

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Γεωτεχνικής



National Technical University of Athens

School of Civil Engineering

Geotechnical Division

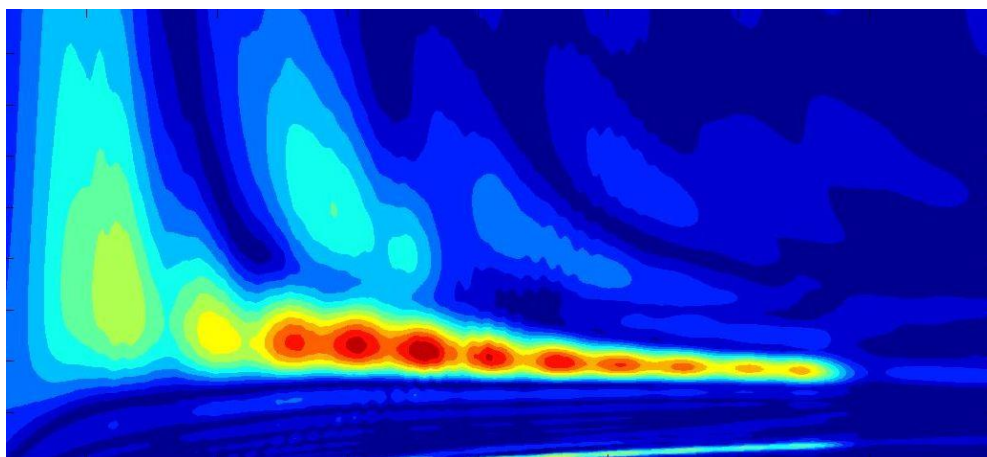
Διπλωματική εργασία

ΓΚΟΝΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Επιβλέπων:

Επίκουρος Καθηγητής Ν. Γερόλυμος

Αριθμητική Προσομοίωση Γεωφυσικής Διασκόπησης με τη Μέθοδο M.A.S.W. & Ανάπτυξη Αλγορίθμου Μόρφωσης Εδαφικής Τομής Σχεδιασμού



Numerical Simulation of M.A.S.W. Geophysical Exploration Method & Development of Algorithm for Determining the Design Soil Profile

Diploma Thesis by

GKONIS KONSTANTINOS

Supervised by

Assistant Professor N. Gerolymos

Αθήνα, Νοέμβριος 2016

Athens, November 2016

Ευχαριστίες...

Ολοκληρώνοντας την διπλωματική μου εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν και με στήριξαν τόσο κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας όσο και στο σύνολο της ακαδημαϊκής μου πορείας.

Αρχικά ευχαριστώ θερμά τον κ. Νίκο Γερόλυμο επιβέπων της διπλωματικής μου εργασίας, για την συνεργασία που είχαμε, για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε και την κατανόηση που έδειξε στο διάστημα εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Η περίοδος της συνεργασίας μας ήταν ιδιαίτερα επικοινωνιακή καθώς οι γνώσεις και οι εμπειρίες που αποκόμισα αποτελούν εφόδιο για την μελλοντική επαγγελματική και προσωπική μου πορεία.

Στη συνέχεια ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στου συμφοιτητές και φίλους μου για την πολύτιμη ψυχολογική και όχι μόνο υποστήριξη τους σε κάθε στάδιο της ακαδημαϊκής μου καριέρας.

Τέλος το μεγαλύτερο ευχαριστώ ανήκει στην οικογένεια μου, στους γονείς μου Ανδρέα και Βασιλική, στην γιαγιά μου Ευγενία και στον αδερφό μου Δημήτρη για την αμέριστη συμπαράστασή τους και την στήριξη που μου παρείχαν απλόχερα σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ -ABSTRACT

Περίληψη

Ο προσδιορισμός των ταχυτήτων διάδοσης των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων από δεδομένα συναφούς εδαφικού θορύβου και συγκεκριμένα από επιφανειακά κύματα Rayleigh, αποτελεί μία από τα πιο σύγχρονα και συνεχώς εξελισσόμενα πεδία της γεωτεχνικής και περιβαλλοντικής γεωφυσικής. Η παρούσα διπλωματική στοχεύει στην κατάρτιση καμπυλών διασποράς των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και στην διαμόρφωση τομών του υπεδάφους, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων (**Multichannel Analysis of Surface Waves - M.A.S.W.**).

Η μέθοδος πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων ανήκει στην κατηγορία των επιτόπου δοκιμών και συγκεκριμένα στις δοκιμές μικρού πλάτους παραμόρφωσης. Για να γίνουν αντιληπτά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου M.A.S.W. γίνεται μία αναφορά στις κυριότερες επιτόπου δοκιμές και παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη της μεθόδου από τα πρώτα της βήματα έως και τη σύγχρονη εποχή.

Η αναλυτική παρουσίαση των επιμέρους σταδίων που συνθέτουν την πειραματική διαδικασία της μεθόδου M.A.S.W. και η περιγραφή του εξοπλισμού και των χαρακτηριστικών αυτού δε θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί εάν πρώτα δεν είχε γίνει μία συνοπτική περιγραφή των χαρακτηριστικών των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh, δίνοντας βάση στο φαινόμενο της διασποράς το οποίο αποτελεί τη βάση λειτουργίας της μεθόδου.

Για την επίτευξη του στόχου της διπλωματικής εργασίας προσομοιώθηκαν εφαρμογές της μεθόδου σε εδαφικούς σχηματισμούς με διάφορα χαρακτηριστικά και υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, επικεντρώνοντας στην ανίχνευση των παραμέτρων εκείνων που οδηγούν στα βέλτιστα αποτελέσματα. Η διαδικασία αυτή ξεκινάει με την προσομοίωση των μετρήσεων πεδίου και την απόκτηση των σεισμικών καταγραφών στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS. Για την ανάγνωση των σεισμικών δεδομένων και τον προσδιορισμό των καμπυλών διασποράς χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MATHCAD. Ακόμα για την διαχείριση και την απεικόνιση των καμπυλών διασποράς, την εκτίμηση της εδαφικής τομής σχεδιασμού και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων αναπτύχθηκε αλγόριθμος σε γλώσσα MATLAB.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας αυτής αφορούν την ερμηνεία των καμπυλών διασποράς και υποδεικνύουν πως η δεσπόζουσα συχνότητα του φορτίου της σεισμικής πηγής πρέπει να είναι μικρότερη της ιδιοσυχνότητας του εδάφους που ερευνάται. Τέλος, η μέθοδος M.A.S.W. παρουσιάζει αστοχίες σε περιπτώσεις όπου στο έδαφος εμφανίζεται ενδιάμεση στρώση μικρότερης ταχύτητας διάδοσης V_s από την υπερκείμενη στρώση.

Abstract

The determination of shear wave velocity from the ground roll and especially from Rayleigh surface waves, consists one of the most recent and continuously growing fields of geotechnical and environmental geophysics. This diploma thesis targets to the formation of dispersion curves of Rayleigh surface waves and the estimation of earth model by using the Multichannel Analysis of Surface Wave (M.A.S.W.) method.

The M.A.S.W. method belongs to a testing category that takes place on the field. The most important field tests are mentioned, along with the presentation of the historical evolution of the M.A.S.W. method, in order to highlight the advantages and disadvantages of it.

The detailed presentation of each stage of the overall procedure and the description of the field equipment and its features could not be accomplished before describing the Rayleigh surface waves characteristics, by emphasising on the dispersion of Rayleigh waves, which is the basis of the M.A.S.W. method.

In order to achieve the main goal of this certain diploma thesis, several method's applications were simulated in soils with different formations and seismic loads, focusing in the detection of the parameters that lead to the optimal results. This process begins with the field procedure and the data acquisition simulation by using the PLAXIS programme. The seismic data are used as input in the MATHCAD programme which gives as outputs the dispersion curves. Furthermore, an algorithm was developed in MATLAB for the management and display of the extracted dispersion curves, the estimation of the earth model and the presentation of the final results.

The main conclusions of the diploma thesis are about the reading of the dispersion curves and indicate that the seismic load's main frequency must be smaller than the domain frequency of the testing soil. Finally, the M.A.S.W. method

is inaccurate in cases where a layer with lower shear wave velocity than the overlying layer is appeared.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ -ABSTRACT	v
Περίληψη	v
Abstract	vii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο – Στόχος.....	1
1.2 Δοκιμές πεδίου – Ιστορική Αναδρομή	2
1.2.1 Δοκιμές - Μέτρησεις Πεδίου.....	2
1.2.2 Ιστορική Αναδρομή Μεθόδου M.A.S.W.	9
1.3 Σύνοψη Διπλωματικής Εργασίας	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Η Μέθοδος M.A.S.W.	14
2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο	14
2.1.1 Επιφανειακά κύματα Rayleigh	14
2.1.1.1 Χαρακτηριστικά των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh	15
2.1.1.2 Διασπορά επιφανειακών κυμάτων Rayleigh	16
2.1.2 Καμπύλες διασποράς	17
2.2 Διαδικασία μετρήσεων μεθόδου M.A.S.W.....	19
2.2.1 Εξοπλισμός και διαδικασία συλλογής δεδομένων	19
2.2.1.1 Σεισμική πηγή.....	20
2.2.1.2 Οι δέκτες	21
2.2.1.3 Διάταξη του εξοπλισμού στο πεδίο	22
2.2.1.4 Παράμετροι καταγραφής.....	23
2.2.2 Ανάλυση διασποράς	25
2.2.3 Εκτίμηση παραμέτρων εδαφικού μοντέλου.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Μεθοδολογία Αριθμητικών Αναλύσεων	30
3.1 Εισαγωγή	30
3.2 Προσομοίωση μετρήσεων πεδίου	31

3.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά μοντέλου (Model Properties).....	31
3.2.1.1 Τύπος μοντέλου	31
3.2.1.2 Τύπος στοιχείων.....	32
3.2.2 Μοντελοποίηση εδάφους (ground modeling).....	33
3.2.2.1 Απόσβεση.....	34
3.2.3 Προσομοίωση διάταξης και χαρακτηριστικών εξοπλισμού	36
3.2.3.1 Προσομοίωση σεισμικής πηγής.....	36
3.2.3.2 Προσομοίωση καναλιών καταγραφής.....	38
3.2.4 Δημιουργία κανάβου π.σ. και υπολογιστική διαδικασία.....	39
3.2.4.1 Κατάρτιση κανάβου π.σ.	39
3.2.4.2 Φάσεις υπολογισμού	40
3.2.5 Αποθήκευση καταγραφών.....	41
3.3 Επεξεργασία καταγραφών	43
3.4 Εκτίμηση κατανομής Vs	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Παραμετρική διερεύνηση.....	55
4.1 Εδαφικός σχηματισμός Soil_1.....	55
4.1.1 Φόρτιση με επιταχυνσιογράφημα.....	55
4.1.2 Εκτίμηση θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας του εδάφους.....	64
4.1.3 Φόρτιση ημίτονου.....	67
4.1.3.1 Ημίτονο δεσπόζουσας συχνότητας 1Hz.....	68
4.1.3.2 Ημίτονο δεσπόζουσας συχνότητας 2Hz.....	74
4.1.4 Προσομοίωση εδαφικού σχηματισμού (Soil_1) με έδαφος 5 στρώσεων	77
4.2 Ανάστροφο εδαφικό προφίλ	81
4.3 Ενδιάμεση στρώση χαμηλότερης Vs.....	89
4.3.1 Εδαφικός σχηματισμός Soil_1 με ενδιάμεση στρώση.....	89
4.3.2 Εδαφικοί σχηματισμοί 5-6 στρώσεων με ενδιάμεση στρώση	92

4.4 Εφαρμογή σε πρόβλημα 2 διαστάσεων	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Συμπεράσματα	104
Βιβλιογραφικές Αναφορές	108
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	110
1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων των αναλύσεων για το έδαφος Soil_2	110
2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων ανάλυση για τον εδαφικό σχηματισμό Soil_1 για ημίτονο δεσπίζουσας συχνότητας μεγαλύτερης της ιδιοσυχνότητας του εδάφους	118

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο – Στόχος

Η ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων V_s αποτελεί μία βασική και πολυδιάστατη πληροφορία στην γεωτεχνική μηχανική καθώς συσχετίζεται άμεσα με τα δυναμικά μέτρα δυσκαμψίας του εδάφους και ακόμα να χρησιμοποιηθεί ως παράμετρος ταξινόμησης των εδαφών σχετικά με την σεισμική τους απόκριση, συνεπώς είναι πολύ σημαντικό ο προσδιορισμός της να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής. Οι μέθοδοι και οι τεχνικές χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της V_s παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία και διακρίνονται σε εργαστηριακές δοκιμές και δοκιμές που γίνονται στο πεδίο. Η παρούσα εργασία εστιάζει στις μετρήσεις πεδίου και συγκεκριμένα στη μέθοδο πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων, ωστόσο για λόγους πληρότητας περιγράφονται συνοπτικά οι δημοφιλέστερες δοκιμές πεδίου.

Η Πολυκάναλη Ανάλυση Επιφανειακών Κυμάτων (**M**ultichannel **A**nalysis of **S**urface **W**aves – **M.A.S.W.**) είναι μία σύγχρονη σεισμική μέθοδος εκτίμησης της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων στη γεωτεχνική γεωφυσική. Θεωρείται ίσως η καταλληλότερη γεωφυσική μέθοδος για γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές καθώς αποτελεί μία αξιόπιστη μέθοδο, με επαρκές

θεωρητικό υπόβαθρο που διακρίνεται για την απλότητα και την ταχύτητα της εκτέλεσης της δοκιμής στο πεδίο. Αν και υπάρχουν μέθοδοι μεγαλύτερης ακρίβειας, όπως για παράδειγμα η διασκόπηση κυμάτων μεταξύ δύο γεωτρήσεων (Cross Hole), η μέθοδος M.A.S.W. πλεονεκτεί σημαντικά αφού για την εκτέλεση της δοκιμής δεν απαιτείται διάτρηση στεγανών γεωτρήσεων, καθώς είναι αποκλειστικά επιφανειακή, ούτε ιδιαίτερα εξειδικευμένος εξοπλισμός.

Ένας από τους στόχους της διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση της μεθόδου M.A.S.W. και της διαδικασίας μέσω της οποίας αναλύονται τα επιφανειακά κύματα Rayleigh με σκοπό την εκτίμηση της κατανομής των εγκάρσιων ταχυτήτων V_s με το βάθος. Έτσι αναπτύχθηκαν εργαλεία προς αυτή τη κατεύθυνση τόσο για την αριθμητική προσομοίωση της μεθόδου και την επεξεργασία των καταγραφών όσο και την εκτίμηση της τομής του υπεδάφους. Επίσης ζητούμενο είναι ο εντοπισμός των συνθηκών υπό τις οποίες η μέθοδος φαίνεται να αποδίδει καλύτερα και η ανίχνευση των ιδιαιτεροτήτων που εμποδίζουν την ομαλή λειτουργία της και αλλοιώνουν την ευκρίνειά της. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις σε διάφορα εδαφικά προφίλ υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης έως ότου να καλυφθούν ικανοποιητικά οι ανωτέρω απαιτήσεις.

1.2 Δοκιμές πεδίου – Ιστορική Αναδρομή

1.2.1 Δοκιμές - Μέτρησις Πεδίου

Για την μέτρηση των δυναμικών ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς των εδαφών γίνονται δοκιμές τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο των έργων. Οι μετρήσεις πεδίου στοχεύουν αφενός στη εκτίμηση της επιφανειακής γεωλογίας και της στρωματογραφίας των εδαφικών σχηματισμών και αφετέρου στον προσδιορισμό φυσικών, μηχανικών και δυναμικών ιδιοτήτων των εδαφών.

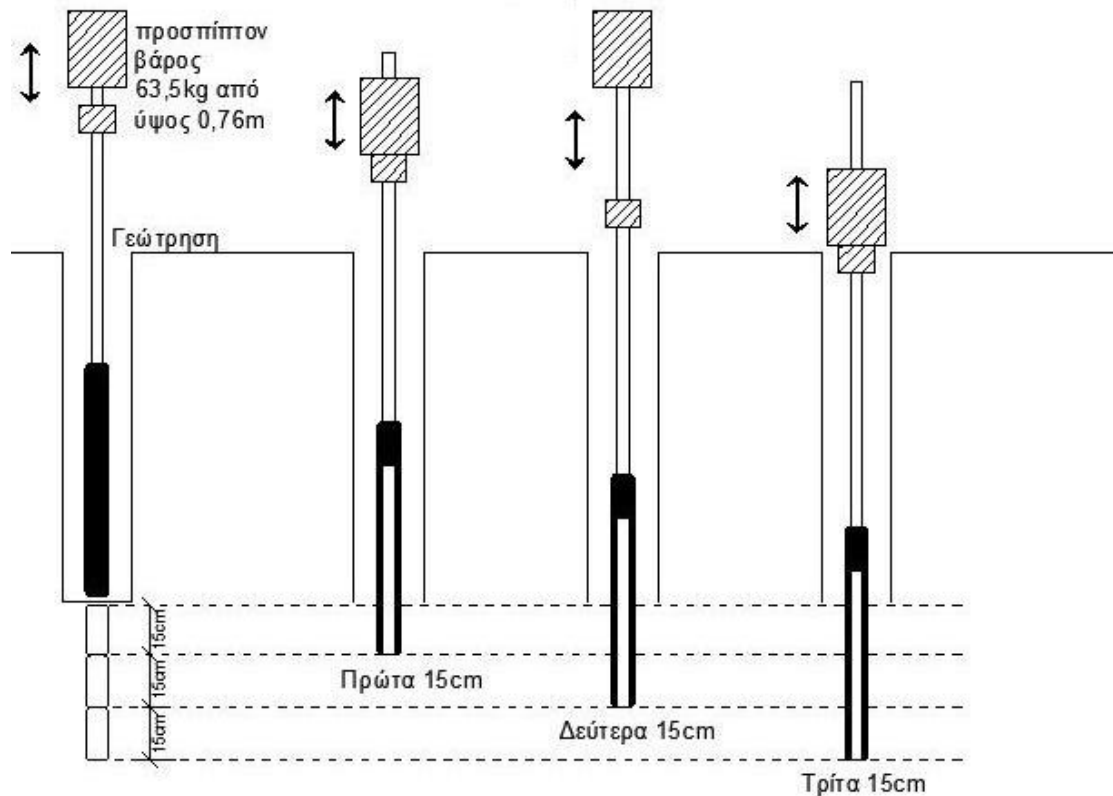
Η διακριτοποίηση των επιτόπου δοκιμών μπορεί να γίνει σε δύο άξονες. Αρχικά διακρίνονται ανάλογα με το εύρος των παραμορφώσεων στο οποίο επιδιώκεται η μέτρηση, σε δοκιμές μεγάλου πλάτους παραμόρφωσης και δοκιμές μικρού πλάτους

παραμόρφωσης. Σε δεύτερη φάση οι δοκιμές πεδίου θα μπορούσαν να ταξινομηθούν βάσει των συνθηκών που απαιτούνται για την λειτουργία τους, όπως για παράδειγμα σε αυτές που απαιτείται γεώτρηση για την μέτρηση των ζητούμενων μεγεθών, σε αυτές που απαιτείται κάποιας μορφής διάτρηση του εδάφους και τέλος σε αυτές που πραγματοποιούνται αποκλειστικά επιφανειακά. Ενδεικτικά δοκιμές που οι συνθήκες λειτουργίας τους απαιτούν γεώτρηση είναι η δοκιμή πρότυπης διείσδυσης (SPT), και οι δοκιμές Cross Hole, Up Hole και Down Hole, δοκιμές που προκαλούν διάτρηση στο έδαφος κατά την λήψη των μετρήσεων είναι η δοκιμή διείσδυσης κώνου (CPT) και οι δοκιμές πρεσσιομέτρου ενώ επιφανειακές δοκιμές θεωρούνται οι περισσότερες γεωφυσικές δοκιμές.

Οι πλέον διαδεδομένες δοκιμές μεγάλου πλάτους παραμόρφωσης είναι η δοκιμή πρότυπης διείσδυσης (SPT) και η δοκιμή κώνου (CPT). Σε αυτή τη κατηγορία ανήκουν επίσης μεταξύ άλλων η δοκιμή διείσδυσης σεισμικού κώνου (SCPT), που αποτελεί εξέλιξη της CPT, η δοκιμή επίπεδου διασταλομέτρου (DMT) και η δοκιμή πρεσσιομέτρου (PMT).

Η δοκιμή πρότυπης διείσδυσης (**Standard Penetration Test – SPT**) αποτελεί την πιο δημοφιλή δοκιμή εδαφομηχανικής στο πεδίο τα τελευταία 100 χρόνια. Ο εξοπλισμός της μεθόδου αποτελείται από έναν μεταλλικό σωλήνα, που φτάνει μέσω μίας γεώτρησης έως το βάθος μέτρησης, στου οποίου την άκρη είναι στερεωμένος ένας δειγματολήπτης. Η μέθοδος αποσκοπεί στον προσδιορισμό του αριθμού (N) των αναγκαίων κτύπων που απαιτούνται για κατακόρυφη διείσδυση του δειγματολήπτη κατά 30 εκατοστά. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται 3 φορές για διείσδυση ίση με 15 εκατοστά και λαμβάνονται υπόψη το άθροισμα των δύο τελευταίων καθώς τα πρώτα 15 εκατοστά αγνοούνται διότι θεωρούνται διαταραγμένα από τη διάνοιξη της γεώτρησης (σχήμα 1.1). Μερικά από τα μεγέθη που μπορούν να εκτιμηθούν μέσω της πρότυπης δοκιμής διείσδυσης είναι η σχετική πυκνότητα D_r , η γωνία εσωτερικής τριβής και η διακινδύνευση έναντι ρευστοποίησης. Βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η εύκολη χρήση της, καθώς δεν απαιτεί ιδιαίτερο θεωρητικό υπόβαθρο και ο υπολογισμός των μετρούμενων μεγεθών βασίζεται σε απλές σχέσεις, και ακόμα η κάλυψη μεγάλου φάσματος εδαφών σε αρκετά τεχνικά έργα. Αντιθέτως βασικό μειονέκτημα μεταξύ

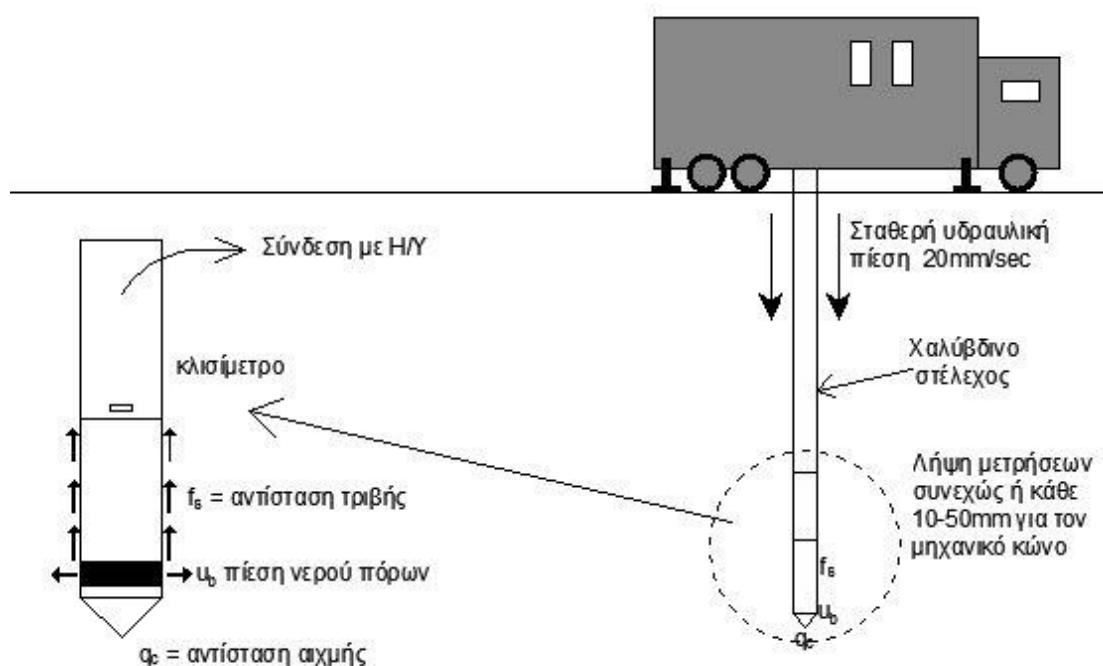
άλλων είναι το γεγονός ότι η δοκιμή SPT παρουσιάζει μεγάλη διασπορά λόγω της διαδικασίας λήψης των μετρήσεων που απαιτούν γεώτρηση επομένως πρόκειται για σημειακή και όχι συνεχή μέτρηση.



Σχήμα 1.1: Διαδικασία εκτέλεσης της πρότυπης δοκιμής διείσδυσης SPT (οδηγία ASTM D 1586).

Η δεύτερη δοκιμή που ανήκει στην ίδια κατηγορία είναι η δοκιμή διείσδυσης πρότυπου κώνου (Cone Penetration Test – CPT) η οποία είναι εξίσου δημοφιλής με την SPT. Στη δοκιμή CPT δεν απαιτείται γεώτρηση, η διείσδυση ξεκινά επιφανειακά και ο εξοπλισμός της αποτελείται από έναν χαλύβδινο κώνο και ενός ηλεκτρονικού συστήματος καταγραφής. Κατά την διείσδυση του πρότυπου αυτού κώνου καταγράφεται η αντίσταση του εδάφους ως σύνολο της αντίστασης στην αιχμή του κώνου (q_c) και της πλευρικής τριβής (f_s) που αναπτύσσεται στη παράπλευρη επιφάνεια του κώνου και εξοπλίζοντας κατάλληλα τον πρότυπο κώνο με ειδική διάταξη πωρόλιθου και ειδικού αισθητήρα είναι δυνατόν να μετρηθεί συνεχώς η αναπτυσσόμενη πίεση των πόρων (u). Η διαδικασία και ο εξοπλισμός της δοκιμής CPT απεικονίζεται στο σχήμα 1.2. Η παράλληλη και συνεχής μέτρηση των τριών

αυτών μεγεθών αποτελεί το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου, σε συνδυασμό με την εξαιρετική απόδοση που παρουσιάζει σε μαλακά και χαλαρά εδάφη. Επίσης πρόκειται για μία ταχύτατη και οικονομική μέθοδο που ωστόσο παρουσιάζει κάποιες αδυναμίες όπως η αδυναμία μέτρησης σε αμμοχάλικα, λόγω μη ικανότητας διάτρησης, και η επιρροή στις μετρήσεις της υλικής κατάστασης του χαλύβδινου κώνου.

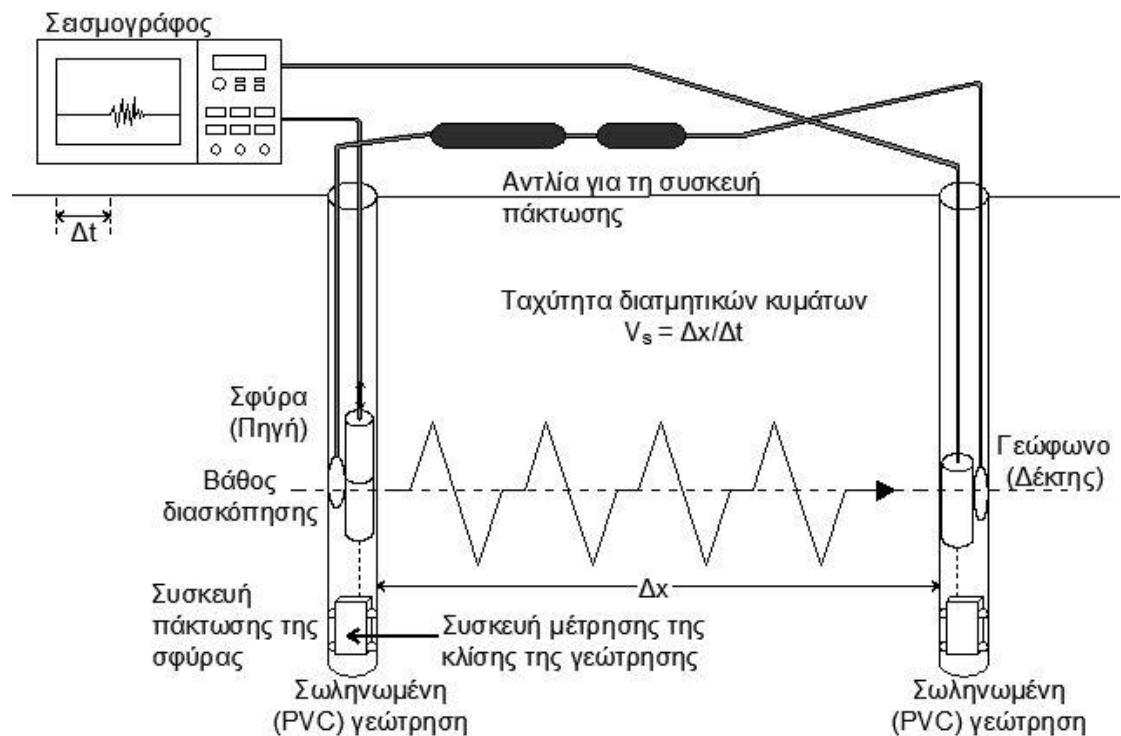


Σχήμα 1.2: Εξοπλισμός και διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής διείσδυσης πρότυπου κώνου CPT (οδηγία ASTM D 5778).

Οι δοκιμές μικρού πλάτους παραμόρφωσης, όπου η συμπεριφορά του εδάφους είναι ελαστική, είναι κατά βάση δοκιμές γεωφυσικής που με κατάλληλη επεξεργασία και προσαρμογή έχουν χρησιμοποιούνται ευρέως στην εδαφοδυναμική και γενικότερα στη γεωτεχνική σεισμική μηχανική. Χρησιμοποιώντας αυτού του τύπου τις δοκιμές προκύπτει η στρωματογραφία των εδαφικών σχηματισμών που συνθέτουν την επιφανειακή γεωλογία και εκτιμούνται βασικές ιδιότητες των εδαφών, όπως οι ταχύτητες των εγκάρσιων και διαμήκων σεισμικών κυμάτων, από δεδομένα εδαφικού θορύβου και συγκεκριμένα από επιφανειακά κύματα Rayleigh. Διακρίνονται σε δύο γενικότερες κατηγορίες, σε

δοκιμές τοπικού χαρακτήρα οι οποίες πραγματοποιούνται μέσα σε γεώτρηση, στις οποίες ανήκουν μεταξύ άλλων οι δοκιμές Cross Hole (CH) και Down Hole (DH) και σε δοκιμές μικροθορύβου που συμμετέχει μεγάλος όγκος εδάφους.

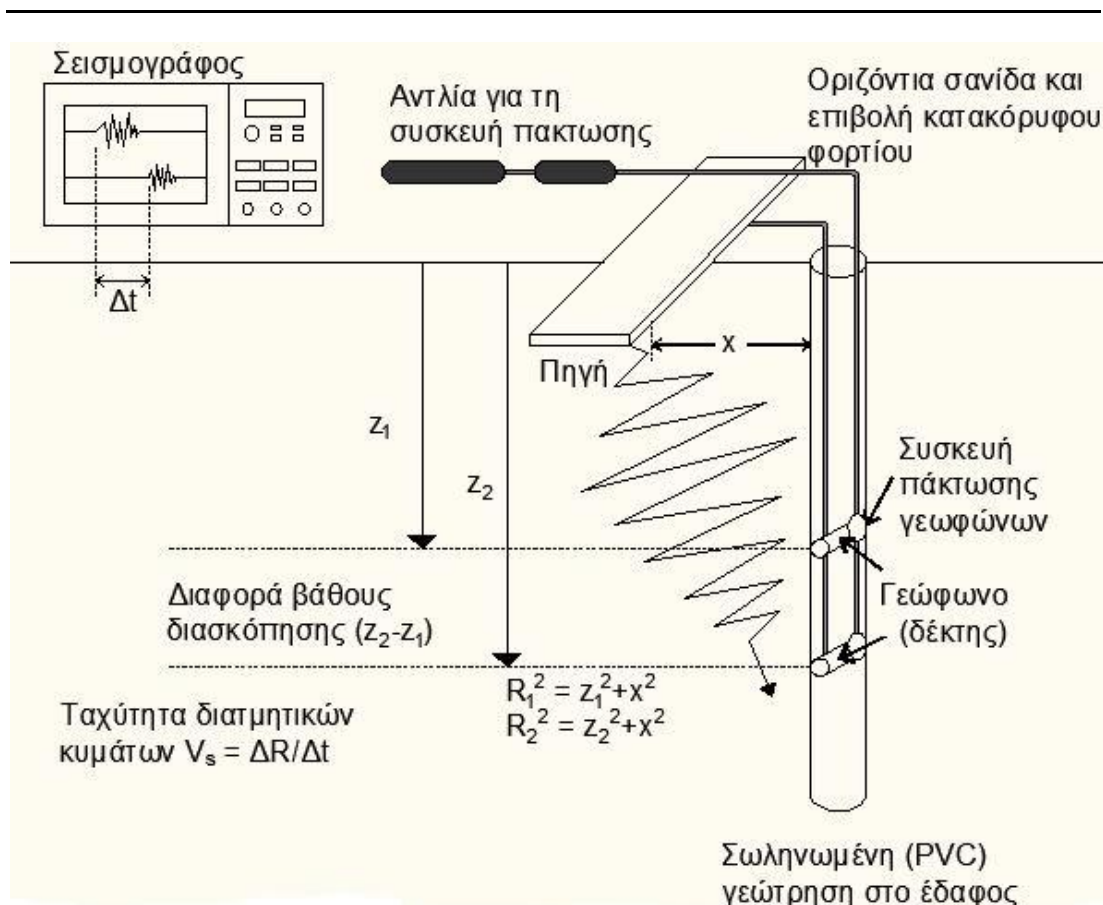
Για την δοκιμή Cross Hole απαιτούνται τουλάχιστον δύο σωληνωμένες γεωτρήσεις, απολύτως κατακόρυφες και πακτωμένες σε απόσταση από 3 έως 6 μέτρα μεταξύ τους. Ο εξοπλισμός της δοκιμής περιλαμβάνει μία πηγή δημιουργίας διαμήκων (P) ή εγκάρσιων (S) κυμάτων, η οποία τοποθετείται στη μία γεώτρηση, από κατάλληλους δέκτες (γεώφωνα κατάλληλης συχνότητας) οι οποίοι τοποθετούνται στο ίδιο βάθος (βάθος διασκόπησης) με αυτό της πηγής στη δεύτερη γεώτρηση και συλλαμβάνουν τα κύματα της πηγής και από έναν σειсмоγράφο που βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους και καταγράφει ταυτόχρονα τη διέγερση της πηγής και τα σήματα από τους δέκτες (σχήμα 1.3). Με δεδομένη την απόσταση πηγής – δέκτη και αφού μετρηθεί ο χρόνος διάνυσης του κύματος είναι πολύ απλό να υπολογισθεί η ταχύτητα του κύματος για τον εδαφικό σχηματισμό που βρίσκεται στο βάθος διασκόπησης.



Σχήμα 1.3: Βασική διάταξη και εξοπλισμός δοκιμής Cross Hole (Οδηγία ASTM D 4428).

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται συνήθως ανά δύο μέτρα και είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και τρίτη γεώτρηση με ενσωματωμένο δέκτη, η οποία βελτιώνει σαφώς την ακρίβεια των μετρήσεων και παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης της απόσβεσης του υλικού στα μικρά πλάτη παραμόρφωσης. Το γεγονός ότι η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων μετράται άμεσα, σε συνδυασμό με την απλότητα και την δυνατότητα επανάληψης της δοκιμής στην ίδια θέση, επιβεβαιώνει τον χαρακτηρισμό της δοκιμής Cross Hole ως της πιο ακριβούς μεθόδου τοπικής μέτρησης της ταχύτητας διάδοσης εγκάρσιων και διαμήκων κυμάτων στο έδαφος. Βέβαια είναι μία δοκιμή που συνοδεύεται από αρκετά υψηλό κόστος και οι εκτιμήσεις που δίνει είναι σημειακές με το βάθος.

Μία ακόμα δοκιμή μικρού πλάτους παραμόρφωσης η οποία πραγματοποιείται εντός γεώτρησης είναι η δοκιμή Down Hole. Πρόκειται για μία απλοποιημένη μορφή της δοκιμής Cross Hole που χρησιμοποιεί μία μόνο γεώτρηση, κατακόρυφη και πακτωμένη επίσης, στην οποία τοποθετείται ένας δέκτης - γεώφωνο σε διάφορα βάθη ενώ η πηγή βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους. Τα εγκάρσια κύματα εκπέμπονται από την πηγή και από τις πρώτες αφίξεις των κυμάτων S και γνωρίζοντας την απόσταση πηγής - γεωφώνου εκτιμάται η ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων (V_s) (σχήμα 1.4). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σε διάφορα βάθη μετακινώντας κάθε φορά το γεώφωνο, ωστόσο παρέχεται η δυνατότητα αντί ενός δέκτη να χρησιμοποιηθεί μία σειρά από γεώφωνα σε διάφορα βάθη ώστε να μειωθούν οι επαναλήψεις. Με κατάλληλη διαμόρφωση της πηγής φόρτισης είναι δυνατόν να δημιουργηθούν διαμήκη κύματα (P) και συνεπώς να εκτιμηθεί η ταχύτητα V_p . Η δοκιμή Down Hole έχει αρκετά χαμηλότερο κόστος από την Cross Hole, αλλά και μειωμένη ακρίβεια στις εκτιμήσεις επειδή τα κύματα διατρέχουν διάφορους εδαφικούς σχηματισμούς έως ότου φτάσουν από την πηγή στον δέκτη οπότε αυξάνεται ο κίνδυνος σφάλματος.



Σχήμα 1.4: Γενική διάταξη και εξοπλισμός δοκιμής Down Hole.

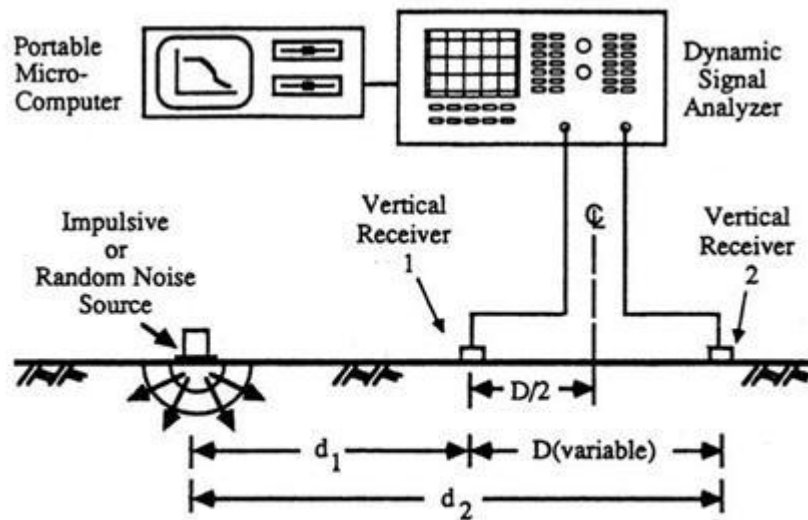
Οι δοκιμές που περιγράφηκαν ανωτέρω στο σύνολο τους απαιτούν κάποιου είδους διαταραχή στο έδαφος είτε πρόκειται για γεώτρηση, μία ή περισσότερες, είτε αφορά κάποιας μορφής διάτρηση. Η γεωφυσικές μέθοδοι που εκτιμούν τις ταχύτητες των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (V_s) χρησιμοποιώντας δεδομένα εδαφικού θορύβου και συγκεκριμένα επιφανειακά κύματα Rayleigh αποτελούν εξαίρεση καθώς είναι επιφανειακές και μη καταστρεπτικές μέθοδοι. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος αυτής της μορφής είναι η πολυκάναλη ανάλυση επιφανειακών κυμάτων που αποτελεί αντικείμενο της εν λόγω διπλωματικής. Πρόκειται για μία σύγχρονη, συνεχώς εξελισσόμενη τεχνική που υποστηρίζεται από επαρκέστατο θεωρητικό υπόβαθρο και εφαρμόζεται σε κάθε είδους εδαφικού ή βραχώδους σχηματισμού. Περισσότερες λεπτομέρειες για την εξέλιξη και το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου M.A.S.W. περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

1.2.2 Ιστορική Αναδρομή Μεθόδου M.A.S.W.

Ο προσδιορισμός των ταχυτήτων των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων από τα επιφανειακά κύματα Rayleigh αποτελεί μία σχετικά νέα μέθοδο στους κόλπους της γεωτεχνικής και περιβαλλοντικής γεωφυσικής.

Η πρώτη απόπειρα για την εκτίμηση εδαφικών παραμέτρων εντοπίζεται την δεκαετία του 50' (Jones 1955) με τη μέθοδο Σταθερής Κατάστασης (Steady Method). Η ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων εκείνη τη περίοδο βασίζονταν αποκλειστικά στο θεμελιώδη τρόπο διάδοσης των κυμάτων Rayleigh καθώς ανώτεροι τρόποι διάδοσης και κύματα χώρου δε λαμβάνονταν υπόψη.

Η συνέχεια δόθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 80' από ερευνητές στο Πανεπιστήμιο του Τέξας (University of Texas UT) οι οποίοι ανέλυσαν το φάσμα των επιφανειακών κυμάτων μέσω μετασχηματισμού Fourier και συνεπώς υπολόγισαν την διαφορά φάσης μεταξύ δύο σεισμικών ιχνών. Ο εξοπλισμός που απαιτούσε η μέθοδος αποτελούταν από μία πηγή παραγωγής σεισμικών κυμάτων (π.χ. βαριά σφύρα) και από δύο δέκτες – γεώφωνα που καταγράφουν τα σεισμικά κύματα (σχήμα 1.5). Η νέα μέθοδος χρησιμοποιήθηκε ευρέως σε γεωτεχνικές εφαρμογές και ονομάστηκε Φασματική Ανάλυση Επιφανειακών Κυμάτων (**Spectral Analysis of Surface Waves – S.A.S.W.**) (Heisey et al., 1982, Nazarian et al., 1983; Rix et al., 1991; Al-Hunaidi, 1992; Gucunski and Woods, 1992; Aouad, 1993; Stokoe et al., 1994; Fonquinos, 1995; Ganji et al., 1998). Στα πρώτα στάδια εφαρμογής της μεθόδου αυτής η ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων βασιζόταν αποκλειστικά στο θεμελιώδη τρόπο διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh, όπως ακριβώς και στη μέθοδο σταθερής κατάστασης.



From Rix et al. (1991)

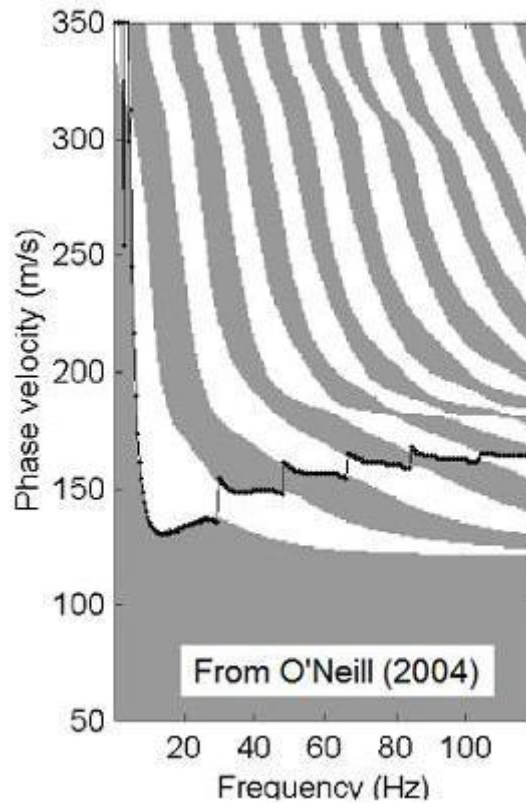
Σχήμα 1.5: Γενική διάταξη και εξοπλισμός δοκιμής S.A.S.W (Πηγή: <http://www.masw.com/>)

Σε επόμενα στάδια εφαρμογής της μεθόδου S.A.S.W. ζητούμενο ήταν η βελτίωση της ακρίβειας υπολογισμού της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh μέσω διαδικασιών απόκτησης των καταγραφών και της επεξεργασίας των δεδομένων. Επόμενες μελέτες συμπεριέλαβαν ανώτερους τρόπους διάδοσης που αναγνωρίστηκαν σε σεισμικές καταγραφές (Tokimatsu et al., 1992; Stokoe et al., 1994), συνεπώς άρχισε να χρησιμοποιείται η έννοια της φαινόμενης καμπύλης διασποράς (Gucunski and Woods, 1992), η οποία οριοθετείται από την κατανομή των μέγιστων της σεισμικής ενέργειας στους διάφορους τρόπους διάδοσης, θεμελιώδης και ανώτερης τάξης. Μία τέτοια καμπύλη διασποράς φαίνεται ενδεικτικά στο σχήμα 1.6.

Οι δυσκολίες που παρουσιάζει η μέθοδος S.A.S.W. μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες:

- Αδυναμία διαχωρισμού – υποεκτίμηση των διάφορων τρόπων διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh
- Η επίδραση κυμάτων διαφορετικού τύπου υποεκτιμάται ή αγνοείται (Sheu et al., 1988; Hiltunen and Woods, 1990; Foti, 2000).

- Δυσκολία επεξεργασίας των δεδομένων για τον προσδιορισμό της καμπύλης διασποράς, όπως για παράδειγμα η αναδιάταξη φάσης (Al-Hunaidi, 1992)



Σχήμα 1.6: Ενδεικτική καμπύλη διασποράς στη μέθοδο S.A.S.W. (Πηγή: <http://www.masw.com/>)

Η πρώτη καταγεγραμμένη πολυκάναλη προσέγγιση επιφανειακών κυμάτων στη γεωτεχνική φυσική, εντοπίζεται στην Ολλανδία την δεκαετία του 80' όπου ερευνητές χρησιμοποίησαν ένα σύστημα 24 καναλιών καταγραφής για να υπολογίσουν την κατανομή της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (V_s) σε παλιρροιακές προσχώσεις, αναλύοντας καταγραφές επιφανειακών κυμάτων (Gabriels et al., 1987).

Στις αρχές του 2000 εμφανίζεται μία η μέθοδος Πολυκάναλης Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων (M.A.S.W.) και γίνεται ιδιαίτερα δημοφιλής στους γεωτεχνικούς μηχανικούς. Για την ακρίβεια η αρχή έγινε στα μέσα της δεκαετίας του 90', στο Γεωλογικό Ινστιτούτο του Κάνσας (Kansas Geological Survey, KGS), όπου

γεωφυσικοί ερευνητές, εξυπηρετώντας τις ανάγκες βιομηχανιών πετρελαίου, χρησιμοποίησαν τα επιφανειακά κύματα με στόχο να παράγουν μία εικόνα για το εσωτερικό της γης ώστε να εντοπίζουν πιθανά “κενά” ορισμένων χιλιομέτρων. Η εξερεύνηση με αυτή τη μέθοδο των φυσικών πόρων ανέδειξε τα πλεονεκτήματα των πολυκάναλων σεισμικών καταγραφών οπότε άνοιξε τον δρόμο για την προσαρμογή μίας πολυκάναλης μεθόδου σε προβλήματα γεωτεχνικής μηχανικής. Από την εφαρμογή της μεθόδου S.A.S.W. και έπειτα από εκτενείς μελέτες, αναγνωρίστηκε ότι οι ιδιότητες των επιφανειακών κυμάτων ήταν πολύ πιο περίπλοκες σε σχέση με τις αρχικές υποθέσεις ή θεωρίες και συνεπώς η προσέγγιση δύο δεκτών ήταν αδύνατο να διαχειριστεί αυτή την πολυπλοκότητα. Με βάση τη λογική ότι ο αριθμός των καναλιών που χρησιμοποιούνται στη σεισμική διασκόπηση μπορεί άμεσα να καθορίσει την διακριτική ικανότητα της μεθόδου, οι μελετητές χρησιμοποίησαν τεχνικές αντιστροφής ήδη διαθέσιμες από τη μακροχρόνια χρήση της ανάλυσης σεισμικών δεδομένων (Telford et al., 1976; Robinson and Treitel, 1980; Yilmaz, 1987) και ακόμα ανέπτυξαν νέες στρατηγικές απόκτησης και επεξεργασίας δεδομένων ώστε να εξετάσουν με λεπτομέρεια τις ιδιότητες της διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων και να προκύψει μία εύχρηστη σεισμική μέθοδος: η μέθοδος Πολυκάναλης Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων (M.A.S.W.).

Αρκετά τμήματα της ιστορικής αναδρομής που περιγράφονται σε αυτή τη παράγραφο είναι δανεισμένα (διατηρώντας κάθε επιφύλαξη) από τον ιστότοπο <http://www.masw.com/>. Σε επόμενο κεφάλαιο γίνεται μία λεπτομερής παρουσίαση των διαφόρων σταδίων της μεθόδου πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh.

1.3 Σύνοψη Διπλωματικής Εργασίας

Όπως περιγράφηκε στη παράγραφο 1.1 το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η αριθμητική εφαρμογή της μεθόδου Πολυκάναλης Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων (M.A.S.W.). Έτσι έπειτα από την περιγραφή των δοκιμών πεδίου και την

ιστορική αναδρομή των γεωφυσικών διασκοπήσεων, σε αυτή τη παράγραφο περιγράφεται συνοπτικά το περιεχόμενο των κεφαλαίων που ακολουθούν.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου M.A.S.W. και των επιμέρους σταδίων εκτέλεσης της μεθόδου καθώς και λεπτομέρειες για τον εξοπλισμό που απαιτείται. Επίσης αναφέρεται συνοπτικά το θεωρητικό υπόβαθρο των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και που αφορά την διάδοσή τους και το φαινόμενο της διασποράς τους.

Ακολουθεί η αριθμητική εφαρμογή της μεθόδου, βήμα-βήμα, χρησιμοποιώντας ένα ενδεικτικό παράδειγμα εδαφικού σχηματισμού και ενός τύπου φόρτισης για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων στο Κεφάλαιο 3. Δίνεται έμφαση στην αλληλουχία των ενεργειών που ακολουθήθηκε στα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν (κατά σειρά PLAXIS, MATHCAD και MATLAB). Τέλος παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα εδαφικά προφίλ που προκύπτουν από τις αναλύσεις και εντοπίζονται οι μηχανισμοί και οι προδιαγραφές υπό τις οποίες η μέθοδος δίνει την βέλτιστη λύση.

Σε επέκταση όσων προέκυψαν στο κεφάλαιο 3 αναζητούνται οι παράμετροι για τις οποίες η μέθοδος αποδίδει με τον βέλτιστο τρόπο. Έτσι στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην προσπάθεια εντοπισμού των χαρακτηριστικών του φορτίου που εισάγεται στο προσομοίωμα και οδηγούν στη βέλτιστη εκτίμηση της τομής του υπεδάφους. Παράλληλα εξετάζονται περιπτώσεις κάποιες ειδικές περιπτώσεις εδαφικών σχηματισμών στις οποίες η μέθοδος θεωρητικά παρουσιάζει μειωμένη ευκρίνεια. Το κεφάλαιο κλείνει με μία εφαρμογή της μεθόδου M.A.S.W. σε δύο διαστάσεις.

Τέλος στο 5^ο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την υλοποίηση της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh στο σύνολο των δοκιμών τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάστηκαν και σχολιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η Μέθοδος Μ.Α.Σ.Ω.

2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1.1 Επιφανειακά κύματα Rayleigh

Στην γεωτεχνική σεισμική μηχανική το έδαφος θεωρείται ως ελαστικός ομοιογενής ημίχωρος σε πρώτη προσέγγιση, καθώς το ενδιαφέρον εστιάζεται στη διάδοση των κυμάτων στα πρώτα δεκάδες μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Θεωρητικά ως ελεύθερη επιφάνεια λογίζεται η διαχωριστική επιφάνεια ενός στερεού με το κενό, ωστόσο λόγω της πολύ μικρής πυκνότητας του αέρα σχετικά με αυτή του εδαφικού υλικού, η επιφάνεια της γης μπορεί με ασφάλεια να χαρακτηριστεί ως ελεύθερη επιφάνεια. Έτσι λόγω των επιπλέον συνοριακών συνθηκών που προκύπτουν από τη παρουσία της ελεύθερης επιφάνειας, οι γενικές κυματικές εξισώσεις του ελαστικού και ισότροπου μέσου διαφοροποιούνται και εμφανίζεται μία νέα κατηγορία κυμάτων: τα επιφανειακά κύματα.

Τα κυριότερα επιφανειακά κύματα στην εδαφοδυναμική, που συγχρόνως αποτελούν και αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι τα κύματα Rayleigh, τα οποία πήραν την ονομασία τους από τον νομπελίστα φυσικό John William Strutt (1885), που έφερε τον τίτλο Βαρόνος Rayleigh, ο οποίος ήταν ο πρώτος που μελέτησε συστηματικά αυτού του είδους τα κύματα. Πρόκειται όπως αναφέρθηκε για επιφανειακά κύματα που διαδίδονται παράλληλα στην ελεύθερη επιφάνεια του

εδάφους και χρησιμοποιούνται ευρέως στην γεωφυσική και την εδαφοδυναμική και συγκεκριμένα στη διερεύνηση των δυναμικών ιδιοτήτων του εδάφους.

2.1.1.1 Χαρακτηριστικά των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh

Τα επιφανειακά κυμάτα Rayleigh προκύπτουν από την συμβολή των διαμήκων (P) και εγκάρσιων (SV) σεισμικών κυμάτων και διαδίδονται παράλληλα με την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Η ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh (C_R) που διαδίδονται σε ομοιογενή ημίχωρο, έπειτα από απλοποιήσεις λόγω των συνοριακών συνθηκών στην επιφάνεια (μηδενισμός των τάσεων σ_{xz} και σ_{zz}) δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\left(\frac{C_R}{V_S}\right)^6 - 8\left(\frac{C_R}{V_S}\right)^4 + \left(\frac{C_R}{V_S}\right)^2 \left(24 - 16\frac{V_S^2}{V_P^2}\right) - 16\left(1 - \frac{V_S^2}{V_P^2}\right) = 0 \quad (2.1)$$

Από τη παραπάνω σχέση μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι ο λόγος της ταχύτητας των κυμάτων Rayleigh προς την αντίστοιχη των εγκάρσιων κυμάτων (V_S) είναι συνάρτηση του λόγου του Poisson (ν).

$$\frac{C_R}{V_S} = f(\nu) \quad (2.2)$$

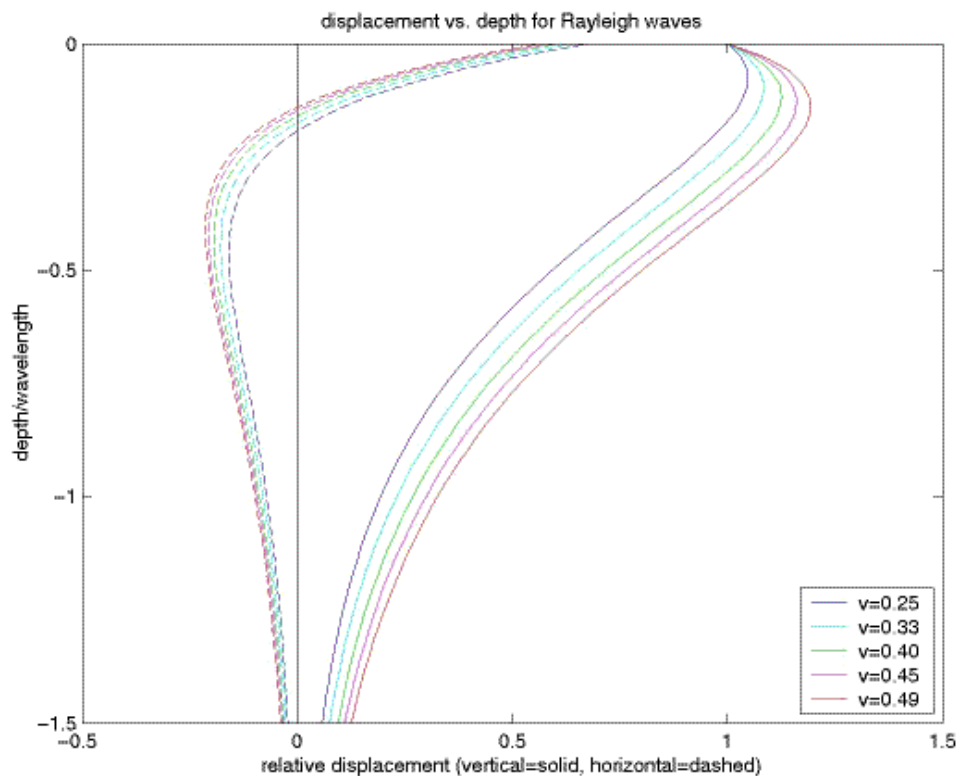
όπως προκύπτει από τη γνωστή σχέση (2.3) που συνδέει τις ταχύτητες των εγκάρσιων και των διαμήκων κυμάτων μέσω του λόγου του Poisson.

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}} \quad (2.3)$$

Η τιμή του λόγου της σχέσης 2.2 κυμαίνεται από 0.874 έως 0.955 για αντίστοιχες τιμές του λόγου Poisson από 0.0 έως 0.5 (Xia et al, 1999, Stokoe et al, 1994). Για συνήθεις τιμές του ν (0.25 ~ 0.50) η σχέση 2.2 διαμορφώνεται προσεγγιστικά ως εξής:

$$C_R \approx 0.94 V_S \quad (2.4)$$

Ακόμη οι μετακινήσεις που επιβάλλονται σε ένα σημείο του εδάφους κατά την διάδοση ενός κύματος Rayleigh είναι ένας συνδυασμός των μετακινήσεων που επιβάλλουν τα κύματα P και S, και μειώνονται εκθετικά με το βάθος. Το μέγιστο βάθος στο οποίο εξακολουθούν να εμφανίζονται τα επιφανειακά κύματα είναι περίπου ίσο με 1,5 φορά το μήκος κύματος (σχήμα 2.1). Σε αυτό το βάθος θεωρείται πως η κατακόρυφη συνιστώσα του πλάτους του κύματος γίνεται ίση με το 10% του αρχικού πλάτους που είχε στην ελεύθερη επιφάνεια. Εάν θεωρήσουμε πως η ταχύτητα διάδοσης του κύματος Rayleigh είναι σταθερή προκύπτει το συμπέρασμα πως το βάθος διείσδυσης μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας.



Σχήμα 2.1: Κανονικοποιημένο πλάτος της οριζόντιας και της κατακόρυφης ταλάντωσης των σωματιδίων ομοιογενούς ημίχωρου κατά τη διάδοση επιφανειακού κύματος Rayleigh (Πηγή <http://www.johnstonsarchive.net/>).

2.1.1.2 Διασπορά επιφανειακών κυμάτων Rayleigh

Η σχέση 2.1 που προηγήθηκε συνεπάγεται ότι η ταχύτητα των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh (C_R) είναι ανεξάρτητη της συχνότητας. Η πρόταση αυτή ισχύει

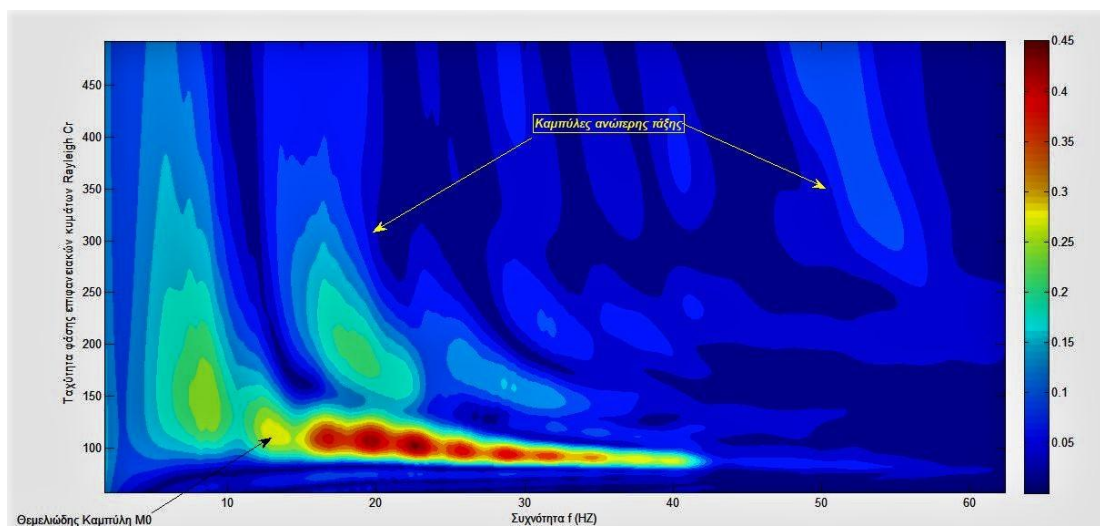
όταν τα κύματα διαδίδονται σε ομοιογενή ελαστικό ημίχωρο, ωστόσο στην πραγματικότητα το έδαφος δε μπορεί να χαρακτηριστεί έτσι, καθώς παρουσιάζονται γεωμετρικές μεταβολές των ιδιοτήτων του σε σχέση με το βάθος. Συνήθως το έδαφος είναι ένα στρωματοποιημένο μέσο που η ακαμψία του, συνεπώς και η ταχύτητα V_s , αυξάνεται με το βάθος. Οπότε με δεδομένο, όπως προαναφέρθηκε (§2.1.1.1), ότι κάθε επιφανειακό κέμα Rayleigh διεισδύει στο έδαφος σε βάθος ίσο με 1,5 φορά το μήκος κύματός (σχήμα 2.1) του συμπεραίνεται ότι διαδίδονται κύματα διαφορετικής συχνότητας με διαφορετικές ταχύτητες.

Το φαινόμενο κατά το οποίο κύματα διαφορετικής συχνότητας διαδίδονται με διαφορετική ταχύτητα καλείται διασπορά. Συνεπώς σύμφωνα με τα παραπάνω το φαινόμενο της διασποράς είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα για τα επιφανειακά κύματα Rayleigh. Το φαινόμενο της διασποράς των επιφανειακών κυμάτων συνδέεται με την ύπαρξη οριζόντιων εδαφικών στρώσεων διαφορετικής ακαμψίας και αποτελεί το βασικό λόγο που τα κύματα Rayleigh χρησιμοποιούνται σε δοκιμές γεωφυσικής με σκοπό την εκτίμηση των δυναμικών ιδιοτήτων του εδάφους και της στρωματογραφίας τους.

2.1.2 Καμπύλες διασποράς

Τα επιφανειακά κύματα Rayleigh διαδίδονται σε κατακόρυφα ανομοιογενές μέσο, όπως για παράδειγμα ένα οριζόντιο στρωματοποιημένο εδαφικό προφίλ, με διάφορους τρόπους, δηλαδή με διαφορετική ταχύτητα φάσης για μία δεδομένη συχνότητα. Οι διαφορετικοί τρόποι διάδοσης των κυμάτων Rayleigh στις σεισμικές καταγραφές αποτυπώνονται με την συγκέντρωση της ενέργειας των κυμάτων αυτών κοντά στις καμπύλες διασποράς. Ο διαχωρισμός των διαφορετικών τρόπων διάδοσης των κυμάτων Rayleigh είναι διακριτός όταν η απεικόνιση τους γίνεται στο πεδίο των ανεξάρτητων μεταβλητών της θεμελιώδους κυματικής εξίσωσης ($C_R = \omega/k$), δηλαδή στο πεδίο ταχύτητας φάσης (C_R) – συχνότητας. Οι βασικές πληροφορίες αντλούνται από τη θεμελιώδη καμπύλη διασποράς (fundamental dispersion curve M_0) που απεικονίζει το θεμελιώδη τρόπο διάδοσης των κυμάτων Rayleigh, ο οποίος ορίζεται συμβατικά ως ο τρόπος διάδοσης κατά τον οποίο η

ταχύτητα φάσης λαμβάνει την μικρότερη τιμή. Ενδεικτικά στο σχήμα 2.2 απεικονίζονται οι ισοϋψείς των καμπυλών διασποράς όπου διακρίνονται όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω.



Σχήμα 2.2: Ενδεικτική απεικόνιση ισοϋψών καμπυλών διασποράς. Διακρίνεται η θεμελιώδης καμπύλη M0 καθώς και οι καμπύλες ανώτερης τάξης. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην κανονικοποιημένη σεισμική ενέργεια.

Επομένως λόγω του φαινομένου της κυματικής διασποράς η ταχύτητα φάσης των κυμάτων Rayleigh εξαρτάται από τη συχνότητα, όταν αυτά διαδίδονται σε οριζόντια στρωματοποιημένο έδαφος. Ωστόσο η ταχύτητα φάσης επηρεάζεται και από άλλες εδαφικές παραμέτρους όπως:

- Της ταχύτητας των διαμηκών κυμάτων (P – κύματα).
- Της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων (S – κύματα).
- Της πυκνότητας των σχηματισμών.
- Του πάχους κάθε στρώματος.

Τα εγκάρσια κύματα επηρεάζουν την καμπύλη διασποράς στο μεγαλύτερο βαθμό από ότι οι υπόλοιπες εδαφικοί παράμετροι. Για το λόγο αυτό, από την καμπύλη διασποράς είναι δυνατό να προσδιοριστεί έμμεσα η κατανομή των

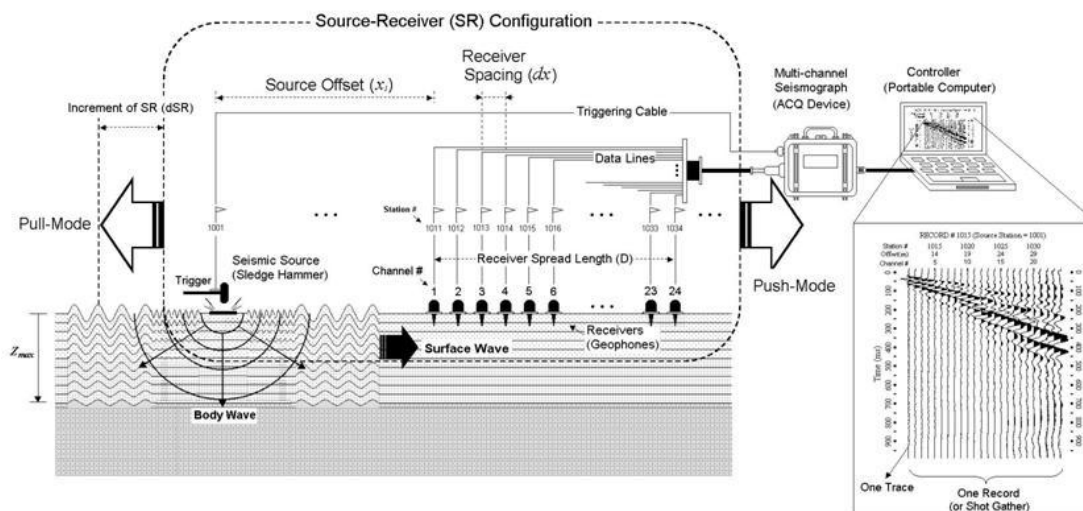
ταχυτήτων διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων (V_s) συναρτήσει του βάθους χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές αντιστροφής των καμπυλών διασποράς.

2.2 Διαδικασία μετρήσεων μεθόδου M.A.S.W.

Η εκτέλεση της κλασικής διαδικασίας της μεθόδου πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια. Αρχικά το πρώτο βήμα είναι η απόκτηση των δεδομένων από τα κανάλια καταγραφής. Ακολούθως, στη δεύτερη φάση τα δεδομένα των καταγραφών επεξεργάζονται κατάλληλα με σκοπό την διαμόρφωση της καμπύλης διασποράς που αποτελεί τη βασική πηγή πληροφορίας που οδηγεί στον προσδιορισμό της κατακόρυφης κατανομής της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων με το βάθος. Η τομή του υπεδάφους που διαμορφώνεται από τη κατανομή της ταχύτητας V_s με το βάθος, είναι και το τελικό στάδιο της διαδικασίας της μεθόδου M.A.S.W. και υλοποιείται μέσω της διαδικασίας αντιστροφής της καμπύλης διασποράς.

2.2.1 Εξοπλισμός και διαδικασία συλλογής δεδομένων

Ο εξοπλισμός που απαιτείται για την εκτέλεση της μεθόδου περιλαμβάνει μία πηγή παραγωγής σεισμικών κυμάτων, μία σειρά από δέκτες των κυμάτων αυτών που μπορεί αν είναι είτε γεώφωνα είτε σειсмоγράφοι, και από ένα σύστημα αποθήκευσης αυτών των δεδομένων που παράγονται από την εκτέλεση της διαδικασίας. Στο σχήμα 2.3 απεικονίζεται μία τυπική διάταξη του εξοπλισμού στο πεδίο. Στη συνέχεια περιγράφονται λεπτομερώς οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη συλλογή και την επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων.



Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης του εξοπλισμού της μεθόδου MASW στο πεδίο (Πηγή <http://www.masw.com/>)

2.2.1.1 Σεισμική πηγή

Η επιλογή του τύπου και των χαρακτηριστικών της σεισμικής πηγής είναι καθορίζει το μέγιστο και ελάχιστο βάθος διασκόπησης. Αυτό συμβαίνει καθώς η μόνη παράμετρος που ελέγχει τα παραγόμενα μήκη κύματος των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh είναι η συχνότητα ταλάντωσης των σωματιδίων του εδάφους στη θέση της πηγής, αφού η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων εξαρτάται από το μέσο. Έτσι επιδιώκεται η παραγωγή σεισμικών κυμάτων που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, επομένως καταγράφονται όσο το δυνατόν περισσότερα μήκη κύματος. Συγκεκριμένα το μέγιστο βάθος διασκόπησης (z_{max}) καθορίζεται από το μέγιστο μήκος κύματος των παραγόμενων επιφανειακών κυμάτων (λ_{max}) από τη σχέση $z_{max} \approx 0.5 \lambda_{max}$.

Η βέλτιστη επιλογή για τη σεισμική πηγή θεωρούνται οι υδραυλικοί δονητές, καθώς παρέχουν ένα ευρύτατο φάσμα συχνοτήτων που καλύπτουν τις απαιτήσεις της μεθόδου, ωστόσο αυξάνουν κατά πολύ το κόστος και απαιτούν προεπεξεργασία στις καταγραφές. Η πιο διαδεδομένες σεισμικές πηγές είναι οι σεισμικές πηγές κρούσης, όπως για παράδειγμα ένα βαρύ σφυρί, καθώς παρέχουν μία οικονομική λύση και παράλληλα παράγουν τις συχνότητες που ζητούνται αναλόγως με το βάρος της σφύρας που επιλέγεται. Σφύρες μεγάλου βάρους παράγουν κύματα χαμηλών συχνοτήτων και αυξάνουν το βάθος διασκόπησης ενώ αντίθετα

ελαφρύτερο βάρος κρούσης επιλέγεται για ρηχές διασκοπήσεις καθώς δημιουργεί υψίσυχνα σεισμικά κύματα. Συνήθως μία καλή επιλογή θεωρείται μία σφύρα 9kg (20 lb) καθώς παράγει κύματα που καλύπτουν ένα ικανοποιητικό φάσμα συχνοτήτων. Επίσης συνήθως προτείνεται η χρήση μίας μεταλλικής πλάκας, ή καλύτερα άκαμπτης ελαστικής, στο σημείο επιβολής του φορτίου με σκοπό την καλύτερη πρόσφυση του βάρους κρούσης με το έδαφος. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς η χρήση της πλάκας μειώνει την ελαστική παραμόρφωση του εδάφους στη θέση της πηγής και βοηθάει στη καλύτερη μετάδοση της ενέργειας από το βάρος κρούσης στο έδαφος

Για ακόμα μεγαλύτερα μήκη κύματος είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν πιο εξελιγμένες πηγές κρούσης, όπως εκρηκτικά ή πίπτον βάρος, καθώς πλεονεκτούν στη δημιουργία επιφανειακών κυμάτων χαμηλότερων συχνοτήτων συγκριτικά με τη σφύρα, ωστόσο αυξάνουν το κόστος και τη δυσκολία εφαρμογής της δοκιμής δυσανάλογα με την αύξηση του βάθους διασκόπησης. Στον Πίνακα 2.1 διακρίνονται οι προτεινόμενες τιμές για το βάρος της σφύρας που απαιτείται για διάφορα βάθη διασκόπησης .

2.2.1.2 Οι δέκτες

Για την καταγραφή των επιφανειακών σεισμικών κυμάτων χρησιμοποιούνται δέκτες κατακόρυφης συνιστώσας καθώς όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1, η κατακόρυφη συνιστώσα των επιφανειακών κυμάτων στην επιφάνεια του εδάφους είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη οριζόντια. Ο βασικότερος παράγοντας που καθορίζει την επιλογή του δέκτη είναι η χαρακτηριστική του συχνότητα (ιδιοσυχνότητα). Συνήθως προτείνονται γεώφωνα συχνότητας 4,5 Hz για διασκοπήσεις μέτριου βάθους ενώ για μεγαλύτερα βάθη επιλέγονται επιταχυνσιόμετρα ή γεώφωνα μικρότερης συχνότητας (1 Hz ή και μικρότερης) αυξάνοντας ωστόσο το κόστος της δοκιμής.

Ιδιαίτερα σημαντική στο σχεδιασμό της μεθόδου είναι και η επαφή των δεκτών με το έδαφος. Η πάγια τακτική στις δοκιμές της μεθόδου M.A.S.W. είναι η πάκτωσή

των δεκτών στο έδαφος με καρφιά καθώς αποτελεί την οικονομικότερη επιλογή και δίνει τη δυνατότητα καταγραφής επαναλαμβανόμενων μετρήσεων υπό διαφορετικές, ή και όχι, συνθήκες κάθε φορά στην ίδια ακριβώς θέση. Ένας διαφορετικός τρόπος επαφής των γεωφώνων με το έδαφος είναι με τη χρήση συρόμενης συστοιχίας γεωφώνων (land streamer). Η απόδοση αυτού του τρόπου επαφής των δεκτών είναι εξίσου αποδοτική την επαφή πάκτωσης αλλά κατά πολύ ταχύτερη στην απόκτηση των σεισμικών δεδομένων. Συνήθως τα κανάλια καταγραφής που χρησιμοποιούνται είναι ίσα με 24, αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται λιγότερα (π.χ. 9) ή και περισσότερα (π.χ. 48 ή και παραπάνω). Ενδεικτικά στον Πίνακα 2.1 φαίνονται περισσότερες λεπτομέρειες για τα χαρακτηριστικά των δεκτών σχετικά με το βάθος διασκόπησης.

2.2.1.3 Διάταξη του εξοπλισμού στο πεδίο

Εκτός από τα χαρακτηριστικά των επιμέρους συσκευών που απαρτίζουν τον εξοπλισμό της μεθόδου M.A.S.W., καταλυτικός παράγοντας στο καθορισμό του εύρους διασκόπησης είναι η διάταξη πηγής - δεκτών στο πεδίο μετρήσεων. Το μήκος του αναπτύγματος των δεκτών (D) καθορίζεται απευθείας από το μέγιστο μήκος κύματος των παραγόμενων επιφανειακών κυμάτων (λ_{max}) που αναλύεται, το οποίο όπως περιγράφηκε στη §2.2.1.1 καθορίζει το μέγιστο βάθος διασκόπησης (z_{max}). Συνήθως προτείνεται το μήκος του αναπτύγματος των δεκτών να είναι μία με τρεις φορές το μέγιστο βάθος διασκόπησης ($D = (1\div 3) * z_{max}$). Η πιθανότητα να καταγραφούν τα μεγάλα μήκη κύματος, συνεπώς και αυξημένα βάθη διασκόπησης, είναι ανάλογη του μήκους D, ωστόσο σε πολύ μεγάλα μήκη D, της τάξης των 100 μέτρων ελλοχεύει ο κίνδυνος αλλοίωσης των καταγραφών λόγω αύξησης του επιπέδου του θορύβου.

Αντίστοιχα οι αποστάσεις μεταξύ των δεκτών (dx) καθορίζονται από το ελάχιστο μήκος κύματος των παραγόμενων επιφανειακών κυμάτων (λ_{min}), συνεπώς από το ελάχιστο βάθος διασκόπησης (z_{min}) και κυμαίνονται από 0.3 έως 1 επί του ελάχιστου βάθους διασκόπησης. Ακόμη αύξηση του αριθμού των καναλιών

καταγραφής έχει νόημα μόνο εάν συνεπάγεται και αύξηση του αντίστοιχου μήκους αναπτύγματος των δεκτών (D) εντός των ορίων που δόθηκαν ανωτέρω.

Η απόσταση μεταξύ της σεισμικής πηγής και των δεκτών προτείνεται να κυμαίνεται σε ποσοστό 20 - 100% του μήκους του αναπτύγματος των δεκτών (D) καθώς για αποστάσεις μεγαλύτερες αυτού του 100% του D αυξάνεται το ρίσκο επικράτησης των ανώτερης τάξης διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων έναντι του θεμελιώδους τρόπου διάδοσης, ενώ για μικρότερες αποστάσεις του εύρους αυτού τα επιφανειακά κύματα αδυνατούν να αναπτυχθούν πλήρως.

Στον Πίνακα 2.1 παρατίθενται ενδεικτικές τιμές οι διαστάσεις που αναφέρθηκαν στις παραγράφους που προηγήθηκαν στα διάφορα βάθη διασκόπησης.

2.2.1.4 Παράμετροι καταγραφής

Οι παράμετροι καταγραφής, όπως η διάρκεια καταγραφής (T) και το διάστημα δειγματοληψίας (dt), επηρεάζουν την ευκρίνεια των καμπυλών διασποράς. Συνήθως μία διάρκεια κατάγραφής ενός δευτερολέπτου με διάστημα δειγματοληψίας 1 ms αρκεί για το σύνολο των περιπτώσεων (Πίνακα 2.1). Η ευκρίνεια των καμπυλών διασποράς αλλοιώνεται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα του ενός δευτερολέπτου όπου συνήθως παρατηρείται μείωση του λόγου σήματος προς το θόρυβο (S/N ratio), καθώς ακόμα και μικρότερο διάστημα από το προτεινόμενο μπορεί να σημαίνει ανεπαρκή καταγραφή της κυματομορφής των επιφανειακών κυμάτων. Μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα του ενός δευτερολέπτου προτείνονται μόνο σε περιπτώσεις που οι ταχύτητες των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων είναι πολύ μικρές ($V_s < 100$ m/s).

Πίνακας 2.1: Προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση της μεθόδου M.A.S.W. (πηγή <http://www.masw.com/>)

Recommended Values in ()

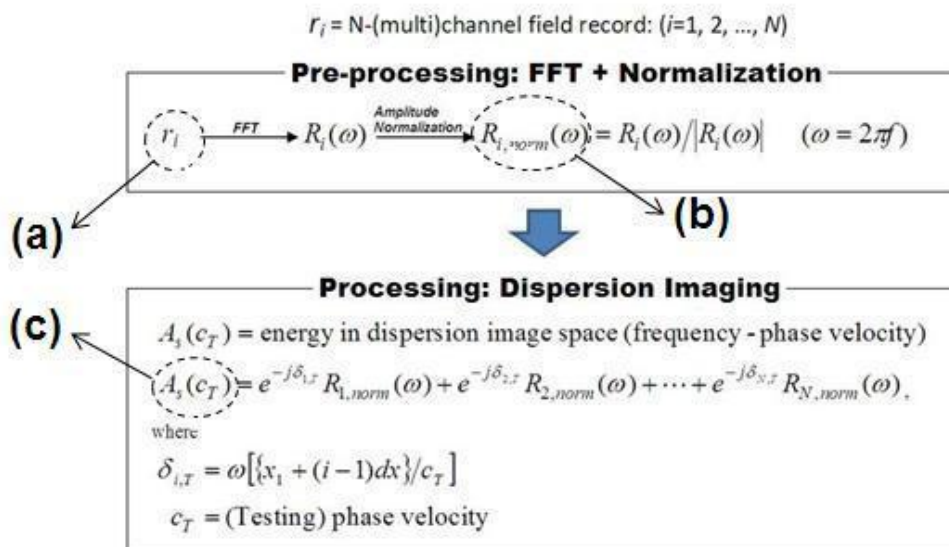
Depth (Z _{max}) ¹ (m)	Source (S) ² (lb)	Receiver (R) ³ (Hz)	Receiver Spread (RS) (m)			SR Move ⁶ (dx)			Recording ⁸				
			Length ⁴ (D)	Receiver Spacing (dx)		High	Lateral Resolution ⁷		dt ⁹ (ms)	Vertical Stack ¹¹			
				Source Offset ⁵ (X ₁)	24-ch*		48-ch	Medium		Low	C	N	VN
≤ 1.0	≤ 1 (1)**	4.5-100 (40)	1-3 (2.0)	0.2-3.0 (0.4)	0.05-0.1 (0.1)	0.02-0.05 (0.05)	1-2 (1)	2-4 (2)	4-12 (4)	0.5-1.0 (0.5)	1-3 (3)	3-5 (5)	5-10 (10)
1-5	1-5 (5)	4.5-40 (10)	1-15 (10)	0.2-15 (2)	0.05-0.6 (0.5)	0.02-0.3 (0.25)	1-2 (1)	2-4 (2)	4-12 (4)	0.5-1.0 (0.5)	1-3 (3)	3-5 (5)	5-10 (10)
5-10	5-10 (10)	≤ 10 (4.5)	5-30 (20)	1-30 (4)	0.2-1.2 (1.0)	0.1-0.6 (0.5)	1-2 (1)	2-4 (2)	4-12 (4)	0.5-1.0 (0.5)	1-3 (3)	3-5 (5)	5-10 (10)
10-20	≥ 10 (20)	≤ 10 (4.5)	10-60 (30)	2-60 (10)	0.4-2.5 (1.5)	0.2-1.2 (1.0)	1-2 (1)	2-4 (2)	4-12 (4)	0.5-1.0 (0.5)	1-3 (3)	3-5 (5)	5-10 (10)
20-30	≥ 10 (20)	≤ 4.5 (4.5)	20-90 (50)	4-90 (10)	0.8-3.8 (2.0)	0.4-1.9 (1.5)	1-2 (1)	2-4 (2)	4-12 (4)	0.5-1.0 (0.5)	1-3 (3)	3-5 (5)	5-10 (10)
30-50	≥ 10 or passive (20)	≤ 4.5 (4.5)	30-150 (70)	6-150 (15)	1.2-6.0 (3.0)	0.6-3.0 (2.0)	1-2 (1)	2-4 (2)	4-12 (4)	0.5-1.0 (0.5)	1-3 (3)	3-5 (5)	5-10 (10)
> 50	≥ 10 or passive (20)	≤ 4.5 (4.5)	> 50 (150)	> 10 (30)	> 2.0 (6.0)	> 1.0 (4.0)	1-2 (1)	2-4 (2)	4-12 (4)	0.5-1.0 (0.5)	1-3 (3)	3-5 (5)	5-10 (10)

** Values listed here are by no means definitive and required. There can always be a tolerance of, at least, ±20% to the most recommended values.

¹ maximum depth to be investigated, ² weight of hammer in pounds, ³ natural frequency of geophone, ⁴ approximate total length of receiver spread (D=mZ_{max} with 1 ≤ m ≤ 3), ⁵ distance between source and the closest receiver (X₁=κD with 0.2 ≤ κ ≤ 1.0), ⁶ distance in receiver spacing (dx) that the source (S) and receiver (R) setup moves after acquiring data at one location, ⁷ degree of lateral resolution being sought, ⁸ recording parameters for seismograph, ⁹ sampling interval in milliseconds (ms), ¹⁰ total recording time in seconds (sec), ¹¹ number of stacking data in seismograph's memory before being saved under different conditions of calm (C), noisy (N), and very noisy (VN) environment, respectively, ¹² acquisition filter (e.g., low-cut, high-cut, etc.). * 24-channel acquisition system.

2.2.2 Ανάλυση διασποράς

Το επόμενο βήμα της υλοποίησης της μεθόδου M.A.S.W. αφορά τον προσδιορισμό της διασποράς των σεισμικών κυμάτων χρησιμοποιώντας μία μέθοδο χωρικής ανάλυσης των καταγραφών σε συνιστώσες ταχύτητας φάσης και συχνότητας. Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι **η διαμόρφωση των χαρακτηριστικών καμπυλών διασποράς μέσω του μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου από τον χώρο απόστασης - χρόνου (x - t) στο χώρο ταχύτητας φάσης - συχνότητας ($c_R - f$)**. Η μέθοδος που ακολουθείται για την επεξεργασία των καταγραφών είναι η μέθοδος μετάθεσης της φάσης (phase - shift) , η οποία χρησιμοποιεί όλα τα σεισμικά ίχνη ώστε να υλοποιηθεί ο μετασχηματισμός του κυματικού πεδίου (Park et al 1998a)(σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Απεικόνιση της μαθηματικής ακολουθίας για την επεξεργασία των καταγραφών (πηγή <http://www.masw.com/>)

Οι δέκτες - κανάλια (i) λαμβάνουν τα σήματα των σεισμικών κυμάτων που παράγονται από την σεισμική πηγή και τα αποθηκεύουν σε αυτή τη μορφή (r_i). Κατόπιν υπολογίζεται ο μετασχηματισμός Fourier των σημάτων που αποθηκεύθηκαν για κάθε ένα από τα κανάλια (Σχέση 2.5). Με αυτόν τον τρόπο

απαλείφεται ο παράγοντας του χρόνου και εισάγεται ο όρος της γωνιακής επιτάχυνσης (ω) κατά συνέπεια και της συχνότητας ($\omega = 2\pi f$).

$$R_i(\omega) = FFT(r_i) \quad (2.5)$$

Ακολούθως το μητρώο $R_i(\omega)$ κανονικοποιείται καθώς ο παράγοντας του πλάτους που περιέχει το $R_i(\omega)$ δε περιέχει πληροφορίες σχετικά με ταχύτητα φάσης των επιφανειακών κυμάτων.

$$R_{i,norm}(\omega) = R_i(\omega)/|R_i(\omega)| \quad (2.6)$$

Για την απαλοιφή των μηχανισμών υστέρησης που εμφανίζονται κατά την διαδικασία των μετρήσεων, δηλαδή της χωρικής λόγω των αποστάσεων των καναλιών και απόσβεσης υστέρησης λόγω της διάχυσης της σεισμικής ενέργειας στα διάφορα στρώματα του εδάφους, επιχειρείται η προβολή όλων των σημείων καταγραφής σε ένα σημείο. Έτσι υπολογίζεται η παράμετρος $\delta_{i,T}$ για ένα ορισμένο πεδίο ταχυτήτων (c_T), το εύρος του οποίου καθορίζεται από τον χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται ουσιαστικά προβολή στη θέση της πηγής όλων των σημείων των καναλιών καταγραφής.

$$\delta_{i,T} = \omega[\{x_1 + (i - 1)dx/c_T\}] \quad (2.7)$$

Στη συνέχεια αθροίζονται τα κανονικοποιημένα μητρώα $R_{i,norm}$ αφού συνυπολογιστεί η επιρροή της υστέρησης χρησιμοποιώντας τη παράμετρο $\delta_{i,T}$ σε ένα μητρώο $A_S(c_T)$:

$$A_S(c_T) = e^{-j\delta_{1,T}}R_{1,norm}(\omega) + e^{-j\delta_{2,T}}R_{2,norm}(\omega) + \dots + e^{-j\delta_{N,T}}R_{N,norm}(\omega) \quad (2.8)$$

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για πεπερασμένες τιμές της συχνότητας (f) και καταρτίζεται το μητρώο A_S που αποτελείται από το άθροισμα των μητρώων $A_S(c_T)$ για το σύνολο των συχνοτήτων κανονικοποιημένο ως προς την απόλυτη τιμή. Το μητρώο που προκύπτει αντιστοιχεί στα τοπικά ενεργειακά μέγιστα της κυματικής ενέργειας. Απεικονίζοντας το τελικό μητρώο A_S στο πεδίο ταχύτητας φάσης - συχνότητας ($c_R - t$) προκύπτει το διάγραμμα ισοϋψών για τις καμπύλες διασποράς και το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη θεμελιώδη καμπύλη διασποράς

(M_0) στην οποία συγκεντρώνονται οι πληροφορίες που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των δυναμικών χαρακτηριστικών του εδάφους.

2.2.3 Εκτίμηση παραμέτρων εδαφικού μοντέλου

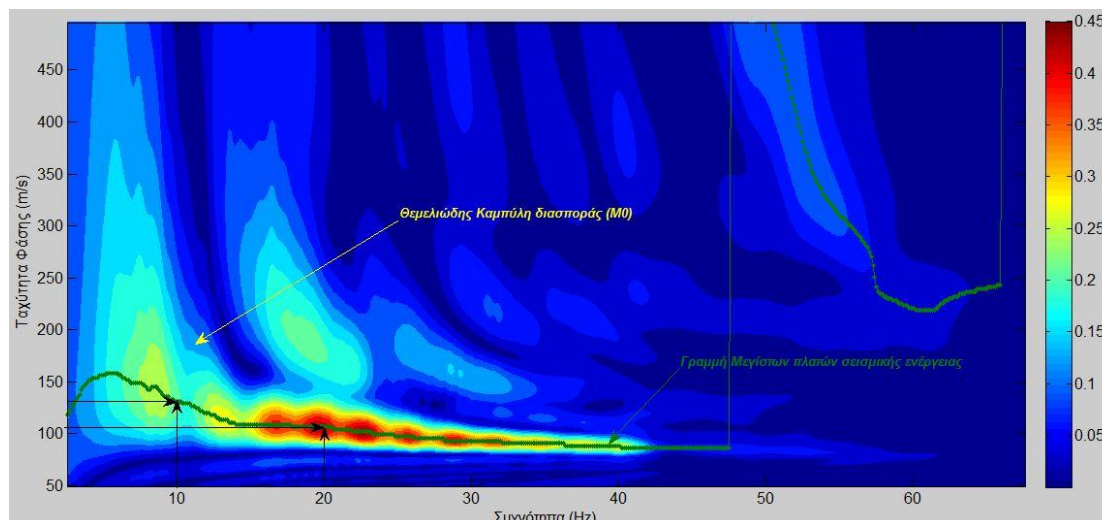
Ο προσδιορισμός των παραμέτρων του εδαφικού μοντέλου από τις καμπύλες διασποράς αποτελεί το τελικό στάδιο της διαδικασίας. Το εδαφικό μοντέλο προκύπτει από τη διαδικασία της αντιστροφής αυτών. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στη σύγκριση των πειραματικών καμπυλών διασποράς που προκύπτουν από τη διαδικασία της μεθόδου με τις θεωρητικές που προσδιορίζονται από τις εδαφικές παραμέτρους, οι οποίες έχουν εκτιμηθεί είτε από μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στο ίδιο πεδίο (εργαστηριακές ή επί τόπου) παράλληλα με τη μέθοδο M.A.S.W. ή και σε προηγούμενο χρόνο. Η σύγκριση αυτή οδηγεί στην αναπροσαρμογή των πειραματικών καμπυλών διασποράς κατ' επανάληψη έως ότου οι πειραματικές και οι θεωρητικές καμπύλες διασποράς συγκλίνουν σε ικανοποιητικό βαθμό οπότε προκύπτει το τελικό εδαφικό μοντέλο.

Η διαδικασία της αντιστροφής επηρεάζει την ακρίβεια της τελικής εκτίμησης για τη κατανομή της V_s με το βάθος, σε μεγαλύτερο βαθμό από τον προσδιορισμό των πειραματικών και θεωρητικών καμπυλών διασποράς. Η επιλογή της τεχνικής αντιστροφής καθώς, η διαδικασία εκτέλεσης της και η κρίση των ενδιάμεσων και τελικών αποτελεσμάτων είναι μία διαδικασία που ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς απαιτεί υπολογιστικά μοντέλα και εμπειρία που είναι αδύνατο να καλυφθούν από το επίπεδο γνώσεων σε προπτυχιακό επίπεδο.

Η εκτίμηση των εδαφικών παραμέτρων στην εργασία αυτή βασίζεται αρχικά στη παραδοχή ότι η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων V_s είναι ίση με την ταχύτητα φάσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh c_R . Σύμφωνα με τη σχέση 2.4 κάτι τέτοιο δεν ισχύει καθώς υπάρχει μία απόκλιση της τάξης του 6%, ωστόσο λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες που διακρίνονται στο πεδίο της γεωφυσικής γεωτεχνικής και της εδαφοδυναμικής, τόσο σε επίπεδο εκτίμησης των χαρακτηριστικών του εδάφους όσο και στη πρόβλεψη της συμπεριφοράς του, η παραδοχή της ισότητας των δύο ταχυτήτων κρίνεται ασφαλής.

Η εκτίμηση της τομής του υπεδάφους βασίζεται στη παρατήρηση ότι η κάθε ταχύτητα φάσης, αντιστοίχως και η ταχύτητα V_s περιγράφει τις εδαφικές ιδιότητες που αντιστοιχούν σε βάθος (z) που κυμαίνεται από $\lambda_R/3$ (Gazetas, 1991) έως $\lambda_R/2$ (Richard et al., 1970). Το λ_R είναι το μήκος κύματος που υπολογίζεται αντιστοιχίζοντας κάθε συχνότητα με την δεσπόζουσα ταχύτητα φάσης που της αντιστοιχεί στη θεμελιώδη καμπύλη διασποράς (M_0). Αυτό επιτυγχάνεται εντοπίζοντας τα ζευγάρια συχνότητας - ταχύτητας φάσης που αντιστοιχούν στα μέγιστα πλάτη της σεισμικής ενέργειας στη θεμελιώδη καμπύλη διασποράς (M_0) και το αντίστοιχο μήκος κύματος ($\lambda_R = c_R/f$) που προκύπτει χρησιμοποιείται στον προσδιορισμό της τομής του υπεδάφους.

Ένα ενδεικτικό παράδειγμα της τεχνικής που ακολουθείται δίνεται στο σχήμα 2.5 απεικονίζει τις ισοϋψείς των καμπυλών διασποράς, στο οποίο φαίνονται τα σημεία που αντιστοιχούν στα μέγιστα πλάτη της σεισμικής ενέργειας. Για παράδειγμα πως για συχνότητα $f = 10$ Hz η ταχύτητα φάσης c_R που αντιστοιχεί σύμφωνα με τα παραπάνω στη θεμελιώδη καμπύλη ισούται με 135 m/s επομένως το μήκος κύματος προκύπτει $\lambda_R = c_R(=V_s)/f = 135/10 = 13,5$ m. Οπότε το έδαφος μεταξύ $\lambda_R/3$ ($=13,5/3=4.5$ m) και $\lambda_R/2$ ($=13,5/2=6,75$ m) αντιπροσωπεύεται από τη ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων V_s ίση με 140 m/s. Αντίστοιχα για $f = 20$ Hz προκύπτουν $c_R(=V_s) = 110$ m/s και $\lambda_R = 110/20 = 5.5$ m οπότε η ταχύτητα $V_s = 110$ m/s εντοπίζεται σε εδαφικούς σχηματισμούς μεταξύ $\lambda_R/3$ ($=5.5/3 \approx 1.84$ m) και $\lambda_R/2$ ($=5.5/2=2.75$ m).



Σχήμα 2.5: Ενδεικτικό παράδειγμα απεικόνισης ισοϋψών καμπυλών διασποράς όπου με πράσινο χρώμα σημειώνονται τα σημεία των μεγίστων πλατών. Διακρίνονται για συχνότητες 10 Hz και 20 Hz, οι θέσεις των τοπικών μεγίστων και οι αντίστοιχες ταχύτητες φάσης στις οποίες αυτά εμφανίζονται.

Ο προσδιορισμός της τομής του υπεδάφους και κατά συνέπεια των εδαφικών παραμέτρων γίνεται εκτιμώντας τη κατανομή της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων V_s με το βάθος. Το εκτιμώμενο εδαφικό προφίλ που προκύπτει μέσω της διαδικασίας της μεθόδου M.A.S.W. είναι μονοδιάστατο καθώς παρά την δισδιάστατη διάταξη των καναλιών καταγραφής, οι παραγόμενες καμπύλες διασποράς αντιστοιχούν σε ένα σημείο στο οποίο έχουν προβληθεί τα σημεία των καναλιών καταγραφής όπως περιγράφηκε στην ανάλυση διασποράς.

Η ταχύτητα V_s αποτελεί μία πολύτιμη πηγή πληροφορίας για τα εδαφικά χαρακτηριστικά στη γεωτεχνική μηχανική καθώς συνδέονται άμεσα με το μέτρο ελαστικότητας (E) και του μέτρου διάτμησης (G) όποτε κατά συνέπεια μπορούν να εκτιμηθούν η σιβαρότητα και η φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους.

$$G = V_s^2 \rho \quad (2.9)$$

$$G = E / [2(1+\nu)] \quad (2.10)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Μεθοδολογία Αριθμητικών Αναλύσεων

3.1 Εισαγωγή

Η αριθμητική προσομοίωση ακολουθεί τα στάδια της μεθόδου της πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων (M.A.S.W.) όπως αυτά περιγράφηκαν σε προηγούμενη παράγραφο (§2.2). Έτσι η διαδικασία ξεκινάει με την προσομοίωση της εκτέλεσης της μεθόδου M.A.S.W. στο πεδίο και την αποθήκευση των δεδομένων που καταγράφηκαν από τα κανάλια καταγραφής, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS. Στη συνέχεια ακολουθεί η μαθηματική επεξεργασία των δεδομένων με σκοπό την διαμόρφωση των καμπυλών διασποράς στο λογισμικό περιβάλλον του προγράμματος MATHCAD. Τέλος η εκτίμηση της τομής του υπεδάφους σε όρους κατανομής της ταχύτητας V_s με το βάθος, πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB.

Για την παρουσίαση της αριθμητικής προσομοίωσης της μεθόδου επιλέχθηκε ένα εδαφικό προφίλ (soil_1) που περιγράφεται από την σχέση 3.1. Πρόκειται για έναν εδαφικό σχηματισμό του οποίου η ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων (V_s) αυξάνεται μονοτονικά με το βάθος και θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως έδαφος που ξεκινάει από αρκετά μαλακή άργιλο και καταλήγει σε άμμο σχετικά μέτριας πυκνότητας με σχετικά απότομο ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας V_s .

$$Soil_1 : V_s(z) = 100z^{0.3} \quad (3.1)$$

Επίσης ως σεισμικό φορτίο, σε πρώτη φάση, εξετάζονται δύο περιπτώσεις παλμών Ricker με διαφορετικά χαρακτηριστικά, λεπτομέρειες των οποίων δίνονται στη συνέχεια. Τέλος στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο διατάξεις με εννέα κανάλια - δέκτες, ενώ αναλύσεις με 24 κανάλια - δέκτες περιορίστηκαν σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, καθώς απαιτούν χρήση μεγάλου όγκου δεδομένων και είναι αρκετά χρονοβόρες.

3.2 Προσομοίωση μετρήσεων πεδίου

3.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά μοντέλου (Model Properties)

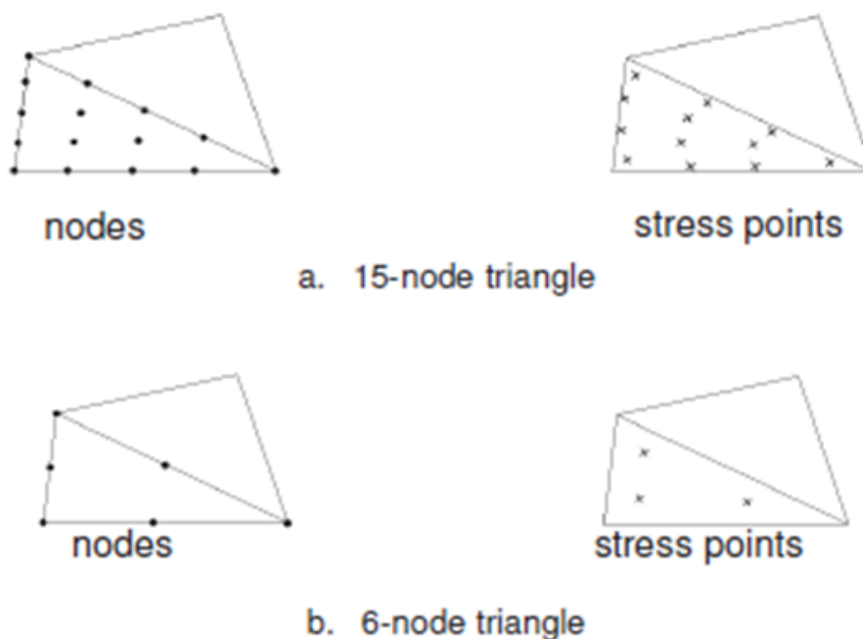
3.2.1.1 Τύπος μοντέλου

Η γεωμετρία και οι συνθήκες φόρτισης επιτρέπουν τη θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης για τη διεξαγωγή της υπολογιστικής διαδικασίας. Το μοντέλο επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain), αφορά διατομές όσο το δυνατόν περισσότερο ομοιόμορφες και περιπτώσεις όπου η εντατική κατάσταση και η κατάσταση φόρτισης εκτείνονται σε ένα επαρκές μήκος στη κάθετη, στη διατομή μελέτης, διεύθυνση. Στην περίπτωση αυτή, η παραμόρφωση και η κίνηση περιορίζεται μόνο σε ένα επίπεδο, ενώ στη διεύθυνση του κάθετου επιπέδου (άξονας z), θεωρείται μηδενική μεταβολή των διαστάσεων. Οι διαστάσεις που δόθηκαν στο προσομοίωμα είναι 72 μέτρα στην οριζόντια διεύθυνση και 20 μέτρα στην κατακόρυφη που αντιστοιχεί στο μέγιστο βάθος του εδαφικού προφίλ (Soil_1). Οι διαστάσεις αυτές θεωρούνται ικανές ώστε να θεωρείται αμελητέα η όποια επίδραση των συνοριακών συνθηκών.

3.2.1.2 Τύπος στοιχείων

Το πρόγραμμα PLAXIS παρέχει την δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε 6-κομβικό και 15-κομβικό τριγωνικό πεπερασμένο στοιχείο (π.σ.). Το 15-κομβικό π.σ. παρέχει παρεμβολή 4ου βαθμού για τις μετακινήσεις και η αριθμητική ολοκλήρωση περιλαμβάνει 12 σημεία Gauss (stress points). Ο τύπος του στοιχείου για τα δομικά στοιχεία και τις διεπιφάνειες λαμβάνεται αυτόματα συμβατός με τον τύπο του στοιχείου του εδάφους που επιλέγεται αρχικά. Το 15-κομβικό τριγωνικό είναι ένα πολύ ακριβές στοιχείο, που παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα τάσεων σε δύσκολα προβλήματα, όπως για παράδειγμα προβλήματα κατάρρευσης ασυμπίεστων εδαφών. Η χρήση των 15-κομβικών τριγωνικών πεπερασμένων στοιχείων οδηγεί σε κατανάλωση περισσότερης μνήμης και χαμηλότερη λειτουργική και υπολογιστική απόδοση.

Τα 6-κομβικά τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία τα οποία παρέχουν παρεμβολή 2ου βαθμού για τις μετακινήσεις και η αριθμητική ολοκλήρωση περιλαμβάνει 3 σημεία Gauss. Είναι ικανοποιητικά ακριβή στοιχεία και δίνουν καλά αποτελέσματα σε προβλήματα παραμόρφωσης, με τη προϋπόθεση ότι παρέχεται επαρκής αριθμός πεπερασμένων στοιχείων. Ένα 15-κομβικό στοιχείο μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από τέσσερα 6-κομβικά στοιχεία, αφού ο συνολικός αριθμός κόμβων και σημείων ολοκλήρωσης είναι ο ίδιος. Παρ' όλα αυτά, ένα 15-κομβικό στοιχείο είναι ισχυρότερο από τέσσερα 6-κομβικά.



Σχήμα 3.1: Θέση των κόμβων και των σημείων ολοκλήρωσης, για στοιχεία εδάφους

Ωστόσο οι ανάγκες της αριθμητικής προσομοίωσης του αντικειμένου της μελέτης αυτής καλύπτονται από τα 6-κομβικά τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία, αρκεί ο αριθμός τους να είναι ικανοποιητικός, καθώς το πλήθος των αναλύσεων είναι μεγάλο και τα αποτελέσματά τους δεν είναι ευαίσθητα ως προς την επιλογή του τύπου των πεπερασμένων στοιχείων.

3.2.2 Μοντελοποίηση εδάφους (ground modeling)

Αφού κατασκευαστεί η γεωμετρία της προσομοίωσης (72m επί 20m), επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή των χαρακτηριστικών του εδάφους και η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου για την ανάλυση του εδάφους. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια (§1.2.1) η μέθοδος M.A.S.W. είναι μία δοκιμή μικρού πλάτους παραμόρφωσης και αναλύει τα επιφανειακά κύματα Rayleigh. Επομένως το μοντέλο που επιλέγεται είναι το γραμμικά ελαστικό μοντέλο (linear elastic), το οποίο βασίζεται στο νόμο του Hooke για την ελαστικότητα ισότροπου υλικού. Οι βασικές ελαστικές παράμετροι του μοντέλου είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young (E) και ο λόγος του Poisson (ν).

Η τιμή του λόγου του Poisson (ν) επιλέγεται ίση με 0,3 και το ειδικό βάρος (γ) ίσο με 20 kN/m^3 για όλους τα εδάφη που εξετάζονται. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας (E) δίνεται έμμεσα καθώς ως δεδομένο εισαγωγής για τον χαρακτηρισμό του εδάφους δίνεται η ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων V_s . Η προσομοίωση των εδαφικών σχηματισμών έγινε θεωρώντας ότι το έδαφος αποτελείται από 20 στρώσεις πάχους ενός μέτρου με διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων ανά στρώμα οι οποίες αντιστοιχούν στο μέσον του κάθε στρώματος (σχήμα 3.5). Στον πίνακα 3.1 φαίνονται τα βάθη με τις αντίστοιχες ταχύτητες εγκάρσιων κυμάτων V_s για το Soil_1 που χρησιμοποιήθηκαν στο προσομοίωμα.

Soil_1 : $V_s = 100 * z^{0,3}$			
z (m)	V_s (m/s)	z (m)	V_s (m/s)
0,5	81,2	10,5	202,5
1,5	112,9	11,5	208,1
2,5	131,6	12,5	213,3
3,5	145,6	13,5	218,3
4,5	157,0	14,5	223,1
5,5	166,8	15,5	227,6
6,5	175,3	16,5	231,9
7,5	183,0	17,5	236,0
8,5	190,0	18,5	240,0
9,5	196,5	19,5	243,8

Πίνακας 3.1 : Κατανομή της εγκάρσιας ταχύτητας V_s με το βάθος

3.2.2.1 Απόσβεση

Είναι σαφές πως, παρόλο που η διάδοση των κυμάτων γίνεται σε γραμμικά ελαστικό ημίχωρο, τα κύματα δε μπορεί να διαδίδονται επ' άπειρον χωρίς απομείωση του πλάτους. Η απώλεια ενέργειας των σεισμικών κυμάτων που οδηγεί στη μείωση του πλάτους του κύματος είναι η απόσβεση. Η απόσβεση των υλικών στους δυναμικούς υπολογισμούς οφείλεται στα χαρακτηριστικά ιξώδους του εδάφους, στη τριβή και στην ανάπτυξη μη αναστρέψιμων παραμορφώσεων. Η απόσβεση των εδαφικών υλικών εκφράζεται μέσω της απόσβεσης Rayleigh. Το

μητρώο απόσβεσης C προκύπτει αθροίζοντας ποσοστό του μητρώου μάζας M και ποσοστό του μητρώου δυσκαμψίας K :

$$C = a * M + b * K \quad (3.2)$$

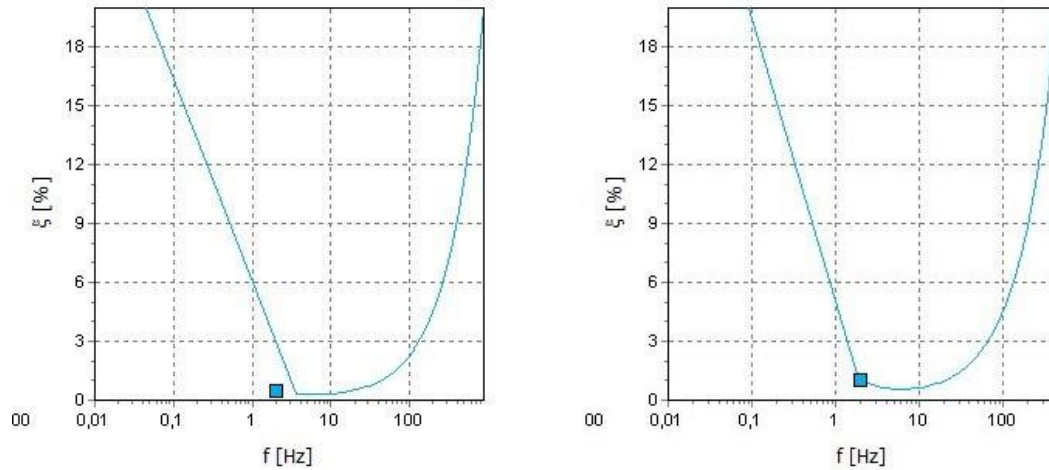
Οι συντελεστές a, b που φαίνονται στη σχέση 3.2 αποτελούν τα ποσοστά επιρροής των μητρών μάζας M και δυσκαμψίας K και ονομάζονται συντελεστές απόσβεσης Rayleigh.

Η παράμετρος που χρησιμοποιήθηκε για την εισαγωγή της απόσβεσης στο προσομοίωμα είναι ο λόγος απόσβεσης ξ , ο οποίος συνδέεται με τους συντελεστές Rayleigh μέσω της σχέσης 3.3.

$$\alpha + \beta * \omega^2 = 2 * \xi * \omega \quad \text{και} \quad \omega = 2 * \pi * f \quad (3.3)$$

όπου ω είναι η γωνιακή συχνότητα και f είναι η συχνότητα.

Αν και σε πρώτη φάση στο έδαφος (Soil_1) που εξετάζεται δε συμπεριλήφθηκε η έννοια της απόσβεσης περιγράφονται εδώ ο τρόπος εισαγωγής της στο προσομοίωμα και τα χαρακτηριστικά της, καθώς θα παρουσιαστούν σε διάφορες αναλύσεις, για λόγους που θα τονιστούν σε επόμενο κεφάλαιο. Για την ακρίβεια χρησιμοποιήθηκαν δύο ζευγάρια τιμών για τις παραμέτρους Rayleigh, a και b ώστε να διαμορφώνεται απόσβεση 0,5% και 1%. Συγκεκριμένα για $\xi = 0,5\%$ οι συντελεστές Rayleigh είναι $a = 0.1142$ και $b = 0,00007234$ ενώ για $\xi = 1\%$ αντίστοιχα είναι $a = 0.2285$ και $b = 0,0001447$ (σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Σχέση συχνότητας-απόσβεσης για $\xi = 0,5\%$ αριστερά και $\xi = 1\%$ δεξιά.

3.2.3 Προσομοίωση διάταξης και χαρακτηριστικών εξοπλισμού

Σε αυτό το στάδιο της προσομοίωσης εισάγονται τα χαρακτηριστικά της σεισμικής πηγής και των καναλιών καταγραφής των επιφανειακών κυμάτων, και ακόμη ορίζεται ο κানাβος (meshing) των πεπερασμένων στοιχείων.

3.2.3.1 Προσομοίωση σεισμικής πηγής

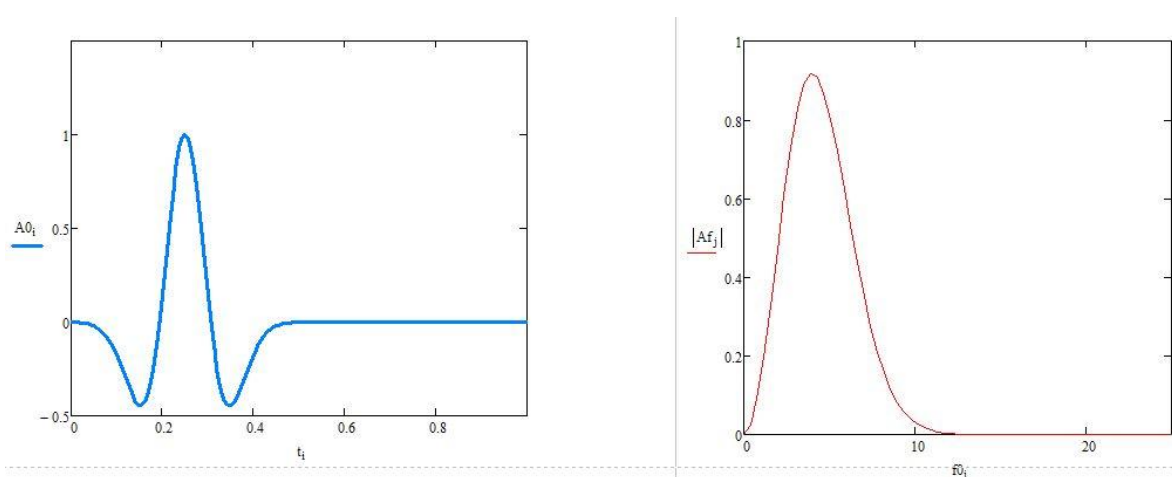
Η προσομοίωση της σεισμικής πηγής γίνεται με ένα σημειακό φορτίο (Point load) του οποίου τα δυναμικά χαρακτηριστικά είναι μία κατακόρυφη δύναμη 20 kN και ένα δυναμικό φορτίο το οποίο καθορίζεται. Σε πρώτη φάση ως δυναμικό φορτίο επιλέγεται ένας εξιδανικευμένος παλμός Ricker δεσπόζουσας συχνότητας 4 Hz και στη συνέχεια μία σειρά από εξιδανικευμένους παλμούς Ricker, οι συχνότητες των οποίων κυμαίνονται από 4 Hz έως και 30 Hz. Η εξίσωση που δίνει το πλάτος του κύματος συναρτήσει του χρόνου περιγράφεται από τη σχέση 3.4.

$$A_0 = (1 - 2\pi^2 f^2 t^2) e^{-\pi^2 f^2 t^2} \quad (3.4)$$

Παλμός Ricker συχνότητας 4 Hz

Η πρώτη ανάλυση πραγματοποιείται θέτοντας ως φόρτιση ένα παλμό Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα στα 4Hz και χρονικής διάρκειας 1,28 δευτερολέπτου. Η χαρακτηριστική συχνότητα επιλέχθηκε σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν σχετικά με το μέγιστο βάθος διείσδυσης (§2.2.1.1) και σύμφωνα με τις προτεινόμενες τιμές που δίνονται στον Πίνακα 2.1, όπου συγκεκριμένα για μέγιστο βάθος 20 μέτρων προτείνονται κανάλια καταγραφής συχνότητας μικρότερης των 4,5 Hz.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που η κυματομορφή ενός τέτοιου παλμού είναι σχετικά απλή, καλύπτεται με την εφαρμογή του μία ευρεία γκάμα συχνοτήτων που πλησιάζει κατά προσέγγιση το τριπλάσιο της χαρακτηριστικής συχνότητας (σχήμα 3.3).

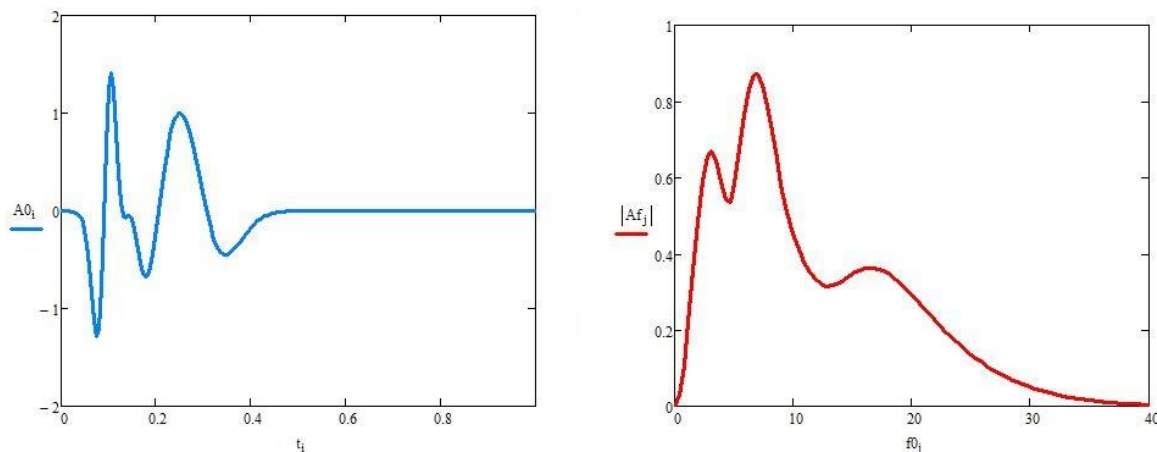


Σχήμα 3.3: Στα αριστερά φαίνεται η κυματομορφή του παλμού Ricker ενώ στα δεξιά διακρίνεται η γκάμα των συχνοτήτων του παλμού και η δεσπόζουσα συχνότητα στα 4Hz.

Σύνθετος Παλμός Ricker

Η επιβολή ενός φορτίου με δεσπόζουσα συχνότητα μεγαλύτερη των 4 Hz έγινε με σκοπό τη διασκόπηση σε βάθη μικρότερα του μέγιστου και κοντά στην επιφάνεια του εδάφους που θεωρητικά δεν καλύπτονται από τον παλμό Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα 4 Hz. Έτσι για τον λόγο αυτό δημιουργείται ένας νέος σύνθετος παλμός Ricker ο οποίος αποτελείται από μία σειρά απλών παλμών Ricker διάφορων δεσποζουσών συχνοτήτων, η συμβολή των οποίων δημιουργεί ένα

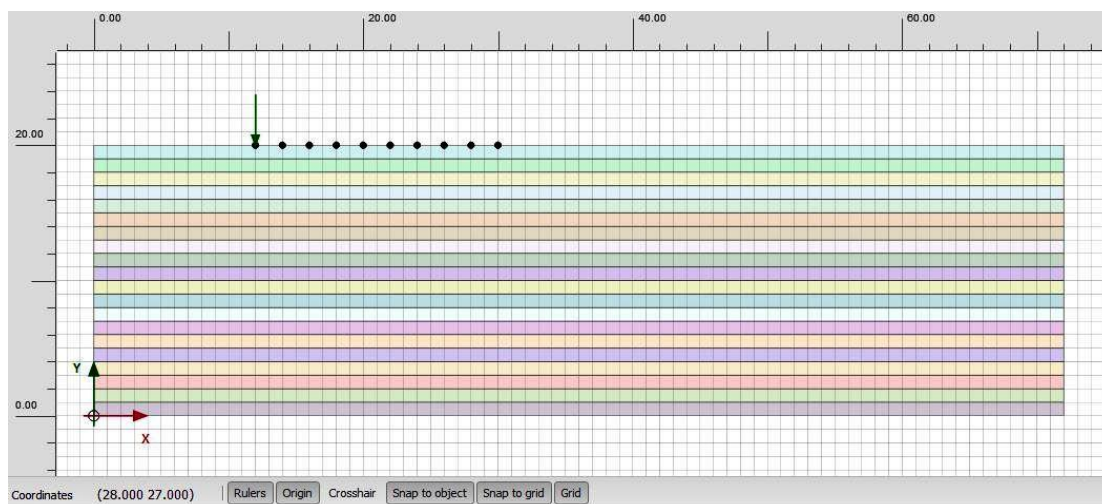
σύνθετο παλμό Ricker με πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο (σχήμα 3.4) σε συχνότητες μεγαλύτερες των 4 Hz.



Σχήμα 3.4: Στα αριστερά φαίνεται η κυματομορφή του σύνθετου παλμού Ricker ενώ στα δεξιά διακρίνεται η γκάμα των συχνοτήτων του σύνθετου παλμού και η έμφαση που δίνεται σε υψηλότερες συχνότητες.

3.2.3.2 Προσομοίωση καναλιών καταγραφής

Τα κανάλια καταγραφής εισάγονται ως σημεία στην επιφάνεια του εδάφους και η μεταξύ τους απόσταση (dx) καθορίζεται στα 2 μέτρα, επομένως το ανάπτυγμα τους (D) ισούται με 18 μέτρα σε 9-κάναλη διάταξη ανά 2m και 24 μέτρα για δοκιμή με 24 κανάλια ανά 1m. Η απόσταση σεισμικής πηγής - καναλιών (x_1) ορίζεται στα 2 μέτρα. Σχετικά με το μέγεθος που καταγράφεται δε υπάρχει κάποια προδιαγραφή καθώς το πρόγραμμα PLAXIS αποθηκεύει τόσο κατανομές ταχύτητας - χρόνου όσο και επιτάχυνσης - χρόνου. Στις αναλύσεις που περιγράφονται στην εργασία αυτή χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα επιτάχυνσης - χρόνου καθώς τα μέγιστα βάθη διασκόπησης είναι μεγάλα. Η διάταξη των καναλιών καταγραφής, της σεισμικής πηγής και η εικόνα της στρωματογραφίας του υπεδάφους φαίνονται στο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Απεικόνιση του μοντέλου του εδάφους και της διάταξης του εξοπλισμού στο πρόγραμμα π.σ. PLAXIS.

3.2.4 Δημιουργία κανάβου π.σ. και υπολογιστική διαδικασία

3.2.4.1 Κατάρτιση κανάβου π.σ.

Με την ολοκλήρωση της γεωμετρίας και των απαραίτητων υποδομών γίνεται η κατάρτιση του κανάβου των πεπερασμένων στοιχείων. Επιλέγεται πολύ πυκνή κατανομή στοιχείων (very fine) με πύκνωση στα πρώτα μέτρα ιδιαίτερα (σχήμα 3.6) καθώς για να μπορέσει να αντληφθεί ένα πεπερασμένο στοιχείο του PLAXIS το κύμα που διαδίδεται πρέπει το πάχος (d) του να επαρκεί. Επαρκές πάχος θεωρείται όταν το d ισούται με $\lambda/(3\div 4)$, όπου λ το μήκος κύματος. Επομένως θεωρώντας πως στο πρώτο ένα μέτρο η ταχύτητα κυμαίνεται στα 81,2 m/s και η μέγιστη συχνότητα που εμφανίζεται στον σύνθετο παλμό Ricker είναι περίπου ίση με 30 Hz προκύπτει μήκος κύματος $\lambda = 81,2/30 = 2,7$ m, επομένως το πάχος του π. σ. θα παίρνει τιμές από 0,9 m ($\lambda/3$) έως 0,675m ($\lambda/4$). Δεδομένου ότι το πάχος των στρωμάτων είναι 1 μέτρο και χρησιμοποιούνται 6-κομβικά π. σ. η πύκνωση στα πρώτα δύο-τρία μέτρα κρίνεται απαραίτητη.



Σχήμα 3.6: Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων. Διακρίνεται η πύκνωση στα πρώτα 3 μέτρα του εδάφους.

3.2.4.2 Φάσεις υπολογισμού

Το τελευταίο βήμα πριν τον έναρξη του υπολογισμού του προγράμματος είναι η κατάρτιση των φάσεων υπολογισμού. Η αρχική φάση (Initial Phase) υπολογίζει το πεδίο των γεωστατικών τάσεων της αρχικής γεωμετρίας. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή “K₀ procedure” στις ιδιότητες της αρχικής φάσης. Η επιλογή αυτή προτιμάται σε περιπτώσεις που η γεωμετρία του εδάφους έχει οριζόντια επιφάνεια εδάφους, οριζόντιες όλες τις εδαφικές στρώσεις και τον υδροφόρο ορίζοντα στην επιφάνεια του εδάφους. Το K₀ που αναφέρθηκε στην επιλογή της για την αρχική φάση είναι ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων γαιών που συσχετίζει την αρχική οριζόντια ενεργό τάση με την αρχική κάθετη ενεργό τάση ($\sigma'_{ho} = K_0 \cdot \sigma'$), όπως είναι γνωστό από την εδαφομηχανική.

Για τις συνθήκες στήριξης στα όρια του εδαφικού προφίλ επιλέγεται ‘use default fixities’. Η επιλογή αυτή δεσμεύει τα κατακόρυφα σύνορα του μοντέλου σε οριζόντια κίνηση και επιτρέπει ελεύθερα την κίνηση στον κάθετο άξονα y. Επίσης η επιφάνεια του εδάφους θεωρείται ελεύθερη σε όλες τις διευθύνσεις ενώ στη βάση του μοντέλου δεν επιτρέπεται καμία κίνηση.

Στην επόμενη φάση (Phase 1) ενεργοποιείται ο εξοπλισμός της μεθόδου M.A.S.W. δηλαδή η σεισμική πηγή και η σειρά των σειсмоγράφων. Σε αυτό το σημείο δίνονται στη πηγή φόρτισης, το σημειακό φορτίο δηλαδή, τα

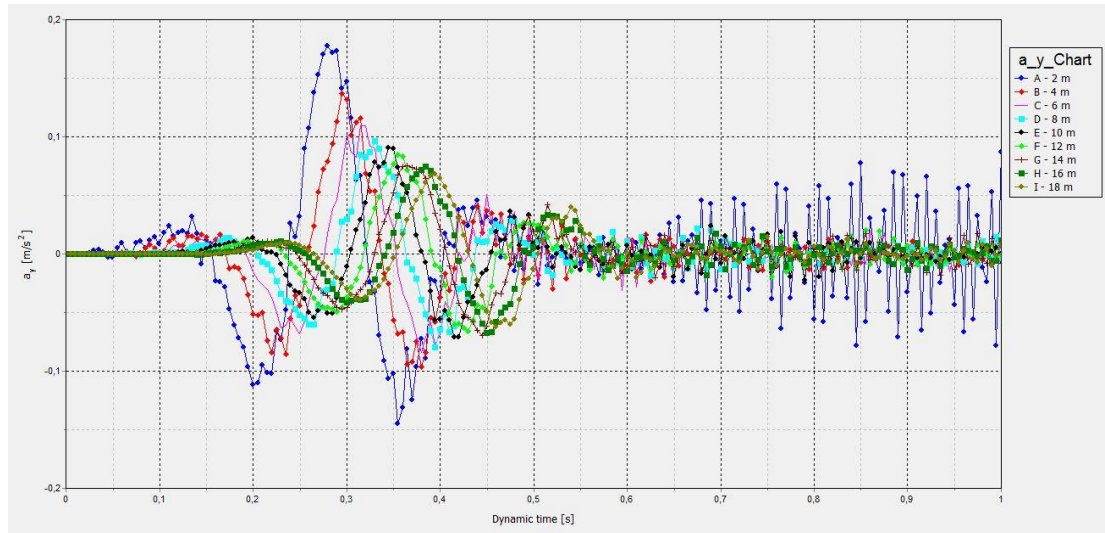
χαρακτηριστικά της φόρτισης που έχει επιλεγεί στην κάθε ανάλυση. Ο τύπος υπολογισμού που χρησιμοποιείται είναι τέτοιος ώστε να προσομοιώνει το δυναμικό χαρακτήρα της φόρτισης (Calculation type → dynamic). Στη συνέχεια συμπληρώνονται ο χρόνος της φόρτισης (1,28 sec) και ο μέγιστος αριθμός των βημάτων (256) που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της φόρτισης, οπότε προκύπτει και το χρονικό βήμα της διαδικασίας που σε αυτή την περίπτωση ισούται με 0,005 sec (=1.28 sec/256). Τα δύο αυτά μεγέθη εξαρτώνται από την φόρτιση που επιλέχθηκε σε κάθε ανάλυση και από την διακριτοποίηση της χρονικής διάρκειας της φόρτισης.

Τέλος πριν την έναρξη της ανάλυσης καθορίζονται οι δυναμικές συνθήκες στήριξης στα όρια του μοντέλου, οι οποίες διαφέρουν φυσικά από εκείνες της αρχικής φάσης. Συγκεκριμένα στη βάση και στις κατακόρυφες πλευρές του μοντέλου επιλέγονται συνθήκες που θεωρείται πως απορροφούν την επερχόμενη σεισμική ενέργεια μέσω αποσβεστήρων (Viscous).

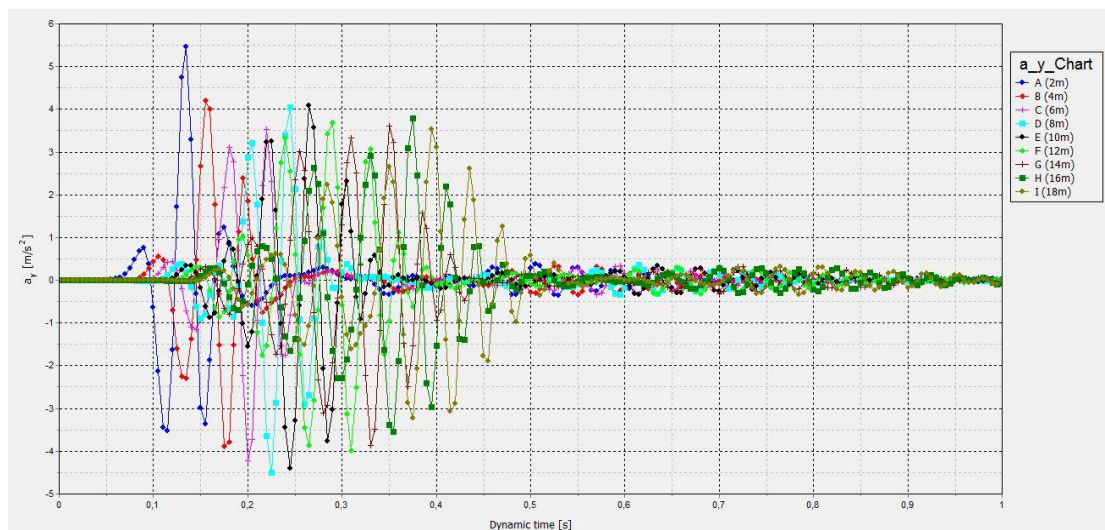
3.2.5 Αποθήκευση καταγραφών

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αποτελούνται από τις χρονοσειρές των κατακόρυφων επιταχύνσεων (a_y) που καταγράφηκαν από κάθε κανάλι, κατά τη διάρκεια επιβολής του φορτίου. Οι καταγραφές αυτές φαίνονται στα σχήματα από 3.7 έως και 3.10 για αναλύσεις που έγιναν στο έδαφος της μελέτης (Soil_1) με τις φορτίσεις που περιγράφηκαν στη §3.2.3.1 σε διάταξη με 9 κανάλια και σε διάταξη με 24 κανάλια. Σε αυτό το σημείο να τονιστεί πως ανάλυση με 24 κανάλια πραγματοποιήθηκε μόνο για τον σύνθετο παλμό Ricker καθώς τα αντίστοιχα αποτελέσματα αυτής της φόρτισης με τα 9 κανάλια παρουσίασαν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Τέλος οι καταγραφές όλων των καναλιών καταγραφής αποθηκεύονται σε ένα μητρώο (A0) διαστάσεων $N \times M$, όπου N είναι το σύνολο των βημάτων που ακολουθήθηκαν (256) και M είναι ο αριθμός των καναλιών συν μία στήλη (στην πρώτη στήλη φαίνεται ο χρόνος). Έχοντας δεδομένο πλέον το αρχείο των καταγραφών των επιφανειακών κυμάτων ακολουθεί η επεξεργασία τους με σκοπό

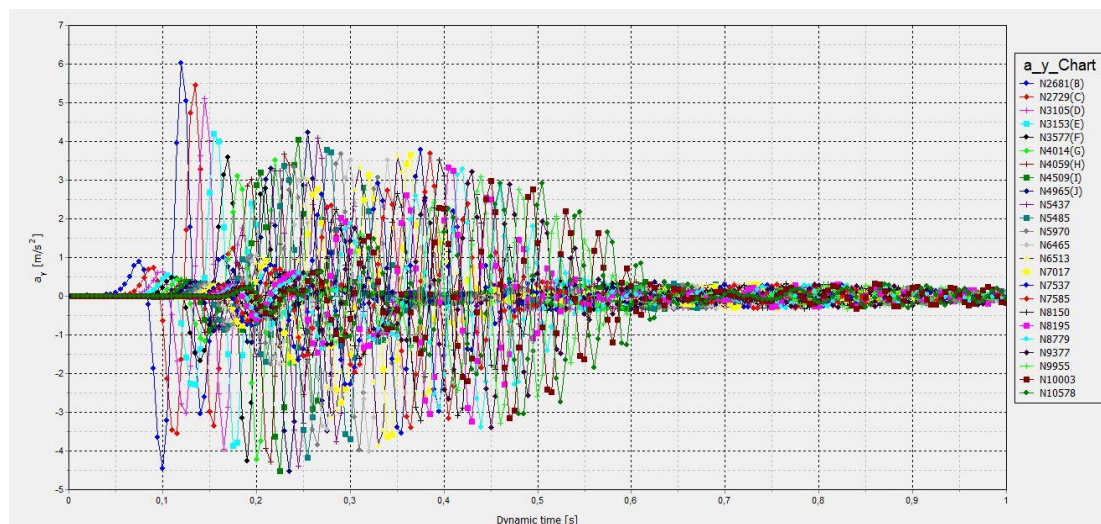
την κατάρτιση των καμπυλών διασποράς και κατ' επέκταση της εκτίμησης του προφίλ των διατμητικών ταχυτήτων συναρτήσει του βάθους.



Σχήμα 3.7: Χρονοσειρά κατακόρυφων επιταχύνσεων που καταγράφονται από τα κανάλια (9) για παλμό Ricker δεσπόζουσας συχνότητας 4Hz.



Σχήμα 3.8: Χρονοσειρά κατακόρυφων επιταχύνσεων που καταγράφονται από τα κανάλια (9) για σύνθετο παλμό Ricker.



Σχήμα 3.9: Χρονοσειρά κατακόρυφων επιταχύνσεων που καταγράφονται από τα κανάλια (24) για σύνθετο παλμό Ricker.

3.3 Επεξεργασία καταγραφών

Το αποτέλεσμα της διαδικασίας των μετρήσεων στο πεδίο είναι οι χρονοσειρές των επιταχύνσεων που καταγράφηκαν από τους δέκτες και αποθηκεύθηκαν σε ένα μητρώο (A0). Η μαθηματική επεξεργασία του αρχείου (A0) που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος MATHCAD 2015 και αποσκοπεί στην διαμόρφωση των καμπυλών διασποράς. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίζεται στη μέθοδο μετάθεσης της φάσης (phase - shift) όπως αυτή περιγράφηκε στη παράγραφο 2.2.2. Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση και η περιγραφή των εντολών και της αλληλουχίας τους, της μεθόδου phase shift στο λογισμικό περιβάλλον του MATHCAD με τις απαραίτητες διευκρινήσεις όπου κρίνεται απαραίτητο.

Στο σημείο αυτό να τονιστεί πως η αρίθμηση των εντολών που φαίνεται στη συνέχεια είναι τυπική καθώς το πρόγραμμα MATHCAD δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να ακολουθήσει όποια σειρά θέλει σχεδιάζοντας ουσιαστικά τις εξισώσεις και μετακινώντας αυτές όπως τον βολεύει καλύτερα. Ακόμα στις επόμενες σειρές το ενδιαφέρον εστιάζεται στην επεξήγηση της φιλοσοφίας που ακολουθήθηκε στην δημιουργία του προγράμματος και όχι σε μία σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας. Επίσης σε όλες τις αναλύσεις το σύνολο των βημάτων που συνθέτουν

την κυματομορφή της φόρτισης είναι δύναμη του 2 καθώς η phase-shift method απαιτεί μετασχηματισμό Fourier επομένως πρέπει να καλύπτεται πάντα αυτή η απαίτηση.

- Αρχικά εισάγεται στο πρόγραμμα το μητρώο των καταγραφών (A0) και ορίζονται τα μεγέθη που καθορίζουν τις διαστάσεις των μητρώων που υπολογίζονται και χρησιμοποιούνται, τα οποία απορρέουν από τις διαστάσεις του (A0) και συνεπώς από τα χαρακτηριστικά του φορτίου της πηγής.

1: A0 = ... \a_y.xlsx

2: dt0 = 0.005

3: Nf = 128

4: i = 0...2*Nf-1 →(256 σημεία)

5: ti = i*dt0

6: k = n →(n ο αριθμός των καναλιών 9 ή 24)

- Εκείνο που απομένει για την έναρξη της μεθόδου phase shift είναι ο ορισμός του πεδίου ταχύτητας φάσης - συχνότητας ($c_R - f$). Για τον ορισμό των ταχυτήτων επιλέγονται τιμές από $50 \div 500$ m/s με βήμα 2,25 m/s, οι οποίες καλύπτουν επαρκώς το εύρος των ταχυτήτων που εμφανίζονται στον εδαφικό σχηματισμό, ενώ για τις συχνότητες επιλέγονται 128 τιμές από 0 έως 100 με βήμα όπως φαίνεται στην εντολή 7.

$$7: f0_j = \frac{j}{2*dt0*Nf}$$

8: Nm = 200

9: ij = 0 ... Nm

$$10: cT_{ij} = 50 + 450 * \frac{ij}{Nm}$$

- Η διαδικασία τη μεθόδου Phase Shift ξεκινάει με το μετασχηματισμό Fourier (εντολή 11) που πραγματοποιείται σε κάθε μία από τις καταγραφές των καναλιών με τη σειρά και κατόπιν κανονικοποιείται. Αμέσως μετά υπολογίζεται η τιμή της παραμέτρου υστέρησης $\delta_{i,T}$ μέσω της σχέσης 2.7, αφού πρώτα οριστούν οι αποστάσεις μεταξύ των

καναλιών καταγραφής και της σεισμικής πηγής. Τέλος υπολογίζεται το μητρώο των μέγιστων πλατών της σεισμικής ενέργειας ως το άθροισμα των γινομένων των κανονικοποιημένων καταγραφών Fourier επί της παραμέτρου $\delta_{i,T}$ για κάθε κανάλι καταγραφής

$$11: Af^{<k>} = \text{fft}(AO^{<k>})$$

$$12: RO_k = RO^{<k>} = \frac{Af^{<k>}}{|Af^{<k>}|}$$

$$13: x_1 = 2, x_2 = 4, x_3 = 6, x_4 = 8 \dots \rightarrow (\text{ορισμός απόστασης δεκτών από τη πηγή})$$

$$14: \text{delta}_{ij,j} = 2\pi f_0 j \frac{x_k}{cT_{ij}}$$

$$15: AT_{j,ij} = \sum_{k=n}^1 \{e^{-i\text{delta}(k)_{ij,j}} RO(k)_j\}$$

$$16: AT_{j,ij} = |AT_{j,ij}|$$

Το μητρώο της σεισμικής ενέργειας $AT_{j,ij}$ αποτελείται από μιγαδικούς αριθμούς καθώς η έννοια του χρόνου σε μία μαθηματική διαδικασία εκφράζεται μέσω μιγαδικών αριθμών. Έτσι στην εντολή 16 απομονώνονται τα πλάτη τα πλάτη των μιγαδικών αριθμών του μητρώου της σεισμικής ενέργειας και κατόπιν απεικονίζονται σε διάγραμμα ισοϋψών καμπυλών. Ωστόσο για λόγους ευχέρειας στην επεξεργασία και τη παρουσίαση των καμπυλών, η διαμόρφωσή τους γίνεται στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB και παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

3.4 Εκτίμηση κατανομής V_s

Η μέθοδος M.A.S.W. ολοκληρώνεται με την εκτίμηση της κατανομής της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων V_s με το βάθος. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού επιστρατεύεται η προγραμματιστική γλώσσα της MATLAB. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε χρησιμοποιεί ως δεδομένο το μητρώο $AT_{j,ij}$ που προέκυψε κατόπιν επεξεργασίας στο πρόγραμμα MATHCAD που παρουσιάστηκε παραπάνω, και αρχικά συνθέτει τις καμπύλες διασποράς του μητρώου αυτού και

στη συνέχεια, “διαβάζοντας” τις καμπύλες αυτές προκύπτει το μητρώο που οδηγεί στην εκτίμηση της κατανομής της ταχύτητας V_s .

Η σύγκριση της προκύπτουσας κατανομής της ταχύτητας V_s με την αρχική που τέθηκε γίνεται σε πρώτη φάση πλοτάρωντας τα σημεία του πραγματικού εδάφους (Soil_1) ακολουθώντας την αντίστροφη διαδικασία από εκείνη που χρησιμοποιείται για το “διάβασμα” των καμπυλών διασποράς που παρουσιάστηκε στο §2.2.3. Συγκεκριμένα στην αντίστροφη διαδικασία αναζητείται η συχνότητα f που αντιστοιχεί στην ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων V_s σε κάθε βάθος z του, όπως αντίστοιχα ζητούμενο ήταν το βάθος z στην διαδικασία ανάλυσης της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς. Επομένως τα ζευγάρια ταχύτητας V_s - βάθους z του Πίνακα 3.1 μετασχηματίζονται σε ζευγάρια ταχύτητας V_s - συχνότητας f (πεδίο καμπυλών διασποράς), μέσω της εξίσωσης $\lambda_R = V_s/f$, αφού πρώτα υπολογισθεί το μήκος κύματος λ_R ως z^3 (Gazetas 1991) ή z^2 (Richard et al.,1970). Συνεπώς προκύπτουν δύο εδαφικές καμπύλες αναλόγως με το κριτήριο που επιλέγεται και αναζητείται εκείνη που πλησιάζει περισσότερο την θεμελιώδη καμπύλη διασποράς. Όσα περιγράφηκαν μόλις παρουσιάζονται παρακάτω στον αλγόριθμο που συντάχθηκε για την εφαρμογή.

```

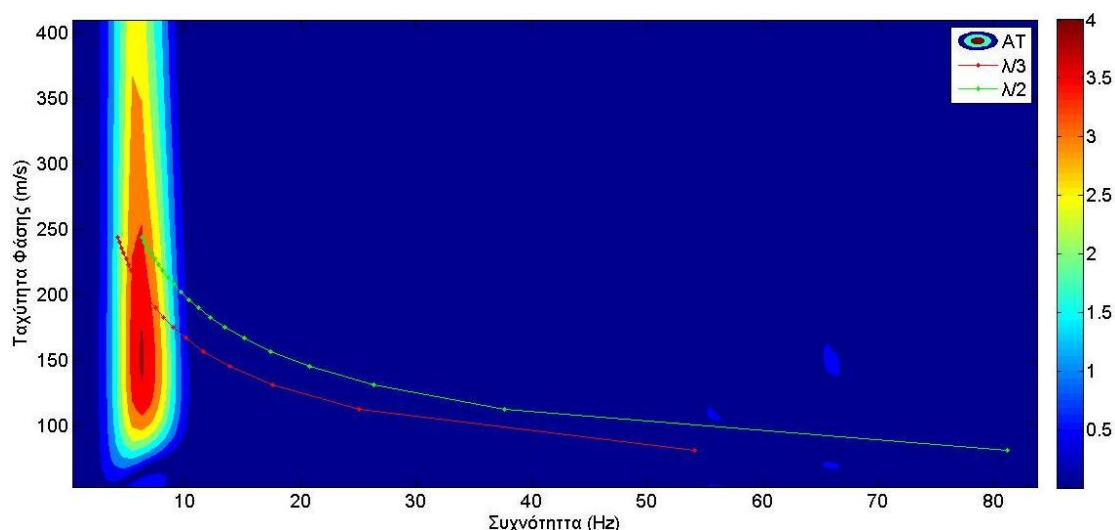
1- clc;
2- clear;
3- AT = xlsread('AT_soil1_sin1hz(4sec)_0.5%.xlsx');
4- [M, I] = max(AT, [], 2);
5-
6- dt0 = 0.001;
7- vima_f = 1/(2*dt0*(size(AT,1)-1));
8- AS = transpose(AT);
9- x0 = 0;
10- AS(:, 1:x0) = zeros(size(AS,1),x0);
11-
12- I = 50+2.25*(I(:)-1);
13- x = 0:vima_f:(size(AT,1)-1)*vima_f;
14- y = 50:2.25:500;
15-
16- z = 0.5:19.5;
17- Vs_real = 100*z.^0.3;
18- for i = 1:20
19-     K3(i) = Vs_real(i)/(3*z(i));
20-     K2(i) = Vs_real(i)/(2*z(i));

```

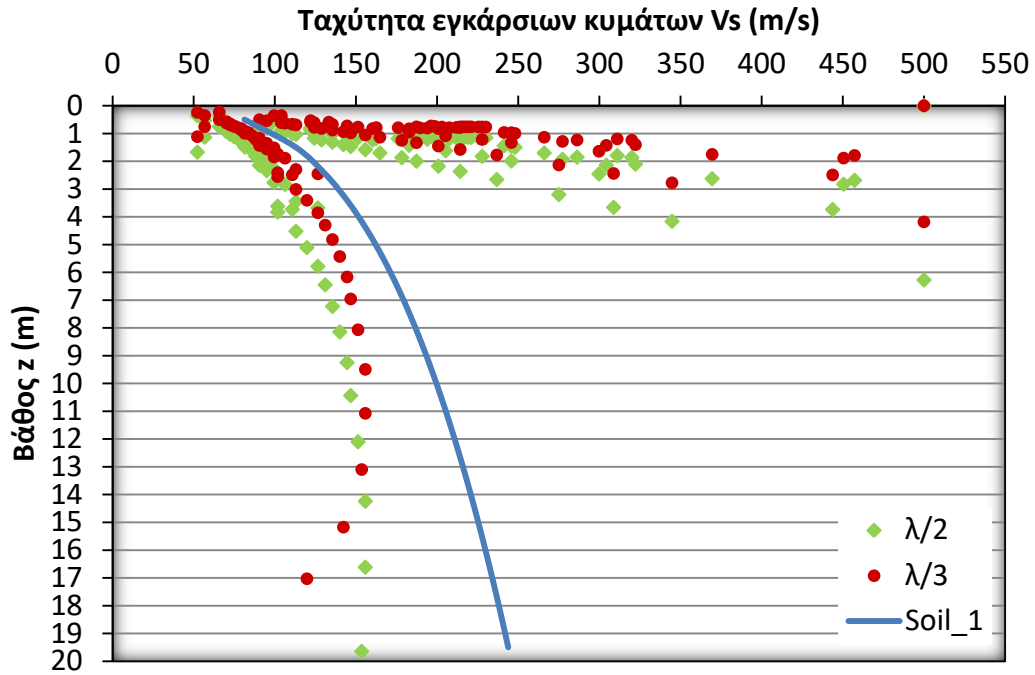
```

21- end
22-
23- figure(1)
24- contour(x,y,AS)
25- xlabel('Συχνότητα (Hz)' % x-axis label
26- ylabel('Ταχύτητα Φάσης (m/s)' % y-axis label
27-
28- hold on
28- plot(K3,Vs_real,'Marker' , '.' , 'Color','red')
29- plot(K2,Vs_real,'Marker' , '.' , 'Color','green')
30- legend('AT','λ/3','λ/2')
    
```

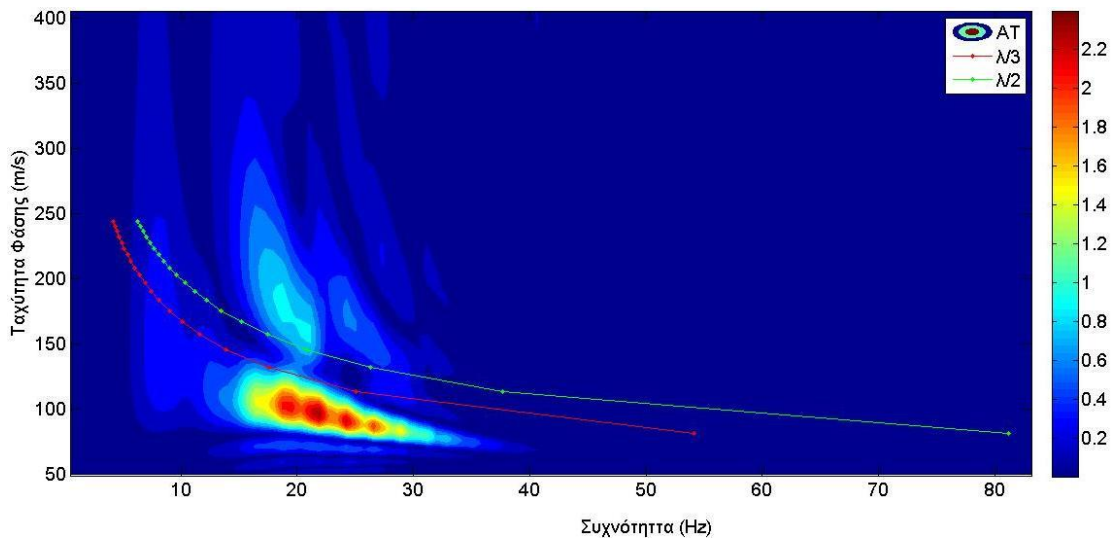
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι ισοψείς για τις καμπύλες διασποράς που προκύπτουν και κατόπιν συγκρίνονται τα κατανομές των ταχυτήτων V_s που προέκυψαν από την ανάλυση με τη αρχική υπόθεση για το εδαφικό προφίλ. Παρουσιάζονται κατά σειρά τα αποτελέσματα για φόρτιση παλμού Ricker 4Hz και σύνθετου παλμού Ricker χρησιμοποιώντας 9 κανάλια καταγραφής και αμέσως μετά παρουσιάζεται ανάλυση που έγινε για τον σύνθετο παλμό Ricker σε 24-κάναλη διάταξη.



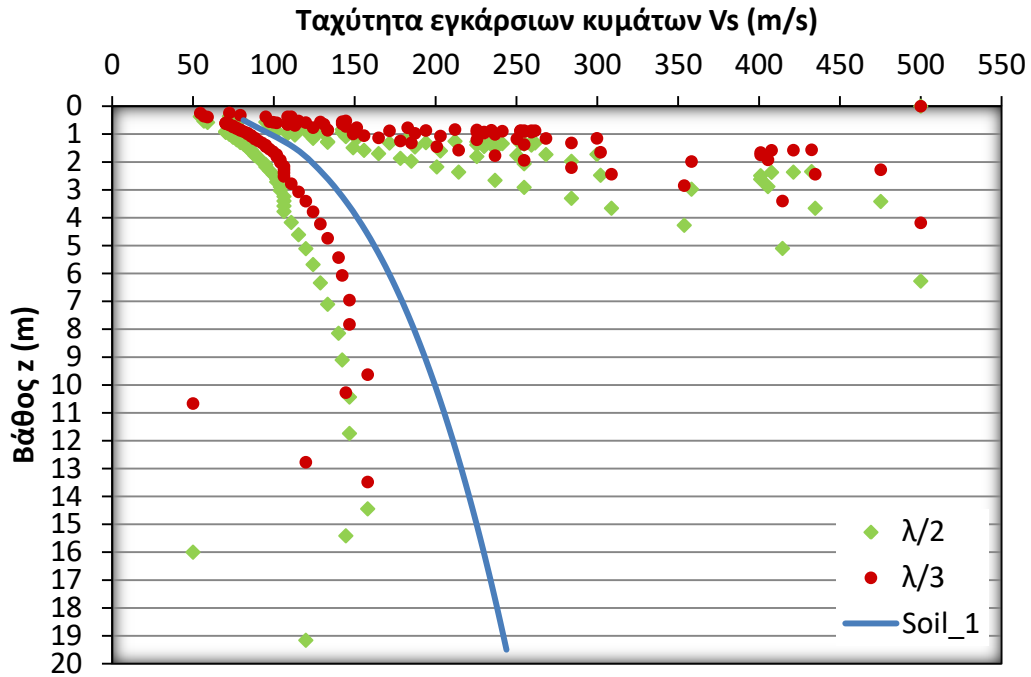
Σχήμα 3.10: Ισοψείς καμπυλών διασποράς για το έδαφος Soil_1 υπό φόρτιση παλμού Ricker 4 Hz σε διάταξη με 9 κανάλια καταγραφής.



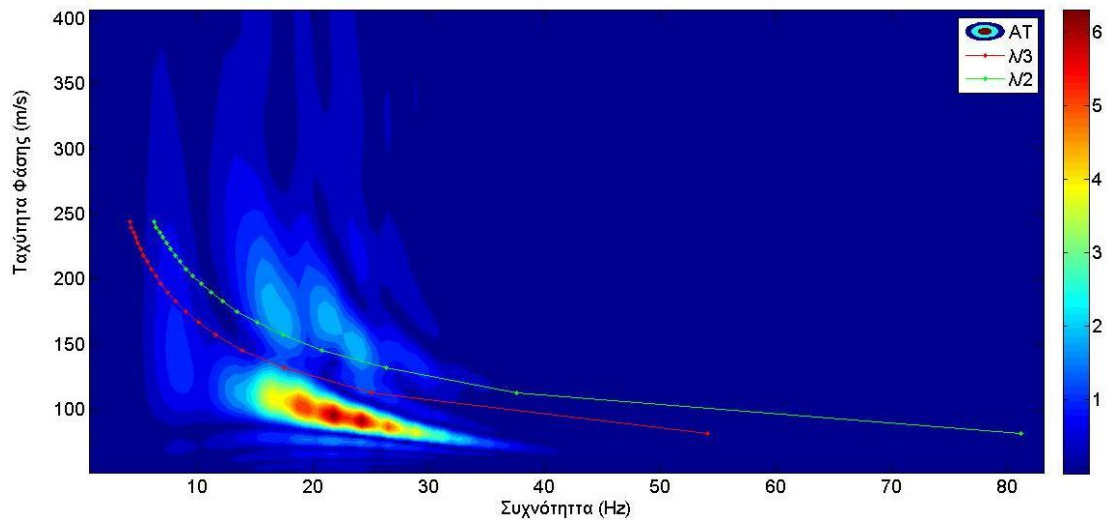
Σχήμα 3.11: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το αρχικό προφίλ που εξετάζεται (soil_1) και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπό φόρτιση παλμού Ricker 4Hz σε διάταξη με 9 δέκτες.



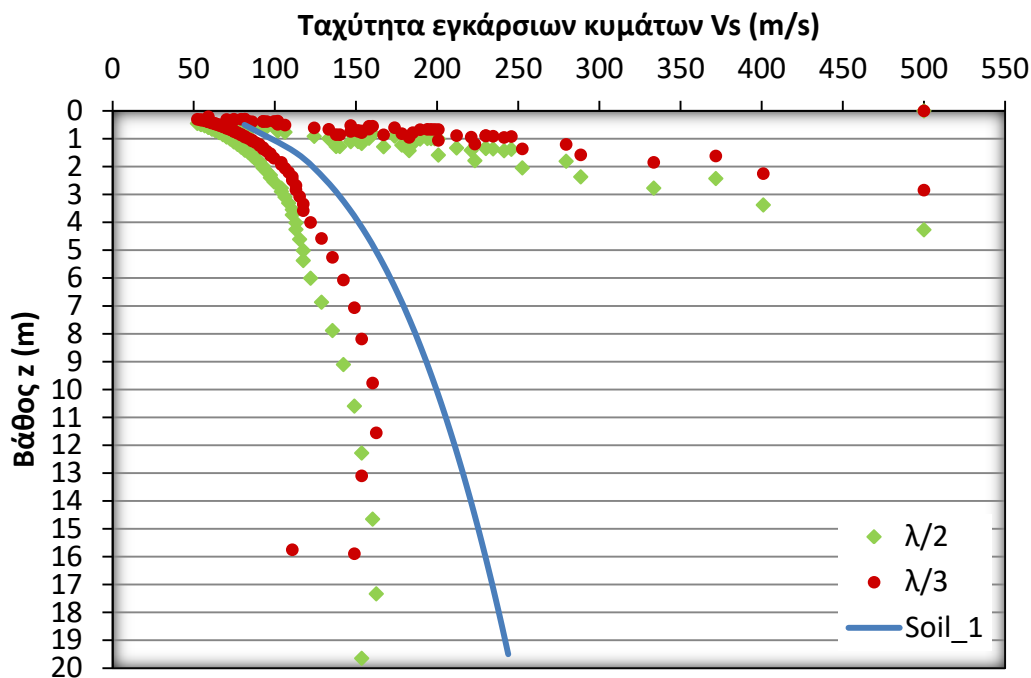
Σχήμα 3.12: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για το έδαφος Soil_1 υπό φόρτιση σύνθετου παλμού Ricker σε διάταξη με 9 κανάλια καταγραφής.



Σχήμα 3.13: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το αρχικό προφίλ που εξετάζεται (soil_1) και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπό φόρτιση σύνθετου παλμού Ricker σε διάταξη με 9 δέκτες.



Σχήμα 3.14: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για το έδαφος Soil_1 υπό φόρτιση σύνθετου παλμού Ricker σε διάταξη με 24 κανάλια καταγραφής.



Σχήμα 3.15: Κατανομές ταχύτητας V_s με το βάθος για το αρχικό προφίλ που εξετάζεται (soil_1) και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπό φόρτιση σύνθετου παλμού Ricker σε διάταξη με 24 δέκτες.

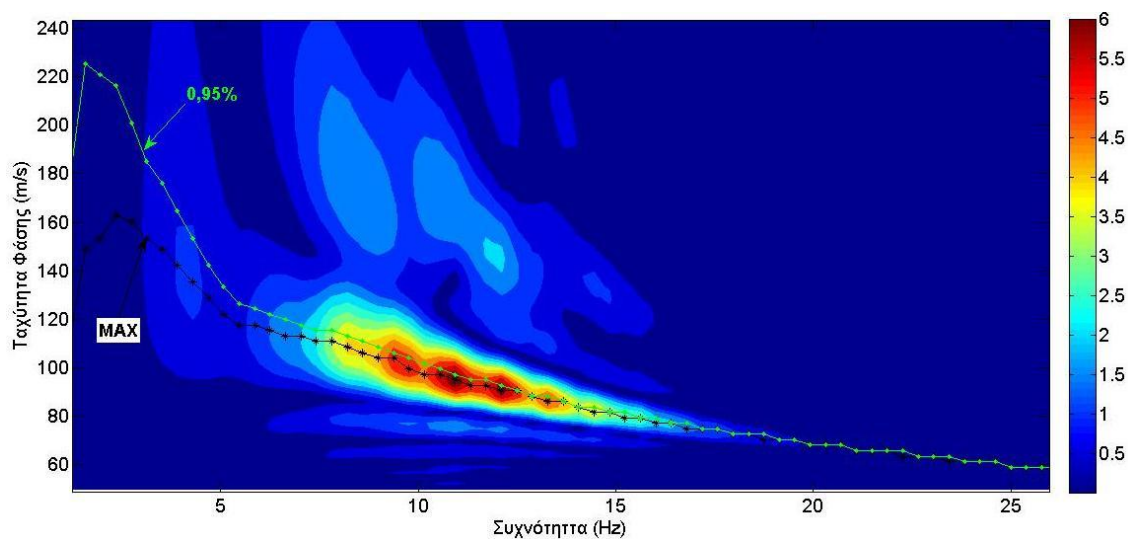
Όπως είναι φανερό από τα διαγράμματα που προηγήθηκαν πως η υπόθεση για το βάθος (z) που αντιστοιχεί στη ταχύτητα V_s ως $z = \lambda/3$ (Gazetas 1991) φαίνεται να πλησιάζει περισσότερο στην πραγματική κατάσταση συγκριτικά με την υπόθεση $z = \lambda/2$ (Richard et al., 1970), γεγονός που επιβεβαιώνεται σε όλες τις αναλύσεις. Ακόμα όπως προκύπτει από την καμπύλη διασποράς (σχήμα 3.10) και το διάγραμμα της κατανομής της ταχύτητας V_s (σχήμα 3.11) για τη φόρτιση με παλμό Ricker δεσπόζουσας συχνότητας 4 Hz, η σεισμική ενέργεια συσσωρεύεται γύρω από την δεσπόζουσα συχνότητα και δεν επιτρέπει σε μεγαλύτερες συχνότητες που υπάρχουν στο φάσμα του παλμού να εμφανιστούν στη καμπύλη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να χάνεται η πληροφορία στις υψηλές συχνότητες, επομένως και στα πρώτα μέτρα του εδαφικού προφίλ, γεγονός που διακρίνεται και στη καμπύλη διασποράς. Αντίθετα στο σύνθετο παλμό Ricker η σεισμική ενέργεια κατανέμεται σε περισσότερες συχνότητες καθώς δεν υπάρχει μία ξεκάθαρη συχνότητα που δεσπόζει για αυτό και τα αποτελέσματα των αναλύσεων που προκύπτουν είναι πιο πλούσια και λεπτομερή, σε όλα τα βάθη και κυρίως στα μικρά - μεσαία βάθη.

Επίσης η αύξηση των καναλιών καταγραφής από 9 σε 24 με αντίστοιχη αύξηση του αναπτύγματος τους, φαίνεται πως δεν οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της εκτίμησης της κατανομής της ταχύτητας V_s με το βάθος (σχήμα 3.13 και 3.15). Ακόμα είναι προφανές πως οι εκτιμήσεις παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις από τη πραγματική κατανομή κυρίως στα βαθύτερα στρώματα του υπεδάφους ακόμα και υπό φόρτιση παλμού Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα 4 Hz που θεωρητικά λειτουργεί καλύτερα στα μεγάλα βάθη διασκόπησης. Για την ακρίβεια γίνεται υποεκτίμηση της ταχύτητας V_s σε κάθε βάθος (z). Αυτό συμβαίνει λόγω της φύσης της καμπύλης διασποράς, καθώς πρόκειται για ένα διάγραμμα ισοϋψών, και κατά συνέπεια προκύπτει πως για κάθε συχνότητα η μέγιστη τιμή του πλάτους που της αντιστοιχεί ενδέχεται να επηρεάζεται από γειτονικά τοπικά μέγιστα.

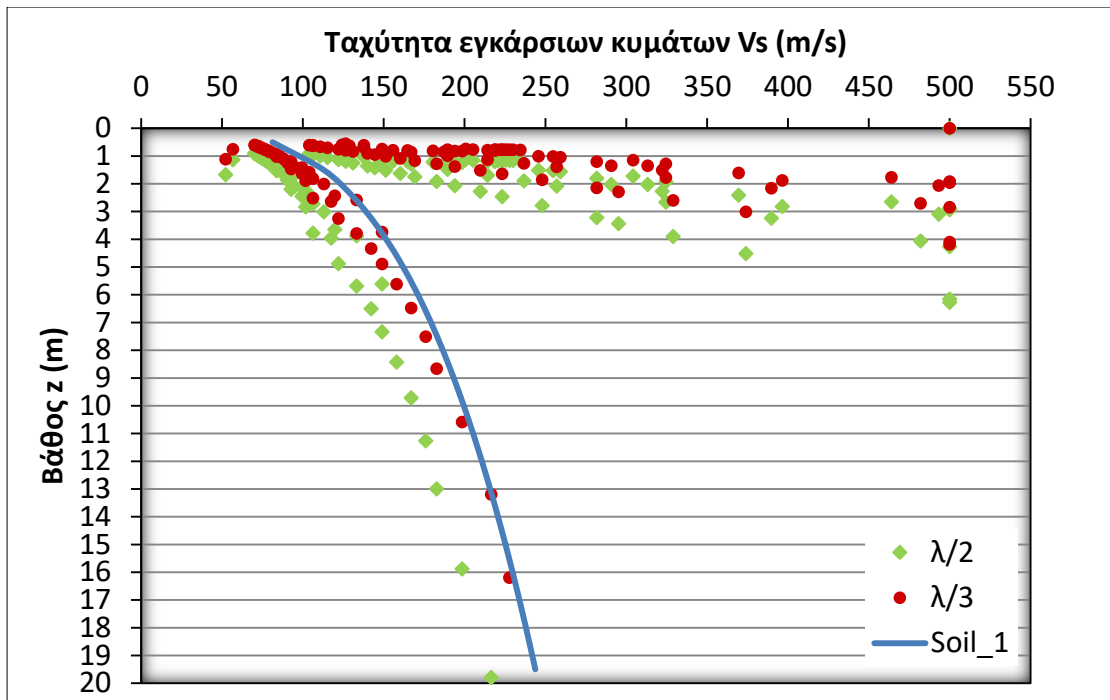
Επομένως δίνοντας ένα ποσοστό απόκλισης από τη μέγιστη τιμή της τάξης του 5% φαίνεται η εκτίμηση της κατανομής της ταχύτητα V_s προσαρμόζεται αρκετά καλύτερα στο αρχικό εδαφικό προφίλ όπως διακρίνεται στα σχήματα 3.16, 3.17, 3.18 και 3.19. Η προσαρμογή αυτή σε όρους εντολών MATLAB δίνεται παρακάτω και στον αλγόριθμο που παρουσιάστηκε στη παρούσα παράγραφο εντοπίζεται αμέσως μετά τον προσδιορισμό των μητρώων $[M,I]$ (εντολή 4- $[M, I] = \max(AT, [,], 2);$) που περιλαμβάνουν τις μέγιστες τιμές του πλάτους της σεισμικής ενέργειας (M) και τις αντίστοιχες θέσεις των ταχυτήτων φάσης όπου αυτές εμφανίζονται (I), για κάθε συχνότητα. Οι νέες θέσεις αναζητούνται σε επόμενες θέσεις από αυτήν που εντοπίζεται η μέγιστη τιμή καθώς οι αναπροσαρμοσμένες τιμές της σεισμικής ενέργειας είναι πιθανό να εντοπιστούν σε περισσότερες από μία θέσεις για κάθε συχνότητα, ωστόσο εκείνη που είναι χρήσιμη για την βελτίωση της εκτίμησης της κατανομής της V_s είναι μεγαλύτερη της θέσης του μεγίστου πλάτους.

```
- for i = 1:size(AT,1)
-   k = 0.95*M(i);
-   for j = I(i):size(AT,2)
-     if AT(i,j) >= k
-       I(i) = j;
-     end
-   end
- end
```

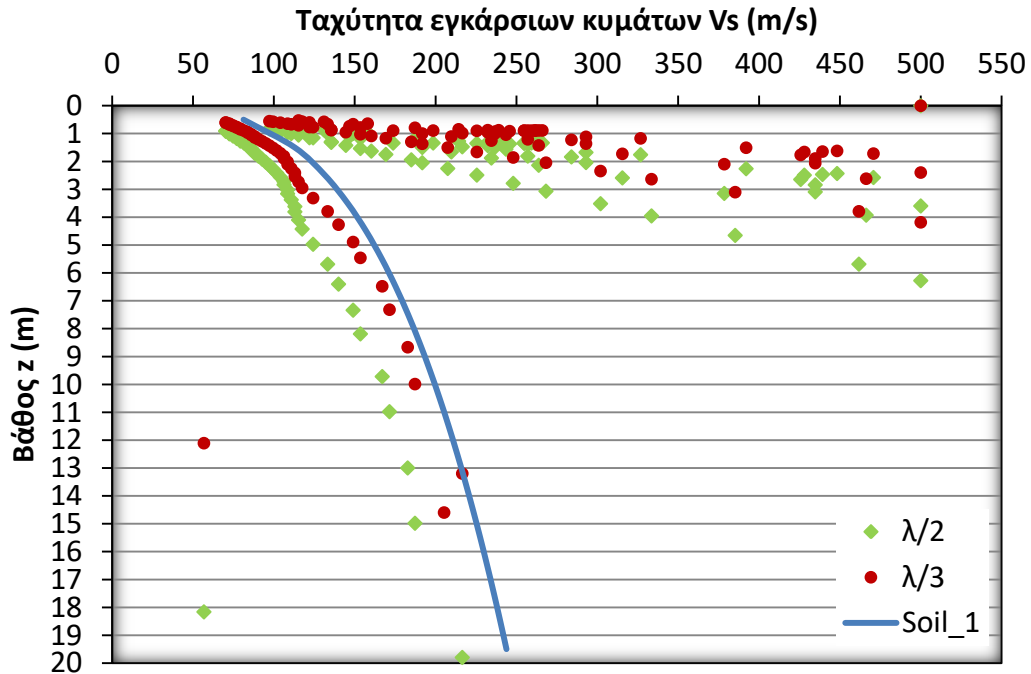
Για να γίνει αντιληπτή η διαφορά μεταξύ των εκτιμήσεων της κατανομής της V_s για το μέγιστο πλάτος της σεισμικής ενέργειας και τις αντίστοιχες του 95% στο σχήμα 3.16 απεικονίζεται λεπτομέρεια των ισοϋψών των καμπυλών διασποράς του σχήματος 3.14, στις οποίες διακρίνονται τα σημεία των μεγίστων πλατών της σεισμικής ενέργειας που επιλέγονται για τις δύο αναλύσεις (max και 0,95%), ώστε να προκύψουν τα αντίστοιχα εδαφικά προφίλ.



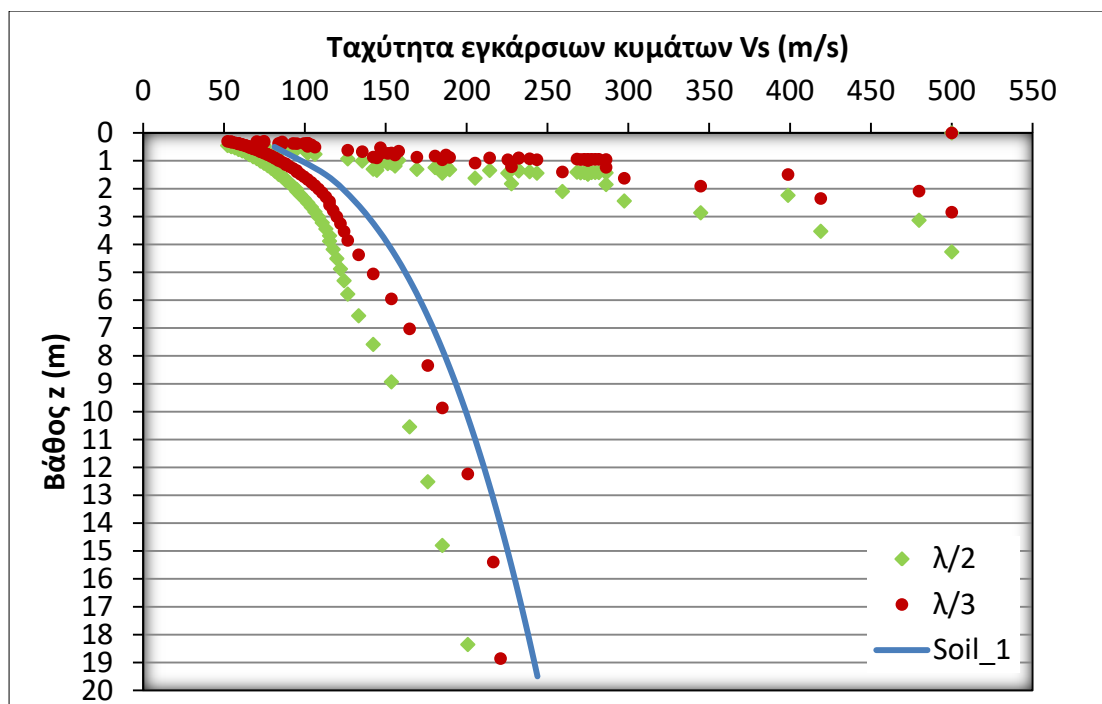
Σχήμα 3.16: Λεπτομέρεια του σχήματος 3.14. Διακρίνεται η διαφορά στην επιλογή των σημείων της καμπύλης $M0$, ειδικότερα στις μικρές συχνότητες (βαθύτερα στρώματα)



Σχήμα 3.17: Αναπροσαρμοσμένες κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος με το κριτήριο του 95% της σεισμικής ενέργειας, για το αρχικό προφίλ που εξετάζεται (soil_1) και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπό φόρτιση παλμού Ricker 4Hz σε διάταξη με 9 δέκτες. Η βελτίωση της κατανομής είναι προφανής καθώς η εκτίμηση για $\lambda/2$ σχεδόν συμπίπτει με το αρχικό έδαφος. Αντίστοιχο διάγραμμα **Σχήμα 3.11**.



Σχήμα 3.18: Αντίστοιχο διάγραμμα για το Σχήμα 3.13 για σύνθετο παλμό Ricker σε διάταξη με 9 κανάλια καταγραφής. Διακρίνεται εξίσου η βελτίωση της ευκρίνειας της μεθόδου.



Σχήμα 3.19: Αντίστοιχο διάγραμμα για το Σχήμα 3.15 για σύνθετο παλμό Ricker σε διάταξη με 24 κανάλια καταγραφής. Διακρίνεται εξίσου η βελτίωση της ευκρίνειας της μεθόδου χωρίς ωστόσο να βελτιώνεται η εικόνα συγκριτικά με την αντίστοιχη ανάλυση των 24 καναλιών καταγραφής..

Όπως είναι προφανές από τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν η βελτίωση των εκτιμώμενων προφίλ χρησιμοποιώντας το κριτήριο του 95% της μέγιστης σεισμικής ενέργειας είναι εντυπωσιακή. Οι εφαρμογές που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο έχουν σκοπό να καλύψουν αδυναμίες της φόρτισης του παλμού Ricker, όπως για παράδειγμα το γεγονός ότι η σεισμική ενέργεια στις καμπύλες διασποράς δεν είναι κατανομημένη σε όλες τις συχνότητες επαρκώς ή ότι οι εκτιμήσεις των ταχυτήτων σε βαθύτερα στρώματα του εδάφους είναι λιγότερες σχετικά με τα πρώτα μέτρα. Έτσι ακολουθούν εφαρμογές υπό διαφορετικό σεισμικό φορτίο αλλά και σε διαφορετικά εδάφη καθώς και ειδικές περιπτώσεις εδαφικών προφίλ ή και φορτίσεων.

Τέλος να σημειωθεί πως το Soil_1 και γενικότερα τα εδάφη που εισάγονται στο προσομοίωμα θεωρούνται ως η πραγματική τομή του υπεδάφους και οι όποιες παρατηρήσεις προκύπτουν από τις αναλύσεις της μεθόδου βασίζονται στη παραδοχή αυτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Παραμετρική διερεύνηση

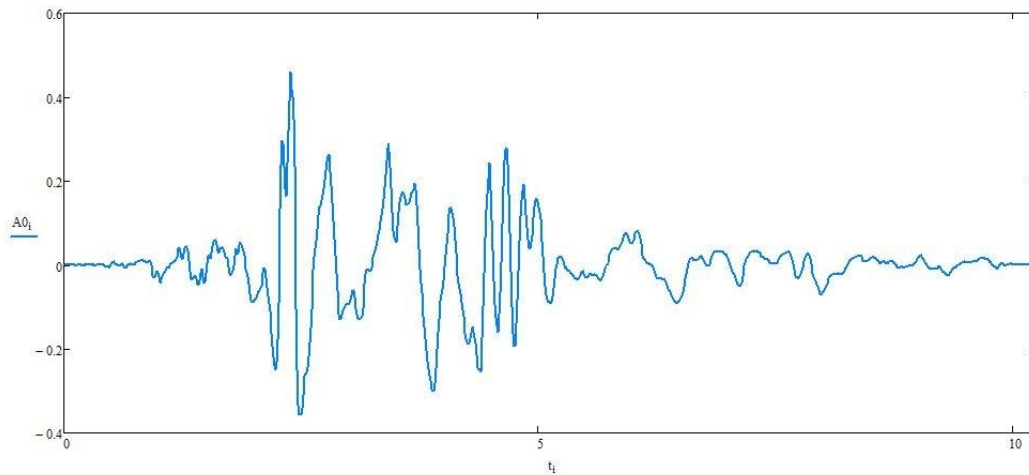
4.1 Εδαφικός σχηματισμός Soil_1

Σε συνέχεια όσων παρουσιάστηκαν στο τέλος του 3^{ου} κεφαλαίου αυτή η παράγραφος εστιάζει σε πρώτη φάση, στον εντοπισμό των συνθηκών φόρτισης υπό τις οποίες βελτιώνεται η ευκρίνεια της μεθόδου, δηλαδή επιχειρείται η βελτίωση της εικόνας των καμπυλών διασποράς οπότε και η εκτίμηση της κατανομής της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων με το βάθος πλησιάζει περισσότερο την πραγματική κατανομή των ταχυτήτων. Επίσης σε επόμενη φάση ελέγχεται η απόδοση της μεθόδου προσομοιώνοντας το παραβολικό εδαφικό προφίλ Soil_1 ως ένα έδαφος που αποτελείται από 5 στρώματα ενιαίας ταχύτητας (ισότητα εμβαδών).

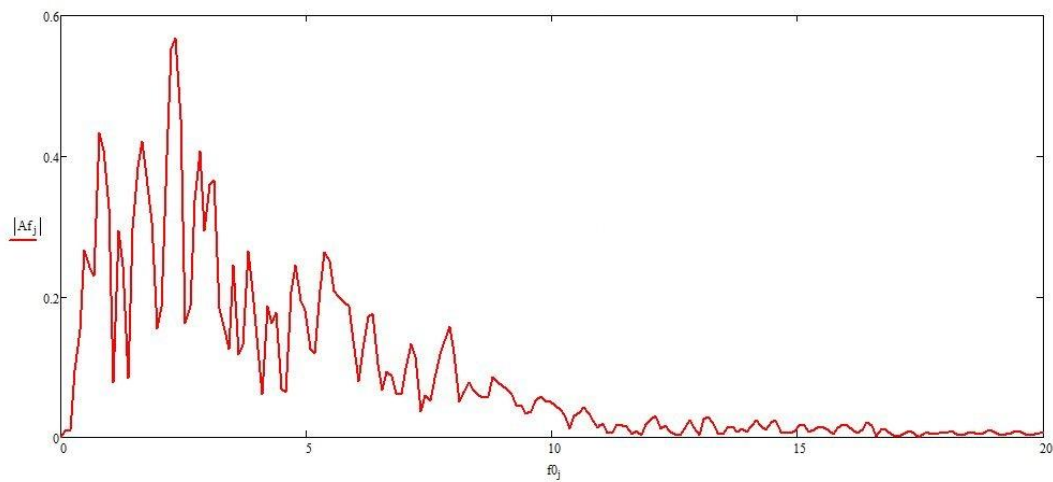
4.1.1 Φόρτιση με επιταχυνσιογράφημα

Όπως φάνηκε στα διαγράμματα του 3^{ου} κεφαλαίου οι καμπύλες διασποράς που προέκυψαν έχοντας ως φόρτιση παλμούς Ricker αδυνατούν να καλύψουν όλο το φάσμα των συχνοτήτων που περιέχουν, ιδιαίτερα στον παλμό Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα στα 4 Hz όπου η σεισμική ενέργεια συσσωρεύεται γύρω της, ενώ και στον σύνθετο παλμό Ricker το εύρος των συχνοτήτων της θεμελιώδους καμπύλης (M0) είναι περιορισμένο. Για αυτό το λόγο επιλέγονται ως φορτίσεις

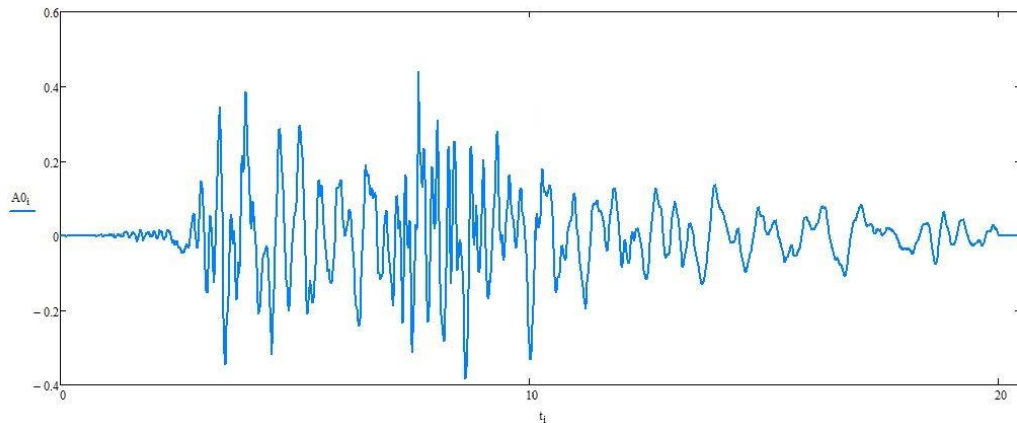
επιταχυνσιογράφηματα πραγματικών σεισμών και συγκεκριμένα αυτά του σεισμού της Καλαμάτας το 1986 (σχήματα 4.1 και 4.2) και της Λευκάδας το 2003 (σχήματα 4.3 και 4.4).



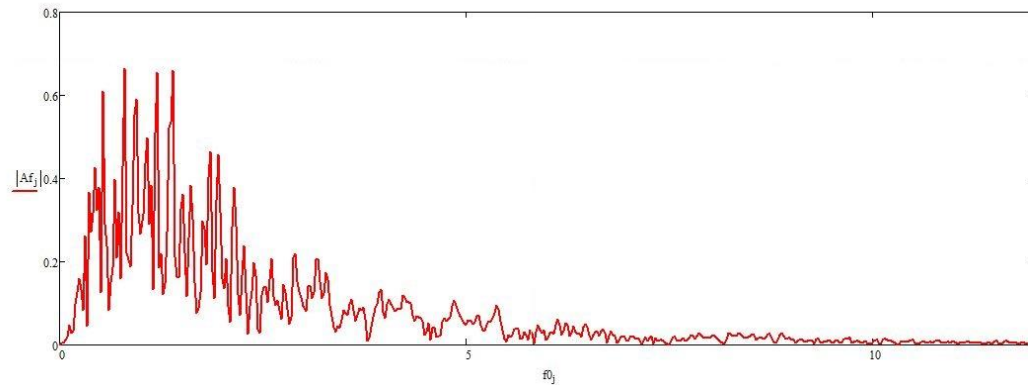
Σχήμα 4.1: Απεικόνιση χρονοϊστορίας 10.24 δευτερολέπτων του σεισμού της Καλαμάτας 1986.



Σχήμα 4.2: Η γκάμα των συχνοτήτων που περιέχονται στο επιταχυνσιογράφημα του σεισμού της Καλαμάτας 1986.



Σχήμα 4.3: Απεικόνιση χρονιοστορίας 20.48 δευτερολέπτων του σεισμού της Λευκάδας 2003.



Σχήμα 4.4: Η γκάμα των συχνοτήτων που περιέχονται στο επιταχυνσιογράφημα του σεισμού της Λευκάδας 2003.

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα που περιγράφουν τις συχνότητες που περιέχουν τα δύο επιταχυνσιογραφήματα δίνεται έμφαση σε μικρές σχετικά συχνότητες καθώς όπως είδαμε στις αναλύσεις του σύνθετου παλμού Ricker υπήρχε σχετική αραίωση των σημείων που προέκυψαν από τη μέθοδο στα μεγαλύτερα βάθη. Στις αναλύσεις που χρησιμοποιούνται ως φορτίσεις οι σεισμοί της Καλαμάτας και της Λευκάδας λαμβάνεται υπόψη η επιρροή της απόσβεσης στο έδαφος όπως αυτή περιγράφηκε στη §3.2.2.1, καθώς σε αντίθετη περίπτωση λόγω του εδαφικού θορύβου που εμφανίζεται είναι πρακτικά αδύνατον να βγουν ασφαλή συμπεράσματα. Έτσι στις αναλύσεις που ακολουθούν η απόσβεση των εδαφικών

σχηματισμών παίρνει τιμές 0,5% και 1,0%, έτσι ώστε να εκτιμηθεί η ευαισθησία της μεθόδου στη τιμή της απόσβεσης.

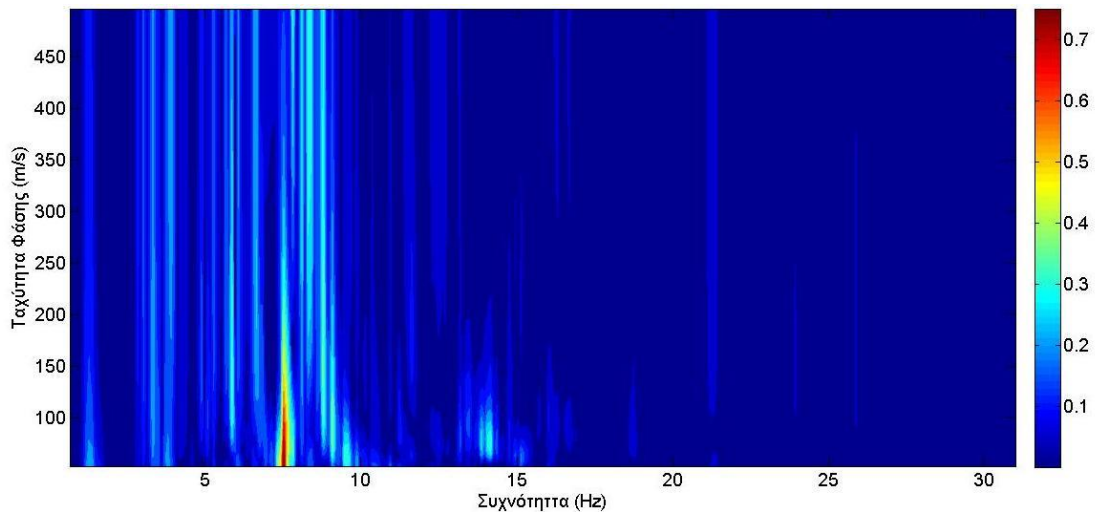
Η απόσβεση αυτή λαμβάνεται υπόψη στη μαθηματική επεξεργασία στο πρόγραμμα MATHCAD με την μετατροπή της εντολής 15 όπως φαίνεται στη σχέση 4.2 αφού πρώτα υπολογιστεί ο συντελεστής απόσβεσης ξ (σχέση 4.1).

$$\xi_j = \frac{1}{2} \left(\frac{a_0}{2\pi f_{0j} + d_c} + 2b_0 \pi f_{0j} \right) \quad (4.1)$$

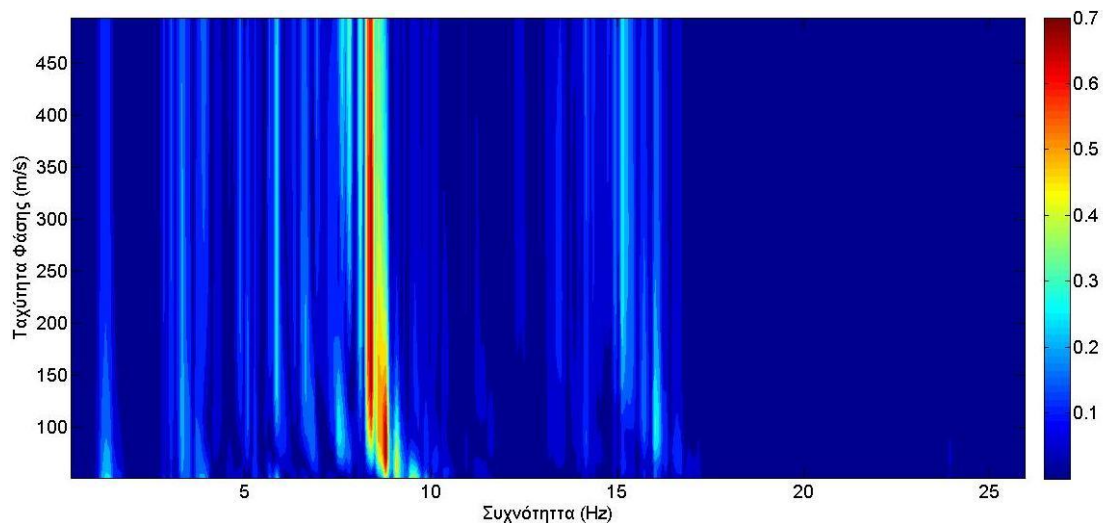
$$AT_{0j,ij} = \sum_{k=n}^1 \{ e^{-i\delta(k)_{ij,j}} e^{-\xi \delta(k)_{ij,j}} R_0(k)_j \} \quad (4.2)$$

όπου συντελεστές Rayleigh είναι $a_0 = 0.1142$ και $b_0 = 0,00007234$ ενώ για $\xi = 1\%$ αντίστοιχα είναι $a = 0.2285$ και $b = 0,0001447$ και ο συντελεστής d_c παίρνει μία τυπική τιμή (10^{-8}) ώστε να αποφεύγεται ο μηδενισμός του παρονομαστή στο κλάσμα αλλά να μην επηρεάζεται το αποτέλεσμα.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων ύστερα από τις τροποποιήσεις στο μοντέλο που περιγράφηκαν ακολουθούν στα επόμενα σχήματα, ξεκινώντας με το σεισμό της Λευκάδας όπου όπως φαίνεται στα σχήματα 4.5 και 4.6 για απόσβεση $\xi=0.5\%$ και $\xi = 1\%$ αντίστοιχα το αποτέλεσμα της ανάλυσης δίνει καμπύλες διασποράς από την οποία δεν είναι δυνατόν να προκύψουν συμπεράσματα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το αντίστοιχο επιταχυνσιογράφημα είναι ιδιαίτερα πλούσιο σε παρασιτικές συχνότητες οπότε η σεισμική ενέργεια διασκορπίζεται παντού και δημιουργούνται χαρακτηριστικές καμπύλες διασποράς. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι καμπύλες διασποράς για τον σεισμό της Καλαμάτας ακολουθούμενες από τις εκτιμήσεις των κατανομών των ταχυτήτων V_s καθώς τα αποτελέσματα της φόρτισης αυτής εμφανίστηκαν σαφώς βελτιωμένα (σχήματα 4.7 έως 4.14).

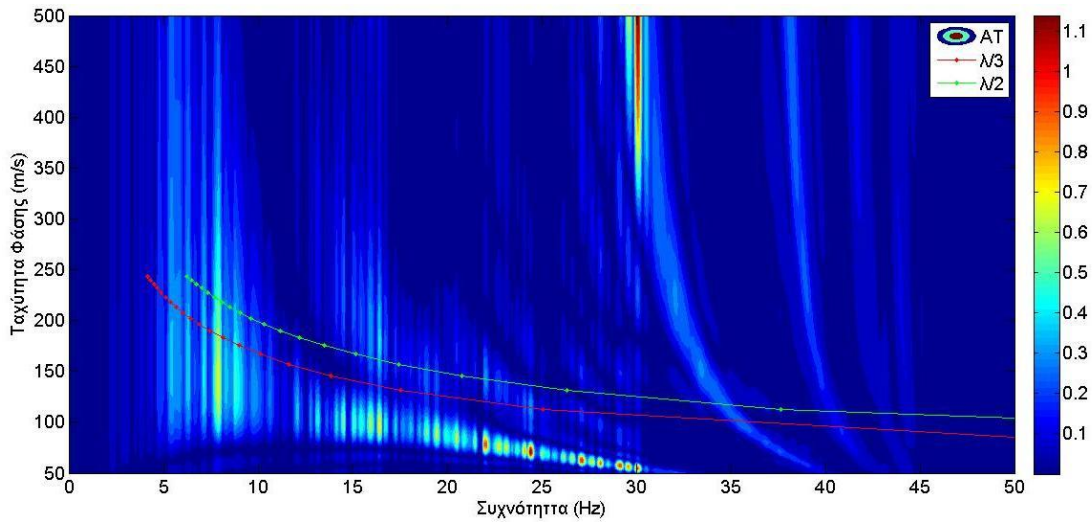


Σχήμα 4.5: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για το έδαφος Soil_1 για τον σεισμό της Λευκάδας 2003 σε διάταξη με 9 κανάλια καταγραφής (απόσβεση $\xi=0,5\%$).

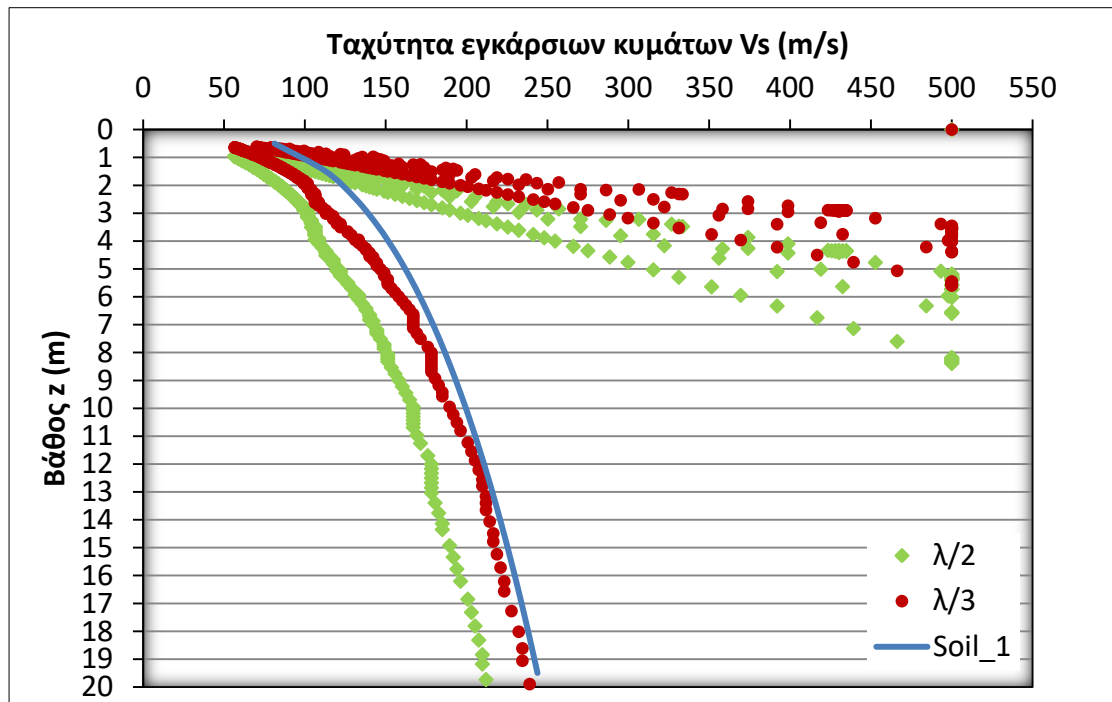


Σχήμα 4.6: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για το έδαφος Soil_1 για τον σεισμό της Λευκάδας 2003 σε διάταξη με 9 κανάλια καταγραφής (απόσβεση $\xi=1,0\%$).

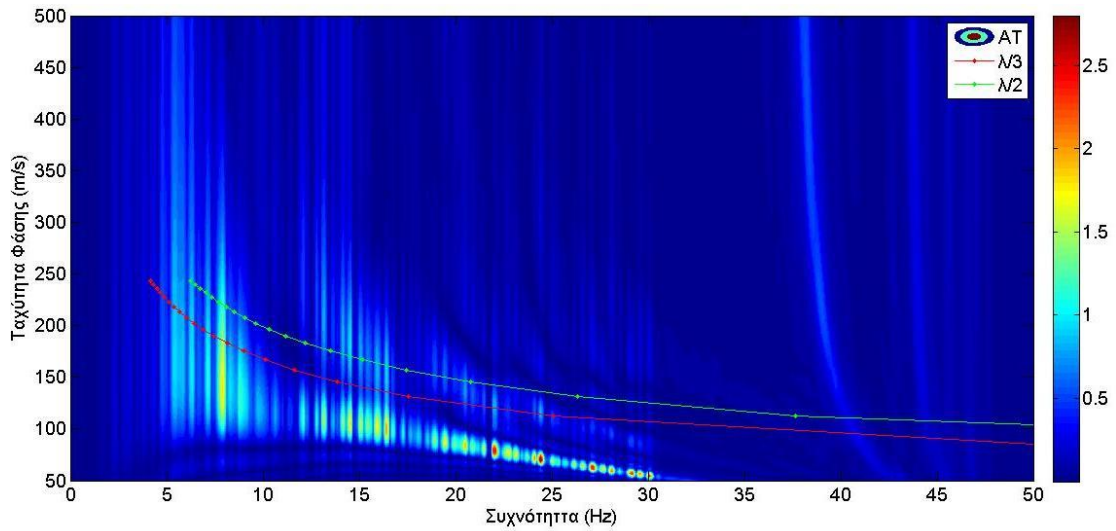
Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων για το σεισμό της Καλαμάτας είναι χρήσιμο να τονιστεί πως οι εκτιμήσεις των εδαφικών προφίλ που προέκυψαν έγιναν λαμβάνοντας υπόψη για κάθε συχνότητα την απόκλιση του 5 % από το μέγιστο πλάτος της σεισμικής ενέργειας όπως ακριβώς διατυπώθηκε και εξηγήθηκε στο τέλος της παραγράφου §3.4.



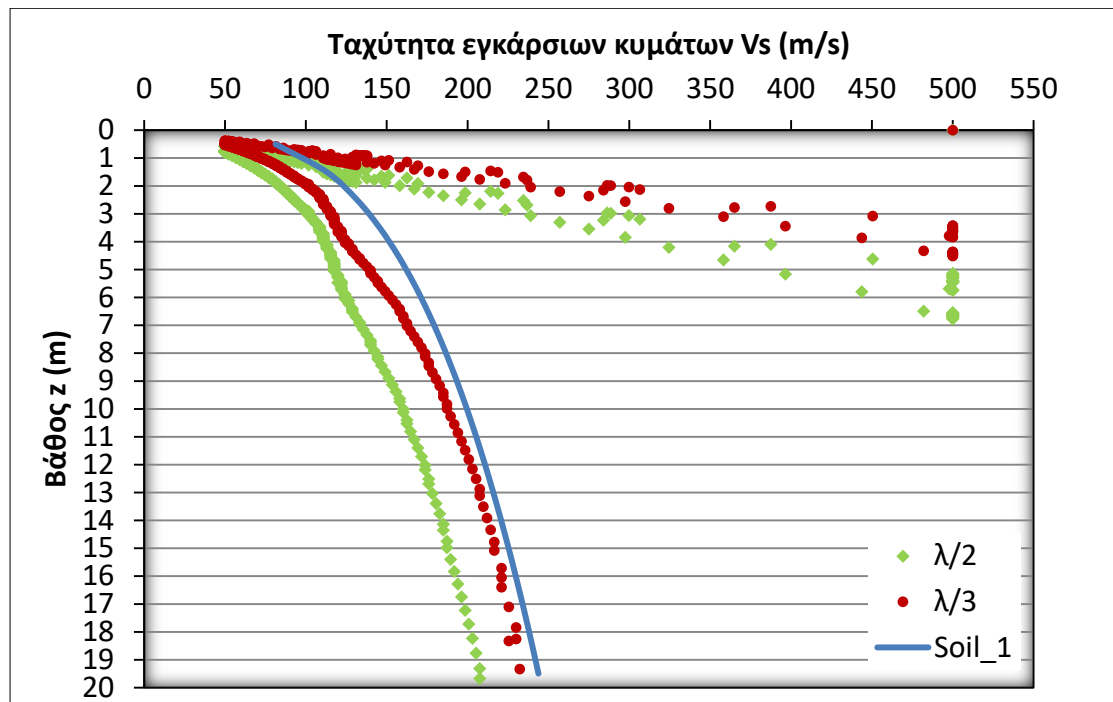
Σχήμα 4.7: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για το έδαφος Soil_1 για τον σεισμό της Καλαμάτας 1986 σε διάταξη με 9 κανάλια καταγραφής (απόσβεση $\xi = 0,5\%$).



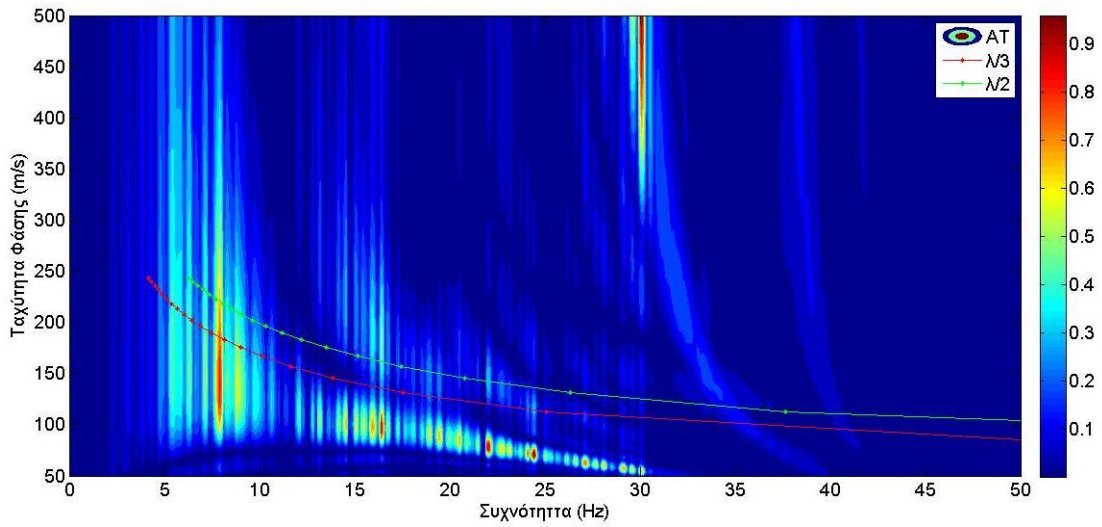
Σχήμα 4.8: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το αρχικό προφίλ που εξετάζεται (soil_1) και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπό φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας 1986 σε διάταξη με 9 κανάλια καταγραφής (απόσβεση $\xi = 0,5\%$).



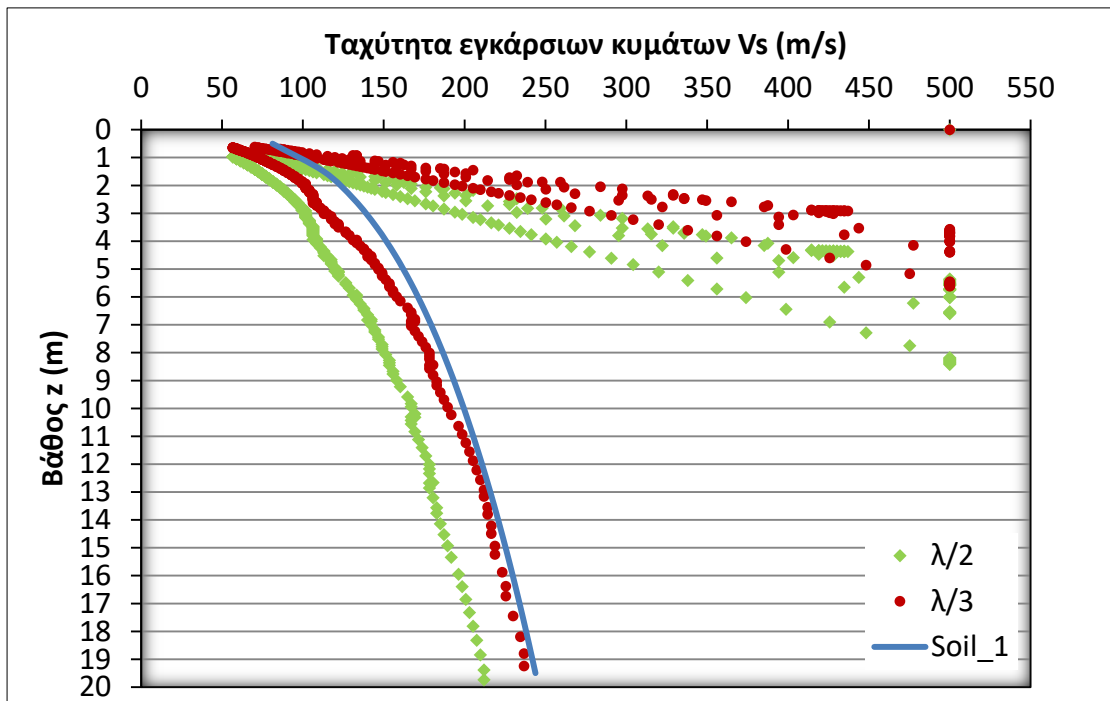
Σχήμα 4.9: Ισοϋψείς καμπυλές διασποράς για το έδαφος *Soil_1* για τον σεισμό της Καλαμάτας 1986 σε διάταξη με 24 κανάλια καταγραφής (απόσβεση $\xi = 0,5\%$).



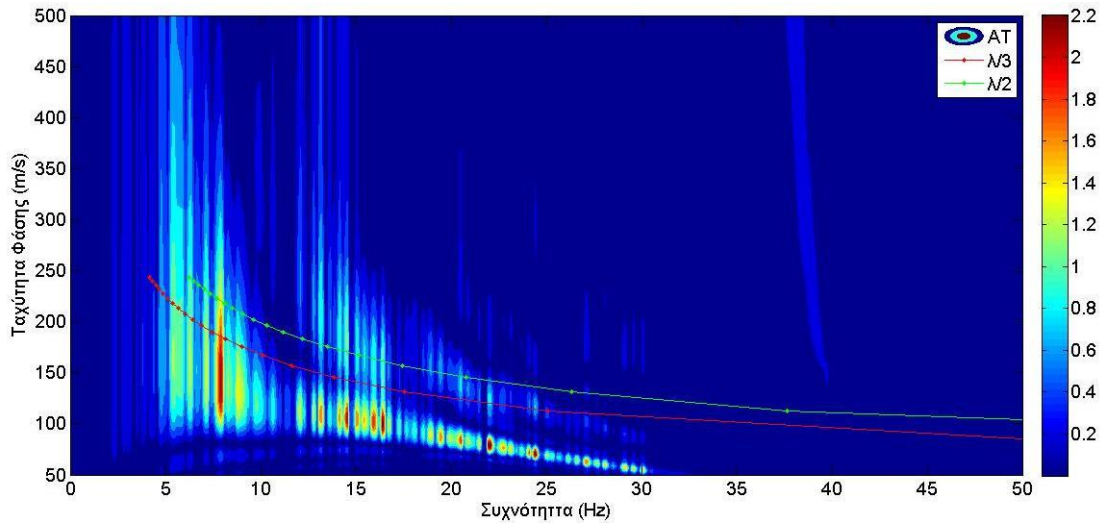
Σχήμα 4.10: Κατανομές ταχύτητας V_s με το βάθος για το αρχικό προφίλ που εξετάζεται (*soil_1*) και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπό φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας 1986 σε διάταξη με 24 κανάλια καταγραφής (απόσβεση $\xi = 0,5\%$).



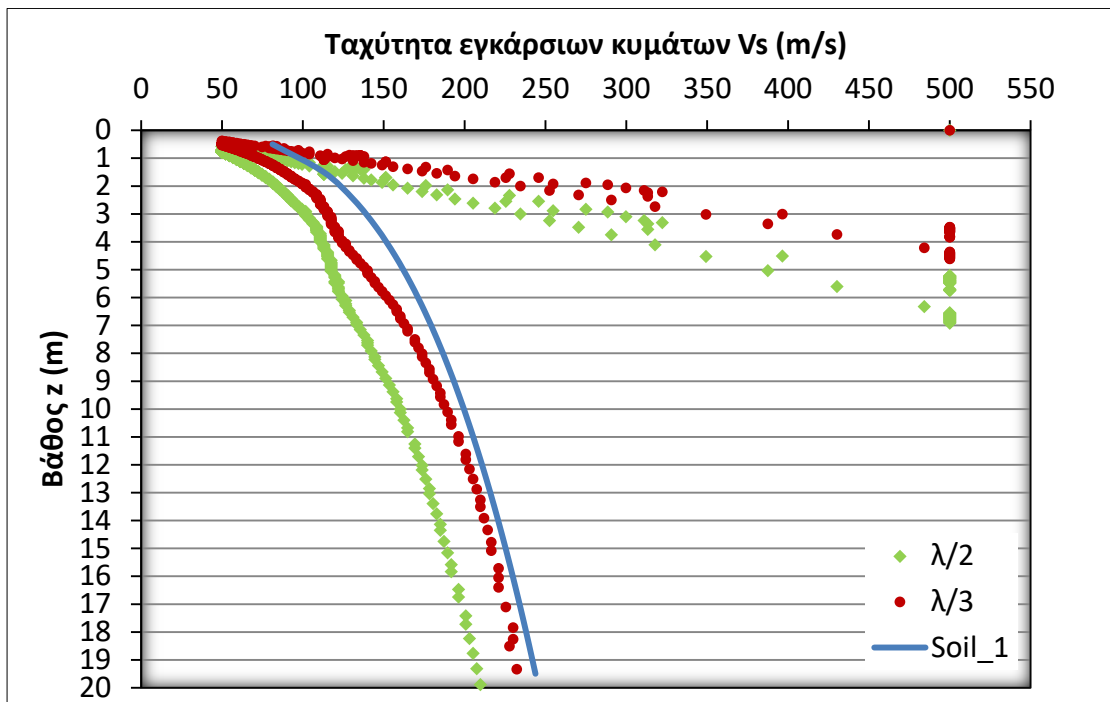
Σχήμα 4.11: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για το έδαφος Soil_1 για τον σεισμό της Καλαμάτας 1986 σε διάταξη με 9 κανάλια καταγραφής (απόσβεση $\xi = 1,0\%$).



Σχήμα 4.12: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το αρχικό προφίλ που εξετάζεται (soil_1) και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπό φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας 1986 σε διάταξη με 9 κανάλια καταγραφής (απόσβεση $\xi = 1,0\%$).



Σχήμα 4.13: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για το έδαφος Soil_1 για τον σεισμό της Καλαμάτας 1986 σε διάταξη με 24 κανάλια καταγραφής (απόσβεση $\xi = 1,0\%$).



Σχήμα 4.14: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το αρχικό προφίλ που εξετάζεται (soil_1) και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπό φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας 1986 σε διάταξη με 24 κανάλια καταγραφής (απόσβεση $\xi = 1,0\%$).

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει πως χρησιμοποιώντας ως φόρτιση ένα επιταχυνσιογράφημα όπως αυτό της Καλαμάτας που είναι ιδιαίτερα πλούσιο σε μία

γκάμα συχνοτήτων από 0 έως περίπου 10 Hz (Σχήμα 4.2), η εκτίμηση της ταχύτητας εγκάρσιων κυμάτων V_s βελτιώνεται αισθητά στα βαθύτερα στρώματα. Ωστόσο η αδυναμία κατανομής της σεισμικής ενέργειας σε όλες της συχνότητες εξακολουθεί να εμφανίζεται καθώς τα πρώτα μέτρα του εδάφους δεν καλύπτονται από το φάσμα των συχνοτήτων αυτών.

Επίσης παρατηρείται ότι στις αναλύσεις με διάταξη 9 καναλιών καταγραφής οι τελικές εκτιμήσεις για το εδαφικό προφίλ προσεγγίζουν το πραγματικό έδαφος με μεγαλύτερη ακρίβεια συγκριτικά με τις αντίστοιχες αναλύσεις με διάταξη 24 καναλιών καταγραφής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυξάνεται το ανάπτυγμα των καναλιών καταγραφής οπότε λόγω της απόσβεσης του εδάφους τα σεισμικά κύματα εξασθενούν και κατά συνέπεια οι καταγραφές των επιταχύνσεων είναι λιγότερο περιεκτικές. Τέλος δεν εντοπίζονται σημαντικές διαφορές μεταξύ των αναλύσεων με απόσβεση $\xi=0,5\%$ και $\xi=1,0\%$ καθώς τα αποτελέσματα φαίνεται να συμπίπτουν.

4.1.2 Εκτίμηση θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας του εδάφους

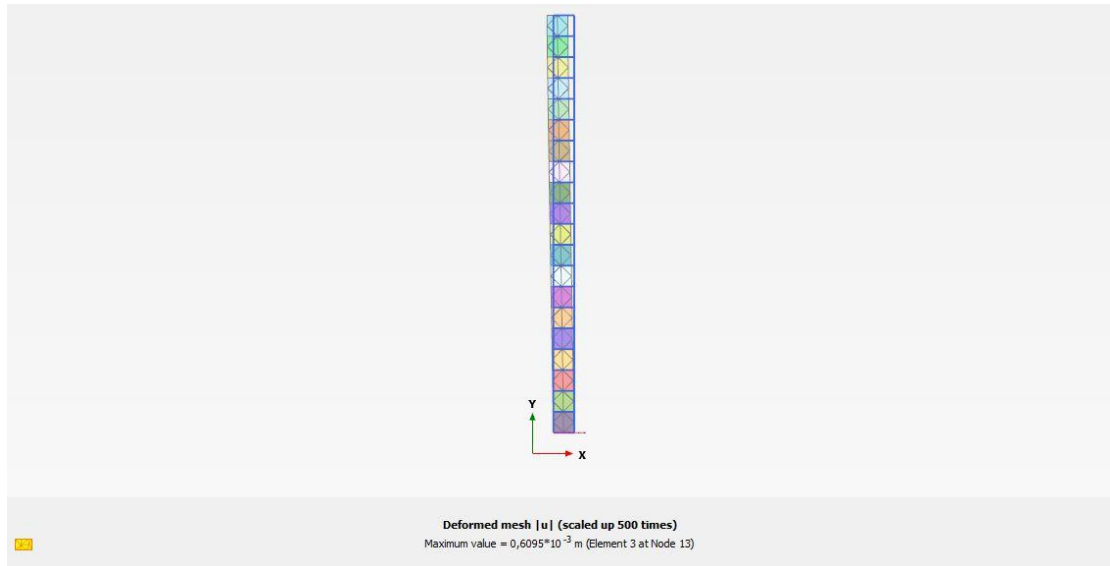
Η φόρτιση του εδαφικού σχηματισμού με επιταχυνσιογραφήματα πραγματικών σεισμών (Καλαμάτα 1986 και Λευκάδα 2003) βελτίωσε την εικόνα των εκτιμώμενων εδαφικών προφίλ στα βαθύτερα στρώματα, ωστόσο η εικόνα των καμπυλών διασποράς σε μεγάλες συχνότητες και η εκτίμηση της ταχύτητας στα στρώματα που είναι κοντά στην επιφάνεια παρουσιάζουν αδυναμίες. Μία πρώτη εξήγηση αυτού του φαινομένου εντοπίζεται στο γεγονός ότι τα επιταχυνσιογραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζουν πλούσιο περιεχόμενο σε χαμηλές συχνότητες, επομένως αδυνατούν να αναλύσουν επαρκώς τα επιφανειακά στρώματα. Βέβαια η δοκιμή υπό φόρτιση σύνθετου παλμού Ricker που παρουσιάστηκε στην §3.4 παρουσίασε τις ίδιες αδυναμίες παρόλο που παρουσιάζει ιδιαίτερη ποικιλία στις συχνότητες που αφορούν τα πρώτα στρώματα, δηλαδή υψηλές συχνότητες.

Η αιτία που εξηγεί αυτό το φαινόμενο είναι πιθανότατα η εμφάνιση κυμάτων που μπορούν να χαρακτηριστούν παρασιτικά καθώς δημιουργούν ένα κυματικό 'χάος'. Τέτοια κύματα είναι τα επιφανειακά κύματα Love τα οποία εμφανίζονται στα ανώτερα στρώματα ενός στρωματοποιημένου μέσου, ακριβώς όπως και το έδαφος που εξετάζεται. Βασική προϋπόθεση για την ύπαρξη τέτοιας μορφής κυμάτων είναι η ακαμψία των επιφανειακών στρωμάτων να είναι μικρότερη των υποκείμενων, γεγονός που επιβεβαιώνεται στο Soil_1 καθώς η ταχύτητα V_s αυξάνεται με το βάθος επομένως και η ακαμψία του εδάφους. Πρόκειται ουσιαστικά για εγκάρσια κύματα S και συγκεκριμένα SH (κύματα S όπου η κίνηση του υλικού σημείου συμβαίνει μόνο σε ένα οριζόντιο επίπεδο) που εγκλωβίζονται στα ανώτερα στρώματα λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων των κυμάτων που συμβαίνουν σε αυτά.

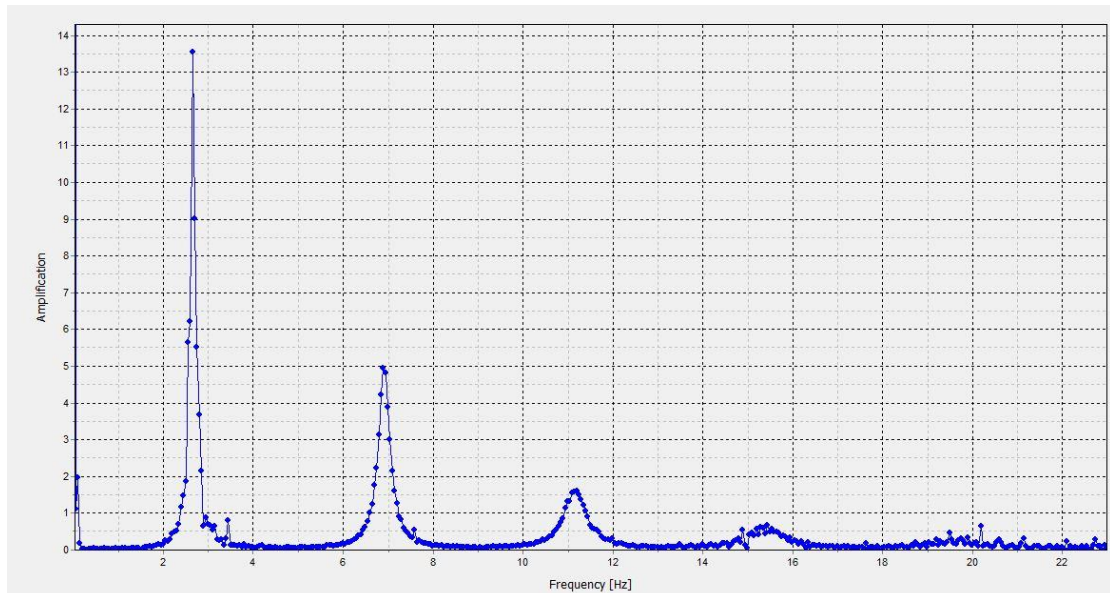
Ωστόσο τα κύματα Love δεν είναι δυνατό να υπάρξουν για συχνότητες μικρότερες από τη θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα του εδαφικού σχηματισμού. Επομένως χρησιμοποιώντας ως φορτίο έναν παλμό ο οποίος είναι πλούσιος σε συχνότητες μικρότερες της ιδιοσυχνότητας του εδάφους επιχειρείται απόσβεση των παρασιτικών συχνοτήτων και κατά συνέπεια η εξομάλυνση των καμπυλών διασποράς. Οπότε σε πρώτη φάση αναζητείται η ιδιοσυχνότητα του εδαφικού σχηματισμού. Σε περιπτώσεις όπως στο Soil_1 όπου το μέσο αποτελείται από εδαφικές στρώσεις διαφορετικών ιδιοτήτων δεν υπάρχει αναλυτική λύση για τον υπολογισμό της ιδιοσυχνότητας του εδάφους. Οπότε για τον σκοπό αυτό επιστρατεύεται ξανά το πρόγραμμα π. σ. του PLAXIS. Η εκτίμηση της ιδιοσυχνότητας του εδάφους γίνεται μέσω του προσδιορισμού του συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης, δηλαδή της επίδρασης του εδάφους εκφράζεται ως ο λόγος (ή το φάσμα) μεταφοράς της σεισμικής κίνησης, από το σεισμικό υπόβαθρο στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους.

Έτσι για τη προσομοίωση της διαδικασίας επιλέγεται μία στήλη εδάφους, πλάτους 1 μέτρου με τη στρωματογραφία του Soil_1 και εισάγεται στη βάση του εδάφους μία σεισμική διέγερση (Λευκάδα 2003). Έπειτα καταγράφονται οι επιταχύνσεις στη βάση και στην επιφάνεια της εδαφικής στήλης και κατόπιν ο λόγος του απεικονίζεται συναρτήσει των συχνοτήτων. Ο λόγος αυτός δείχνει πρακτικά πως τείνει να αποκριθεί η επιφάνεια του εδάφους σε σχέση με τη βάση υπό μία

διέγερση. Τα σημεία στα οποία αυτός ο λόγος παρουσιάζει τοπικά μέγιστα είναι οι ιδιοσυχνότητες του εδαφικού σχηματισμού που εξετάζεται. Στο σχήμα 4.15 η απόκριση της εδαφικής στήλης ενώ στο σχήμα 4.16 δίνεται η γραφική απεικόνιση του λόγου των επιταχύνσεων της επιφάνειας δια της κορυφής.



Σχήμα 4.15: Απόκριση επιφάνειας εδαφικής στήλης σε σχέση με τη βάση της (Διέγερση - σεισμός Λευκάδας 2003).



Σχήμα 4.16: Απεικόνιση του λόγου των επιταχύνσεων στην επιφάνεια του εδάφους προς την αντίστοιχη της βάσης. Τα τοπικά μέγιστα που φαίνονται αντιστοιχούν στις ιδιοσυχνότητες του εδαφικού σχηματισμού.

Από το σχήμα 4.16 προκύπτει πως η πρώτη ιδιοσυχνότητα του εδαφικού σχηματισμού (Soil_1) είναι $f_0=2,65\text{Hz}$ και εμφανίζονται ακόμα και επόμενες ιδιοσυχνότητες ($f_1=6,90\text{Hz}$, $f_2=11,20\text{Hz}$ κ.ο.κ.).

4.1.3 Φόρτιση ημιτόνου

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στη προηγούμενη παράγραφο για την απόσβεση των παρασιτικών συχνοτήτων απαιτείται μία φόρτιση της οποίας οι συχνότητες να είναι μικρότερες από την ιδιοσυχνότητα του εδάφους που εξετάζεται. Όπως αποδείχθηκε η συχνότητα του εδαφικού σχηματισμού Soil_1 είναι $f_0=2,65\text{Hz}$ (σχήμα 4.16), οπότε επιλέγεται ως φορτίο ένα ημίτονο πεπερασμένου αριθμού κύκλων με δεσπόζουσα συχνότητα ίση με $f_1=1\text{Hz}$ και $f_2=2\text{Hz}$ οι οποίες είναι σαφώς μικρότερες από την ιδιοσυχνότητα του εδάφους.

Η διαμόρφωση των κυματομορφών του ημιτόνου και του φάσματος των συχνοτήτων γίνεται στο πρόγραμμα MATHCAD χρησιμοποιώντας τις εντολές που ακολουθούν αφού οριστούν πρώτα τα εξής μεγέθη:

- $Nf, i, j \rightarrow$ ορισμός αριθμού βημάτων
- $dt_0 = 0,001 \text{ sec} \rightarrow$ χρονικό βήμα
- $t_i = i * dt_0 \rightarrow$ χρονικό διάστημα
- $a_0 = 1$ και $f_0 = 1$ ή $2 \text{ Hz} \rightarrow$ ορισμός πλάτους και συχνότητας
- $\omega_0 = 2 * \pi * f_0 \rightarrow$ γωνιακή επιτάχυνση

1: $A0_i = a_0 * \sin(\omega_0 * t_i)$

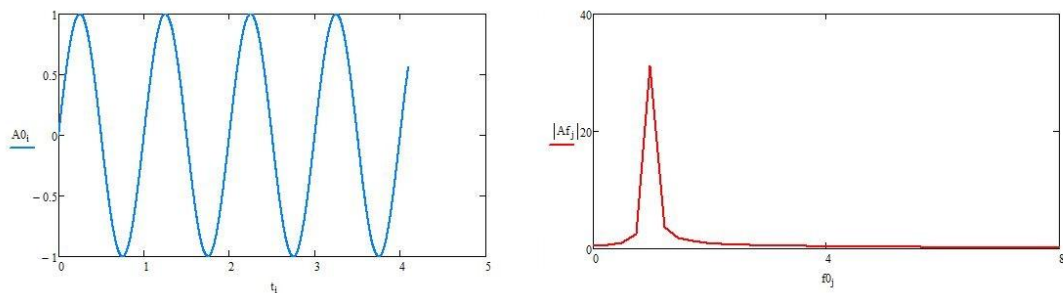
2: $A_f = \text{fft}(A_0)$

3: $f_{0_j} = j / (2 * dt_0 * Nf)$

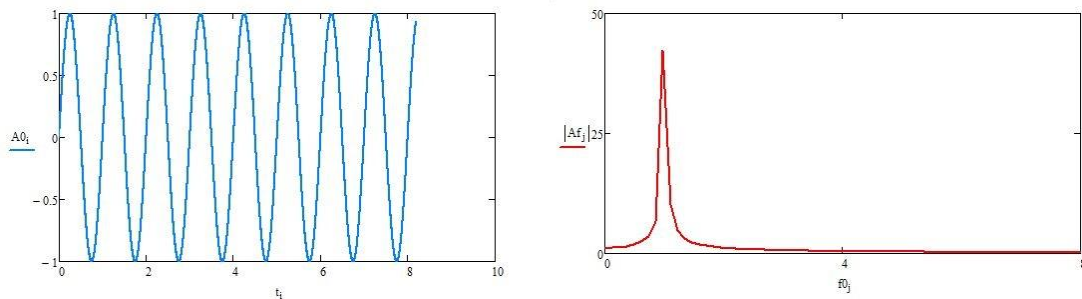
Για την ευνοϊκότερη παρακολούθηση των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται πρώτα οι δοκιμές ημιτόνου δεσπόζουσας συχνότητας 1Hz χρονικής διάρκειας 4,096 sec και 8,192 sec και κατόπιν ακολουθούν τα αποτελέσματα του ημιτόνου δεσπόζουσας συχνότητας 2 Hz και συνολικής διάρκειας 4,096 sec.

4.1.3.1 Ημίτονο δεσπόζουσας συχνότητας 1Hz

Η πρώτες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με βάση τον ημιτονοειδή παλμό με δεσπόζουσα συχνότητα 1 Hz χρονικής διάρκειας 4,096 sec και 8,192 sec, δηλαδή με 4 και 8 κύκλους φόρτισης αντίστοιχα με βήμα 0,001 sec. Το γεγονός ότι πρόκειται για πεπερασμένου αριθμού κύκλων ημιτονοειδείς συναρτήσεις συνεπάγεται πως το φάσμα των συχνοτήτων εμπεριέχει κι άλλες συχνότητες εκτός της δεσπόζουσας, αν και όπως φαίνεται στα σχήματα 4.17 και 4.18 το εύρος τους είναι περιορισμένο.



Σχήμα 4.17: Στα αριστερά φαίνεται η κυματομορφή του ημιτόνου 4 συνολικών κύκλων χρονικής διάρκειας 4,096 sec. Στα δεξιά διακρίνεται η γκάμα των συχνοτήτων όπου δεσπόζει η συχνότητα 1 Hz.



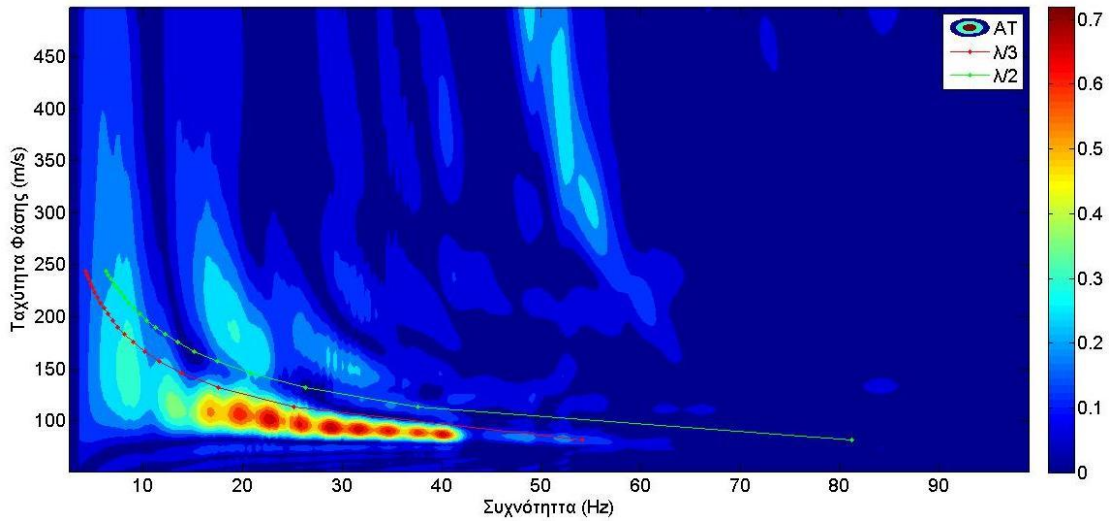
Σχήμα 4.18: Στα αριστερά φαίνεται η κυματομορφή του ημιτόνου 8 συνολικών κύκλων χρονικής διάρκειας 8,192 sec. Στα δεξιά διακρίνεται η γκάμα των συχνοτήτων όπου δεσπόζει η συχνότητα 1 Hz.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρατηρείται μία βελτίωση της εικόνας των καμπυλών διασποράς τόσο για απόσβεση $\xi = 0,5\%$ όσο και για $\xi = 1,0\%$ καθώς είναι προφανές ότι η σεισμική ενέργεια κατανέμεται πιο ομοιόμορφα, σε περισσότερες συχνότητες ακόμα και σε μεγαλύτερες της δεσπόζουσας (1Hz) που θεωρητικά δεν εμφανίζονται στο φάσμα των συχνοτήτων του ημιτόνου φόρτισης (σχήμα 4.19, 4.21, 4.23 και 4.25).

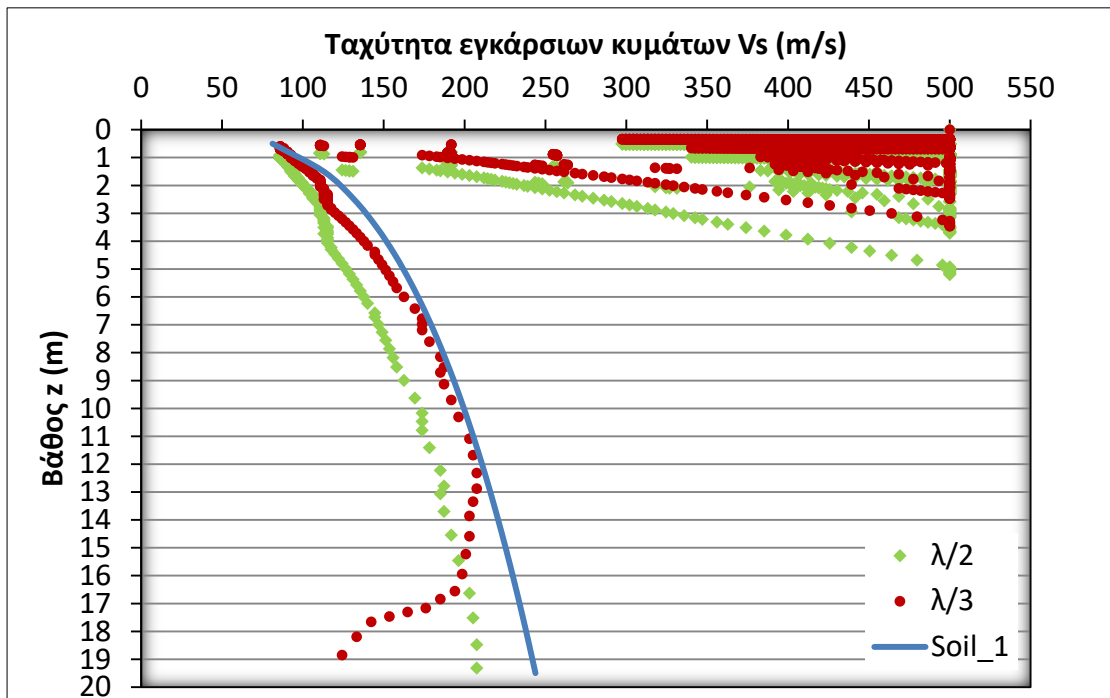
Ωστόσο η βελτίωση αυτή για το ημίτονο 1Hz χρονικής διάρκειας 4,096 sec δε φαίνεται να συνεπάγεται σημαντική βελτίωση στην εκτίμηση της κατανομής της ταχύτητας V_s με το βάθος, συγκριτικά με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που ως φόρτιση χρησιμοποιήθηκε ο σεισμός της Καλαμάτας 1986. Ειδικότερα αν και η φόρτιση είναι αρκετά χαμηλής συχνότητας, η εκτίμηση της ταχύτητας V_s φαίνεται να απομακρύνεται από το πραγματικό προφίλ περίπου μετά τα 13 μέτρα ενώ στα υψηλότερα στρώματα (4-13m) εμφανίζεται μία αισθητή βελτίωση (σχήμα 4.20 και 4.22).

Αντίθετα η δοκιμή υπό φόρτιση ημιτόνου δεσπόζουσας συχνότητας 1Hz χρονικής διάρκειας 8,192 sec (8 κύκλων φόρτισης) παράλληλα με την βελτιωμένη εικόνα των καμπυλών διασποράς παρουσιάζει βελτιωμένες εκτιμήσεις της κατανομής της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων σε όλο το βάθος του εδαφικού σχηματισμού (σχήμα 4.24 και 4.26). Συγκριτικά με τις δοκιμές που παρουσιάστηκαν στη παράγραφο §4.1.1 και αφορούν φόρτιση με το επιταχυνσιογράφημα του σεισμού της Καλαμάτας 1986 φαίνεται μία μικρή βελτίωση στα βαθύτερα στρώματα του εδάφους, καθώς και οι δύο αναλύσεις λειτουργούν αρκετά καλά σε αυτό το κομμάτι, ωστόσο στα μεσαία στρώματα κυρίως αλλά και στα επιφανειακά εμφανίζεται σημαντική βελτίωση αντίστοιχη με αυτήν της δοκιμής του ημιτόνου δεσπόζουσας συχνότητας 1Hz χρονικής διάρκειας 4,096 sec.

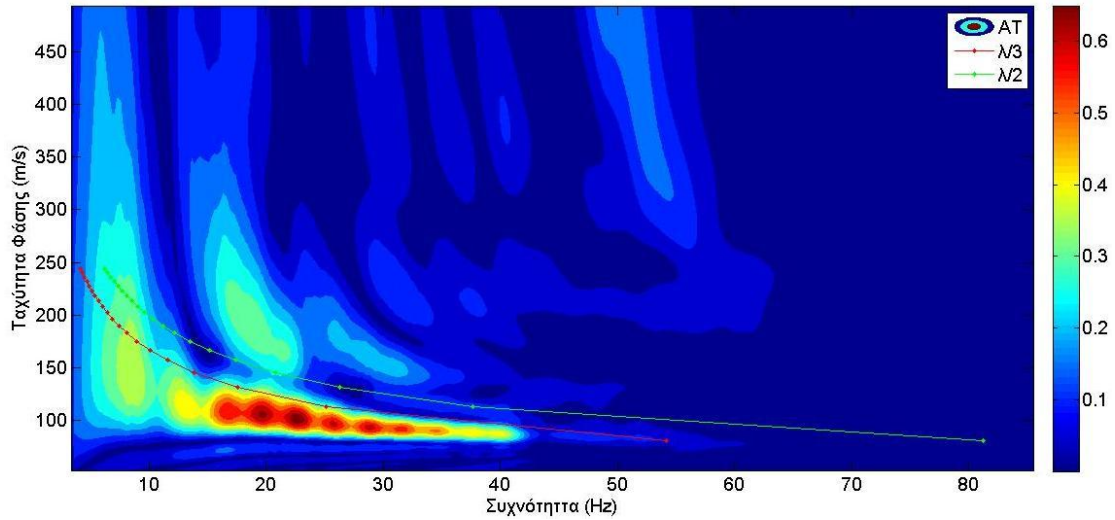
Για τις εκτιμήσεις των κατανομών της ταχύτητας V_s και σε αυτές τις δοκιμές λαμβάνεται υπόψη για κάθε συχνότητα η απόκλιση του 5 % από το μέγιστο πλάτος της σεισμικής ενέργειας όπως ακριβώς διατυπώθηκε και εξηγήθηκε στο τέλος της παραγράφου §3.4, και χρησιμοποιήθηκε και στις αναλύσεις που προηγήθηκαν με φόρτιση το σεισμό της Καλαμάτας 1986. Επίσης οι αναλύσεις που παρουσιάζονται πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας διάταξη 9 καναλιών καταγραφής καθώς όπως φάνηκε σε προηγούμενες δοκιμές η αύξηση των καναλιών σε 24 δεν οδηγεί σε βελτίωση των εκτιμήσεων.



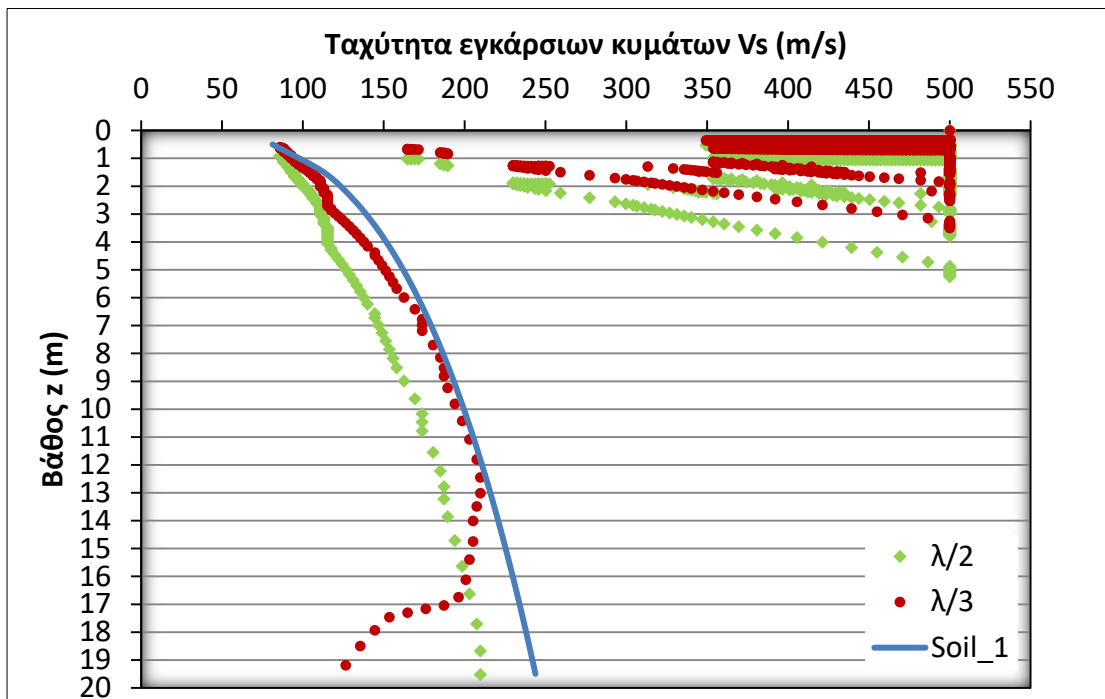
Σχήμα 4.19: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για το έδαφος Soil_1 υπό φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 1 Hz χρονικής διάρκειας 4,096 sec (απόσβεση $\xi=0,5\%$). Είναι εμφανής η βελτίωση στα πρώτα μέτρα του εδάφους (υψηλές συχνότητες).



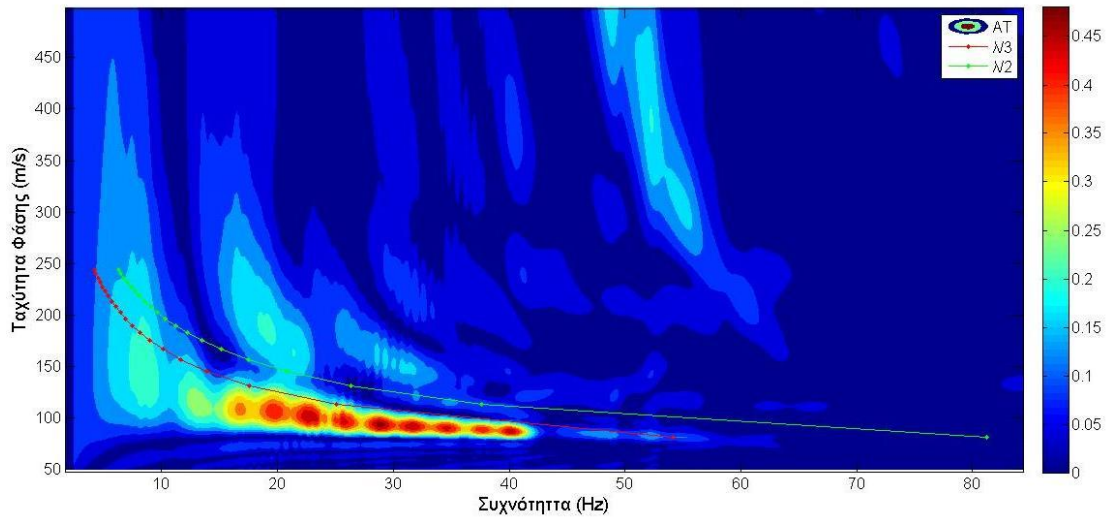
Σχήμα 4.20: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το αρχικό προφίλ που εξετάζεται (soil_1) και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπό φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 1 Hz 4,096 sec (απόσβεση $\xi = 0,5\%$). Διακρίνεται η απόκλιση στα βαθύτερα στρώματα.



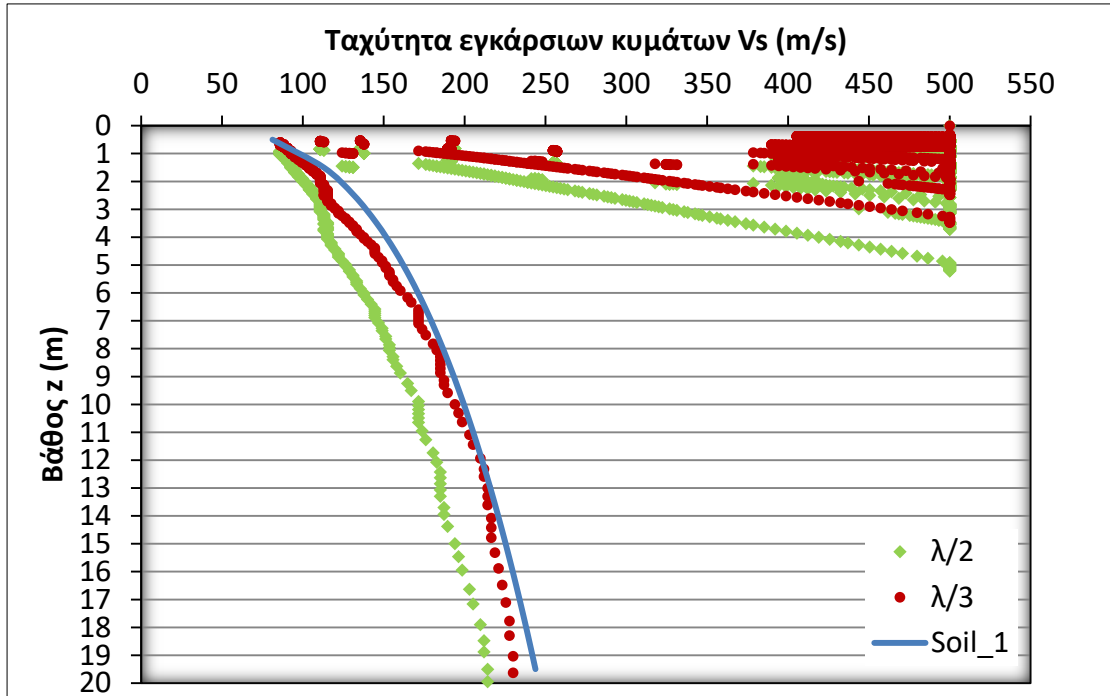
Σχήμα 4.21: Ισοψείς καμπυλών διασποράς για το έδαφος Soil_1 υπό φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 1 Hz χρονικής διάρκειας 4,096 sec (απόσβεση $\xi=1,0\%$). Επιβεβαιώνεται η βελτίωση στα πρώτα μέτρα του εδάφους (υψηλές συχνότητες).



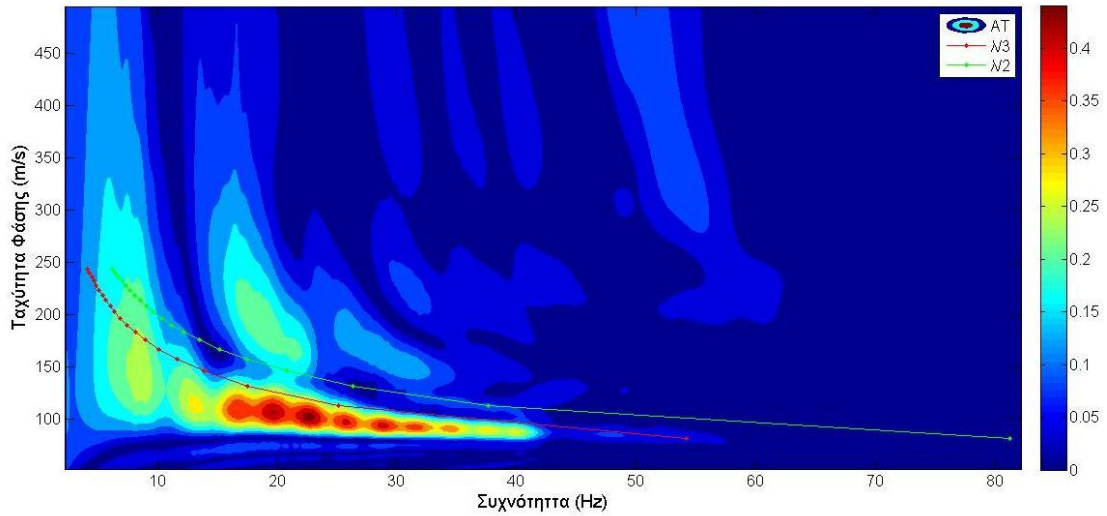
Σχήμα 4.22: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το soil_1 και αυτές που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπό φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 1 Hz 4,096 sec (απόσβεση $\xi = 1,0\%$).



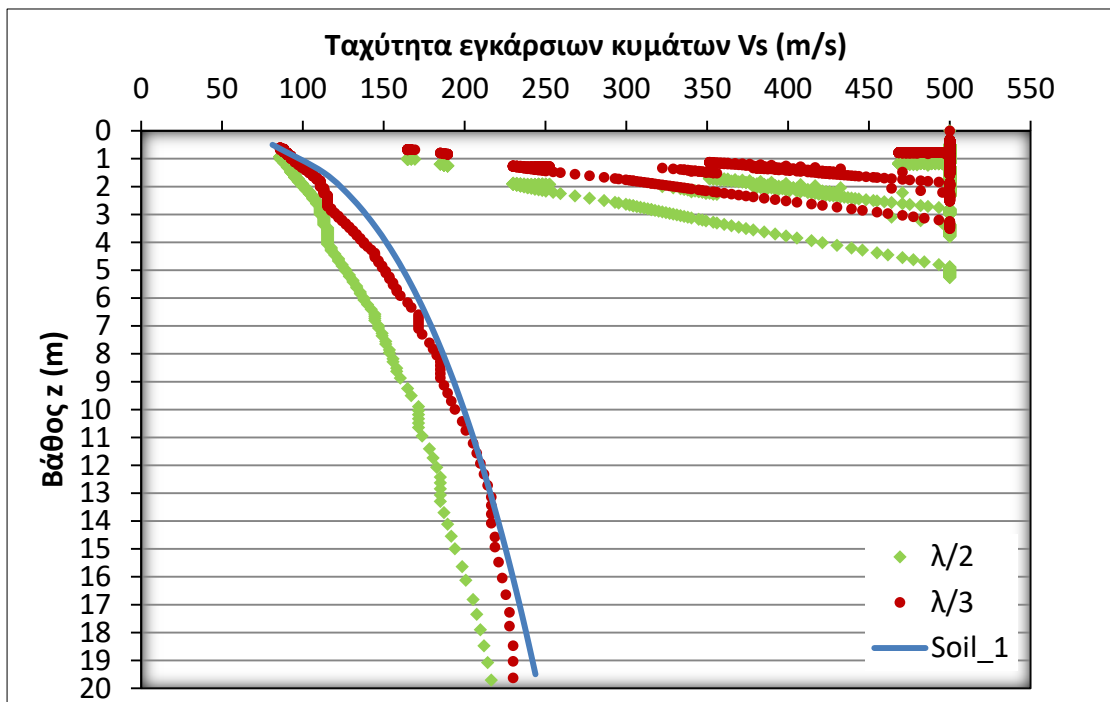
Σχήμα 4.23: Ισοψείς καμπυλών διασποράς για το έδαφος Soil_1 υπό φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 1 Hz χρονικής διάρκειας 8,192 sec (απόσβεση $\xi=0,5\%$).



Σχήμα 4.24: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το soil_1 και αυτές που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπό φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 1 Hz 4,096 sec (απόσβεση $\xi = 0,5\%$). Φαίνεται η βελτίωση της εκτίμησης στα μεσαία και επιφανειακά στρώματα σε σχέση με τα αντίστοιχα σχήματα του σεισμού της Καλαμάτας (σχ 4.8,4.10).



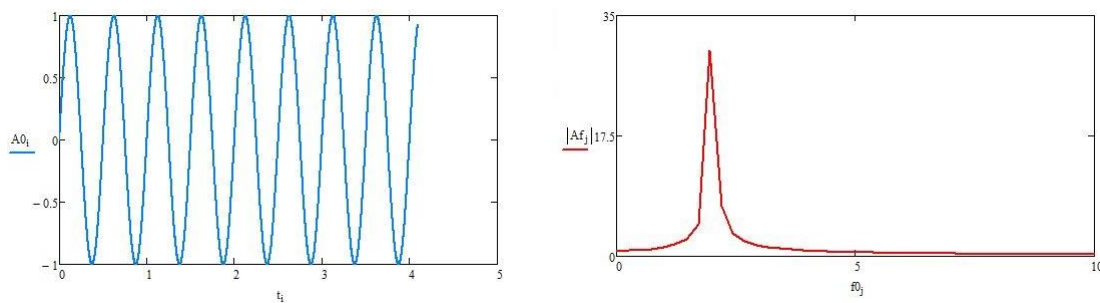
Σχήμα 4.25: Ισοψείς καμπυλών διασποράς για το έδαφος Soil_1 υπό φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 1 Hz χρονικής διάρκειας 8,192 sec (απόσβεση $\xi=1,0\%$).



Σχήμα 4.26: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το αρχικό προφίλ που εξετάζεται (soil_1) και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπο φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 1 Hz 4,096 (απόσβεση $\xi = 0,5\%$). Φαίνεται η βελτίωση της εκτίμησης στα μεσαία και επιφανειακά στρώματα σε σχέση με τα αντίστοιχα σχήματα του σεισμού της Καλαμάτας (σχ 4.12,4.14).

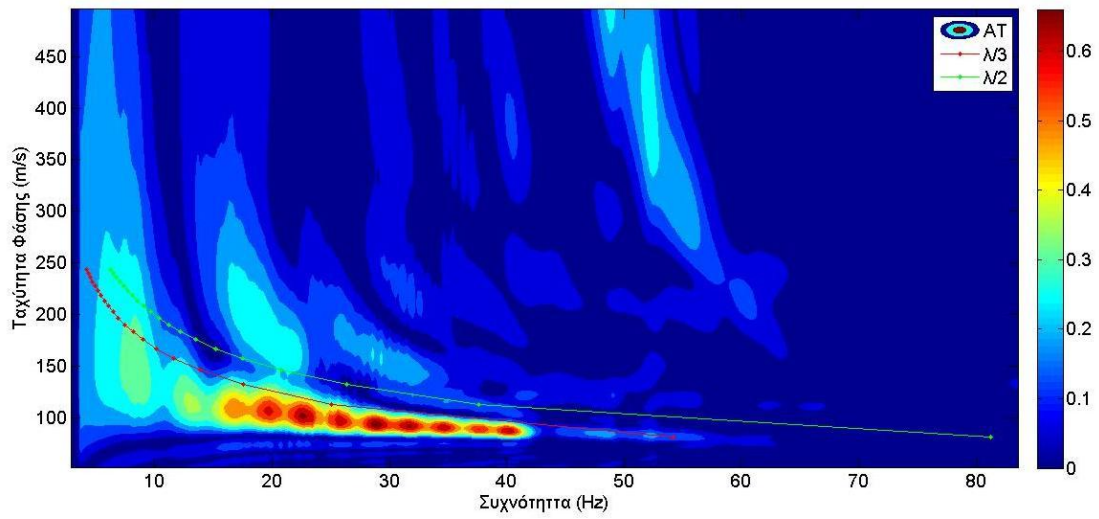
4.1.3.2 Ημίτονο δεσπόζουσας συχνότητας 2Hz

Οι επόμενες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ως φόρτιση ένα ημίτονο με δεσπόζουσα συχνότητα 2 Hz χρονικής διάρκειας 4,096 sec στον οποίο αντιστοιχούν 8 κύκλοι φόρτισης με βήμα 0,001 sec. Η χρονοσειρά του ημιτόνου και το φάσμα των συχνοτήτων που του αντιστοιχεί δίνονται στο σχήμα 4.27.

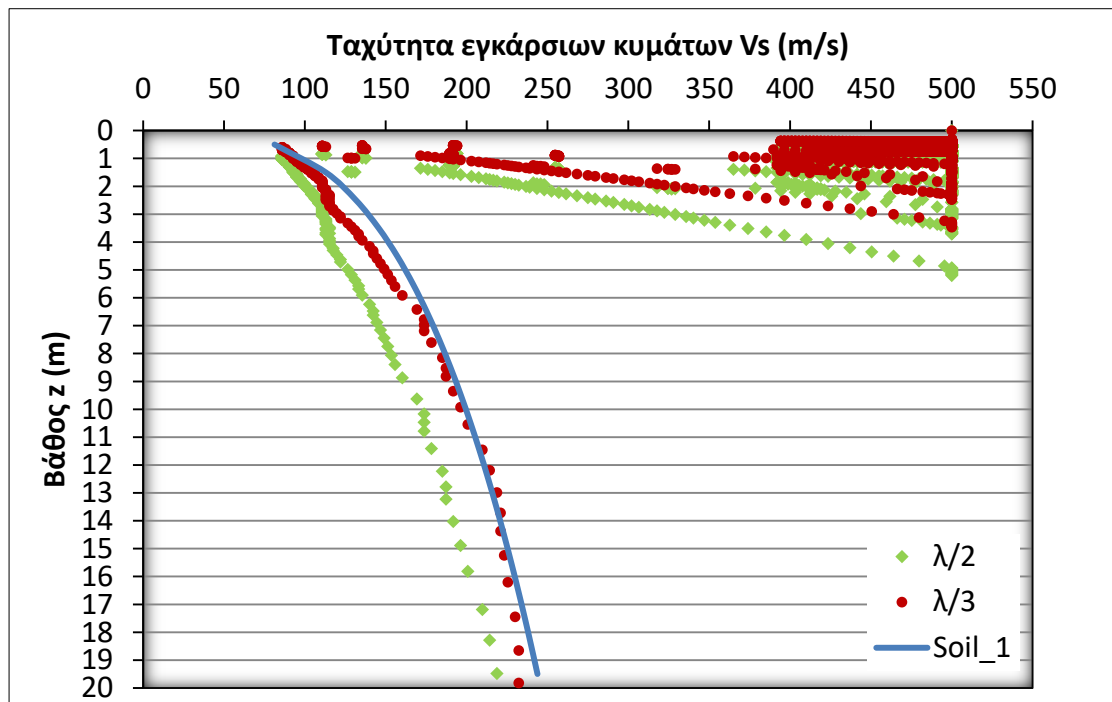


Σχήμα 4.27: Στα αριστερά φαίνεται η κυματομορφή του ημιτόνου 8 συνολικών κύκλων. Στα δεξιά διακρίνεται το φάσμα των συχνοτήτων και η δεσπόζουσα συχνότητα ίση με 2 Hz.

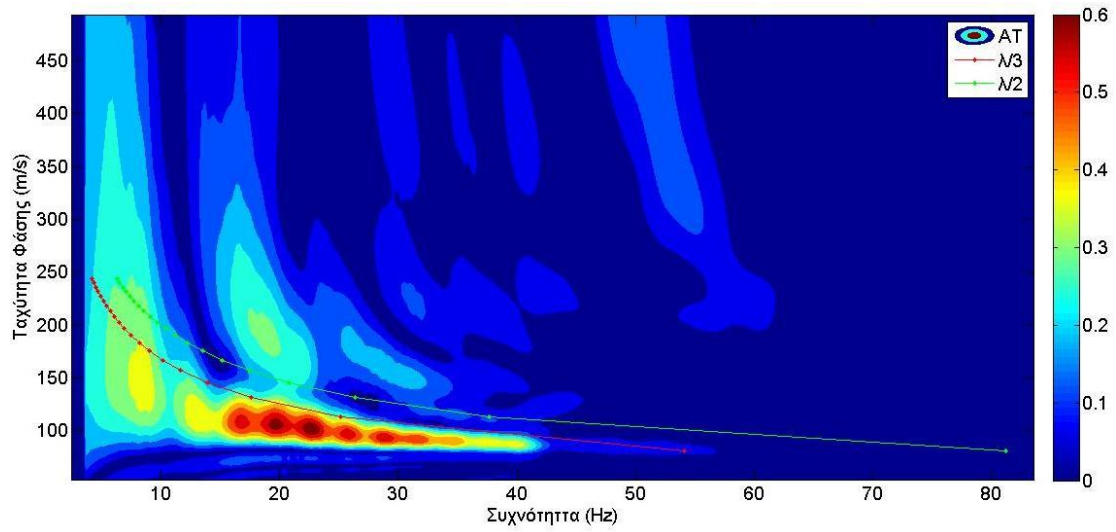
Η κατανομές της ταχύτητας V_s με το βάθος που προκύπτει από τις αναλύσεις για απόσβεση $\xi=0,5\%$ και $\xi=1,0\%$ παρουσιάζουν αντίστοιχα αποτελέσματα με εκείνα των αναλύσεων που ως φόρτιση χρησιμοποιήθηκε το ημίτονο δεσπόζουσας συχνότητας 1 Hz και χρονικής διάρκειας 8,192 sec. Δηλαδή η εκτίμηση της ταχύτητας V_s προσεγγίζει την πραγματική κατανομή ικανοποιητικά σε όλα τα βάθη με ξεκάθαρη βελτίωση στα μεσαία και επιφανειακά στρώματα. Η ομοιότητα των αποτελεσμάτων των δύο φορτίσεων οφείλεται στον αριθμό των κύκλων φόρτισης, ο οποίος είναι ίσος με 8 και στις δύο περιπτώσεις παρόλο που το ημίτονο συχνότητας 2 Hz είναι χρονικής διάρκειας 4,096 sec.



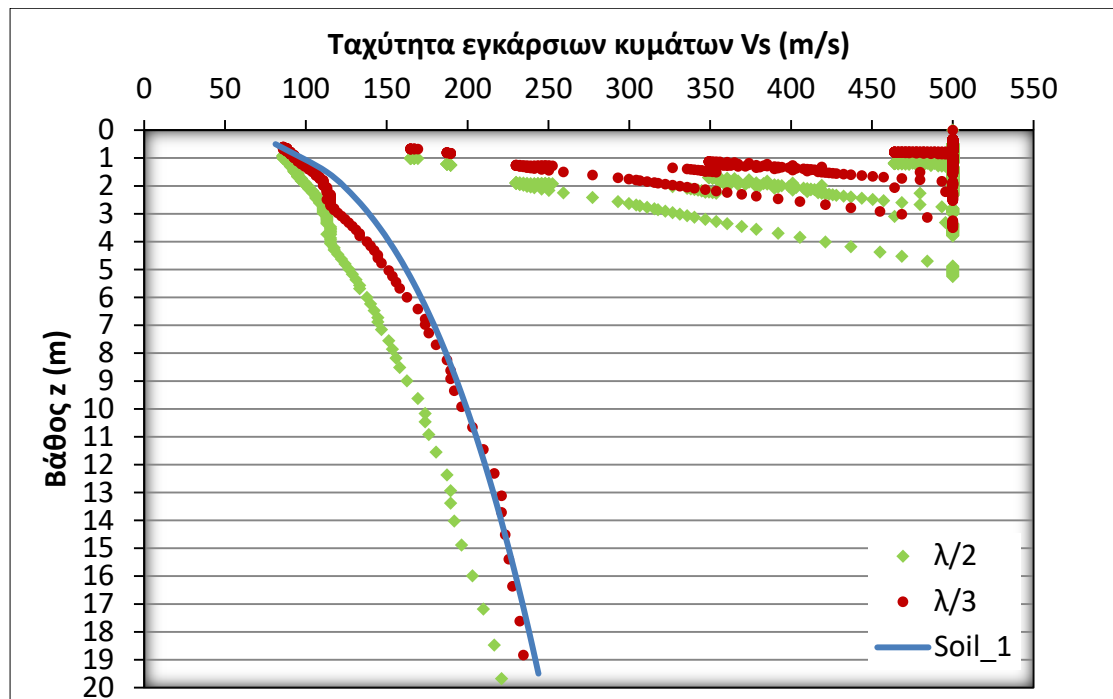
Σχήμα 4.28: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για το έδαφος Soil_1 υπό φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 2 Hz χρονικής διάρκειας 4,096 sec (απόσβεση $\xi=0,5\%$).



Σχήμα 4.29: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το αρχικό προφίλ που εξετάζεται (soil_1) και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπό φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 2 Hz 4,096 sec (απόσβεση $\xi = 0,5\%$). Η ομοιότητα της εκτίμησης συγκριτικά με το ημίτονο 1Hz 8,192 sec (σχ 4.24) είναι προφανής.



Σχήμα 4.30: Ισοψείς καμπυλών διασποράς για το έδαφος Soil_1 υπό φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 2 Hz χρονικής διάρκειας 4,096 sec (απόσβεση $\xi=1,0\%$).



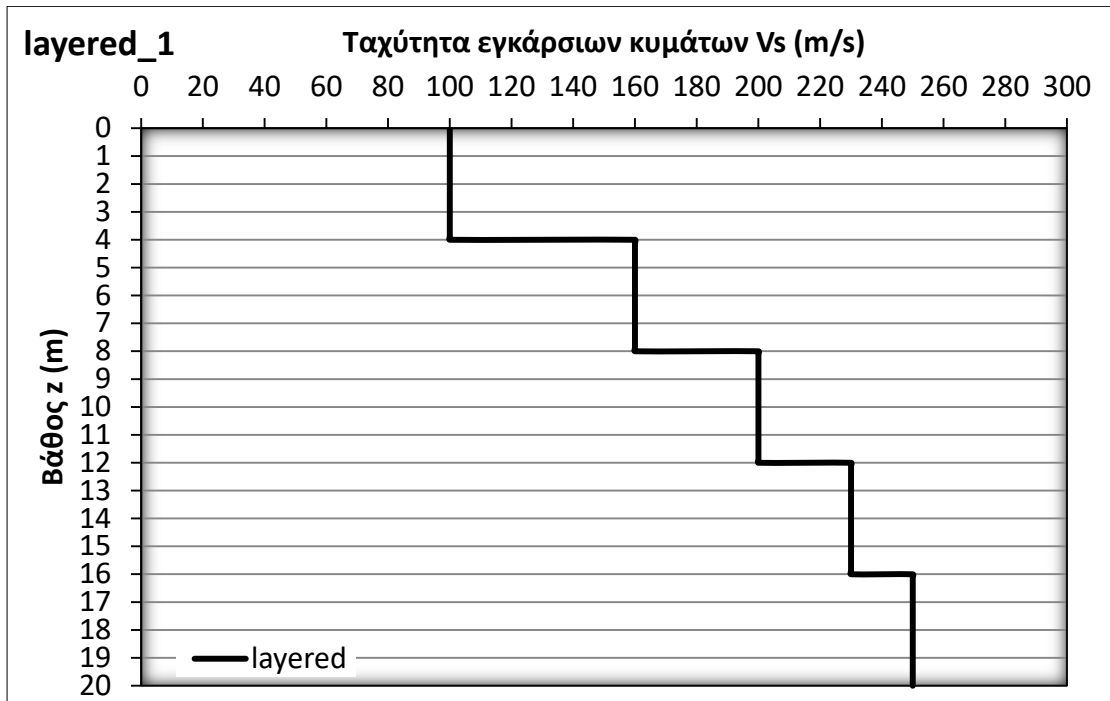
Σχήμα 4.31: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το αρχικό προφίλ που εξετάζεται (soil_1) και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπο φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 2 Hz 4,096 (απόσβεση $\xi = 1,0\%$).

Στις αναλύσεις, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάστηκαν ανωτέρω εμφανίζεται όπως είναι αναμενόμενο, μία συγκέντρωση ενός μεγάλου ποσοστού της σεισμικής ενέργειας γύρω από την δεσπόζουσα συχνότητα του ημιτόνου που χρησιμοποιείται ως φόρτιση. Αυτό βέβαια δεν εμφανίζεται στις καμπύλες διασποράς καθώς οι συχνότητες αυτές έχουν απομονωθεί και εξαλειφθεί από τις καμπύλες θέτοντας στο μητρώο καταγραφών AT τιμή 0 σε όλα τα κελιά σε μία περιοχή γύρω από τη θέση που αντιστοιχεί στη δεσπόζουσα συχνότητα (πρακτικά από το πρώτο σημείο έως και λίγο μετά τη δεσπόζουσα συχνότητα). Οι αντίστοιχες εντολές στο MATLAB φαίνονται στις εντολές 9 και 10 στον αλγόριθμο που παρουσιάστηκε στη §3.4.

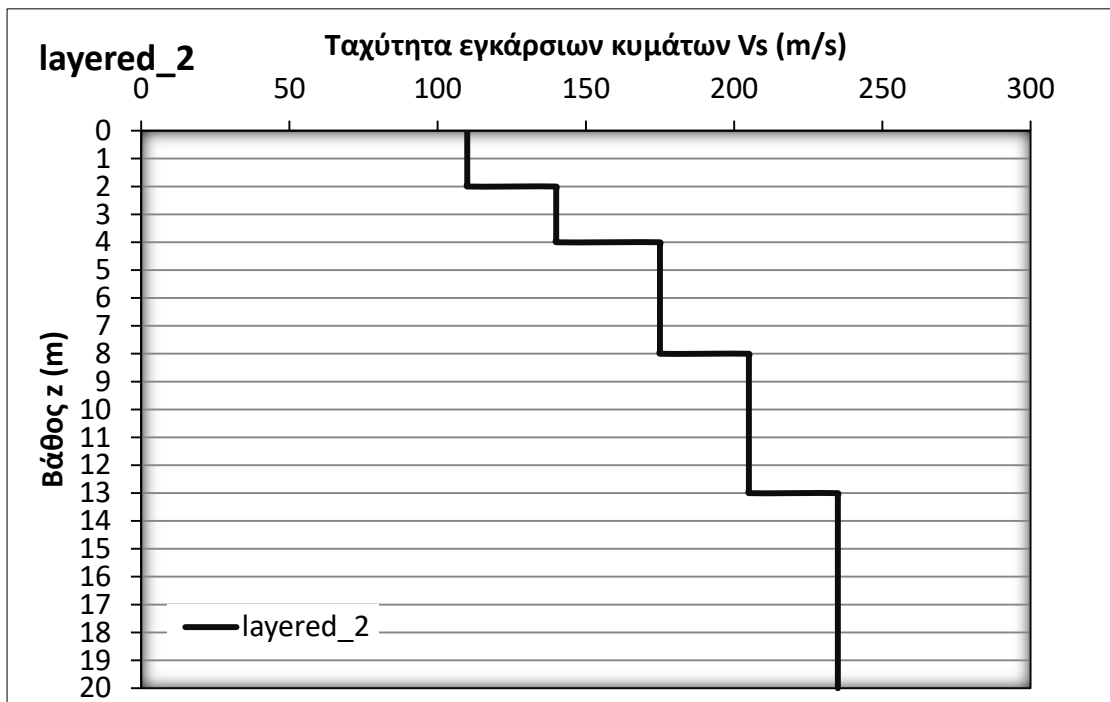
Παράλληλα με τον εδαφικό σχηματισμό που εξετάστηκε στις παραγράφους που προηγήθηκαν, οι αντίστοιχες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν και στο έδαφος Soil_2 η κατανομή του οποίου και τα διαγράμματα με τις εκτιμήσεις των τομών του υπεδάφους δίνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1.

4.1.4 Προσομοίωση εδαφικού σχηματισμού (Soil 1) με έδαφος 5 στρώσεων

Στη παράγραφο αυτή εξετάζεται η απόδοση της μεθόδου M.A.S.W. σε εδαφικούς σχηματισμούς των οποίων η ταχύτητα δε μεταβάλλεται με τον ίδιο ρυθμό (παραβολικά) όπως στο Soil_1. Τέτοιοι εδαφικοί σχηματισμοί μπορούν να χαρακτηριστούν εδάφη που αποτελούνται από εδαφικές στρώσεις ενιαίας ταχύτητας V_s που διατηρείται για στρώσεις μεγαλύτερου πάχους του ενός μέτρου. Έτσι επιλέγονται δύο εδαφικά προφίλ 5 στρώσεων εκ των οποίων το πρώτο (layered_1) αποτελείται από 5 στρώσεις ίσου βάθους και κατανομής ταχύτητας V_s όπως φαίνεται στο σχήμα 4.32. Το δεύτερο (layered_2) ακολουθεί μία πιο ρεαλιστική σύνθεση καθώς το πάχος των στρωμάτων της μεγαλώνουν όσο αυξάνεται το βάθος (σχήμα 4.33). Και οι δύο εδαφικοί σχηματισμοί προσομοιώνουν το Soil_1 (ισότητα εμβαδών) για λόγους σύγκρισης με το παραβολικό προφίλ.

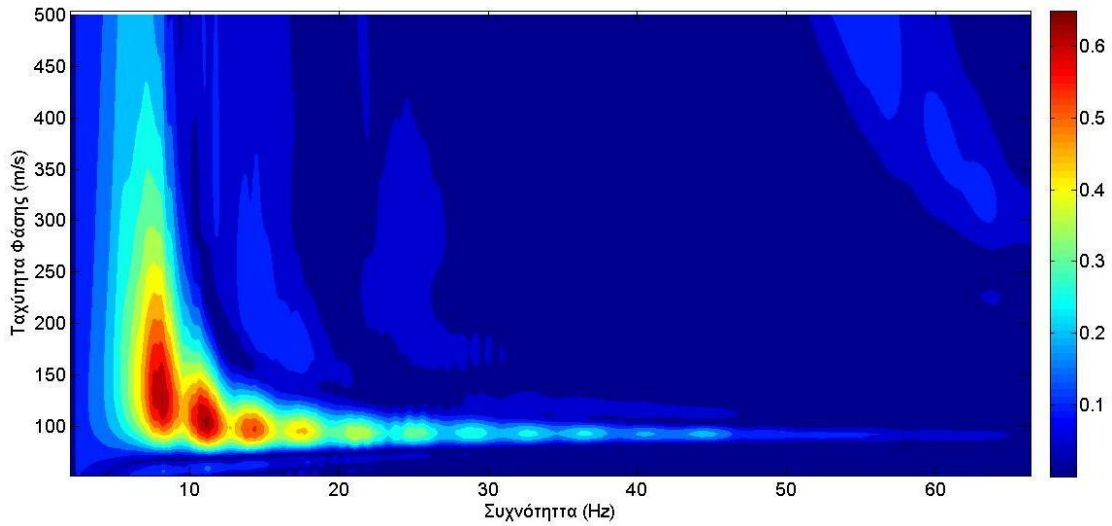


Σχήμα 4.32: Κατανομή ταχύτητας εγκάρσιων ταχυτήτων Vs με το βάθος για το layered_1. Ο εδαφικός σχηματισμός αποτελείται από 5 στρώσεις 4 m η κάθε μία.

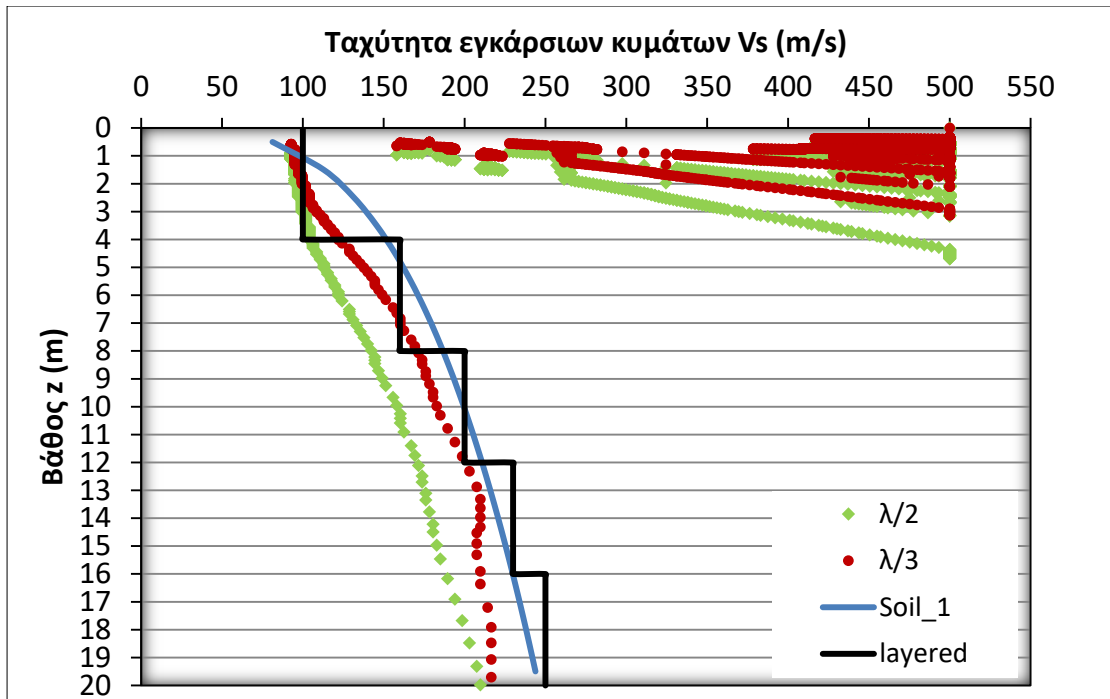


Σχήμα 4.33: Κατανομή ταχύτητας εγκάρσιων ταχυτήτων Vs με το βάθος για το layered_2. Ο εδαφικός σχηματισμός αποτελείται από 5 στρώσεις το πάχος των οποίων δεν είναι σταθερό.

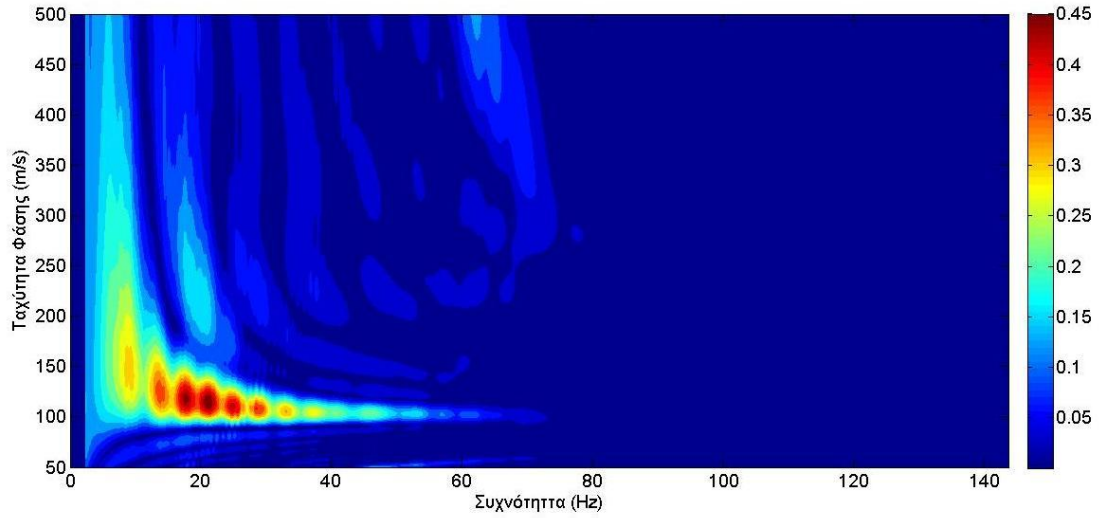
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων με φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 1Hz και διάρκειας 8,192 sec και απόσβεσης $\xi=0,5\%$.



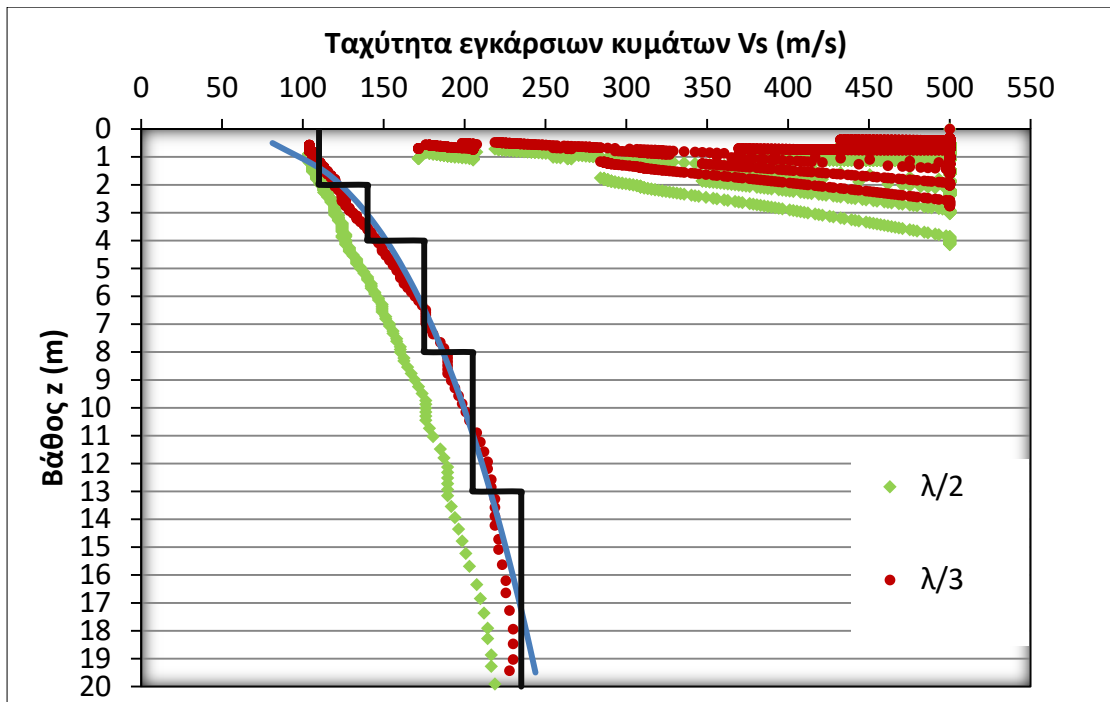
Σχήμα 4.34: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για το έδαφος *layered_1*.



Σχήμα 4.35: Κατανομές ταχύτητας V_s με το βάθος για το αρχικό προφίλ που εξετάζεται (*layerd_1*) και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$).



Σχήμα 4.36: ΙσοΨείς καμπυλών διασποράς για το έδαφος *layered_2*.



Σχήμα 4.37: Κατανομές ταχύτητας V_s με το βάθος για το αρχικό προφίλ που εξετάζεται (*layered_2*) και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$)

Είναι φανερό πως η μέθοδος αδυνατεί να δώσει εκτιμήσεις για προφίλ που η ταχύτητα διατηρείται σταθερή για περισσότερα από 1-2 μέτρα. Ωστόσο η εκτέλεση της μεθόδου οδηγεί σε εκτιμήσεις παραβολικών προφίλ τα οποία μπορούν να προσομοιώσουν τέτοιου είδους προφίλ με ένα παραβολικό. Αυτό επιβεβαιώνεται στο σχήμα 4.37 για το έδαφος layered_2 καθώς η εκτίμηση της κατανομής των ταχυτήτων V_s με το βάθος προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια αυτήν του Soil_1, από το οποίο έχει προκύψει και το εξεταζόμενο προφίλ λαμβάνοντας ισότητα εμβαδών. Το ίδιο δεν ισχύει στο προφίλ layered_1 καθώς το μεγάλο πάχος των επιφανειακών προφίλ οδηγεί σε υποτίμηση της ταχύτητας V_s που εκτιμάται.

Με αυτές τις δοκιμές ολοκληρώνονται οι εκτιμήσεις για το έδαφος Soil_1 και το ενδιαφέρον εστιάζεται σε εδαφικά προφίλ που παρουσιάζουν κάποιες ιδιαιτερότητες και σε μία εφαρμογή της μεθόδου σε δύο διαστάσεις. Συγκεκριμένα εξετάζονται εδάφη που η ταχύτητα V_s των στρωμάτων της μειώνεται μονοτονικά με το βάθος και ακόμη εδαφικοί σχηματισμοί με ενδιάμεσες στρώσεις μειωμένης ακαμψίας (συνεπώς και ταχύτητας V_s) από τις υπερκείμενες.

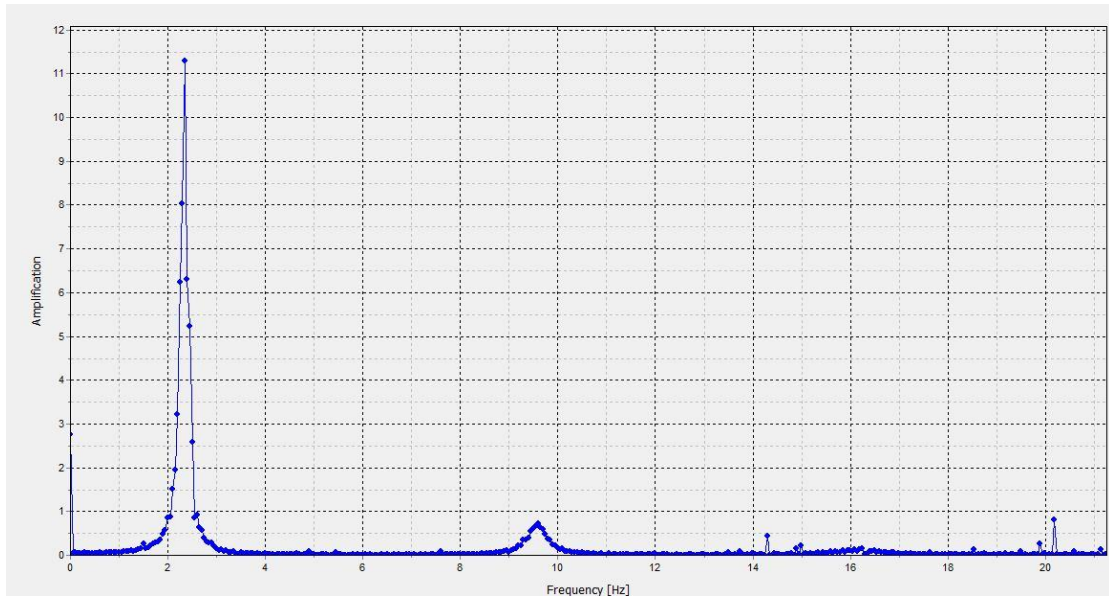
4.2 Ανάστροφο εδαφικό προφίλ

Σε αυτή τη παράγραφο εξετάζεται η λειτουργία της μεθόδου M.A.S.W. σε εδαφικούς σχηματισμούς των οποίων η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων V_s , κατά συνέπεια και η ακαμψία τους, μειώνεται μονοτονικά με το βάθος, σε αντίθεση με όσα εδάφη είχαν εξεταστεί σε προηγούμενες παραγράφους (μονοτονική αύξηση V_s με το βάθος). Για το σκοπό αυτό εξετάζονται 2 εδαφικά προφίλ, Soil_A και Soil_B, οι κατανομές των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 4.1 υπό φόρτιση ημιτόνου δεσπόζουσας συχνότητας 1 Hz, χρονικής διάρκειας 4,096 sec και 8,192 sec, η κυματομορφή και το φάσμα συχνοτήτων των οποίων φαίνονται στα σχήματα 4.17 και 4.18 αντίστοιχα. Η απόσβεση του εδάφους επιλέχθηκε ίση με $\xi=1\%$ και για τα δύο εδαφικά προφίλ. Η προσομοίωση του εδάφους ακολουθεί τα πρότυπα που τέθηκαν στο Soil_1, δηλαδή η ταχύτητα κάθε στρώματος αντιστοιχεί στο μέσον αυτού.

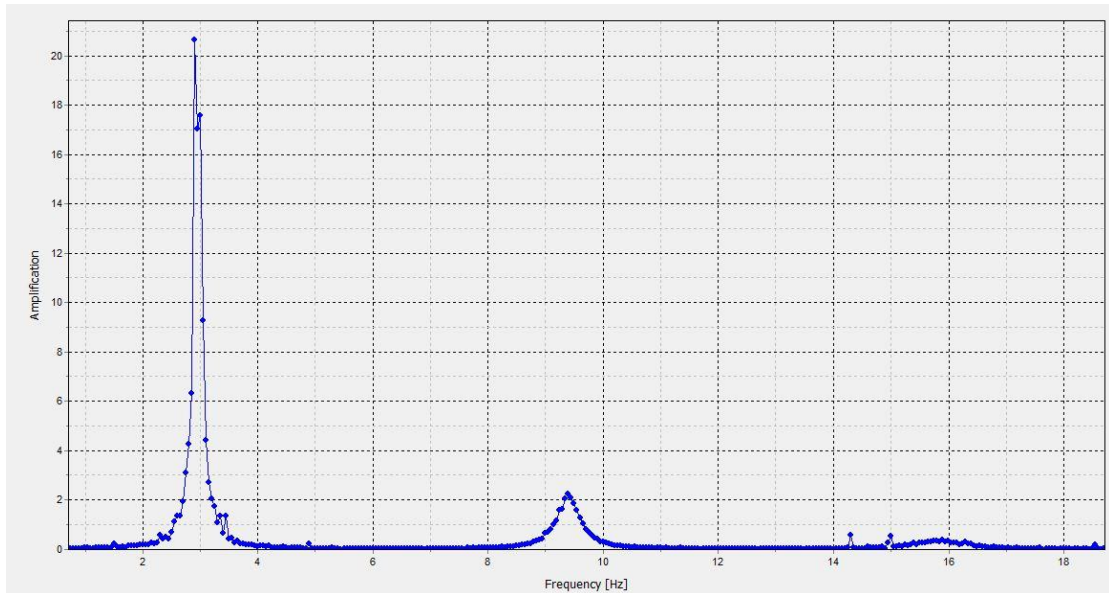
Soil_A: $V_s = 400 \cdot x^{-0,25}$		soil_B: $V_s = 350 \cdot x^{-0,15}$	
0,5	475,68	0,5	388,3
1,5	361,44	1,5	329,3
2,5	318,11	2,5	305,1
3,5	292,44	3,5	290,0
4,5	274,64	4,5	279,3
5,5	261,20	5,5	271,0
6,5	250,51	6,5	264,3
7,5	241,71	7,5	258,7
8,5	234,26	8,5	253,9
9,5	227,84	9,5	249,7
10,5	222,21	10,5	246,0
11,5	217,21	11,5	242,6
12,5	212,73	12,5	239,6
13,5	208,68	13,5	236,9
14,5	204,98	14,5	234,3
15,5	201,59	15,5	232,0
16,5	198,47	16,5	229,9
17,5	195,57	17,5	227,8
18,5	192,87	18,5	225,9
19,5	190,35	19,5	224,2

Πίνακας 4.1: Κατανομή της εγκάρσιας ταχύτητας V_s με το βάθος για τα 2 ανάστροφα προφίλ.

Η επιλογή του ημιτόνου με δεσπόζουσα συχνότητα ίση με 1 Hz καλύπτει τις απαιτήσεις που περιγράφηκαν σχετικά με τα κύματα Love (§4.1.2) καθώς οι ιδιοσυχνότητες των εδαφικών σχηματισμών που εξετάζονται είναι $f_0(A)=2,40$ Hz και $f_0(B)=2,90$ Hz για Soil_A και Soil_B αντίστοιχα (σχήμα 4.38 και 4.39).



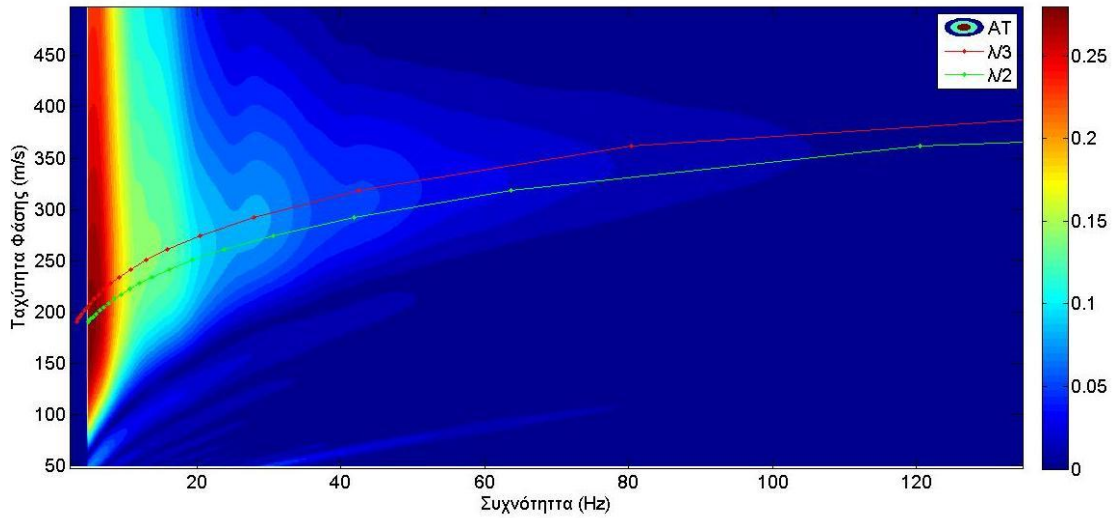
Σχήμα 4.38: Απεικόνιση του λόγου των επιταχύνσεων στην επιφάνεια του εδάφους προς την αντίστοιχη της βάσης για το Soil_A. Τα τοπικά μέγιστα που φαίνονται αντιστοιχούν στις ιδιοσυχνότητες του εδαφικού σχηματισμού ($f_0=2,40$ Hz).



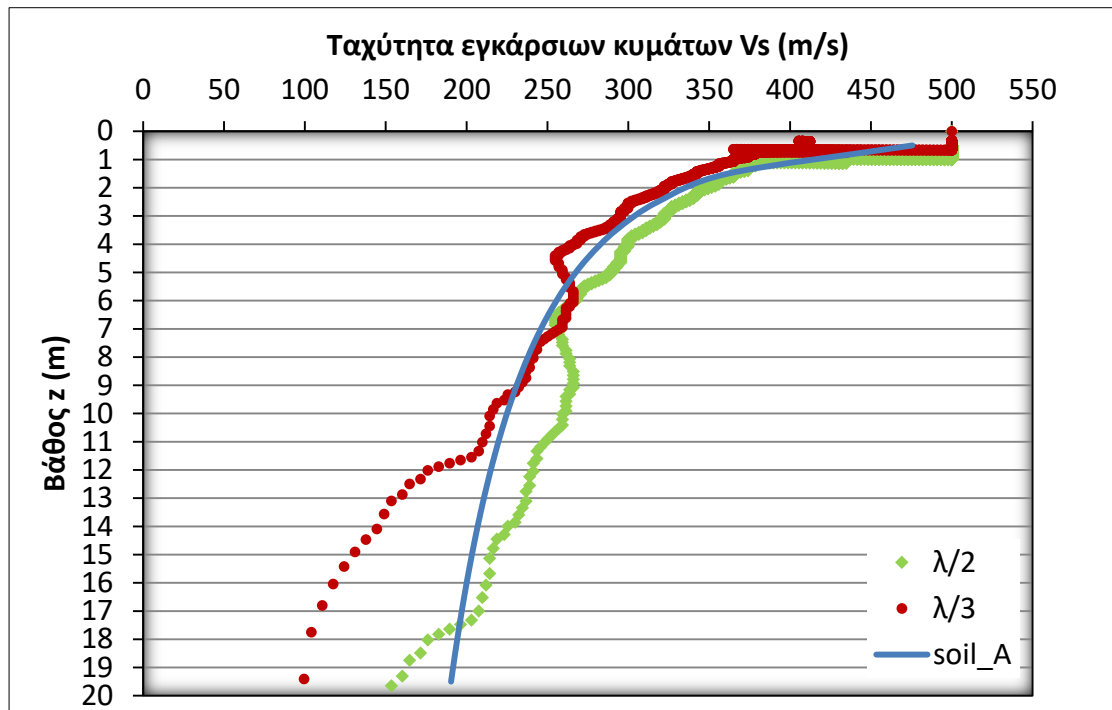
Σχήμα 4.39: Απεικόνιση του λόγου των επιταχύνσεων στην επιφάνεια του εδάφους προς την αντίστοιχη της βάσης για το Soil_B. Τα τοπικά μέγιστα που φαίνονται αντιστοιχούν στις ιδιοσυχνότητες του εδαφικού σχηματισμού ($f_0=2,90$ Hz).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι καμπύλες διασποράς και τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων για τις τομές του υπεδάφους για τα δύο εδάφη που εξετάζονται με το Soil_A να παρουσιάζεται πρώτο και το Soil_2 να ακολουθεί.

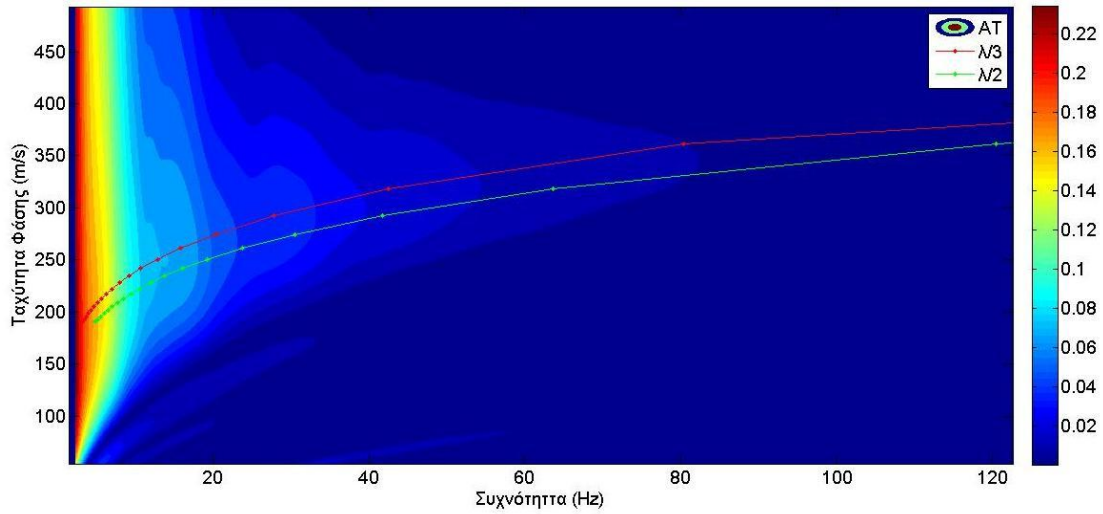
Αποτελέσματα αναλύσεων Soil-A



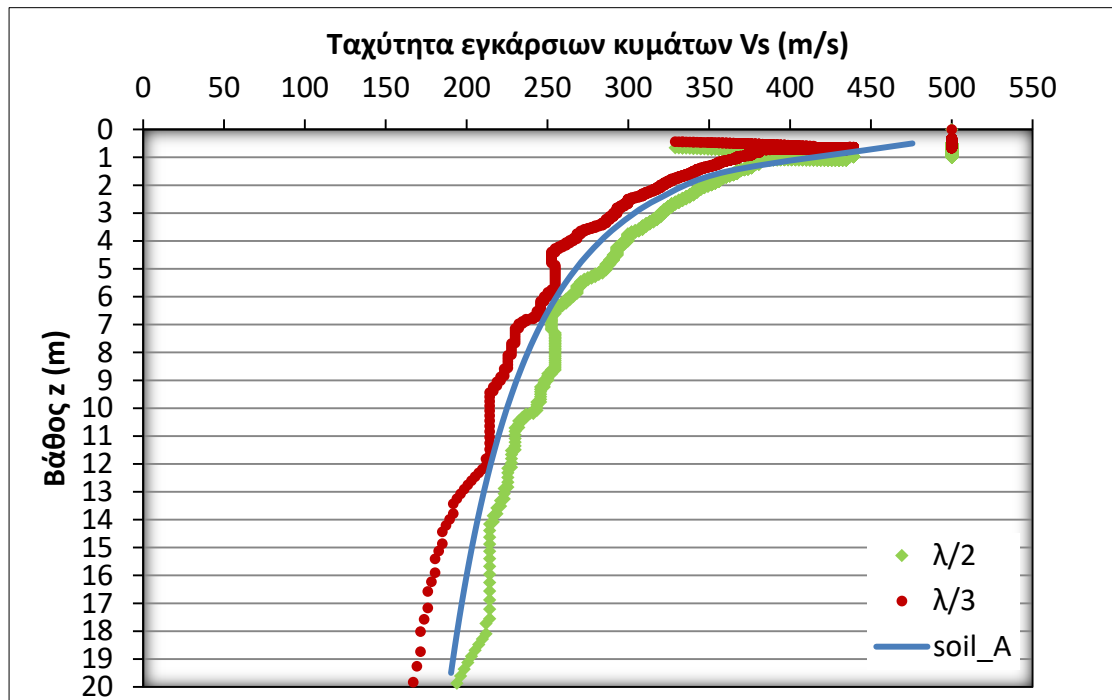
Σχήμα 4.40: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για το ανάστροφο έδαφος Soil_A υπό φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 1 Hz χρονικής διάρκειας 4,096 sec. Διακρίνεται η αντιστροφή της φοράς της καμπύλης διασποράς (M0) λόγω του ανάστροφου εδαφικού προφίλ.



Σχήμα 4.41: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το soil_A και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπό φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 1 Hz 4,096 sec.

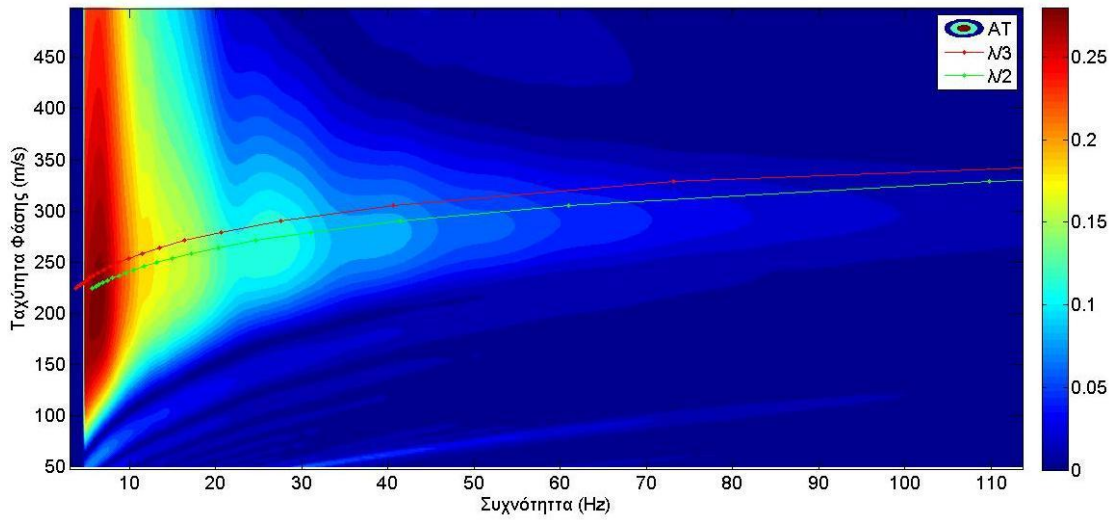


Σχήμα 4.42: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για το ανάστροφο έδαφος Soil_A υπό φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 1 Hz χρονικής διάρκειας 8,192 sec.

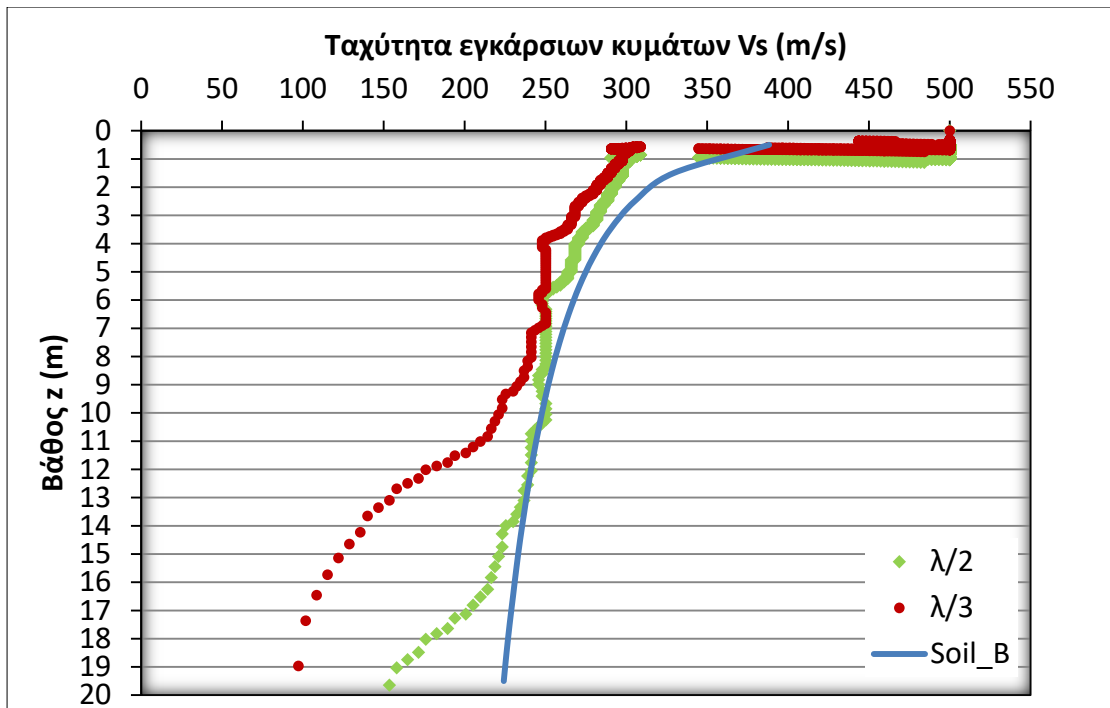


Σχήμα 4.43: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το soil_A και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπο φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 1 Hz 8,192 sec σ. Διακρίνεται η βελτίωση της εκτίμησης των κατανομών της V_s .

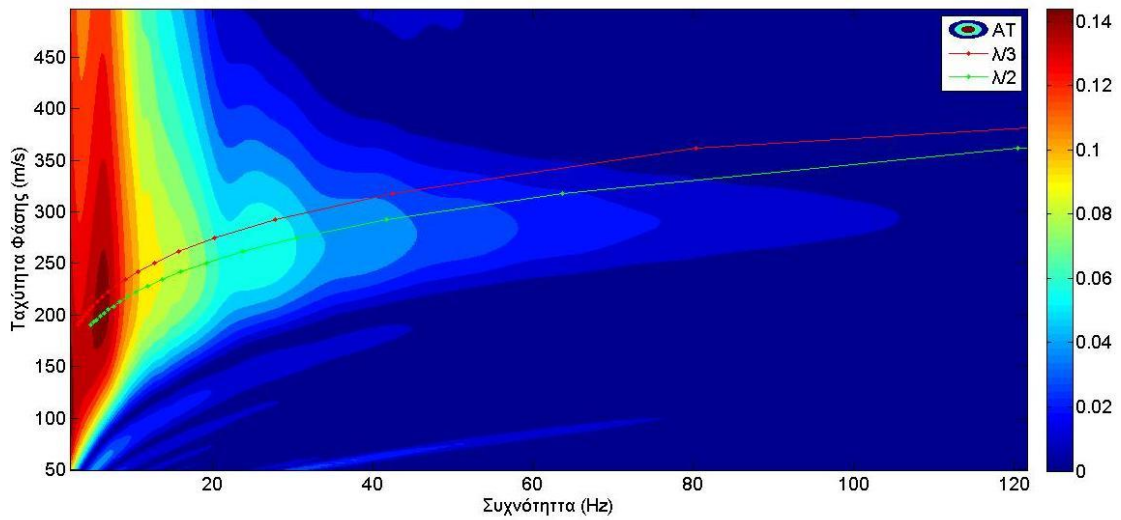
Αποτελέσματα αναλύσεων Soil-B



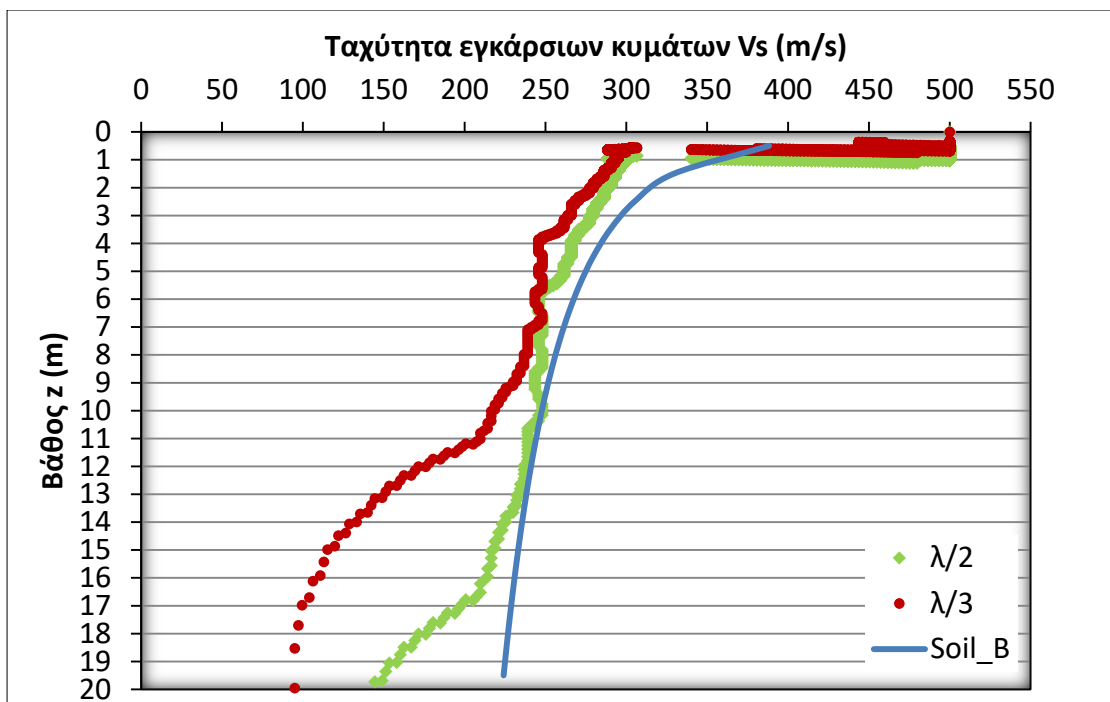
Σχήμα 4.44: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για το ανάστροφο έδαφος Soil_B υπό φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 1 Hz χρονικής διάρκειας 4,096 sec.



Σχήμα 4.45: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το soil_B και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπο φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 1 Hz 4,096 sec. Η εκτίμηση βάθους $\lambda/2$ προσεγγίζει περισσότερο το πραγματικό προφίλ σε αντίθεση με το Soil_A.



Σχήμα 4.46: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για το ανάστροφο έδαφος Soil_B υπό φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 1 Hz χρονικής διάρκειας 8,192 sec.



Σχήμα 4.47: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το soil_B και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$), υπο φόρτιση ημιτόνου συχνότητας 1 Hz 8.192 sec. Η εκτίμηση βάθους $\lambda/2$ προσεγγίζει περισσότερο το πραγματικό προφίλ σε αντίθεση με το Soil_A.

Πριν σχολιαστούν τα αποτελέσματα των δοκιμών για τα ανάστροφα προφίλ να σημειωθεί πως η διαμόρφωση των εκτιμήσεων των κατανομών της ταχύτητας V_s με το βάθος έγινε με βάση τις θέσεις των μεγίστων της σεισμικής ενέργειας καθώς δεν λήφθηκε υπόψη η απόκλιση του 5 % από το μέγιστο πλάτος της σεισμικής ενέργειας αφού οι εκτιμήσεις χρησιμοποιώντας αυτό το κριτήριο παρουσίασαν μεγάλες αποκλίσεις από τα πραγματικά εδαφικά προφίλ.

Στις αναλύσεις που προηγήθηκαν φαίνεται πως οι εκτιμήσεις των δύο εδαφικών προφίλ διαφέρουν μεταξύ τους. Αρχικά οι εκτιμήσεις για το έδαφος Soil_A πλησιάζουν αρκετά καλά το αρχικό προφίλ ειδικότερα στη φόρτιση με ημίτονο 8 κύκλων (σχήμα 4.43) όπου οι εκτιμήσεις για $\lambda/2$ και $\lambda/3$ παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια απόκλιση. Αντίθετα στο δεύτερο έδαφος που εξετάζεται (Soil_B) οι εκτιμήσεις δε προσεγγίζουν την πραγματική κατανομή τόσο καλά όπως στο Soil_A. Συγκεκριμένα σε αντίθεση με τις αναλύσεις που έχουν παρουσιαστεί ως τώρα, φαίνεται πως το πραγματικό εδαφικό προφίλ προσεγγίζεται καλύτερα από την εκτίμηση για $\lambda/2$ και όχι για $\lambda/3$. Επίσης η αύξηση των κύκλων φόρτισης από 4 σε 8 για το Soil_B δε φαίνεται να οδηγεί σε κάποια βελτίωση σχετικά με την εκτίμηση της ταχύτητας V_s όπως διακρίνεται στα αντίστοιχα σχήματα του Soil_B.

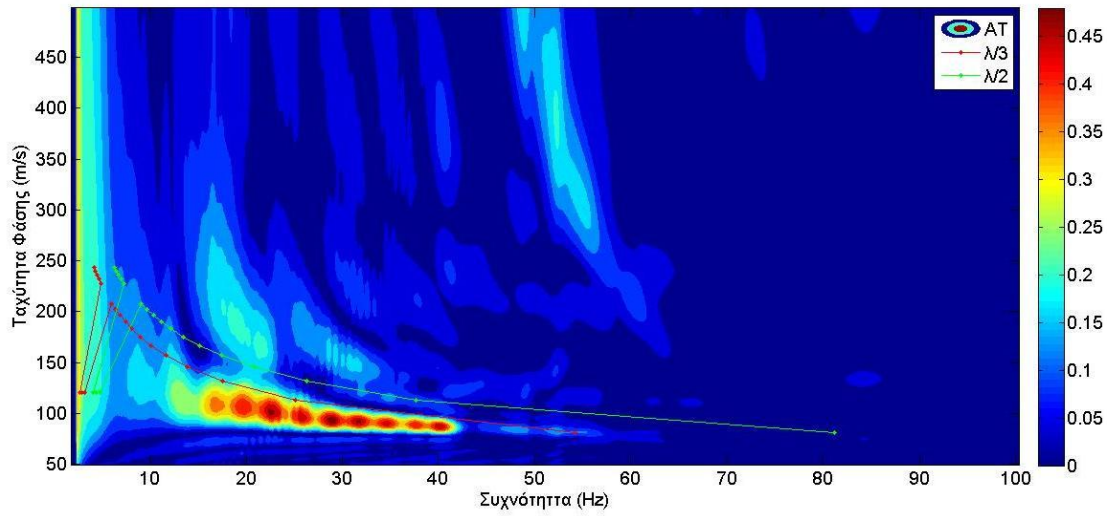
Οι διαφορές που περιγράφηκαν δικαιολογούνται εν μέρει από τις διαφορές που παρουσιάζουν τα δύο εδαφικά προφίλ ως προς τη κατανομή της ταχύτητας V_s με το βάθος. Από το Πίνακα 4.1 προκύπτει πως το Soil_A προσεγγίζει καλύτερα ένα μέσο που αποτελείται από πολλές στρώσεις καθώς η μεταβολή των ταχυτήτων είναι πιο ομαλή επομένως οι διαφορές στην τιμή της V_s μεγαλύτερες, οπότε μπορούν να θεωρηθούν τα στρώματα ανεξάρτητα. Αντίθετα στο Soil_B οι ταχύτητες ακολουθούν μία πιο απότομη κατανομή επομένως πλησιάζει σχεδόν σε κατακόρυφη κατανομή την οποία η μέθοδος αδυνατεί να προσεγγίσει με ακρίβεια.

4.3 Ενδιάμεση στρώση χαμηλότερης V_s

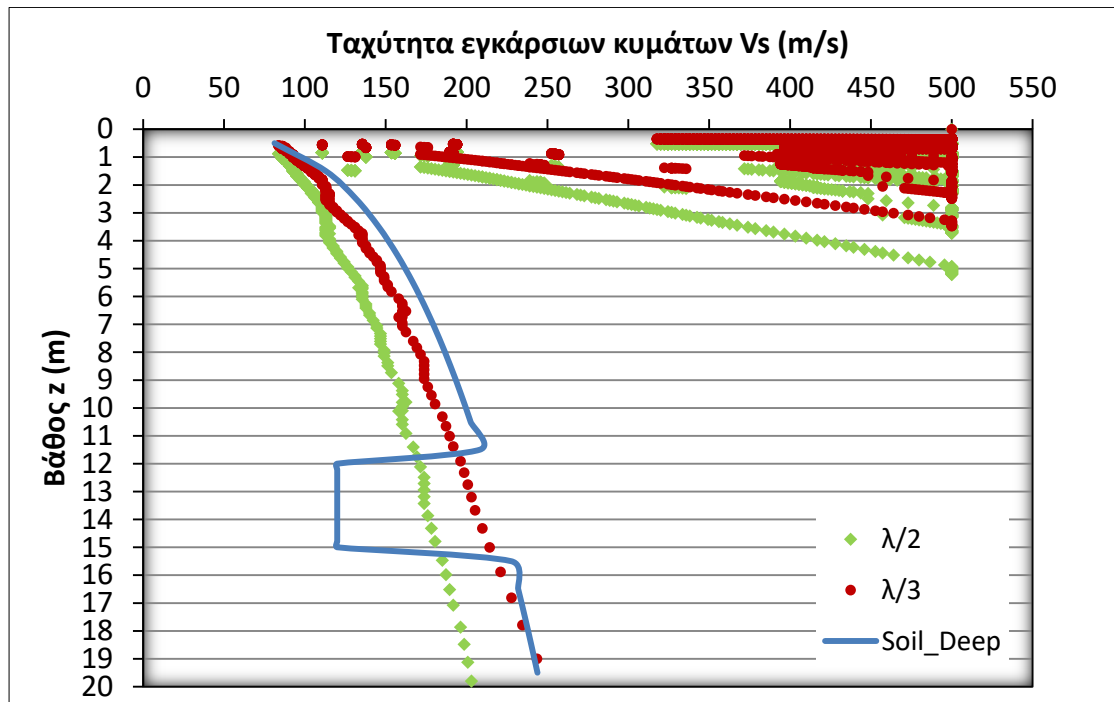
Στις αναλύσεις που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους τα εξετάστηκαν εδαφικοί σχηματισμοί των οποίων οι ταχύτητες διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων μεταβάλλεται μονοτονικά με το βάθος (είτε αυξάνονται είτε μειώνονται). Γενικά ισχύει ότι η μέθοδος πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων (M.A.S.W.) καταλήγει σε εκτιμήσεις εδαφικών προφίλ των οποίων η ακαμψία, συνεπώς και η ταχύτητα V_s μεταβάλλεται μονοτονικά με το βάθος. Επομένως η μέθοδος θεωρητικά αδυνατεί να προσεγγίσει εδαφικά προφίλ στα οποία εμφανίζονται διακυμάνσεις στη τιμή της ταχύτητας V_s (συνεπώς και της ακαμψίας) μεταξύ των στρωμάτων. Για τον έλεγχο της παραπάνω πρότασης γίνονται δοκιμές σε εδαφικούς σχηματισμούς που σε κάποιο βάθος τους εμφανίζεται ένα “ασθενές” στρώμα. Αρχικά εξετάζεται το Soil_1 θεωρώντας ότι υπάρχει ασθενές στρώμα σε σχετικά επιφανειακό βάθος και κατόπιν βαθύτερα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε εδαφικά προφίλ 5 ή 6 στρώσεων των με ασθενή στρώματα σε διάφορα βάθη το πάχος των οποίων κυμαίνεται από 2 έως και 5 μέτρα.

4.3.1 Εδαφικός σχηματισμός Soil 1 με ενδιάμεση στρώση

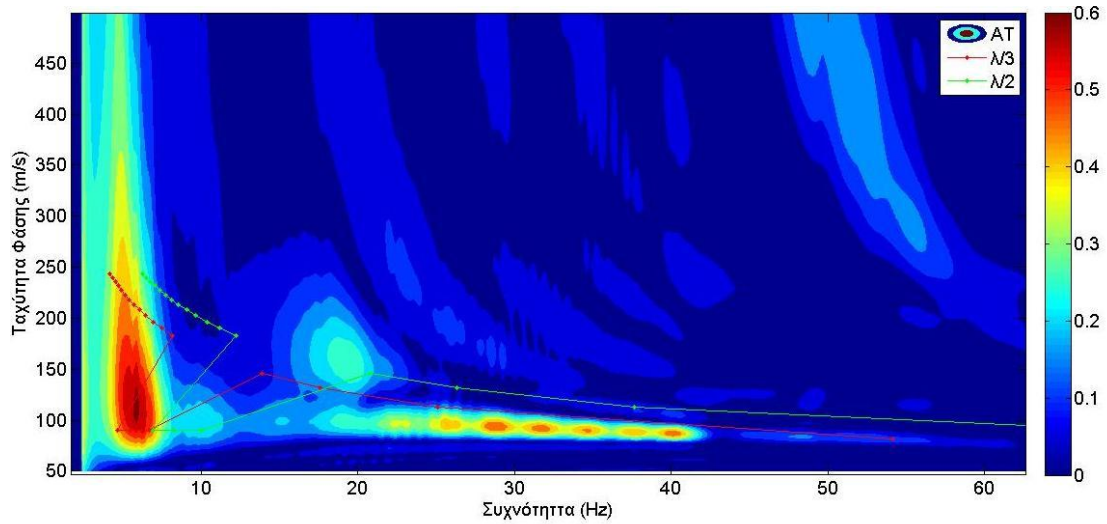
Για το έδαφος Soil_1 πραγματοποιήθηκαν δύο αναλύσεις. Στην πρώτη ανάλυση θεωρήθηκε πως η ενδιάμεση στρώση 3 μέτρων εμφανίζεται σε μεγάλο βάθος (12-15m) και η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων V_s ισούται με 120m/s (Soil_deep). Η δεύτερη ανάλυση αφορά μία ρηχή ενδιάμεση στρώση ταχύτητας $V_s=90$ m/s (Soil_surface, βάθος 4-7m). Οι καμπύλες διασποράς και τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών που ακολουθούν στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν για φόρτιση ημιτόνου δεσπόζουσας συχνότητας 1Hz, χρονικής διάρκειας 8,196 sec (8 κύκλοι φόρτισης) και για εδαφική απόσβεση ίση με 0,5%.



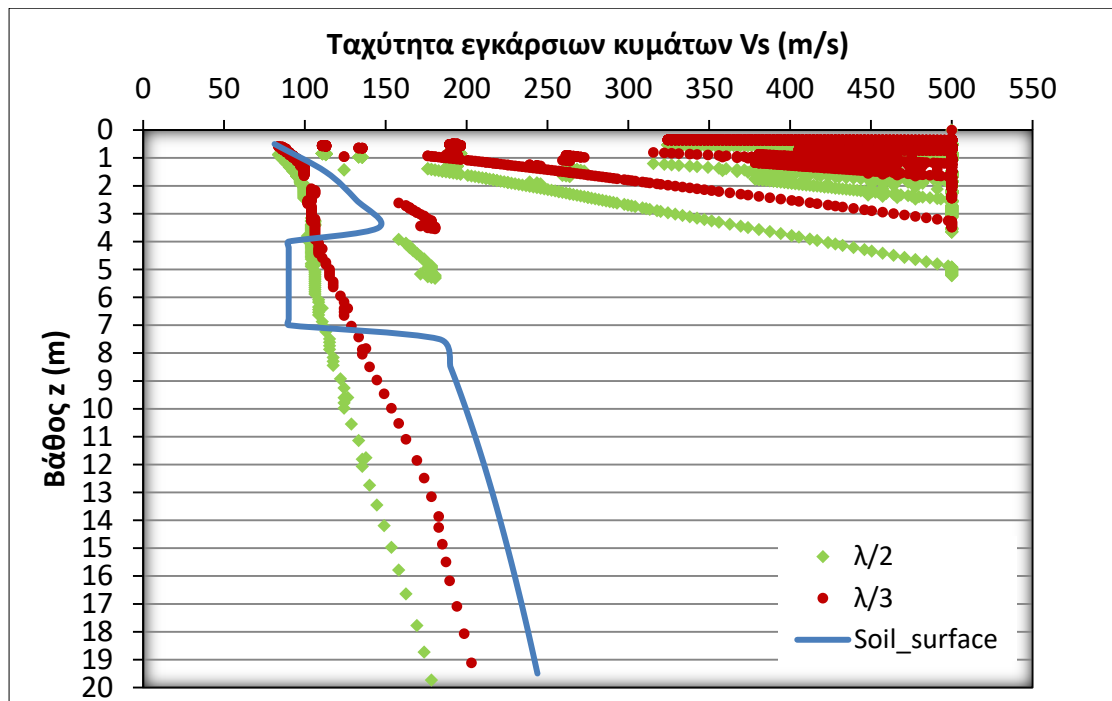
Σχήμα 4.48: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς του Soil_deep.



Σχήμα 4.49: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το soil_deep και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$).



Σχήμα 4.50: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς του Soil_surface. Διακρίνεται μία ασυνέχεια της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς στη περιοχή που αντιστοιχεί στη "ασθενή" στρώση.



Σχήμα 4.51: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το soil_surface και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$).

Είναι προφανές από τα σχήματα 4.49 και 4.51 ότι η μέθοδος M.A.S.W. αδυνατεί να εντοπίσει ενδιάμεσα στρώματα χαμηλότερης ταχύτητας V_s . Συγκεκριμένα στη πρώτη περίπτωση για ενδιάμεσο στρώμα σε βάθος 12-15m (Soil_Deep) η εκτίμηση για $\lambda/3$ δεν αντιλαμβάνεται καν το “ασθενές” στρώμα αλλά προσεγγίζει με σχετικά μικρή απόκλιση το εδαφικό προφίλ Soil_1. Πρόκειται για μία σημαντική αδυναμία της μεθόδου καθώς σε περίπτωση που εμφανίζονται τέτοιου τύπου ασθενή στρώματα η μέθοδος παράγει μία τομή του υπεδάφους χωρίς να φαίνεται πουθενά η ανωμαλία αυτή και ούτε γίνεται σημαντική υποεκτίμηση των ταχυτήτων στο βάθος αυτό ώστε να υπάρχει δυνατότητα εντοπισμού του ασθενούς στρώματος.

Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και για το επιφανειακό “ασθενές” στρώμα (Soil_surface) με τη μόνη διαφορά ότι η υποεκτίμηση της ταχύτητας είναι αισθητή. Σε κάθε περίπτωση η αναγνώριση του “ασθενούς” στρώματος και του βάθους στο οποίο εντοπίζεται είναι κάτι που δεν καλύπτεται από τη μέθοδο M.A.S.W. Ωστόσο στη θεμελιώδη καμπύλη διασποράς εντοπίζεται μία μικρή ασυνέχεια η οποία μπορεί να προϋδεάσει για την ύπαρξη ενός τέτοιου στρώματος χωρίς να υπάρχει όμως η δυνατότητα προσδιορισμού του βάθους στο οποίο βρίσκεται.

4.3.2 Εδαφικοί σχηματισμοί 5-6 στρώσεων με ενδιάμεση στρώση

Παράλληλα με τις αναλύσεις των ενδιάμεσων στρωμάτων που εμφανίζονται στο Soil_1, προς επιβεβαίωση όσων προέκυψαν και για περεταίρω διερεύνηση, εξετάζονται διάφορα εδαφικά προφίλ με ενδιάμεσα “ασθενή” στρώματα σε διάφορα βάθη. Τα εξεταζόμενα προφίλ φαίνονται στον Πίνακα 4.2, στον οποίο αναγράφονται και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες. Συγκεκριμένα εξετάζονται 2 εδαφικά προφίλ 6 στρώσεων με ενδιάμεσα στρώματα 2 μέτρων κοντά στην επιφάνεια (Soil_6) και σε μεγαλύτερο βάθος (Soil_7) και κατόπιν δύο εδαφικοί σχηματισμοί 5 στρωμάτων στους οποίους το ενδιάμεσο στρώμα είναι μεγαλύτερου πάχους (5m). Οι εδαφική απόσβεση για όλους τα εδάφη είναι ίση με 0,5%, ως φόρτιση επιλέχθηκε ημίτονο συχνότητας 1 Hz και διάρκειας 8,192 sec σε διάταξη με 9 κανάλια καταγραφής.

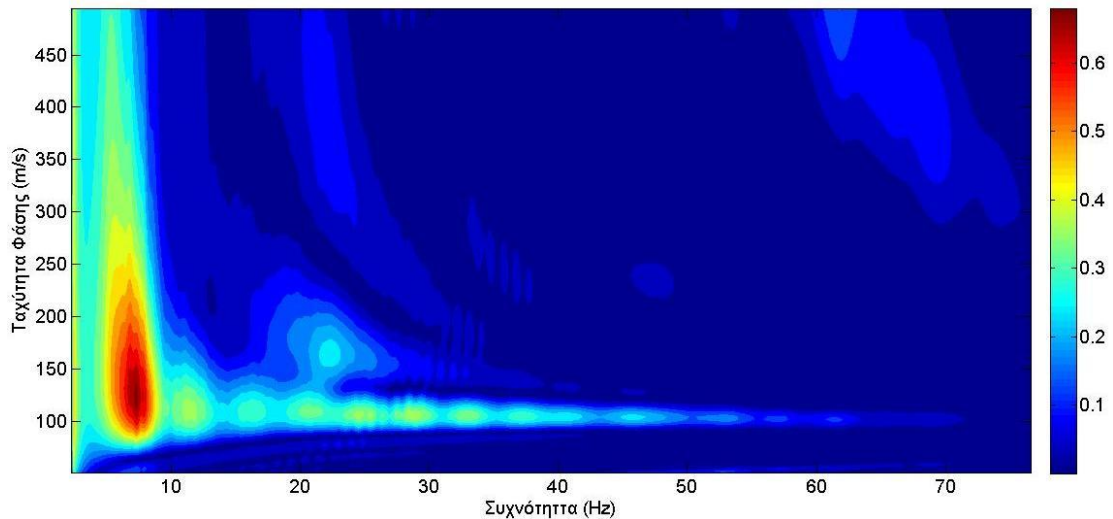
z(m)		Vs
top	bottom	
0	-2	110
-2	-4	140
-4	-6	100
-6	-9	180
-9	-14	210
-14	-20	250

z(m)		Vs
top	bottom	
0	-2	110
-2	-4	140
-4	-8	180
-8	-12	210
-12	-14	150
-14	-20	250

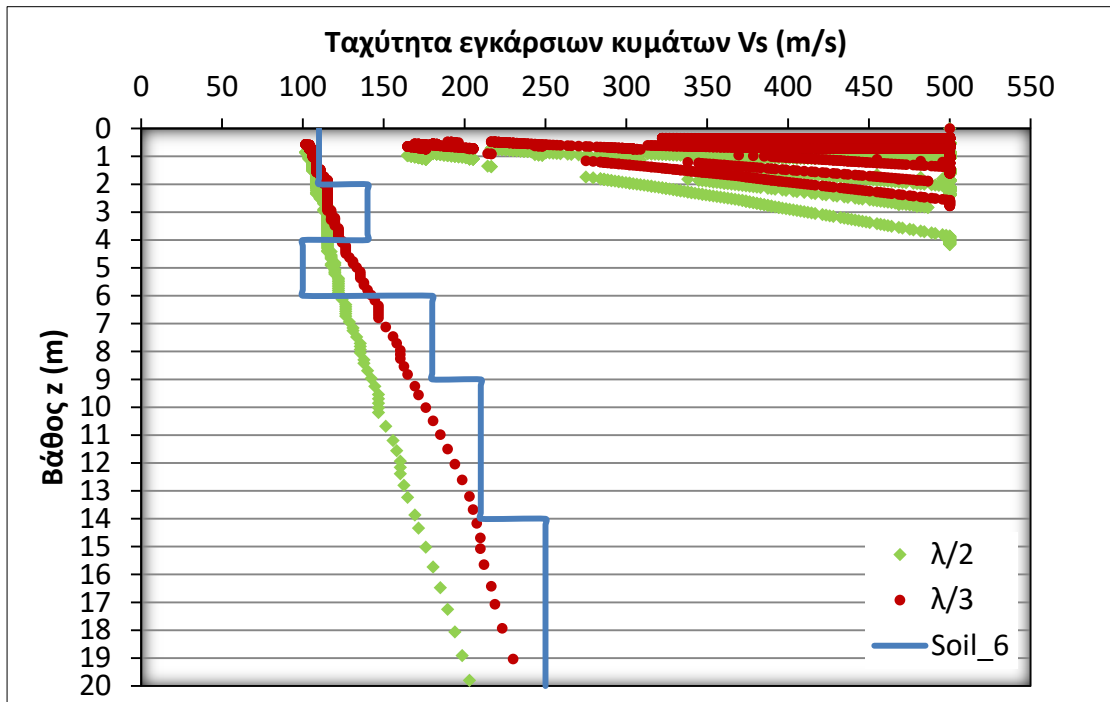
z(m)		Vs
top	bottom	
0	-2	100
-2	-5	150
-5	-10	80
-10	-15	200
-15	-20	250

z(m)		Vs
top	bottom	
0	-2	100
-2	-5	150
-5	-10	200
-10	-15	80
-15	-20	250

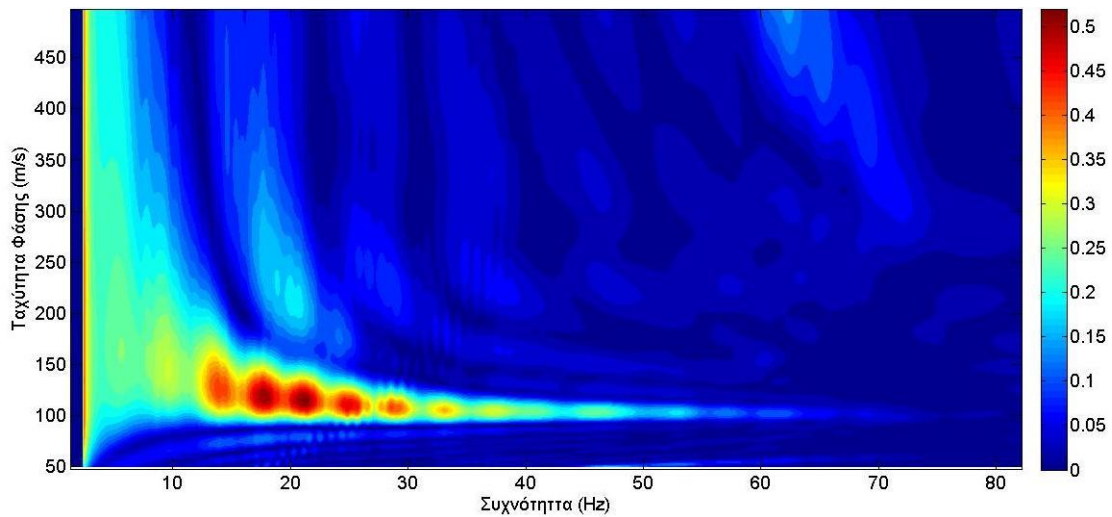
Πίνακας 4.2: Κατανομή της εγκάρσιας ταχύτητας V_s με το βάθος για τα εδαφικά προφίλ με τις ενδιάμεσες “ασθενείς” στρώσεις. Στην παρένθεση δίνονται και οι ιδιοσυχνότητες του κάθε εδάφους.



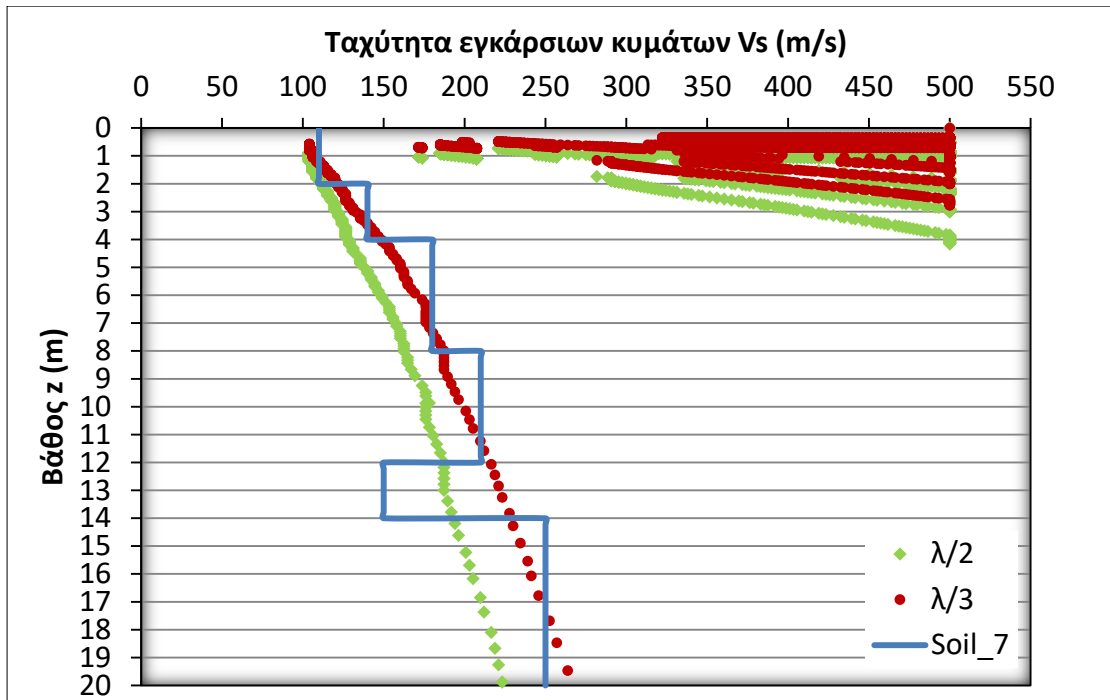
Σχήμα 4.52: Ισοψείς καμπυλών διασποράς για το εδαφικό προφίλ Soil_6.



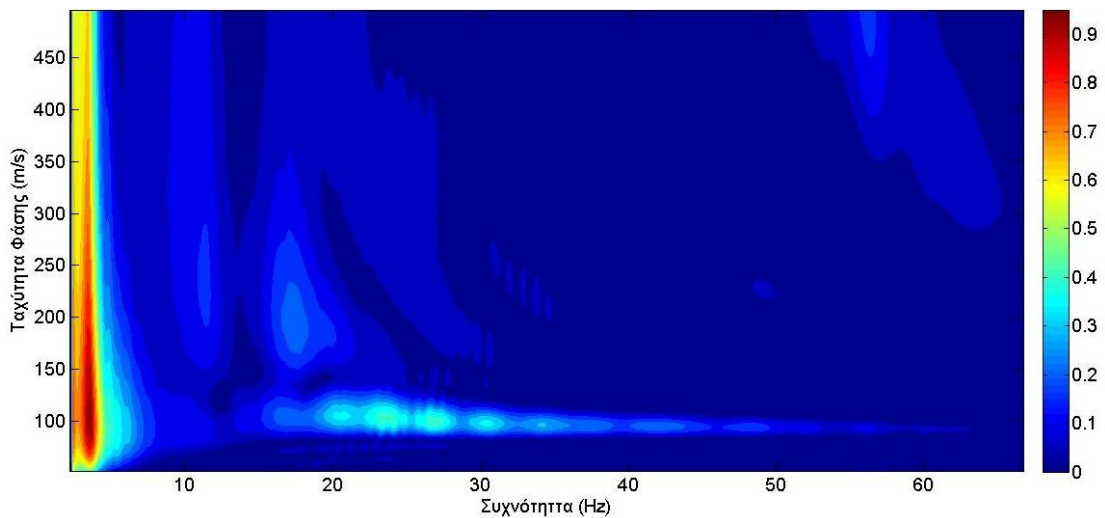
Σχήμα 4.53: Κατανομές ταχύτητας V_s με το βάθος για το soil_6 και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$). Παρατηρείται η ομοιότητα με το Soil_surface στα αποτελέσματα της ανάλυσης.



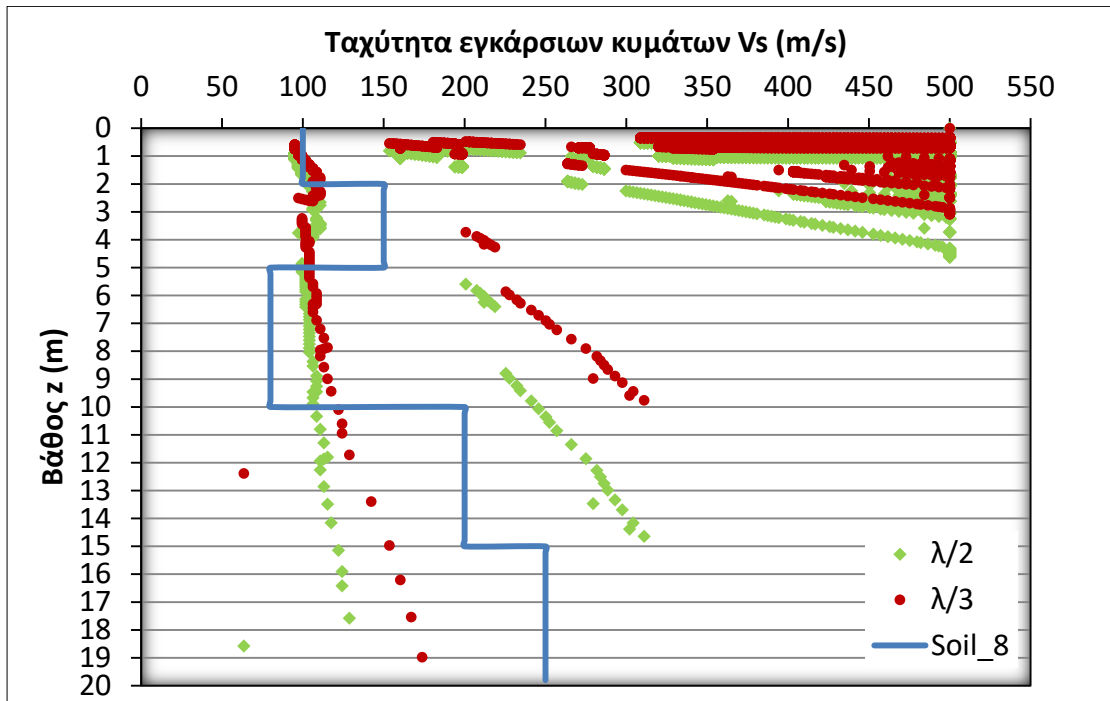
Σχήμα 4.54: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για το εδαφικό προφίλ Soil_7.



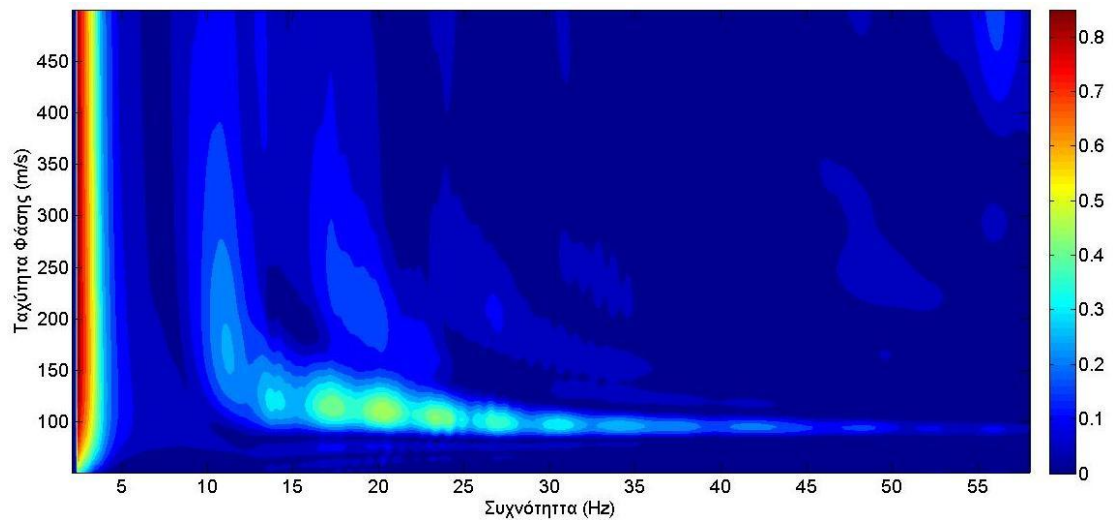
Σχήμα 4.55: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το soil_7 και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$). Παρατηρείται η ομοιότητα με το Soil_deer στα αποτελέσματα της ανάλυσης καθώς φαίνεται πως η ενδιάμεση στρώση δεν εντοπίζεται.



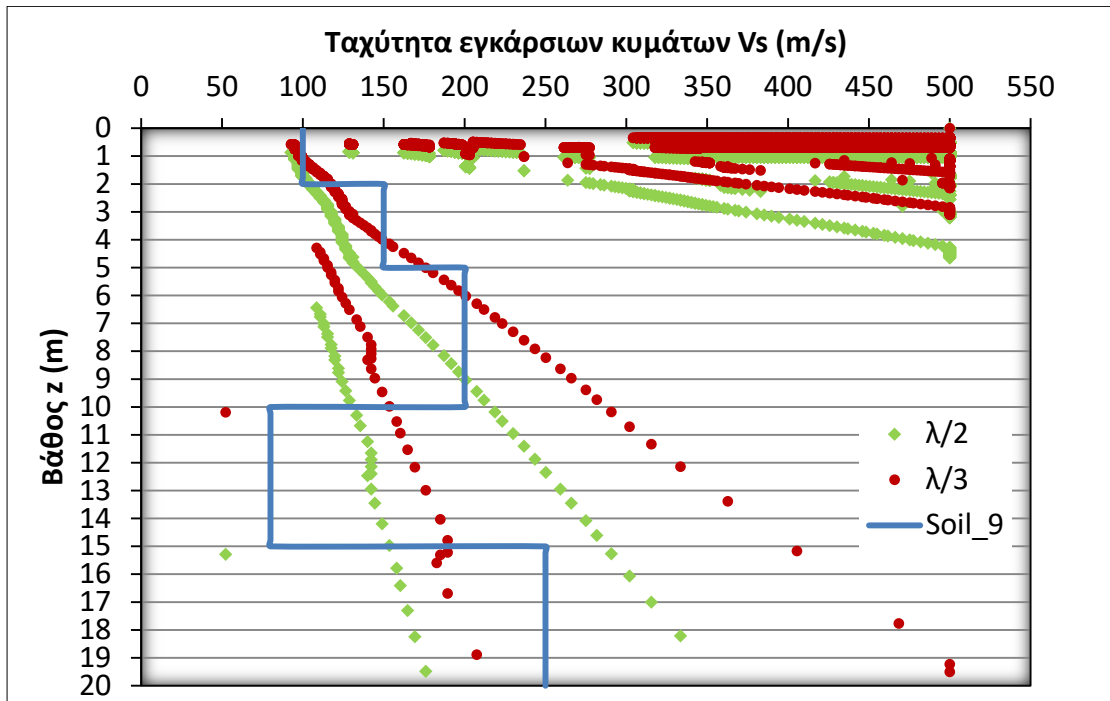
Σχήμα 4.56: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για το εδαφικό προφίλ Soil_8. Διακρίνεται μία ασυνέχεια στη θεμελιώδη καμπύλη διασποράς ($M0$) η οποία προκύπτει από το πάχος του “ασθενούς” στρώματος.



Σχήμα 4.57: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το soil_8 και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$). Η ασυνέχεια που διακρίνεται στην αντίστοιχη θεμελιώδη καμπύλη διασποράς φαίνεται και στην εκτίμηση των ταχυτήτων Vs καθώς οι εκτιμήσεις διαχωρίζονται στα δύο.



Σχήμα 4.58: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για το εδαφικό προφίλ Soil_9. Διακρίνεται μία ασυνέχεια στη θεμελιώδη καμπύλη διασποράς ($M0$) η οποία προκύπτει από το πάχος του "ασθενούς" στρώματος.



Σχήμα 4.59: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για το soil_9 και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$).

Από τα εδαφικά προφίλ των 6 στρώσεων στα οποία η ενδιάμεση στρώση είναι ίση με 2 μέτρα επιβεβαιώνονται οι παρατηρήσεις που προέκυψαν στην §4.3.1, καθώς η θέση και το πάχος των ενδιάμεσων στρωμάτων είναι παρεμφερή. Επίσης γίνεται αντιληπτή και πάλι η αδυναμία της μεθόδου να προσομοιώσει εδαφικά προφίλ που αποτελούνται από στρώσεις μέτριου πάχους (έως λίγα μέτρα π.χ. 3-4 m) όπως φάνηκε και στη §4.1.4.

Από την άλλη μεριά αυξάνοντας πάχος του ενδιάμεσου στρώματος σε 5 μέτρα εντοπίζεται μία ασυνέχεια στη καμπύλη διασποράς (M0) τόσο στη περίπτωση όπου το ασθενές στρώμα βρίσκεται σε μεγάλο βάθος (σχήμα 4.54) όσο και όταν εντοπίζεται πλησιέστερα στην επιφάνεια (σχήμα 4.56). Κάτι αντίστοιχο εντοπίζεται και στα διαγράμματα που απεικονίζουν τις εκτιμήσεις των κατανομών της ταχύτητας V_s (σχήμα 4.55 και 4.56) καθώς η ασυνέχεια που εντοπίστηκε στις καμπύλες διασποράς φαίνεται στο γεγονός ότι η εκτιμώμενη κατανομή της ταχύτητας διαχωρίζεται σε δύο ανεξάρτητες καμπύλες. Επομένως προκύπτει το συμπέρασμα πως σε περιπτώσεις που εμφανίζονται τέτοιου τύπου ασυνέχειες η μέθοδος προϋποθέτει για ύπαρξη "ασθενούς" ενδιάμεσου στρώματος. Ωστόσο κάτι

τέτοιο παρατηρείται μόνο σε ενδιάμεσα στρώματα αρκετά μεγάλου πάχους (περί των 5 μέτρων) επομένως η παρατήρηση αυτή δε μπορεί να αποτελέσει οδηγό για τον εντοπισμό περιπτώσεων ύπαρξης ενδιάμεσων ασθενών στρώσεων.

4.4 Εφαρμογή σε πρόβλημα 2 διαστάσεων

Κατά την μαθηματική επεξεργασία (§2.2.2 Ανάλυση διασποράς) των καταγραφών που προκύπτουν από την εκτέλεση της μεθόδου M.A.S.W. γίνεται σαφές πως η εκτίμηση που προκύπτει για τη τομή του υπεδάφους είναι μονοδιάστατη, καθώς οι θέσεις των καναλιών καταγραφής προβάλλονται σε ένα σημείο, αυτό της θέσης της πηγής. Στις εφαρμογές που προηγήθηκαν για τα εδάφη που εξετάστηκαν θεωρήθηκε πως η στρωματογραφία τους δε μεταβάλλεται κατά την οριζόντια διεύθυνση, επομένως η θέση της πηγής και των καναλιών καταγραφής δεν επηρεάζει την τελική εκτίμηση καθώς το υπόβαθρο είναι παντού το ίδιο.

Σε αυτήν την παράγραφο εξετάζεται μία εφαρμογή που δεν ακολουθεί όσα προηγήθηκαν, δηλαδή ένα εδαφικό σχηματισμό που η στρωματογραφία του μεταβάλλεται κατά τον άξονα x . Σε αυτή την περίπτωση η εκτίμηση της κατανομής της ταχύτητας V_s στις 2 διαστάσεις προσεγγίζεται με την κύλιση (roll along) της διάταξης πηγής-καναλιών καταγραφής κατά μήκος μίας οριζόντιας γραμμής και καταγραφή της κάθε μέτρησης ξεχωριστά. Έτσι για κάθε καταγραφή ακολουθεί ανεξάρτητη επεξεργασία και η εκτίμηση της κατακόρυφης κατανομής της V_s που προκύπτει κάθε φορά αντιστοιχεί στο κέντρο διάταξης των καναλιών καταγραφής. Παρεμβάλλοντας τις τομές των κατανομών της V_s που προέκυψαν κατασκευάζεται μία ψευδοτομή της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων σε δύο διαστάσεις.

Στη συνέχεια εξετάζεται το εδαφικό προφίλ φαίνεται στο σχήμα 4.60 (διαστάσεων 120m x 30m) που προσομοιώνει μία κοιλάδα που βρίσκεται σε ένα βραχώδες υπόβαθρο. Η προσομοίωση του εδάφους έγινε στα πρότυπα που

ακολουθήθηκαν σε όλες τις προηγούμενες αναλύσεις και περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3. Η κατανομή της ταχύτητας V_s του εδαφικού σχηματισμού (Soil_2) που επιλέχθηκε δίνεται στη σχέση 4.3 ενώ για την προσομοίωση του το βραχώδους υπόβαθρου επιλέγεται $V_s=1800\text{m/s}$. Το έδαφος προσομοιώνεται σε στρώσεις του ενός μέτρου ενιαίας ταχύτητας V_s η οποία αντιστοιχεί στο μέσον του κάθε στρώματος.

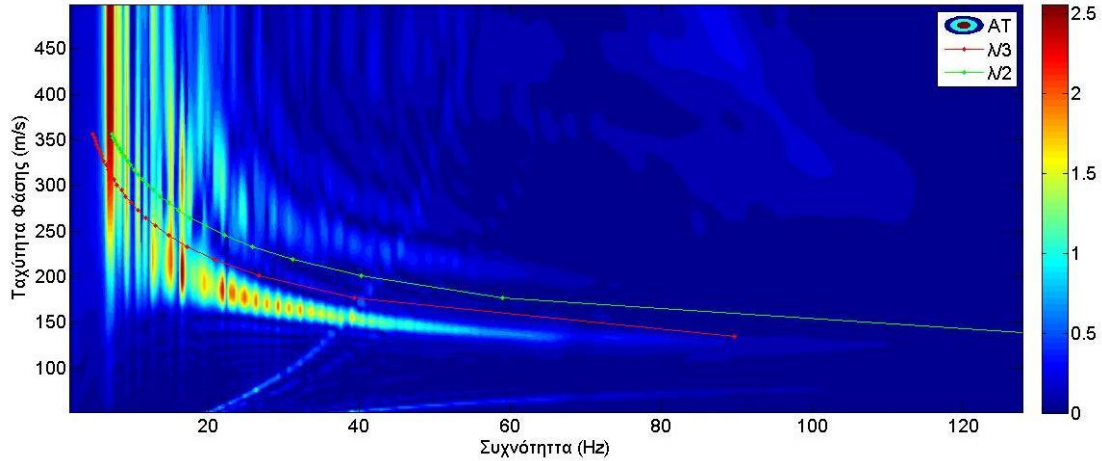
$$\text{Soil_2: } V_s = 160z^{0.25} \text{ (m/s)} \quad (4.3)$$



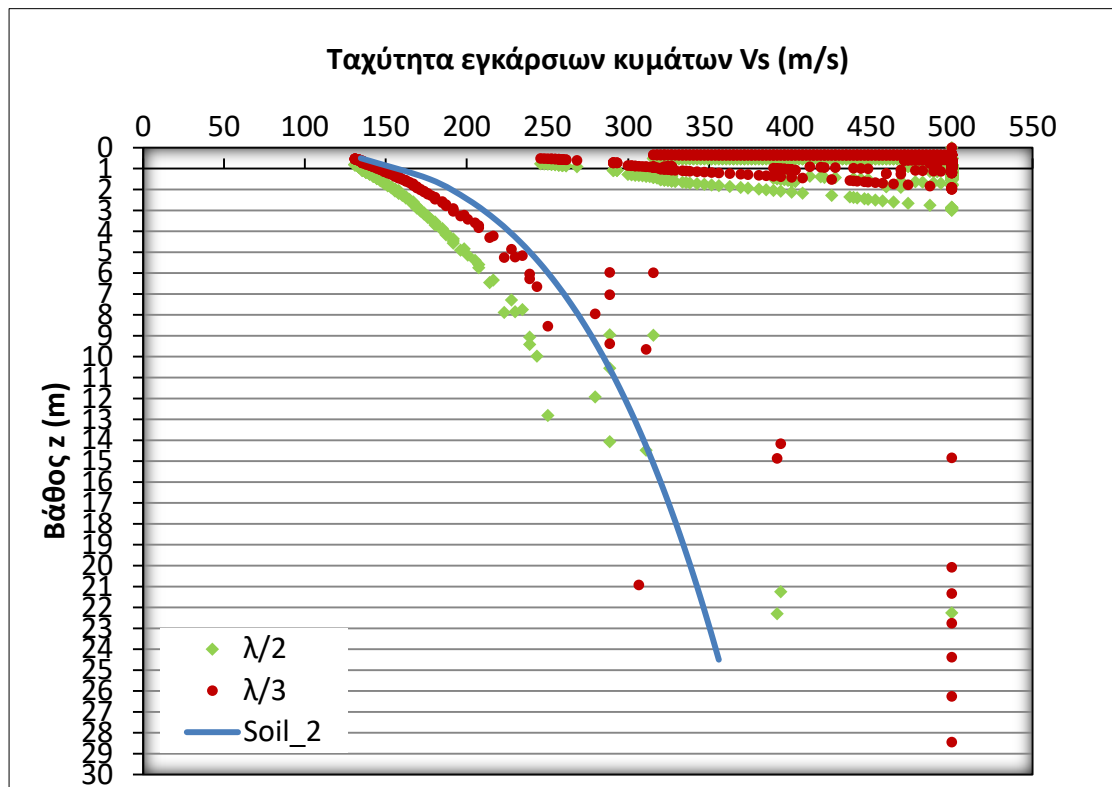
Σχήμα 4.60: Απεικόνιση του εδαφικού μοντέλου και της διάταξης του εξοπλισμού στο πρόγραμμα π.σ. PLAXIS.

Για να μελετηθεί πλήρως ένα τέτοιο πρόβλημα με τη μέθοδο roll along απαιτούνται συνεχείς και επαναλαμβανόμενες δοκιμές, ο όγκος δεδομένων και η χρονική διάρκεια των οποίων αποτελούν εμπόδιο για την παρουσίαση μίας τέτοιας διαδικασίας στα πλαίσια μίας διπλωματικής εργασίας. Ωστόσο γίνονται τρεις δοκιμές για διαφορετικές θέσεις της διάταξης πηγής - καναλιών καταγραφής που αντιστοιχούν σε διαφορετικά βάθη διασκόπησης. Έτσι στη πρώτη δοκιμή η πηγή τοποθετείται στα 54m με 24 κανάλια καταγραφής με μεταξύ τους απόστασή 2m, οπότε το βάθος που αντιστοιχεί στο μέσο του αναπτύγματος προκύπτει $z_{(1)} = 15\text{m}$. Ακολουθεί μία δοκιμή όπου το αντίστοιχο βάθος διασκόπησης αντιστοιχεί στο μέγιστο βάθος της κοιλάδας ($z_{(2)} = 25\text{m}$) και η θέση της πηγής στα 35m, με 24 κανάλια καταγραφής ανά 2m επίσης. Τέλος μία πιο ρηχή διασκόπηση στα $z_{(3)} = 11\text{m}$ με 24 κανάλια καταγραφής ανά 1m και με την πηγή να τοποθετείται στα 18m. Όλες

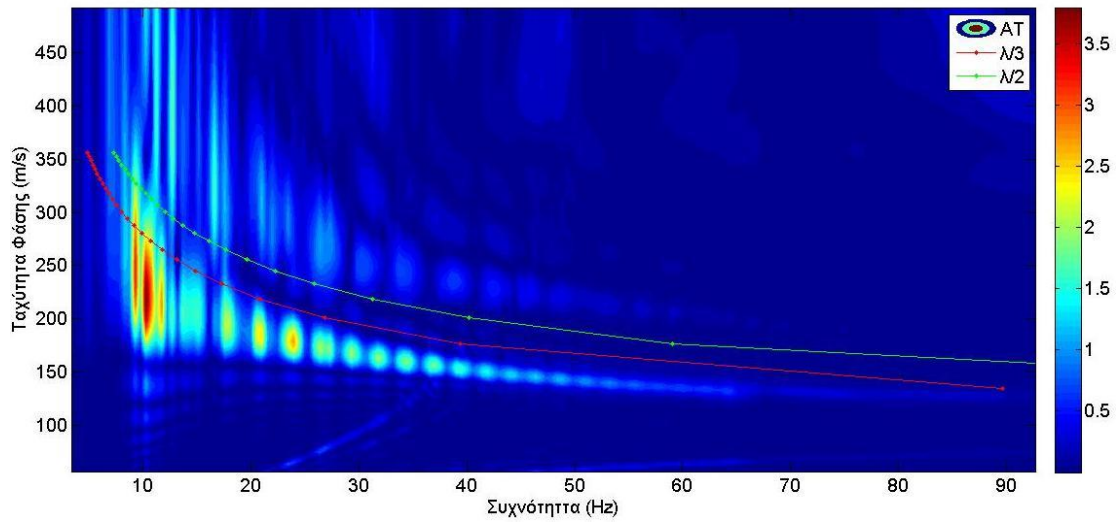
οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για φόρτιση ημιτόνου δεσπόζουσας συχνότητας 2Hz και χρονικής διάρκειας 2,048 sec (4 κύκλοι φόρτισης) και εδαφική απόσβεση $\xi=0,5\%$.



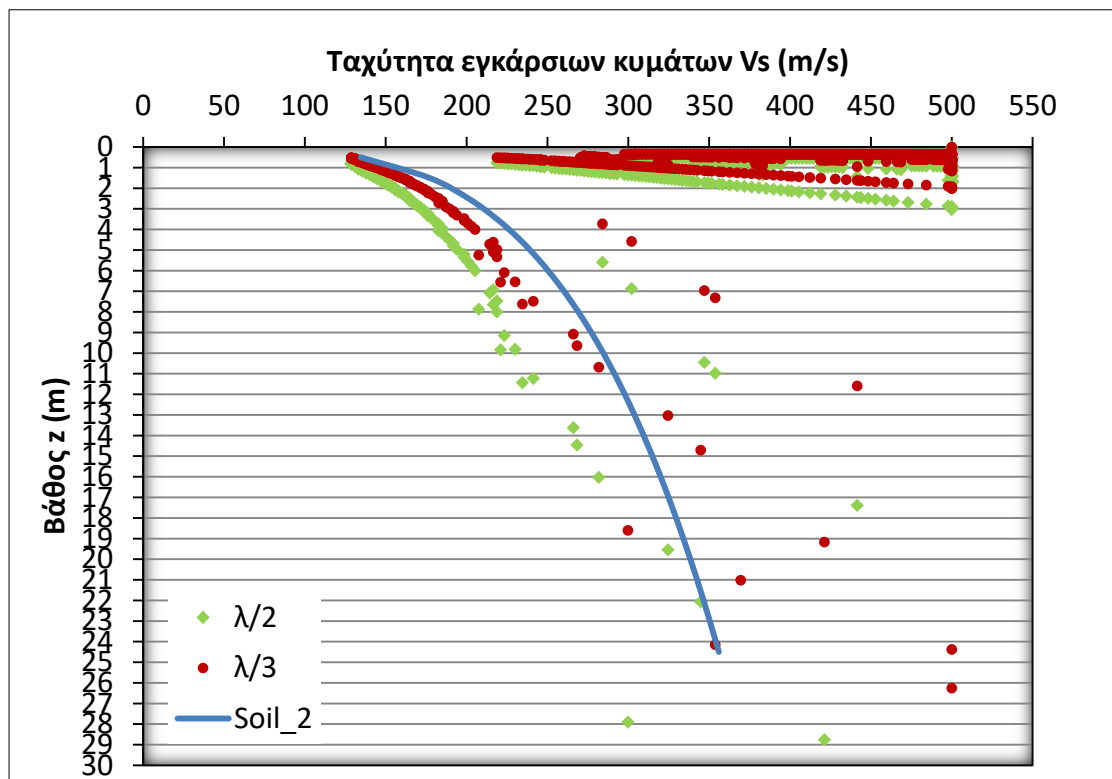
Σχήμα 4.61: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για τη θέση $z_{(1)}=15m$.



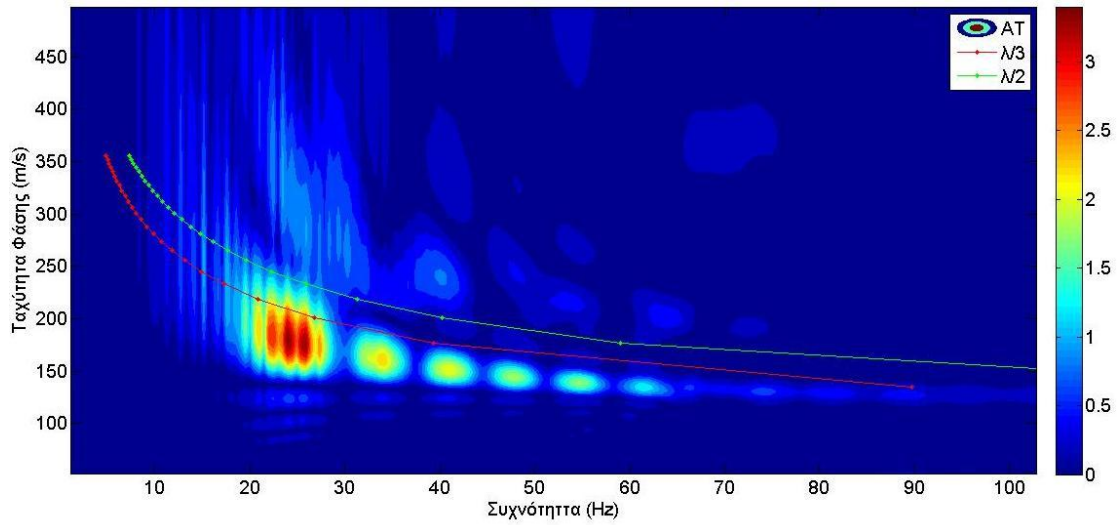
Σχήμα 4.62: Κατανομές ταχύτητας V_s με το βάθος για τη θέση $z_{(1)}=15m$ και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$). Διακρίνονται στα δεξιά τα σημεία όπου εμφανίζεται ο βράχος οπότε η ταχύτητα V_s παίρνει την μέγιστη τιμή της.



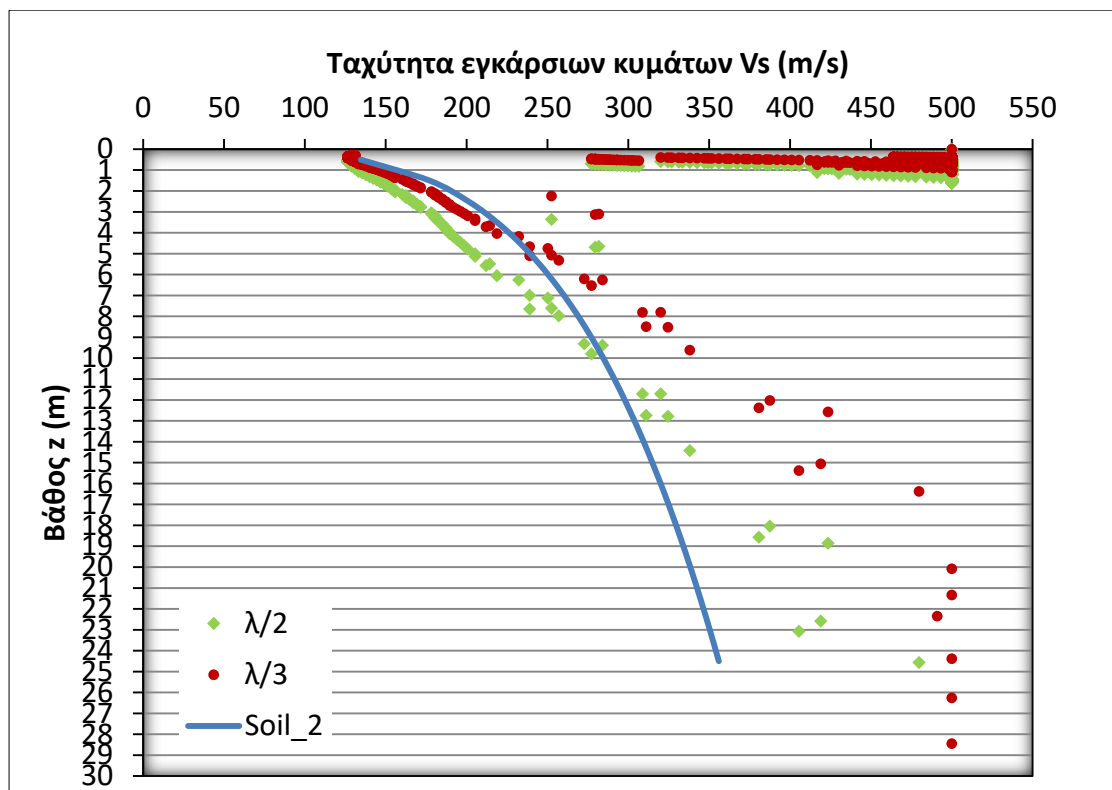
Σχήμα 4.63: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για τη θέση $z_{(2)}=25m$. Αντιστοιχεί στο μέσον του εδαφικού σχηματισμού.



Σχήμα 4.64: Κατανομές ταχύτητας V_s με το βάθος για τη θέση $z_{(2)}=25m$ και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$). Μετά τα 12 μέτρα οι εκτιμήσεις αραιώνουν γεγονός που οφείλεται στου κύκλους φόρτισης του ημιτόνου (μόλις 4).



Σχήμα 4.65: Ισοϋψείς καμπυλών διασποράς για τη θέση $z_{(2)}=11m$. Η μικρή συγκέντρωση ενέργειας οφείλεται στο μικρό βάθος διασκόπησης.



Σχήμα 4.66: Κατανομές ταχύτητας Vs με το βάθος για τη θέση $z_{(2)}=11m$ και αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ($\lambda/2$ και $\lambda/3$).

Είναι σαφές από τα εδαφικά προφίλ που προκύπτουν και στις 3 περιπτώσεις πως το βάθος διασκόπησης προσεγγίζεται σχετικά καλά από τη μέθοδο. Αν και στα μεγαλύτερα βάθη παρουσιάζεται μια αραιώση των παρατηρήσεων κυρίως στη δοκιμή με βάθος διασκόπησης $z_{(2)} = 25\text{m}$ η οποία επηρεάζει την ευκρίνεια της μεθόδου. Επίσης φαίνεται πως η κατανομή της ταχύτητας V_s για $\lambda/3$ προσεγγίζει καλύτερα το πραγματικό έδαφος στα πρώτα 10 μέτρα ενώ από εκεί και κάτω η κατανομή για $\lambda/2$ λειτουργεί καλύτερα. Τέλος στις καμπύλες διασποράς (σχήμα 4.61, 4.63 και 4.65) η σεισμική ενέργεια δε κατανέμεται επαρκώς σε όλες τις συχνότητες και φαίνεται να παρουσιάζει μικρές ασυνέχειες.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις οφείλονται στο γεγονός πως η φόρτιση που χρησιμοποιήθηκε ήταν χρονικής διάρκειας 2,048 sec με μόλις 4 κύκλους φόρτισης, επομένως δεν επαρκούσε για να διεισδύσει ο παλμός στα βαθύτερα στρώματα επαρκώς. Ακόμα η αραιώση των παρατηρήσεων που διακρίνεται κυρίως στις πρώτες 2 δοκιμές ενδεχομένως οφείλεται στο ανάπτυγμα των καναλιών καταγραφής καθώς έχουν διαταχθεί ανά 2m (D=48m) σε αντίθεση με την Τρίτη δοκιμή που ακολουθήθηκε διάταξη ανά 1m (D=24m) όπου η διασπορά αυτή είναι μικρότερης έκτασης. Επομένως για βελτίωση της ευκρίνειας των εκτιμώμενων κατανομών και μείωση της αραιώσης των παρατηρήσεων απαιτούνται μικρά μήκη αναπτύγματος των καναλιών διασποράς και φόρτιση με ημίτονα όσο το δυνατόν περισσότερων κύκλων φόρτισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα

Η χρήση της μεθόδου πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων Rayleigh πλεονεκτεί έναντι άλλων δοκιμών εκτίμησης των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους καθώς συνδυάζει ταχύτητα και χαμηλό κόστος εφαρμογής με αποτελέσματα υψηλής ευκρίνειας. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που αν και πρόκειται για μία σύγχρονη γεωφυσική μέθοδο προτιμάται ολοένα και περισσότερο στη σύγχρονη γεωτεχνική. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγεται και το γεγονός πως για την χρήση της δεν απαιτείται κάποιου είδους επέμβαση στο έδαφος (π.χ. γεώτρηση) οπότε είναι ιδανική για δοκιμές σε περιορισμένο χώρο (π.χ. αστικό περιβάλλον) ή σε εδάφη έδρασης ήδη κτισμένων κατασκευών, ωστόσο στη πράξη σπανίως συναντάται χωρίς να συνοδεύεται από άλλες δοκιμές πεδίου ή τουλάχιστον δειγματοληπτικές γεωτρήσεις.

Ένας από τους βασικούς στόχους της διπλωματικής εργασίας ήταν να εντοπιστούν οι παράμετροι και οι μηχανισμοί με τους οποίους η μέθοδος M.A.S.W. αποδίδει με τον βέλτιστο τρόπο. Προτού σχολιαστούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις να σημειωθεί πως στις δοκιμές που παρουσιάστηκαν αγνοήθηκε πλήρως η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα καθώς όπως είναι γνωστό τα εγκάρσια κύματα δεν διαδίδονται στο νερό και τα ρευστά. Επομένως η μέτρηση τέτοιων κυμάτων είναι δυνατή σε κάθε είδος εδάφους ή βράχου ανεξάρτητα από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση της κατανομής της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων βασίστηκε στη παρατήρηση ότι η κάθε ταχύτητα φάσης, αντιστοίχως και η ταχύτητα V_s περιγράφει τις εδαφικές ιδιότητες που αντιστοιχούν σε βάθος (z) που κυμαίνεται από $\lambda_R/3$ (Gazetas, 1991) έως $\lambda_R/2$ (Richard et al., 1970). Όπως προκύπτει από το σύνολο των αναλύσεων η εκτίμηση του βάθους ως $\lambda_R/3$ προσεγγίζει την πραγματική κατανομή με μεγαλύτερη ακρίβεια από το $\lambda_R/2$. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται τόσο από την εικόνα των εκτιμώμενων κατανομών όσο και από τις καμπύλες διασποράς όπου η αποτύπωση του εδάφους για $\lambda_R/3$ πλησιάζει περισσότερο την θεμελιώδη καμπύλη διασποράς (M0). Επίσης στις εκτιμήσεις που προκύπτουν λαμβάνεται υπόψη ένα ποσοστό απόκλισης από τη μέγιστη τιμή της σεισμικής ενέργειας της τάξης του 5% καθώς για κάθε συχνότητα η μέγιστη τιμή του πλάτους που της αντιστοιχεί ενδέχεται να επηρεάζεται από γειτονικά τοπικά μέγιστα.

Εξαίρεση σε αυτές τις παρατηρήσεις αποτελούν τα ανάστροφα προφίλ (ταχύτητα που μειώνεται μονοτονικά με το βάθος) καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις οι δύο υποθέσεις για το εκτιμώμενο βάθος ($\lambda_R/2$ και $\lambda_R/3$) παρουσιάζουν την ίδια περίπου απόκλιση από την πραγματική κατανομή, ενώ σε περιπτώσεις που η κατανομή των ταχυτήτων γίνεται απότομη, η εκτίμηση του βάθους ως $\lambda_R/2$ κρίνεται καταλληλότερη. Επιπλέον το κριτήριο του 95% δεν ισχύει στις περιπτώσεις των ανάστροφων προφίλ καθώς η εικόνα των εκτιμήσεων που προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψη αυτό, παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις εάν ληφθεί υπόψη.

Όσον αφορά το φορτίο της σεισμικής πηγής προκύπτει πως η επιλογή ενός ημιτόνου δεσπόζουσας συχνότητας χαμηλότερης της ιδιοσυχνότητας του εδάφους οδηγεί στην βελτίωση των αποτελεσμάτων στο σύνολο των περιπτώσεων, κυρίως στα επιφανειακά στρώματα καθώς εξασφαλίζεται έτσι η εξάλειψη επιφανειακών κυμάτων Love που δημιουργούν μία επιφανειακή ζώνη παρασιτικών συχνοτήτων που επηρεάζουν την ευκρίνεια των εκτιμήσεων για μικρά βάθη. Σημαντικός παράγοντας του ημιτονικού παλμού φόρτισης είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης, ο οποίος όσο αυξάνεται βελτιώνεται η απόδοση της μεθόδου. Ωστόσο η αύξηση του κύκλου των φορτίσεων συνεπάγεται και χρήση μεγαλύτερου όγκου δεδομένων γεγονός που αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα.

Είναι σαφές πως οι τομές του υπεδάφους που παράγονται είναι μονοδιάστατες, οπότε οι πληροφορίες που παρέχονται είναι περιορισμένες. Για την κατάρτιση δισδιάστατων ψευδοτομών απαιτούνται συνεχείς μετρήσεις για διάφορες θέσεις της διάταξης πηγής-κανάλια καταγραφής (roll along) των οποίων η συμβολή οδηγεί στην ζητούμενη ψευδοτομή. Σε τέτοιες περιπτώσεις προτείνεται η επιλογή ημιτονικού παλμού με περισσότερους από 8 κύκλους φόρτισης και σχετικά πυκνές διατάξεις καναλιών καταγραφής (αναπτύγματα μικρού μήκους).

Το μειονέκτημα της μεθόδου M.A.S.W. είναι πως αδυνατεί να εκτιμήσει εδαφικά προφίλ των οποίων οι μηχανικές ιδιότητες δε μεταβάλλονται μονοτονικά με το βάθος. Συγκεκριμένα σε εδάφη όπου εντοπίζονται ενδιάμεσες στρώσεις χαμηλότερης ταχύτητας διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων από τις υπερκείμενες, επομένως και ακαμψίας (μαλακό στρώμα), η μέθοδος αδυνατεί να τις εντοπίσει, ειδικότερα όταν πρόκειται για “ασθενές” στρώμα μικρού πάχους (2-3m). Σε αυτές τις περιπτώσεις δεν υπάρχουν ενδείξεις ύπαρξης τέτοιου στρώματος καθώς η μέθοδος καταλήγει σε μία εκτίμηση μονοτονικής κατανομής της ταχύτητας V_s , παρά μόνο κάποιες ασυνέχειες στη θεμελιώδη καμπύλη διασποράς οι οποίες ωστόσο είναι δυσδιάκριτες και δε μπορούν αν αποτελέσουν κριτήριο ύπαρξης ενός μαλακού στρώματος. Δεν ισχύει το ίδιο σε περιπτώσεις όπου η εδαφική αυτή στρώση είναι μεγαλύτερου πάχους. Τότε παρουσιάζονται χαρακτηριστικές ασυνέχειες στην καμπύλη διασποράς $M0$, οι οποίες επιβεβαιώνονται και στην εκτίμηση του εδαφικού προφίλ καθώς η κατανομή που προκύπτει διαχωρίζεται σε περισσότερες από μία.

Μία ακόμα παρατήρηση για τις παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοση της μεθόδου έχει να κάνει με το εύρος της εδαφικής απόσβεσης. Από τις δοκιμές προκύπτει πως η τιμή της εδαφικής απόσβεσης δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα των αναλύσεων, χωρίς αυτό να σημαίνει πως μπορεί να αγνοηθεί καθώς αποδεικνύεται πως απορροφά τις παρασιτικές συχνότητες και τους μικροθορύβους με αποτέλεσμα οι καταγραφές των επιφανειακών κυμάτων να είναι επαρκείς. Ακόμα η αριθμός των καναλιών καταγραφής δεν οδηγεί πάντα σε βελτίωση της μεθόδου, καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις η αύξηση του αναπτύγματος των και του αριθμού των καναλιών από 9 σε 24 οδήγησε σε εκτιμήσεις που παρουσίαζαν

μεγαλύτερες αποκλίσεις από το πραγματικό έδαφος συγκριτικά με τις αντίστοιχες των 9 καναλιών καταγραφής.

Στην πράξη αυτής της μορφής τα εδάφη προσεγγίζονται από τη μέθοδο M.A.S.W. χρησιμοποιώντας αποτελέσματα άλλων δοκιμών, προσαρμόζοντας τις καμπύλες διασποράς σε αυτά και επαναλαμβάνοντας την διαδικασία των μετρήσεων με διάφορες τεχνικές (αντιστροφή καμπυλών διασποράς-inversion) και επανεκτιμώντας την κατανομή της ταχύτητας V_s . Επίσης τα τελευταία χρόνια εκτός από τη θεμελιώδη καμπύλη διασποράς (M0) λαμβάνονται υπόψη και οι καμπύλες ανώτερης τάξης.

Συνοψίζοντας η μέθοδος M.A.S.W. είναι μία σύγχρονη μέθοδος που εξελίσσεται συνεχώς και αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο στα χέρια του γεωτεχνικού μηχανικού για την εκτίμηση τομών του υπεδάφους μέσω του προσδιορισμού της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων V_s .

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Γκαζέτας Γ. (2007). Στοιχεία εδαφοδυναμικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα

Καββαδάς Ι.Μ. (2009). Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Εκδόσεις Συμεών. Αθήνα

Καββαδάς Ι.Μ. (2013). Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής, Εκδόσεις Τσότρας. Αθήνα

Κυριαζής Δ. Πιτιλάκης (2010). Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική. Εκδόσεις Ζήτη. Θεσσαλονίκη

Κρητικάκης Σ.Γ. (2001). Εκτίμηση της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων και των δυναμικών μηχανικών παραμέτρων από καταγραφές επιφανειακών κυμάτων Rayleigh. Μεταπτυχιακή εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης

Κρητικάκης Σ. Γ. , Βαφείδης Α. , Gourry J. C. (2004). Ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και εφαρμογή σε χώρο απόθεσης απορριμμάτων στη Β. Ιταλία και στη βιομηχανική περιοχή Porto Petroli, Genoa. Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας. Α.Π.Θ.

Κρητικάκης Γ.Σ., Βαφειάδης Α., Λούης Ι. (2004). Εκτίμηση Ταχυτήτων Διάδοσης Εγκάρσιου Κύματος από Καταγραφές Επιφανειακών Κυμάτων Rayleigh. Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, Ι, τεύχ. 2-3

Κρητικάκης Γ. (2010). Επιφανειακά Κύματα: Εφαρμογές σε Περοβαλλοντικά και Γεωτεχνικά Προβλήματα. Διδακτορική Διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης

Παπακωνσταντίνου Κ., Κρητικάκης Γ.Σ., Βαφειάδης Α., Στειακάκης Ε. (2006). Συνδυαστική Εφαρμογή Γεωφυσικών και Εργαστηριακών Μετρήσεων για την Εκτίμηση του Μέτρου Ακαμψίας Μαργαϊκού Σχηματισμού. 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη

Παπανδρακάκης Μ. (2001). Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Εκδόσεις Παπασωτηρίου Αθήνα

Ingard, K. (1988). Fundamentals of waves & oscillations. Cambridge: Cambridge University Press.

Masw.com. (2016). *MASW Home*. [online] Available at: <http://www.masw.com/index.html> [Accessed 21 Oct. 2016].

Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., (1998a). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record: 68th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, p. 1377-1380

Park C.B., Miller R.D., Xia J., Ivanov J. (2007). Kansas Geological Survey, Lawrence, USA

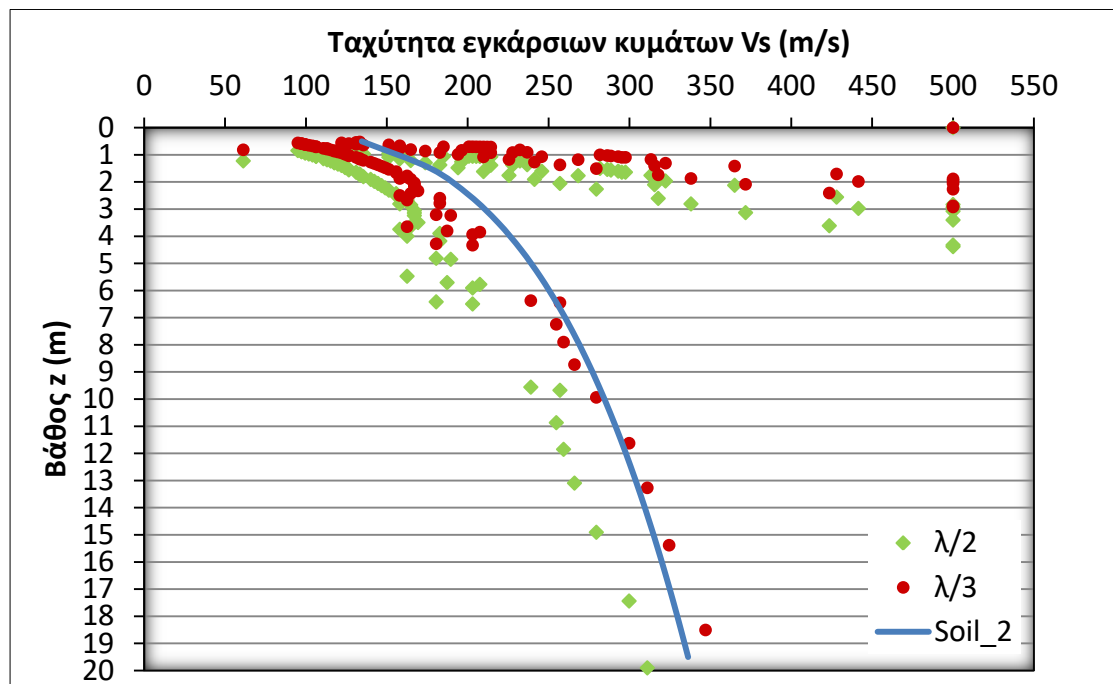
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων των αναλύσεων για το έδαφος Soil_2

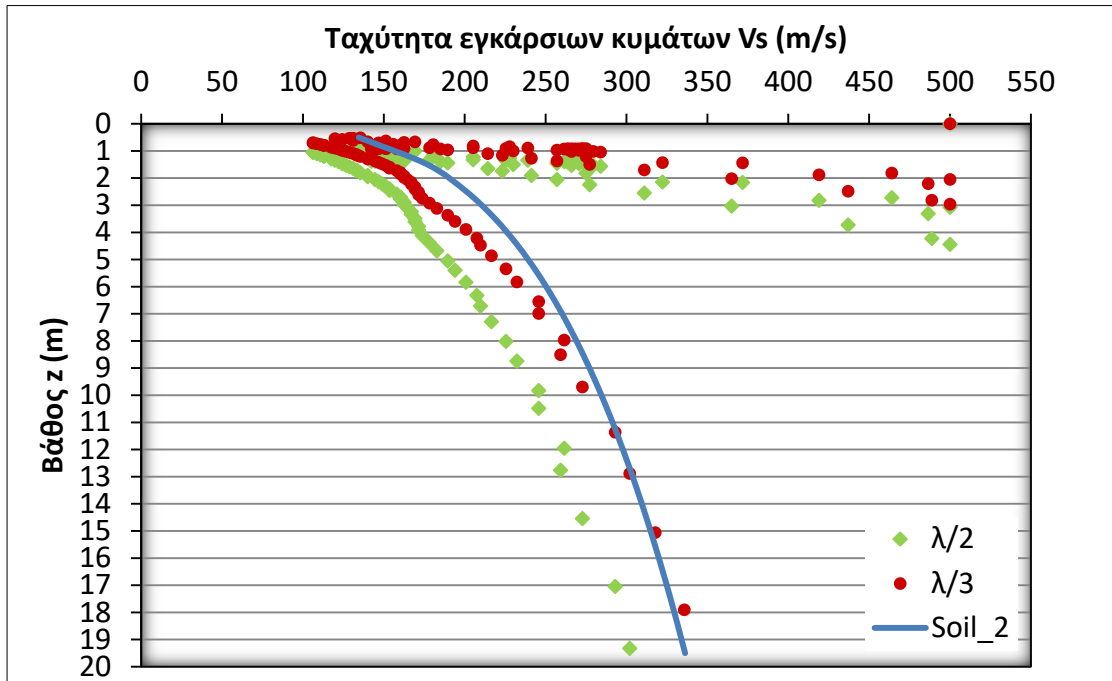
Κατανομή ταχύτητας διάδοσης με το βάθος για το Soil_2: $V_s(z)=160*z^{0.25}$

Φόρτιση με παλμό Ricker

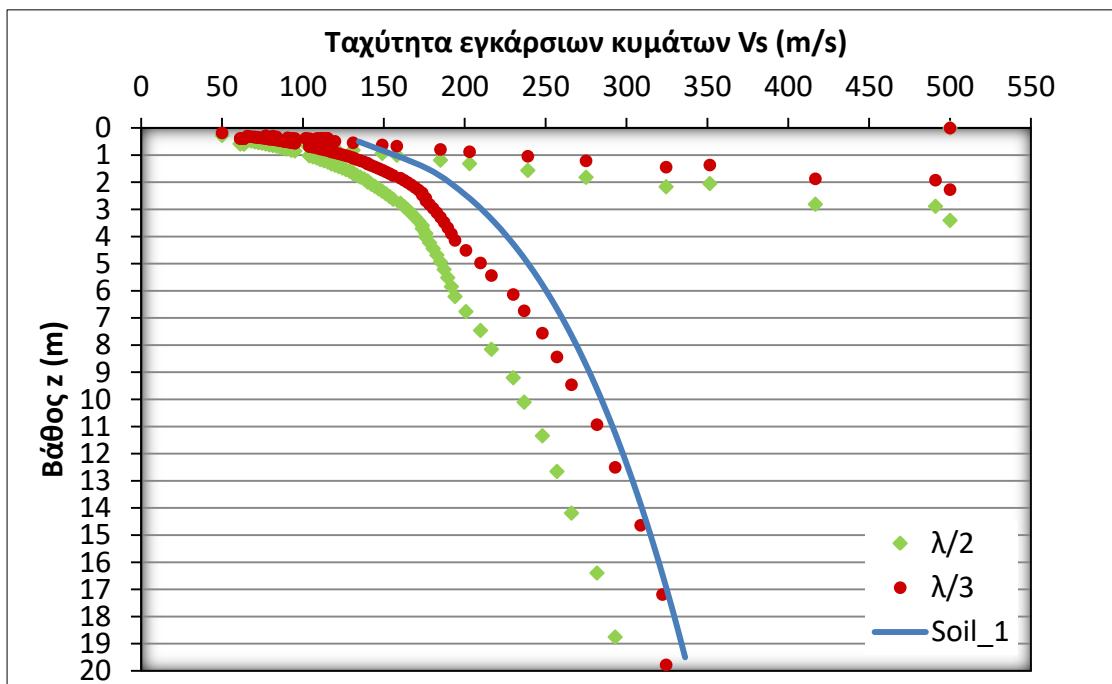
- Ricker_4Hz_9channels



- Ricker_mix_9channels (σύνθετος παλμός Ricker)

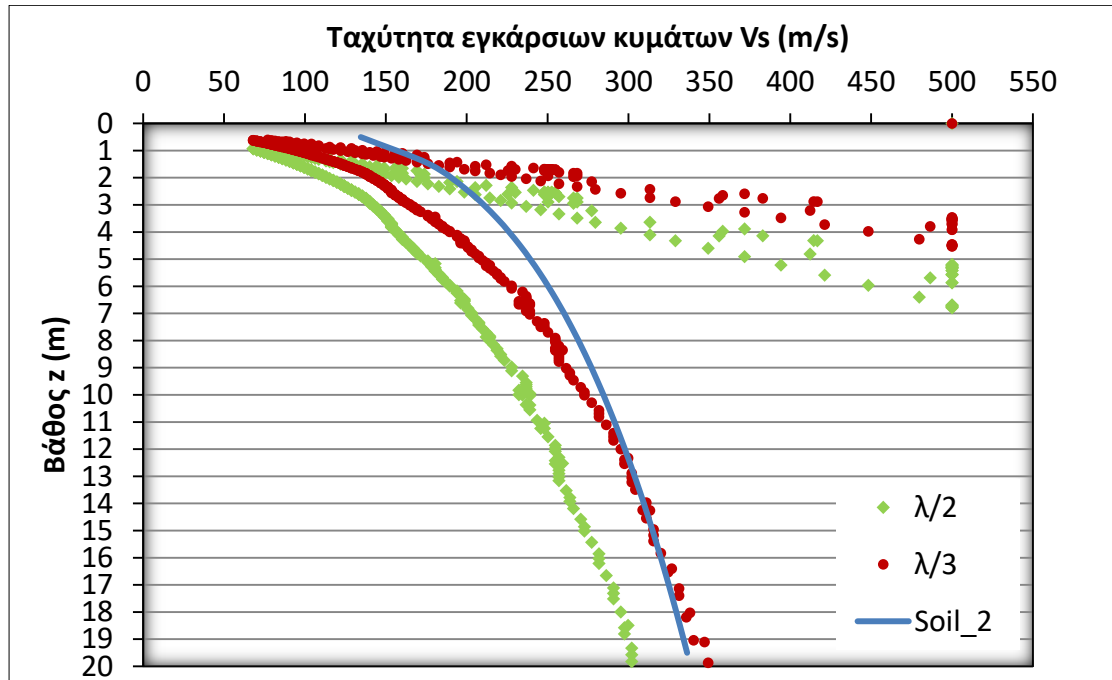


- Ricker_mix_24channels (σύνθετος παλμός Ricker)

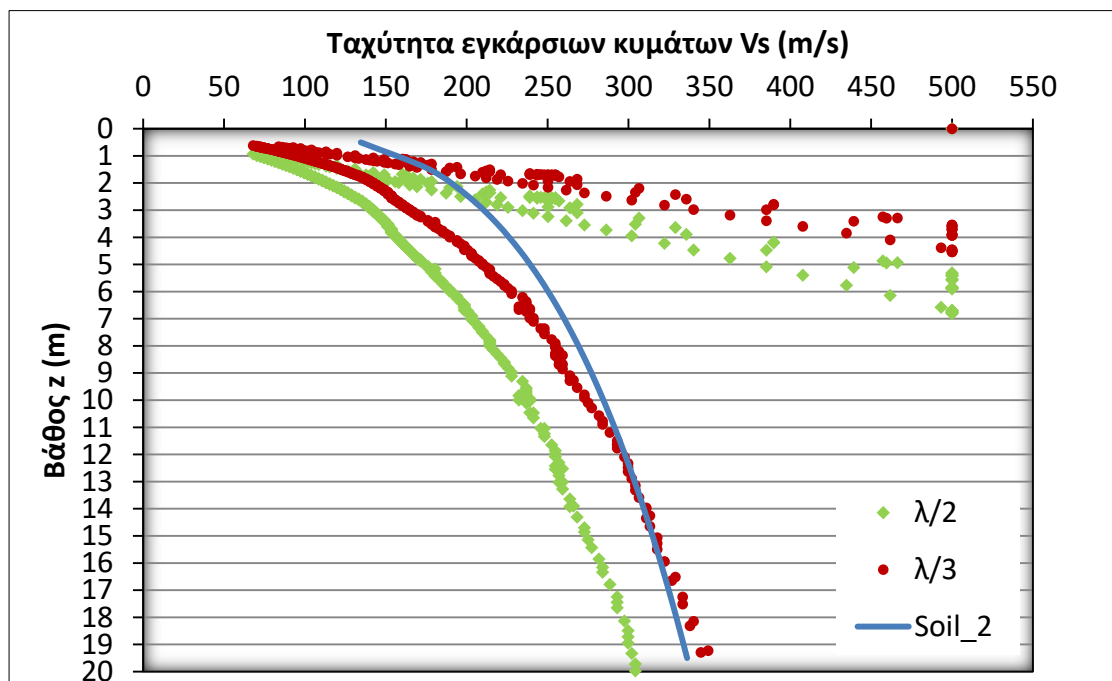


Φόρτιση με επιταχυνσιογράφημα του σεισμού της Καλαμάτας 1986

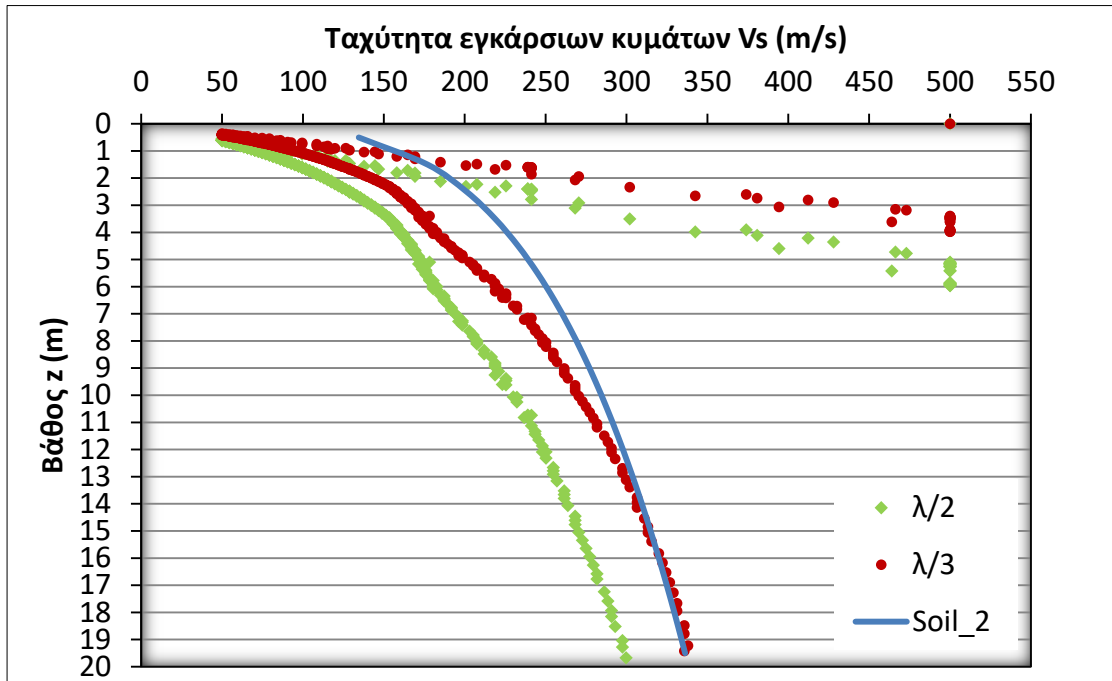
- $klmt_ξ=0,5\%_9channels$



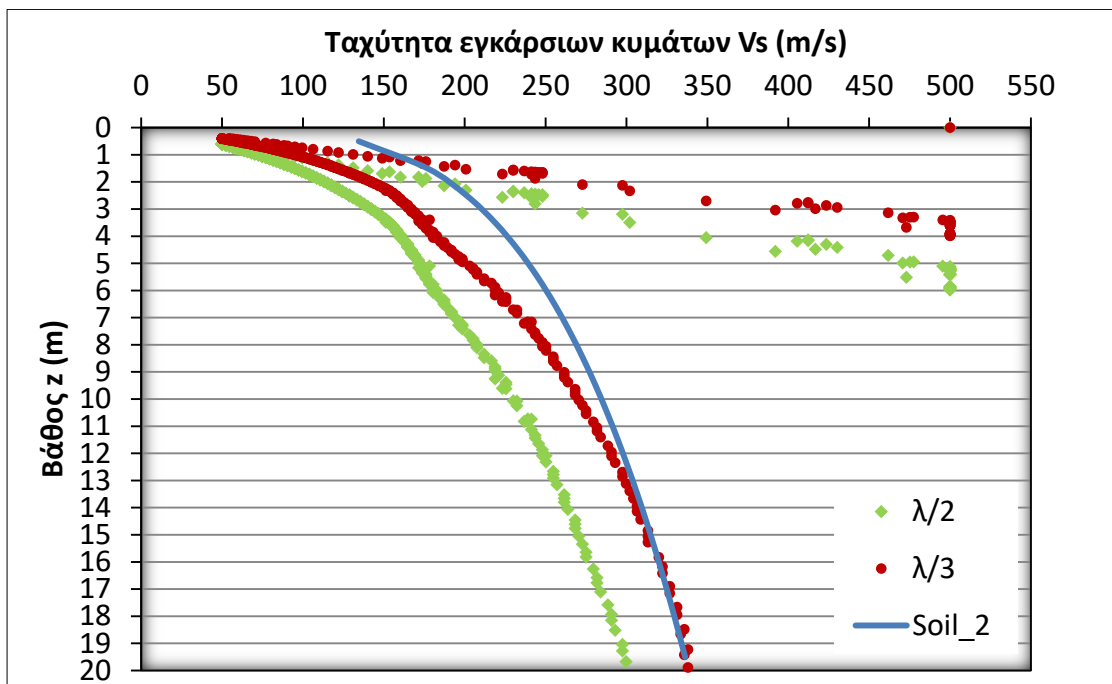
- $klmt_ξ=1,0\%_9channels$



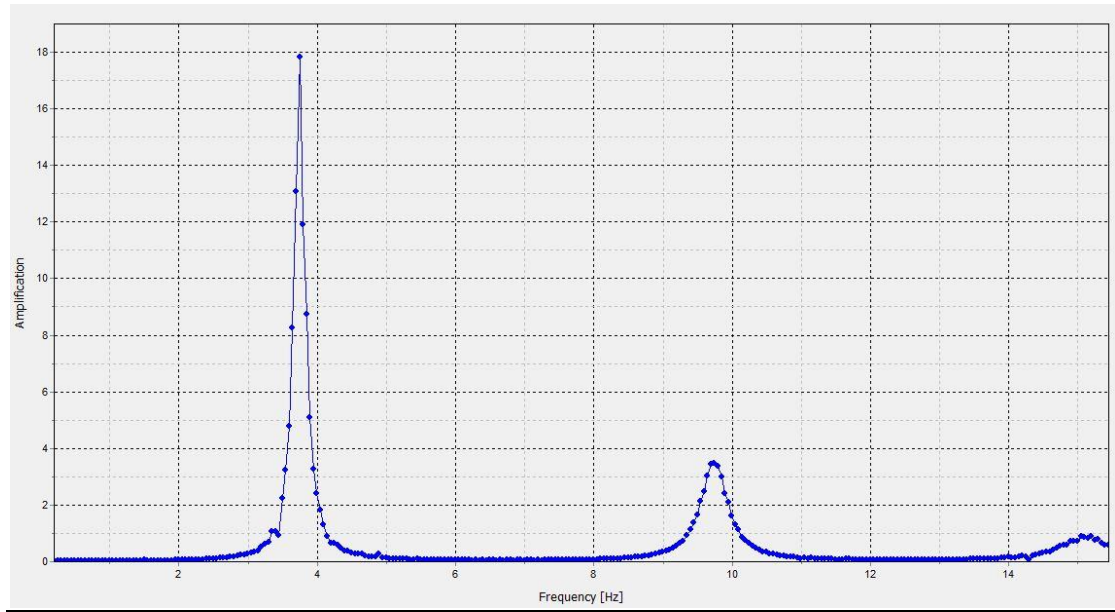
- klmt_ξ=0,5%_24channels



- klmt_ξ=1,0%_24channels

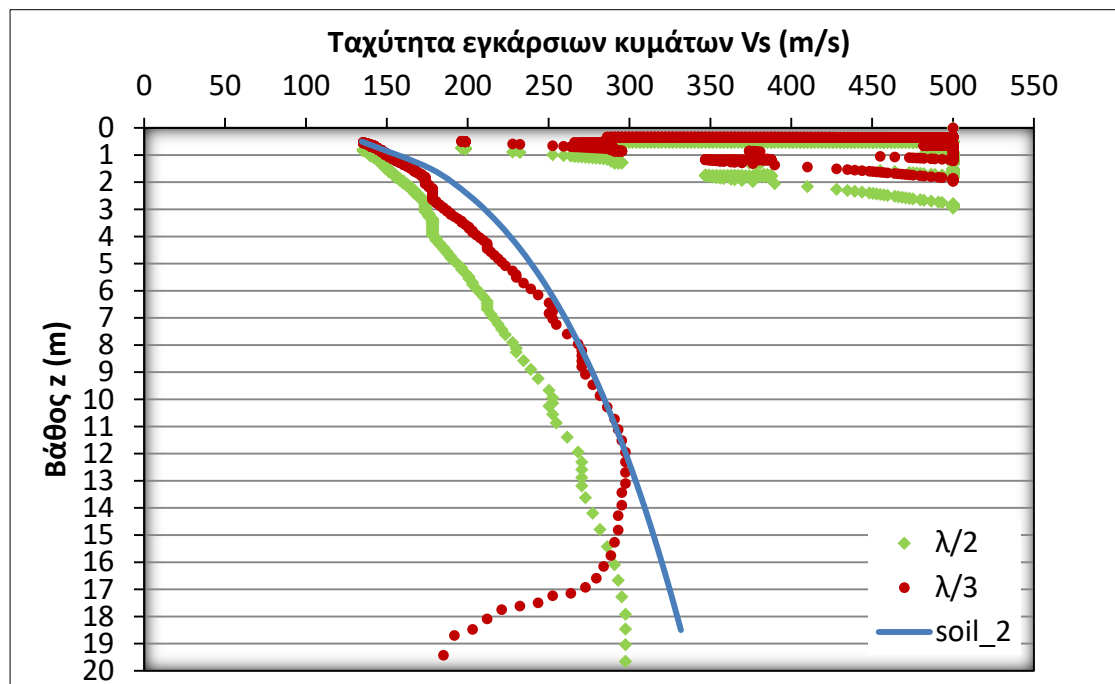


Ιδιοσυχνότητα εδάφους Soil 2, $f_0=3,75$ Hz

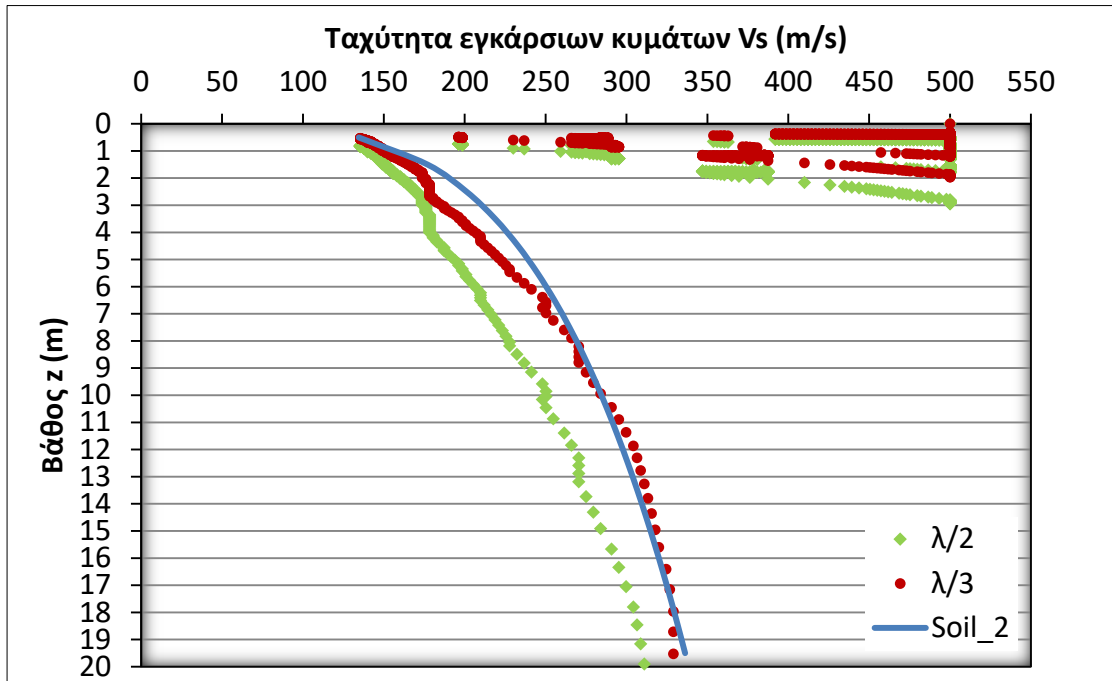


Φόρτιση με ημίτονοπερασμένων κύκλων

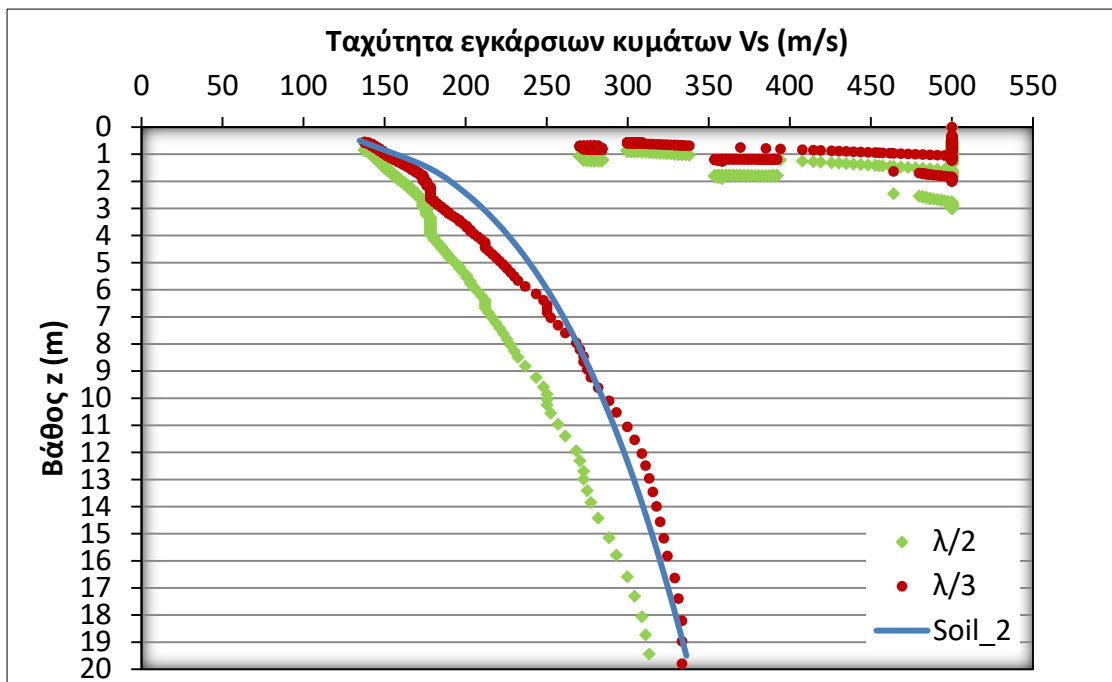
- $\sin(1\text{Hz})_{4,096\text{sec}}_{\xi=0,5\%}_{9\text{channels}}$ (4 κύκλοι φόρτισης)



- sin(2Hz)_4,096sec_ξ=0,5%_9channels (8 κύκλοι φόρτισης)

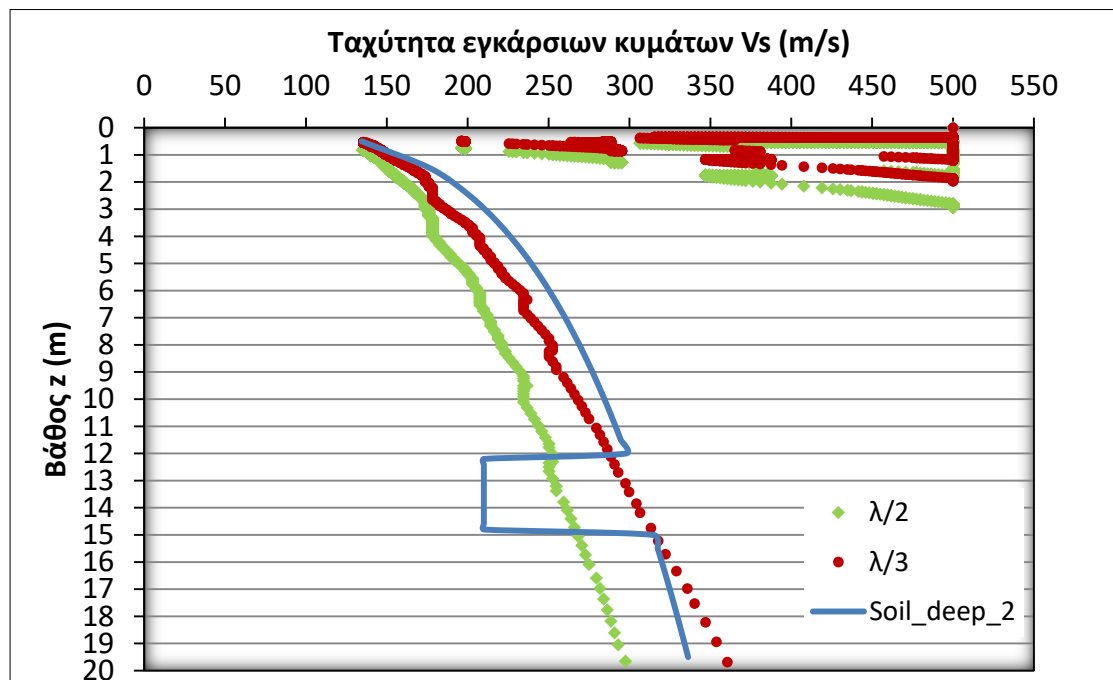
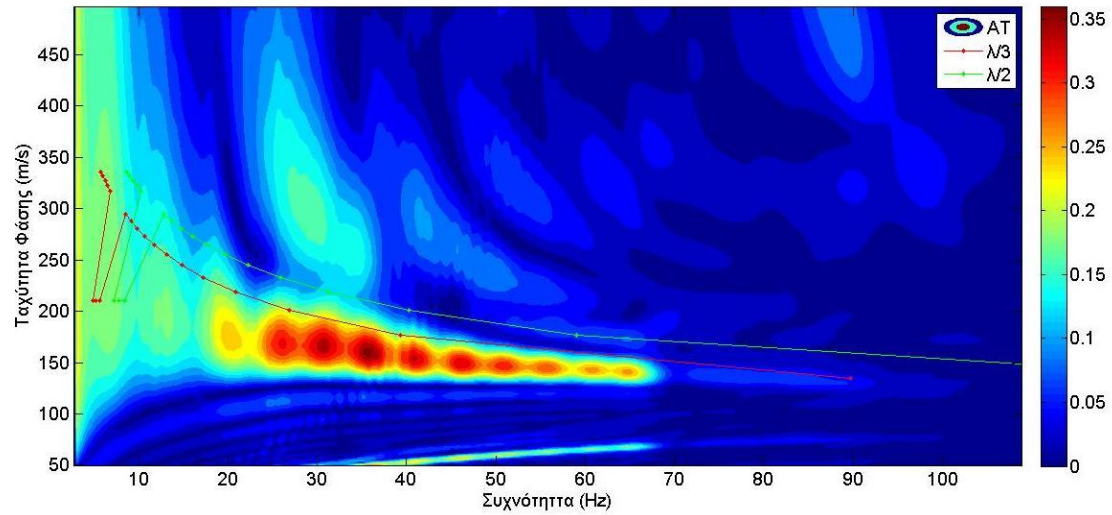


- sin(2Hz)_4,096sec_ξ=1,0%_9channels (8 κύκλοι φόρτισης)

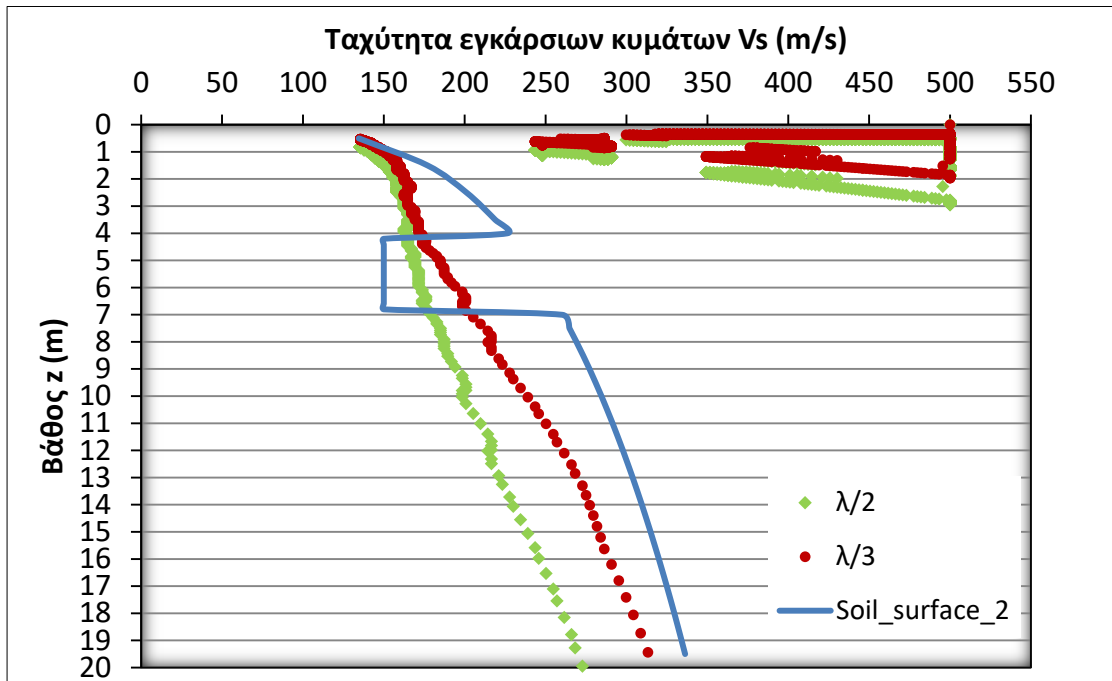
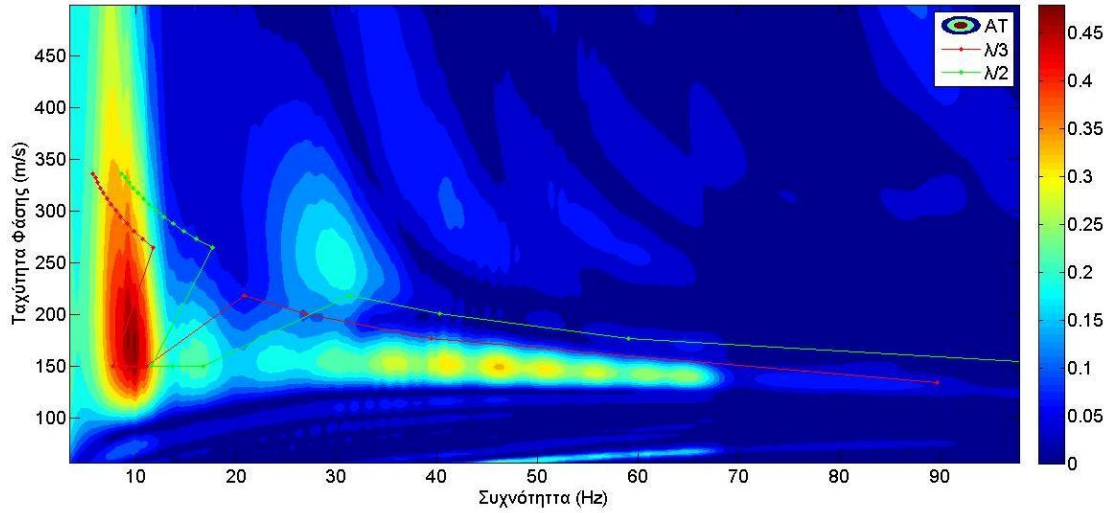


Ενδιάμεση στρώση χαμηλότερης ταχύτητας Vs (φόρτιση sin(1Hz)_8,192sec)

- Soil_deep_2 (ενδιάμεση στρώση 12-15m και $V_s=210\text{m/s}$)



- Soil_surface_2 (ενδιάμεση στρώση 4-7m και $V_s=150\text{m/s}$)



2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων ανάλυσης για τον εδαφικό σχηματισμό Soil_1 για ημίτονο δεσπόζουσας συχνότητας μεγαλύτερης της ιδιοσυχνότητας του εδάφους

- Soil1_ξ=0,5%_sin(7Hz)_2.048sec(14 κύκλοι φόρτισης)

