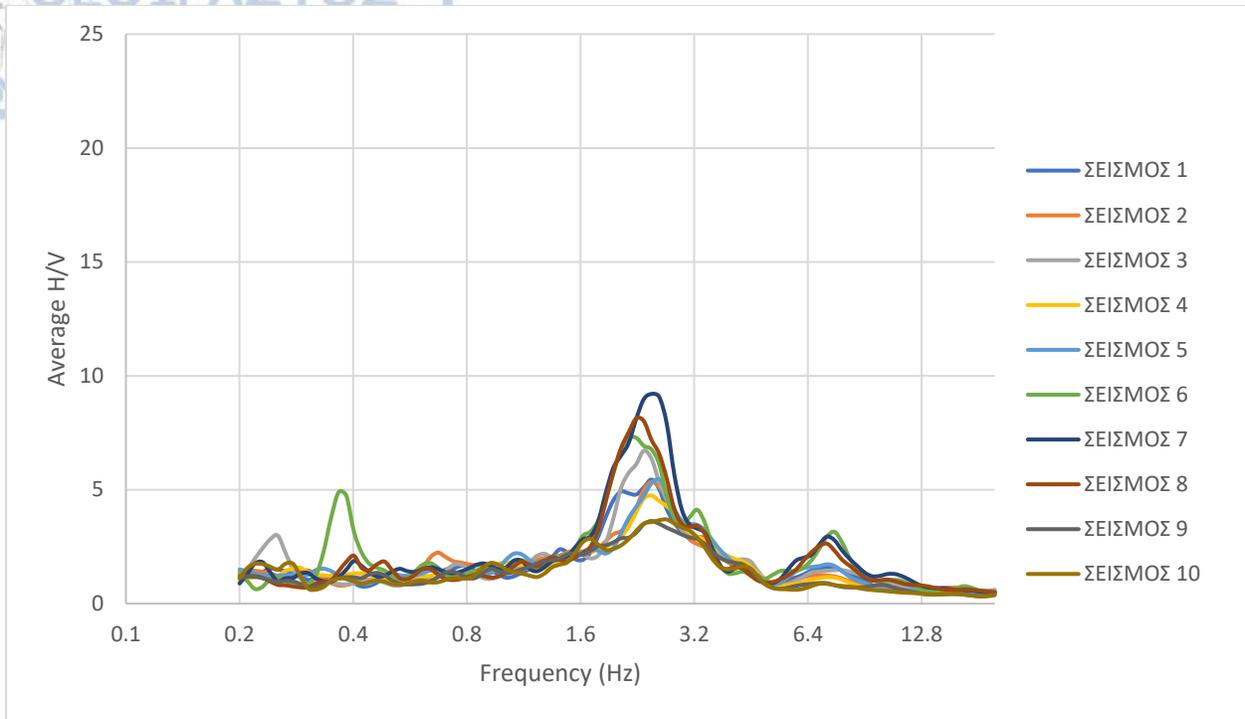
Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά σεισμικών καταγραφών που κατέγραψε ο σταθμός STL1

α/α	f_1 (Hz) Δεσπόζουσα	Αριθμός παραθύρων	Μέγεθος παραθύρων	Min STA/LTA	Max STA/LTA
1	2.46569	4	40.00s	0.20	3.00
2	2.46569	7	40.00s	0.20	3.00
3	2.35362	3	40.00s	0.20	3.00
4	2.46569	10	40.00s	0.20	3.00
5	2.58310	4	40.00s	0.20	3.00
6	2.24665	2	40.00s	0.20	3.00
7	2.46569	2	40.00s	0.20	3.00
8	2.24665	2	40.00s	0.20	3.00
9	2.46569	5	40.00s	0.20	3.00
10	2.70610	3	40.00s	0.20	3.00

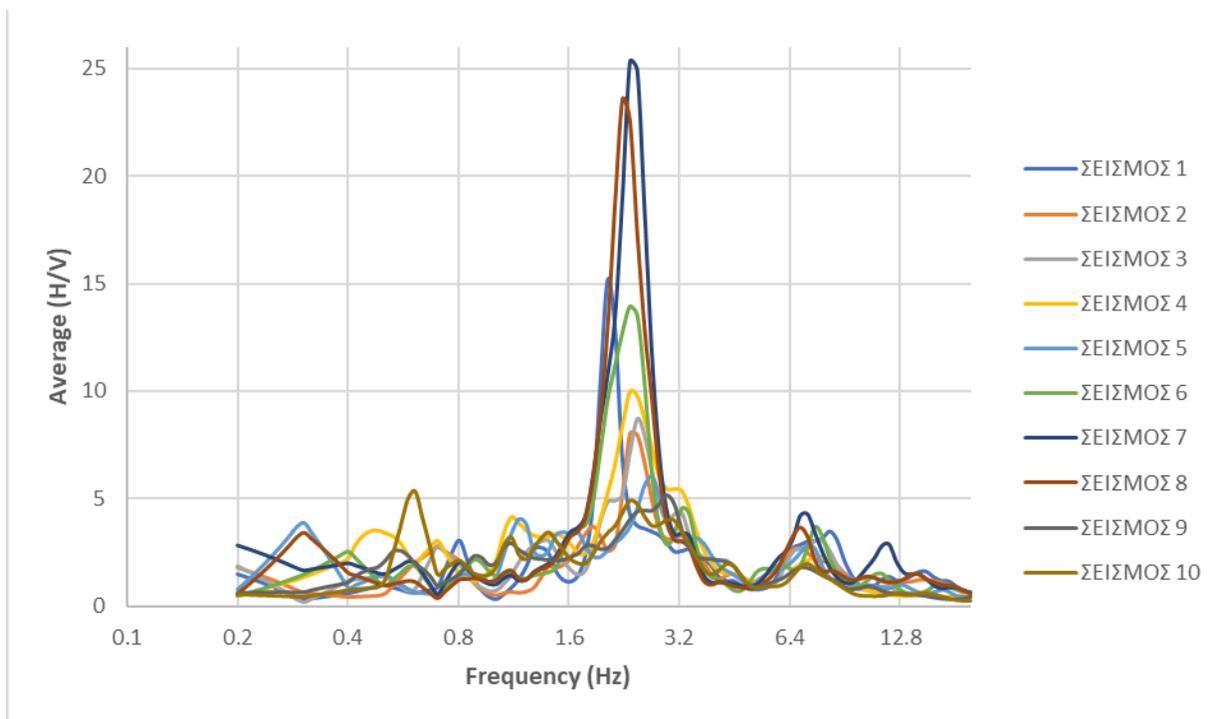
Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά κυμάτων S των σεισμικών καταγραφών που κατέγραψε ο σταθμός STL1

α/α	f_1 (Hz) Δεσπόζουσα	Αριθμός παραθύρων (βλ. Παράρτημα)	Μέγεθος παραθύρων	Min STA/LTA	Max STA/LTA
1	2.04706	1	10.00s	0.20	3.00
2	2.35362	1	10.00s	0.20	3.00
3	2.46569	1	10.00s	0.20	3.00
4	2.35362	2	10.00s	0.20	3.00
5	2.70610	1	10.00s	0.20	3.00
6	2.35362	1	10.00s	0.20	3.00
7	2.35362	1	10.00s	0.20	3.00
8	2.24665	1	10.00s	0.20	3.00
9	2.96994	3	10.00s	0.20	3.00
10	0.610771	1	10.00s	0.20	3.00

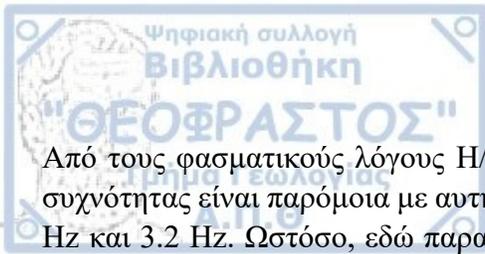
Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν κι εδώ είναι ίδιες με αυτές του εδαφικού μικροθορύβου, με εξαίρεση το μέγεθος των παραθύρων. Η θεμελιώδης συχνότητα f_0 δεν αναφέρεται στους Πίνακες 3 και 4 καθώς δεν διακρίνεται τόσο εύκολα και από τους φασματικούς λόγους H/V των S κυμάτων παρατηρούμε ότι για τιμές μικρότερες του 1 Hz τα αποτελέσματα δεν είναι τόσο αξιόπιστα.



Σχήμα 4.7. Διάγραμμα των average H/V προς Frequency για όλες τις σεισμικές καταγραφές με βάση όλη τη διάρκεια της καταγραφής.



Σχήμα 4.8. Διάγραμμα των average H/V προς Frequency των κυμάτων S για όλες τις σεισμικές καταγραφές.



Από τους φασματικούς λόγους H/V που προέκυψαν παρατηρούμε ότι η τιμή της δεσπόζουσας συχνότητας είναι παρόμοια με αυτήν του εδαφικού μικροθορύβου, δηλαδή κυμαίνεται μεταξύ 2.5 Hz και 3.2 Hz. Ωστόσο, εδώ παρατηρούμε μεγαλύτερα πλάτη και ιδιαίτερα στους φασματικούς λόγους H/V των S κυμάτων (Σχήμα 4.8).

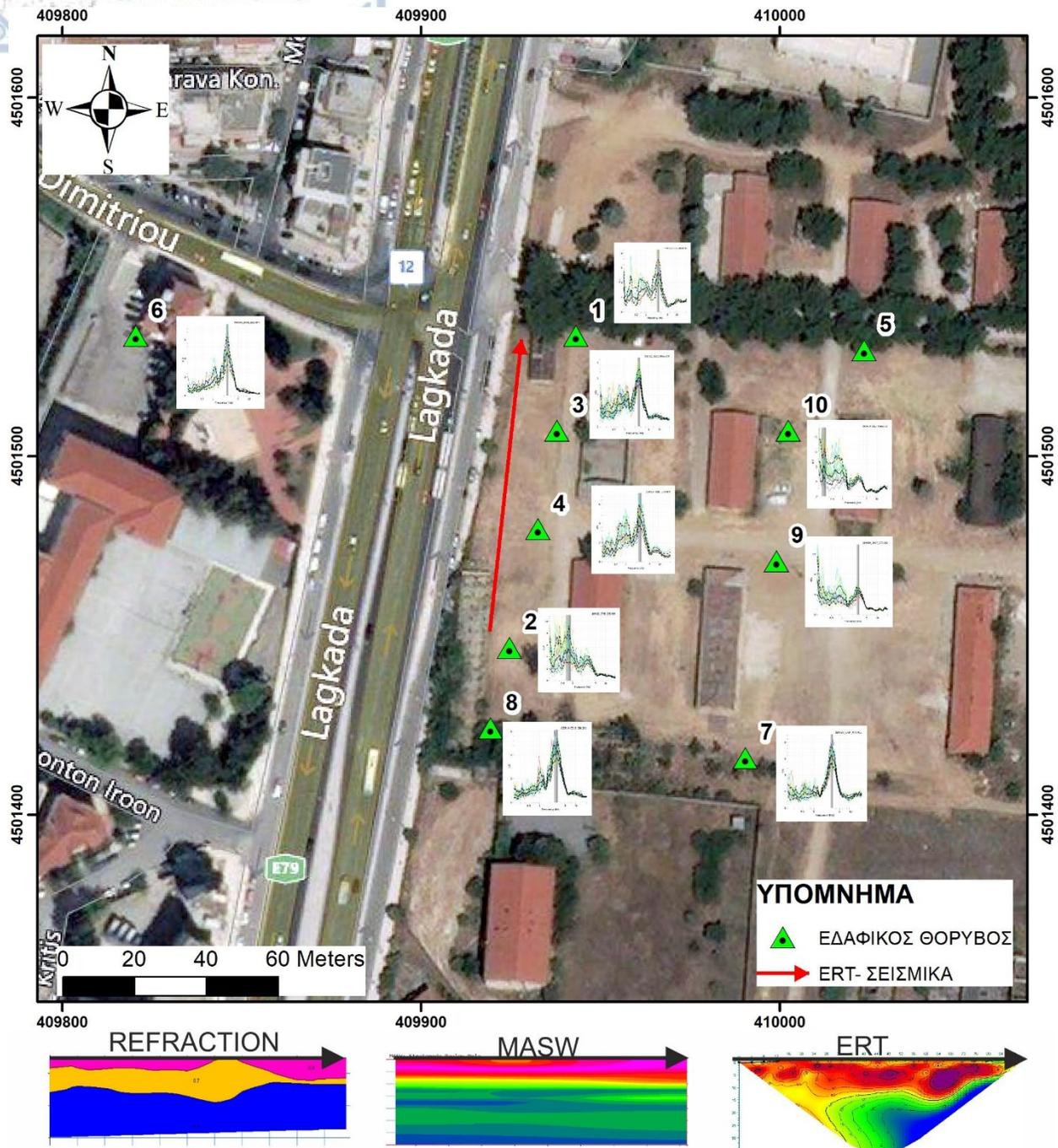
Επομένως, όπως φαίνεται από τους φασματικούς λόγους H/V του μικροθορύβου και των σεισμικών καταγραφών, η θεμελιώδης συχνότητα υπολογίζεται γύρω στο 1 Hz και αφορά έναν σχηματισμό λεπτόκοκκων υλικών (πιθανόν συμπαγούς αργίλου) που φθάνει προσεγγιστικά το βάθος των 100 έως 150 μέτρων επικάθεται στο υπόβαθρο το οποίο αποτελείται από μεταμορφωμένους σχηματισμούς. Θέτοντας ως δεσπόζουσα την $f_1=2.5$ Hz και μία μέση ταχύτητα εγκαρσίων κυμάτων $V_s=320$ m/s (από τα αποτελέσματα της MASW) στον τύπο $f = V_s/4h$ παίρνουμε μία τιμή βάθους 32 μέτρων το οποίο είναι σε ικανοποιητική συμφωνία με την τιμή των 30 μέτρων που εκτιμήθηκε για το δεύτερο πακέτο σχηματισμών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων (Σχήμα 5.1) της σεισμικής και ηλεκτρικής διασκόπησης παρατηρούμε ένα επιφανειακό στρώμα πάχους 10-12 μέτρων περίπου, το οποίο έχει υψηλές αντιστάσεις και μικρές σχετικά ταχύτητες το οποίο, με βάση τη γεωλογία της περιοχής φαίνεται να αποτελείται από χαλαρές αποθέσεις αδρόκοκκων υλικών. Βαθύτερα συναντάμε ένα πακέτο σχηματισμών όπου οι ταχύτητες των επιμήκων και εγκαρσίων κυμάτων σταδιακά αυξάνονται ενώ οι αντιστάσεις μειώνονται. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη γεωλογική πληροφορία, υποδηλώνει ότι μεταβαίνουμε σε πιο λεπτόκοκκα υλικά όσο αυξάνεται το βάθος και συναντάμε συμπαγή άργιλο. Από την ηλεκτρική τομογραφία φαίνεται και μία πλευρική μετάβαση από καθαρά αργιλικούς σχηματισμούς στο βόρειο τμήμα της τομής μας σε προσμίξεις με αμμοχάλικα προς το νότιο τμήμα. Ωστόσο, υπάρχει μία μικρή απόκλιση στο βάθος αυτού του σχηματισμού όπως προκύπτει από τη σεισμική και την ηλεκτρική διασκόπηση σε σχέση με το βάθος που υπολογίζεται με τις μετρήσεις εδαφικού θορύβου. Στην πρώτη περίπτωση (ηλεκτρικά και σεισμικά) εκτιμάται ένα βάθος 30 μέτρων περίπου και στην δεύτερη (μετρήσεις εδαφικού θορύβου), με βάση τη δεσπόζουσα συχνότητα $f_1=2.5-3.2$ Hz, βρίσκουμε ένα βάθος 30-35 μέτρων. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την χρησιμότητα περισσότερων δεδομένων είτε από γεωτρήσεις είτε από γεωφυσική διασκόπηση με μεγαλύτερο μήκος της τομής ERT. Με τον τρόπο αυτό θα έχουμε εικόνα του μοντέλου της περιοχής για μεγαλύτερα βάθη και θα μπορούμε να ορίσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια το όριο του ενός σχηματισμού από το άλλο. Τέλος, ακολουθεί ένα τρίτο στρώμα το οποίο, σύμφωνα με τη θεμελιώδη συχνότητα $f_0=0.7-1.3$ Hz που προέκυψε από τον φασματικό λόγο H/V του εδαφικού θορύβου και τα δεδομένα του επιταχυνσιογράφου, φτάνει μέχρι το βάθος των 100 έως 150 μέτρων περίπου και επικάθεται επάνω στα κρυσταλλικά μεταμορφωμένα και πιο συμπαγή πετρώματα του υποβάθρου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτει ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα που αφορά την βέλτιστη σειρά υλοποίησης τέτοιου είδους γεωφυσικών μετρήσεων. Προτείνεται λοιπόν να υλοποιούνται πρώτα μετρήσεις εδαφικού θορύβου κι επεξεργασία δεδομένων επιταχυνσιογράφου ώστε να προκύπτει ένα αρχικό μοντέλο των εδαφικών – γεωλογικών σχηματισμών και έπειτα να ακολουθεί η γεωφυσική διασκόπηση. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να γίνει η κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων των ηλεκτρικών και σεισμικών μετρήσεων ώστε να έχουμε την καλύτερη δυνατή συσχέτιση των αποτελεσμάτων και να εξάγουμε με αυξημένη αξιοπιστία το μοντέλο της περιοχής έρευνας.

Τελικά, προκύπτει πως οι συγκεκριμένες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία είναι κατάλληλες για τη γεωφυσική και γεωτεχνική τεκμηρίωση της θέσης του σταθμού επιταχυνσιογράφου στη Σταυρούπολη.



Σχήμα 5.1. Παρουσίαση όλων των αποτελεσμάτων.



Bard, P.-Y., 1999. Microtremor Measurement: A Tool for Site Effect Estimation. The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 1251-1279p.

Bard P.-Y. et al., 2010. From Non-invasive Site Characterization to Site Amplification: Recent Advances in the Use of Ambient Vibration Measurements. Chapter 5. 105-123.

Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. SESAME European research project. December 2004

Martin A., Yong A., Stephenson W., Boatwright J., Diehl J. 2017. Geophysical characterization of seismic station sites in the United States-The importance of a flexible, multi-method approach. *16th World Conference on Earthquake, January 9th to 13th 2017, Santiago Chile*. Paper N° 2160

Nakamura, Y., 1989. A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, (Vol. 30), 25-33p.

Nogoshi, M. and Igarashi, T., 1971. On the Amplitude Characteristics of Microtremor (Part 2) (in Japanese with English Abstract). Journal of Seismological Society of Japan (Vol. 24), 24-40p.

Savva A., Rathje E., Cox B., Zalachoris G., Ayushi T., Yust M., Young B.. 2018. Site Characterization of TexNet Seismic Stations Using Different Geophysical Approaches. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V GSP 293*, 518-527.

Ελληνική βιβλιογραφία

Παπαζάχος, Β.Κ., Καρακαϊσης, Γ.Φ., Χατζηδημητρίου, Π.Μ. 2005. *Εισαγωγή στη Σεισμολογία*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ

Παπαζάχος, Κ., Παπαζάχος, Β. 2013. *Εισαγωγή στη Γεωφυσική*. 2^η έκδοση. Εκδόσεις ΖΗΤΗ

Παπαζάχος, Βασίλης Κ..1996. *Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ

Διαδικτυακές πηγές

<http://www.geopsy.org/> (ανακτήθηκε την 17-02-2020)

<https://www.guralp.com/sw/scream.shtml> (ανακτήθηκε την 17-02-2020)

<https://byjus.com/physics/p-wave/> (ανακτήθηκε την 30-10-2019)

<https://slideplayer.com/slide/7544811/> (ανακτήθηκε την 30-10-2019)

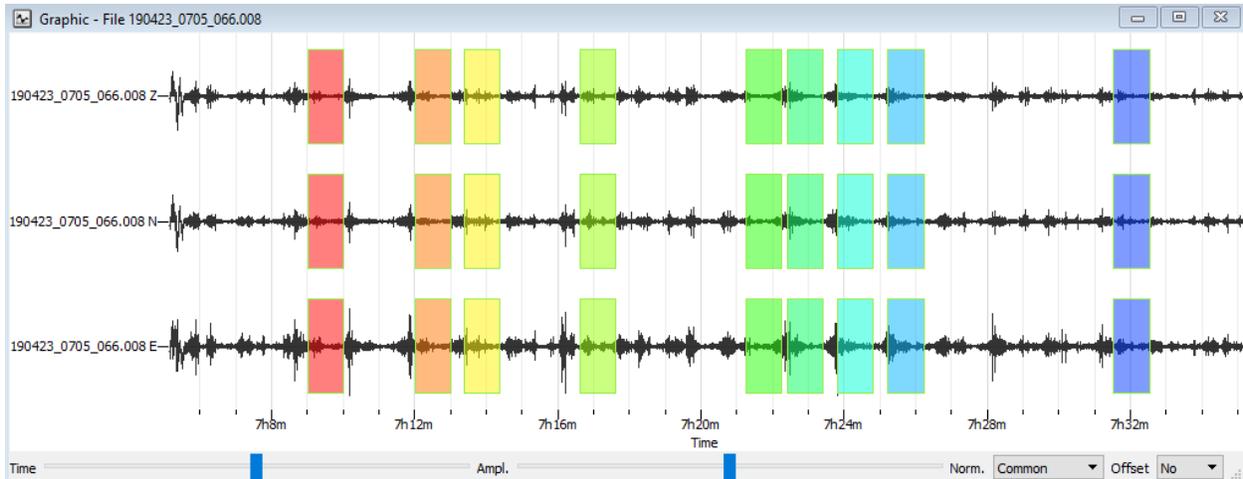
https://www.geosphereinc.com/seis_refraction.html (ανακτήθηκε την 30-10-2019)

<http://masw.com/Seismograph.html> (ανακτήθηκε την 30-10-2019)

<http://masw.com/MASW-Applications.html> (ανακτήθηκε την 30-10-2019)

http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/PDF/LEC3_NEW.pdf (ανακτήθηκε την 30-10-2019)

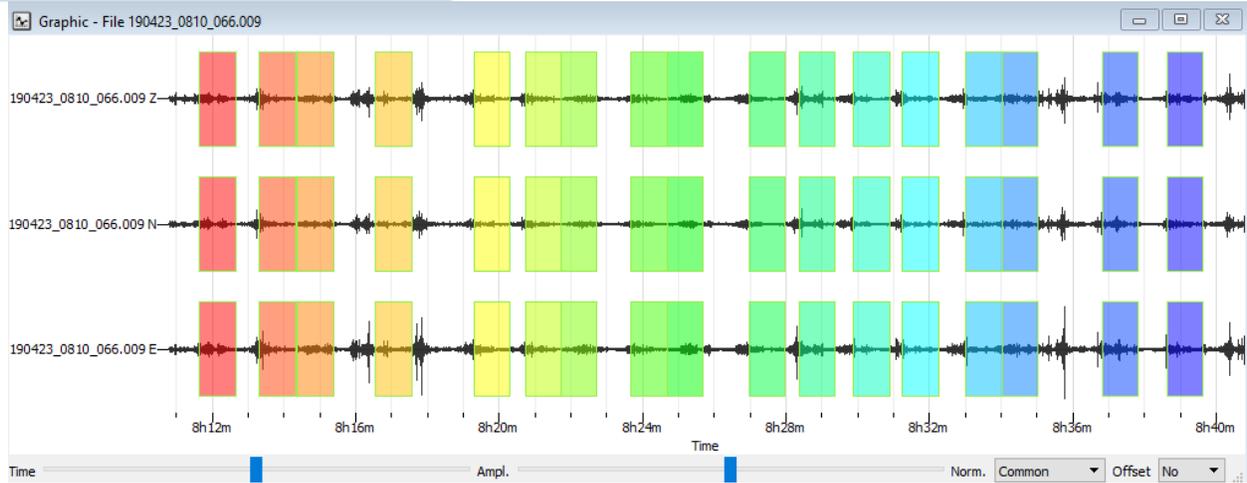
ΘΕΣΗ 1:



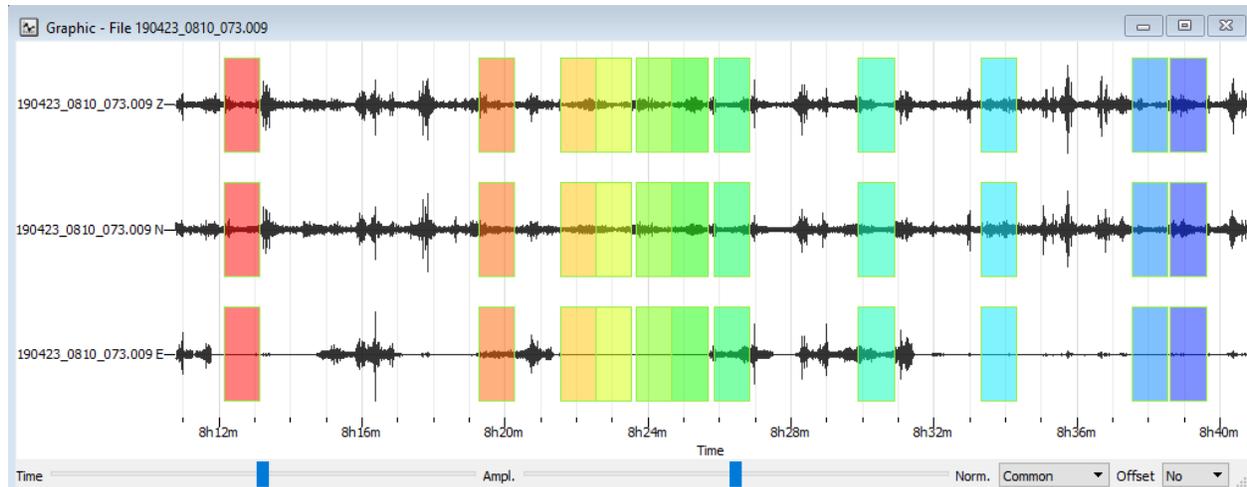
ΘΕΣΗ 2:



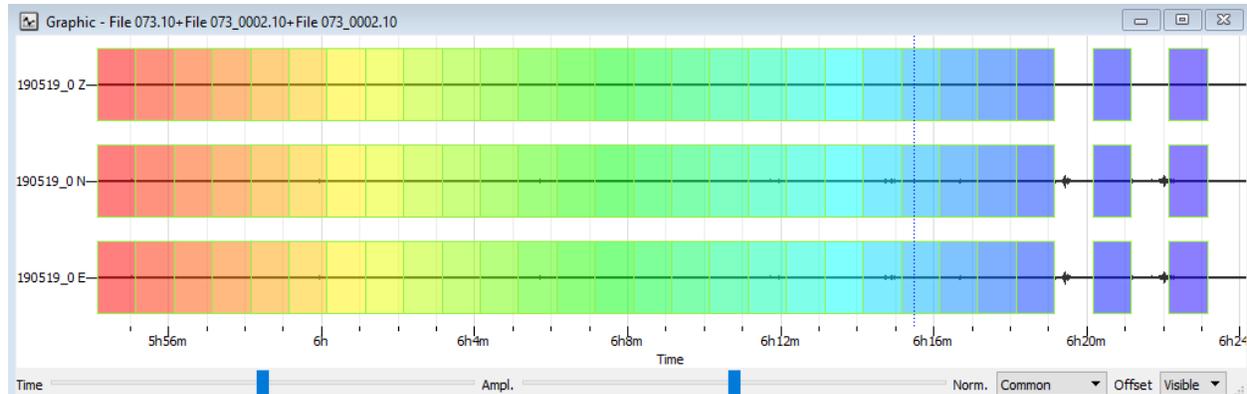
ΘΕΣΗ 3:



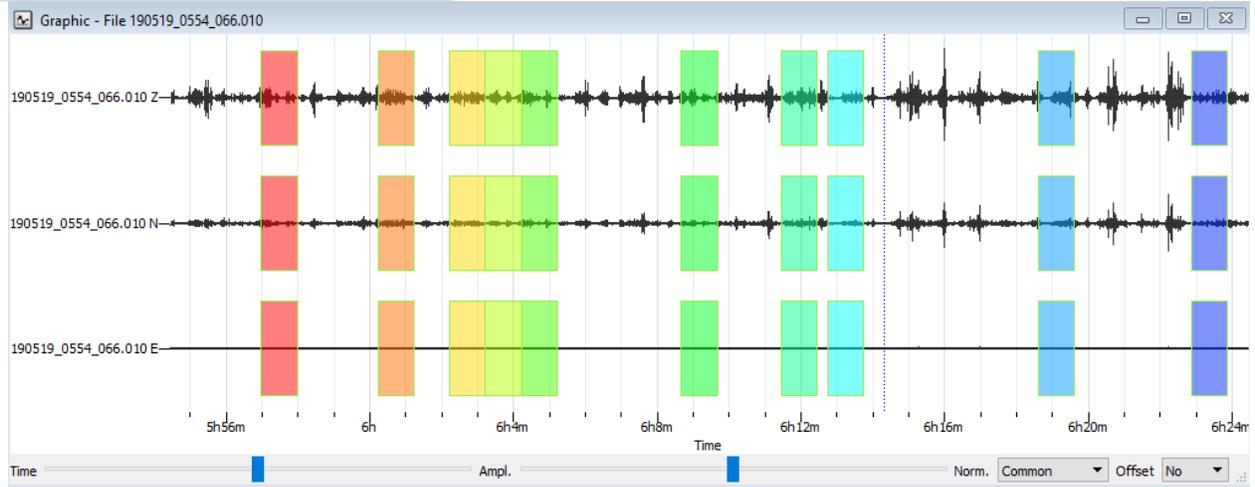
ΘΕΣΗ 4:



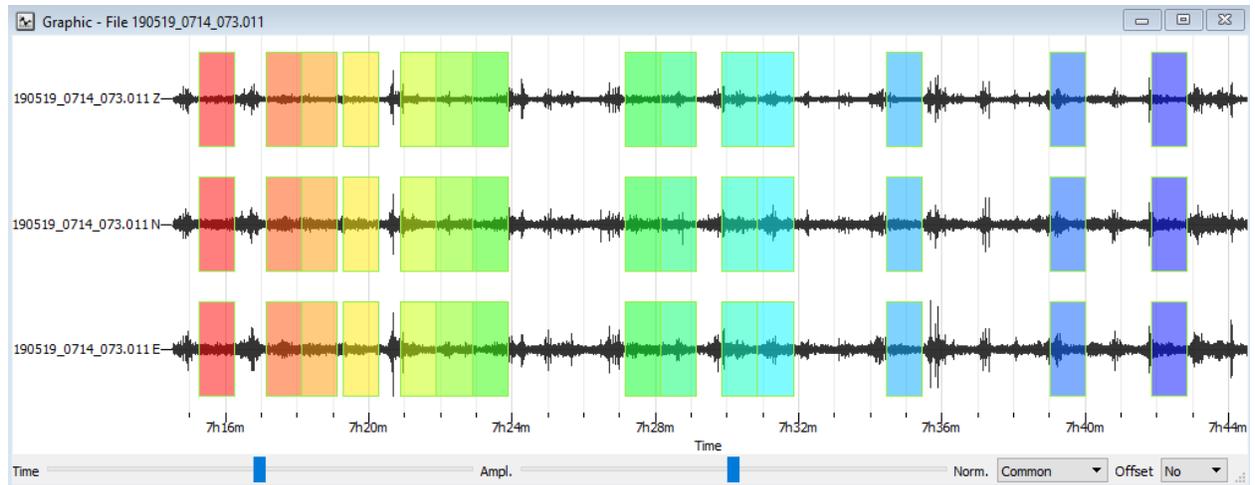
ΘΕΣΗ 5:



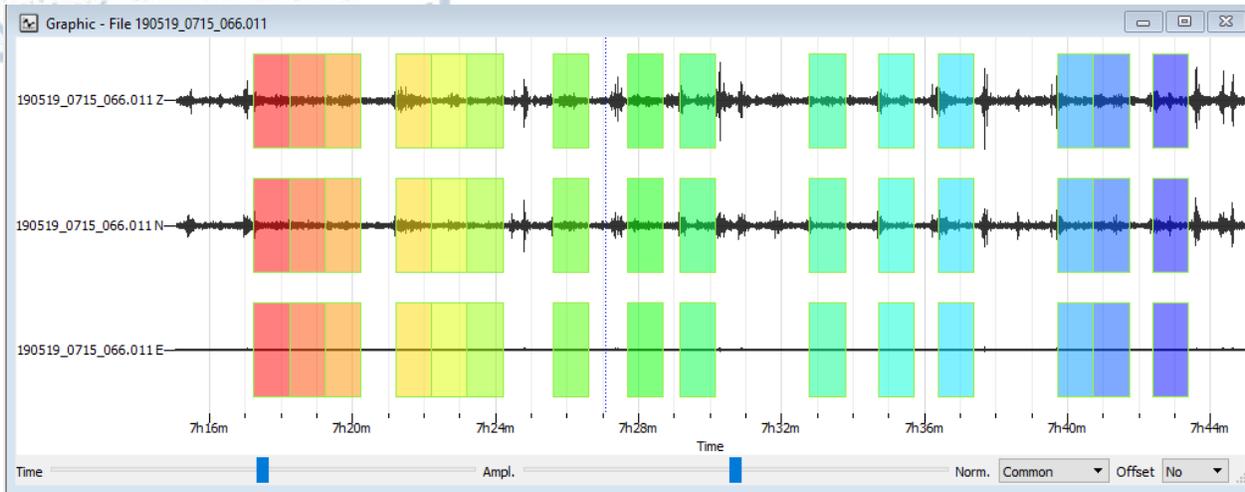
ΘΕΣΗ 6:



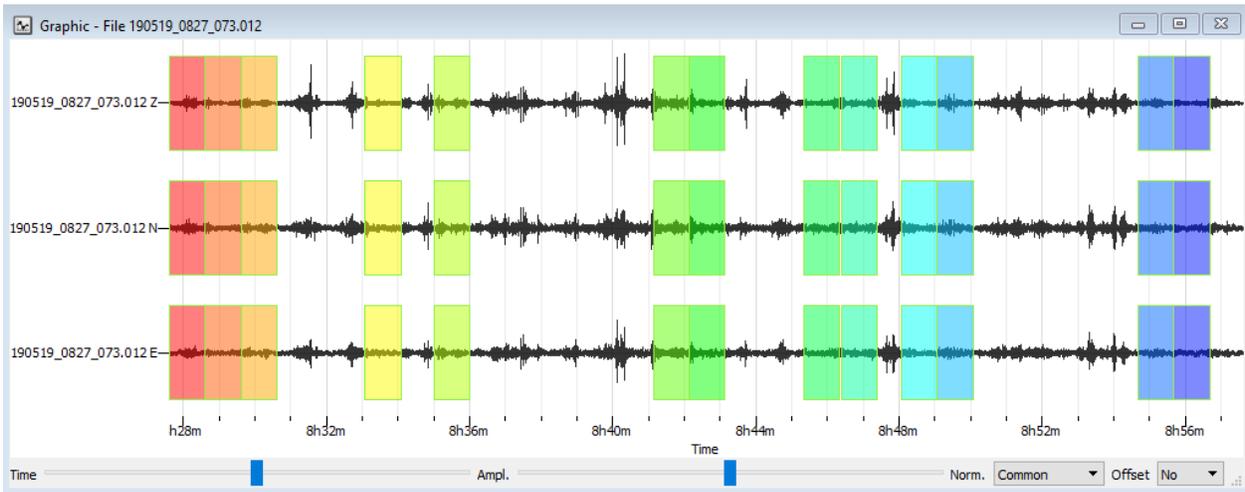
ΘΕΣΗ 7:



ΘΕΣΗ 8:



ΘΕΣΗ 9:

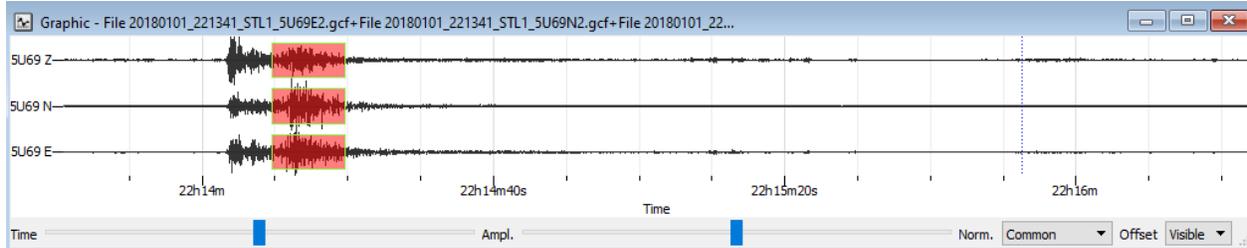


ΘΕΣΗ 10:

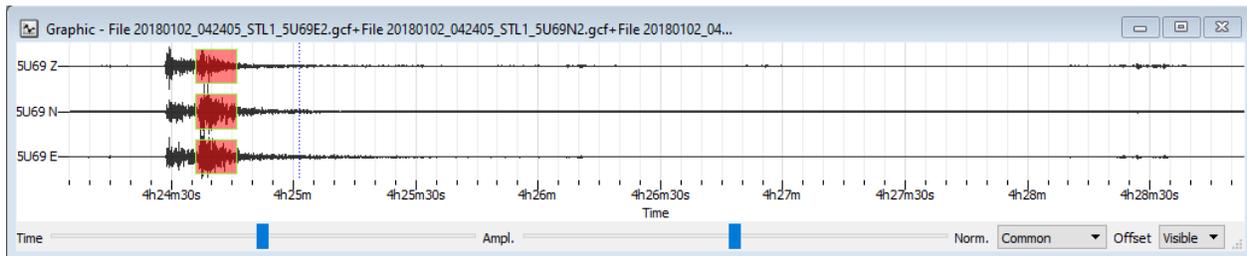


ΠΑΡΑΘΥΡΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ Σ ΤΩΝ
ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ ΣΤΑΥΡΟΥΠΟΛΗΣ

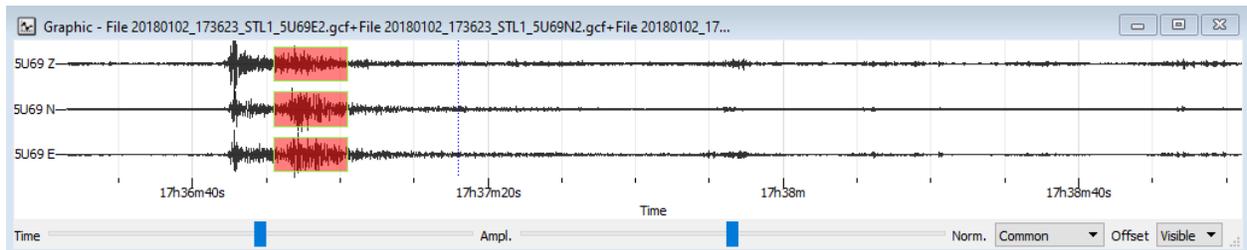
ΣΕΙΣΜΟΣ 1:



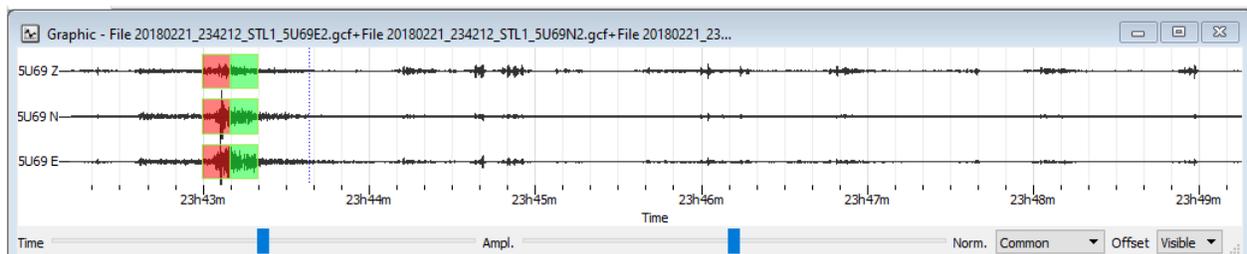
ΣΕΙΣΜΟΣ 2:



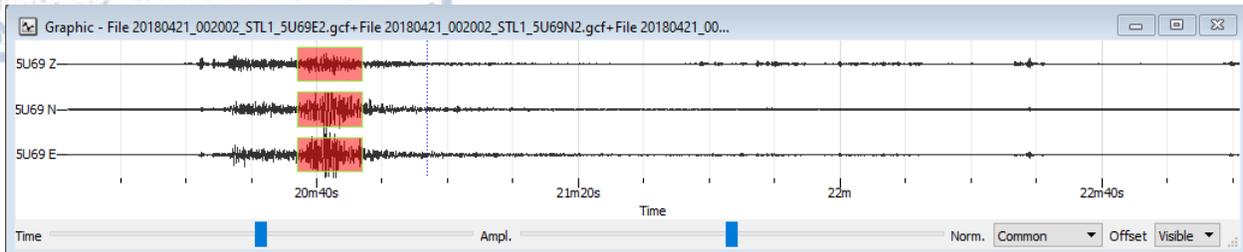
ΣΕΙΣΜΟΣ 3:



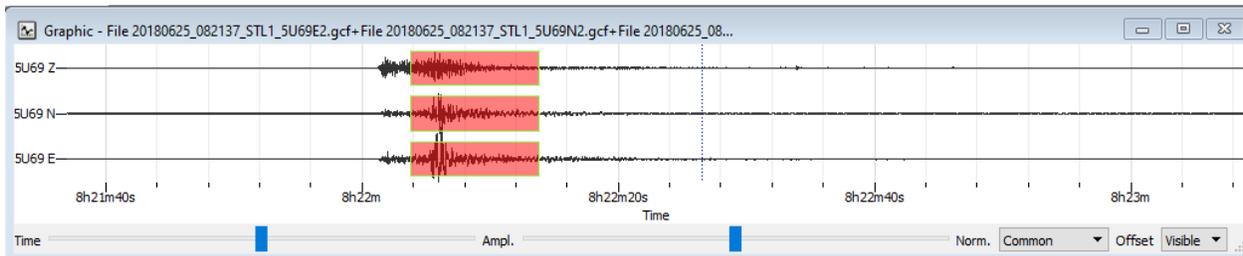
ΣΕΙΣΜΟΣ 4:



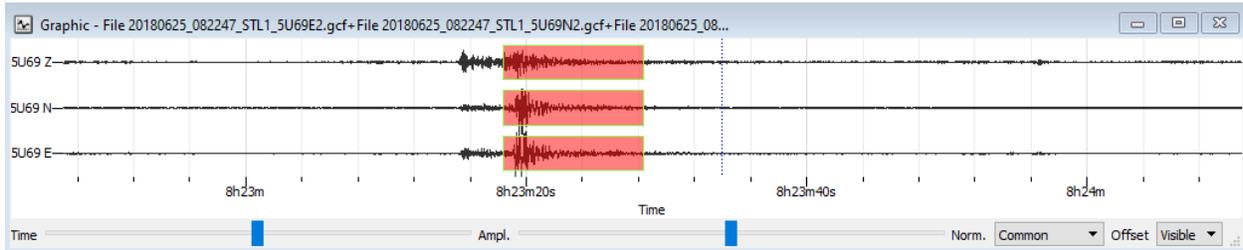
ΣΕΙΣΜΟΣ 5:



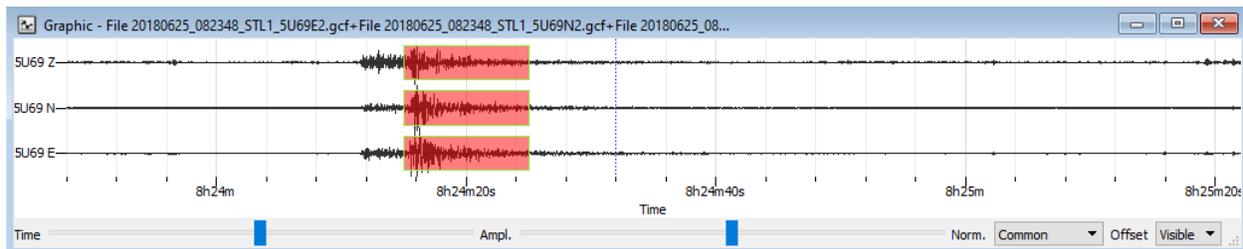
ΣΕΙΣΜΟΣ 6:



ΣΕΙΣΜΟΣ 7:



ΣΕΙΣΜΟΣ 8:



ΣΕΙΣΜΟΣ 9:

