



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΧΑΤΖΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ
ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΙΚΡΟΘΟΡΥΒΟΥ ΜΟΝΟΥ
ΣΤΑΘΜΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ
ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ, ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2017





ΧΑΤΖΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ
ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΙΚΡΟΘΟΡΥΒΟΥ ΜΟΝΟΥ
ΣΤΑΘΜΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ
ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ, ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας του στο πλαίσιο του
Μεταπτυχιακού Προγράμματος σπουδών «Εφαρμοσμένη και
Περιβαλλοντική Γεωλογία» με κλάδο ειδίκευσης Εφαρμοσμένη
Γεωφυσική

Ημερομηνία προφορικής Εξέτασης:

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Καθηγητής Α.Π.Θ. Παπαζάχος Κώστας, επιβλέπων

Δ/ντής Ερευνών ΙΤΣΑΚ, Θεοδουλίδης Νικόλαος

Αν. Καθηγητής ΔΠΘ, Κλήμης Νικόλαος



Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Ν°

© Χατζής Νικόλαος, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗΝ
ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΙΚΡΟΘΟΡΥΒΟΥ ΜΟΝΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΚΑΙ
ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ, ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ
ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία» με κλάδο ειδίκευσης «Εφαρμοσμένη Γεωφυσική» του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, πραγματοποιήθηκε η παρούσα διατριβή ειδίκευσης με τίτλο «Προσδιορισμός μονοδιάστατου μοντέλου ταχύτητας με την αντιστροφή δεδομένων εδαφικού θορύβου μονού σταθμού και συνδυαστική ερμηνεία με ανεξάρτητες Γεωλογικές, Γεωφυσικές και Γεωτεχνικές πληροφορίες». Ο στόχος της παρούσας διατριβής ειδίκευσης είναι να διερευνηθεί αν η επεξεργασία με τη μέθοδο της αντιστροφής καταγραφών μονού σταθμού του εδαφικού θορύβου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αξιόπιστο εργαλείο εκτίμησης του μονοδιάστατου προφίλ της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων με το βάθος, ώστε να υποκαταστήσει περισσότερο δαπανηρές και χρονοβόρες μεθόδους. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εδαφικού θορύβου μονού σταθμού σε θέσεις με γνωστή μεταβολή των εγκάρσιων ταχυτήτων με το βάθος, στην ευρύτερη περιοχή της Β. Ελλάδας. Λόγω της μη μοναδικότητας των αποτελεσμάτων της αντιστροφής, εξετάζεται η δυνατότητα αντιστροφής με τη χρήση ανεξάρτητων πληροφοριών και πιο συγκεκριμένα της μέσης εγκάρσιας ταχύτητας των πρώτων 5 m (V_{s5}), η οποία είναι συχνά διαθέσιμη ή μπορεί να μετρηθεί ή και εκτιμηθεί με σχετική ευκολία.

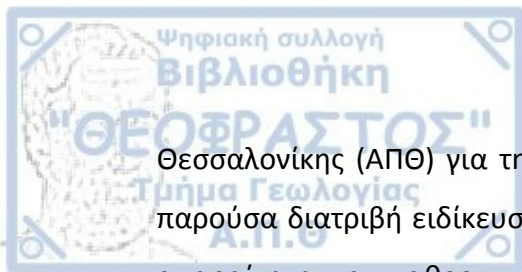
Στο πρώτο κεφάλαιο παρατίθενται οι θεωρητικές έννοιες του εδαφικού θορύβου, όπως οι πηγές προέλευσης του, το κυματικό του περιεχόμενο και οι εφαρμογές του με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία. Στην συνέχεια, αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο των μεθόδων επεξεργασίας του εδαφικού θορύβου, όπως του φασματικού λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSr), και της μεθόδου αντιστροφής των καμπύλων ελλειπτικότητας HVSr. Επίσης, αναλύονται οι αναδρομικές/ημι-εμπειρικές σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της μέσης εγκάρσιας ταχύτητας των πρώτων 30 m (V_{s30}), με χρήση της μέσης εγκάρσιας ταχύτητας των πρώτων 5 m (V_{s5}). Τέλος, δίνεται σε συντομία, η γεωλογική περιγραφή των περιοχών, στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις του εδαφικού θορύβου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αναλυτικές πληροφορίες των θέσεων από όπου συλλέχθηκαν οι μετρήσεις του εδαφικού θορύβου, καθώς και ο εξοπλισμός ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση αυτών των μετρήσεων. Στην συνέχεια, αναλύονται οι μέθοδοι επεξεργασίας των δεδομένων, οι οποίες περιλαμβάνουν τον υπολογισμό των καμπυλών ελλειπτικότητας με την μέθοδο HVSR, τον υπολογισμό των θεωρητικών καμπυλών ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh με την χρήση των γνωστών γεωφυσικών προφίλ των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων με το βάθος και την διάκριση-εξαγωγή των καμπυλών ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh με τη χρήση της τεχνικής τυχαίας μείωσης (random decrement technique). Επίσης, αναλύεται ο τρόπος επεξεργασίας των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR με τη μέθοδο της αντιστροφής του λογαρίθμου γειτνίασης, με σκοπό την εκτίμηση των μονοδιάστατων μοντέλων του υπεδάφους, εκφρασμένων σε σεισμικές ταχύτητες, και στη συνέχεια, τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 30 m (V_{s30}) από αυτά τα μοντέλα.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, καθώς και η ερμηνεία και αξιολόγησή τους. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται οι λόγοι για τις θέσεις όπου η αντιστροφή απέτυχε να εκτιμήσει τη σωστή μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 30 m (V_{s30}). Στην συνέχεια, πραγματοποιείται η σύγκριση των τελικών εκτιμήσεων των τιμών της V_{s30} , οι οποίες προκύπτουν από την μέθοδο της αντιστροφής και από την χρήση των ημι-εμπειρικών σχέσεων σε σχέση με τις πραγματικές V_{s30} από τις γνωστές εξεταζόμενες θέσεις. Τέλος, παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR, των καμπυλών ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh και των θεωρητικών καμπυλών ελλειπτικότητας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο διατυπώνονται τα βασικά συμπεράσματα, τα οποία προκύπτουν από τα αποτελέσματα των αντιστροφών του εδαφικού θορύβου, καθώς και την αξιολόγηση της αξιοπιστίας/εφαρμοσιμότητας της μεθόδου.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην τριμελή επιτροπή ξεκινώντας φυσικά με τον υπεύθυνο καθηγητή μου κ. Κώστα Παπαζάχο, καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου

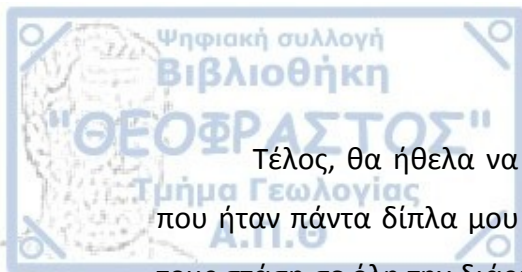


Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ) για την ευκαιρία που μου έδωσε ώστε να ασχοληθώ με την παρούσα διατριβή ειδίκευσης. Η καθοδήγηση και έμπνευση που μου παρείχε ήταν απαραίτητη και καθοριστική για την υλοποίηση της παρούσας έρευνας. Στην συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νίκο Θεοδοουλίδη, διευθυντή ερευνών του ΙΤΣΑΚ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για τον εξοπλισμό που μου παρείχε για την διεκπεραίωση των μετρήσεων, καθώς και για τις εύστοχες παρατηρήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια της διατριβής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νίκο Κλήμη, Αναπλ. Καθηγητή του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης (ΔΠΘ), για την παροχή των απαραίτητων Γεωφυσικών/Γεωτεχνικών πληροφοριών/δεδομένων και τη βοήθειά του στη διάρκεια της διατριβής.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστίσω μου εκείνους που μου έδωσαν «απλόχερα» δεδομένα θορύβου ή άλλων γεωφυσικών δεδομένων όπως η Δρ. κ. Αρετή Πάνου και ο αν. καθηγητής κ. Γεώργιος Βαργεμέζης. Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Υποψ. Δρ. κ. Μάριο Ανθυμίδη που εκτός από δεδομένα θορύβου που μου διέθεσε, παρακολουθούσε την εξέλιξη της διατριβής μου και μου μετέδωσε τις απαραίτητες θεωρητικές και τεχνικές γνώσεις.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλα τα μέλη του τομέα Γεωφυσικής και του Τμήματος Γεωλογίας, στην καθοδήγηση των οποίων οφείλω την απόκτηση των βασικών Γεωλογικών και Γεωφυσικών γνώσεων. Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Παναγιώτη Τσούρλο, τον αν. καθηγητή κ. Γεώργιο Βαργεμέζη και τον ΕΔΙΠ κ. Ηλία Φίκο για την κατάλληλη εκπαίδευση και εμπειρία που μου προσέφεραν σε σχέση με τη συλλογή μετρήσεων στην ύπαιθρο, κάτι το οποίο αποτέλεσε ισχυρό εφόδιο για την υλοποίηση των μετρήσεων της διατριβής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους συμφοιτητές μου Δ. Αγγελή, Ι. Γρένδα, Α. Νιβορλή, Δ. Οικονόμου και Κ. Πολυδωρόπουλο. Η βοήθεια που μου παρείχαν για την υλοποίηση των μετρήσεων ήταν καθοριστική και πολύτιμη. Με απόλυτη ειλικρίνεια, χωρίς τη βοήθειά τους ακόμα θα ήμουν στο στάδιο της συλλογής μετρήσεων...



Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου που ήταν πάντα δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια, για την ενθάρρυνση και τη θετική τους στάση σε όλη την διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Χατζής Νικόλαος

Οκτώβριος 2017



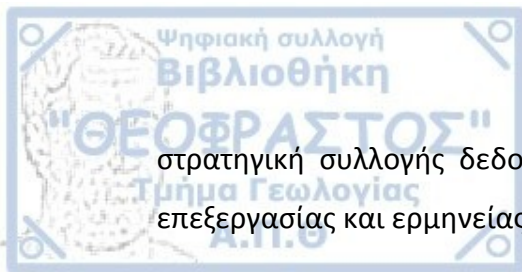
ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ενώ η αξιολόγηση της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) έχει αναγνωριστεί ως μία σημαντική παράμετρος κατά την προσομοίωση της εδαφικής κίνησης από τις αρχές του 70s, και αρκετοί κώδικες σεισμικής επικινδυνότητας και αναλύσεις κτιρίων έχουν ενσωματώσει τη χρήση της για την εκτίμηση των τοπικών επιδράσεων στην εδαφική-κίνηση (με χρήση της V_{s30}), η εκτίμηση της V_s παραμένει ένα δύσκολο αντικείμενο. Οι περισσότερες τεχνικές παράγουν μονοδιάστατα (1-D) μοντέλα χρησιμοποιώντας ενεργές πηγές, είτε εντός γεωτρήσεων (crosshole/downhole) ή χρησιμοποιώντας επιφανειακές μετρήσεις (π.χ. MASW, διάθλαση, κτλ.), με κάθε προσέγγιση να έχει τα πλεονεκτήματά και τα μειονεκτήματά της. Σε όλες τις περιπτώσεις, η χρήση ενεργών πηγών, και ειδικότερα γεωτρήσεων, αυξάνει τον χρόνο/κόστος και περιορίζει τα όρια της μεθόδου σε απαιτητικά περιβάλλοντα (π.χ. αστικά). Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, δεδομένα εδαφικού θορύβου έχουν χρησιμοποιηθεί όλο και περισσότερο για μελέτες επιφανειακών V_s δομών. Η προφανής και σταδιακά αυξανόμενη αξία των δεδομένων εδαφικού θορύβου είναι ότι παρέχουν έμμεσες πληροφορίες για τις ιδιότητες των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης (π.χ. θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα, κτλ.). Επιπλέον, αρκετές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την επεξεργασία δεδομένων από ειδικές διατάξεις εδαφικού θορύβου (π.χ. SPAC, f-k, κτλ.), παρέχοντας έτσι αξιόπιστες πληροφορίες για την τοπική γεωφυσική δομή.

Στην παρούσα διατριβή ερευνούμε την εφαρμοσιμότητα της αντιστροφής των καμπυλών HVSR καταγραφών μονού σταθμού για τον προσδιορισμό της τοπικής μονοδιάστατης 1D δομής. Ενώ η συλλογή δεδομένων HVSR είναι οικονομικά εξαιρετικά αποδοτική, η σχέση της με την ελλειπτικότητα των Rayleigh κυμάτων έχει αμφισβητηθεί, ενώ η αντιστροφή της ελλειπτικότητας είναι εμφανώς μη-μοναδική. Το κύριο κίνητρο πίσω από το έργο μας βασίζεται στις πρόσφατες έρευνες των Hobiger et al. (2013), οι οποίοι έδειξαν ότι αν το πολύ επιφανειακό 1D προφίλ ταχυτήτων είναι γνωστό, η μοναδικότητα από την αντιστροφή της ελλειπτικότητας βελτιώνεται σημαντικά. Δεδομένου ότι οι επιφανειακές

πληροφορίες μπορούν να προέρχονται απευθείας από μικρής-κλίμακας ενεργητικές πηγές ή παθητικές δοκιμές, η έμμεσα να εκτιμηθούν από άλλες (γεωφυσικές, γεωτεχνικές ή γεωλογικές) πληροφορίες, είναι ενδιαφέρον να αξιολογηθεί αυτή η προσέγγιση σε πρακτικό επίπεδο.

Μετρήσεις εδαφικού θορύβου μονού σταθμού πραγματοποιήθηκαν σε 73 βαθμονομημένες θέσεις της Βόρειας Ελλάδας, επιλεγμένες από τη βάση δεδομένων των Stewart et al. (2014), η οποία περιλαμβάνει ανεξάρτητες πληροφορίες για την 1D Vs δομή και γεωλογία. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κυρίως με την χρήση ενός τυπικού συστήματος λήψης δεδομένων θορύβου (City-Shark II ψηφιοποιητής, Lennart 5-sec αισθητήρας), και η καμπύλη HVSR υπολογίστηκε με το λογισμικό GEOPSY (Wathelet et al., 2008). Η αξιοπιστία των καμπυλών HVSR ως εκδοχή καμπύλης ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh ελέγχθηκε με τη χρήση της προσέγγισης των Hobiger et al. (2008). Πραγματοποιήθηκαν αντιστροφές καμπυλών HVSR με τον περιορισμό της μέσης εγκάρσιας ταχύτητας των πρώτων 5 m (V_{s5}), όπως αυτή παρέχεται από τις πληροφορίες της διαθέσιμης βάσης δεδομένων. Αναπτύχθηκε μια αυτόματη διαδικασία αντιστροφής, ώστε να επιτρέπει την εφαρμογή της μεθόδου ακόμα και από μη ειδικούς. Η αξιοπιστία του παραγόμενου 1D Vs μοντέλου αξιολογήθηκε με την απευθείας σύγκριση με τη βάση δεδομένων, εστιάζοντας σε πληροφορίες όπως το σεισμικό υπόβαθρο, εκεί που αυτό ήταν γνωστό. Επιπλέον, τα αποτελέσματα από την αντιστροφή των HVSR για την τιμή της V_{s30} συγκρίθηκαν με τις πραγματικές τιμές V_{s30} της προαναφερόμενης βάσης δεδομένων, καθώς και την εκτίμηση των V_{s30} από την V_{s5} ακολουθώντας την ημ εμπειρική σχέση των Stewart et al. (2014). Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η αντιστροφή των καμπυλών HVSR χρησιμοποιώντας ως περιορισμό την V_{s5} μπορεί να οδηγήσει, σε αρκετές περιπτώσεις, σε σημαντικά βελτιωμένες εκτιμήσεις της V_{s30} , κυρίως για σκληρότερους σχηματισμούς (κατηγορία εδάφους B κατά EC8), παρέχοντας επίσης ταυτόχρονα βελτιωμένες εκτιμήσεις της V_{s30} για αρκετές πιο "μαλακές" θέσεις (κατηγορία εδάφους C κατά EC8). Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αντιστροφή δεδομένων HVSR μπορεί να θεωρηθεί ως ένα συμπληρωματικό εργαλείο για τον αποτελεσματικό, μεγάλης-κλίμακας/χαμηλού-κόστους προσδιορισμό αξιόπιστων εκτιμήσεων της V_{s30} , χρησιμοποιώντας μια απλή



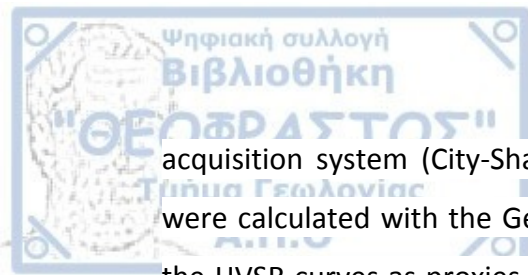
στратηγική συλλογής δεδομένων και ένα ελάχιστο και ημι-αυτοποιημένο φόρτο επεξεργασίας και ερμηνείας δεδομένων.



While the assessment of the shear-wave velocity (V_s) has been recognized as an important parameter for ground motion simulations since the early 70s, and several seismic hazard and building codes have incorporated its use for site-effects assessment on ground-motions (typically through V_{s30}), obtaining V_s estimates remains a demanding task. Most techniques derive local 1-D V_s models using active sources methods, either using boreholes (crosshole/downhole) or surface measurements (e.g. MASW, refraction, etc.), with each approach having its merits and drawbacks. In all cases, the use of active sources, and especially boreholes, increases the time/cost demands and limit the method applicability in demanding environments (e.g. urban). During the last decades ambient noise data have been increasingly used for shallow V_s structure study. The obvious added value of ambient noise data is that they also provide indirect information on surface layers properties (e.g. fundamental frequency, etc.). Moreover, several methods have been developed for array ambient noise processing (e.g. SPAC, f-k, etc.), hence providing reliable information on the local V_s structure.

We explore here the applicability of single-station HVSr curve inversion to determine the local 1D V_s structure. While HVSr data collection is extremely cost-efficient, its relation to Rayleigh wave ellipticity has been questioned, while ellipticity inversions are notoriously non-unique. The main motivation behind our work is based on the recent findings by Hobiger et al. (2013), who showed that if the shallow 1D velocity profile is known, the uniqueness of the ellipticity inversion is severely improved. Since shallow information can be directly derived from small-scale active source or passive tests, or indirectly assessed from other (geophysical, geotechnical or geological) information, it is interesting to evaluate this approach at a practical level.

Single station ambient noise measurements were performed at 73 calibration sites of Northern Greece, selected from the database of Stewart et al. (2014) which includes independently information on the local 1D V_s structure and geology. Measurements were mainly performed with the use of a conventional noise

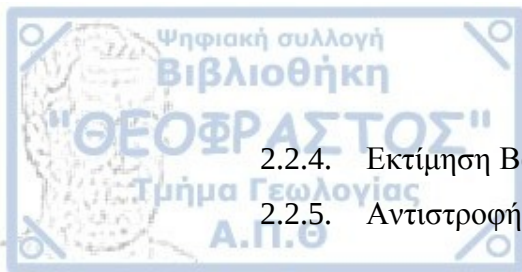


acquisition system (City-SharkII digitizer, Lennart 5-sec sensor), and HVSR curves were calculated with the Geopsy software (Wathelet et al., 2008). The reliability of the HVSR curves as proxies for Rayleigh wave ellipticity has been checked using the approach of Hobiger et al.(2008). HVSR curve inversions have been performed by constraining the average shear-wave velocity of the first 5 m (V_{s5}), as provided from the database information. An automated inversion procedure was developed, allowing the method application even by non-experts. The reliability of the obtained 1D V_s models has been assessed by direct comparison with the database, focusing on information such as the inferred seismic bedrock depth. Moreover, V_{s30} results from the HVSR inversions were compared with the actual V_{s30} database reference values, as well as V_{s30} estimates from V_{s5} proxies following Stewart et al. (2014). The results suggest that the inversion of HVSR curves using V_{s5} constraints can lead, in almost all cases, to significantly improved V_{s30} estimates for stiffer formations (EC8, soil class B), while providing also improved V_{s30} assessments for several softer (EC8, soil class C) sites. These observations suggest that the inversion of HVSR data can be considered as a supplementary tool for efficient, large-scale/low-cost V_{s30} estimations, employing a simple data-collection strategy and a minimal amount of data processing and interpretation.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	viii
ABSTRACT	x
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ - Εισαγωγή	17
1.1.1. Γενικά	17
1.2.Εδαφικός Θόρυβος.....	23
1.2.1. Πηγές του Εδαφικού Θορύβου	24
1.2.2. Η Φύση του Εδαφικού Θορύβου	28
1.3.Χρήση ή Αξιοποίηση του Εδαφικού Θορύβου.....	30
1.3.1. Μέθοδος HVSR	34
1.3.2. Ελλειπτικότητα των Κυμάτων Rayleigh και Καμπύλων HVSR	39
1.3.3. Αντιστροφή Καμπυλών Ελλειπτικότητας Κυμάτων Rayleigh – HVSR	40
1.4.Εκτίμηση της Μέσης Ταχύτητας των Εγκαρσίων Κυμάτων των Πρώτων 30 m (Vs ₃₀) με την Χρήση Στατιστικών/Αναδρομικών Σχέσεων	45
1.5.Συνοπτική Γεωλογική Περιγραφή των Θέσεως Μέτρησης.....	47
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ - Δεδομένα και Επεξεργασία Δεδομένων.....	53
2.1.Συλλογή Δεδομένων	53
2.1.1. Όργανα Καταγραφής Εδαφικού Θορύβου.....	64
2.1.2. Δεδομένα.....	67
2.2.Επεξεργασία Δεδομένων.....	68
2.2.1. Υπολογισμός Καμπυλών Ελλειπτικότητας HVSR	69
2.2.2. Υπολογισμός Θεωρικών Καμπυλών Ελλειπτικότητας των Κυμάτων Rayleigh.....	74
2.2.3. Δοκιμές Διάκρισης Κυμάτων Rayleigh σε Καταγραφές Θορύβου ...	77



2.2.4.	Εκτίμηση Βάθους Υποβάθρου	79
2.2.5.	Αντιστροφή Καμπυλών Ελλειπτικότητας HVSR.....	83

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ - Αποτελέσματα Αντιστροφής Καμπυλών Ελλειπτικότητας HVSR και Αξιολόγηση.....95

3.1.1.	Μη Αποδεκτές Θέσεις για την Αντιστροφή των Καμπυλών Ελλειπτικότητας HVSR και την ερμηνεία των Αποτελεσμάτων της	96
3.1.2.	Αποτελέσματα Μοντέλων Δομής Σεισμικών Ταχυτήτων με το Βάθος, από τη Μέθοδο της Αντιστροφής των Καμπυλών Ελλειπτικότητας HVSR.....	98
3.1.3.	Παραδείγματα Αποτελεσμάτων Αντιστροφής Καμπυλών Ελλειπτικότητας HVSR	99
3.1.4.	Προκαταρκτικά Αποτελέσματα Αντιστροφής Καμπυλών Ελλειπτικότητας HVSR και η Αξιολόγηση του	101
3.1.5.	Τελικά Αποτελέσματα των Μέσων Ταχυτήτων των Εγκαρσίων Κυμάτων των Πρώτων 30 m, V_{s30} , από την Αντιστροφή Καμπυλών Ελλειπτικότητας HVSR.....	119
3.1.6.	Αποτελέσματα Εξαγωγής Κυμάτων Rayleigh από Καταγραφές Εδαφικού Θορύβου.....	129
3.1.7.	Αποτελέσματα Θεωρητικών Καμπυλών Ελλειπτικότητας των Κυμάτων Rayleigh	131

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ - Συμπεράσματα133

Βιβλιογραφία139

Παράρτημα147



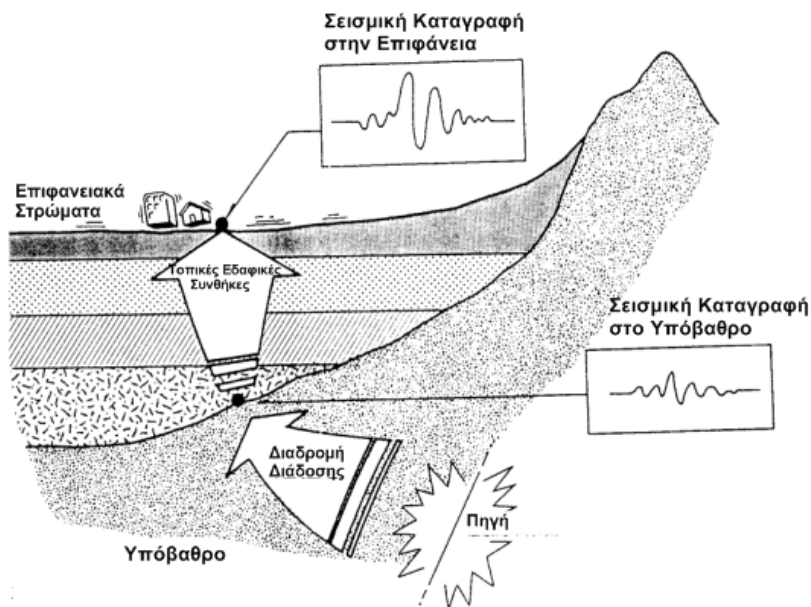
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ – Εισαγωγή

1.1. Γενικά

Οι σεισμοί αποτελούν ένα από τα πιο καταστροφικά φυσικά φαινόμενα, με σημαντικές επιπτώσεις στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον, προκαλούμενοι από ενδογενείς δυνάμεις στο εσωτερικό της Γης. Το τελικό αποτέλεσμα ενός σεισμού σε έναν τόπο εξαρτάται από την πηγή (εστιακό βάθος, μέγεθος και τρόπος διάρρηξης), από τη διαδρομή διάδοσης (απόσταση, απόσβεση), από τις τοπικές εδαφικές συνθήκες τις θέσεις στην οποία θα καταγραφεί η σεισμική κίνηση (σκληρότητα σχηματισμών, θεμελιώδης συχνότητα εδάφους κλπ.) και τέλος από τις τεχνικές κατασκευές στις οποίες θα επιδράσει (ποιότητα, κτλ.). Η κατανόηση όλων αυτών των παραγόντων είναι αντικείμενο μελέτης της Τεχνικής Σεισμολογίας, της Εδαφομηχανικής και της Αντισεισμικής Μηχανικής, οι οποίες έχουν ως κύριο στόχο το σχεδιασμό και λήψη κατάλληλων μέτρων ώστε να κατανοηθεί και στη συνέχεια να περιοριστεί η επίδραση της σεισμικής κίνησης στο φυσικό και δομημένο περιβάλλον.

Ένα από τα σημαντικότερα θέματα σε σχέση με την επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών είναι αυτό της ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης, όταν αυτή διαδίδεται στους επιφανειακούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Η ενίσχυση αυτή συνήθως προκαλείται όταν η σεισμική ενέργεια διεισδύσει από το υπόβαθρο (γεωλογικό ή σεισμικό) στα ανώτερα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης, με αποτέλεσμα (συνήθως) την αύξηση των πλατών ταλάντωσής του, αλλά και την μεταβολή του συχνотικού περιεχομένου της σεισμικής κίνησης. Ως γεωλογικό υπόβαθρο θεωρούνται συνήθως οι βραχώδεις σχηματισμοί τυπικά προ-Αλπικής ηλικίας (π.χ. ασβεστόλιθοι, γνεύσιοι, γρανίτες, σχιστόλιθοι, κλπ.), ενώ ως σεισμικό υπόβαθρο οι σχηματισμοί με μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 30 m μεγαλύτερη των 800 m/sec ($V_{s30} > 800$ m/sec, με βάση την κατηγοριοποίηση των σχηματισμών από Eurocode 8, EN 1998-1, **CEN, 1994**, βλέπε και πίνακα 1.1). Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται σχηματικά η ενίσχυση η οποία προκαλείται στα πλάτη της σεισμικής κίνησης, λόγω της διάδοσης της σεισμικής ενέργειας από το υπόβαθρο

στα ανώτερα επιφανειακά στρώματα (π.χ. σε μία ιζηματογενή λεκάνη). Η ενίσχυση που θα προκύψει για μία περιοχή με συγκεκριμένες τοπικές εδαφικές συνθήκες, εξαρτάται από την θεμελιώδη συχνότητα (ιδιοσυχνότητα) του εδάφους, γιατί σε αυτήν την συχνότητα η σεισμική δόνηση όταν συντονιστεί με τα επιφανειακά στρώματα θα προκαλέσει την μεγαλύτερη δυνατή κίνηση (ταλάντωση) στην επιφάνεια.



Σχ. 1.1. Σεισμική κίνηση η οποία δημιουργείται από μία σεισμική πηγή, διαδίδεται μέσω της διαδρομής διάδοσης και εκδηλώνεται σε μία περιοχή με συγκεκριμένες εδαφικές συνθήκες (τροποποιημένο από <http://seismo.geology.upatras.gr/MICROZON-THEORY1.htm>).

Στο σχήμα 1.2 παρουσιάζεται μία απλή γεωλογική δομή ενός ομογενούς στρώματος πάνω σε ομογενή ημιχώρο (αριστερό μέρος) και ένα σχηματικό διάγραμμα του πλάτους ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης σε συνάρτηση με την συχνότητα (δεξί μέρος). Πρακτικά μπορούμε να σκεφτούμε το ανώτερο στρώμα ως ένα μονοβάθμιο ταλαντωτή, οπότε το πλάτος ταλάντωσης στην επιφάνεια του ανώτερου σχηματισμού δίνεται από την σχέση:

$$a_0 = a_1 * G(f) \quad (1.1)$$

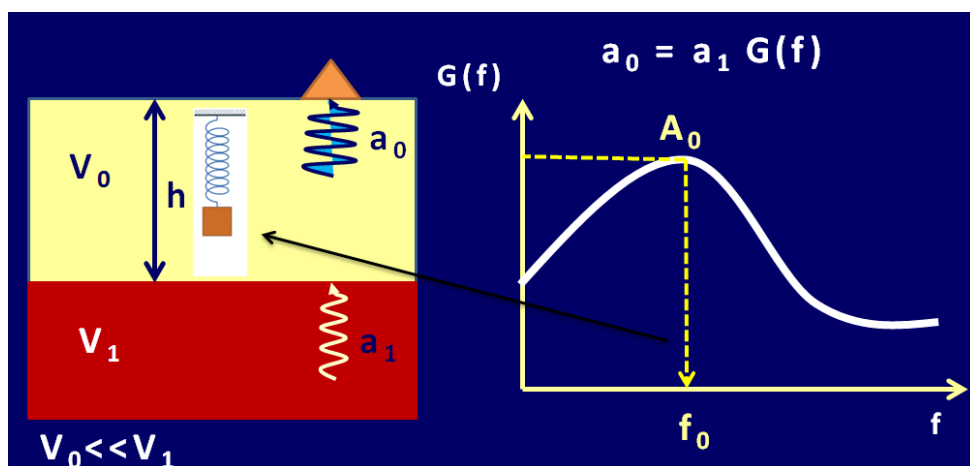
όπου a_1 το πλάτος της σεισμικής κίνησης στο πάνω μέρος του ημιχώρου και $G(f)$ η συνάρτηση ενίσχυσης του πλάτους της σεισμικής κίνησης σε συνάρτηση με την συχνότητα. Η συνάρτηση αυτή περιγράφει ακριβώς την επίδραση του ανώτερου

στρώματος στην σεισμική κίνηση εισόδου (a_1), και ποσοτικοποιεί την επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στη σεισμική κίνηση.

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα στο δεξί μέρος του σχήματος 1.2, το πλάτος ενίσχυσης της συνάρτησης μεταφοράς, $G(f)$, αποκτά μία μέγιστη τιμή σε σημείο, το οποίο συμπίπτει με την θεμελιώδη συχνότητα ταλάντωσης ή ιδιοσυχνότητα του ανώτερου στρώματος του εδάφους, η οποία για $V_0 \ll V_1$ δίνεται από την σχέση:

$$f_0 = V_0/4h \quad (1.2)$$

όπου f_0 η ιδιοσυχνότητα του εδάφους, V_0 η ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων του επιφανειακού στρώματος και h το βάθος του ημιχώρου από την επιφάνεια (πάχος του επιφανειακού στρώματος).



Σχ. 1.2. Σχηματική απεικόνιση απλής γεωλογικής δομής ενός ομογενούς στρώματος πάνω σε ομογενή ημιχώρο (αριστερά) και αντίστοιχο διάγραμμα του πλάτους ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης σε συνάρτηση με την συχνότητα (δεξιά) στην επιφάνεια του ανώτερου στρώματος (τροποποιημένο από Papadopoulos, 2013).

Η ενίσχυση της σεισμικής κίνησης στα ανώτερα επιφανειακά στρώματα του φλοιού ελέγχεται σε σημαντικό βαθμό από τη διαφορά των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων, η οποία εκφράζει την αντίθεση εμπέδησης (ρV), μεταξύ υποβάθρου και των επιφανειακών ιζηματογενών σχηματισμών. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η διαφορά των ταχυτήτων, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενίσχυση που προκαλείται. Η άμεση εξάρτηση της ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης από την

ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης οδήγησε στην ανάγκη για την κατηγοριοποίηση των εδαφών με βάση την ταχύτητα αυτών των κυμάτων. Πιο συγκεκριμένα, στην Καλιφόρνια το 1994 έγινε η πρώτη κατηγοριοποίηση των σχηματισμών με βάση τη μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 30 m (V_{s30}) στο πλαίσιο του NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program, BSSC, **Dobry et al., 1994**). Στην Ευρώπη στο πλαίσιο του κανονισμού Eurocode 8 (EN 1998-1, **CEN, 1994**) πραγματοποιήθηκε η κατηγοριοποίηση των σχηματισμών με βάση τη V_{s30} , με στόχο τη δημιουργία ενός κοινού πλαισίου αντισεισμικών κανονισμών για όλες τις χώρες της Ενωμένης Ευρώπης. Στο πίνακα 1.1 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των σχηματισμών με βάση τη V_{s30} . Στην πρώτη στήλη δίνεται η κατηγοριοποίηση των σχηματισμών με λατινικούς χαρακτήρες, για πολύ συνεκτικούς μεγάλης αντοχής σχηματισμούς (A) μέχρι πολύ χαλαρούς, μικρής αντοχής εδαφικούς σχηματισμούς (E), στην στήλη 2 η αντίστοιχη στρωματογραφική περιγραφή και στην στήλη 3 το αντίστοιχο εύρος ταχυτήτων της V_{s30} για τον κάθε τύπο. Ο προσδιορισμός της έγκαρσιας ταχύτητας των πρώτων 30 m, V_{s30} , μπορεί να γίνει από τα προφίλ των εγκαρσίων ταχυτήτων (μεταβολή με το βάθος) μέσω της σχέσης:

$$V_{s30} = \frac{Z_p}{\Delta t_z} \quad (1.3)$$

όπου Z_p το βάθος σε μέτρα, το οποίο αποκτά την τιμή 30 στην προκειμένη περίπτωση και Δt_z ο χρόνος κατακόρυφης διαδρομής των εγκαρσίων κυμάτων σε αυτό το μήκος, ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$\Delta t_z = \int_0^{Z_p} \frac{dz}{V_s(z)} \quad (1.4)$$

Πίνακας 1.1. Κατηγοριοποίηση στρωματογραφικών σχηματισμών, σύμφωνα με τον Eurocode 8 με βάση την ταχύτητα V_{s30} (τροποποιημένο από CEN, 2004).

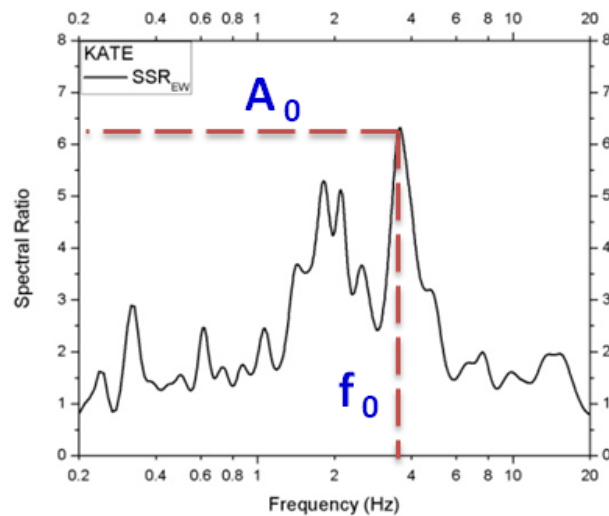
Εδαφικό Τύπος	Περιγραφή του στρωματογραφικού προφίλ	V_{s30} (m/s)
A	Πετρώματα ή άλλος γεωλογικός σχηματισμός, συμπεριλαμβανομένου ασθενέστερου υλικού μέχρι 5 m από την επιφάνεια.	> 800
B	Αποθέσεις από πολύ πυκνές άμμους, χαλίκια, ή πολύ σκληρή αργίλου, τουλάχιστον αρκετά δεκάδες μέτρα πάχους, αυξημένων μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος.	360 - 800

C	Βαθιές αποθέσεις από πυκνές ή μέτρια πυκνές άμμους, χαλίκια, ή σκληρή άργιλο, πάχους από αρκετές δεκάδες μέχρι πολλές εκατοντάδες μέτρα.	180 - 360
D	Αποθέσεις από χαμηλής έως μέτριας συνοχής εδάφη(με ή χωρίς μερικά στρώματα μαλακής συνοχής), ή κυρίως μαλακά έως συνεκτικά εδάφη.	< 180
E	Ένα εδαφικό προφίλ αποτελούμενο από επιφανειακά αλλουβιακά στρώματα με τιμές Vs από τους τύπους C ή D και πάχους μεταξύ 5 και 20 μέτρα, υπερκείμενο σε σκληρότερα υλικά με Vs>800 m/s.	

Για την μελέτη της επίδρασης των τοπικών εδαφικών σχηματισμών και κατ' επέκταση της ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης στα ανώτερα εδαφικά στρώματα, χρησιμοποιούνται τόσο εμπειρικές όσο και θεωρητικές (αναλυτικές) μέθοδοι. Στην πρώτη κατηγορία, ο υπολογισμός της ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης, τόσο του πλάτους ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης (A_0) όσο και της ιδιοσυχνότητας του εδάφους (f_0), επιτυγχάνεται μέσω του εμπειρικού υπολογισμού της συνάρτησης μεταφοράς (transfer function). Μια τέτοια μέθοδος υπολογισμού της συνάρτησης μεταφοράς είναι αυτή του κλασικού φασματικού λόγου (Standard Spectral Ratio, SSR). Η μέθοδος SSR βασίζεται στον υπολογισμό του λόγου των φασμάτων της σεισμικής καταγραφής στην επιφάνεια της θέσης ενδιαφέροντος (π.χ. ένα σημείο μιας ιζηματογενούς λεκάνης) προς την αντίστοιχη καταγραφή σε γειτονικό σημείο της επιφάνειας του υποβάθρου. Στο σχήμα 1.3 δίνεται ένα τυπικό διάγραμμα του λόγου SSR σε συνάρτηση με την συχνότητα, όπου η περιοχή του μεγίστου της καμπύλης αντιστοιχεί στο μέγιστο πλάτος ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης και στην αντίστοιχη θεμελιώδη συχνότητα ενίσχυσης του υπεδάφους. Όμως, η εφαρμογή της μεθόδου προϋποθέτει την ύπαρξη σημαντικού αριθμού καταγραφών ισχυρής κίνησης τόσο στο υπόβαθρο, όσο και σε θέση εδαφικών αποθέσεων, οπότε είναι δύσκολο να εφαρμοστεί σε περιοχές με μέτρια ή χαμηλή σεισμικότητα.

Οι θεωρητικές μέθοδοι για την μελέτη της επίδρασης των τοπικών εδαφικών σχηματισμών βασίζονται στην αξιοποίηση μοντέλων (προσομοιωμάτων) του υπεδάφους, όπως αυτά καθορίζονται από γεωτεχνικές/γεωλογικές μελέτες (δοκιμές υλικών, γεωτρήσεις κ.α.) και από μεθόδους επιφανειακής γεωφυσικής διασκόπησης. Μέσω των σεισμικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης πραγματοποιείται συνήθως ο υπολογισμός της κατανομής της εγκάρσιας ταχύτητας

με το βάθος. Οι σεισμικές μέθοδοι είναι είτε επιφανειακές (σεισμική διάθλαση, MASW), είτε υλοποιούνται μέσα σε γεωτρήσεις (π.χ. μέθοδοι Crosshole/Downhole). Αν και οι μέθοδοι αυτές παρέχουν αξιόπιστες πληροφορίες για τη μεταβολή (προφίλ) της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων με το βάθος, θεωρούνται δαπανηρές και χρονοβόρες (ειδικά οι μέθοδοι Crosshole και Downhole) ενώ παράλληλα, σε αρκετές περιπτώσεις δεν είναι δυνατή η εφαρμογή τους σε αστικά περιβάλλοντα.



Σχ. 1.3. Διάγραμμα του πλάτους ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης σε συνάρτηση με την συχνότητα από την μέθοδο του κλασικού φασματικού λόγου (τροποποιημένο από *Paradopoulos 2013*).

Πολλές γεωφυσικές μέθοδοι για την μελέτη της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών βασίζονται στη χρήση του εδαφικού θορύβου. Οι μέθοδοι αυτές παρουσιάζουν μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, κυρίως για τον λόγο ότι είναι οικονομικές, αλλά και γρήγορες και μπορούν να εφαρμοστούν με σχετική ευκολία σε αστικά περιβάλλοντα. Οι κύριες μέθοδοι του εδαφικού θορύβου είναι οι ακόλουθες:

- Μέθοδος απόλυτων φασμάτων (Kanai Method).
- Μέθοδος του φασματικού λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφης συνιστώσας (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSr).
- Τεχνική ειδικών δικτύων σεισμομέτρων (Array Technique).

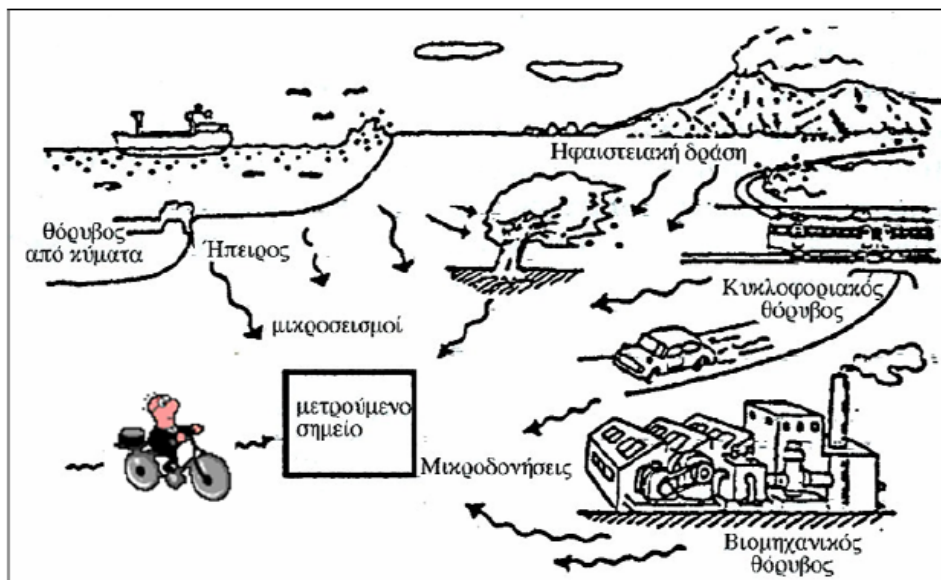
Οι δύο πρώτες μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της θεμελιώδους συχνότητας του εδάφους και μερικώς για την εκτίμηση του πλάτους ενίσχυσης, ενώ η τελευταία χρησιμοποιείται κυρίως για τον υπολογισμό της μεταβολής των εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος. Βασικό μειονέκτημα της τεχνικής των ειδικών δικτύων σεισμομέτρων είναι ότι απαιτεί την χρήση μεγάλου αριθμού σεισμομέτρων.

Η ανάγκη για την χρήση πιο απλών και εύκολων μεθόδων οδήγησε στην εύρεση μεθόδων επεξεργασίας εδαφικού θορύβου οι οποίες να εκτιμούν το τοπικό προφίλ (δομή) της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων (ειδικά των εγκαρσίων κυμάτων) με το βάθος, χωρίς την χρήση μεγάλου αριθμού σεισμομέτρων. Το πρόβλημα αυτό εξετάζεται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής ειδίκευσης με την αντιστροφή των καμπυλών ελλειπτικότητας (HVSr) από καταγραφές μονού σταθμού βάσης. Η μέθοδος αυτή παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς είναι οικονομική και γρήγορη μέθοδος, και μπορεί να εφαρμοστεί σχεδόν σε οποιοδήποτε περιβάλλον. Λόγω των περιορισμών της μεθόδου η μελέτη της αξιοπιστίας της αποτέλεσε το κύριο αντικείμενο έρευνας της παρούσας διατριβής, έτσι ώστε να εκτιμηθεί αν, και σε ποιο βαθμό, μπορεί να αντικαταστήσει/συμπληρώσει τις κλασικές μεθόδους για την εκτίμηση της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών και της μελέτης της τοπικής γεωφυσικής δομής.

1.2. Εδαφικός Θόρυβος

Ως εδαφικός θόρυβος ή μικροθόρυβος ορίζονται οι δονήσεις του εδάφους οι οποίες οφείλονται σε φυσικά αίτια και διαχωρίζονται από τις σεισμικές δονήσεις λόγω του ότι δεν σχετίζονται (συνήθως) με τεκτονική διάρρηξη. Πρόκειται για ελαστικά κύματα χώρου, αλλά και επιφανειακά κύματα, τα οποία διαδίδονται στο υπέδαφος με πολύ μικρά πλάτη ταλάντωσης (10^{-4} με 10^{-2} mm) και τα οποία δεν γίνονται, συνήθως, αισθητά από τον άνθρωπο. Οι πηγές του εδαφικού θορύβου είναι φυσικές (ατμοσφαιρικές και ωκεάνιες) και ανθρωπογενείς, και συχνά είναι πρακτικά σχεδόν τυχαία κατανεμημένες στον χώρο. Όπως η σεισμική ενέργεια που προέρχεται από τη διάρρηξη σε ένα σεισμικό ρήγμα, έτσι και ο μικροθόρυβος

εξαρτάται από την πηγή προέλευσης, την διαδρομή που διένυσε και από τις τοπικές εδαφικές συνθήκες όπου καταγράφηκε. Στο σχήμα 1.4 δίνεται μία συνοπτική αναπαράσταση των βασικών πηγών του εδαφικού θορύβου.



Σχ. 1.4. Τυπικές πηγές εδαφικού θορύβου (από Τσελέντη, 1997).

1.2.1. Πηγές του Εδαφικού Θορύβου

Για την κατανόηση του εδαφικού θορύβου θα πρέπει να εξεταστούν οι πηγές απ' όπου δημιουργείται. Αυτός ήταν και ο λόγος που πολλοί ερευνητές εργάστηκαν πάνω σε αυτό το ερευνητικό αντικείμενο, ώστε να διαχωρίσουν το θόρυβο από άλλες καταγραφές και να τον ταξινομήσουν σε κατηγορίες. Μία πολύ καλή σύνοψη παρουσιάζεται στην δημοσίευση των **Bonnefoy-Claudet et al. (2006)**.

Από τους πρώτους που προσπάθησαν να ερμηνεύσουν την προέλευση του μικροθορύβου ήταν ο **Gutenberg (1958)**. Αργότερα οι **Asten (1978)** και **Asten and Henstridge (1984)** ομαδοποίησαν τις κύριες πηγές θορύβου, ανάλογα με το συχνотικό τους περιεχόμενο. Τα κυριότερα συμπεράσματα που κατέληξαν, αν και με διαφορετικά συχνотικά όρια για το είδος της πηγής, είναι η διάκριση του εδαφικού θορύβου σε φυσικό και ανθρωπογενή ή σε μικροσεισμικό και μικροδονήσεις, όπως παρουσιάζεται σε πολλές δημοσιεύσεις, αντίστοιχα. Στον πίνακα 1.2 δίνονται τα αποτελέσματα στα οποία κατέληξαν για το είδος της πηγής

(πρώτη στήλη), ανάλογα με το συχνοτικό περιεχόμενο της, τόσο ο **Gutenberg (1958)**, όσο και οι **Asten (1978)** και **Asten and Henstridge (1984)**, αντίστοιχα (δεύτερη και τρίτη στήλη).

Πίνακας 1.2. Πηγές του εδαφικού θορύβου, ανάλογα με το συχνοτικό περιεχόμενό τους, από τους Gutenberg (1958), Asten (1978) και Asten and Henstridge (1984) (τροποποιημένο από τους Bennefoy-Claudet et al., 2006).

Πηγές	Gutenberg (1958)	Asten (1978, 1984)
Ωκεάνια κύματα κατά μήκος των ακτογραμμών	0.05-0.1 Hz	0.5-1.2 Hz
Μουσώνες/Μακράς κλίμακας μετεωρολογικά φαινόμενα	0.1-0.25 Hz	0.16-0.5 Hz
Κυκλώνες στον ωκεανό	0.3-1 Hz	0.5-3 Hz
Τοπικής κλίμακας μετεωρολογικά φαινόμενα	1.4 Hz	
Ηφαιστειακές δονήσεις	2-10 Hz	
Αστικός θόρυβος	1-100 Hz	1.4-30 Hz

Στην συνέχεια, πολλοί ήταν οι ερευνητές που προσπάθησαν να ερμηνεύσουν τους μηχανισμούς γένεσης του μικροθορύβου εκτελώντας μετρήσεις χωρικά και χρονικά ανεξάρτητες ή εξαρτώμενες. Οι **Frantti et al. (1962)**, **Frantti (1963)**, **Peterson (1983)**, **Stutzmann et al. (2000)**, **Okada (2003)**, **Berger and Davis (2004)** και **McNamara and Buland (2004)** συγκρίνοντας καταγραφές από διαφορετικές γεωλογικές και γεωγραφικές συνθήκες, αλλά και χρονικές στιγμές, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι περίπου στην συχνότητα του 1 Hz υπάρχει μία αλλαγή στην συμπεριφορά του θορύβου, καθώς και μεγάλες αλλαγές που παρατηρήθηκαν από θέση σε θέση. Για την διάκριση του θορύβου σε φυσικό και ανθρωπογενή, οι **Bernard (1941a,b)**, **Longuet-Higgins (1950)**, **Kanai and Tanaka (1961)**, **Haubrich et al. (1963)**, **Toksöz and Lacoss (1968)**, **Horike (1985)**, **Akamatsu et al. (1992)**, **Kamura (1997)**, **Seo (1997)**, **Friedrich et al. (1998)**, **Yamanaka et al. (1993)**, **Tindle and Murphy (1999)**, **Grevemeyer et al. (2000)**, **Okeke and Asor (2000)**, **Bromirski (2001)**, **Satoh et al. (2001)**, **Bromirski and Duennebier (2002)**, **Bowen et al. (2003)**, **Essen et al. (2003)**, **Okada (2003)**, **Bonnefoy-Claudet (2004)**, **Gorbatikov et al. (2004)**, **Dolenc and Dreger (2005)** παρατηρώντας ότι οι καταγραφές μεγάλης περιόδου μεταβάλλονται αργά χρονικά, ενώ οι αντίστοιχες χαμηλής περιόδου μεταβάλλονται ημερησίως, συμπέραναν ότι οι πρώτες οφείλονται σε φυσικά αίτια (ωκεάνια και μετεωρολογικά) ενώ οι δεύτερες σε ανθρωπογενή αίτια. Πιο συγκεκριμένα, κατά

την μελέτη των ημερήσιων μεταβολών, παρατηρούνται μέγιστες τιμές κατά την διάρκεια της μέρας και ελάχιστες κατά την διάρκεια της νύχτας, κυρίως εξαιτίας της επίδρασης της ανθρώπινης δραστηριότητας στις καταγραφές.

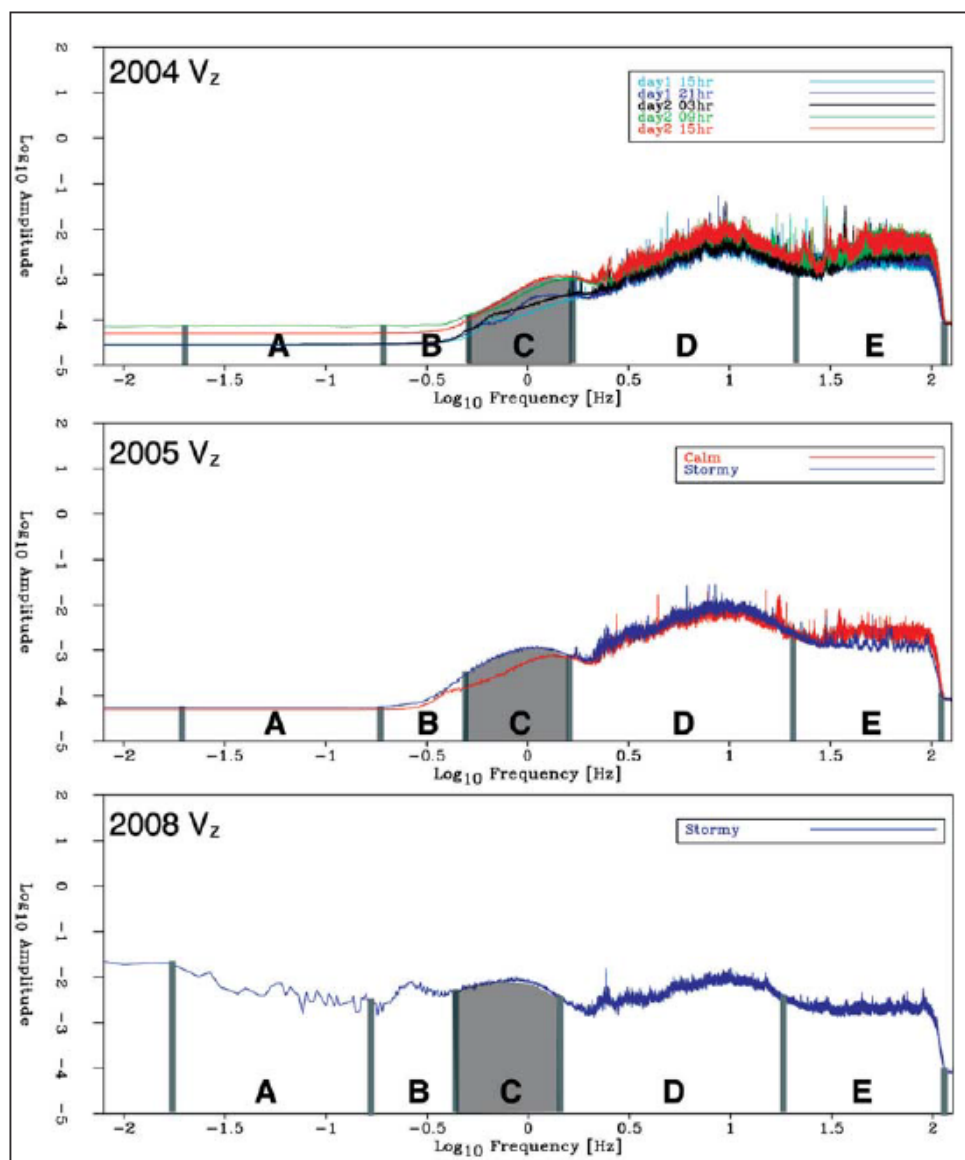
Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα των μέχρι τώρα ερευνών, από την κατηγοριοποίηση των πηγών που εδαφικού θορύβου και με βάση το συχνотικό περιεχόμενο, οι βασικές κατηγορίες, κατά τους **Bonnefoy-Claudet et al. (2006)** είναι:

- Για συχνότητες < 0.5 Hz ο εδαφικός θόρυβος δημιουργείται από την δράση των ωκεανών και τα μακράς κλίμακας μετεωρολογικά φαινόμενα.
- Για κύματα με συχνότητα κοντά στο 1 Hz οφείλεται στον αέρα και σε τοπικά μετεωρολογικά φαινόμενα.
- Για συχνότητες > 1 Hz, οφείλεται κυρίως στην ανθρώπινη δραστηριότητα.

Ωστόσο, το όριο του 1 Hz δεν είναι σταθερό κατά τον **Seo (1997)**, και μπορεί να μετατοπίζεται σε υψηλότερες και χαμηλότερες συχνότητες ανάλογα με της γεωλογικές συνθήκες. Για παράδειγμα, σε μια βαθιά λεκάνη με χαλαρά ιζήματα το όριο συχνότητας του 1 Hz για την διάκριση φυσικών και ανθρωπογενών πηγών μετατοπίζεται σε χαμηλότερες συχνότητες. Ο **Seo (1997)** πρότεινε ότι αν η καταγραφή έχει μεταβολές στα πλάτη κατά έναν παράγοντα 3-4 κατά την διάρκεια μέρας και νύχτας, τότε ο θόρυβος οφείλεται κυρίως σε ανθρωπογενή αίτια.

Ένα παράδειγμα από νεότερη έρευνα μελέτης του εδαφικού θορύβου (**Ridder and Dellinger, 2011**) που πραγματοποιήθηκε στο πεδίο δοκιμών Valhall Field της Νορβηγίας ώστε να προσδιοριστούν τα είδη των πηγών του μικροθορύβου στο συγκεκριμένο πεδίο, παρουσιάζεται στο σχήμα 1.5. Στο σχήμα αυτό δίνονται τα αποτελέσματα των μέσων φασμάτων της κατακόρυφης συνιστώσας σε δεκαδική λογαριθμική κλίμακα, για τα έτη 2004 (πάνω), 2005 (μέση) και 2008 (κάτω). Η χρωματική κλίμακα που δίνεται στο πάνω δεξιά μέρος του κάθε διαγράμματος δηλώνει για το έτος 2004 την διάρκεια των ωρών για κάθε μέρα που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, για το έτος 2005 την μεταβολή της μέτρησης από ήσυχη (μπλε) σε θορυβώδη (κόκκινο) λόγω καταιγίδας και για το 2008 μόνο θορυβώδη μέτρηση κατά τη διάρκεια καταιγίδας. Η κατηγοριοποίηση των πηγών

έγινε με βάση την μεταβολή των πλατών, ανάλογα με το αντίστοιχο εύρος συχνοτήτων, το οποίο δίνεται στα διαγράμματα με αντίστοιχα λατινικά σύμβολα. Το εύρος συχνοτήτων A (<0.18 Hz) οφείλεται σε δράση ωκεάνιων κυμάτων, τα διαστήματα B ($0.18-0.35$ Hz) και C ($0.35-1.75$ Hz) στην επίδραση καιρικών φαινομένων του ωκεανού και του θαλάσσιου πυθμένα και τα D ($1.75-18$ Hz) και E (>18 Hz) στην ανθρώπινη δραστηριότητα.



Σχ. 1.5. Φάσματα συχνοτήτων για τις κατακόρυφες συνιστώσες εδαφικού θορύβου για τα έτη 2004 (πάνω), 2005 (μέση) και 2008 (κάτω) και κατηγοριοποίηση των πηγών θορύβου ανάλογα με το εύρος συχνοτήτων: A (<0.18 Hz) εξαιτίας της δράσης ωκεάνιων κυμάτων, B ($0.18-0.35$ Hz) και C ($0.35-1.75$ Hz) λόγω καιρικών φαινομένων στον ωκεανό και στον θαλάσσιο πυθμένα, D ($1.75-18$ Hz) και E (>18 Hz) λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας. Η χρωματική κλίμακα πάνω δεξιά του κάθε σχήματος δηλώνει για το έτος 2004 την διάρκεια των ωρών όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις για κάθε μέρα, για το 2005 την μεταβολή

της μέτρησης από ήσυχη σε θορυβώδη λόγω καταιγίδας και για το 2008 ότι η μέτρηση έγινε κατά την διάρκεια καταιγίδας (από *Ridder and Dellinger, 2011*).

1.2.2. Η Φύση του Εδαφικού Θορύβου

Για την σωστή αξιοποίηση των μεθόδων επεξεργασίας του εδαφικού θορύβου, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η κατανόηση της σύνθεσης των κυμάτων που τον αποτελούν. Γενικά ο θόρυβος αποτελείται από κύματα χώρου (P, SV, SH) και επιφανειακά κύματα (Rayleigh και Love). Τα ερωτήματα που τίθενται, με βάση τη μελέτη των **Bonnefoy-Claudet et al. (2006)**, αφορούν κυρίως την αναλογία συμμετοχής αυτών των κυμάτων στον εδαφικό θόρυβο. Δηλαδή, ποιες είναι οι σχετικές αναλογίες των κυμάτων χώρου και επιφανειακών, ποιες είναι οι σχετικές αναλογίες των Rayleigh και Love, και για τα Rayleigh κύματα ποια είναι η σχετική αναλογία μεταξύ της θεμελιώδους ιδιομορφής και των ανώτερων αρμονικών όρων.

Πολλοί ερευνητές ερεύνησαν την σχετική αναλογία των κυμάτων χώρου και των επιφανειακών (**Douze, 1964, 1967, Toksöz and Lacoss, 1968, Li et al., 1984, Horike, 1985, Yamanaka et al., 1994, Bonnefoy-Claudet, 2004, Bonnefoy-Claudet et al., 2006**). Αν και τα αποτελέσματα τους διαφέρουν για το ποσοστό της συμμετοχής των διαφόρων κυμάτων, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ανάλογα με το εύρος συχνοτήτων υπάρχουν και διαφορετικές αναλογίες. Επίσης, η χωρική κατανομή των πηγών καθορίζει την αναλογία των κυμάτων, όπως και η αντίθεση εμπέδησης μεταξύ βραχώδους υποβάθρου και επιφανειακών ιζημάτων.

Για την κατανομή των Rayleigh και Love κυμάτων οι **Ohmachi and Umezono (1998), Chouet et al. (1998), Okada (2003), Yamamoto (2000), Arai and Tokimatsu (1998, 2000), Schmidt (1981), Cornou (2002)** και **Cornou et al. (2003a,b)** καταλήγουν σε διαφορετικές σχετικές αναλογίες. Στον πίνακα 1.3 δίνονται τα αποτελέσματα των ερευνητών αυτών, όπου στην πρώτη στήλη παρουσιάζεται η αντίστοιχη αναφορά, στην δεύτερη το εύρος συχνοτήτων, στην τρίτη και τέταρτη το ποσοστό των Rayleigh και Love κυμάτων, αντίστοιχα, και στην πέμπτη στήλη το είδος της γεωλογίας των θέσεων μελέτης. Σε γενικές γραμμές, αυτές οι αναλογίες εξαρτώνται από το είδος της πηγής, από την διεύθυνση παρατήρησης, από τις τοπικές γεωλογικές συνθήκες (πάχος και γεωμετρία ιζημάτων, αντίθεσης εμπέδησης) και από το συχνοτικό περιεχόμενο (για $f > 1\text{Hz}$ σε αστικά περιβάλλοντα

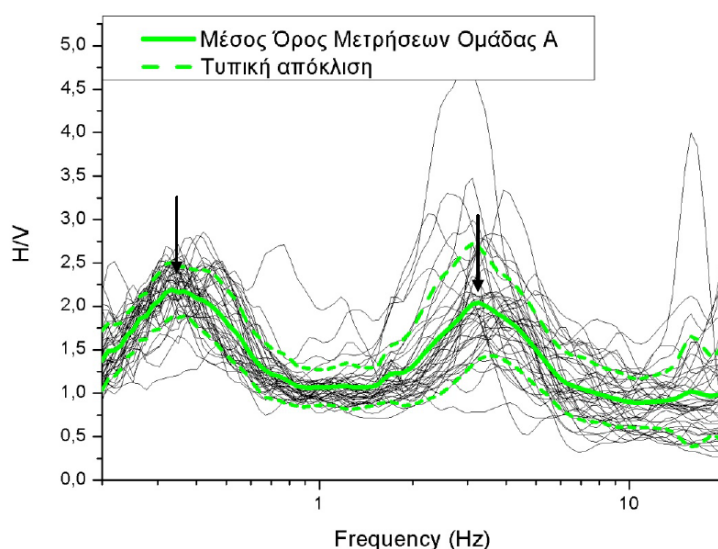
υπερισχύουν τα Love κύματα). Πιο πρόσφατες έρευνες από τους **Bonnefoy-Claudet et al. (2008)**, **Albarello and Lunedei (2010)** και **Endrun (2011)** έδειξαν ότι η αναλογία των κυμάτων στο εδαφικό θόρυβο έχει άμεση εξάρτηση με την πηγή του θορύβου και με τις τοπικές γεωλογικές συνθήκες (τιμή εμπέδησης). Συγκεκριμένα, οι **Bonnefoy-Claudet et al. (2008)** βρήκαν ότι για υψηλό λόγο αντίθεσης εμπέδησης ($Z_c > 4$) ο εδαφικός θόρυβος αποτελείται κυρίως από θεμελιώδη Rayleigh και Love. Για μέτρια τιμή του λόγου αντίθεσης εμπέδησης ($3 < Z_c < 4$) τα θεμελιώδη Love κύματα υπερिशύουν. Για χαμηλή τιμή του λόγου αντίθεσης εμπέδησης ($Z_c < 3$) ο εδαφικός θόρυβος αποτελείται κυρίως από θεμελιώδη Love και S κύματα.

Πίνακας 1.3. Ποσοστά κυμάτων χώρου στον εδαφικό θόρυβο (τροποποιημένο από *Bonnefoy-Claudet et al., 2006*).

	Εύρος συχνοτήτων	Ποσοστό κυμάτων Rayleigh	Ποσοστό Love κυμάτων	Γεωλογία θέσεων
Chouet et al. (1998)	>2 Hz	23%	70%	Ηφαιστειακό
Yamamoto (2000)	1-8 Hz	< 50%	>50%	Ιζηματογενή (πάχος<100 m)
Arai and Tokimatsu (1998)	1-12 Hz	40%	60%	Ιζηματογενή (πάχος<100 m)
Cornou (2002)	0.1-1 Hz	50%	50%	Ιζηματογενή (πάχος>50 m)
Okada (2003)	0.4-1 Hz	<50%	≥50%	Ιζηματογενή (πάχος>50 m)

Για την κατανομή των θεμελιωδών κυμάτων Rayleigh και των ανώτερων αρμονικών όρων τους στον εδαφικό θόρυβο, οι **Stephenson (2003)**, **Konno and Ohmachi (1998)**, **Lermo and Chavez-Garcia (1994)**, **Mucciarelli (1998)**, **Seekins et al. (1996)** καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι αν η καμπύλη HVSR έχει ένα μέγιστο, τότε αυτό οφείλεται στα θεμελιώδη Rayleigh κύματα. Οι **Bodin et al. (2001)**, **Asten and Dhu (2002)**, **Asten (2004)** υποστηρίζουν ότι η ύπαρξη δεύτερου μεγίστου στην καμπύλη HVSR οφείλεται σε ανώτερους αρμονικούς όρους των Rayleigh. Ωστόσο οι **Bonnefoy-Claudet (2004)** υποστηρίζουν ότι αυτό οφείλεται σε κύματα χώρου. Ο **Tokimatsu (1997)** απέδειξε ότι σε περίπτωση αντιστροφής ταχυτήτων με το βάθος δημιουργούνται ανώτεροι αρμονικοί όροι των Rayleigh κυμάτων, οπότε η δομή του εδάφους διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο. Ωστόσο, από σύγκριση καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR με διπλή κορυφή και με την τοπική γεωλογία, οι **Anthymidis et al. (2008)** και **Papadopoulos et al. (2013)** κατέληξαν, τόσο με πειραματικά δεδομένα όσο και με τη χρήση προσομοιώσεων, ότι αν και η πρώτη κορυφή μπορεί

να οφείλεται στο λόγο της αντίθεσης εμπέδησης μεταξύ υποβάθρου και επιφανειακών ιζηματογενών σχηματισμών, η δεύτερη μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη σημαντικής αντίθεσης εμπέδησης εντός των ιζηματογενών σχηματισμών, όταν η τοπική γεωλογία παρουσιάζει τέτοια δομή. Στο σχήμα 1.6 παρουσιάζετε μια τυπική καμπύλη HVSr, για την περίπτωση διπλής κορυφής. Η πρώτη κορυφή με συχνότητα ~ 0.35 Hz οφείλεται σε ενίσχυση που συνδέεται πιθανά με την αντίθεση εμπέδησης μεταξύ υποβάθρου και ιζηματογενών στρωμάτων, ενώ η δεύτερη κορυφή με συχνότητα ~ 3.5 Hz συνδέεται με την αντίθεση εμπέδησης η οποία αντιστοιχεί στη διαφορά δυσκαμψίας μεταξύ Τεταρτογενών ιζημάτων και πολύ συνεκτικών υποκείμενων Νεογενών σχηματισμών.



Σχ. 1.6. Καμπύλη HVSr με διπλή κορυφή λόγω διπλής ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης από το υπόβαθρο μέχρι την επιφάνεια για την περιοχή των Χανίων (από *Paradopoulos et al.*, 2013).

1.3. Χρήση ή Αξιοποίηση του Εδαφικού Θορύβου

Η βασική αξιοποίηση του εδαφικού θορύβου βασίζεται στο ότι παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την επιφανειακή δομή και την ενίσχυση της σεισμικής κίνησης λόγω των τοπικών εδαφικών συνθηκών, χωρίς όμως να έχει πλήρως τεκμηριωθεί και κατανοηθεί το θεωρητικό υπόβαθρο αυτής της αξιοποίησης και ερμηνείας του. Οι πληροφορίες που δυνητικά μπορεί να παρέχουν οι καταγραφές θορύβου αφορούν την ιδιοσυχνότητα του τοπικού εδαφικού προφίλ πάνω από το

βραχώδες υπόβαθρο, το πλάτος ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης, τη δομή του εδάφους εκφρασμένη σε σεισμικές ταχύτητες (V_p , V_s), και από αυτήν την μέση ταχύτητα των πρώτων 30 μέτρων των εγκαρσίων κυμάτων (V_{s30}).

Όπως προαναφέρθηκε, οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της επιφανειακής δομής και των χαρακτηριστικών ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης με τη χρήση καταγραφών του εδαφικού θορύβου είναι η τεχνική των ειδικών δικτύων σεισμομέτρων (Array Technique), καθώς και των καταγραφών μονού σταθμού (Single Station). Στην πρώτη μέθοδο οι κυριότερες τεχνικές, οι οποίες αναπτύχθηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων είναι η μέθοδος της χωρικής αυτοσυσχέτισης (Spatial Auto-Correlation Method ή SPAC, **Aki 1957, Asten 1978**) και η μέθοδος συχνότητας- κυματάριθμου (frequency – wavenumber ή f-k, **Capon et al. 1967, Capon 1969, Lacoss et al. 1969**). Η μέθοδος επεξεργασίας εδαφικού θορύβου μονού σταθμού βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά στον υπολογισμό του φασματικού λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα (HVSr) της καταγραφής θορύβου για τον υπολογισμό κυρίως της ιδιοσυχνότητας του εδάφους (**Nogoshi and Igarashi 1971, Nakamura 1989, 1996, 2000**). Από την αντιστροφή, είτε της καμπύλης διασποράς (όπως αυτή προσδιορίζεται από διάφορες τεχνικές π.χ. SPAC ή f-k), είτε ενίοτε της καμπύλης HVSr μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες για τη σεισμική δομή του εδάφους.

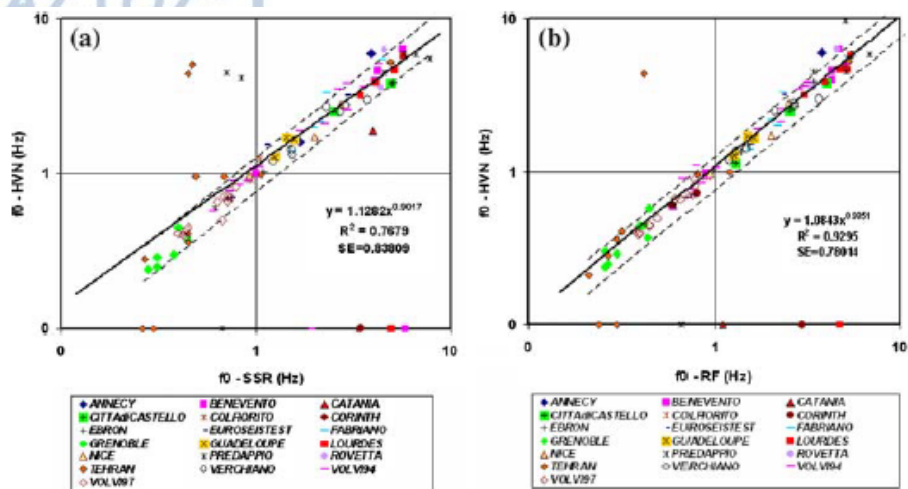
Για την αξιοπιστία των μεθόδων του μικροθορύβου οι **Chavez-Garcia et al. (1990), Field et al. (1990), Duval et al. (1994), Teves-Costa et al. (1996), Bour et al. (1998), Riepl et al. (1998), Bindi et al. (2000), Semblat et al. (2000), Duval et al. (2001), Nguyen et al. (2004)** καταλήγουν, από την σύγκριση των αποτελεσμάτων του λόγου της οριζόντιας προς της κατακόρυφη συνιστώσα (HVSr) με αυτές που προκύπτουν από την συνάρτηση μεταφοράς (transfer function), ότι η μέθοδος HVSr παρέχει αξιόπιστα την θεμελιώδη συχνότητα του εδάφους, αλλά όχι το πλάτος ενίσχυσης. Στα ίδια συμπεράσματα καταλήγουν οι **Field and Jacob (1993), Lachet and Bard (1994), Lermo and Chavez-Garcia (1994a), Dravinski et al. (1996), Wakamatsu and Yasui (1996), Al Yuncha Luzon (2000), Fah et al. (2001), Maresca et al. (2003), Bonnefoy-Claudet (2004), Cornou et al. (2004), Guillier et al. (2006), Bonnefoy-Claudet et al. (2006)** χρησιμοποιώντας συνθετικές καταγραφές εδαφικού

θορύβου. Ωστόσο, οι **Lermo and Chavez-Garcia (1994b)**, **Seekins et al. (1996)**, **Mucciarelli (1998)**, **Chavez-Garcia et al. (1999)**, **Zaslavsky et al. (2000)**, **Horike et al. (2001)**, **Rodriguez and Midorikawa (2002)** βρήκαν σε πολλές περιπτώσεις καλή συμφωνία και για το πλάτος ενίσχυσης που προκύπτει από τη μέθοδο HVSR.

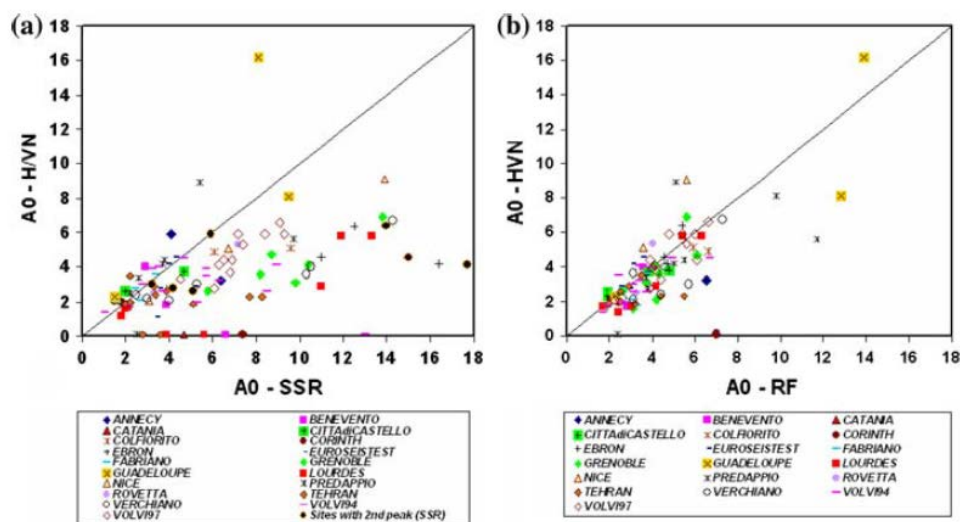
Πιο πρόσφατες έρευνες πραγματοποιήθηκαν από τους **Haghshenas et al. (2008)** για την αξιοπιστία της μεθόδου HVSR στον υπολογισμό της ιδιοσυχνότητας του εδάφους και του πλάτους ενίσχυσης από την επεξεργασία δεδομένων εδαφικού θορύβου, ασθενούς και ισχυρής κίνησης σε συνολικά 190 θέσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι ερευνητές αυτοί υπολόγισαν τις ιδιοσυχνότητες και τα πλάτη ενίσχυσης, τα οποία προκύπτουν από την τεχνική HVSR για δεδομένα εδαφικού θορύβου και τα σύγκριναν με αυτά που προκύπτουν από τις μεθόδους Standard Spectral Ratio (SSR) και HVSR (HVSRE ή RF, μέθοδος φασματικού λόγου της οριζόντιας προς τη κατακόρυφη συνιστώσα σε καταγραφές σεισμικής κίνησης) για δεδομένα ασθενούς κίνησης (weak motion). Επίσης, υπολόγισαν αυτές τις παραμέτρους με δεδομένα εδαφικού θορύβου και ισχυρής κίνησης χρησιμοποιώντας τις μεθόδους HVSR και RF, αντίστοιχα.

Στο σχήμα 1.7 και 1.8 παρουσιάζεται η σύγκριση των ιδιοσυχνοτήτων και των πλατών ενίσχυσης, αντίστοιχα, μεταξύ των μεθόδων HVSR - SSR (αριστερά) και HVSR - RF (δεξιά) για δεδομένα εδαφικού θορύβου και ασθενούς κίνησης. Στο σχήμα 1.9 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις ιδιοσυχνότητες (αριστερά) και τα πλάτη ενίσχυσης (δεξιά) μεταξύ των μεθόδων HVSR και RF για δεδομένα εδαφικού θορύβου και ισχυρής κίνησης.

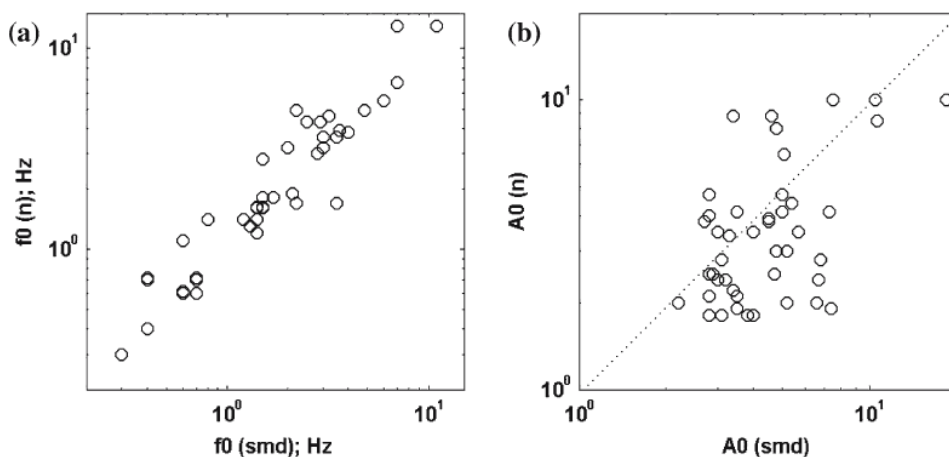
Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν οι ερευνητές αυτοί, είναι ότι η μέθοδος HVSR παρέχει πολύ ικανοποιητικά τον υπολογισμό της ιδιοσυχνότητας του εδάφους. Ωστόσο, χρειάζεται προσοχή όταν η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμόζεται σε περιβάλλοντα βαθιών λεκανών ($f_0 < 1$ Hz) και σε περιπτώσεις όπου η αντίθεση εμπέδησης μεταξύ υποβάθρου και ανώτερων σχηματισμών είναι χαμηλή. Για τον υπολογισμό του μεγίστου πλάτους ενίσχυσης, η μέθοδος HVSR δεν παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα, αλλά μπορεί να χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί μία προσέγγιση για το ελάχιστο όριο αυτού του πλάτους.



Σχ. 1.7. Σύγκριση των ιδιοσυχνότητων της μεθόδου HVSR με τη μέθοδο SSR (αριστερά) και της μεθόδου HVSR με της RF (από Haghsheenas et al., 2008).



Σχ. 1.8. Σύγκριση των πλατών της μεθόδου HVSR με τη μέθοδο SSR (αριστερά), καθώς και της μεθόδου HVSR με τη μέθοδο RF (δεξιά), (από Haghsheenas et al., 2008).



Σχ. 1.9. Σύγκριση των ιδιοσυχνότητων (αριστερά) και των πλατών (δεξιά), τα οποία προκύπτουν από τη μέθοδο HVSR για δεδομένα εδαφικού θορύβου και τη μέθοδο RF για δεδομένα ισχυρής κίνησης (από Haghsheenas et al., 2008).

1.3.1. Μέθοδος HVSR

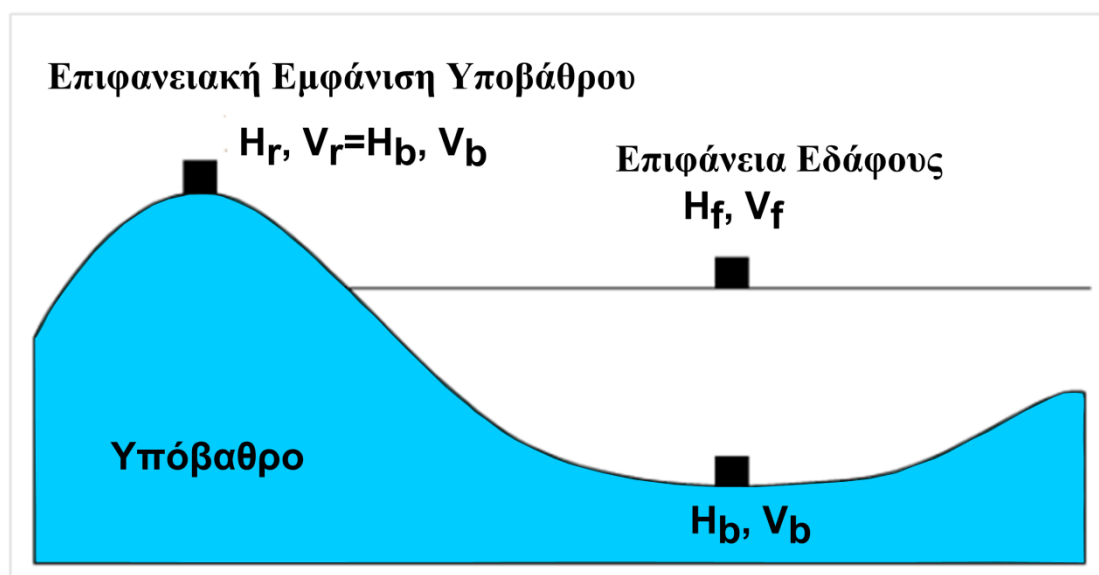
Για την αξιοπιστία της μεθόδου του φασματικού λόγου της οριζόντιας προς κατακόρυφης συνιστώσας του εδαφικού θορύβου (Horizontal to Vertical Spectral Ratio - HVSR) είναι χρήσιμο να εξεταστεί το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου. Οι πρώτοι που πρότειναν τη μέθοδο αυτή ήταν οι **Nogoshi - Igarashi (1971)**, βασιζόμενοι στην υπόθεση ότι ο εδαφικός θόρυβος αποτελείται από επιφανειακά κύματα. Με βάση αυτήν την υπόθεση πολλοί ερευνητές (π.χ. **Field and Jacob, 1993, Lachet and Bard, 1994, Ansary et al., 1995, Horike, 1996, Tokimatsu et al., 1996, Konno and Ohmachi, 1998**) κατέληξαν στα ακόλουθα συμπεράσματα (βλέπε **Bard, 1999**):

- Ο λόγος HVSR οφείλεται και απεικονίζει κυρίως την ελλειπτικότητα των Rayleigh κυμάτων, εξαιτίας της κυριαρχίας τους στην κατακόρυφη συνιστώσα.
- Η ελλειπτικότητα είναι εξαρτώμενη της συχνότητας και εμφανίζει ένα μέγιστο κοντά στην θεμελιώδη συχνότητα στην περίπτωση που ο λόγος εμπέδησης μεταξύ υποβάθρου και επιφανειακών σχηματισμών είναι μεγάλος. Αυτό το μέγιστο αντιστοιχεί σε μηδενισμό της κατακόρυφης συνιστώσας εξαιτίας της αλλαγής της περιστροφικής κίνησης του θεμελιώδους Rayleigh κύματος, από αριστερόστροφη σε δεξιόστροφη, στη συχνότητα αυτή.
- Η τιμή του λόγου εμπέδησης μεταξύ υποβάθρου και επιφανειακών σχηματισμών ώστε να υπάρξει σαφές μέγιστο στην καμπύλη ελλειπτικότητας πρέπει να είναι $\geq 2.5-3$.

Ωστόσο για την αξιοπιστία του θεωρητικού πλαισίου της μεθόδου HVSR, πολλοί ερευνητές κατέληξαν ότι το παραπάνω πλαίσιο είναι σωστό αλλά όχι επαρκές. Ο **Horike (1996)** υποστήριξε ότι αυτή η υπόθεση, στην οποία βασίζεται η μέθοδος, μπορεί να υπάρξει μόνο σε απλές δομές (όπως π.χ. ενός στρώματος πάνω από ημχώρο). Επίσης, η Airy φάση των Love κυμάτων εμφανίζεται σε συχνότητα πολύ κοντά στη θεμελιώδη συχνότητα των S κυμάτων ενώ ότι η κατακόρυφη συνιστώσα είναι ευαίσθητη στα κύματα χώρου (P, SV) (**Konno and Ohmachi, 1998**).

Η μέθοδος HVSR εξελίχθηκε από τον **Nakamura (1989)**, ο οποίος αρχικά υποστήριξε ότι η επίδραση των επιφανειακών κυμάτων στον εδαφικό θόρυβο μπορεί να αγνοηθεί. Πιο συγκεκριμένα, ο εν λόγω ερευνητής θεώρησε ότι η οριζόντια συνιστώσα οφείλεται σε πολλαπλές ανακλάσεις εγκάρσιων, SH, κυμάτων και η κατακόρυφη συνιστώσα σε πολλαπλές ανακλάσεις διαμήκων, P, κυμάτων με το τελικό αποτέλεσμα να σχετίζεται με την συνάρτηση μεταφοράς (transfer function) των S κυμάτων. Ωστόσο, αυτή η υπόθεση δέχτηκε πολλές κριτικές (π.χ. **Kubo, 1995**). Για το λόγο αυτό ο Nakamura προχώρησε σε νεότερες, αναθεωρημένες θεωρήσεις για τη μέθοδο (**Nakamura, 1996, 2000**).

Με βάση την πιο πρόσφατη σχετική ερμηνεία, ο **Nakamura (2000)** μετονόμασε την τεχνική HVSR σε QTS (Quasi Transfer Spectral). Για τον υπολογισμό του QTS θεώρησε ένα απλοποιημένο μοντέλο μιας απλής ιζηματογενούς λεκάνης, αποτελούμενης από ένα στρώμα πάνω από ημιχώρο, με καταγραφή εδαφικού θορύβου που αποτελείται από επιφανειακά κύματα και κύματα χώρου. Στο σχήμα 1.10 δίνεται σχηματικά η μορφή αυτής της λεκάνης, όπου H_f και V_f το φάσμα του θορύβου της οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας στην επιφάνεια του ιζηματογενούς στρώματος και H_b και V_b το φάσμα του θορύβου της οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας του υποβάθρου, αντίστοιχα.



Σχ. 1.10. Τυπική γεωλογική δομή ενός στρώματος πάνω από ημιχώρο και καταγραφές εδαφικού θορύβου σε διάφορες θέσεις (τροποποιημένο από **Nakamura, 2000**)

Τα φάσματα της οριζόντιας, H_f , και κατακόρυφης, V_f , συνιστώσας στην επιφάνεια του εδάφους ορίζονται ως:

$$H_f = A_h * H_b + H_s \quad (1.5)$$

$$V_f = A_v * V_b + V_s \quad (1.6)$$

$$T_h = \frac{H_s}{H_b} \quad (1.7)$$

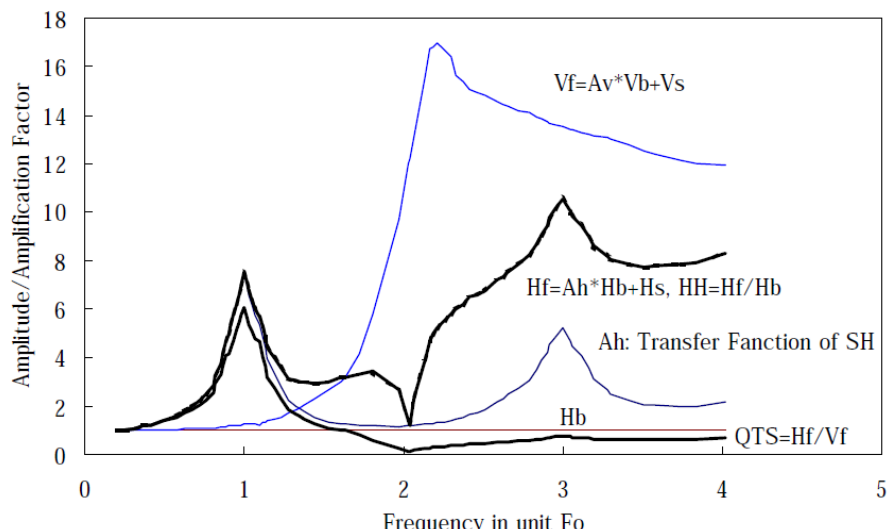
$$T_v = \frac{V_s}{V_b} \quad (1.8)$$

όπου A_h , A_v : ο παράγοντας ενίσχυσης στην οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα αντίστοιχα, H_s και V_s : το φάσμα της οριζόντιας και κατακόρυφης διεύθυνσης κίνησης των Rayleigh κυμάτων, ενώ T_h και T_v είναι οι παράγοντες ενίσχυσης για την οριζόντια και κατακόρυφη κίνηση στην επιφάνεια της ιζηματογενούς λεκάνης εξαιτίας της σεισμικής κίνησης στο υπόβαθρο. Από την σχέση (1.8) προκύπτει ότι αν δεν υπάρχει επίδραση από Rayleigh κύματα, τότε $V_f \approx V_b$, ενώ αν το V_f είναι πολύ μεγαλύτερο από το V_b συμπεραίνεται ότι η επίδραση των Rayleigh είναι κυρίαρχη. Με τη χρήση των σχέσεων (1.5) και (1.6) ο λόγος QTS υπολογίζεται ως:

$$QTS = \frac{H_f}{V_f} = \frac{A_h * H_b + H_s}{A_v * V_b + V_s} = \frac{H_b}{V_b} \cdot \frac{[A_h + \frac{H_s}{H_b}]}{[A_v + \frac{V_s}{V_b}]} \quad (1.9)$$

Στην σχέση (1.9) γίνεται η υπόθεση ότι ισχύει $H_b/V_b \approx 1$, για μεγάλο εύρος συχνοτήτων (**Nakamura, 1989**), δηλαδή ο φασματικός λόγος οριζόντιας προς κατακόρυφη σεισμική κίνηση στο υπόβαθρο είναι περίπου ίσος με την μονάδα. Στο σχήμα 1.11 παρουσιάζεται η σχηματική σύγκριση μεταξύ των ποσοτήτων της οριζόντιας (H_f) και κατακόρυφης συνιστώσας (V_f), της QTS, της θεωρητική τιμή ενίσχυσης που προκύπτει από την συνάρτηση μεταφοράς (transfer function), και της τεχνικής SSR ($HH=H_f/H_b$). Τα συμπεράσματα που προκύπτουν για την ιδιοσυχνότητα είναι ότι το μέγιστο της καμπύλης της QTS παρουσιάζει καλή ταύτιση με αυτό της συνάρτησης μεταφοράς. Για το πλάτος ενίσχυσης, η συνάρτηση QTS το υποεκτιμά σε σχέση με το θεωρητικό πλάτος της συνάρτησης μεταφοράς, ενώ η H_f και HH (SSR) υπερεκτιμούν το πλάτος στην περιοχή του δεύτερου μεγίστου, με

αποτέλεσμα η ιδιοσυχνότητα να είναι πολύ μεγαλύτερη από την θεωρητική, στην περίπτωση που υπάρχει μεγάλη επίδραση των κυμάτων Rayleigh.



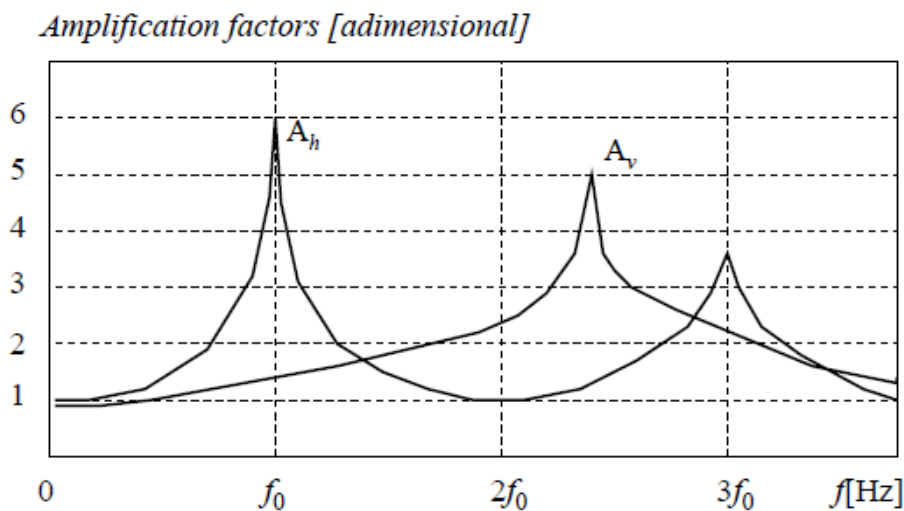
Σχ. 1.11. Σύγκριση των φασμάτων της οριζόντιας (H_f) και κατακόρυφης (V_f) συνιστώσας, της συνάρτησης QTS και της θεωρητικής οριζόντιας συνάρτησης ενίσχυσης των κυμάτων χώρου, A_h (από Nakamura, 2000).

Επίσης, από την σχέση (5) προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Στην περίπτωση που η επιρροή των Rayleigh κυμάτων είναι μικρή, ισχύει ότι $QTS=A_h/A_v$, αφού τα κλάσματα H_s/H_b και V_s/V_b θα αποκτήσουν σχεδόν μηδενικές τιμές. Όπως φαίνεται στο σχήμα (1.12), ο λόγος A_h/A_v θα έχει μέγιστο στην περιοχή της f_0 , ελάχιστο στην περιοχή της $2f_0$ και δεύτερο μικρότερο μέγιστο στην περιοχή $3f_0$, το οποίο έρχεται σε καλή συμφωνία με την σύγκριση της θεωρητικής καμπύλης της συνάρτησης μεταφοράς του προηγούμενου σχήματος.
- Στην περίπτωση που η συμμετοχή των κυμάτων Rayleigh είναι μεγάλη, τότε ισχύει ότι $QTS=H_s/V_s$. Αυτό σημαίνει ότι η κίνηση των επιφανειακών στρωμάτων λόγω αυξημένης ύπαρξης των κυμάτων Rayleigh θα είναι πολύ μεγαλύτερη από την κίνηση του υποβάθρου και οι παρονομαστές των κλασμάτων H_s/H_b και V_s/V_b θα έχουν αμελητέες τιμές σε σχέση με του αριθμητές, οπότε και εξαλείφονται, όπως και οι παράγοντες ενισχύσεως A_h και A_v . Αυτό θεωρητικά σημαίνει ότι δεν υπάρχει κάποια σημαντική ενέργεια

θορύβου που θα διαδοθεί διαμέσου του υποβάθρου στα επιφανειακά στρώματα ώστε να επηρεάσει τους παράγοντες ενίσχυσης, οπότε η ποσότητα QTS μπορεί να δώσει πληροφορίες μόνο για τη θεμελιώδη συχνότητα του εδάφους.

- Στην περίπτωση που η κίνηση του υποβάθρου, είναι σχετικά μεγαλύτερη από αυτήν που οφείλεται στα κύματα Rayleigh των επιφανειακών στρωμάτων, τότε ισχύει ότι $QTS=A_h$, αφού οι παρονομαστές των κλαμάτων του δεύτερου όρου της σχέσεις (5) θα είναι πολύ μεγαλύτεροι απ' ότι οι αριθμητές και η ενίσχυση θα οφείλεται κυρίως σε οριζόντιες, SH, κινήσεις, με αποτέλεσμα ο παράγοντας A_v να είναι αμελητέος.



Σχ. 1.12. Τυπικά Φάσματα παραγόντων ενίσχυσης της οριζόντιας (A_h) και κατακόρυφης (A_v) κίνησης. (από Carniel et al., 2006).

Τα τελικά συμπεράσματα στα οποία κατέληξε ο **Nakamura (1996, 2000)**, είναι τα ακόλουθα:

- Από την ποσότητα QTS υπολογίζεται η θεμελιώδης συχνότητα του εδάφους.
- Το μέγιστο της καμπύλης QTS οφείλεται κυρίως σε πολλαπλές διαθλάσεις των S κυμάτων.
- Ο ίδιος ερευνητής χρησιμοποίησε τη σχέση που συνδέει τη θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα, f_0 , με το βάθος, h , του υποβάθρου:

$$f_0 = \frac{c_s}{4h} \quad (1.10)$$

όπου C_s η μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων των επιφανειακών σχηματισμό μέχρι το υπόβαθρο.

- Με βάση τη σχέση αυτή υπολόγισε τον παράγοντα ενίσχυσης, A , στην περιοχή της ιδιοσυχνότητας, από την σχέση:

$$A_0 = \frac{C_b}{C_s} \quad (1.11)$$

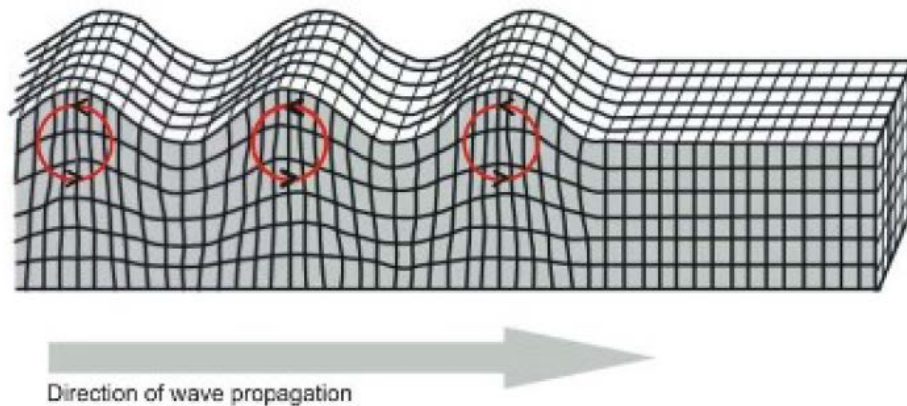
όπου C_b η διατμητική ταχύτητα του υποβάθρου.

1.3.2. Ελλειπτικότητα των Κυμάτων Rayleigh και Καμπύλων HVSr

Όπως προαναφέρθηκε, τα επιφανειακά κύματα αποτελούνται κυρίως από κύματα Love και Rayleigh. Τα πρώτα είναι πολωμένα οριζόντια κύματα και καταγράφονται μόνο στην οριζόντια συνιστώσα, ενώ τα δεύτερα καταγράφονται τόσο στην κατακόρυφη συνιστώσα, όσο και στην οριζόντια. Στο σχήμα 1.13 παρουσιάζεται ο τρόπος διάδοσης των Rayleigh κυμάτων. Τα υλικά σημεία του μέσου κατά την διάδοση των Rayleigh κυμάτων, ταλαντώνονται πραγματοποιώντας ελλείψεις, με φορά αντίθετη της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος στο ανώτερο τμήμα της έλλειψης και με άξονα ελλειπτικότητας κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Η συμμετοχή και οι σχετικές αναλογίες των σεισμικών κυμάτων (P, S και Love κυμάτα) στον εδαφικό θόρυβο ποικίλει και μπορεί να είναι σημαντική (όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 1.2.2). Ωστόσο, η καμπύλη, η οποία προκύπτει από τον φασματικό λόγο της οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας (HVSr) στηρίζεται στην υπόθεση ότι απεικονίζει κυρίως την ελλειπτικότητα των Rayleigh κυμάτων, δηλαδή το λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφης συνιστώσας των κυμάτων Rayleigh. Για αυτόν τον λόγο, η καμπύλη αυτή θα καλείται καμπύλη ελλειπτικότητας HVSr, ώστε να διαχωριστεί από την τυπική καμπύλη ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh.

Rayleigh wave



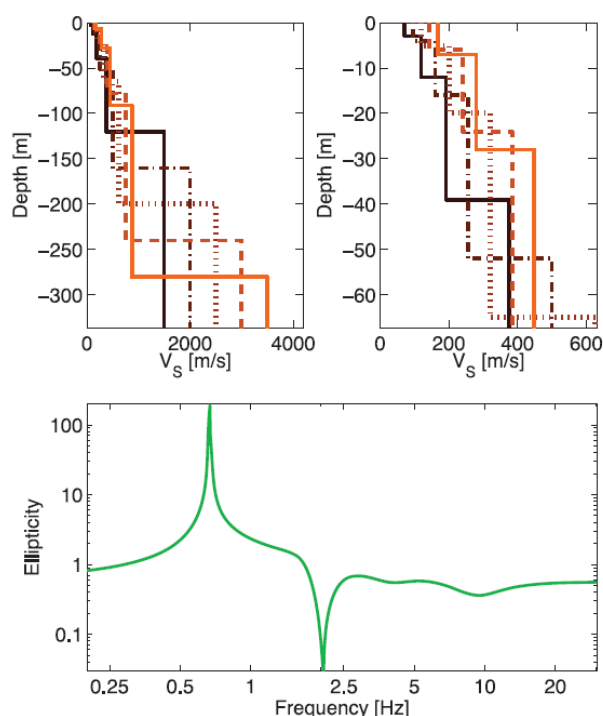
Σχ. 1.13. Σχηματική διάδοση και ελλειπτικές τροχιές των κυμάτων Rayleigh (τροποποιημένο από Fowler, 2005).

1.3.3. Αντιστροφή Καμπυλών Ελλειπτικότητας Κυμάτων Rayleigh – HVSR

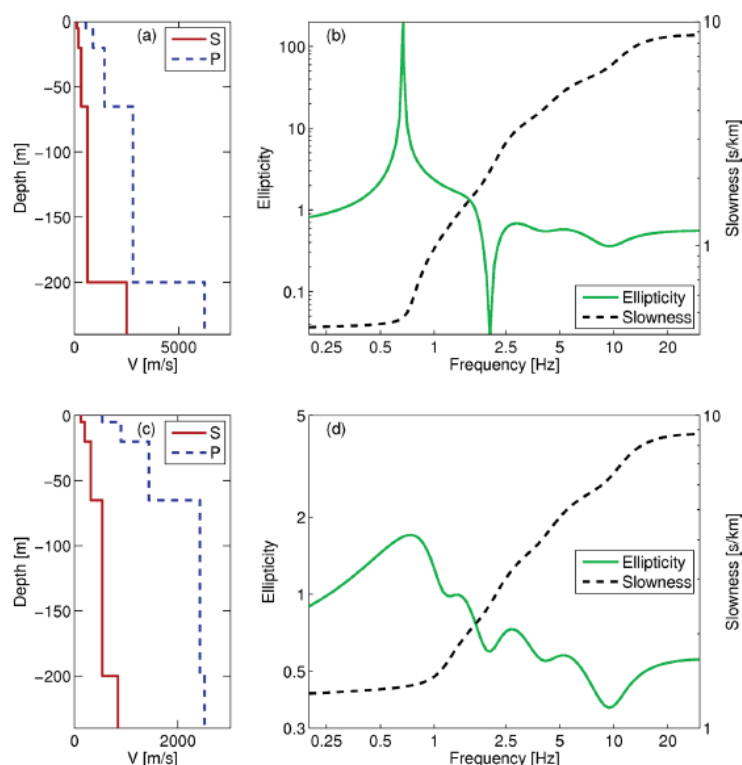
Η αντιστροφή είναι μία οικογένεια μαθηματικών μεθόδων επεξεργασίας, που στόχο έχουν την επίλυση αντιστρόφων προβλημάτων. Ως αντίστροφα προβλήματα αναφέρονται συνήθως σε προβλήματα που από ένα σύνολο παρατηρήσεων (π.χ. μετρήσεων βαρύτητας) προσπαθούμε να εξαγάγουμε πληροφορίες για τις παραμέτρους ενός φυσικού συστήματος (π.χ. την κατανομή της πυκνότητας στο εσωτερικό της Γης). Τεχνικές αντιστροφής μπορεί να εφαρμοστούν στις καμπύλες ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh, αν θεωρηθεί ότι προκύπτουν από την μέθοδο HVSR, για τον υπολογισμό της μονοδιάστατης δομής του εδάφους εκφραζόμενη σε σεισμικές ταχύτητες (P, S). Από πολλούς ερευνητές έγινε αντιληπτό (π.χ. **Fäh et al., 2003**) ότι το μειονέκτημα της αντιστροφής των καμπυλών ελλειπτικότητας είναι η μη-μοναδικότητα των λύσεων και ότι κάποια πληροφορία της δομής του εδάφους θα πρέπει να εμπεριέχεται για τον περιορισμό των πολλαπλών λύσεων που προκύπτουν. Στο σχήμα 1.14 δίνεται ένα παράδειγμα με διάφορα μοντέλα ταχυτήτων εγκαρσίων κυμάτων με το βάθος, που δυνητικά προκύπτουν από την αντιστροφή της ίδιας καμπύλης ελλειπτικότητας (**Hobiger et al., 2012**).

Τα βασικά ερωτήματα που θέτουν οι **Hobiger et al. (2012)** αφορούν το ποιο τμήμα της καμπύλης ελλειπτικότητας εμπεριέχει τις πιο σημαντικές πληροφορίες

ώστε να αντιστραφεί, πόσο «μεροληπτικά» επηρεάζει η εκτίμηση της ελλειπτικότητας το προφίλ εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος και πως τα δεδομένα της ελλειπτικότητας θα πρέπει να συνδυαστούν με πληροφορίες από την επιφανειακή δομή των εγκαρσίων κυμάτων. Για την αντιμετώπιση αυτών των ερωτημάτων, πραγματοποιήθηκε η δημιουργία συνθετικών καμπύλων ελλειπτικότητας, με χρήση της δομής μια γνωστής θέσης από την περιοχή της Βόλβης από το Euroseistest (**Raptakis et al., 1998**). Στο σχήμα 1.15 δίνονται οι συνθετικές αυτές καμπύλες ελλειπτικότητας με τις αντίστοιχες καμπύλες διασποράς. Η πρώτη καμπύλη (πάνω) προέρχεται από δομή με έντονη αντίθεση εμπέδησης μεταξύ ιζηματογενών στρωμάτων και υποβάθρου, ώστε να εμφανίζει «καθαρό» μέγιστο στην περιοχή της ιδιοσυχνότητας. Η δεύτερη (κάτω) προέρχεται από την ίδια δομή με την πρώτη, με μικρή διαφορά στις εγκάρσιες ταχύτητες του τελευταίου στρώματος και του ημιχώρου (βάθος > 60 m), έτσι ώστε να μην εμφανίζει υψηλή τιμή του λόγου της αντίθεσης εμπέδησης. Και για τις δύο καμπύλες δίνονται τα αντίστοιχα μοντέλα ταχυτήτων με το βάθος (αριστερά πάνω και αριστερά κάτω).



Σχ. 1.14. Πέντε διαφορετικά μοντέλα ταχυτήτων εγκαρσίων κυμάτων με το βάθος (πάνω μέρος) μέχρι το σεισμικό υπόβαθρο (πάνω αριστερά) και για βάθη μέχρι τα 60 m (πάνω δεξιά) που αντιστοιχούν στην ίδια καμπύλη ελλειπτικότητας (κάτω μέρος) (*Hobiger et al., 2012*).

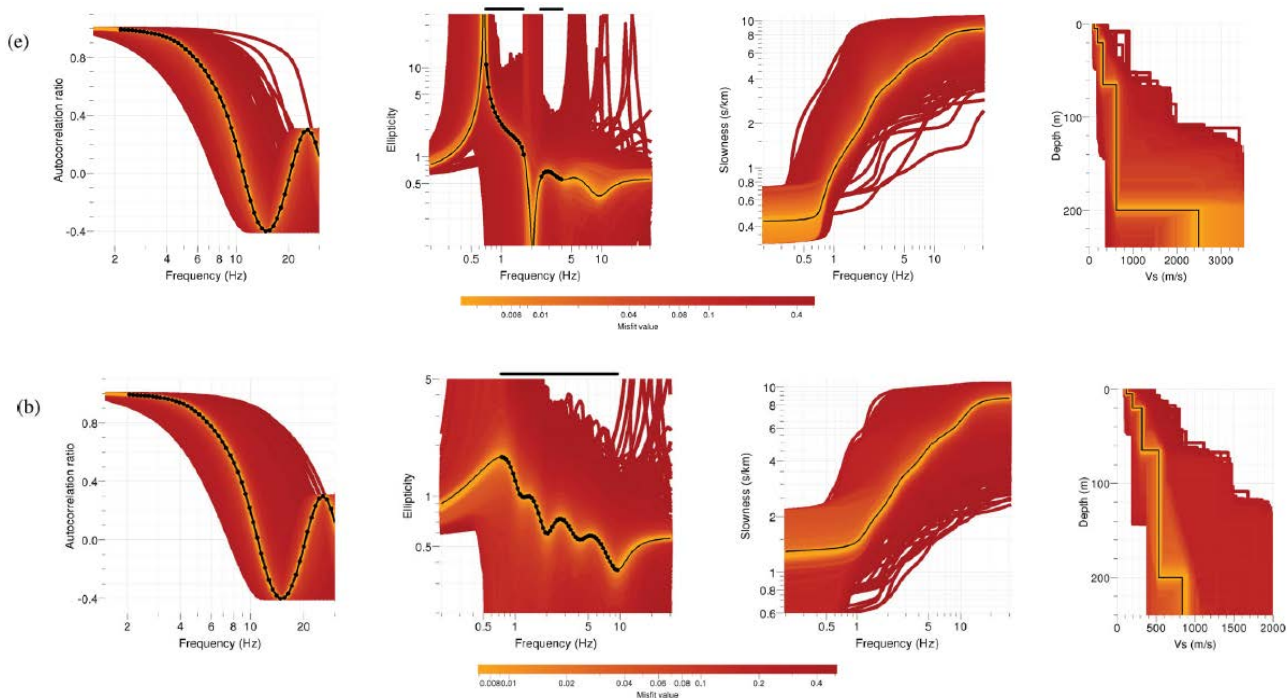


Σχ. 1.15. Μοντέλα δομής από σεισμικές ταχύτητες (P, S) με το βάθος (αριστερά) με τις αντίστοιχες καμπύλες ελλειπτικότητας και διασποράς (δεξιά) για δομή με υψηλή (πάνω) και χαμηλή (κάτω) τιμή του λόγου της αντίθεσης εμπέδησης των ιζηματογενών σχηματισμών με το υπόβαθρο (*Hobiger et al., 2012*).

Για το περιορισμό της μη-μοναδικότητας των λύσεων της αντιστροφής είναι απαραίτητο να συμπεριληφθούν στην αντιστροφή γνωστές τιμές της εγκάρσιας ταχύτητας από ένα επιφανειακό τμήμα της γεωφυσικής δομής. Για το σκοπό αυτό, έγινε χρήση από τους ερευνητές της γρήγορης φόρμουλας του **Dunkin (1965)** για τον υπολογισμό της θεωρητικής καμπύλης αυτοσυσχέτισης (SPAC) που θα προέκυπτε από δίκτυο ειδικών σεισμομέτρων (Array) για δύο περιπτώσεις ακτινών 5 και 10 m, και για εύρος συχνοτήτων από 2 μέχρι 30 Hz, από την δομή που δίνεται στο σχήμα 1.13. Λόγω των μικρών διαστάσεων του δικτύου καταγραφής, η καμπύλη αυτοσυσχέτισης (SPAC) είναι ίδια και για τις δύο δομές του προηγούμενου σχήματος σε αυτό το εύρος συχνοτήτων. Τελικός σκοπός είναι να αντιστραφούν μαζί η καμπύλη αυτοσυσχέτισης και η καμπύλη ελλειπτικότητας, ώστε να εξεταστεί η μοναδικότητα της λύσης.

Για τον προσδιορισμό του τμήματος της καμπύλης ελλειπτικότητας που παρέχει τις πιο κρίσιμες πληροφορίες για την αντιστροφή, οι **Hobiger et al. (2012)**

πραγματοποίησαν δοκιμές αντιστρέφοντας ταυτόχρονα την καμπύλη αυτοσυσχέτισης και διαφορετικά τμήματα της καμπύλης ελλειπτικότητας, για τις δύο περιπτώσεις, υψηλής και χαμηλής αντίθεσης εμπέδησης των ιζημάτων με το υπόβαθρο. Στο σχήμα 1.16 παρουσιάζονται τα καλύτερα αποτελέσματα που κατέληξαν για τη δομή υψηλής (πάνω) και χαμηλής (κάτω) αντίθεσης εμπέδησης. Σε αυτά τα σχήματα περιλαμβάνονται οι καμπύλες διασποράς και ελλειπτικότητας που χρησιμοποιήθηκαν στην αντιστροφή και η εκτιμώμενη δομή του εδάφους. Με μαύρες τελείες απεικονίζονται τα σημεία της κάθε καμπύλης που χρησιμοποιήθηκαν στην αντιστροφή. Σε περίπτωση δομής με υψηλή αντίθεση εμπέδησης το εύρος συχνοτήτων που εκτιμά καλύτερα την δομή αφορά συχνότητες από 0.7 Hz μέχρι 1.7 Hz και από 2.5 Hz έως 4.0 Hz ενώ στην περίπτωση χαμηλής αντίθεσης εμπέδησης το εύρος συχνοτήτων που παρέχει τις πιο χρήσιμες πληροφορίες είναι από 0.75 Hz μέχρι 9.5 Hz.



Σχ. 1.16. Αποτελέσματα αντιστροφών για κοινή αντιστροφή καμπύλης αυτοσυσχέτισης (SPAC, αριστερά) και καμπύλης ελλειπτικότητας (HVSR, κέντρο αριστερά), καμπύλης διασποράς (κέντρο δεξιά) και της εκτιμώμενης δομής του εδάφους (δεξιά) για περίπτωση υψηλής (πάνω) και χαμηλής (κάτω) τιμής του λόγου της αντίθεσης εμπέδησης. Με μαύρους κύκλους απεικονίζονται τα τμήματα της καμπύλης που χρησιμοποιήθηκαν στην αντιστροφή (τροποποιημένο από *Hobiger et al., 2012*).

Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξε για την περίπτωση καμπύλης ελλειπτικότητας με υψηλή τιμή του λόγου της αντίθεσης εμπέδησης είναι ότι το

σημαντικότερο διάστημα συχνοτήτων είναι αυτό πάνω από την συχνότητα του οποίου εμφανίζεται η κορυφή της καμπύλης ελλειπτικότητας. Ωστόσο, και το αριστερό τμήμα από την κορυφή (μικρότερες συχνότητες) της καμπύλης HVSr θα πρέπει να περιλαμβάνεται για τον καλύτερο προσδιορισμό του μεγίστου της καμπύλης. Για την περίπτωση χαμηλής τιμής του λόγου της αντίθεσης εμπέδησης, βασικό συμπέρασμα είναι ότι όλο το τμήμα ανώτερων συχνοτήτων από το μέγιστο της καμπύλης ελλειπτικότητας θα πρέπει να περιλαμβάνεται στην αντιστροφή.

Όπως αποδείχτηκε θεωρητικά και πειραματικά από τους **Hobiger et al. (2012)**, πληροφορίες σχετικά με την επιφανειακή δομή πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στην αντιστροφή, ώστε να περιορίζεται η μη μοναδικότητα της λύσης και να είναι δυνατή η αξιόπιστη και μοναδική εκτίμηση της δομής των βαθύτερων στρωμάτων. Τα νέα ερωτήματα που προκύπτουν, τα οποία αποτέλεσαν την κύρια ιδέα διερεύνησης της παρούσας διατριβής, είναι τα ακόλουθα:

- Επαρκεί η επιφανειακή πληροφορία της μέσης ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων λίγων μέτρων (π.χ. 5 m, δηλαδή της ταχύτητας V_{s5}) για τον περιορισμό της μη-μοναδικότητας των λύσεων, της αντιστροφής των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSr; Η ταχύτητα (V_{s5}) αυτή επιλέχθηκε γιατί τέτοιες εκτιμήσεις είναι εύκολα προσδιορίσιμες από μικρής κλίμακας γεωφυσικές, γεωτεχνικές αλλά και γεωλογικές έρευνες.
- Μπορεί η μέθοδος της αντιστροφής των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSr να εκτιμήσει με μεγαλύτερη ακρίβεια την μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 30 m (V_{s30}), σε σχέση με τις ημι-εμπειρικές σχέσεις που έχουν προταθεί και που βασίζονται στη χρήση της μέσης ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 5 m (V_{s5}); Με άλλα λόγια, είναι χρήσιμη η αντιστροφή των καμπυλών ελλειπτικότητας για τον περιορισμό των αβεβαιοτήτων των ημι-εμπειρικών σχέσεων V_{s5} - V_{s30} (βλέπε και επόμενη παράγραφο);
- Μπορεί η μέθοδος της αντιστροφής των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSr να εκτιμήσει με σχετική ακρίβεια τα μονοδιάστατα προφίλ των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων με το βάθος, ώστε να αντικαταστήσει πιο χρονοβόρες και περισσότερο δαπανηρές μεθόδους;

- Ποιοι είναι οι περιορισμοί και τα μειονεκτήματα, για την εκτίμηση της δομής του εδάφους, από την αντιστροφή των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSF;

1.4. Εκτίμηση της Μέσης Ταχύτητας των Εγκαρσίων Κυμάτων των Πρώτων 30 m (V_{s30}) με την Χρήση Στατιστικών/Αναδρομικών Σχέσεων

Η μέση τιμή της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 30 m μπορεί να υπολογιστεί από τη μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων με το βάθος στην περίπτωση που αυτό φτάνει τουλάχιστον τα 30 m. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις, στις οποίες δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων μέχρι αυτό το βάθος. Για τον λόγο, η εκτίμηση της μέσης ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 30 m (V_{s30}) πραγματοποιείται συχνά μέσω στατιστικών/ημι-εμπειρικών σχέσεων, ώστε να γίνεται δυνατή η εκτίμηση της με χρήση μιας πιο επιφανειακής μέσης τιμής της ταχύτητας αυτών των κυμάτων. Ο σκοπός της παρούσας διατριβής είναι να χρησιμοποιηθεί μια τέτοια σχέση, για την εκτίμηση των τιμών της V_{s30} , χρησιμοποιώντας τη μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 5 m (V_{s5}) και στη συνέχεια, αυτές οι τιμές να συγκριθούν με τις τιμές των V_{s30} , οι οποίες προκύπτουν από τα μονοδιάστατα προφίλ ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων με το βάθος, τα οποία υπολογίζονται από τις αντιστροφές των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSF, ώστε να ερευνηθεί η αξιοπιστία της τελευταίας μεθόδου. Όπως προαναφέρθηκε, η επιλογή της V_{s5} για την εκτίμηση των τιμών της V_{s30} , με την χρήση αναδρομικών σχέσεων, έγινε επειδή αυτή η επιφανειακή πληροφορία των πρώτων 5 m είναι συχνά διαθέσιμη από ανεξάρτητα δεδομένα (γεωτεχνικά, γεωφυσικά, γεωλογικά, κτλ.) οπότε και η τιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε στις αντιστροφές των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSF για τον περιορισμό της μη-μοναδικότητας των λύσεων.

Η εμπειρική σχέση η οποία χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της V_{s30} από την ταχύτητα V_{s5} , η οποία χρησιμοποιήθηκε, προέρχεται από τη μελέτη των **Stewart et al. (2014)**. Ο υπολογισμός της σχέσης πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μία

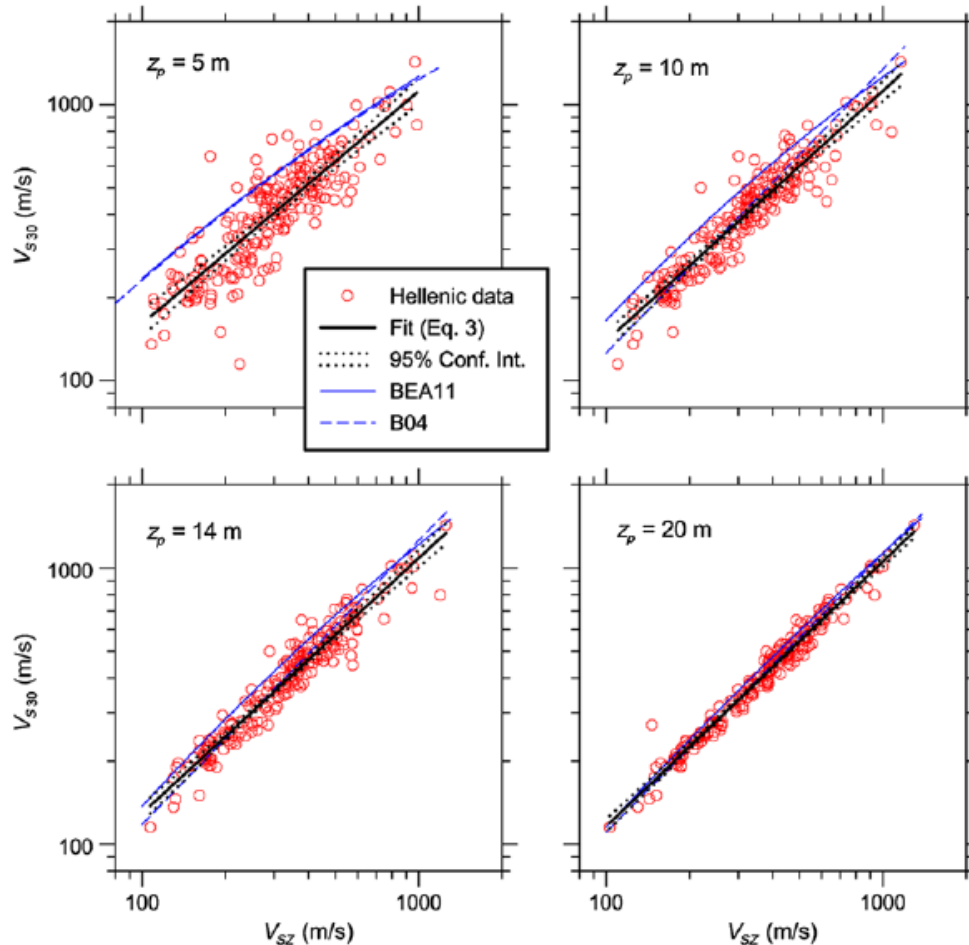
βάση δεδομένων με μεταβολές εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος σε 314 θέσεις του Ελληνικού χώρου, όπως αυτές είχαν προσδιοριστεί με διάφορες γεωφυσικές και γεωτεχνικές τεχνικές. Στο χάρτη του σχήματος 2.1 παρουσιάζονται οι θέσεις αυτές. Στο πλαίσιο της έρευνας μελετήθηκε η μεταβολή των τιμών V_{s30} σε συνάρτηση με τις μέσες ταχύτητες των εγκαρσίων κυμάτων για διάφορα βάθη σε λογαριθμική κλίμακα. Στο σχήμα 1.17 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της V_{s30} σε σχέση με τις μέσες τιμές ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 5 m (V_{s5} , πάνω αριστερά), 10 m (V_{s10} , πάνω δεξιά), 14 m (V_{s14} , κάτω αριστερά) και των 20 m (V_{s20} , κάτω δεξιά). Η στατιστική σχέση της V_{s30} ως συνάρτηση της μέσης ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων για διάφορα βάθη που χρησιμοποιήθηκε είναι της μορφής:

$$\log(V_{s30}) = c_0 + c_1 * \log(V_{sz}) \quad (1.12)$$

όπου V_{sz} η μέση τιμή της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων για βάθος z και c_0 και c_1 κατάλληλες σταθερές, οι οποίες δίνονται στον πίνακα 1.4. Στη πρώτη στήλη δίνεται το βάθος στο οποίο αντιστοιχούν οι τιμές των σταθερών c_0 και c_1 (δεύτερη και τρίτη στήλη) και στη τέταρτη στήλη το αντίστοιχο σφάλμα της κάθε σχέσης.

Πίνακας 1.4. Σταθερές λογαριθμικής σχέσης (1.12) υπολογισμού των τιμών της V_{s30} από μέσες τιμές ταχυτήτων άλλων βαθών (τροποποιημένο από Stewart et al., 2014)

Z_p	c_0	c_1	σ
5	0.522	0.842	0.233
10	0.311	0.907	0.156
12	0.287	0.919	0.138
14	0.261	0.925	0.121
16	0.24	0.93	0.107
18	0.165	0.955	0.086
20	0.144	0.96	0.076
22	0.088	0.978	0.54
24	0.064	0.984	0.045
26	0.038	0.991	0.033
28	0.014	0.997	0.015



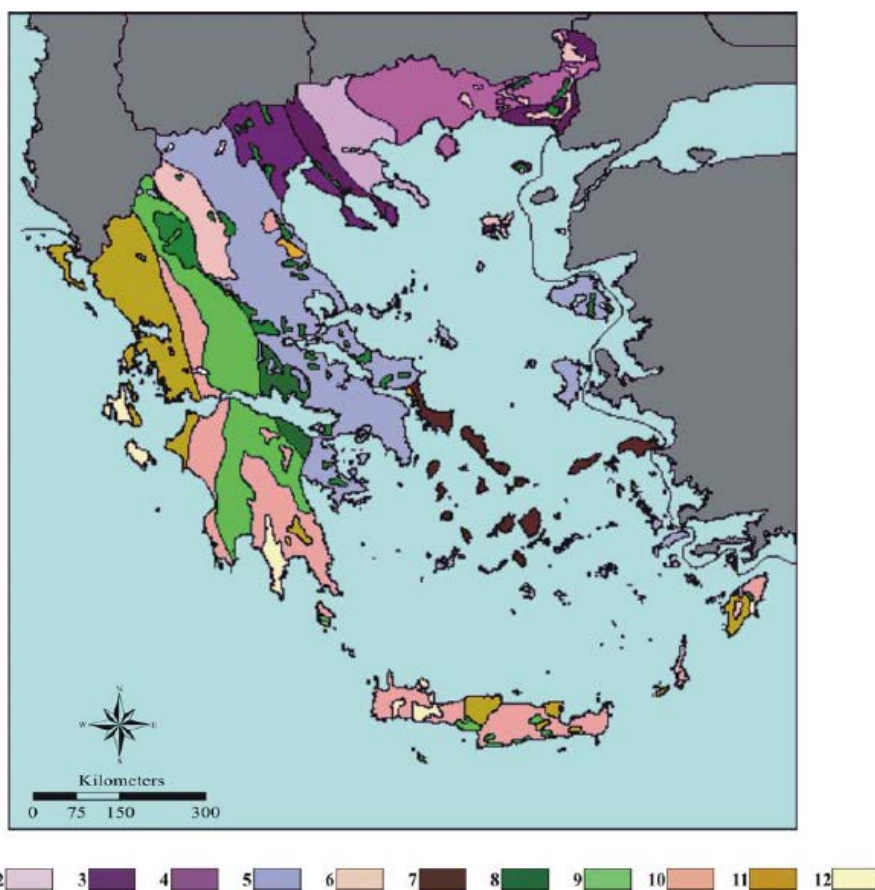
Σχ. 1.17. Γραφικές παραστάσεις της V_{s30} σε συνάρτηση με τη V_{s5} (πάνω αριστερά), με τη V_{s10} (πάνω δεξιά), με τη V_{s14} (κάτω αριστερά) και με τη V_{s20} (κάτω δεξιά) (Stewart et al., 2014).

1.5. Συνοπτική Γεωλογική Περιγραφή των Θέσεων Μέτρησης

Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκαν 70 μετρήσεις εδαφικού θορύβου σε διαφορετικές θέσεις του Β. Ελληνικού χώρου. Οι θέσεις όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις του εδαφικού θορύβου είναι η ευρύτερη περιοχή του Βόρειου Ελληνικού χώρου από την Ξάνθη (Ανατολικά) μέχρι την Κεφαλονιά (Δυτικά). Λόγω της μεγάλης γεωλογικής ποικιλίας των θέσεων μέτρησης, παρουσιάζεται στη συνέχεια μία συνοπτική γεωλογική περιγραφή των ζωνών και των πετρογραφικών πληροφοριών για τις θέσεις όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

Οι Ελληνικές ζώνες (Σχ. 1.18, από Mountrakis et al. 1985), στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, είναι από τα Ανατολικά προς τα Δυτικά η μάζα

της Ροδόπης, η Σερβομακεδονική μάζα, η Περιοδοπική ζώνη, η ζώνη του Αξιού (υποζώνες Παιονίας, Πάικου και Αλμωπίας), η Πελαγονική ζώνη, η Υποπελαγονική ζώνη, η ζώνη Ωλονού – Πίνδου και η ζώνη Παξών. Πληροφορίες των ζωνών συνοψίζονται στους **Mountrakis et al. (1985)**.



Σχ. 1.18. Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών. 1: Μάζα της Ροδόπης, 2: Σερβομακεδονική μάζα. 3: Περιοδοπική ζώνη, 4: Ζώνη Αξιού (υποζώνες Παιονίας, Πάικου και Αλμωπίας), 5: Πελαγονική ζώνη, 6: Υποπελαγονική ζώνη, 7: Αττικό - Κυκλαδική ζώνη, 8: Ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας, 9: Ζώνη Ωλονού – Πίνδου, 10: Ζώνη Γαβρόβου – Τρίπολης, 11: Ιόνιος ζώνη, 12: Ζώνη Παξών (τροποποιημένο από *Montrakis et al., 1985*).

ΜΑΖΑ ΡΟΔΟΠΗΣ

Ο γεωτεκτονικός χαρακτήρας της μάζας της Ροδόπης είναι καθαρά ηπειρωτικός και αποτελεί μία παλιά κρυσταλλική μάζα ηλικίας Προκαμβρίου έως Κατωπαλαιοζωικού η οποία πιστεύεται ότι θαλάσσευσε μόνο μερικώς κατά την διάρκεια του Μεσοζωικού και πιθανόν σε ορισμένες μόνο περιόδους. Αποτελείται από μεταμορφωμένα πετρώματα (μιγματίτες, γνεύσιους, αμφιβολίτες, εκλογίτες,

ματαβάσιτες, μεταπηλίτες και μάρμαρα) και πυριγενή πετρώματα (υπερβασικά πετρώματα μανδυακής προέλευσης και γρανίτες ηλικίας Άνω Κρητιδικής και Τριτογενούς).

ΣΕΡΒΟΜΑΚΕΔΟΝΙΚΗ ΜΑΖΑ

Η Σερβομακεδονική μάζα θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει παλαιό ηπειρωτικό φλοιό, αποτελούμενη από μεταμορφωμένα πετρώματα ηλικίας Προκαμβρίου και πυριγενείς διεισδύσεις ηλικίας Σιλούριο. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα είναι γνεύσιοι, αμφιβολίτες, εκλογίτες, μάρμαρα, σχιστόλιθους και μετά-βασικά πετρώματα.

ΠΕΡΙΟΔΟΠΙΚΗ ΖΩΝΗ

Η Περιοδοπική ζώνη θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει την ηπειρωτική κατωφέρεια των ηπειρωτικών μαζών της Ροδόπης και της Σερβομακεδονικής. Γι' αυτόν τον λόγο αποτελείται από ιζήματα και μετα-ιζήματα καθώς και κάποια ηφαιστειακά πετρώματα, λόγω ηπειρωτικής διάρρηξης. Στην ζώνη αυτή έχουν διακριθεί τρεις κύριες ενότητες από τα Ανατολικά προς τα Δυτικά:

- Ενότητα Ντεβέ Κοράν – Δουμπιά. Περιλαμβάνει στην βάση της ένα σχηματισμό από μετακλασικών ιζημάτων ηλικίας Περμίου. Ακολουθεί η ηφαιστειοιζηματογενής ημιμεταμορφωμένη σειρά Περμίου – Κάτω Τριαδικού. Στο ανώτερο τμήμα της ενότητας βρίσκεται μια ανθρακική νηριτική σειρά ηλικίας Μέσου Τριαδικού μέχρι Μέσου Ιουρασικού.
- Ενότητα Μελισχωρίου – Χολομώντα. Ο κατώτερος σχηματισμός είναι μάρμαρα και ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι ηλικίας Μέσου – Άνω Τριαδικού. Ο ανώτερος σχηματισμός της ενότητας είναι φλύσχης με τουρβιτικές εναλλαγές μετά – ιζημάτων ηλικίας Κάτω – Μέσο Ιουρασικού.
- Ενότητα Άσπρης Βρύσης – Χορτιάτη. Το κατώτερο τμήμα της ενότητας είναι Περμιο-Τριαδικής ηλικίας, με μετακλαστικά, ηφαιστειοκλαστικά και νηριτικά ανθρακικά ιζήματα. Ο ανώτερος ορίζοντας αποτελείται από ιζήματα βαθιάς θάλασσας, μέσα στον οποίο παρεμβάλλονται μεταμορφωμένα πετρώματα όξινης μαγματικής προέλευσης τα οποία αποτελούν τους πράσινους επιγνεύσιους της Θεσσαλονίκης.

Η ζώνη του Αξιού θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει μία παλιά ωκεάνια περιοχή που λειτούργησε κατά την διάρκεια του Μεσοζωικού, λόγω της ύπαρξης των οφιολίθων. Αυτή η ζώνη έχει υποδιαιρεθεί σε τρεις επιμέρους υποζώνες από τα Ανατολικά προς τα δυτικά:

- Η υποζώνη της Παιονίας αποτελείται από οφιολίθους, οι οποίοι καθορίζουν τον ωκεάνιο χαρακτήρα της. Τα οφιολιθικά πετρώματα συνοδεύονται από ιζήματα βαθιάς θάλασσας.
- Η υποζώνη του Πάικου, η οποία με τις σημερινές γεωτεκτονικές απόψεις, κατά την διάρκεια του Ιουρασικού λειτούργησε ως νησιωτικό τόξο με έντονη ηφαιστειακή δράση μέσα στην ευρύτερη ωκεάνια ζώνη του Αξιού. Αποτελείται κυρίως από μεταμορφωμένα ιζηματογενή, ηφαιστειοιζηματογενή και ιζηματογενή πετρώματα.
- Η υποζώνη της Αλμωπίας, η οποία θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει το πιο δυτικό τμήμα της παλαιάς ωκεάνιας περιοχής, καθώς και το ανατολικό ηπειρωτικό περιθώριο της Πελαγονικής. Η Αλμωπία αποτελείται κυρίως από οφιολίθους και συνοδά ιζήματα βαθιάς θάλασσας, από τα Άνω Κρητιδικά επικλυσιογενή ιζήματα και τα μεταμορφωμένα προ – οφιολιθικά πετρώματα στο Πελαγονικό ηπειρωτικό περιθώριο.

ΠΕΛΑΓΟΝΙΚΗ ΖΩΝΗ

Οι σύγχρονες απόψεις θεωρούν την Πελαγονική ως ένα παλαιό ηπειρωτικό τέμαχος, το οποίο λειτούργησε ως ύβωμα και χώριζε τις αύλακες της ζώνης του Αξιού στα Ανατολικά και της Πίνδου από τα Δυτικά. Η υποθαλάσσια ράχη της Πελαγονικής διακοπτόταν από διαύλους όπου και επικοινωνούσαν οι δύο αύλακες. Στην διάρκεια του Μεσοζωικού η ιζηματογένεση ήταν ανθρακική νηριτική με εξαίρεση την περιοχή των διαύλων, όπου η ιζηματογένεση ήταν πελαγική μαζί με οφιολιθικές μάζες. Αποτελείται από Παλαιοζωικά κρυσταλοσχιστώδη πετρώματα, γνευσιομένους γρανίτες, ημιμεταμορφωμένα Περμιο–Τριαδικά πετρώματα, ανθρακικά καλύμματα του Τριαδικού–Ιουρασικού, οφιολίθους και Ανωκρητιδικά επικλυσιογενή ιζήματα.

Η Υποπελαγονική θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει την δυτική κατωφέρεια του υβώματος της Πελαγονικής προς την αύλακα της Πίνδου. Επειδή αποτελεί την δυτική ζώνη των οφιολίθων της Ελλάδας και πιστεύεται ότι μαζί με την ζώνη της Πίνδου αποτελούσαν την ωκεάνια περιοχή της Νέο-Τηθύος, που λειτουργούσε την Ιουρασική περίοδο. Ωστόσο, μπορεί να θεωρηθεί ότι η Υποπελαγονική ταυτίζεται με την Πελαγονική, λόγω της ομοιότητας των Αλπικών ιζημάτων.

Η Υποπελαγονική ζώνη αποτελείται από 3 διαφορετικές τεκτονικές διαδοχές πετρωμάτων:

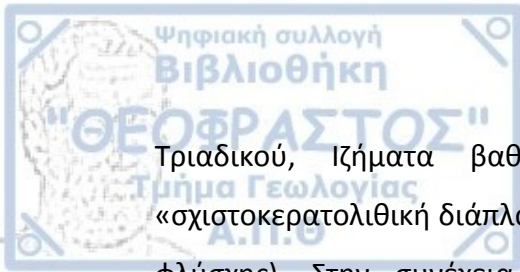
- Οφιολιθική ακολουθία και τα συνοδά ιζήματα βαθιάς θάλασσας.
- Οφιολίθοι και ιζήματα βαθιάς θάλασσας τοποθετημένα σε πελαγικά ανθρακικά πετρώματα Τριαδικής και Ιουρασικής ηλικίας.
- Οφιολίθοι με ιζήματα βαθιάς θάλασσας τοποθετημένα σε νηριτικά ανθρακικά πετρώματα Τριαδικής και Ιουρασικής ηλικίας, τυπικά ηπειρωτικού περιθωρίου, που δεν διαφέρουν με αυτά του δυτικού περιθωρίου της Πελαγονικής.

Στα ανώτερα τμήμα αυτών υπάρχουν επικλυσεγενή ιζήματα Μέσου – Άνω Κρητιδικού, φλύσχης Τριτογενούς ηλικίας και τέλος μεταλπικά μολασσικά ιζήματα ηλικίας Ολιγοκαίνου – Μέσου Μειοκαίνου.

ΖΩΝΗ ΩΛΟΝΟΥ – ΠΙΝΔΟΥ

Η ζώνη Ωλονού – Πίνδου θεωρείται ότι μαζί με την Υποπελαγονική αντιπροσωπεύουν τον ωκεάνιο χώρο της Νέο-Τηθύος λόγω της ύπαρξης των οφιολιθικών πετρωμάτων και των ιζημάτων βαθιάς θάλασσας. Ωστόσο, αυτή η άποψη αμφισβητείται λόγω της μη ύπαρξης συμπτυχωμένων δομών μεταξύ ωκεάνιων ιζημάτων και οφιολίθων, όπως παρατηρείται στην Υποπελαγονική. Γι' αυτόν τον λόγο προτείνεται και ο χαρακτηρισμός της βαθιάς ηπειρωτικής λεκάνης.

Η ζώνη της Πίνδου αποτελείται στα κατώτερα στρώματα από κλαστικά ιζήματα Μέσο Τριαδικού, ανθρακικά και ηφαιστειο-ιζηματογενή υλικά Άνω



Τριαδικού, Ιζήματα βαθιάς θάλασσας ηλικίας Ιουρασικού, γνωστά ως «σχιστοκερατολιθική διάπλωση» που στο Κάτω Κρητιδικό θυμίζουν φλύσχη (πρώτος φλύσξης). Στην συνέχεια Μέσο – Άνω Κρητιδικό πελαγικοί ασβεστόλιθοι, Τριτογενής φλύσξης (δεύτερος φλύσξης) και τέλος μολασσικά ιζήματα με ηλικία Ολιγόκαινο – Άνω Ηώκαινο.

ΖΩΝΗ ΠΑΞΩΝ

Η ζώνη Παξών αποτελεί το εσωτερικό τμήμα της Απούλιας πλατφόρμας, η οποία συνεχίζεται μέχρι την Ιταλία. Αποτελείται από ανθρακικά νηριτικά πετρώματα με μικρές παρεμβολές διαφορετικών τύπων ιζηματογενών σχηματισμών, με ηλικία από Άνω Τριαδικό μέχρι Κάτω Μειόκαινο.

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ Δεδομένων

- Δεδομένα και Επεξεργασία

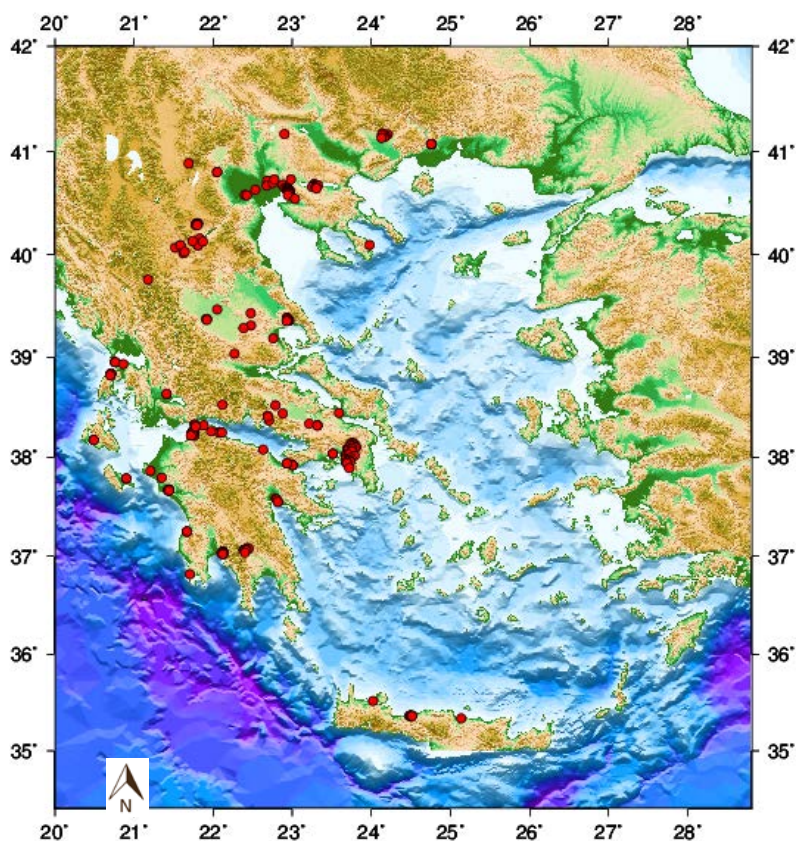
2.1. Συλλογή Δεδομένων με τη Χρήση Μονού Σταθμού

Όπως προαναφέρθηκε, για την υλοποίηση των στόχων της παρούσας διατριβής, πραγματοποιήθηκε συλλογή δεδομένων εδαφικού θορύβου με τη χρήση μονού σταθμού καταγραφής, σε θέσεις για τις οποίες ήταν γνωστά τα προφίλ των διατμητικών ταχυτήτων με το βάθος από άλλες μεθόδους. Για αυτό τον λόγο, η επιλογή των θέσεων έγινε από τη βάση δεδομένων της έρευνας των **Stewart et al. (2014)**. Αυτή η βάση δεδομένων αποτελείται από 314 θέσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα (Σχ. 2.1). Σε αυτές τις θέσεις είναι γνωστό το μονοδιάστατο προφίλ (δομή) των εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος από διάφορες σεισμικές γεωφυσικές έρευνες (κυρίως βασισμένες στις μεθόδους Crosshole, Downhole, MASW, Noise Seismic Array και σεισμικής διάθλασης).

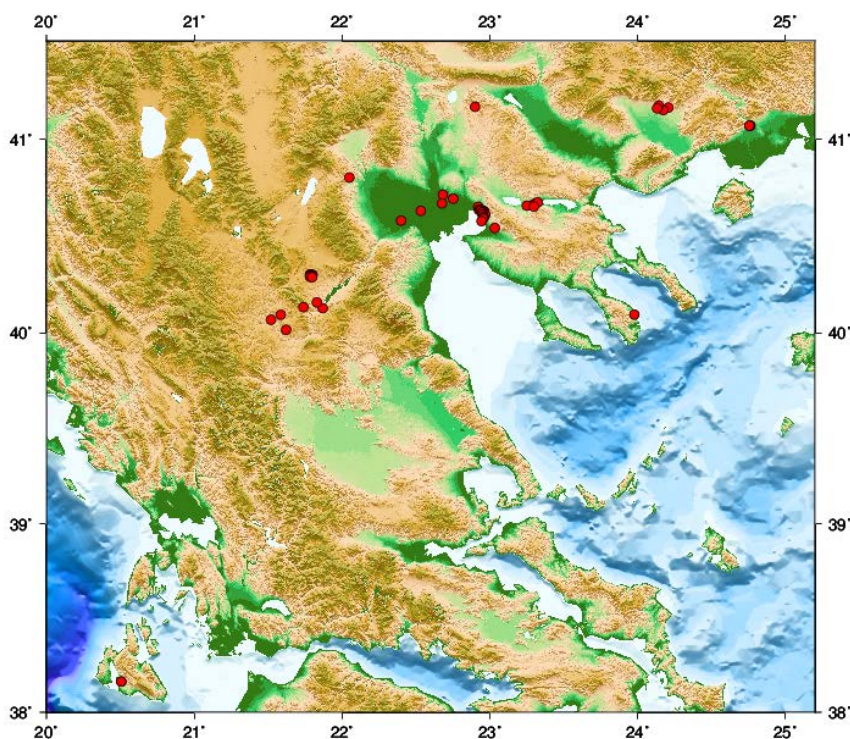
Από τις 314 θέσεις της βάσης δεδομένων του **Stewart et al. (2014)** επιλέχθηκαν οι θέσεις, οι οποίες πληρούσαν τα παρακάτω κριτήρια:

- Θέσεις, οι οποίες βρίσκονται κυρίως στον Β. Ελληνικό χώρο, ώστε να υπάρχει ευκολία πρόσβασης και μετρήσεων.
- Θέσεις, στις οποίες το προφίλ εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος είναι γνωστό τουλάχιστον μέχρι τα 30 μέτρα, ώστε να είναι δυνατός ο αξιόπιστος υπολογισμός της ταχύτητας V_{s30} .
- Θέσεις, στις οποίες το προφίλ της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων με το βάθος είναι σχεδόν ίσο με 30 m, θεωρώντας ότι οι σεισμικές ταχύτητες, από το μέγιστο βάθος του προφίλ (>25 m) μέχρι το βάθος των 30 m δεν διέφερε σημαντικά.
- Θέσεις, στις οποίες το γεωλογικό/σεισμικό υπόβαθρο είναι γνωστό και είναι σε βάθος < 30 m.

Οι θέσεις, οι οποίες επιλέχθηκαν μετά την αξιολόγηση, με βάση τα παραπάνω κριτήρια, ανέρχονται στις 64 και παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα (Σχ. 2.2).

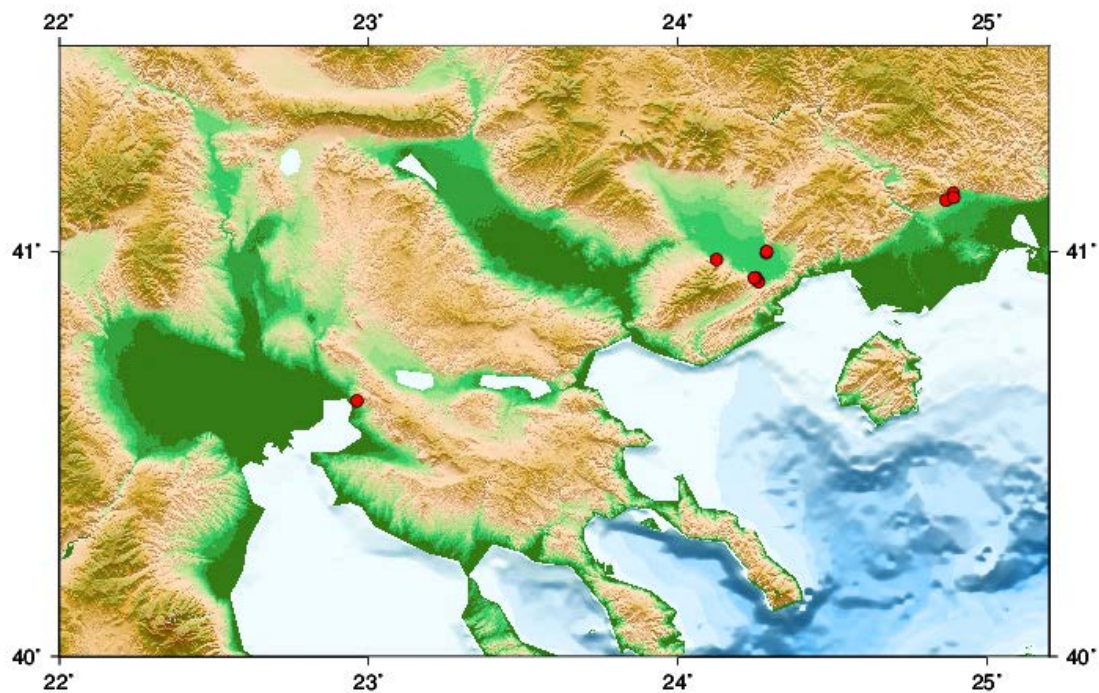


Σχ. 2.1. Χάρτης της Ελλάδας, στον οποίο παρουσιάζονται οι διαθέσιμες θέσεις με γνωστό το μονοδιάστατο προφίλ (δομή) ταχυτήτων από την βάση δεδομένων του Stewart et al. (2014).



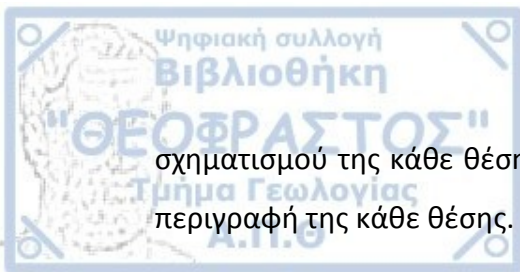
Σχ. 2.2. Χάρτης της Β. Ελλάδας με τις 64 επιλεγμένες θέσεις, με γνωστό μονοδιάστατο προφίλ ταχυτήτων, από την βάση δεδομένων των Stewart et al. (2014), οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Επιπλέον, στη βάση διατριβής προστέθηκαν άλλες δέκα (10) θέσεις, από δεδομένα που διατέθηκαν από τον Τομέα Γεωφυσικής του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.). Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζονται οι δέκα αυτές οι θέσεις.



Σχ. 2.3. Χάρτης 10 θέσεων με γνωστό μονοδιάστατο προφίλ (δομή) εγκαρσίων ταχυτήτων, από την βάση δεδομένων του Τομέα Γεωφυσικής (Α.Π.Θ.).

Ο τελικός αριθμός των θέσεων, στις οποίες πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εδαφικού θορύβου, ανέρχονται στις 74. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι θέσεις αυτές για τις οποίες είναι γνωστό το προφίλ εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος. Στην πρώτη και δεύτερη στήλη δίνονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες (γεωγραφικό μήκος και πλάτος αντίστοιχα) και στη τρίτη στήλη ο κωδικός της κάθε θέσης. Στη τέταρτη στήλη δίνεται το μέγιστο βάθος της δομής, στην πέμπτη η μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων μέχρι το μέγιστο βάθος της κάθε μέτρησης και στην έκτη η μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 30 m (V_{s30}). Στην έβδομη στήλη παρουσιάζεται η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του προφίλ, ενώ στην όγδοη αναφέρεται η αντίστοιχη αναφορά απ' όπου προέρχεται το προφίλ και στην ένατη η γεωλογική ηλικία του κυρίαρχου



σχηματισμού της κάθε θέσης. Τέλος, στη δέκατη στήλη δίνεται η τυπική γεωλογική περιγραφή της κάθε θέσης.

Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι στο πλαίσιο της διατριβής, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 53 μετρήσεις εδαφικού θορύβου, ενώ χρησιμοποιήθηκαν και δεδομένα από 21 μετρήσεις που υπήρχαν από προηγούμενες έρευνες (**Anthymidis et al., 2008, Panou et al., 2010, μη δημοσιευμένα δεδομένα ΙΤΣΑΚ και Εργ. Γεωφυσικής ΑΠΘ**).

Πίνακας 2.1. Θέσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι νέες μετρήσεις εδαφικού θορύβου από τη βάση δεδομένων των Stewart et al. (2014) και των νέων πρόσθετων δεδομένων ΑΠΘ-ΙΤΣΑΚ που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Γεωγρ. Μήκος	Γεωγρ. Πλάτος	Κωδικός Θέσης	Βάθος (m)	Vs _z (m/sec)	Vs ₃₀ m/sec	Μέθοδος	Αναφορά	Γεωλογική Ηλικία	Γεωλογική Περιγραφή
24.763833	41.070778	NESXAN001a	64	366	258	CH	Klimis and Gazetas (2003)	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ	Αδιαίρετο αλλούβιο, αναβαθμίδες
24.760722	41.070861	NESXAN002a	56	289	212	CH	Klimis and Gazetas (2003)	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ	Αδιαίρετο αλλούβιο, αναβαθμίδες
24.759472	41.070139	NESXAN004a	60	293	202	CH	Klimis and Gazetas (2003)	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ	Αδιαίρετο αλλούβιο, αναβαθμίδες
24.756333	41.0705	NESXAN005a	38	256	220	CH	Klimis and Gazetas - 2003	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ	Αδιαίρετο αλλούβιο, ποτάμιας ή λημναίες αποθέσεις
24.208199	41.163205	DRADRA001d	60	413	368	MASW	Karastathis (2008)	ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ	Καστανοκόκκινος πυλός με διάσπαρτες κροκάλες, αποτελούνται από κόκκινες ψαμμιτικές αργίλους έως πηλούς με διάσπαρτες κροκάλες
24.174301	41.150375	DRADRA002d	50	388	347	MASW	Karastathis (2008)	ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ	Σύγχρονες προσχώσεις: κροκάλες, χαλαρά κροκαλοπαγή, λεπτοκοκκώδες υλικό και κόκκινες άργιλοι
24.1438	41.173267	DRADRA005d	60	581	518	MASW	Karastathis (2008)	ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ	Εναλλαγές κροκαλοπαγών με ερυθρές ψαμμιτικές αργίλους
24.132469	41.158873	DRADRA006d	20	412	618	MASW	Pleistocene	ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ	Εναλλαγές κροκαλοπαγών με ερυθρές ψαμμιτικές αργίλους
24.86674	41.124203	XANTHlg1	22	586	610	DH	K. Papazachos (personal comm., 2016)	ΠΛΕΙΟΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΙΚΟ	Χαλίκια και άμμοι
24.89049	41.142064	XANTHlg2	18	443	507	DH	K. Papazachos (personal comm., 2016)	ΠΛΕΙΟΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΙΚΟ	Χαλίκια και άμμοι
24.891464	41.130942	XANTHlg3	30	542	542	DH	K. Papazachos (personal comm., 2016)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Αλλουβιακά ιζήματα
24.260607	40.924746	KAVALAG1	15	170	174	MASW	K. Papazachos (personal comm., 2016)	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ	Αλλουβιακά ιζήματα

24.252058	40.934656	KAVALAG2	15	61	54	MASW	K. Papazachos (personal comm., 2016)	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ	Αλλουβιακά ιζήματα
24.246354	40.934092	KAVALAG3	15	157	166	MASW	K. Papazachos (personal comm., 2016)	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ	Αλλουβιακά ιζήματα
24.124804	40.979248	KAVALAG4	15	263	240	MASW	K. Papazachos (personal comm., 2016)	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ	Αλλουβιακά ιζήματα
24.285208	40.995821	TENAGH01	56.5	166	120	MASW	K. Papazachos (personal comm., 2016)	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ	Αλλουβιακά ιζήματα
24.286911	40.998583	TENAGH02	56	122	82	MASW	K. Papazachos (personal comm., 2016)	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ	Αλλουβιακά ιζήματα
23.978292	40.096566	SARSTH001e	20	238	369	SW Passive	Bard (2010)	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΗ	Αλλουβιακές αποθέσεις (Παράκτιες και δόμους από αμμόλιθους)
22.90052	41.166933	KNTXER001e	30	479	390	SW Passive	Bard (2010)	ΥΠΟΒΑΘΡΟ	Διμαρμαρυγικοί γνεύσιοι
23.2906	40.6638	VLVZAG008a	200	447	207	CH	Pitilakis (1995)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Κατώτερο σύστημα αναβαθμίδων
23.2509	40.65964	VLVZAG009e	30	248	248	SW Passive	Bard (2010)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Αποθέσεις στις κοίτες ποταμών και χειμάρρων
23.306758	40.67059	VLVZAG010e	30	302	302	SW Passive	Bard (2010)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Προσχώσεις κοιλάδων
23.324046	40.676239	VLVZAG011e	30	238	238	SW Passive	Bard (2010)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Προσχώσεις κοιλάδων
23.298442	40.655308	VLVZAG012a	200	539	267	CH	Pitilakis (1995)	ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ	Κατώτερο σύστημα αναβαθμίδων
22.983	40.733	LITTHE001a	20	489	532	CH	G. Athanasopoulos (personal comm., 1997)	ΜΕΣΟΖΩΙΚΟ	Ασβεστιτικός φλύσχης, εναλλαγές κλαστικών ή ψαμμιτικών σχηματισμών
22.9215	40.6544	THETHE003a	39	337	329	CH	Lontzetidis (1993) and Anastasiadis et al.(2000)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Ολοκαινικές αποθέσεις αδιάριτες:παράκτιες αποθέσεις(άμμοι),προσχώσεις πεδιάδων,ερυθρές άργιλοι με ασβετιτικά συγκρίματα. Στη βάση τις επικρατούν κροκαλοπαγή.

22.926483	40.637772	THETHE005b	78	309	206	DH(Limani)	Klimis (2008) and Raptakis et al.(1998)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Ολοκαινικές αποθέσεις αδιαίρετες:παράκτιες αποθέσεις(άμμοι),προσχώσεις πεδιάδων,ερυθρές άργιλοι με ασβετιτικά συγκρίματα.Στη βάση τις επικρατούν κροκαλοπαγή.
22.933956	40.639995	THETHE006a	25	324	344	CH	Lontzetidis (1993) and Anastasiadis et al.(2000)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Ολοκαινικές αποθέσεις αδιαίρετες:παράκτιες αποθέσεις(άμμοι),προσχώσεις πεδιάδων,ερυθρές άργιλοι με ασβετιτικά συγκρίματα.Στη βάση τις επικρατούν κροκαλοπαγή.
22.945948	40.638118	THETHE007a	30	524	524	CH	Lontzetidis (1993) and Anastasiadis et al.(2000)	ΥΠΟΒΑΘΡΟ	Λευκοκρατικός-αλβιτικός-σερικιτικός-μικροκλινικός γνεύσιος: (αλβίτης,μικροκλινής,μοσχοβίτης και επουσιώδη ορυκτά),γνευσιακό ή οφθαλμοειδή ιστό,σε ενστρώσεις μεσά στα μεταϊζημάτα.
22.944653	40.63575	THETHE008a-9a	28	522	536	CH - DH(Aristotelous)	K. Papazachos (personal comm., 2016)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Ολοκαινικές αποθέσεις αδιαίρετες:παράκτιες αποθέσεις(άμμοι),προσχώσεις πεδιάδων,ερυθρές άργιλοι με ασβετιτικά συγκρίματα.Στη βάση τις επικρατούν κροκαλοπαγή.
22.94	40.634	THETHE010h	250		325	MASW	P. Pelekis (personal comm., 2013)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Αδιαίρετες παράκτιες αποθέσεις από άμμους, χαλίκια-προσχώσεις πεδιάδων από ερυθρές αργίλους.
22.962812	40.631773	THETHE013b	22	742	879	DH(Seismologikos)	Klimis (2008) and Raptakis et al.(1998)	ΥΠΟΒΑΘΡΟ	Λευκοκρατικός-αλβιτικός-σερικιτικός-μικροκλινικός γνεύσιος: (αλβίτης,μικροκλινής,μοσχοβίτης και επουσιώδη ορυκτά),γνευσιακό ή οφθαλμοειδή ιστό,σε ενστρώσεις μεσά στα μεταϊζημάτα.
22.959892	40.628136	THETHE014b	40	385	346	DH	Klimis (2008) and Raptakis et al.(1998)	ΝΕΟΓΕΝΕΣ	Ψαμμιτομαργακή σειρά:ψαμμίτες εύθρυπτοι έως πολύ συμπαγείς,τοπικά μικροκροκαλοπαγή με διαστραυρωμένη στρώση. Κατά θέσεις υπάρχουν

									ορίζοντες από μάργες.
22.958696	40.626599	THETHE015a	29	283	285	CH	Lontzetidis (1993) and Anastasiadis et al.(2000)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Ολοκαινικές αποθέσεις αδιαίρετες:παράκτιες αποθέσεις(άμμοι),προσχώσεις πεδιάδων,ερυθρές άργιλοι με ασβετιτικά συγκρίματα.Στη βάση τις επικρατούν κροκαλοπαγή.
22.948656	40.625133	THETHE016a	55	305	238	CH	Geognosis, Inc. (2010)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Ολοκαινικές αποθέσεις αδιαίρετες:παράκτιες αποθέσεις(άμμοι),προσχώσεις πεδιάδων,ερυθρές άργιλοι με ασβετιτικά συγκρίματα.Στη βάση τις επικρατούν κροκαλοπαγή.
22.962335	40.617428	THETHE017a- 18a	28	450	453	CH-DH(Katsimidi)	K. Papazachos (personal comm., 2016)	ΝΕΟΓΕΝΕΣ	Ψαμμιτομαργακή σειρά:ψαμμίτες εύθρυπτοι έως πολύ συμπαγείς,τοπικά μικροκροκαλοπαγή με διασταυρωμένη στρώση.Κατά θέσεις υπάρχουν ορίζοντες από μάργες.
22.970353	40.613631	THETHE019a	25	385	379	CH	Lontzetidis (1993) and Anastasiadis et al.(2000)	ΝΕΟΓΕΝΕΣ	Ψαμμιτομαργακή σειρά:ψαμμίτες εύθρυπτοι έως πολύ συμπαγείς,τοπικά μικροκροκαλοπαγή με διασταυρωμένη στρώση.Κατά θέσεις υπάρχουν ορίζοντες από μάργες.
22.95353	40.61371	THETHE020e	37	296	269	SW Passive	Bard (2010)	ΝΕΟΓΕΝΕΣ	Ψαμμιτομαργακή σειρά:ψαμμίτες εύθρυπτοι έως πολύ συμπαγείς,τοπικά μικροκροκαλοπαγή με διασταυρωμένη στρώση.Κατά θέσεις υπάρχουν ορίζοντες από μάργες.
22.95237	40.611826	THETHE021a	30	248	248	CH	Lontzetidis (1993) and Anastasiadis et al.(2000)	ΝΕΟΓΕΝΕΣ	Ψαμμιτομαργακή σειρά:ψαμμίτες εύθρυπτοι έως πολύ συμπαγείς,τοπικά μικροκροκαλοπαγή με διασταυρωμένη στρώση.Κατά θέσεις υπάρχουν ορίζοντες από μάργες.

22.959084	40.601623	THETHE023a	27	261	267	CH(Patrikiou)	K. Papazachos (personal comm., 2016)	NEOGENES	Ψαμμιτομαργακή σειρά: ψαμμίτες εύθρυπτοι έως πολύ συμπαγείς, τοπικά μικροκροκαλοπαγή με διασταυρωμένη στρώση. Κατά θέσεις υπάρχουν ορίζοντες από μάργες.
22.958137	40.598407	THETHE024a	30	241	241	CH	Lontzetidis (1993) and Anastasiadis et al.(2000)	NEOGENES	Ψαμμιτομαργακή σειρά: ψαμμίτες εύθρυπτοι έως πολύ συμπαγείς, τοπικά μικροκροκαλοπαγή με διασταυρωμένη στρώση. Κατά θέσεις υπάρχουν ορίζοντες από μάργες.
22.955829	40.596615	THETHE025a	30	276	276	CH	Lontzetidis (1993) and Anastasiadis et al.(2000)	NEOGENES	Ψαμμιτομαργακή σειρά: ψαμμίτες εύθρυπτοι έως πολύ συμπαγείς, τοπικά μικροκροκαλοπαγή με διασταυρωμένη στρώση. Κατά θέσεις υπάρχουν ορίζοντες από μάργες.
22.955706	40.592689	THETHE026b	52	415	370	DH(Nomarxia)	Klimis (2008) and Raptakis et al.(1998)	NEOGENES	Ψαμμιτομαργακή σειρά: ψαμμίτες εύθρυπτοι έως πολύ συμπαγείς, τοπικά μικροκροκαλοπαγή με διασταυρωμένη στρώση. Κατά θέσεις υπάρχουν ορίζοντες από μάργες.
22.944231	40.579768	THETHE027a	30	330	330	CH	Lontzetidis (1993) and Anastasiadis et al.(2000)	NEOGENES	Ψαμμιτομαργακή σειρά: ψαμμίτες εύθρυπτοι έως πολύ συμπαγείς, τοπικά μικροκροκαλοπαγή με διασταυρωμένη στρώση. Κατά θέσεις υπάρχουν ορίζοντες από μάργες.
22.962067	40.632305	THETHESEISM	20	739	967	MASW	Oikonomou (2017)	ΥΠΟΒΑΘΡΟ	Λευκοκρατικός-αλβιτικός-σερικιτικός-μικροκλινικός γνεύσιος: (αλβίτης, μικροκλινής, μοσχοβίτης και επουσιώδη ορυκτά), γνευσιακό ή οφθαλμοειδή ιστό, σε ενστρώσεις μεσά στα μεταϊζημάτα.
23.03416	40.544765	THETRM028a	48	227	193	CH	Tsiambaos (2003)	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ	Ρυτίδια προσχώσεων διαφορετικής ηλικίας
22.752839	40.695612	FYSTHE001a	30	237	237	CH	Tsiambaos (2003) and Kapiri (2002)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Ολοκαινικές αποθέσεις αδιαίρετες: παράκτιες αποθέσεις (άμμοι). Προσχώσεις πεδιάδων, ερυθρές άργιλοι με ασβεστικά συγκρίματα. Στη βάση τις

									επικρατούν κροκαλοπαγή.
22.683	40.717	AXIPLA001a	40	381	393	CH	Raptakis and Lontzetidis (1994)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Νεότερες αποθέσεις που προέρχονται από τις πλημμύρες των ποταμών Αλιάκμονα και Αξιού, εναλλαγές θαλάσσιων, ποτάμιων και υφάλμυρων αποθέσεων
22.676687	40.671198	FYSPLA001a	30	467	467	CH	Tsiambaos (2003) and Kapiri (2002)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Συσσωρευσεις λεπτόκοκκων αμμων και πηλού στις εκβολές του Αξιού και Αλιάκμονα, που σχηματίζονται απο την απόθεση των μεταφερμενων απο το ρεύμα των ποταμών λεπτομερών υλικών και απο την δράση των κυμάτων.
22.533	40.633	PLAPLA001a	48	236	193	CH	Raptakis and Lontzetidis (1994)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Νεότερες αποθέσεις που προέρχονται από τις πλημμύρες των ποταμών Αλιάκμονα και Αξιού, εναλλαγές θαλάσσιων, ποτάμιων και υφάλμυρων αποθέσεων
22.4	40.583	LOUALE001a	34	135	133	CH	Pitilakis (1992) and Pitilakis et al.(1992)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Αποθέσεις πλημμύρας και προσχώσεις του ποταμού Αλιάκμονα
22.049566	40.804033	EDEEDE001c	30	356	356	SW Passive-Active	Bard (2010)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Σύγχρονοι και πρόσφατοι κώνοι χειμαρρωδών αποθέσεων.
21.783974	40.304931	KZKNZN003b	38	543	483	DH	Pitilakis (1998)	ΥΠΟΒΑΘΡΟ	Φλύσσης : Γενικά χονδροκλαστικός σχηματισμός, χωρίς κυκλοθερμική ανάπτυξη
21.788731	40.304004	KZKNZN004b	33	497	471	DH	Pitilakis (1998)	ΥΠΟΒΑΘΡΟ	Φλύσσης : Γενικά χονδροκλαστικός σχηματισμός, χωρίς κυκλοθερμική ανάπτυξη
21.801298	40.302805	KZKNZN005b	32	773	753	DH	Pitilakis (1998)	ΥΠΟΒΑΘΡΟ	Φλύσσης : Γενικά χονδροκλαστικός σχηματισμός, χωρίς κυκλοθερμική ανάπτυξη
21.792217	40.300103	KZKNZN006b	40	503	451	DH	Pitilakis (1998)	ΥΠΟΒΑΘΡΟ	Φλύσσης : Γενικά χονδροκλαστικός σχηματισμός, χωρίς κυκλοθερμική ανάπτυξη

21.787835	40.301364	KZKNKZN007b	43	460	392	DH	Pitilakis (1998)	ΥΠΟΒΑΘΡΟ	Φλύσσης : Γενικά χονδροκλαστικός σχηματισμός, χωρίς κυκλοθερμική ανάπτυξη
21.783268	40.299417	KZKNKZN008b	43	441	376	DH	Pitilakis (1998)	ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ	Συσώρευση διαφόρων τύπων χονδροκλαστικών ιζημάτων
21.797734	40.296074	KZKNKZN009a	40	437	444	CH	Pitilakis (1998)	ΠΛΕΙΟΚΑΙΝΟ	Μάργες, άργιλοι, άμμοι, λιγνίτες
21.792623	40.296257	KZKNKZN010b	36	315	316	DH	Pitilakis (1998)	ΠΛΕΙΟΚΑΙΝΟ	Μάργες, άργιλοι, άμμοι, λιγνίτες
21.791131	40.293838	KZKNKZN012b	35	534	622	DH	Pitilakis (1998)	ΠΛΕΙΟΚΑΙΝΟ	Μάργες, άργιλοι, άμμοι, λιγνίτες
21.783518	40.293192	KZKNKZN013b	42	424	354	DH	Pitilakis (1998)	ΠΛΕΙΟΚΑΙΝΟ	Μάργες, άργιλοι, άμμοι, λιγνίτες
21.798214	40.290095	KZKNKZN016b	43	814	671	DH	Pitilakis (1998)	ΠΛΕΙΟΚΑΙΝΟ	Μάργες, άργιλοι, άμμοι, λιγνίτες
21.87	40.13	RYMLIV001a	35	268	264	CH	Pitilakis (1997) and Raptakis et al. (1996, 1997)	ΟΛΟΚΑΙΝΟ	Παλιά και σύγχρονα πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων
21.83	40.16	AIALIV001a	40	391	345	CH	Pitilakis (1997) and Raptakis et al. (1996, 1997)	ΠΛΕΙΟΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΙΚΑ	Κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμοι, μάργες, άργιλοι και ερυθροί πηλοί.
21.738938	40.134833	CHRKNI001b	26	607	529	DH	Pitilakis (1997) and Raptakis et al. (1996, 1997)	ΠΛΕΙΟΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΙΚΑ	Κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμοι και κοκκινοχώματα
21.585688	40.095459	KNIKNI001c	22	578	469	SW Passive-Active	Pitilakis (1997) and Raptakis et al. (1996, 1997)	ΜΕΙΟΚΑΙΝΟ	Σειρά Τσοτυλίου , εναλλαγές ψαμμιτών, μαργών και ψαμμιτομαργων
21.622009	40.01782	KENKNI001a	30	307	307	CH	Pitilakis (1997) and Raptakis et al. (1996, 1997)	ΠΛΕΙΟΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΙΚΑ	Κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμοι και κοκκινοχώματα
21.52	40.07	KLXKNI001a	40	380	392	CH	Pitilakis (1997) and Raptakis et al. (1996, 1997)	ΠΛΕΙΟΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΙΚΑ	Ποτάμεις και λιμναίες αποθέσεις
20.50629	38.16416	ARGOKEA16	78	331	236	CH	K. Papazachos (personal comm., 2016)	ΠΛΕΙΟΚΑΙΝΟ	Κροκαλοπαγές, ψαμμίτης και ασβεστόλιθος
20.50629	38.16416	ARGOKES08	78	331	236	DH	K. Papazachos (personal comm., 2016)	ΠΛΕΙΟΚΑΙΝΟ	Κροκαλοπαγές, ψαμμίτης και ασβεστόλιθος

2.1.1. Όργανα Καταγραφής Εδαφικού Θορύβου

Για τις μετρήσεις του εδαφικού θορύβου μονού σταθμού, τα όργανα καταγραφής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι σεισμόμετρα τριών συνιστωσών κάθε τύπου, π.χ. βραχείας περιόδου ή ευρέως φάσματος. Το πλεονέκτημα των βραχείας περιόδου σεισμομέτρων, είναι ότι χρειάζονται πολύ λιγότερο χρόνο (μερικά λεπτά) για να φτάσουν σε κατάσταση ηρεμίας και να είναι έτοιμα για χρήση από ότι τα ευρέως φάσματος. Τα όργανα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις της παρούσας διατριβής ήταν σεισμόμετρο τύπου Lennart (Le-3D/5s) και καταγραφικό City shark II ή Guralp CMG-6TD (40T-60 sec).

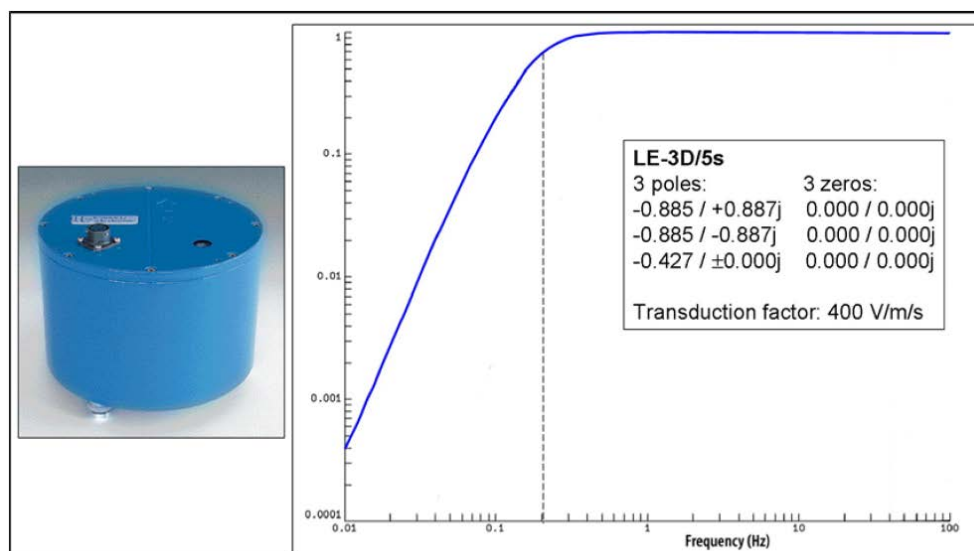
Το σύστημα Lennart (Le-3D/5s) & Cityshark II αποτελείται από:

- Το σεισμόμετρο Lennart (Le-3D/5s).
- Ψηφιοποιητής και τροφοδοτικό City Shark II, με κεραία προσδιορισμού γεωγραφικών συντεταγμένων (GPS).
- Κάρτα αποθήκευσης δεδομένων (compact flash cart).
- Καλώδιο επικοινωνίας μεταξύ σεισμομέτρου και καταγραφέα/τροφοδοτικού.

Στο σχήμα 2.4. παρουσιάζεται ο εξοπλισμός Lennart Le-3D/5s & Cityshark II. Το σεισμόμετρο Lennart είναι ταχυτητόμετρο τριών συνιστωσών, ενδιάμεσης ιδιοπεριόδου 5 sec, με κρίσιμη απόσβεση 0.707 και ευαισθησία 400 V/m/sec, με ανώτερο όριο συχνότητας κίνησης στα 50 Hz. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται το σεισμόμετρο Lennart Le-3D/5s (αριστερά) και η απόκριση στην εδαφική ταχύτητα που διαθέτει (δεξιά). Όπως φαίνεται, για συχνότητες από 0.2 Hz μέχρι τα 100 Hz το Lennart Le-3D/5s παρουσιάζει σταθερή απόκριση. Το City Shark II αποτελεί το ψηφιοποιητή και το τροφοδοτικό, διαθέτοντας μεγάλα πλεονεκτήματα φορητότητας. Επίσης, διαθέτει τη δυνατότητα καθορισμού του χρόνου και της επανάληψης της κάθε μέτρησης, της συχνότητας δειγματοληψίας (frequency sample), της αλλαγής ευαισθησίας της απόκρισης (gain) και του κορεσμού της κλίμακας της καταγραφής (overlap).



Σχ. 2.4. Όργανα καταγραφής εδαφικού θορύβου Lennart Le-3D/5s & Cityshark II.



Σχ. 2.5. Το σεισμόμετρο Lennart Le-3D/5s (αριστερά) και η απόκρισή του στη εδαφική ταχύτητα (δεξιά) (<http://www.lennartz-electronic.de/>).

Το σεισμόμετρο Guralp CMG-6TD (40T-60 sec) είναι ένα μακράς περιόδου (60 sec) σεισμόμετρο τριών συνιστωσών και η απόκριση του οργάνου είναι επίπεδη για ταχύτητες από 0.16 Hz μέχρι 100 Hz (www.guralp.com/products/6TD). Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε flash memory στο εσωτερικό του οργάνου και η ανάκτηση τους γίνεται μέσω της χρήσης εξωτερικής flash disk ή μέσω της χρήσης

διαδικτύου (Internet). Η τροφοδοσία πραγματοποιείται μέσω φορητής μπαταρίας (UPS) και διαθέτει κεραία προσδιορισμού γεωγραφικών συντεταγμένων. Επίσης, διαθέτει την δυνατότητα παρακολούθησης της καταγραφής μέσω φορητού υπολογιστή.



Σχ. 2.6. Ο σειсмоγράφος Guralp CMG-6TD (40T-60 sec) (www.guralp.com/products/6TD).

Η μεθοδολογία για την εκτέλεση των μετρήσεων του εδαφικού θορύβου, βασίστηκε στα αποτελέσματα και προτάσεις από το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα **SESAME** (Site Effects assessment using Ambient Excitations, European Commission – Research Directorate-General, Contract No: EVG1-CT-2000-00026). Πλήρης και αναλυτική περιγραφή των συμπερασμάτων και προδιαγραφών του προγράμματος SESAME (<http://sesame.geopsy.org/>, 2004) παρουσιάζεται στην διδακτορική διατριβή της **Panou (2007)**. Οι κυριότεροι παράμετροι συνοψίζονται ως εξής:

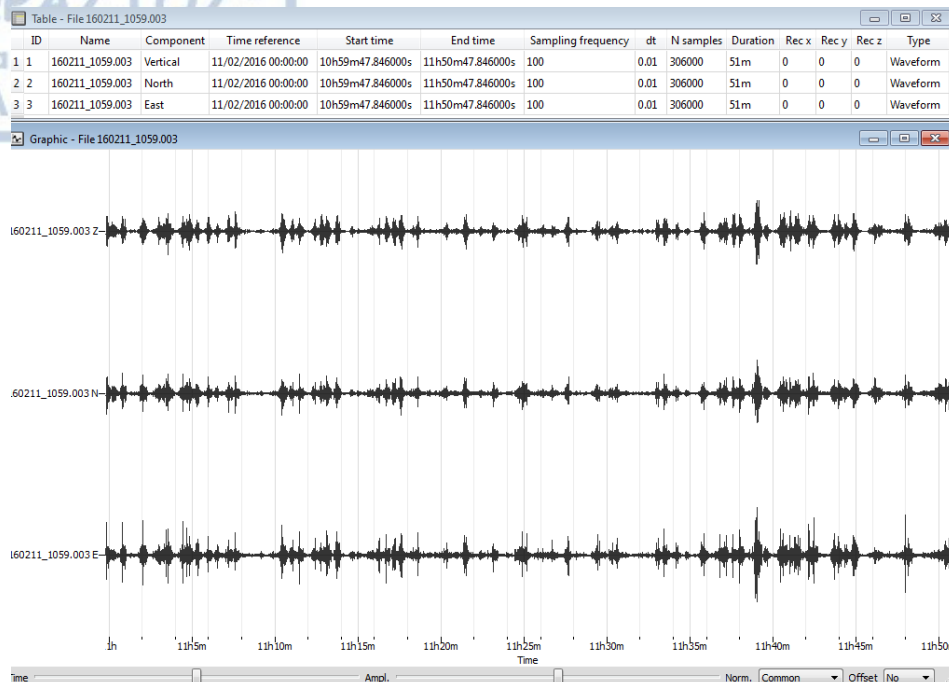
- Το όργανο πρέπει να είναι σεισμόμετρο ταχύτητας και να αποφεύγεται η χρήση επιταχυνσιομέτρων. Η φυσική συχνότητα του σεισμομέτρου πρέπει να είναι μικρότερη από την ιδιοσυχνότητα ενδιαφέροντος. Κατά τη τοποθέτηση θα πρέπει να είναι καλά οριζοντιωμένο, με προσανατολισμένη τη συνιστώσα B-N στο βορρά και να επιτυγχάνεται καλή σύζευξη με το έδαφος.

- Πρέπει η διάρκεια της καταγραφής να είναι τουλάχιστον 30 min ώστε να είναι δυνατή η καταγραφή χαμηλών συχνοτήτων ($f_0=0.2$ Hz) και συνίσταται να πραγματοποιούνται τρεις τουλάχιστον μετρήσεις για να αποφεύγονται τυχαία σφάλματα. Σε περίπτωση της ύπαρξης παροδικών διαταραχών (όπως ο αστικός θόρυβος) θα πρέπει να αυξάνεται η διάρκεια της καταγραφής.
- Πρέπει να αποφεύγεται η εκτέλεση μετρήσεων με έντονες μετεωρολογικές συνθήκες, όπως με άνεμο και βροχή. Επίσης, πρέπει να αποφεύγεται η εκτέλεση των μετρήσεων πάνω από υπόγειους δόμους (καπάκια υπονόμων κ.α.), σε μαλακά εδάφη (λάσπη, οργωμένο χώμα κ.α.) και κοντά σε βιομηχανικές περιοχές. Οι μετρήσεις πάνω σε ασφάλτο δεν επηρεάζουν το αποτέλεσμα.

2.1.2. Δεδομένα Εδαφικού Θορύβου

Τα δεδομένα που συλλέγονται από τις μετρήσεις αντιστοιχούν σε καταγραφές εδαφικού θορύβου τριών συνιστωσών. Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζεται καταγραφή εδαφικού θορύβου από μία ενδεικτική μέτρηση στο Νέστο (NESXAN005a). Στο πάνω μέρος του σχήματος δίνονται οι πληροφορίες των καταγραφών της κάθε συνιστώσας, όπως είναι η ημερομηνία και ο χρόνος κατά τον οποίο ξεκίνησε και τελείωσε η καταγραφή, η συχνότητα δειγματοληψίας (frequency sampling), η διάρκεια της καταγραφής κ.α. Στο κάτω μέρος του σχήματος παρουσιάζεται η καταγραφή για τις τρεις συνιστώσες, την κατακόρυφη, τη βορρά-νότου και ανατολής-δύσης (V, N, E, αντίστοιχα).

Οι μετρήσεις του εδαφικού θορύβου πραγματοποιήθηκαν σε αστικές περιοχές, αλλά και στην ύπαιθρο. Στις αστικές περιοχές οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της νύχτας (μετά από τις 00:00) για τον περιορισμό της επίδρασης του αστικού θορύβου, με διάρκεια καταγραφής 50 min και 60 min (ανάλογα με την ιδιαιτερότητα της κάθε θέσης). Στις περιοχές της υπαίθρου οι μετρήσεις έγιναν κατά τη διάρκεια της μέρας, με τυπική διάρκεια καταγραφής 40 min και 50 min. Σε όλες τις περιπτώσεις η συχνότητα δειγματοληψίας (frequency sampling) ήταν 100 Hz.



Σχ. 2.7. Καταγραφή εδαφικού θορύβου τριών συνιστωσών από την θέση NESXAN005a στην περιοχή του Νέστου. Στο πάνω μέρος του σχήματος δίνονται οι πληροφορίες για την κάθε συνιστώσα και στο κάτω μέρος του σχήματος παρουσιάζεται η κάθε καταγραφή.

2.2. Επεξεργασία Δεδομένων

Για την επεξεργασία των δεδομένων του εδαφικού θορύβου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο Geopsy (Wathelet 2005, <http://www.geopsy.org>). Το Geopsy δημιουργήθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος SESAME και αποτελεί ένα σύγχρονο και εξελισσόμενο εργαλείο για την επεξεργασία των δεδομένων του εδαφικού θορύβου. Το λογισμικό πακέτο GEOPSY αποτελείται από επιμέρους υποπρογράμματα, ανάλογα για την μέθοδο επεξεργασίας. Στη παρούσα διατριβή, τα υποπρογράμματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν είναι:

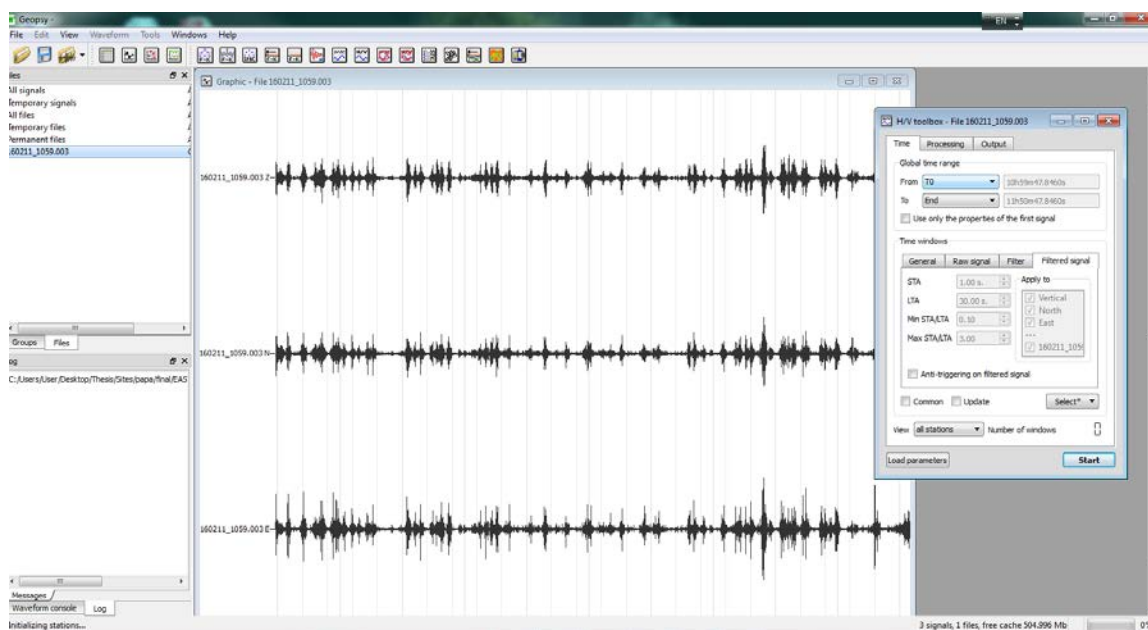
- *Geopsy*, για τον υπολογισμό των καμπυλών των φασματικών λόγων της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα (HVSR). Επίσης, τον υπολογισμό των φασμάτων (Spectrum) της κάθε συνιστώσας για τον εντοπισμό ανεπιθύμητου θορύβου, ώστε να εξεταστεί η αξιοπιστία της καταγραφής.
- *Grrell*, για τον υπολογισμό της ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh, από το προφίλ σεισμικών ταχυτήτων με το βάθος, κυρίως για περιπτώσεις με γνωστό το βάθος του υποβάθρου.

- *Dinver*, για την αντιστροφή των καμπυλών ελλειπτικότητας και την εκτίμηση του μονοδιάστατου προφίλ σεισμικών ταχυτήτων με το βάθος.

Τέλος, για τη διάκριση/εξαγωγή των κυμάτων Rayleigh στις καταγραφές του εδαφικού θορύβου έγινε χρήση του κώδικα RAYDEC (**Hobiger et al., 2009**).

2.2.1. Υπολογισμός Καμπυλών Ελλειπτικότητας HVSR

Όπως προαναφέρθηκε, για τον υπολογισμό των καμπυλών ελλειπτικότητας των φασματικών λόγων της οριζόντιας προς της κατακόρυφη συνιστώσα (HVSR), το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε, είναι το λογισμικό *Geopsy*. Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται μία τυπική εικόνα του λογισμικού *Geopsy*. Σε αυτό το σχήμα, παρουσιάζεται μία τυπική καταγραφή εδαφικού θορύβου, στην οποία θα εκτελεστεί η μέθοδος επεξεργάστηκε HVSR.



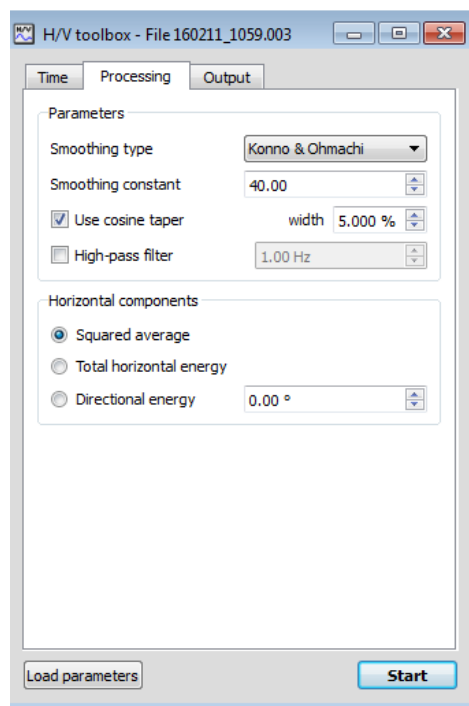
Σχ. 2.8. Λογισμικό *Geopsy* με τυπική καταγραφή εδαφικού θορύβου.

Τα στάδια επεξεργασίας είναι τα ακόλουθα:

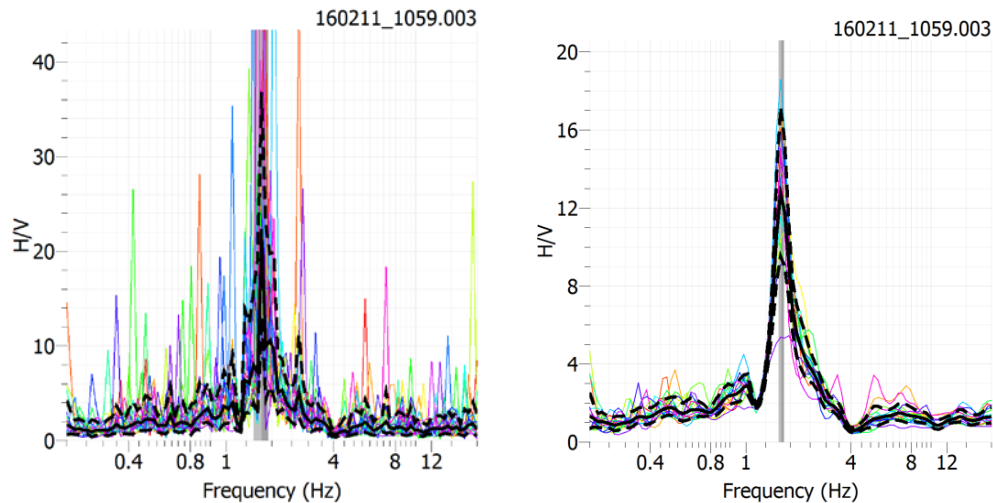
- Επιλογή του εύρους συχνοτήτων, για το οποίο θα πραγματοποιηθεί η φασματική ανάλυση. Το εύρος συχνοτήτων, το οποίο χρησιμοποιήθηκε αφορούσε τις συχνότητες από 0.2 Hz μέχρι 20 Hz. Εξαίρεση αποτελούν οι περιπτώσεις, στις οποίες το υπόβαθρο ήταν σε πολύ μικρό βάθος, οπότε και

το μέγιστο όριο συχνότητας μπορεί να μετατοπιστεί και σε υψηλότερες τιμές.

- Επιλογή του φίλτρου εξομάλυνσης (smoothing type) «Konno&Ohmachi» (Konno and Ohmachi, 1998) και σταθερά εξομάλυνσης (smoothing constant)=40 (Σχ. 2.9). Η εφαρμογή του συγκεκριμένου τύπου εξομάλυνσης έχει ως αποτέλεσμα, τα πλάτη του φασματικού λόγου να εξομαλύνονται σε ίσα διαστήματα λογαρίθμου συχνότητας. Στο σχήμα 2.10 δίνεται παράδειγμα αποτελεσμάτων επεξεργασίας HVSR, χωρίς (αριστερά) και με τη χρήση φίλτρου εξομάλυνσης τύπου Konno&Ohmachi (δεξιά).
- Συνημιτονικό φίλτρο απόληξης (cosine taper) = 5% (Σχ. 2.9).
- Επιλογή της μεθόδου του υπολογισμού του γεωμετρικού μέσου στις δύο (2) οριζόντιες συνιστώσες, για τον υπολογισμό της μέσης οριζόντιας συνιστώσας (Σχ. 2.9).



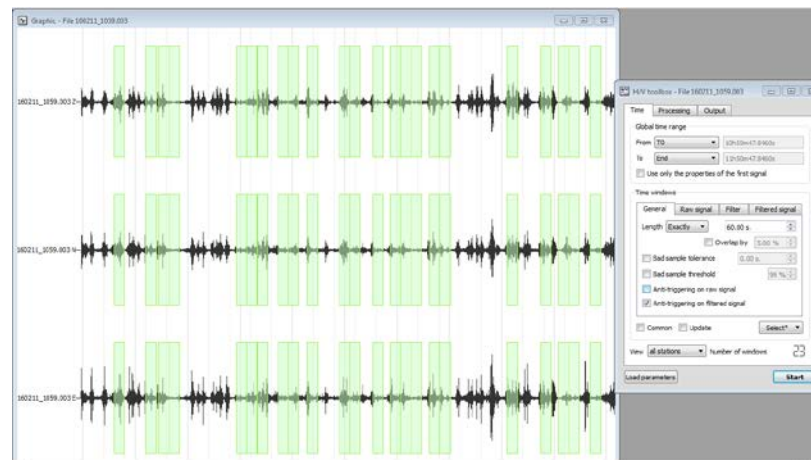
Σχ. 2.9. Επιλογή του φίλτρου εξομάλυνσης, της σταθεράς εξομάλυνσης, του συνημιτονικού φίλτρου απόληξης και του τρόπου υπολογισμού του οριζοντίου φάσματος.



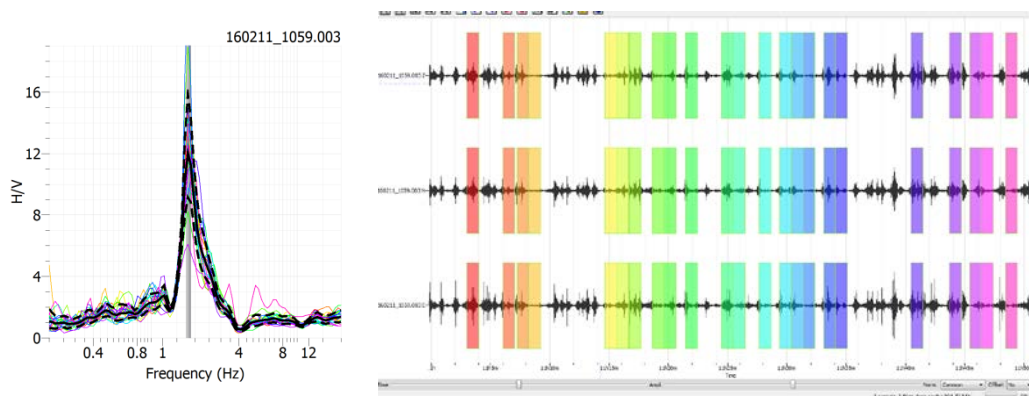
Σχ. 2.10. Παράδειγμα υπολογισμού τυπικής καμπύλης HVSR χωρίς (αριστερά) και με τη χρήση φίλτρου εξομάλυνσης Konno&Ohmachi (δεξιά).

- Επιλογή του χρόνου και του αριθμού των παραθύρων, στα οποία θα πραγματοποιηθεί η φασματική ανάλυση HVSR. Στη παρούσα έρευνα, το κάθε παράθυρο επιλέχθηκε να είναι 60 sec, ενώ η επιλογή των ήσυχων παραθύρων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση Anti-Trigering filtering signal ή raw Signal του λόγου STA/LTA. Ως STA/LTA, αναφέρεται ο λόγος των πλατών του σήματος για μικρό χρονικό παράθυρο, STA, προς ένα σημαντικά πιο μεγάλο χρονικό παράθυρο, LTA. Προτεινόμενες τιμές είναι για STA=1 sec και LTA=30 sec. Επίσης, προτεινόμενες ελάχιστες και μέγιστες τιμές του λόγου STA/LTA είναι $\min(STA/LTA)=0.2$ sec και $\max(STA/LTA)=2.5$ sec. Στην περίπτωση κατά την οποία, ο αριθμός των παραθύρων δεν είναι αρκετός, προτείνεται η αλλαγή των ελάχιστων και μέγιστων τιμών του λόγου STA/LTA, ώστε να αυξάνεται το εύρος των τιμών που μπορεί να αποκτήσει. Στη παρούσα διατριβή, έγινε προσπάθεια ώστε ο ελάχιστος αριθμός χρονικών παραθύρων να είναι τουλάχιστον 20 για κάθε καταγραφή. Στο σχήμα 2.11 παρουσιάζεται παράδειγμα όπου έχουν επιλεγεί 23 παράθυρα διάρκειας 60 sec.
- Το τελικό αποτέλεσμα είναι ο υπολογισμός του φασματικού λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα. Στο σχήμα 2.12

παρουσιάζεται η καμπύλη HVSR (αριστερά), όπως προκύπτει από το *Geopsy*, με βάση τα παράθυρα τα οποία επιλέχθηκαν (δεξιά).



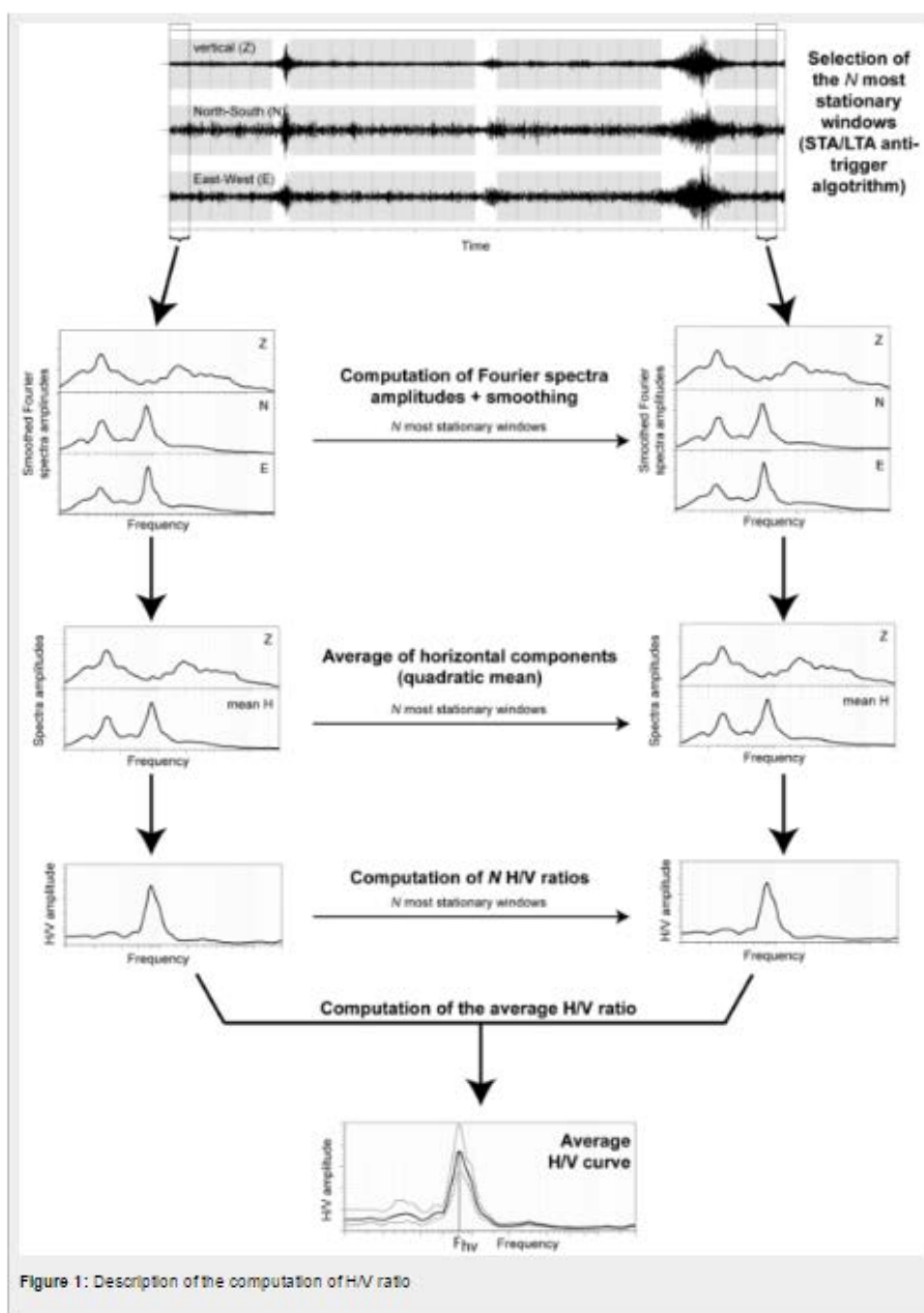
Σχ. 2.11. Επιλογή των χρονικών παραθύρων στο σήμα του εδαφικού θορύβου για τον προσδιορισμό του λόγου HVSR.



Σχ. 2.12. Η καμπύλη ελλειπτικότητας HVSR (αριστερά) μετά από την επεξεργασία του *Geopsy* με χρήση των συγκεκριμένων παραθύρων (δεξιά).

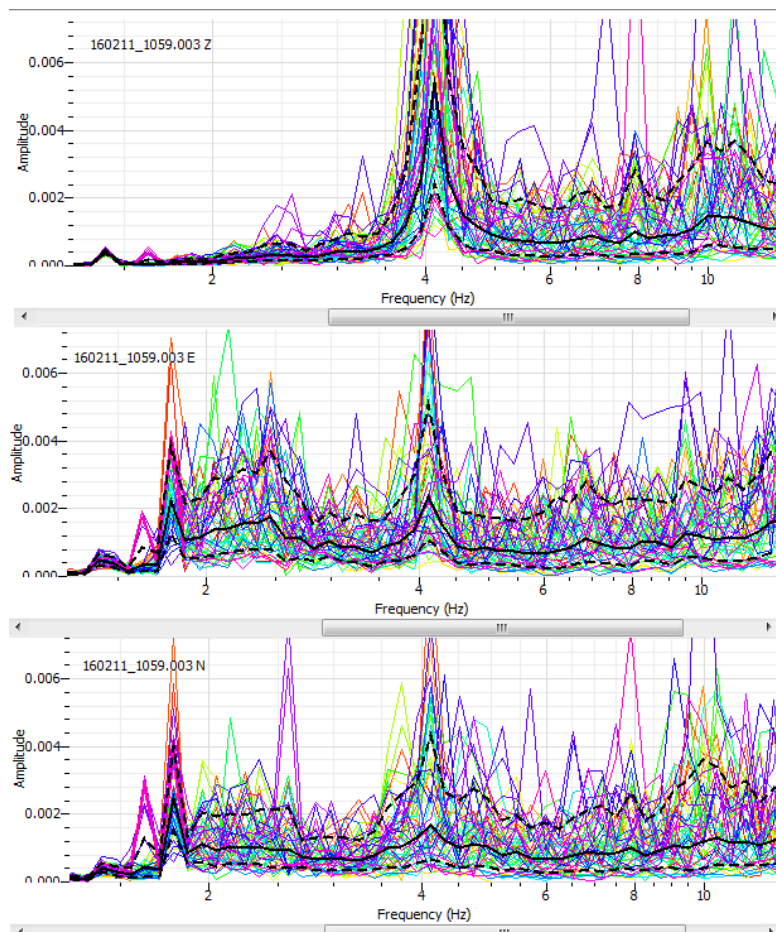
Στο σχήμα 2.13 παρουσιάζονται τα στάδια επεξεργασίας τα οποία πραγματοποιούνται στο *Geopsy* για τον υπολογισμό της καμπύλης ελλειπτικότητας HVSR. Αρχικά, από το κάθε επιλεγμένο παράθυρο (πάνω), υπολογίζονται τα φάσματα της κάθε συνιστώσας και εφαρμόζεται το φίλτρο εξομάλυνσης Konno-Ohmachii (μέση πάνω). Στη συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος από τις δύο οριζόντιες συνιστώσες (μέση). Μετά πραγματοποιείται ο υπολογισμός του λόγου HVSR (μέση κάτω). Τέλος, υπολογίζεται η μέση καμπύλη HVSR από κάθε καμπύλη, η οποία υπολογίστηκε για κάθε παράθυρο (κάτω).

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των καμπυλών HVSR, για κάθε καταγραφή πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των φασμάτων της κάθε συνιστώσας, για τον εντοπισμό ανεπιθύμητων, στιγμιαίων και έντονων πλατών σε κάποια συγκεκριμένη συχνότητα (spikes). Αυτός ο φασματικός έλεγχος πρέπει να πραγματοποιείται χωρίς τη χρήση κάποιου φίλτρου εξομάλυνσης (Σχ. 2.14).



Σχ. 2.13. Στάδια επεξεργασίας, τα οποία πραγματοποιούνται από το Geopsy, για τον υπολογισμό της καμπύλης HVSR. Από κάθε επιλεγμένο παράθυρο (πάνω), υπολογίζονται τα φάσματα της κάθε συνιστώσας και γίνεται χρήση του φίλτρου εξομάλυνσης

Konno&Ohmachi (μέση πάνω), υπολογισμός του γεωμετρικού μέσου από τις δύο οριζόντιες συνιστώσες (μέση), υπολογισμός του λόγου HVSR (μέση κάτω) και ο υπολογισμός της μέσης καμπύλης HVSR από κάθε καμπύλη η οποία προέκυψε για κάθε παράθυρο (από <http://www.geopsy.org>).



Σχ. 2.14. Έλεγχος για ανεπιθύμητα πλάτη (spikes) με την χρήση της φασματικής ανάλυσης στις τρεις συνιστώσες.

2.2.2. Υπολογισμός Θεωρητικής Καμπύλης Ελλειπτικότητας Κυμάτων Rayleigh

Ο υπολογισμός της θεωρητικής καμπύλης ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh πραγματοποιήθηκε ώστε να ερευνηθεί η αξιοπιστία των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR. Στην ουσία, αποτελεί τη λύση του ευθέος προβλήματος, ώστε από το προφίλ (δομή) σεισμικών ταχυτήτων με το βάθος να προκύψει η θεωρητική καμπύλη ελλειπτικότητας των Rayleigh κυμάτων.

Όπως προαναφέρθηκε, το λογισμικό επεξεργασίας, το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θεωρητικής καμπύλης ελλειπτικότητας των Rayleigh κυμάτων είναι το *gpell* του GEOPSY (www.geopsy.com). Απαραίτητη

προϋπόθεση αποτελεί η γνώση της γεωφυσικής δομής του υπεδάφους, εκφρασμένη σε σεισμικές ταχύτητες, πυκνότητα και ελαστικές σταθερές των σχηματισμών μέχρι το βάθος του υποβάθρου. Η πυκνότητα του εδάφους (σε gr/cm^3) μπορεί να υπολογιστεί με βάση τη σχέση του **Boore (2016)** για $V_s < 0.30$ km/sec:

$$\rho = 1 + \frac{1.53V_s^{0.85}}{0.35 + 1.889V_s^{1.7}} \quad (2.1)$$

ενώ για $0.30 \text{ km/sec} < V_s < 3.55 \text{ km/sec}$ η σχέση γίνεται:

$$\rho = 1.74V_p^{0.25} \quad (2.2)$$

όπου V_s η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων, V_p η ταχύτητα των επιμηκών κυμάτων και ρ η πυκνότητα. Στην περίπτωση όπου η ταχύτητα V_p των επιμηκών κυμάτων δεν είναι γνωστή, υπολογίζεται μέσω της σχέσης (**Gardner et al., 1974**):

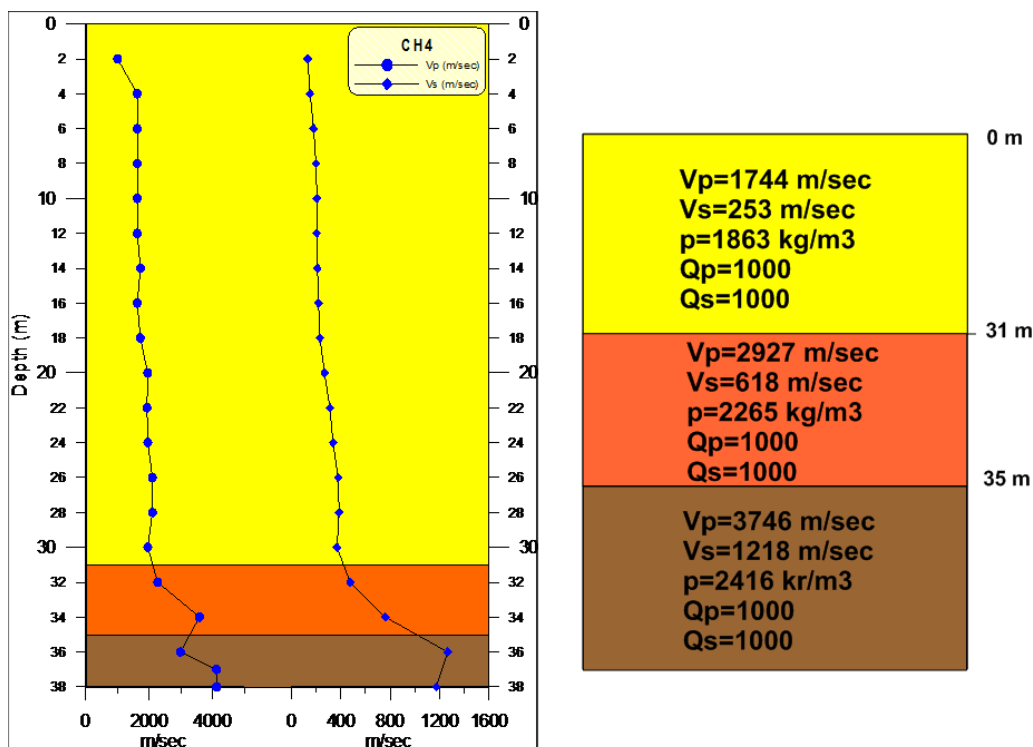
$$V_p = 0.9409 + 2.0947V_s - 0.8206V_s^2 + 0.2683V_s^3 - 0.0251V_s^4 \quad (2.3)$$

Το τελικό στάδιο, περιλαμβάνει τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας των επιμηκών και εγκάρσιων κυμάτων, και της μέσης πυκνότητας για το κάθε στρώμα, έτσι ώστε να προκύψει ένα απλοποιημένο μοντέλο δομής με ομογενή σχηματισμούς. Στη παρούσα έρευνα για λόγους απλοποίησης, θεωρήθηκε ότι τα στρώματα έχουν ελαστικές ιδιότητες με ελαστικές σταθερές $Q_p = Q_s = 1000$. Στο σχήμα 2.15 παρουσιάζεται παράδειγμα της δομής των σεισμικών ταχυτήτων δύο στρωμάτων πάνω από ημιχώρο (αριστερά), για τη θέση NESXAN005a και της μέσης/απλοποιημένης δομής (δεξιά) των σεισμικών ταχυτήτων (P , S) και των πυκνοτήτων (ρ) των στρωμάτων από την χρήση των σχέσεων 2.1, 2.2 και 2.3, για τον υπολογισμό της ελλειπτικότητας των Rayleigh κυμάτων. Οι πληροφορίες του τελικού αρχείου, το οποίο εισάγετε στο λογισμικό *gpell*, παρουσιάζονται στο πίνακα 2.2, όπου στη πρώτη γραμμή δίνεται ο αριθμός των στρωμάτων μαζί με τον ημιχώρο, από τη δεύτερη γραμμή και στην πρώτη στήλη τα πάχη του κάθε στρώματος σε m, στην δεύτερη και τρίτη στήλη οι μέσες ταχύτητες V_p και V_s σε m/sec, αντίστοιχα, στην τέταρτη η μέση πυκνότητα σε kg/cm^3 και πέμπτη και έκτη οι ελαστικές σταθερές Q_p και Q_s , αντίστοιχα, για το κάθε στρώμα και τον ημιχώρο.

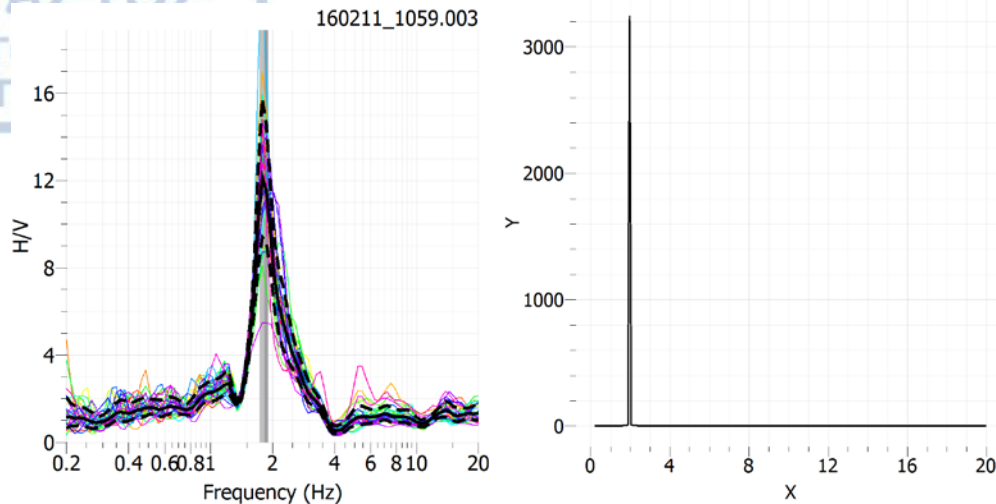
Πίνακας 2.2. Παράδειγμα αρχείου μέσης δομής του εδάφους, το οποίο εισάγεται στο λογισμικό *gpell* για τον υπολογισμό της ελλειπτικότητας των Rayleigh κυμάτων.

3					
31	1744	253	1863	1000	1000
4	2927	618	2265	1000	1000
0	3746	1218	2416	1000	1000

Τέλος, το λογισμικό *gpell* υπολογίζει για κάθε συχνότητα την καμπύλη ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh. Ένα ενδεικτικό αποτέλεσμα θεωρητικής καμπύλης ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh, για την θέση NESXAN005a, παρουσιάζεται στο σχήμα 2.16. Αριστερά δίνεται η καμπύλη ελλειπτικότητας όπως προσδιορίστηκε πειραματικά από τη μέθοδο HVSr ($f_0=1.8$ Hz) και δεξιά η θεωρητική καμπύλη ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh ($f_0=1.96$ Hz). Οι υπερβολικές μεγάλες τιμές στα πλάτη της καμπύλης ελλειπτικότητας των Rayleigh οφείλονται πιθανότατα στο απλοποιημένο μοντέλο στο οποίο μετατράπηκε η πραγματική δομή, αλλά και στο ότι θεωρήθηκε ότι τα στρώματα έχουν πρακτικά ελαστικές ιδιότητες.



Σχ. 2.15. Δομή του υπεδάφους (αριστερά) εκφρασμένη σε σεισμικές ταχύτητες για τη θέση NESXAN005a και απλοποιημένη δομή στρωμάτων (δεξιά) που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh.



Σχ. 2.16. Η καμπύλη ελλειπτικότητας από την μέθοδο HVSr (αριστερά) και η θεωρητική καμπύλη ελλειπτικότητας των Rayleigh κυμάτων (δεξιά) για τη θέση NESXAN005a.

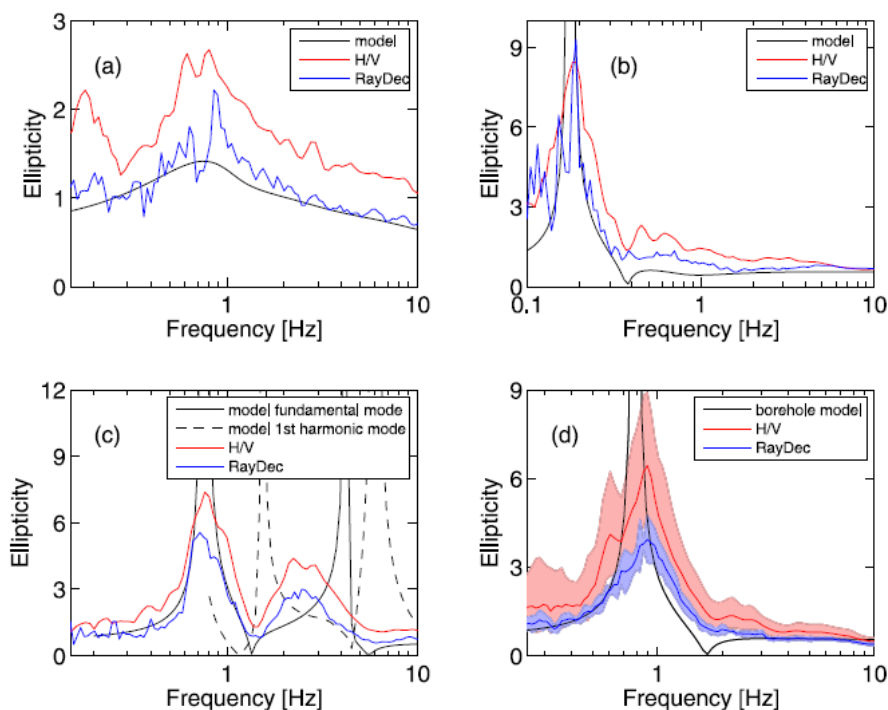
2.2.3. Δοκιμές Διάκρισης Κυμάτων Rayleigh σε Καταγραφές Θορύβου

Η μεταβολή της ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh με τη συχνότητα είναι στενά συνδεδεμένη με την υπεδάφια γεωφυσική δομή, δηλαδή με τη μεταβολή της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων με το βάθος. Ωστόσο, η συμμετοχή των Love κυμάτων και των κυμάτων χώρου στον εδαφικό θόρυβο ποικίλει και μπορεί να είναι σημαντική (όπως έγινε αναφορά στην παράγραφο 1.2.1). Η διάκριση των Rayleigh κυμάτων στον εδαφικό θόρυβο μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση του κώδικα RAYDEC (**Hobiger et al., 2009**). Αυτός ο κώδικας, εκτιμά το φάσμα της ελλειπτικότητας των Rayleigh κυμάτων κάνοντας χρήση της τεχνικής τυχαίας μείωσης (random decrement technique) (**Asmussen, 1997**).

Για την αξιοπιστία της χρήσης του κώδικα RAYDEC, οι **Hobiger et al. (2009)** πραγματοποίησαν δοκιμές σε τρεις συνθετικές προσομοιώσεις θορύβου και μία σε πραγματικά δεδομένα θορύβου. Στο σχήμα 2.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις δοκιμές στα συνθετικά δεδομένα (σχήματα 2.17a, b και c) και σε ένα πραγματικό (σχήμα 2.17d). Στο κάθε σχήμα, με μαύρη γραμμή δίνεται η θεωρητική καμπύλη ελλειπτικότητα του θεμελιώδους Rayleigh, ενώ με διακεκομμένη μαύρη γραμμή δίνεται η θεωρητική καμπύλη για του πρώτου αρμονικού όρου Rayleigh (σχήμα 2.17c) από τη χρήση του μοντέλου ταχυτήτων. Με κόκκινη γραμμή,

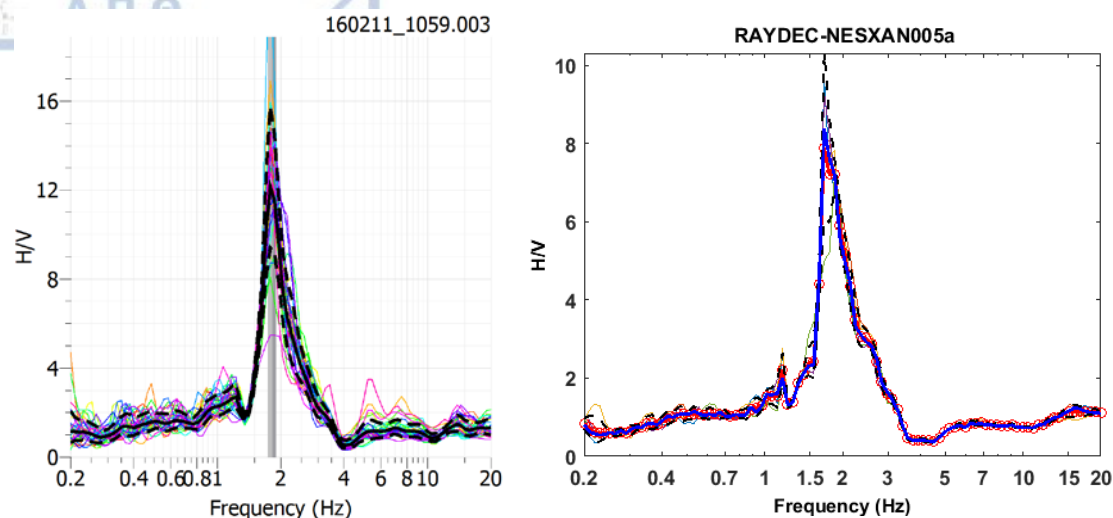
παρουσιάζεται η καμπύλη ελλειπτικότητας HVSr και με μπλε η καμπύλη ελλειπτικότητας από τον κώδικα RAYDEC. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι καμπύλες ελλειπτικότητας του RAYDEC είναι σε καλύτερη συμφωνία με τις θεωρητικές καμπύλες, από ότι οι καμπύλες της μεθόδου HVSr. Εξαιρέσεις αποτελούν περιπτώσεις πολύ χαμηλών συχνοτήτων (<0.15 Hz) και η περίπτωση της καμπύλης με παρουσία πρώτου ανώτερου αρμονικού όρου των κυμάτων Rayleigh (2.17c).

Παράδειγμα εφαρμογής του κώδικα RAYDEC, με τη χρήση δεδομένων εδαφικού θορύβου της παρούσας διατριβής, δίνεται στο σχήμα 2.18 για τη θέση NESXAN005a στην περιοχή του Νέστου. Στο αριστερό μέρος του σχήματος παρουσιάζεται η καμπύλη ελλειπτικότητας, όπως προκύπτει από την μέθοδο HVSr, και στο δεξί αυτό με χρήση του κώδικα RAYDEC. Και οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν πολύ καλή συμφωνία και στη μορφή αλλά και στην ιδιοσυχνότητα που προσδιορίζουν (HVSr=1.8 Hz, RAYDEC=1.7 Hz). Η διαφορά τους εμφανίζεται κυρίως στα μέγιστα πλάτη των καμπυλών, ενδεχομένως λόγω συνεισφοράς και άλλου τύπου κυμάτων (Love και κύματα χώρου) στις οριζόντιες συνιστώσες της καμπύλης HVSr.



Σχ. 2.17. Σύγκριση μεταξύ καμπυλών ελλειπτικότητας, οι οποίες προέκυψαν από την μέθοδο HVSr (κόκκινη γραμμή), με χρήση του κώδικα RAYDEC (μπλε γραμμή) και η θεωρητική καμπύλη από το προφίλ ταχυτήτων (μαύρη γραμμή), για συνθετικές καταγραφές (a,b και c) και από πραγματικά δεδομένα (d). Στο σχήμα c, δίνεται με διακεκομμένη μαύρη γραμμή η

καμπύλη ελλειπτικότητας, η οποία προκύπτει από πρώτο αρμονικό όρο Rayleigh (τροποποιημένο από *Hobiger et al.*, 2009).



Σχ. 2.18. Εφαρμογή του κώδικα RAYDEC σε καταγραφή εδαφικού θορύβου στη θέση NESXAN005a, στη περιοχή του Νέστου. Αριστερά, η καμπύλη από την μέθοδο HVSR. Δεξιά, η καμπύλη από την χρήση του κώδικα RAYDEC.

2.2.4. Εκτίμηση Βάθους Υποβάθρου

Ο σκοπός της παρούσας διατριβής, είναι η εύρεση ενός γενικού και απλού τρόπου υλοποίησης της μεθόδου της αντιστροφής των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR, ο οποίος να εφαρμόζεται σε κάθε καμπύλη HVSR και να επιφέρει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, με τη χρήση των ελαχίστων δυνατών πληροφοριών επιφανειακής δομής. Η εύρεση αυτού του γενικού/απλού τρόπου μεθοδολογίας, αφορά ένα αρχικό μοντέλο δομής, το οποίο περικλείεται ως αρχική πληροφορία στην αντιστροφή για τον περιορισμό της μη-μοναδικότητας των λύσεων. Τα διαθέσιμα δεδομένα για τον καθορισμό του αρχικού μοντέλου δομής για την αντιστροφή, είναι η ιδιοσυχνότητα (από την καμπύλη HVSR) και οι ταχύτητες των εγκαρσίων κυμάτων σε συνάρτηση με το βάθος (από τα προφίλ των εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος, από τη βάση δεδομένων της παρούσας διατριβής), αλλά και το βάθος του υποβάθρου, για τις θέσεις που ήταν διαθέσιμο.

Λόγω του ότι το βάθος του υποβάθρου δεν είναι πάντα γνωστό, προέκυψε η ανάγκη της εύρεσης ενός γενικού κανόνα για την αρχική εκτίμηση αυτού του βάθους, με τη χρήση των διαθέσιμων δεδομένων. Για τον λόγο αυτό υλοποιήθηκε αρχικά μία βαθμονόμηση του βάθους του υποβάθρου με τη χρήση των διαθέσιμων θέσεων

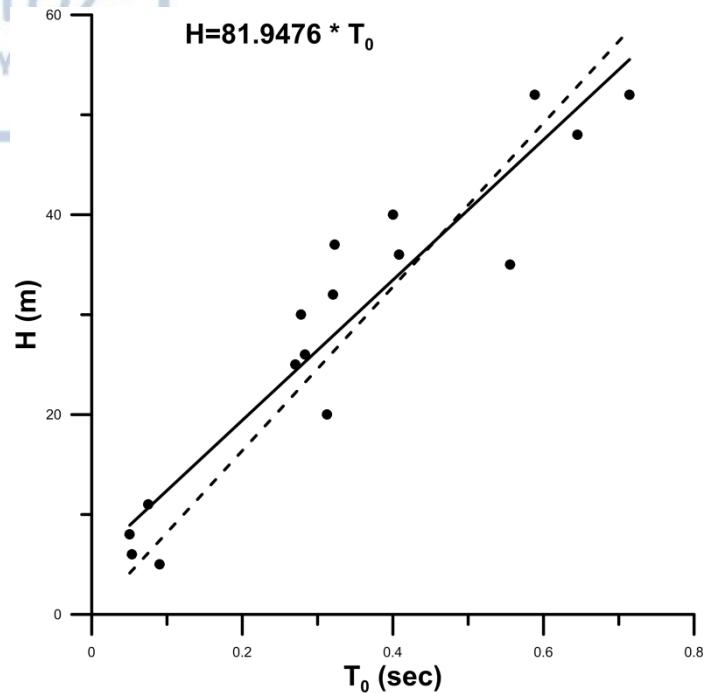
με γνωστό βάθος υποβάθρου (16 θέσεις) σε συνάρτηση με την ιδιοπερίοδο της κάθε θέσης. Οι διαθέσιμες θέσεις με γνωστό το βάθος του υποβάθρου παρουσιάζονται στον πίνακα 2.3. Στην πρώτη στήλη δίνεται ο κωδικός της θέσης, στη δεύτερη η αντίστοιχη ιδιοπερίοδος του εδάφους, στη τρίτη το βάθος του υποβάθρου, στη τέταρτη η ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων ακριβώς πάνω από το όριο του υποβάθρου και στην πέμπτη η μέση τιμή της εγκάρσιας ταχύτητας του υποβάθρου, από άνω όριο του μέχρι το μέγιστο βάθος των μετρήσεων. Στη έκτη στήλη παρουσιάζεται ο γεωλογικός τύπος του υποβάθρου. Στο σχήμα 2.19 δίνεται η γραφική παράσταση του βάθους του υποβάθρου σε σχέση με την ιδιοπερίοδο. Με συνεχόμενη γραμμή δίνεται η σχέση, η οποία προκύπτει με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων ενώ με διακεκομμένη γραμμή η σχέση, η οποία διέρχεται από την αρχή των αξόνων (σε συμφωνία και με τη σχέση 2.4), η οποία είναι:

$$H = 81.9476 * T_0 \quad (2.4)$$

όπου H το βάθος του υποβάθρου σε m και T_0 η ιδιοπερίοδος σε sec.

Πίνακας 2.3. Θέσεις της βάσης δεδομένων της παρούσας διατριβής με γνωστό βάθος υποβάθρου.

Κωδικός θέσεων	Ιδιοπερίοδος (sec)	Βάθος (m)	Vs (m/sec) (Υποβάθρου)	Vs _{average} (m/sec) (Υποβάθρου)	Γεωλογικός τύπος Υποβάθρου
KZNKZN005b	0.090	5	1047	1172	fg - Φλύσχης
THESEISM	0.054	6	1000	1500	sch, gn - Σχιστόλιθος, Γνεύσιος
THETHE013b	0.051	8	942	1452	sch, gn - Σχιστόλιθος, Γνεύσιος
THETHE007a	0.075	11	1180	1125	sch, gn - Σχιστόλιθος, Γνεύσιος
AIALIV001a	0.313	20	650	650	k - Ασβεστόλιθος
KZNKZN004b	0.270	25	1121	1121	fg - Φλύσχης
KZNKZN003b	0.283	26	1031	1031	fg - Φλύσχης
KZNKZN013b	0.278	30	832	832	fg - Φλύσχης
KZNKZN006b	0.321	32	935	936	fg - Φλύσχης
NESXAN005a	0.556	35	1263	1065	gn - Γνεύσιος
KZNKZN007b	0.408	36	1056	1056	fg - Φλύσχης
KZNKZN008b	0.323	37	1475	1475	fg - Φλύσχης
DRADRA002d	0.400	40	810	810	Mr - Μάρμαρο
NESXAN004a	0.645	48	630	762	gn - Γνεύσιος
NESXAN001a	0.714	52	1058	967	gn - Γνεύσιος
NESXAN002a	0.588	52	800	965	gn - Γνεύσιος



Σχ. 2.19. Βάθος υποβάθρου σε σχέση με την ιδιοπερίοδο, για θέσεις με γνωστό βάθος υποβάθρου. Με συνεχόμενη γραμμή παρουσιάζεται η σχέση ελαχίστων τετραγώνων ενώ με διακεκομμένη γραμμή δίνεται η σχέση ελαχίστων τετραγώνων, η οποία διέρχεται από την αρχή των αξόνων.

Για τον προσδιορισμό μιας σχέσης εκτίμησης του βάθους του υποβάθρου από τα διαθέσιμα δεδομένα, εξετάστηκε η επίδραση της μέσης ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) πάνω από το υπόβαθρο. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε η χαρτογράφηση του λόγου $(V_{s(average)}/V_{s5})-1$, όπου $V_{s(average)}$ η μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων μέχρι το βάθος του υποβάθρου (για τις θέσεις με γνωστό υπόβαθρο) και V_{s5} η μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 5 m, σε συνάρτηση με το βάθος του υποβάθρου (Σχ. 2.20). Η επιλογή και η χρήση της V_{s5} έγινε επειδή αυτή χρησιμοποιείται επίσης, στην αντιστροφή των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSr, ως ελάχιστη επιφανειακή πληροφορία δομής, για τον περιορισμό της μη-μοναδικότητας των λύσεων. Η σχέση η οποία προκύπτει από το σχήμα (2.20) είναι:

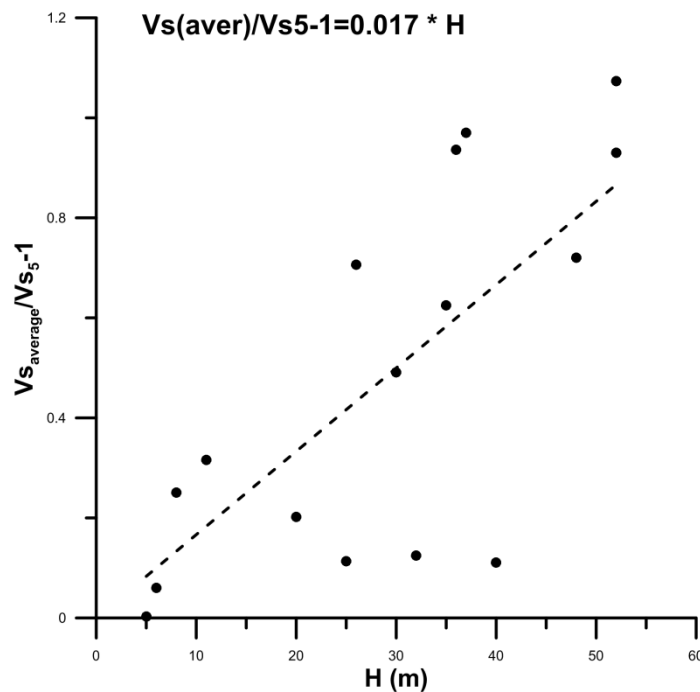
$$\frac{V_{s(aver)}}{V_{s5}} - 1 = 0.017 * H \quad (2.5)$$

όπου $V_{s(aver)}$ η μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων για βάθη μέχρι το υποβάθρο, V_{s5} η μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 5 m και H το βάθος του υποβάθρου. Για το $V_{s(aver)}$ ισχύει η σχέση:

$$f_0 = \frac{V_{s(aver)}}{4 \cdot H} \quad (2.6)$$

όπου f_0 η ιδιοσυχνότητα του εδάφους σε Hz. Από την σχέση (2.5) και (2.6) προκύπτει η σχέση:

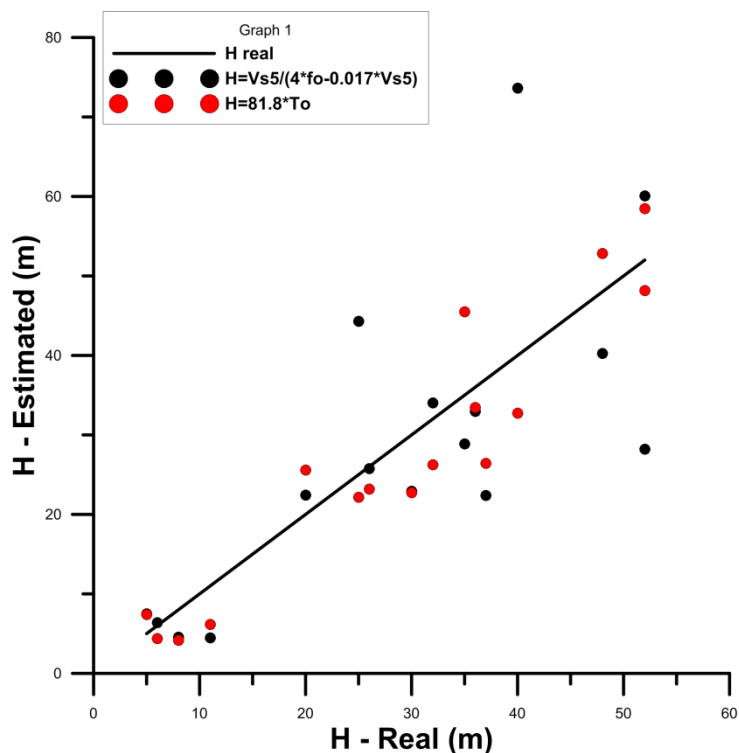
$$H = \frac{V_{s5}}{4 \cdot f_0 - 0.017 \cdot V_{s5}} \quad (2.7)$$



Σχ. 2.20. Σχέση του λόγου $V_{s(average)}/V_{s5-1}$ σε συνάρτηση με το βάθος H . Με μαύρη διακεκομμένη γραμμή δίνεται η διχοτόμος.

Για να γίνει αντιληπτό ποια από τις δύο σχέσεις (2.4 ή 2.7) εκτιμά περισσότερο αξιόπιστα το βάθος του υποβάθρου, ώστε να χρησιμοποιηθεί στην αντιστροφή ως αρχικό βάθος, έγινε η χαρτογράφηση των εκτιμώμενων βαθών τα οποία προκύπτουν από τις δύο αυτές σχέσεις, σε συνάρτηση με το πραγματικό βάθος του υποβάθρου (Σχ. 2.21). Στο σχήμα αυτό, με κόκκινους κύκλους

παρουσιάζεται η εκτίμηση της σχέσης 2.4 και με μαύρους κύκλους από την σχέση 2.7. Όπως προκύπτει από το σχήμα αυτό, η σχέση 2.4 εκτιμά με μεγαλύτερη ακρίβεια το πραγματικό βάθος του υποβάθρου, οπότε και αξιοποιήθηκε στην αντιστροφή των δεδομένων HVSR.



Σχ. 2.21. Εκτιμήσεις βαθών υποβάθρου από τις σχέσεις 2.4 και 2.7 σε συνάρτηση με τα πραγματικά βάθη. Με συνεχόμενη γραμμή δίνεται η διχοτόμος.

2.2.5. Αντιστροφή Καμπυλών Ελλειπτικότητας – HVSR

Η αντιστροφή των καμπυλών HVSR είναι μια μαθηματική διαδικασία που εφαρμόζεται με σκοπό τον υπολογισμό της δομής του εδάφους (από την επιφάνεια μέχρι το υπόβαθρο) εκφρασμένη σε σεισμικές ταχύτητες (P, S). Το λογισμικό, το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι το *Dinver* του πακέτου GEOPSY (<http://www.geopsy.org>), το οποίο χρησιμοποιεί την μαθηματική μέθοδο Monte-Carlo για την πραγματοποίηση της αντιστροφής. Στο σχήμα 2.22 παρουσιάζεται το παράθυρο εργασιών του *Dinver*.

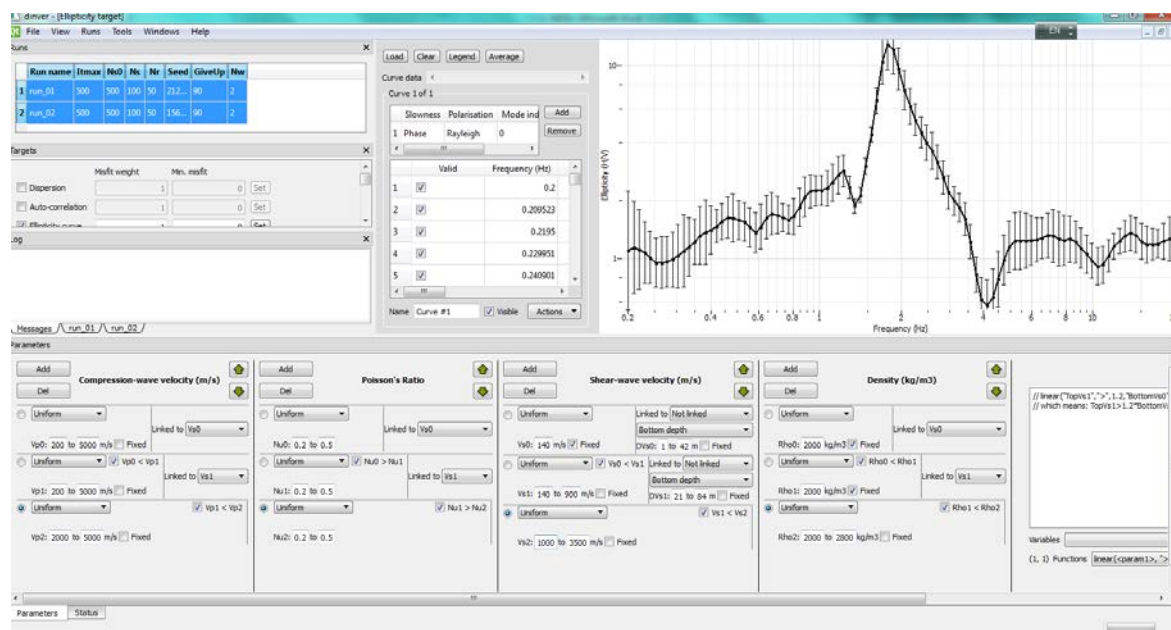
Ο σκοπός της παρούσας διατριβής, είναι να εφαρμοστεί ένας απλός τρόπος αντιστροφής με τη χρήση του ελάχιστου δυνατού αριθμού πληροφοριών για το περιορισμό της μη-μοναδικότητας των λύσεων. Η συγκεκριμένη μέθοδος αντιστροφής (Monte-Carlo) απαιτεί την ύπαρξη ενός αρχικού/γενικού μοντέλου δομής (εκφρασμένη σε σεισμικές ταχύτητες), για τον υπολογισμό της εκτίμησης του μονοδιάστατου προφίλ σεισμικών ταχυτήτων (κυρίως των εγκαρσίων κυμάτων) με το βάθος, από τις καμπύλες HVSr της κάθε θέσης. Η επιλογή του αρχικού μοντέλου δομής (αριθμός στρωμάτων, βάθη ασυνεχειών των στρωμάτων, εγκάρσιες σεισμικές ταχύτητες των στρωμάτων) επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να περιγράψει πληθώρα γεωλογικών/γεωτεχνικών δομών. Η ελάχιστη δυνατή επιφανειακή πληροφορία η οποία επιλέχθηκε για τον περιορισμό της μη-μοναδικότητας των λύσεων της αντιστροφής είναι η μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 5 m (V_{s5}). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η επιλογή της V_{s5} έγινε επειδή είναι σχετικά εύκολος ο υπολογισμός της, π.χ. με την χρήση επιφανειακών σεισμικών μεθόδων μικρής διάταξης, όπως μικρής ακτίνας διάταξης (10 m) Noise Array ή με τη μέθοδο MASW με μικρό συνολικό άνοιγμα γεωφώνων, κλπ..

Ως βάθος του ορίου μεταξύ υποβάθρου και ανώτερων επιφανειακών σχηματισμών, επιλέχθηκε η εκτίμηση της σχέσης 2.4, έτσι ώστε να υπάρχει ένας γενικός κανόνας υπολογισμού αυτού του βάθους που να μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις θέσεις, με ή χωρίς γνωστό αυτό το βάθος. Επίσης, πραγματοποιήθηκε η χρήση ενός εύρους τιμών του βάθους του υποβάθρου στο αρχικό μοντέλο δομής, έτσι ώστε να μπορεί αυτό να περιγράψει πληθώρα γεωλογικών/γεωτεχνικών δομών που μπορεί να απαντηθούν στη φύση. Το αποτέλεσμα της αντιστροφής περιλαμβάνει το υπόβαθρο ως ένα ομογενή σχηματισμό με σταθερή ταχύτητα. Αυτός ήταν ο κύριος λόγος που οδήγησε στο να επιλεγεί το υπόβαθρο να έχει ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων μεγαλύτερη ή ίση των 1000 m/sec, καθώς επίσης να ικανοποιείται είτε αυτό είναι γεωλογικό είτε σεισμικό υπόβαθρο.

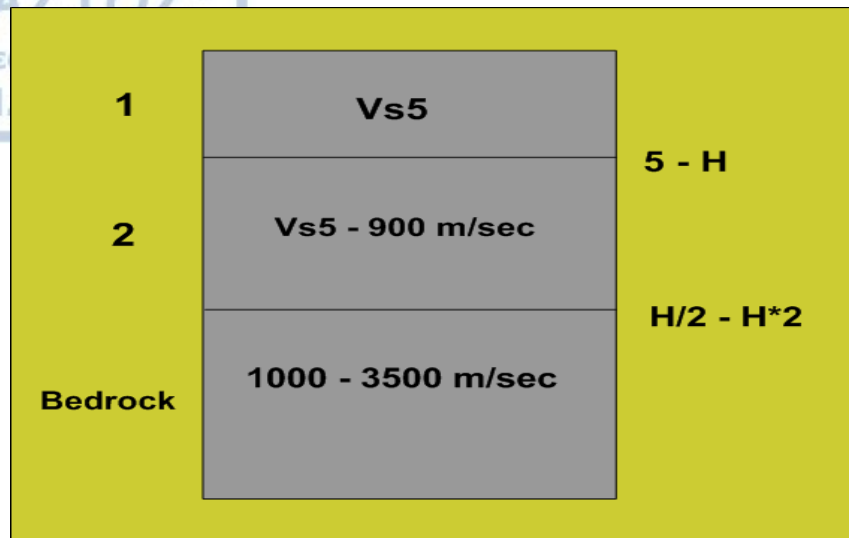
Η βασική στρατηγική που επιλέχθηκε για τη δημιουργία του αρχικού μοντέλου δομής της αντιστροφής, η οποία εφαρμόστηκε στη παρούσα διατριβή περιλάμβανε δύο στρώματα πάνω από ημικόκκο. Το πρώτο στρώμα επιλέχθηκε να έχει ως αρχική (επιφανειακή) ταχύτητα τη μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων

των πρώτων 5 m (V_{s5}), με βάθος ασυνέχειας με το υποκείμενο στρώμα να μεταβάλλεται από 5 m μέχρι H m, όπου H το βάθος το οποίο προκύπτει από τη σχέση 2.4, δηλαδή μέχρι και το μέσο εκτιμώμενο βάθος του υποβάθρου. Με αυτό τον τρόπο χρησιμοποιούμε τις διαθέσιμες πληροφορίες, χωρίς να εισάγουμε περιορισμούς στη δομή του πρώτου στρώματος.

Αντίστοιχα, το δεύτερο στρώμα επιλέχθηκε να έχει ταχύτητα από V_{s5} (δηλαδή ίση με το υποκείμενο στρώμα) μέχρι 900 m/sec (δηλαδή ταχύτητες σεισμικού υποβάθρου), ενώ το βάθος του ορίου αυτού του στρώματος με το υπόβαθρο να είναι από $H/2$ μέχρι $H*2$, δηλαδή να κυμαίνεται και αυτό σε ένα εξαιρετικά μεγάλο εύρος τιμών, χωρίς να περιορίζεται η λύση. Οι εγκάρσιες ταχύτητες του υποβάθρου επιλέχθηκαν να είναι από 1000 m/sec μέχρι 3500 m/sec (Σχ. 2.23), αποδεχόμενοι όλο το πιθανό εύρος τιμών, από μέτρια αποσαθρωμένο έως υγιές υπόβαθρο και για μεγάλο εύρος βαθών.



Σχ. 2.22. Παράθυρο εργασιών του λογισμικού *Dinver*.



Σχ. 2.23. Αρχικό μοντέλο δομής δύο στρωμάτων πάνω από ημιχώρο, το οποίο επιλέχθηκε για την αντιστροφή των καμπυλών HVSR της παρούσας διατριβής.

Για το αρχικό μοντέλο δομής της αντιστροφής, εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι μοντέλων δομής. Στη πρώτη περίπτωση τα δύο στρώματα επιλέχθηκε να είναι ομογενή (Uniform-Uniform, UU), δηλαδή η ταχύτητα να μην αυξάνεται με το βάθος μέσα σε αυτά τα στρώματα. Στη δεύτερη περίπτωση επιλέχθηκε το πρώτο στρώμα να είναι ομογενές ενώ στο δεύτερο στρώμα η ταχύτητα να αυξάνει γραμμικά με το βάθος (Uniform -Linear increase, UL). Στην τρίτη περίπτωση επιλέχθηκε και στα δύο στρώματα η ταχύτητα να είναι γραμμικά αυξανόμενη (Linear increase- Linear increase, LL) με το βάθος. Επίσης, επιλέχθηκε κάθε φορά να πραγματοποιούνται δύο αντιστροφές (που ονομάζονται run1 και run2 στη συνέχεια) και για τη κάθε αντιστροφή να δημιουργούνται περίπου 50000 μοντέλα.

Η αντιστροφή πραγματοποιείται με χρήση του αλγορίθμου γειτνίασης (neighborhood algorithm, **Wathelet, 2008**), ο οποίος είναι μία εξελιγμένη τεχνική τύπου Monte-Carlo. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα αρχικό μοντέλο δομής και με βάση αυτό προσπαθεί να υπολογίσει ένα νέο μοντέλο, για το οποίο η καμπύλη ελλειπτικότητας του θα παρουσιάζει μικρότερη απόκλιση από την πειραματική καμπύλη HVSR. Κάθε φορά υπολογίζεται ένα μοντέλο δοκιμάζοντας διαφορετικές παραμέτρους στον παραμετρικό χώρο (parameters space), με τυχαία βήματα διαταραχών από το προηγούμενο μοντέλο. Αφού υπολογιστεί ένα νέο μοντέλο, ο

κώδικας υπολογίζει την απόκλιση του από τις πειραματικές μετρήσεις με βάση την σχέση:

$$\text{misfit} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{D_i - M_i}{\sigma_i} \right)^2} \quad (2.8)$$

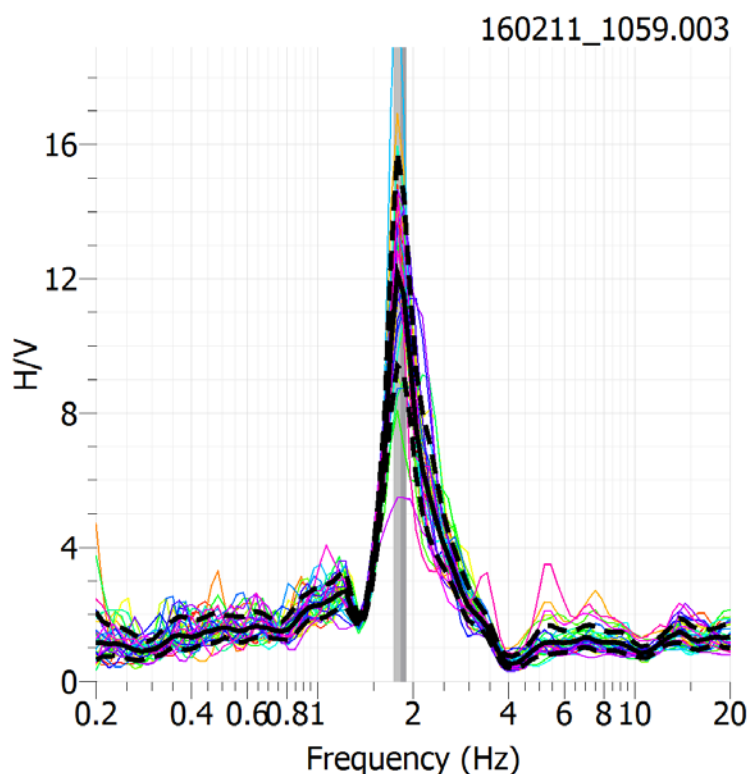
όπου N το πλήθος των σημείων, D_i το κάθε σημείο της αρχικής καμπύλης HVSR, M_i το κάθε σημείο της παραγόμενης καμπύλης ελλειπτικότητας (το οποίο αντιστοιχεί στο τρέχον μοντέλο) και σ_i το σφάλμα μεταξύ του κάθε σημείου της αρχικής HVSR καμπύλης και του κάθε σημείου της παραγόμενης καμπύλης. Στην ουσία, το misfit αντιστοιχεί στο κάθε μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS), το οποίο δηλώνει κάθε φορά το πόσο καλή προσαρμογή έχει η νέα παραγόμενη καμπύλη σε σχέση με την πειραματική HVSR καμπύλη. Αφού υπολογιστεί το misfit, ο αλγόριθμος συνεχίζει και υπολογίζει νέα μοντέλα δοκιμάζοντας τις γειτονικές παραμέτρους. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται για μεγάλο αριθμό παραγόμενων μοντέλων, ώστε να προκύψει λύση με το καλύτερο δυνατό misfit.

Παράδειγμα αποτελεσμάτων αντιστροφής δίνεται για την θέση NESXAN005a, από μέτρηση εδαφικού θορύβου στη περιοχή του Νέστου. Στο σχήμα 2.24 δίνεται η αντίστοιχη καμπύλη HVSR στην οποία πραγματοποιήθηκε η αντιστροφή με ιδιοσυχνότητα 1.8 Hz. Στο σχήμα 2.25 παρουσιάζεται η δομή του εδάφους, εκφρασμένη σε σεισμικές ταχύτητες για αυτήν την θέση. Στο πίνακα 2.4 δίνεται η μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 30 m (V_{s30}), η μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων μέχρι το κατώτερο βάθος μέτρησης (V_{sz}) και η μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων για πρώτα 5 m (V_{s5}). Από την σχέση 2.4 προκύπτει ότι το εκτιμώμενο βάθος του υποβάθρου είναι $H = 81.9476 \cdot 1/f_0 = 81.9476 \cdot 1/1.8 = 45.5$ m. Στο πίνακα 2.5 δίνεται το μοντέλο αρχικής δομής με βάση το οποίο πραγματοποιήθηκε η αντιστροφή, όπου στη πρώτη στήλη ο αριθμός των στρωμάτων, στη δεύτερη στήλη τα βάθη του κάθε στρώματος και στη τρίτη οι εγκάρσιες ταχύτητες του κάθε στρώματος.

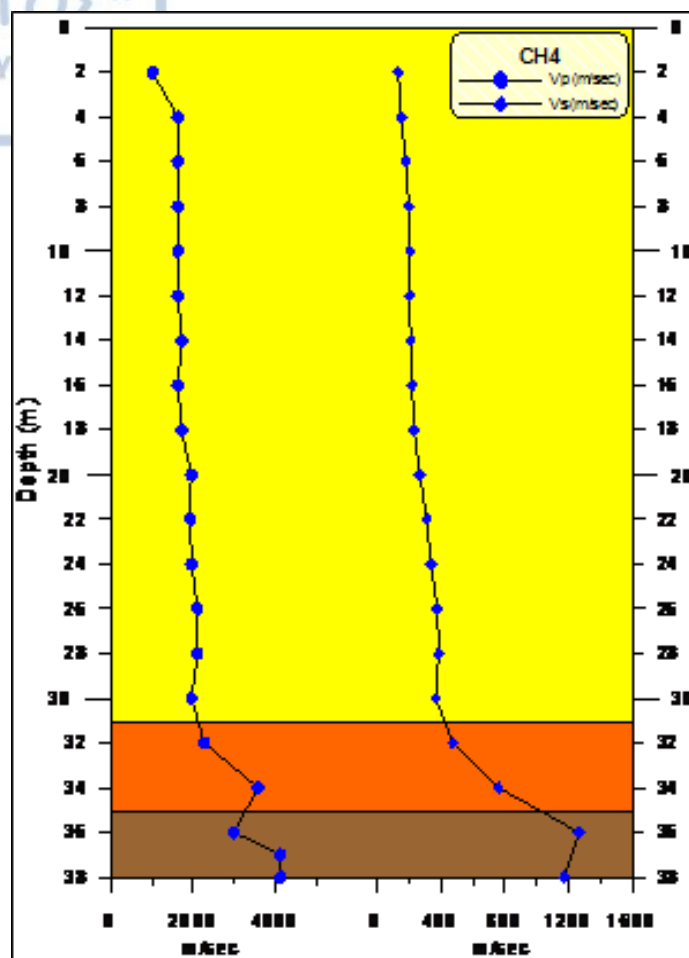
Πίνακας 2.4. Η μέση ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων των πρώτων 30 m (V_{s30}), η μέση ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων μέχρι το κατώτερο βάθος μέτρησης (V_{sz}) και η μέση ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων για πρώτα 5 m (V_{s5}) για τη θέση NESXAN005a, στη περιοχή του Νέστου.

V_{s30} (m/sec)	V_{sz} (m/sec)	V_{s5} (m/sec)
220	256	139

Στα σχήματα 2.26, 2.27 και 2.28 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αντιστροφών για τις περιπτώσεις όπου τα δύο στρώματα είναι ομογενή, το πρώτο είναι ομογενές και το δεύτερο με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα και τα δύο στρώματα με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα, αντίστοιχα. Στο πάνω και κάτω μέρος αυτών των σχημάτων δίνεται η πρώτη (run1) και δεύτερη (run2) αντιστροφή, αντίστοιχα, και στο αριστερό μέρος η παραγόμενη καμπύλη ενώ στο δεξί μέρος το αντίστοιχο παραγόμενο μοντέλο δομής εκφρασμένο σε σεισμικές ταχύτητες με το βάθος [αριστερό τμήμα για τις επιμήκεις (P) ταχύτητες και στο δεξί για τις εγκάρσιες (S) ταχύτητες με το βάθος]. Στο κάτω μέρος όλων των σχημάτων δίνεται σε χρωματική κλίμακα το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (misfit) της κάθε λύσης.



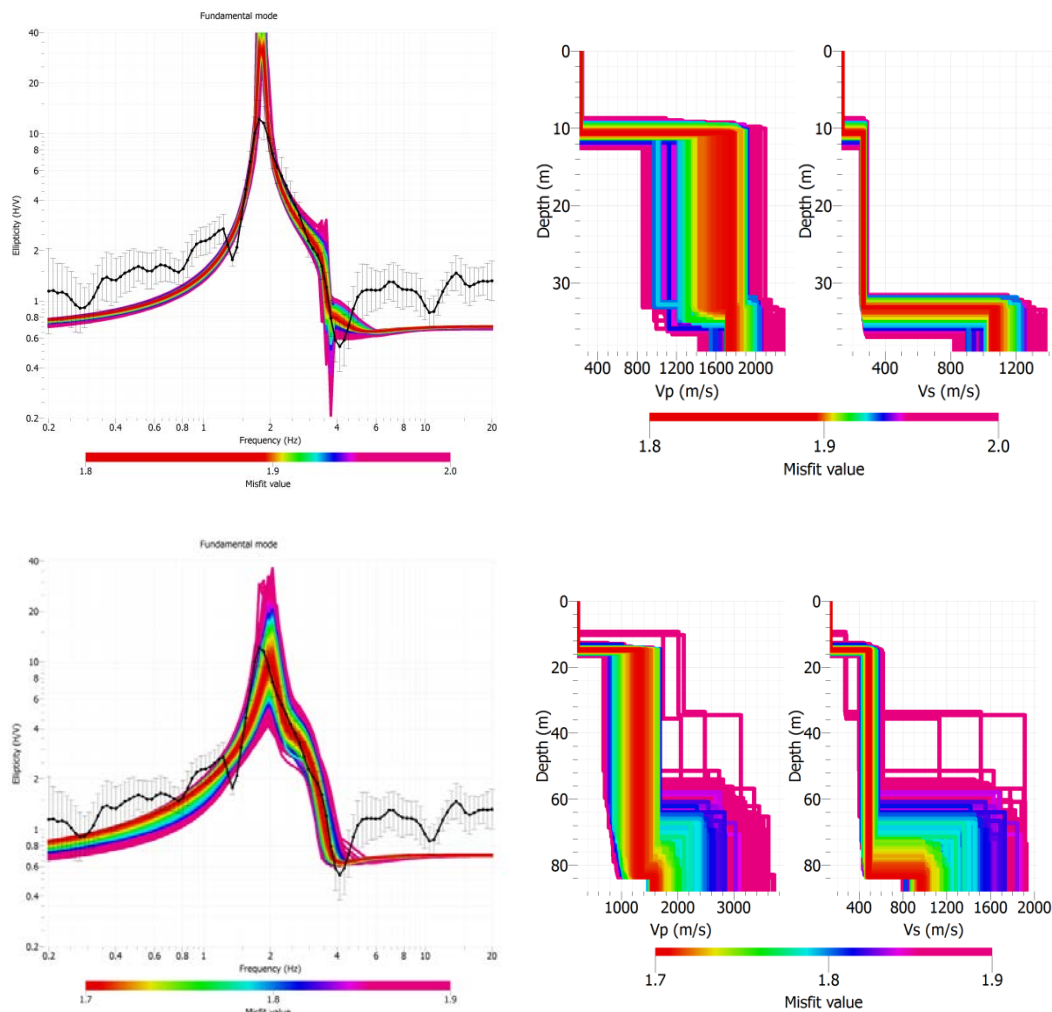
Σχ. 2.24. Καμπύλη HVSR για τη θέση NESXAN005a στην περιοχή του Νέστου με ιδιοσυχνότητα 1.8 Hz.



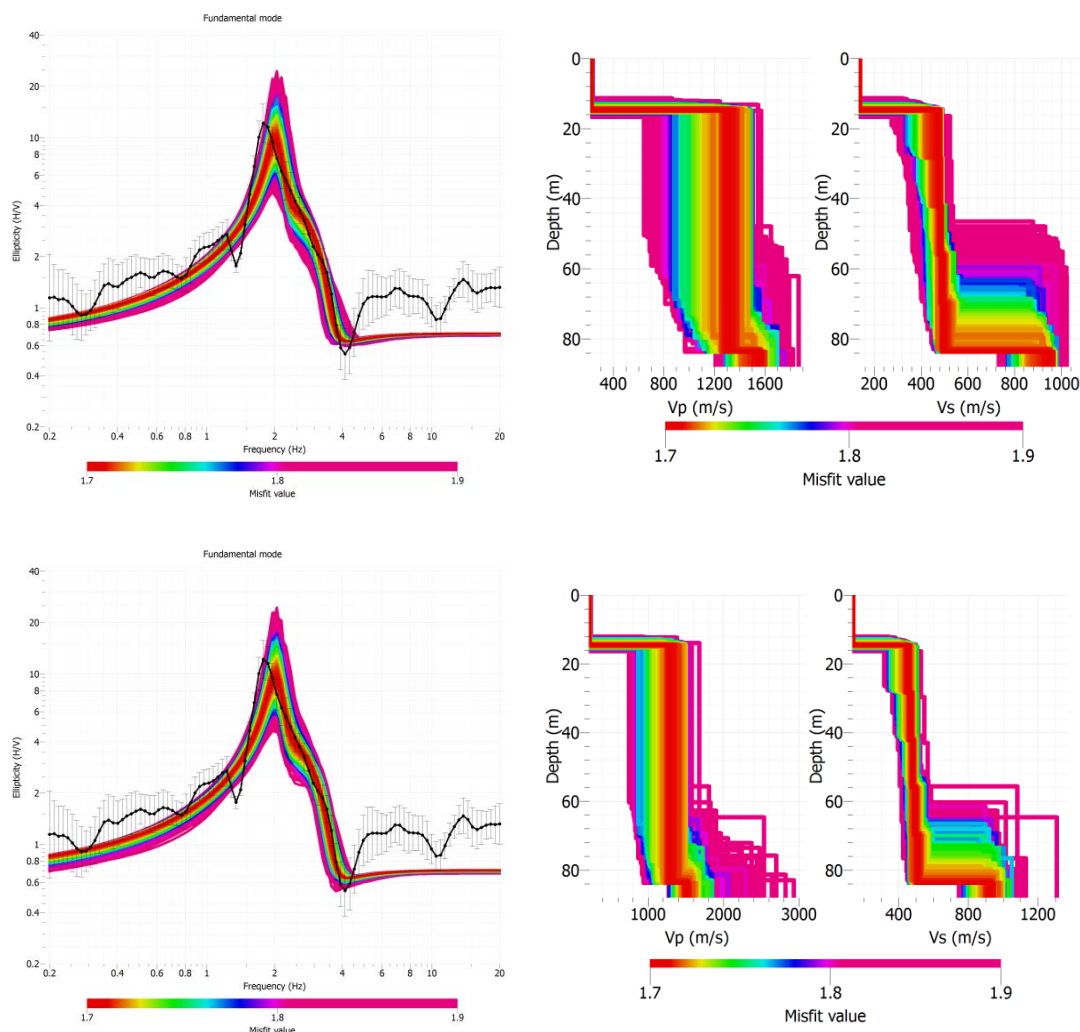
Σχ. 2.25. Δομή του εδάφους εκφρασμένη σε σεισμικές ταχύτητες για τη θέση NESXAN005a, στη περιοχή του Νέστου.

Πίνακας 2.5. Αρχικό μοντέλο δομής, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην αντιστροφή των καμπυλών HVSr.

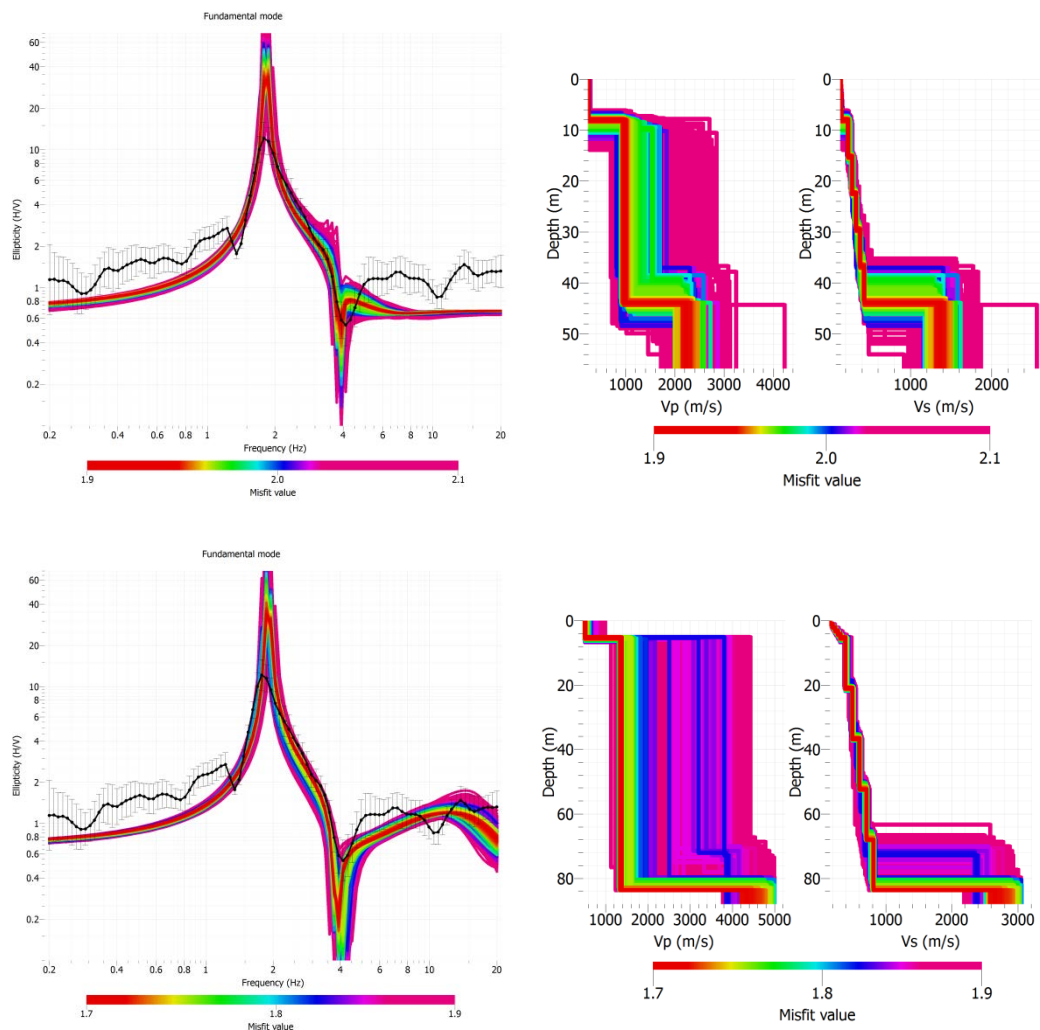
Στρώματα	Βάθος (m)	Vs (m/sec)
1	5 - 45.5	140
2	22.7 - 91	140 – 900
Υπόβαθρο		1000 – 3500



Σχ. 2.26. Αποτελέσματα λύσεων για την πρώτη αντιστροφή (run1, πάνω) και τη δεύτερη αντιστροφή (run2, κάτω) για τη περίπτωση δύο ομογενών στρωμάτων (UU) πάνω από ημιχώρο, για τη θέση NESXAN005a στην περιοχή του Νέστου. Στο αριστερό μέρος δίνονται οι παραγόμενες καμπύλες ελλειπτικότητας και στο δεξί μέρος οι αντίστοιχες δομές εδάφους εκφρασμένες σε ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων. Στο αριστερό μέρος των μοντέλων δομής του υπεδάφους παρουσιάζονται οι ταχύτητες των επιμηκών (P) και στο δεξί των εγκάρσιων (S) κυμάτων με το βάθος. Στο κάτω μέρος του κάθε σχήματος δίνεται με χρωματική κλίμακα το σφάλμα (misfit) των μοντέλων.



Σχ. 2.27. Αποτελέσματα λύσεων για την πρώτη αντιστροφή (run1, πάνω) και τη δεύτερη αντιστροφή (run2, κάτω) για τη περίπτωση ενός πρώτου ομογενούς στρώματος και ενός δεύτερου με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα (UL) πάνω από ημιχώρο, για τη θέση NESXAN005a στην περιοχή του Νέστου. Στο αριστερό μέρος δίνονται οι παραγόμενες καμπύλες ελλειπτικότητας και στο δεξί μέρος οι αντίστοιχες δομές εδάφους εκφρασμένες σε ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων. Στο αριστερό μέρος των μοντέλων δομής του υπεδάφους παρουσιάζονται οι ταχύτητες των επιμηκών (P) και στο δεξί των εγκαρσίων (S) κυμάτων με το βάθος. Στο κάτω μέρος του κάθε σχήματος δίνεται με χρωματική κλίμακα το σφάλμα (misfit) των μοντέλων.



Σχ. 2.28. Αποτελέσματα λύσεων για τη πρώτη αντιστροφή (run1, πάνω) και τη δεύτερη αντιστροφή (run2, κάτω) για τη περίπτωση δύο στρωμάτων με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα πάνω από ημιχώρο, για τη θέση NESXAN005a στην περιοχή του Νέστου. Στο αριστερό μέρος δίνονται οι παραγόμενες καμπύλες ελλειπτικότητας και στο δεξί μέρος οι αντίστοιχες δομές εδάφους εκφρασμένες σε ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων. Στο αριστερό μέρος των μοντέλων δομής του υπεδάφους παρουσιάζονται οι ταχύτητες των επιμηκών (P) και στο δεξί των εγκάρσιων (S) κυμάτων με το βάθος. Στο κάτω μέρος του κάθε σχήματος δίνεται με χρωματική κλίμακα το σφάλμα (misfit) των μοντέλων.

Τελικό στάδιο αποτελεί ο υπολογισμός της V_{s30} από τα παραγόμενα μοντέλα δομής του υπεδάφους. Πιο συγκεκριμένα, από κάθε αποτέλεσμα αντιστροφής γίνεται χρήση του μοντέλου με το μικρότερο σφάλμα (misfit) για τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων των πρώτων 30 m (V_{s30}). Τα αποτελέσματα για την ταχύτητα V_{s30} και τα βάθη του υποβάθρου παρουσιάζονται στο πίνακα 2.6. Στη πρώτη στήλη δίνονται οι περιπτώσεις αρχικών μοντέλων (ομογενών και με γραμμική αύξηση) για τις λύσεις της 1^{ης} (δεύτερη στήλη) και 2^{ης}

(τρίτη στήλη) αντιστροφής, τόσο για τις τιμές της V_{s30} , όσο και για τα βάθη του υποβάθρου. Ο λόγος, για τον οποίο επιλέχθηκε η λύση μοντέλου με το μικρότερο σφάλμα (misfit) από ότι η μέση λύση από όλα τα παραγόμενα μοντέλα ή κάποιου αριθμού από τα καλύτερα, είναι επειδή το σφάλμα (misfit) μειώνεται λογαριθμικά με την αύξηση των παραγόμενων μοντέλων. Ως παράδειγμα δίνονται τα στοιχεία του πίνακα 2.7, όπου στην δεύτερη και τρίτη στήλη παρουσιάζονται οι εκτιμώμενες τιμές της V_{s30} από το μοντέλο με το μικρότερο σφάλμα (misfit) και από το μέσο μοντέλο το οποίο προκύπτει από όλα (50500) τα παραγόμενα μοντέλα, αντίστοιχα, για την περίπτωση της πρώτης αντιστροφής (Run1, δεύτερη γραμμή) και της δεύτερης αντιστροφής (Run2, τρίτη γραμμή).

Πίνακας 2.6. Υπολογισμένες τιμές V_{s30} και βάθη υποβάθρου από τις λύσεις αντιστροφών για τη θέση NESXAN005a στην περιοχή του Νέστου.

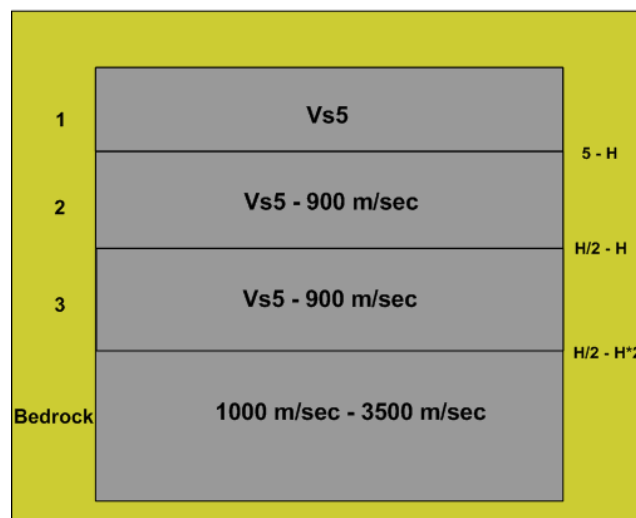
	1η Αντιστροφή		2η Αντιστροφή	
	V_{s30} (m/sec)	Βάθος (m)	V_{s30} (m/sec)	Βάθος (m)
Ομογενές – Ομογενές (UU)	202	33.5	221	83
Ομογενές - Γραμμικά αυξανόμενο (UL)	220	83	218	83
Γραμμικά αυξανόμενο - Γραμμικά αυξανόμενο (LL)	220	43.5	224	83

Πίνακας 2.7. Παράδειγμα εκτιμώμενων τιμών της V_{s30} , από το μοντέλο με το μικρότερο σφάλμα (misfit) και από το μέσο μοντέλο το οποίο προκύπτει από όλα τα παραγόμενα μοντέλα.

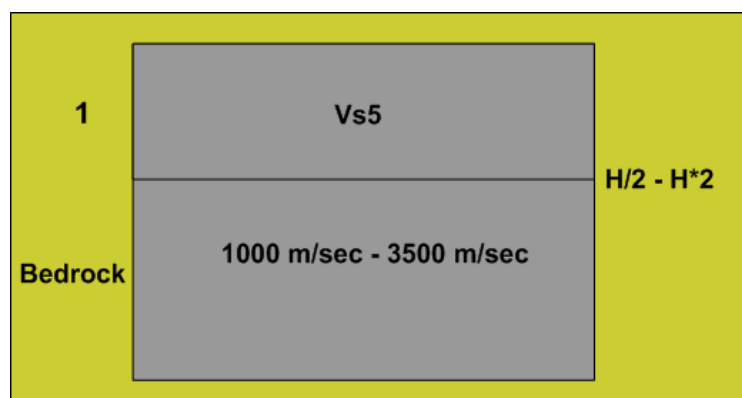
	Μοντέλο με το μικρότερο σφάλμα (misfit)	Μέσο μοντέλο από τα 50500 παραγόμενα μοντέλα
V_{s30} (m/sec) - Run1	202.17	205.56
V_{s30} (m/sec) - Run2	221.66	224.14

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι, για θέσεις με πολύ μικρό ή πολύ μεγάλο βάθος υποβάθρου εφαρμόστηκαν διαφορετικές στρατηγικές επεξεργασίας. Πιο

συγκεκριμένα, για τις θέσεις, ο οποίες παρουσιάζουν πολύ χαμηλή ιδιοσυχνότητα ($f_0 < 1$ Hz) χρησιμοποιήθηκε μοντέλο δομής με τρία στρώματα πάνω από ημιχώρο, ενώ σε θέσεις με πολύ υψηλή ιδιοσυχνότητα ($f_0 > 15$ Hz) χρησιμοποιήθηκε μοντέλο με ένα στρώμα πάνω από ημιχώρο, στο αρχικό μοντέλο δομής της αντιστροφής. Στο σχήμα 2.29 και 2.30 παρουσιάζονται οι περίπτωση μοντέλου με τρία στρώματα και ένα στρώμα πάνω από ημιχώρο, αντίστοιχα, όπου V_{s5} η μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 5 m και H η εκτίμηση του βάθους του υποβάθρου από την σχέση 2.4. Αξίζει να σημειωθεί ότι, για την περίπτωση του ενός στρώματος πάνω από ημιχώρο, το στρώμα αυτό επιλέχθηκε να έχει την ταχύτητα V_{s5} σταθερή στην περίπτωση που αυτό είναι ομογενές, ενώ στην περίπτωση που αυτό το στρώμα έχει γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα, η ταχύτητα επιλέχθηκε να μεταβάλλεται στο διάστημα από V_{s5} μέχρι 900 m/sec.



Σχ. 2.29. Στρατηγική επεξεργασίας με χρήση μοντέλου τριών στρωμάτων πάνω από ημιχώρο, για θέσεις με ιδιοσυχνότητα < 1 Hz.



Σχ. 2.30. Στρατηγική επεξεργασίας με χρήση μοντέλου ενός στρώματος πάνω από ημιχώρο, για θέσεις με ιδιοσυχνότητα > 15 Hz.

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ - Αποτελέσματα Αντιστροφών Καμπυλών Ελλειπτικότητας HVSR και Αξιολόγηση

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αντιστροφής των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR, τα οποία αντιστοιχούν στα προτεινόμενα μοντέλα μεταβολής της δομής των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων (κυρίως των εγκαρσίων κυμάτων) με το βάθος, για όλες τις θέσεις όπου συλλέχθηκαν μετρήσεις του εδαφικού θορύβου. Όπως προαναφέρθηκε, η βασική στρατηγική, για τον περιορισμό των λύσεων της αντιστροφής βασίστηκε στη χρήση της μέσης εγκάρσιας ταχύτητας των πρώτων 5 μέτρων (V_{s5}) των επιφανειακών στρωμάτων της Γης. Από τα παραγόμενα μοντέλα δομής των εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της μέσης εγκάρσιας ταχύτητας των πρώτων 30 μέτρων (V_{s30}). Βασικός στόχος της διατριβής αλλά και μέτρο αξιολόγησης των αποτελεσμάτων ήταν η σύγκριση αυτών των τιμών με τις εκτιμώμενες τιμές της V_{s30} , οι οποίες προκύπτουν από την χρήση της ημι-εμπειρικής σχέσης των Stewart et al. (2014), καθώς επίσης και με την σύγκριση αυτών των τιμών με τις πραγματικές τιμές V_{s30} , από τη βάση δεδομένων της παρούσας διατριβής.

Αρχικά, πραγματοποιείται η αξιολόγηση των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR και των αρχικών προφίλ (μεταβολών) των εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος, έτσι ώστε να εντοπιστούν τυχόν προβληματικές θέσεις για την εκτέλεση/αξιολόγηση/ερμηνεία της προτεινόμενης προσέγγισης αντιστροφής δεδομένων HVSR. Επίσης, παρουσιάζονται παραδείγματα αποτελεσμάτων των παραγόμενων μοντέλων δομής των σεισμικών ταχυτήτων με το βάθος με τις αντίστοιχες καμπύλες ελλειπτικότητας, οι οποίες προκύπτουν από τις αντιστροφές των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR. Στην συνέχεια, περιγράφονται τα προκαταρκτικά αποτελέσματα των εκτιμώμενων τιμών της V_{s30} σε σχέση με τις πραγματικές, και εξετάζονται οι θέσεις για τις οποίες η αντιστροφή απέτυχε να εκτιμήσει αξιόπιστα μοντέλα (δομές) σεισμικών ταχυτήτων με το βάθος, με αποδεκτές τιμές της V_{s30} . Βασικός στόχος αποτέλεσε η διερεύνηση των λόγων για τους οποίους η αντιστροφή απέτυχε, ώστε να βρεθούν και να προταθούν νέες, προσαρμοσμένες στρατηγικές επεξεργασίας των δεδομένων, όπου αυτό ήταν

εφικτό. Τέλος, δίνονται τα τελικά αποτελέσματα αξιολόγησης της μεθόδου, καθώς και τα συμπεράσματα, τα οποία προκύπτουν.

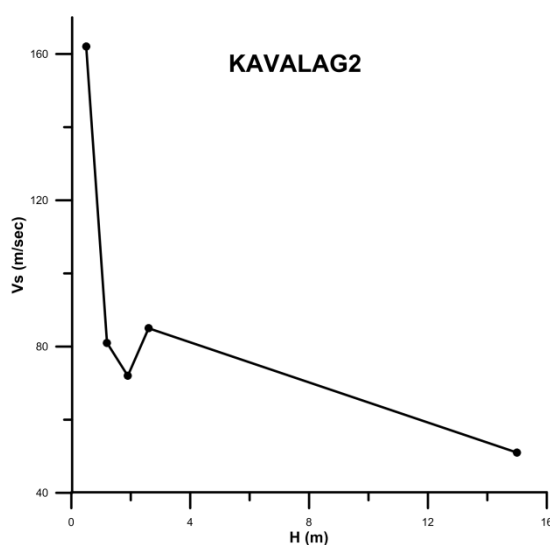
3.1. Μη Αποδεκτές Θέσεις για την Αντιστροφή των Καμπυλών Ελλειπτικότητας HVSR και την Ερμηνεία των Αποτελεσμάτων της

Για λόγους αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της αντιστροφής των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR είναι, αρχικά απαραίτητο να αξιολογηθούν τα χαρακτηριστικά της κάθε θέσης (προφίλ εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος, καμπύλες ελλειπτικότητας HVSR, κλπ.), έτσι ώστε να εντοπιστούν οι θέσεις οι οποίες χαρακτηρίζονται ως ακατάλληλες για την εκτέλεση/αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου αντιστροφής. Από τις 74 θέσεις καταγραφών εδαφικού θορύβου, 4 θέσεις παρουσίασαν προβλήματα και για τον λόγο αυτό η αντιστροφή σε αυτές δεν πραγματοποιήθηκε ή δεν αξιολογήθηκε. Κατά συνέπεια, ο τελικός αριθμός των θέσεων, στις οποίες εφαρμόστηκε και αξιολογήθηκε η προτεινόμενη μέθοδος αντιστροφής είναι 70. Αυτές οι 4 θέσεις χαρακτηρίστηκαν προβληματικές εξαιτίας των παρακάτω προβλημάτων:

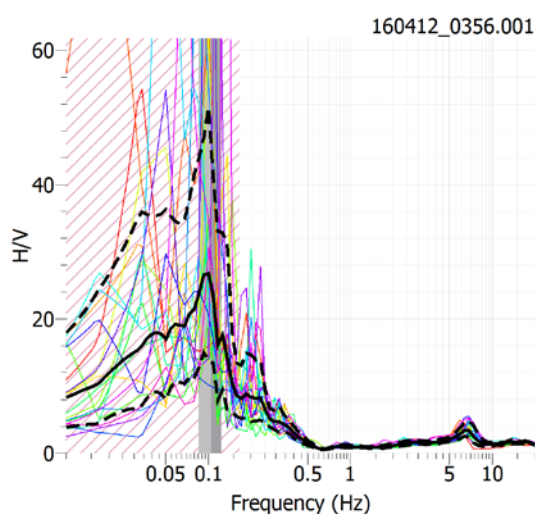
- Εμφανώς μη αξιόπιστο προφίλ εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος.
- Καμπύλη ελλειπτικότητας HVSR, με πολύ χαμηλή ιδιοσυχνότητα, καθιστώντας την ερμηνεία της καταγραφής μη αξιόπιστη.
- Μη αξιοποιήσιμη καμπύλη ελλειπτικότητας, HVSR, λόγω χαμηλής αντίθεσης εμπέδησης των υπεδάφειων σχηματισμών.
- Καμπύλη ελλειπτικότητας HVSR με πολύ υψηλή τιμή ιδιοσυχνότητας (εκτός συχνοτικού πεδίου ενδιαφέροντος).

Στο σχήμα 3.1 δίνεται το προφίλ εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος για την θέση KAVALAG2. Όπως γίνεται αντιληπτό, οι εξαιρετικά χαμηλές τιμές ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων, καθιστούν αυτή την θέση πιθανά μη αξιόπιστη. Αν και στην ευρύτερη περιοχή της Καβάλας εμφανίζονται πολύ χαμηλές ταχύτητες σε σχηματισμούς τύρφης, η συγκεκριμένη θέση δεν εμφάνιζε τέτοια χαρακτηριστικά. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η καμπύλη ελλειπτικότητας HVSR, για την θέση THETHE027a. Η πολύ χαμηλή ιδιοσυχνότητας ($f_0 \sim 0.1$ Hz) της καμπύλης HVSR

βρίσκεται εκτός των ορίων αξιοπιστίας του λόγου HVSR της καταγραφής. Στο σχήμα 3.3 δίνεται η καμπύλη ελλειπτικότητας HVSR για τη θέση ΚΝΙΚΝΙ001c. Όπως φαίνεται, δεν υπάρχει σαφής κορυφή, πιθανότατα λόγω της έλλειψης σημαντικής αντίθεσης εμπέδησης των επιφανειακών ιζημάτων με τους υποκείμενους σχηματισμούς. Τέλος, στο σχήμα 3.4. δίνεται η καμπύλη ελλειπτικότητας για την θέση ΛΙΤΤΗΕ001a, η οποία παρουσιάζει πολύ υψηλή τιμή ιδιοσυχνότητας ($f_0 \sim 35$ Hz), η οποία εκφράζει πιθανότατα κάποιο τοπικό μανδύα αποσάθρωσης (η θέση μέτρησης ήταν πάνω στο υπόβαθρο, πιθανώς σε λάθος θέση λόγω περιορισμένης ακρίβειας της χωροθέτησης της αρχικής βάση δεδομένων).

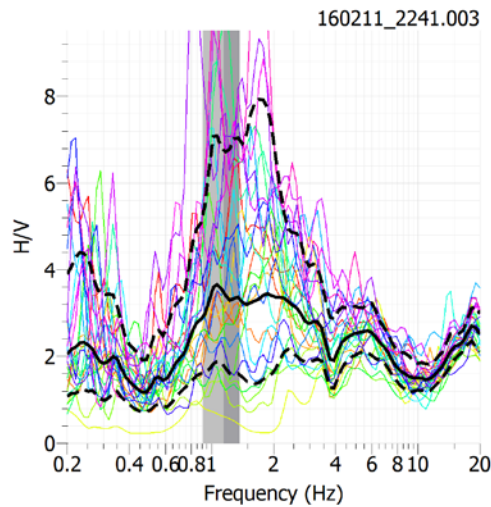


Σχ. 3.1. Προφίλ εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος με πολύ χαμηλές τιμές ταχυτήτων, για τη θέση KAVALAG2, το οποίο εξαιρέθηκε από περαιτέρω επεξεργασία.

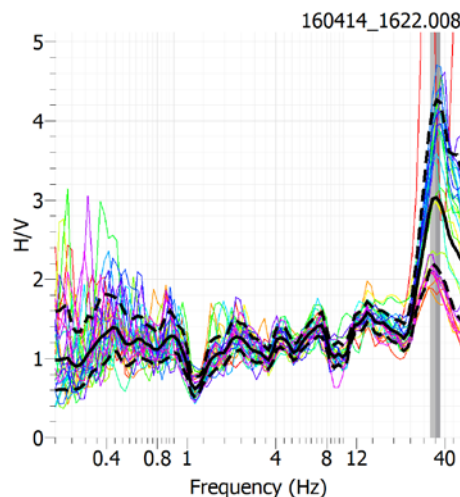


Σχ. 3.2. Καμπύλη ελλειπτικότητας HVSR με πολύ χαμηλή τιμή ιδιοσυχνότητας, για τη θέση THETHE027a. Η ιδιοσυχνότητα βρίσκεται στη περιοχή μη αξιοπιστίας του λόγου HVSR

(γραμμοσκιασμένη περιοχή, όπως την παρουσιάζει το λογισμικό *Geopsy*), οπότε η καταγραφή δεν χρησιμοποιήθηκε σε περαιτέρω επεξεργασία.



Σχ. 3.3. Καμπύλη ελλειπτικότητας HVSR για τη θέση KNIKN1c, χωρίς εμφανή κορυφή, πιθανότατα λόγω δομής με χαμηλή τιμή του λόγου της αντίθεσης εμπεδήσης.



Σχ. 3.4. Καμπύλη ελλειπτικότητας HVSR με πολύ υψηλή τιμή ιδιοσυχνότητας, για τη θέση LITTHE001a, λόγω τοπικής γεωλογικής δομής του υποβάθρου.

3.2. Αποτελέσματα Μοντέλων Δομής Σεισμικών Ταχυτήτων με το Βάθος, από τη Μέθοδο της Αντιστροφής των Καμπυλών Ελλειπτικότητας HVSR

Τα βασικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αντιστροφές των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR είναι τα μονοδιάστατα (1D) μοντέλα σεισμικών ταχυτήτων με το βάθος, από τα οποία υπολογίστηκαν οι μέσες εγκάρσιες

ταχύτητες των πρώτων 30 μέτρων (V_{s30}). Αρχικά, θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα αποτελέσματα από μία ενδεικτική καλή περίπτωση αποτελεσμάτων αντιστροφής. Στην συνέχεια, θα εξεταστούν οι λόγοι για τους οποίους οι αντιστροφές απέτυχαν να εκτιμήσουν την δομή του εδάφους εκφρασμένη σε ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων σε συγκεκριμένες θέσεις, καθώς και τρόπους βελτίωσης της εφαρμογής της μεθόδου. Τέλος, θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά οι τελικές μέσες εγκάρσιες ταχύτητες των πρώτων 30 m (V_{s30}), οι οποίες προκύπτουν από την αντιστροφή των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR, για το σύνολο των θέσεων που μελετήθηκαν.

3.2.1. Παραδείγματα Αποτελεσμάτων Αντιστροφής Καμπυλών Ελλειπτικότητας HVSR

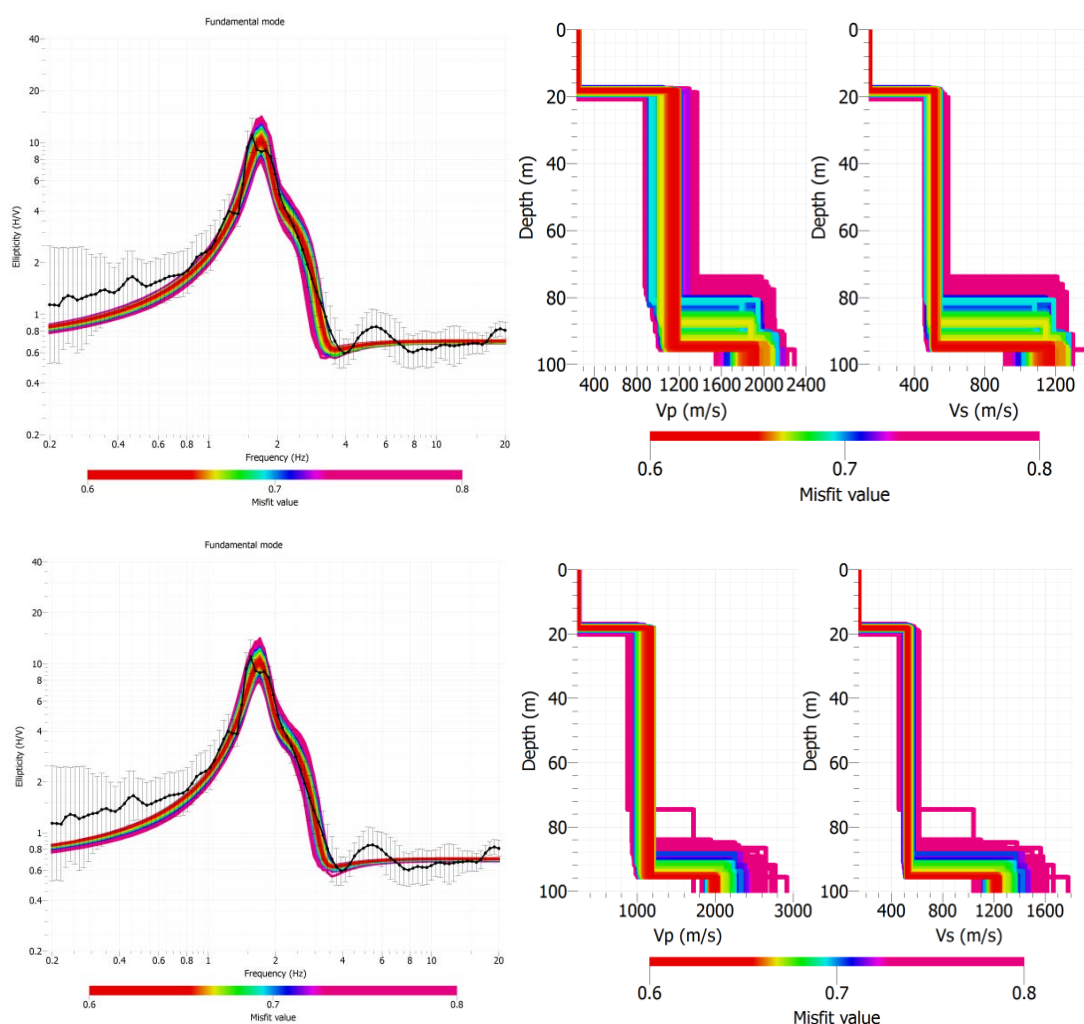
Ως παράδειγμα ικανοποιητικών αποτελεσμάτων αντιστροφής παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.2.5 η θέση NESXAN005a. Μια άλλη καλή περίπτωση αντιστροφής αποτελεί η θέση NESXAN004a, η οποία αντιστράφηκε με την στρατηγική δύο στρωμάτων πάνω από ημιχώρο (παράγραφο 2.2.5). Στον πίνακα 3.1 δίνονται οι πληροφορίες για αυτήν την θέση, όπου στην πρώτη και δεύτερη στήλη παρουσιάζεται η μέση τιμή ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 5 m (V_{s5}) και 30 m (V_{s30}), αντίστοιχα. Στην τρίτη στήλη δίνεται η ιδιοσυχνότητα της καμπύλης ελλειπτικότητας HVSR, ενώ στην τέταρτη και πέμπτη το πραγματικό και το εκτιμώμενο βάθος του υποβάθρου (από τη σχέση 2.4), αντίστοιχα.

Στο σχήμα 3.5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αντιστροφών για την περίπτωση δύο ομογενών στρωμάτων (Uniform – Uniform, UU). Αριστερά δίνονται οι καμπύλες ελλειπτικότητας και δεξιά τα προφίλ των ταχυτήτων των επιμηνών και των εγκαρσίων κυμάτων με το βάθος, για τη πρώτη (πάνω, run1) και δεύτερη (κάτω, run2) δοκιμή αντιστροφής. Στο κάτω μέρος του κάθε σχήματος δίνεται με χρωματική κλίμακα το σφάλμα (misfit) μεταξύ πειραματικής και της παραγόμενης καμπύλης ελλειπτικότητας. Στον πίνακα 3.2 δίνονται τα αποτελέσματα των τιμών της V_{s30} και του βάθους του υποβάθρου (H), τα οποία προκύπτουν από τα δύο παραγόμενα μοντέλα εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος με το μικρότερο σφάλμα (misfit), για τη θέση NESAXAN004a. Στην πρώτη, δεύτερη και τρίτη γραμμή

παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για δύο ομογενή στρώματα (UU), για ένα ομογενές και ένα με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα στρώμα (UL) και για δύο στρώματα με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα (LL) πάνω από ημιχώρο, αντίστοιχα, για την πρώτη (run1, δεύτερη στήλη) και δεύτερη (run2, τρίτη στήλη) δοκιμή αντιστροφής.

Πίνακας 3.1. Πληροφορίες της θέσης NESXAN004a.

V_{s5} (m/sec)	V_{s30} (m/sec)	f_0 (Hz)	Depth-Bedrock (m)	Depth-Estimated (m) (σχέση 2.4)
148	201	1.6	48	51.2



Σχ. 3.5. Αποτελέσματα λύσεων για την πρώτη αντιστροφή (run1, πάνω) και τη δεύτερη αντιστροφή (run2, κάτω) για τη περίπτωση δύο ομογενών στρωμάτων (UU) πάνω από ημιχώρο, για τη θέση NESXAN004a στην περιοχή του Νέστου. Στο αριστερό μέρος δίνονται οι παραγόμενες καμπύλες ελλειπτικότητας και στο δεξί μέρος οι αντίστοιχες δομές εδάφους εκφρασμένες σε ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων. Στο αριστερό μέρος των μοντέλων δομής του υπεδάφους παρουσιάζονται οι ταχύτητες των επιμηκών (P) και στο δεξί των εγκάρσιων (S) κυμάτων με το βάθος. Στο κάτω μέρος του κάθε σχήματος δίνεται με χρωματική κλίμακα το σφάλμα (misfit) των μοντέλων.

Πίνακας 3.2. Αποτελέσματα των τιμών της V_{s30} και του βάθους του υποβάθρου, από τις αντιστροφές της καμπύλης HVSr για τη θέση NESXAN004a.

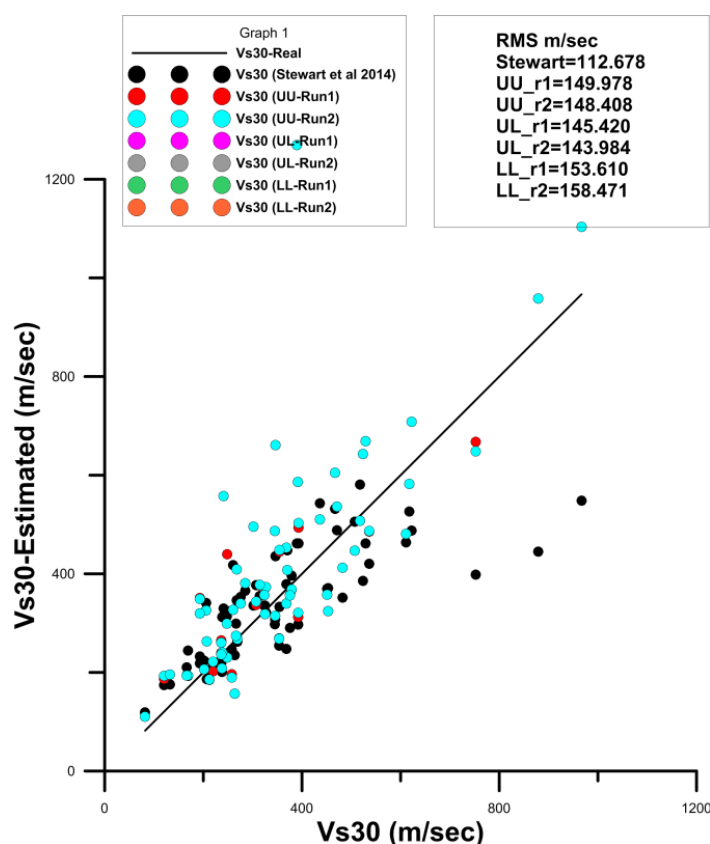
	run1		run2	
	V_{s30} (m/sec)	H (m)	V_{s30} (m/sec)	H (m)
UU	206	95	206	95
UL	206	95	205	95
LL	206	95	206	95

3.2.2. Προκαταρκτικά Αποτελέσματα Αντιστροφών Καμπυλών Ελλειπτικότητας HVSr και η Αξιολόγησή τους.

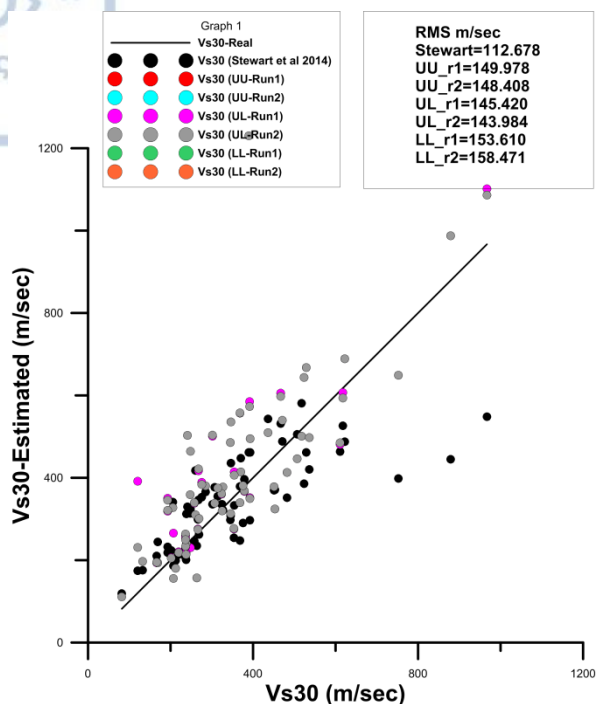
Τα προκαταρκτικά αποτελέσματα αφορούν τις εκτιμώμενες τιμές τη μέσης εγκάρσιας ταχύτητας των πρώτων 30 μέτρων (V_{s30}), οι οποίες προκύπτουν από τα παραγόμενα μοντέλα δομής των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων με το βάθος, από τις αντιστροφές των καμπυλών ελλειπτικότητα HVSr.

Στα επόμενα τρία σχήματα παρουσιάζονται αυτά τα προκαταρκτικά αποτελέσματα. Σε αυτά, στον κατακόρυφο άξονα δίνονται οι εκτιμώμενες τιμές της V_{s30} από την μέθοδο της αντιστροφής και από την ημι-εμπειρική σχέση (σχέση 1.18) των **Stewart et al. (2014)**, με την χρήση της μέσης ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 5 m (V_{s5}). Στον οριζόντιο άξονα δίνονται οι πραγματικές τιμές της V_{s30} , οι οποίες προκύπτουν από τα διαθέσιμα προφίλ ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων με το βάθος, της βάσης δεδομένων της παρούσας διατριβής. Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αντιστροφών για την περίπτωση δύο ομογενών στρωμάτων (Uniform – Uniform, UU) πάνω από ημιχώρο, για την πρώτη (run1, κόκκινοι κύκλοι) και την δεύτερη (run2, γαλάζια κύκλοι) αντιστροφή. Στο σχήμα 3.7 δίνονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση ενός ομογενούς και ενός με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα στρώματος (Uniform - Linear increase, UL) πάνω από ημιχώρο, για την πρώτη (run1, μοβ κύκλοι) και την δεύτερη (run2, γκρι κύκλοι) αντιστροφή. Τέλος, στο σχήμα 3.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, για την περίπτωση δύο στρωμάτων με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα (Linear increase - Linear increase, LL) πάνω από ημιχώρο, για την πρώτη (run1, πράσινοι κύκλοι) και την δεύτερη (run2, πορτοκαλί κύκλοι) αντιστροφή. Με μαύρους κύκλους

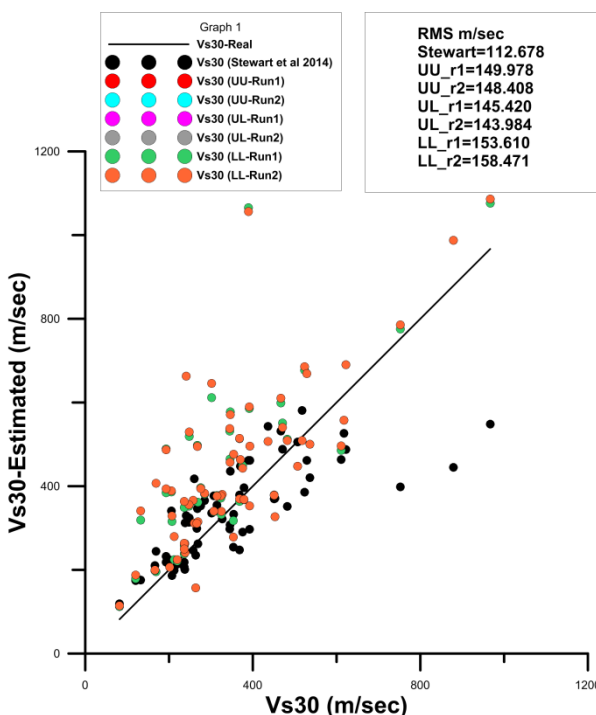
αναφέρονται οι εκτιμώμενες τιμές της V_{s30} , οι οποίες προκύπτουν από την ημι-εμπειρική σχέση 1.18 των **Stewart et al. (2014)**. Στο πάνω αριστερό μέρος του κάθε σχήματος δίνονται τα σφάλματα (RMS) μεταξύ των εκτιμώμενων και των πραγματικών τιμών της V_{s30} , για κάθε περίπτωση εκτίμησης της V_{s30} (UU run1, UU run2, UL run1, UL run2, LL run1, LL run2 και Stewart et al., 2014). Όσο πιο σύμφωνες είναι οι εκτιμώμενες με τις πραγματικές τιμές V_{s30} , τόσο αυτές είναι πιο κοντά στη διχοτόμο. Στο πίνακα 3.3 παρουσιάζονται τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα (RMS) των εκτιμώμενων τιμών της V_{s30} με τις πραγματικές (δεύτερη στήλη) για την κάθε περίπτωση εκτίμησης (πρώτη στήλη).



Σχ. 3.6. Εκτιμώμενες από την αντιστροφή τιμές της V_{s30} σε συνάρτηση με τις πραγματικές τιμές, για την περίπτωση δύο ομογενών στρωμάτων (UU) πάνω από ημιχώρο, για τη πρώτη (run1, κόκκινοι κύκλοι) και δεύτερη (run2, γαλάζιοι κύκλοι) δοκιμή αντιστροφής, καθώς και από την ημι-εμπειρική σχέση του **Stewart et al., 2014** (μαύροι κύκλοι). Στο πάνω δεξί μέρος του κάθε σχήματος δίνονται τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα (RMS) για τη κάθε περίπτωση εκτίμησης της V_{s30} με τις πραγματικές, ενώ με μαύρη γραμμή δίνεται η διχοτόμος.



Σχ. 3.7. Όπως το σχήμα 3.6, για την περίπτωση ενός ομογενούς και ενός με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα στρώματος (UL) πάνω από ημιχώρο, για τη πρώτη (run1, μοβ κύκλοι) και δεύτερη (run2, γκρι κύκλοι) δοκιμή αντιστροφή, καθώς και από την ημι-εμπειρική σχέση του *Stewart et al., 2014* (μαύροι κύκλοι). Στο πάνω δεξί μέρος του κάθε σχήματος δίνονται τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα (RMS) για τη κάθε περίπτωση εκτίμησης της V_{s30} με τις πραγματικές, ενώ με μαύρη γραμμή δίνεται η διχοτόμος.



Σχ. 3.8. Όπως το σχήμα 3.6, για την περίπτωση δύο στρωμάτων με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα (LL) πάνω από ημιχώρο, για τη πρώτη (run1, πράσινοι κύκλοι) και δεύτερη (run2, πορτοκαλί κύκλοι) δοκιμή αντιστροφή, καθώς και από την ημι-εμπειρική σχέση του *Stewart et al., 2014* (μαύροι κύκλοι). Στο πάνω δεξί μέρος του κάθε σχήματος δίνονται τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα (RMS), για τη κάθε περίπτωση εκτίμησης της V_{s30} με τις πραγματικές, ενώ με μαύρη γραμμή δίνεται η διχοτόμος.

Πίνακας 3.3. Τα σφάλματα (RMS) της κάθε περίπτωσης εκτίμησης των τιμών της V_{s30} με τις πραγματικών.

Μέθοδος	RMS (m/sec)
UU-run1	150
UU-run2	148
UL-run1	145
UL-run2	144
LL-run1	154
LL-run2	159
Stewart et al. (2014)	113

Από τα σχήματα 3.6, 3.7 και 3.8 γίνεται αντιληπτό, ότι κάποιες εκτιμώμενες τιμές της V_{s30} παρουσιάζουν μεγάλο σφάλμα, σε σχέση με τις πραγματικές, με αποτέλεσμα να επηρεάζουν σημαντικά το συνολικό σφάλμα (RMS) των λύσεων. Στο πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι θέσεις αυτές (πρώτη στήλη). Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι θέσεις, οι οποίες αξιολογήθηκαν ως προβληματικές από τις προκαταρκτικές τους πληροφορίες, με κίτρινο οι θέσεις στις οποίες δοκιμάστηκαν διαφορετικές στρατηγικές αντιστροφής ώστε να εξεταστεί αν μπορεί να βελτιωθούν, και με λευκό οι θέσεις που μόνο κάποιες περιπτώσεις από τις δοκιμές των αντιστροφών (UU, UL ή LL) απέτυχαν. Στον ίδιο πίνακα, στη δεύτερη στήλη, δίνεται η ιδιοσυχνότητα, στη τρίτη το πραγματικό βάθος υποβάθρου (όπου αυτό ήταν διαθέσιμο), στη τέταρτη η τιμή V_{s5} , στην πέμπτη το εκτιμώμενο βάθος του υποβάθρου από την σχέση 2.4, στην έβδομη η τιμή V_{s30} η οποία προκύπτει από την ημι-εμπειρική σχέση 1.12 των Stewart et al. (2014) με χρήση της V_{s5} , ενώ στην όγδοη, ένατη και δέκατη τα αποτελέσματα των εκτιμώμενων τιμών της V_{s30} από τις περιπτώσεις αντιστροφών UU, UL και LL, αντίστοιχα, για δύο τις δοκιμές αντιστροφών (run1 και run2).

Πίνακας 3.4. Θέσεις με προβληματικά αποτελέσματα από τις αντιστροφές των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR.

Site code	f_0 (Hz)	H-real (m)	V_{s5} (m/sec)	$H=81.9 \cdot T_0$	V_{s30} (Stewart et al. 2014, from V_{s5})	V_{s30} -Real (m/s)	U-U (m/s)		U-L (m/sec)		L-L (m/s)	
							Run1	Run2	Run1	Run2	Run1	Run2
KNTXER001e	16.5	??	350	4.9	461.4	389.8	1269.1	1269.1	1230.3	1230.3	1065.6	1056.2
KLXKNI001a	3	??	350	27.3	461.4	391.9	586.4	586.4	584.5	572.7	585.3	589.4
DRADRA001d	0.7	?	277.2	117.0	379.2	120.1	186.8	193.1	391.4	230.6	179.1	187.2
DRADRA002d	2.5	40	327	32.7	435.8	346.5	660.9	660.9	535.8	535.8	577.3	570.5
FYSPLA001a	0.97	??	414.1	84.4	531.7	466.9	604.7	604.7	605.1	597.5	598.5	610.0
AIALIV001a	3.2	??	207.7	25.6	297.4	345.1	487.1	487.1	485.4	485.4	531.2	537.7
RYMLIV001a	0.28	??	156.7	292.7	234.6	263.5	157	157	157	157	157	157
VLVZAG009e-W003	0.37	??	230	221.5	324.0	248.1	439.2	230	230	463.8	518.7	529.4
THETHE025a	0.42	??	254.5	195.1	352.9	275.6	339.9	339.3	389.1	383.4	396.1	394.1
THETHE024a	0.43	??	234.5	190.6	329.4	241.3	557.7	557.7	502.7	502.7	662.7	662.7
THETHE021a	0.54	??	221.2	151.8	313.6	247.5	298.7	298.7	358.7	358.7	351.8	355.4
THETHE017a-18a	0.62	??	270.2	132.2	371.1	452.8	324.1	324.1	324.3	324.3	326.5	326.5
VLVZAG012a	0.709	122	248.9	115.6	346.4	267.4	408.9	408.9	417.1	421.8	497.3	494.6
VLVZAG010e-E001	0.8	??	240	102.4	335.8	301.6	495.6	495.6	500.5	503.6	611.5	645.3
THETRM028a	0.85	??	143.5	96.4	217.9	192.7	319.4	319.4	318.9	320.6	383.8	393.2
KAVALAG1	0.88	??	164.5	93.1	244.4	210	193.1	193.5	193.4	193.5	195.3	406.9
THETHE005b	0.97	??	244.3	84.5	341.0	205.4	325.8	325.3	327.5	327.5	386.3	388.9
LOUALE001a	0.97	??	111.2	84.5	175.8	132.5	195.5	195.5	197.0	197.0	318.9	340.5
XANTHlg2	1.27	??	351.7	64.5	463.3	610.7	480.5	480.5	480.9	484.5	485.6	496.4



TENAGH01	1.88	??	110	43.6	174.1	120.1	186.8	193.1	391.4	230.6	179.1	187.2
THETHE014b	2.7	??	216	30.4	307.4	346	314.6	314.6	313.1	313.1	464.7	456.6
AXIPLA001a	3.6	??	350	22.8	461.4	393	493.4	502.9	494.5	494.5	495.3	495.3
KZNKZN013b	3.6	??	237.5	22.8	332.9	354.1	444.5	448.3	414.4	406.2	475.9	475.9
THETHE007a	13.13	11	282.6	6.3	385.4	523.8	643.0	643.0	643.5	643.5	677.0	685.3

Από την ανάλυση των θέσεων με κόκκινο χρώμα στον πίνακα 3.4, αυτές αξιολογήθηκαν ως προβληματικές, χωρίς δυνατότητα βελτίωσης, για δύο βασικούς λόγους:

- Μη αξιόπιστες γεωγραφικές συντεταγμένες της θέσης του γεωφυσικού προφίλ, όπου και έγινε η μέτρηση.
- Μη αξιόπιστο-προβληματικό προφίλ εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος.

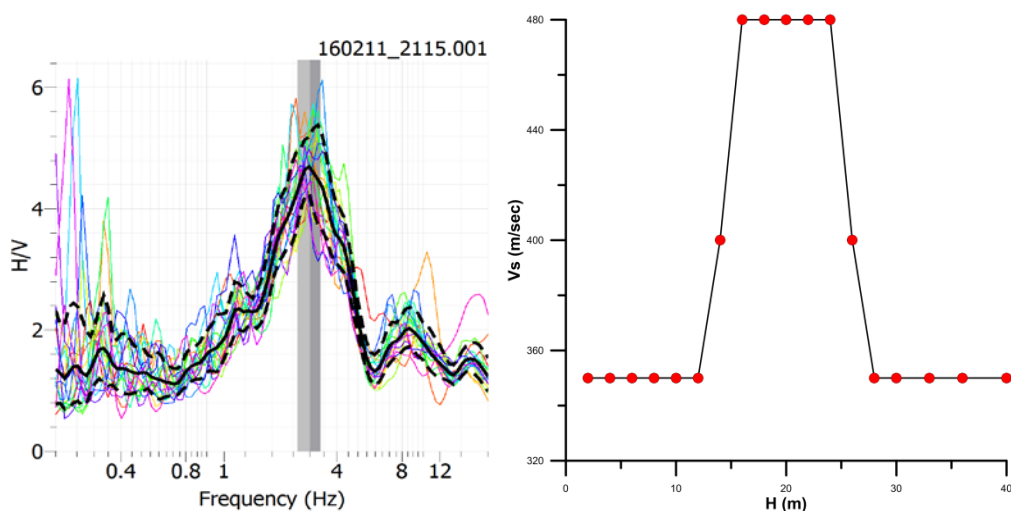
Η θέση KLXKN1001a παρουσιάζεται ως παράδειγμα θέσης με μη αξιόπιστες γεωγραφικές συντεταγμένες και προφίλ εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος. Στο πίνακα 3.5, δίνονται στη πρώτη και δεύτερη στήλη οι γεωγραφικές συντεταγμένες και στη τρίτη στήλη ο κωδικός της θέσης. Στη τέταρτη, πέμπτη και έκτη στήλη αναφέρεται το μέγιστο βάθος των μετρήσεων, η V_{s30} και η V_{s5} , αντίστοιχα. Στο σχήμα 3.9 παρουσιάζεται η καμπύλη ελλειπτικότητας HVSR (αριστερά) και το αντίστοιχο προφίλ εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος (δεξιά). Είναι εμφανές ότι το προφίλ ταχυτήτων είναι εντελώς αφύσικο γεωλογικά, με στρογγυλοποιημένες τιμές, χαρακτηριστικό δομής που έχει προσδιοριστεί τεχνητά και όχι από αξιόπιστη ανάλυση δεδομένων.

Για να επαληθευτεί ότι οι θέσεις οι οποίες σημειώνονται με κόκκινο χρώμα στον πίνακα 3.4 έπρεπε να εξαιρεθούν από την ανάλυση λόγω προβληματικών προφίλ ταχυτήτων, επιλέχθηκε να μελετηθεί λεπτομερέστερα μία από αυτές και ειδικότερα η θέση KNTXER001e (σεισμολογικός σταθμός KNT). Σε αυτήν την θέση πραγματοποιήθηκαν νέες μετρήσεις επιφανειακών κυμάτων με ενεργή πηγή (μέθοδος MASW) στο πλαίσιο της διατριβής, με σκοπό τον έλεγχο του προφίλ των εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος που ήταν διαθέσιμο στη βάση δεδομένων της διατριβής και το οποίο εμφάνιζε ανώμαλα χαμηλές τιμές (ο σταθμός KNT βρίσκεται πάνω σε σχηματισμούς υποβάθρου). Στον σχήμα 3.10 δίνεται με κόκκινους κύκλους το διαθέσιμο προφίλ των εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος στη βάση δεδομένων, ενώ μαύρους κύκλους σημειώνεται το μοντέλο δομής που προέκυψε από την ερμηνεία των νέων μετρήσεων. Είναι εμφανές ότι το διαθέσιμο προφίλ στη βάση δεδομένων είναι εντελώς λανθασμένο, με το νέο προφίλ να έχει πολύ πιο ρεαλιστικές τιμές για θέση υποβάθρου. Λόγω του νέου προφίλ, η θέση KNTXER001e

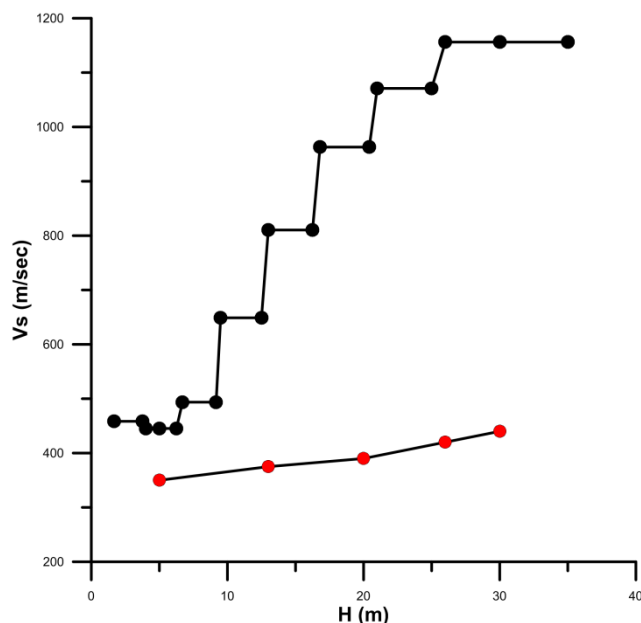
χρησιμοποιήθηκε κανονικά στη περαιτέρω επεξεργασία, ενώ οι άλλες θέσεις που σημειώνονται με κόκκινο χρώμα εξαιρέθηκαν από τη συνέχεια.

Πίνακας 3.5. Προκαταρκτικές πληροφορίες της θέσης KNLKNI001a.

Γεωγρ. Μήκος	Γεωγρ. Πλάτος	Κωδικός θέσεις	Βάθος Μέτρησης (m)	Vs ₃₀ (m/sec)	Vs ₅ (m/sec)
21.52000	40.070000	KLXKNI001a	30	392	350



Σχ. 3.9. Καμπύλη ελλειπτικότητας HVSR (αριστερά) και το αντίστοιχο προφίλ εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος (δεξιά), για τη θέση KLXKNI001a.



Σχ. 3.10. Δομή εγκαρσίων ταχυτήτων με το βάθος για την θέση KNTXER001e. Με κόκκινους κύκλους παρουσιάζεται το διαθέσιμο γεωφυσικό προφίλ της βάσης δεδομένων της διατριβής, ενώ με μαύρους το μοντέλο δομής που προέκυψε από τις νέες γεωφυσικές μετρήσεις (MASW). Είναι εμφανές το πρόβλημα του αρχικού προφίλ, το οποίο δεν συμφωνεί και με την τοπική γεωλογία (σχηματισμοί γεωλογικού υποβάθρου).

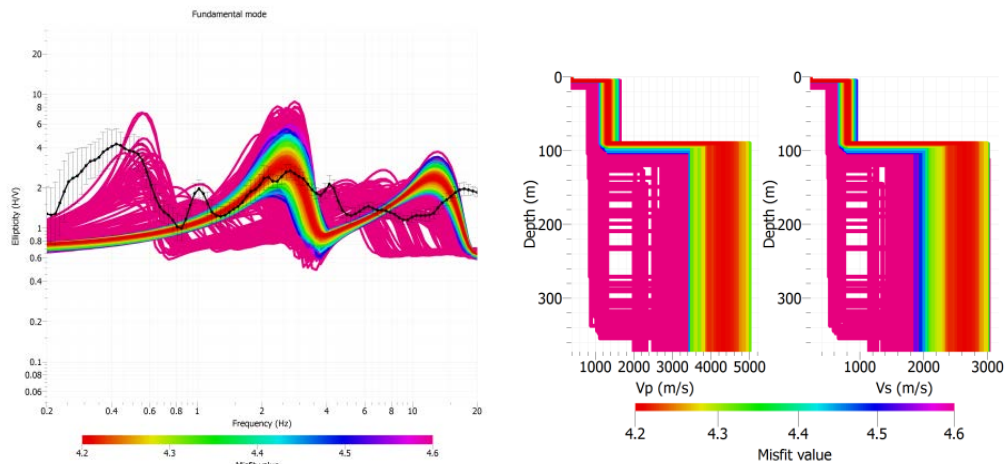
Για τις θέσεις, οι οποίες σημειώνονται με κίτρινο χρώμα στον πίνακα 3.4 δοκιμάστηκαν διαφορετικές στρατηγικές αντιστροφής, έτσι ώστε να βελτιωθούν οι λύσεις τους. Αυτές οι θέσεις, χαρακτηρίζονται από χαμηλές ιδιοσυχνότητες ($f_0 < 1.5$ Hz), και μερικές εμφανίζουν διπλή κορυφή στην καμπύλη ελλειπτικότητας HVSr. Για τον λόγο αυτό, έγιναν πρόσθετες δοκιμές αντιστροφής, με αλλαγές στο αρχικό μοντέλο δομής της αντιστροφής, και ειδικότερα εισάγοντας μοντέλα με:

- 3 στρώματα πάνω σε ημιχώρο (Σχ. 2.29).
- Μεγαλύτερο εύρος τιμών στο αρχικό βάθος υποβάθρου του μοντέλου ($H - H*3$).

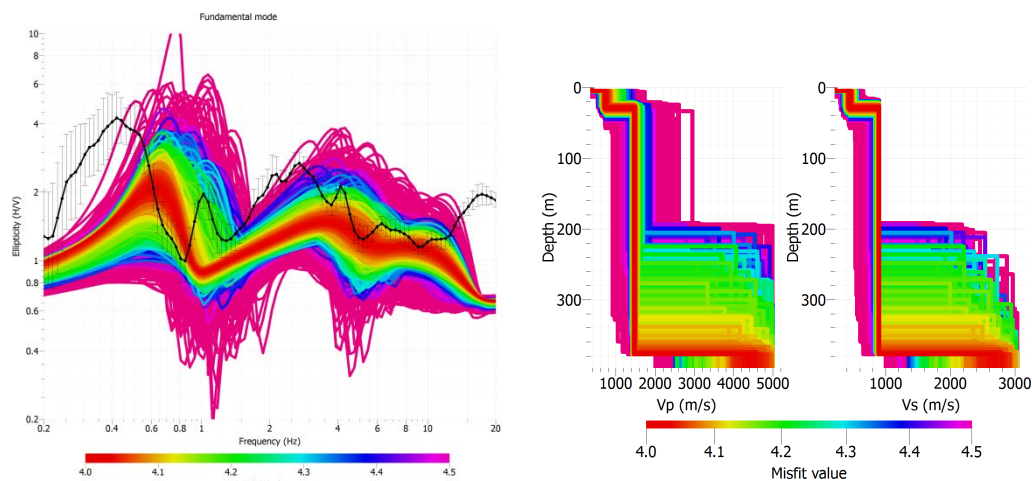
Παράδειγμα εφαρμογής της στρατηγικής τριών στρωμάτων και του μεγαλύτερου αρχικού εύρους βαθών υποβάθρου αποτελεί η θέση THETHE024a. Το κύριο πρόβλημα σε αυτή τη θέση είναι ότι η καμπύλη ελλειπτικότητας HVSr παρουσιάζει διπλή κορυφή και πολύ χαμηλή ιδιοσυχνότητα ($f_0 = 0.43$ Hz). Το αποτέλεσμα είναι η αντιστροφή να μη μπορεί να υπολογίσει καμπύλη ελλειπτικότητας που να προσομοιάζει την πειραματική καμπύλη HVSr. Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αντιστροφής για την περίπτωση δύο ομογενών στρωμάτων πάνω από ημιχώρο. Αριστερά, δίνεται με μαύρη γραμμή η πειραματική καμπύλη ελλειπτικότητας HVSr, ενώ με κόκκινο χρώμα η παραγόμενη καμπύλη ελλειπτικότητας η οποία προκύπτει από την αντιστροφή με το μικρότερο σφάλμα (misfit). Στο δεξί μέρος του σχήματος, δίνονται τα αντίστοιχα προφίλ των επιμηκών (αριστερά) και εγκάρσιων (δεξιά) ταχυτήτων με το βάθος.

Η αντιστροφή, για τη θέση THETHE024a δεν υπολόγιζε λύση καμπύλης ελλειπτικότητας της οποίας το μέγιστό της να ήταν κοντά με το πρώτο μέγιστο της καμπύλης ελλειπτικότητας HVSr, βρίσκοντας λύσεις με σχετικά μικρό βάθος υποβάθρου. Για αυτό τον λόγο, έγινε χρήση τριών στρωμάτων πάνω από ημιχώρο (Σχ. 3.12) και υιοθετήθηκε μεγαλύτερη αρχική ελάχιστη τιμή του βάθους του υποβάθρου (από H μέχρι $H*2$ αντί για $H/2$ μέχρι $H*2$, όπου H το βάθος του υποβάθρου της σχέσης 2.4), ώστε να μην συγκλίνει η διαδικασία σε λύσεις με μικρό βάθος υποβάθρου, αλλά να είναι εφικτή (από τα τρία στρώματα) η δημιουργία δεύτερης κορυφής. Τα αποτελέσματα των αντιστροφών για τη θέση THETHE024a με

χρήση τριών ομογενών στρωμάτων πάνω από ημιχώρο, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.12 (ισχύει η ίδια επεξήγηση με το σχήμα 3.11).



Σχ. 3.11. Αποτελέσματα λύσεων για τη περίπτωση δύο ομογενών στρωμάτων (UU) πάνω από ημιχώρο, για τη θέση THETHE024a στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Στο αριστερό μέρος δίνονται οι παραγόμενες καμπύλες ελλειπτικότητας (έγχρωμες γραμμές) και η πειραματική καμπύλη ελλειπτικότητας HVSR (μαύρη γραμμή) ενώ στο δεξί μέρος οι αντίστοιχες δομές εδάφους εκφρασμένες σε ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων. Στο αριστερό μέρος των μοντέλων δομής του υπεδάφους παρουσιάζονται οι ταχύτητες των επιμηκών (P) και στο δεξί των εγκάρσιων (S) κυμάτων με το βάθος. Στο κάτω μέρος του κάθε σχήματος δίνεται με χρωματική κλίμακα το σφάλμα (misfit) των μοντέλων.



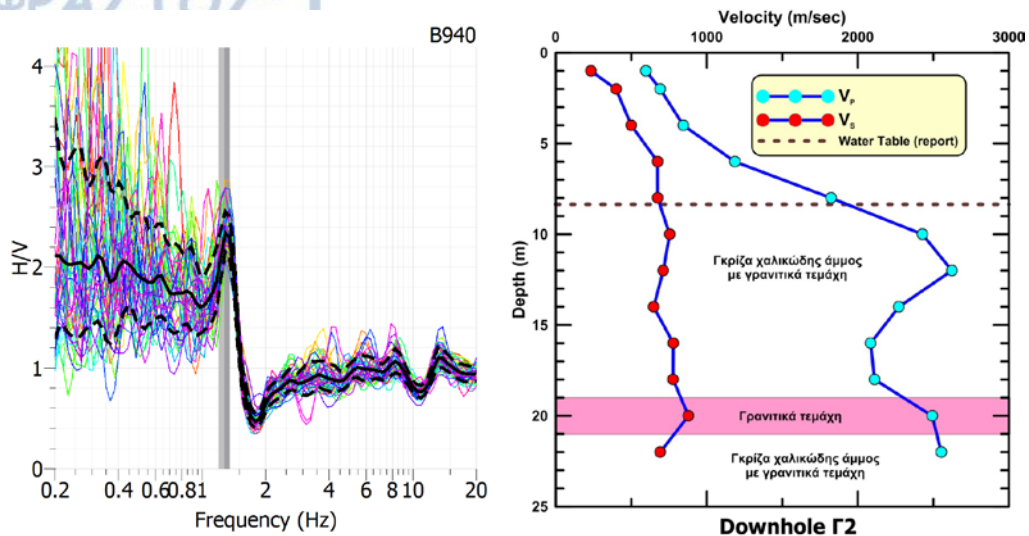
Σχ. 3.12. Αποτελέσματα αντιστροφών με χρήση τριών ομογενών στρωμάτων πάνω από ημιχώρο και με βάθος υποβάθρου από H μέχρι H^2 , για τη θέση THETHE024a. Αριστερά με μαύρη γραμμή, δίνεται η καμπύλη ελλειπτικότητας HVSR και με έγχρωμες γραμμές οι παραγόμενες καμπύλες ελλειπτικότητας από την αντιστροφή ενώ στο δεξί μέρος οι αντίστοιχες δομές εδάφους εκφρασμένες σε ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων. Στο αριστερό μέρος των μοντέλων δομής του υπεδάφους παρουσιάζονται οι ταχύτητες των επιμηκών (P) και στο δεξί των εγκάρσιων (S) κυμάτων με το βάθος. Στο κάτω μέρος του κάθε σχήματος δίνεται με χρωματική κλίμακα το σφάλμα (misfit) των μοντέλων.

Στο πίνακα 3.6 δίνονται τα αποτελέσματα των τιμών της μέσης ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 30 μέτρων (V_{s30}) και του βάθους υποβάθρου (H), τα οποία προκύπτουν από τις αντιστροφές για τη περίπτωση δύο ομογενών (UU, δεύτερη γραμμή) στρωμάτων και τριών ομογενών (UUU, τρίτη γραμμή) στρωμάτων πάνω από ημιχώρο. Στην δεύτερη και τρίτη στήλη δίνονται τα αποτελέσματα των τιμών της V_{s30} και H για την πρώτη (run1) και δεύτερη (run2) δοκιμή αντιστροφής, αντίστοιχα. Στην τέταρτη στήλη δίνεται η πραγματική τιμή της V_{s30} αυτής θέσης, από την βάση δεδομένων της διατριβής H ομοιότητα των λύσεων των δύο αντιστροφών (run1 και run2), οφείλεται στο ότι αυτές συγκλίνουν σε πρακτικά ίδιες λύσεις. Το συμπέρασμα το οποίο προκύπτει από τα αποτελέσματα του πίνακα 3.6, είναι ότι και οι δύο περιπτώσεις αντιστροφών απέτυχαν να προσεγγίσουν την πραγματική V_{s30} , αλλά η χρήση τριών στρωμάτων και μεγαλύτερου ελαχίστου βάθους του υποβάθρου βελτίωσε αισθητά τις λύσεις.

Πίνακας 3.6. Αποτελέσματα αντιστροφών για δύο (UU) και τρία (UUU) ομοιόμορφα στρώματα πάνω από ημιχώρο για τη θέση THETHE024a.

	run1		run2		V_{s30} -Real (m/sec)
	V_{s30} (m/sec)	H (m)	V_{s30} (m/sec)	H (m)	241
2 layers - UU	558	89	558	89	
3 layers - UUU	380	377	380	377	

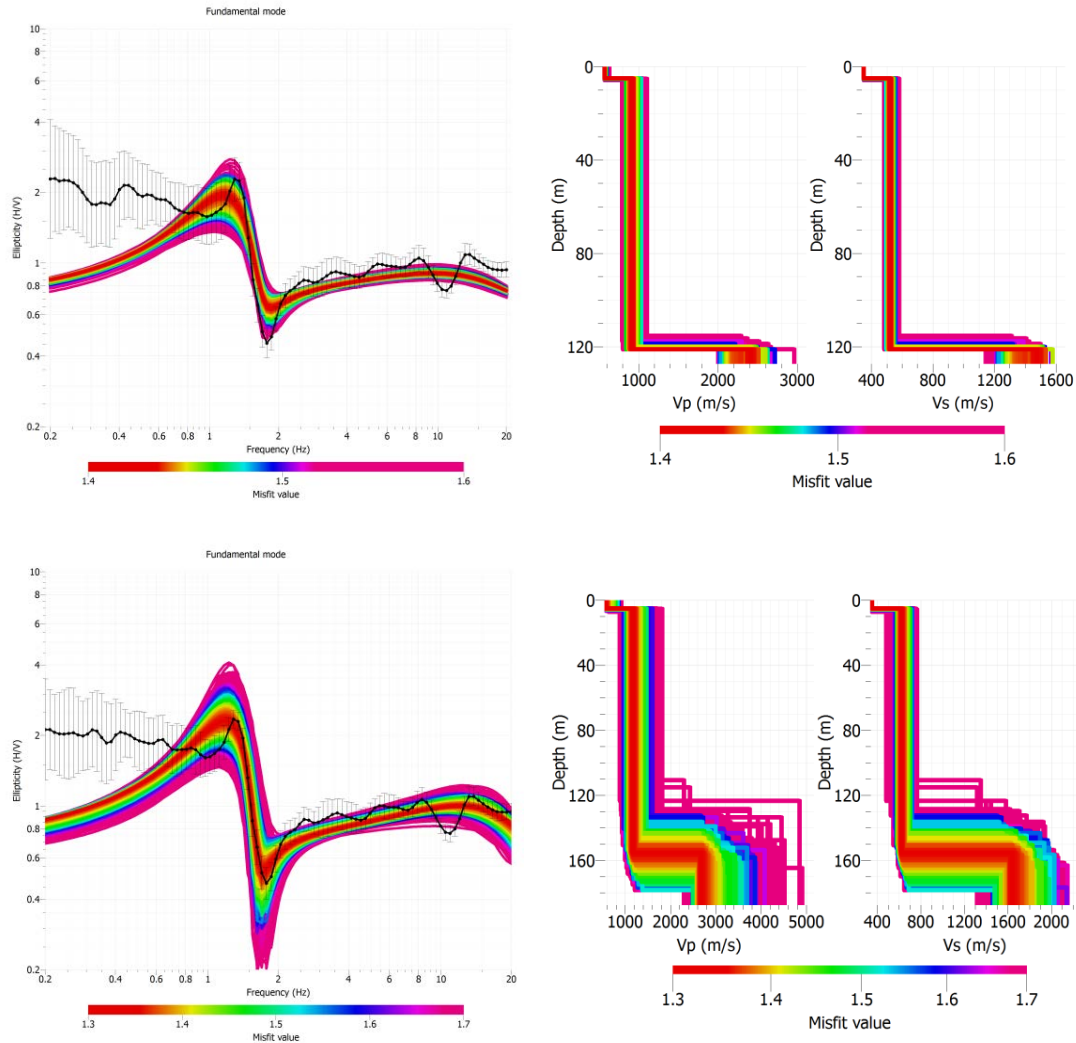
Άλλη χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί η θέση XANTHlg2, στη περιοχή της πόλης της Ξάνθης. Η ιδιαιτερότητα αυτής της περιοχής είναι ότι αποτελείται από πολύ σκληρά εδάφη (χαλικώδεις άμμους με γρανιτικά τεμάχια) με πολύ υψηλές σεισμικές ταχύτητες από τα επιφανειακά στρώματα ($V_{s5}=352$ m/sec και $V_{s30}=611$ m/sec). Στο σχήμα 3.13 παρουσιάζεται η καμπύλη ελλειπτικότητας HVSR (αριστερά) με ιδιοσυχνότητα 1.2 Hz και το προφίλ της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων με το βάθος (δεξιά), όπου με κόκκινους και γαλάζιους κύκλους δίνονται οι ταχύτητες των εγκαρσίων και των επιμηκών κυμάτων, αντίστοιχα.



Σχ. 3.13. Καμπύλη ελλειπτικότητας HVSr (αριστερά) και το αντίστοιχο προφίλ σεισμικών ταχυτήτων με το βάθος (δεξιά) για τη θέση XANTHIG2 στην περιοχή της Ξάνθης. Στο δεξί μέρος δίνονται με κόκκινους και γαλάζιους κύκλους οι ταχύτητες των εγκαρσίων και των επιμηκών κυμάτων, αντίστοιχα.

Στο πάνω μέρος του σχήματος 3.14 παρουσιάζονται τα αρχικά αποτελέσματα των αντιστροφών για τη περίπτωση αρχικού μοντέλου με δύο ομογενή στρώματα πάνω από ημιχώρο, για μέγιστο βάθος υποβάθρου $H^*2=125$ m (από τη σχέση 2.4). Στο κάτω μέρος αυτού του σχήματος δίνονται τα αποτελέσματα των αντιστροφών, για δύο ομογενή στρώματα πάνω από ημιχώρο και για μέγιστο βάθος υποβάθρου $H^*3=187$ m. Στο αριστερό μέρος δίνονται οι πειραματικές καμπύλες HVSr (μαύρη γραμμή) και η παραγόμενη καμπύλη ελλειπτικότητας (κόκκινη γραμμή), η οποία προκύπτει από την αντιστροφή με το μικρότερο δυνατό σφάλμα (misfit). Στο δεξί μέρος του σχήματος δίνονται τα προφίλ των επιμηκών (αριστερά) και εγκαρσίων (δεξιά) ταχυτήτων με το βάθος.

Στο πίνακα 3.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών της V_{s30} (δεύτερη στήλη) και βαθών του υποβάθρου (H , τρίτη στήλη) από τις αντιστροφές. Στη πρώτη στήλη δίνονται οι περιπτώσεις για δύο ομογενή στρώματα πάνω από ημιχώρο με μέγιστο βάθος υποβάθρου H^*2 (δεύτερη γραμμή) και με H^*3 (τρίτη γραμμή). Στη τέταρτη στήλη δίνεται η πραγματική ταχύτητα V_{s30} της θέσης XANTHIG2.



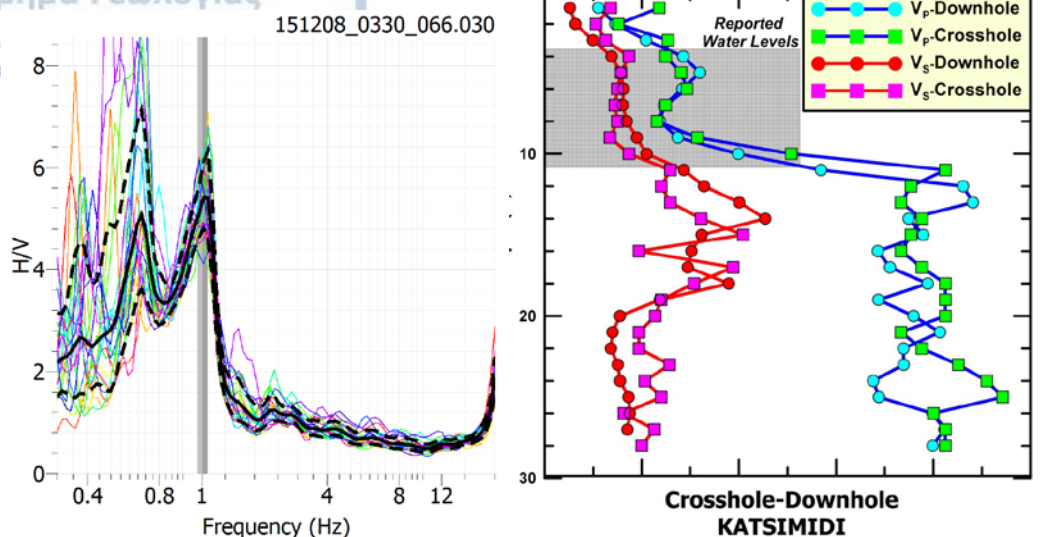
Σχ. 3.14. Αποτελέσματα αντιστροφών για δύο ομογενή στρώματα πάνω από ημιχώρο, για μέγιστο βάθους υποβάθρου $H^*2=125$ m (πάνω) και $H^*3=187$ m (κάτω), για τη θέση XANTHig2 στην περιοχή της Ξάνθης. Αριστερά, δίνονται οι πειραματικές καμπύλες ελλειπτικότητας HVSR (μαύρη γραμμή) και οι παραγόμενες καμπύλες (έγχρωμες γραμμές) από την αντιστροφή. Δεξιά, δίνονται τα αντίστοιχα προφίλ ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων με το βάθος, των επιμηκών (αριστερά) και των εγκαρσίων κυμάτων (δεξιά). Στο κάτω μέρος του κάθε σχήματος δίνεται με χρωματική κλίμακα το σφάλμα (misfit) των μοντέλων.

Πίνακας 3.7. Εκτιμώμενες τιμές της V_{s30} της θέσης XANTHig2 στην περιοχή της Ξάνθης, για διαφορετικά διαστήματα βαθών υποβάθρου (H), με βάση τα αποτελέσματα των αντιστροφών, για την περίπτωση που θεωρούνται δύο ομογενή (UU) στρώματα πάνω από ημιχώρο.

	V_{s30} (m/sec)	H(m)	V_{s30} -Real(m/sec)
UU (H*2)	481	122	611
UU (H*3)	545	154	

Όπως προκύπτει από το σχήμα 3.14 και τον πίνακα 3.7, για τα αποτελέσματα των αντιστροφών στην περίπτωση που ο περιορισμός για το μέγιστο βάθος του υποβάθρου στην αντιστροφή είναι H^*2 , η βασική ασυνέχεια των υπολογιζόμενων μοντέλων ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων με το βάθος φτάνει σε αυτό το μέγιστο βάθος, εμφανίζοντας ένα ιδιότυπο φαινόμενο «κορεσμού». Αυτό το φαινόμενο μπορεί να οφείλεται στις πολύ μεγάλες επιφανειακές ταχύτητες αυτής της θέσης, με αποτέλεσμα την υποεκτίμηση των τιμών της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων. Αντίθετα, η χρήση περιορισμού με μεγαλύτερο μέγιστο βάθος υποβάθρου βελτιώνει αισθητά την εκτιμώμενη V_{s30} . Η ίδια δοκιμή πραγματοποιήθηκε και για τη θέση ΧΑΝΤΗlg1, η οποία παρουσιάζει σχεδόν τα ίδια γεωλογικά χαρακτηριστικά με τη προηγούμενη εξεταζόμενη θέση. Αυτή η δοκιμή δεν κατάφερε να βελτιώσει τα αποτελέσματα των αντιστροφών, αλλά ούτε παρουσίασε διαφορές. Το συμπέρασμα το οποίο προκύπτει για περιβάλλοντα όπως της Ξάνθης (εδαφικές συνθήκες B βάσει EC8) είναι ότι στην περίπτωση που η αντιστροφή υπολογίζει μοντέλα ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων με ασυνέχεια κοντά στο μέγιστο εξεταζόμενο βάθος, ο περιορισμός στην αντιστροφή για το μέγιστο βάθος του υποβάθρου θα πρέπει να μετατοπίζεται από H^*2 σε H^*3 .

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η θέση THETHE017a στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, όπου η αντιστροφή απέτυχε να υπολογίσει λύση καμπύλης ελλειπτικότητας, η οποία να προσομοιάζει με την πειραματική καμπύλη HVSr, είτε με τη χρήση δύο και τριών στρωμάτων πάνω από ημιχώρο, είτε με τη χρήση μεγαλύτερου μέγιστου βάθους υποβάθρου. Η ιδιαιτερότητα αυτής της θέσης οφείλεται στην ύπαρξη διπλής κορυφής στη καμπύλη ελλειπτικότητας HVSr. Η ύπαρξης της διπλής κορυφής μπορεί να οφείλεται στα κατώτερα στρώματα των ερυθρών αργίλων, δημιουργώντας μία δεύτερη ισχυρή αντίθεση εμπέδησης εντός των ιζηματογενών σχηματισμών με τους επιφανειακούς Ολοκαινικούς σχηματισμούς. Στο σχήμα 3.15 δίνεται η καμπύλη ελλειπτικότητας HVSr (αριστερά) με πρώτη κορυφή στα 0.65 Hz και δεύτερη κορυφή στα 1.2 Hz. Δεξιά, δίνεται το αντίστοιχο προφίλ ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων με το βάθος, για τα επιμήκη (γαλάζιοι και πράσινοι κύκλοι) και τα εγκάρσια (κόκκινοι και μωβ κύκλοι) κύματα από τις μεθόδους Crosshole και Downhole.

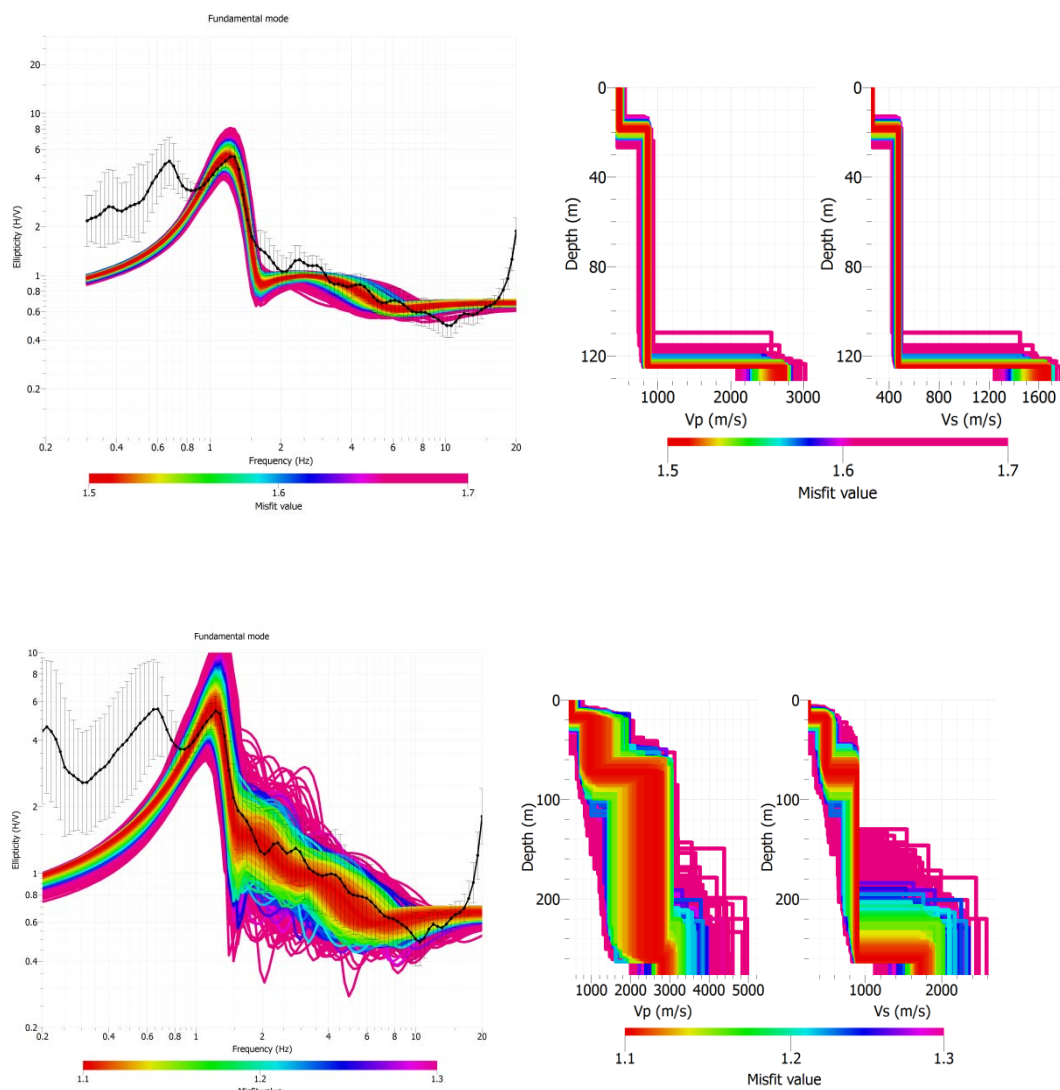


Σχ. 3.15. Καμπύλη ελλειπτικότητας HVSR (αριστερά) και το αντίστοιχο προφίλ σεισμικών ταχυτήτων με το βάθος (δεξιά) για τη θέση THETHE017a στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Στο προφίλ ταχυτήτων με το βάθος, δίνονται οι ταχύτητες των εγκαρσίων (μωβ και κόκκινοι κύκλοι) και των επιμηκών κυμάτων (γαλάζιοι και πράσινοι κύκλοι), από τις μεθόδους Crosshole και Downhole.

Στο σχήμα 3.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αντιστροφών δύο ομογενών στρωμάτων πάνω από ημιχώρο, με χρήση της ιδιοσυχνότητας 1.2 Hz, για την εκτίμηση του βάθους του υποβάθρου (πάνω) και τριών ομογενών στρωμάτων πάνω από ημιχώρο, με χρήση της ιδιοσυχνότητας 0.65 Hz, για την εκτίμηση αυτού του βάθους (από τη σχέση 2.4). Στο αριστερό μέρος δίνονται οι πειραματικές καμπύλες HVSR (μαύρη γραμμή) και οι παραγόμενες καμπύλες ελλειπτικότητας (κόκκινη γραμμή), οι οποίες προκύπτουν από την αντιστροφή με το μικρότερο δυνατό σφάλμα (misfit). Στο δεξί μέρος του κάθε σχήματος δίνονται τα προφίλ των επιμηκών (αριστερά) και εγκαρσίων (δεξιά) ταχυτήτων με το βάθος.

Στο πίνακα 3.8 αναφέρονται τα αποτελέσματα των τιμών της μέσης ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 30 μέτρων (V_{s30} , δεύτερη στήλη) και των βαθών του υποβάθρου (H, τρίτη στήλη) από την αντιστροφή για την θέση THETHE017a. Στην δεύτερη γραμμή δίνονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση της χρήσης δύο ομογενών στρωμάτων πάνω από ημιχώρο, με βάθος υποβάθρου που καθορίστηκε λαμβάνοντας υπόψη την δεύτερη κορυφή ($f_0=1.2$ Hz) ως κύρια κορυφή της καμπύλης HVSR. Στην τρίτη γραμμή δίνονται τα αποτελέσματα για την

περίπτωση της χρήσης τριών ομογενών στρωμάτων πάνω από ημιχώρο, με βάθος υποβάθρου λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη κορυφή ($f_0=0.65$ Hz) ως κύρια κορυφή της καμπύλης HVSr. Στην τέταρτη στήλη δίνεται η πραγματική ταχύτητα V_{s30} αυτής της θέσης, από τη βάση δεδομένων της διατρίβής.

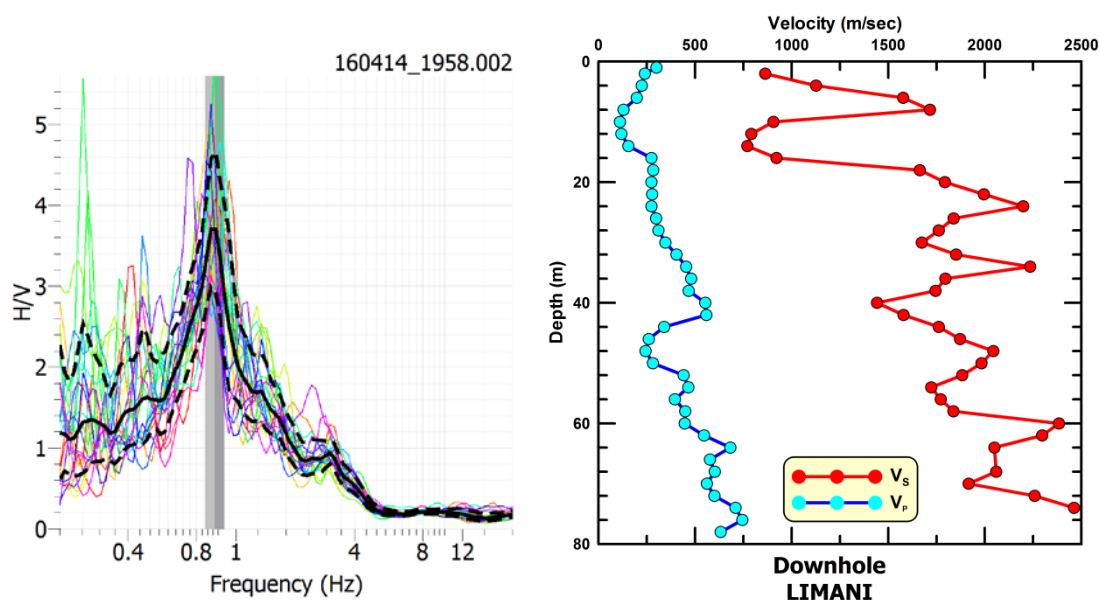


Σχ. 3.16. Αποτελέσματα αντιστροφών δύο ομογενών στρωμάτων πάνω από ημιχώρο, για βάθος υποβάθρου από τη χρήση της δεύτερης κορυφής ($f_0=1.2$ Hz, πάνω) και τριών ομογενών στρωμάτων, με βάθος υποβάθρου που αντανακλά τη θέση της πρώτης κορυφής ($f_0=0.65$ Hz, κάτω), για τη θέση THETHE017a στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Αριστερά δίνονται οι πειραματικές καμπύλες ελλειπτικότητας HVSr (μαύρη γραμμή) και οι παραγόμενες καμπύλες (έγχρωμες γραμμές) από την αντιστροφή. Δεξιά δίνονται τα αντίστοιχα προφίλ ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων με το βάθος, για τα επιμήκη (αριστερά) και για τα εγκάρσια κύματα (δεξιά). Στο κάτω μέρος του κάθε σχήματος δίνεται με χρωματική κλίμακα το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (misfit) των μοντέλων.

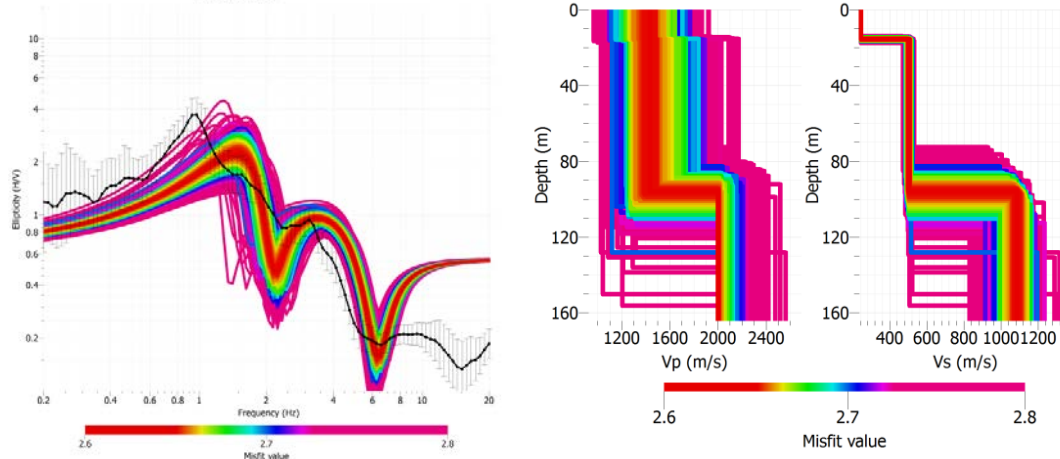
Πίνακας 3.8. Οι εκτιμώμενες τιμές της V_{s30} και των βαθών του υποβάθρου (H) από τα αποτελέσματα των αντιστροφών, για δύο ομογενή στρώματα πάνω από ημιχώρο με χρήση της δεύτερης κορυφής ($f_0=1.2$ Hz) και για τρία ομογενή στρώματα πάνω από ημιχώρο με χρήση της πρώτης κορυφής ($f_0=0.655$ Hz), της θέσης THETHE017a στην περιοχή της Θεσσαλονίκης.

	$V_{s30}(\text{m/sec})$	$H(\text{m})$	$V_{s30}\text{-Real}(\text{m/sec})$
UU ($f_0=1.2$ Hz)	324	263	453
UUU ($f_0=0.65$ Hz)	331	126	

Τέλος, εξετάστηκε και η περίπτωση της θέσης THETHE005b στην περιοχή του χώρου του λιμανιού της Θεσσαλονίκης. Η θέση αυτή παρουσιάζει έντονη αντιστροφή των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων με το βάθος ($V_{s30}=206$ m/sec < $V_{s5}=309$ m/sec) με αποτέλεσμα η αντιστροφή να μην υπολογίζει μοντέλα δομής ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων που να είναι σύμφωνα με το διαθέσιμο προφίλ των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων από τη βάση δεδομένων της διατρίβης. Στο σχήμα 3.17 παρουσιάζεται δεξιά το προφίλ των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων και αριστερά η καμπύλη ελλειπτικότητας αυτής της θέσης. Στο σχήμα 3.18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αντιστροφής για αυτήν τη θέση (ισχύει η ίδια επεξήγηση με το σχήμα 3.11). Λόγω της ομοιότητας των δύο λύσεων των αντιστροφών (run1 και run2) παρουσιάζεται μόνο μία από τις δύο λύσεις.



Σχ. 3.17. Καμπύλη ελλειπτικότητας HVSR (αριστερά) και το προφίλ των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων (δεξιά), όπου με κόκκινους κύκλους παρουσιάζεται η μεταβολή των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων με το βάθος και με γαλάζιους των επιμηκών, για την θέση THETHE005b στην περιοχή της Θεσσαλονίκης.



Σχ. 3.18. Αποτελέσματα λύσεων για τη περίπτωση δύο ομογενών στρωμάτων (UU) πάνω από ημιχώρο, για τη θέση THETHE005b στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Στο αριστερό μέρος δίνονται οι παραγόμενες καμπύλες ελλειπτικότητας (έγχρωμες γραμμές) και η πειραματική καμπύλη ελλειπτικότητας HVSr (μαύρη γραμμή) ενώ στο δεξί μέρος οι αντίστοιχες δομές εδάφους εκφρασμένες σε ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων. Στο αριστερό μέρος των μοντέλων δομής του υπεδάφους παρουσιάζονται οι ταχύτητες των επιμηκών (P) και στο δεξί των εγκάρσιων (S) κυμάτων με το βάθος. Στο κάτω μέρος του κάθε σχήματος δίνεται με χρωματική κλίμακα το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (misfit) των μοντέλων.

Στον πίνακα 3.9 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της θέσης THETHE005b . Στην πρώτη αναφέρεται ο κωδικός της θέσης. Στην δεύτερη και τρίτη δίνεται η μέση ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων των πρώτων 5 μέτρων (V_{s5}) και η μέση ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων των πρώτων 30 μέτρων (V_{s30}), ενώ στην τέταρτη η εκτιμώμενη τιμή της V_{s30} από το παραγόμενο μοντέλο της αντιστροφής, για την περίπτωση δύο ομογενών στρωμάτων πάνω από ημιχώρο. Οι υπόλοιπες περιπτώσεις αντιστροφών (UL και LL) υπολόγισαν παρόμοια αποτελέσματα, οπότε και παραλείπονται. Αξίζει να σημειωθεί ότι και οι υπόλοιπες περιπτώσεις θέσεων με έντονη αντιστροφή σεισμικών ταχυτήτων με το βάθος παρουσίασαν δυσκολίες και η μέθοδο της αντιστροφής απέτυχε να υπολογίσει μοντέλα δομής σεισμικών ταχυτήτων που να συμφωνούν με τα διαθέσιμα προφίλ της βάσης δεδομένων.

Πίνακας 3.9. Πληροφορίες για την θέση THETHE005b στην περιοχή της Θεσσαλονίκης.

Site_code	V_{s5} (m/sec)	V_{s30} (m/sec)	V_{s30} -Estimated (m/sec)
THETHE005b	309	206	326

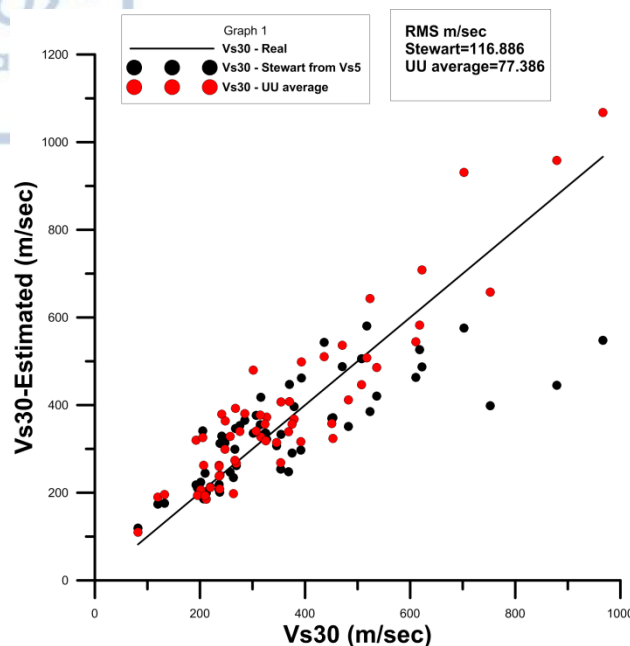
Συμπερασματικά, για περίπτωση καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR με πολύ χαμηλή ιδιοσυχνότητα ($f_0 < 1.5$ Hz), η χρήση τριών στρωμάτων πάνω από ημιχώρο στην αντιστροφή βελτίωσε μερικώς τις λύσεις κάποιων θέσεων αλλά σε καμία περίπτωση η χρήση αυτής της στρατηγικής δεν τις χειροτέρεψε. Η χρήση μεγαλύτερου βάθους υποβάθρου ως περιορισμός στην αντιστροφή, προτείνεται να χρησιμοποιείται όταν η αντιστροφή δεν μπορεί να υπολογίσει λύση, της οποίας το μέγιστό της να συμπίπτει με το μέγιστο της καμπύλης ελλειπτικότητας HVSR. Επίσης, για τη περίπτωση εδαφών τύπου E8=B (κατά Eurocode 8, παράγραφο 1.1), η χρήση μεγαλύτερου βάθους προτείνεται όταν τα αποτελέσματα των μοντέλων δομής των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων με το βάθος από την αντιστροφή, παρουσιάζουν σύγκλιση κοντά στο μέγιστο εξεταζόμενο βάθος («κορεσμός» βάθους), γεγονός το οποίο σημαίνει ότι η αντιστροφή μπορεί να υπολογίσει λύσεις με μεγαλύτερα βάθη υποβάθρου. Για περιπτώσεις θέσεων με έντονη αντιστροφή των ταχυτήτων σεισμικών κυμάτων με το βάθος, η μέθοδος της αντιστροφής δεν υπολόγισε συμβατές λύσεις με τα διαθέσιμα γεωφυσικά προφίλ της βάσης δεδομένων.

3.2.3. Τελικά Αποτελέσματα των Μέσων Ταχυτήτων των Εγκαρσίων Κυμάτων των Πρώτων 30 m, V_{s30} , από την Αντιστροφή των Καμπυλών Ελλειπτικότητας HVSR.

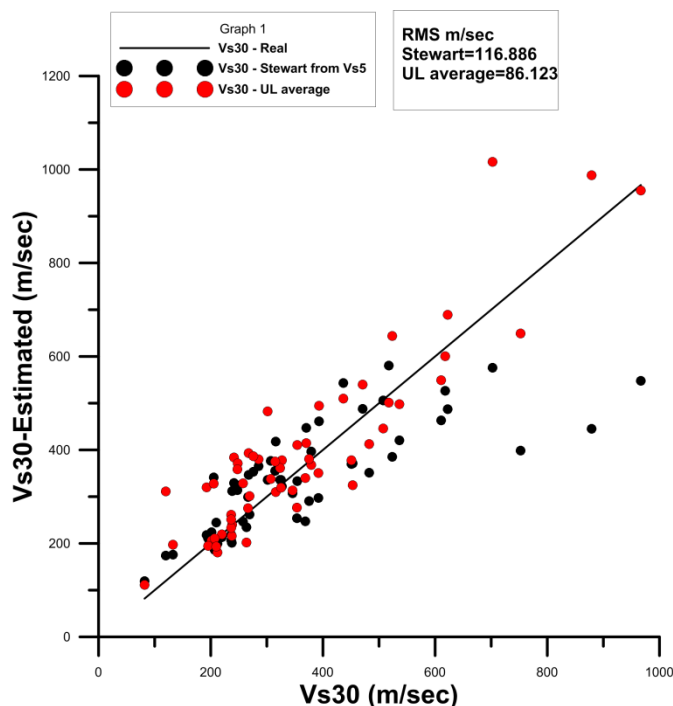
Όπως προφέρθηκε, τα αποτελέσματα των αντιστροφών αξιολογήθηκαν αρχικά για την αξιοπιστία της μετρούμενης θέσης και της καμπύλης ελλειπτικότητας. Στην συνέχεια, έγινε προσπάθεια της χρήσης διαφορετικής στρατηγικής επεξεργασίας αντιστροφής, για θέσεις οι οποίες παρουσιάζουν γεωλογικές ή άλλες ιδιαιτερότητες ώστε να βελτιωθούν πιθανά οι λύσεις τους, όπως αυτά παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Με βάση τα παραπάνω, ο τελικός αριθμός των θέσεων, για τον οποίο παρουσιάζονται στα τελικά αποτελέσματα είναι 58.

Στα σχήματα 3.19, 3.20 και 3.21 παρουσιάζονται αυτά τα τελικά αποτελέσματα των μέσων τιμών των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 30 μέτρων (V_{s30}), από τις αντιστροφές των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR. Σε αυτά, στον

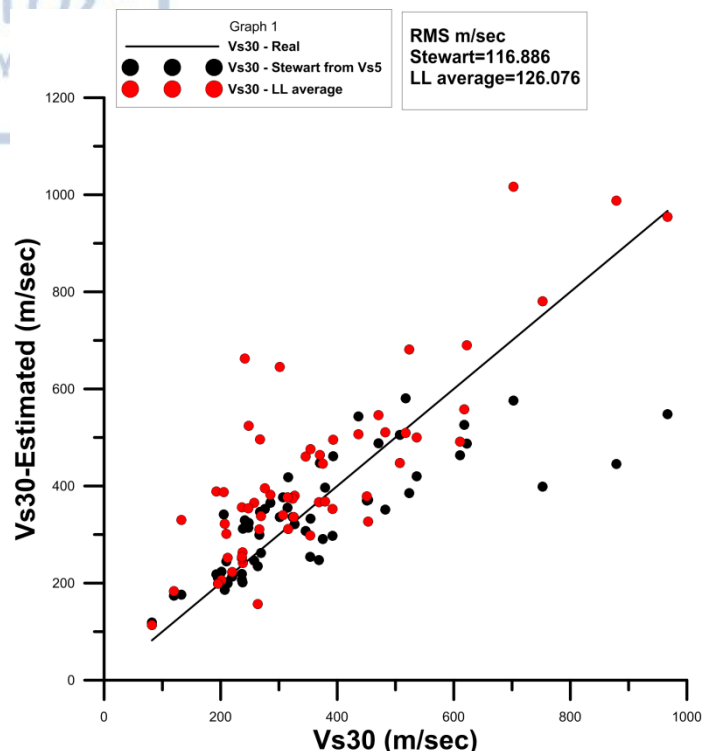
κατακόρυφο άξονα δίνονται οι εκτιμώμενες τιμές της V_{s30} από την μέθοδο της αντιστροφής και από την ημι-εμπειρική σχέση (σχέση 1.18) του **Stewart et al. (2014)**, με τη χρήση της μέσης ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 5 m (V_{s5}). Στον οριζόντιο άξονα δίνονται οι πραγματικές τιμές της V_{s30} , οι οποίες προκύπτουν από τα προφίλ ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων με το βάθος της βάσης δεδομένων της παρούσας διατριβής. Σε αυτά τα τρία σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση δύο ομογενών στρωμάτων (Uniform – Uniform, UU), για την περίπτωση ενός ομογενούς στρώματος και ενός στρώματος με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα με το βάθος (Uniform - Linear increase, UL), καθώς και για την περίπτωση δύο στρωμάτων με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα με το βάθος (Linear increase - Linear increase, LL) πάνω από ημιχώρο, αντίστοιχα. Σε αυτά τα σχήματα με κόκκινους κύκλους αναφέρονται τα αποτελέσματα των μέσων όρων των V_{s30} , τα οποία προκύπτουν από τις δύο αντιστροφές (run1 και run2), ενώ με μαύρους κύκλους περιγράφονται οι εκτιμώμενες τιμές της V_{s30} , οι οποίες προκύπτουν από την εμπειρική σχέση των **Stewart et al. (2014)**. Στο πάνω αριστερό μέρος του κάθε σχήματος δίνονται τα σφάλματα (RMS) μεταξύ των εκτιμώμενων και των πραγματικών τιμών της V_{s30} , για κάθε περίπτωση εκτίμησης της V_{s30} (UU average, UL average, LL average, και Stewart et al., 2014). Όσο πιο σύμφωνες είναι οι εκτιμώμενες με τις πραγματικές τιμές της V_{s30} , τόσο αυτές είναι πιο κοντά στη διχοτόμο. Στο πίνακα 3.10 παρουσιάζονται τα σφάλματα (RMS) των εκτιμώμενων τιμών της V_{s30} με τις πραγματικές (δεύτερη στήλη) για την κάθε περίπτωση εκτίμησης (πρώτη στήλη). Όπως προκύπτει από αυτά τα σχήματα και με βάση τα σφάλματα (RMS), οι περιπτώσεις των δύο ομογενών στρωμάτων (UU) και ενός ομογενούς και ενός με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα στρώματος με το βάθος (UL) πάνω από ημιχώρο, παρέχουν σαφώς πιο ακριβείς εκτιμήσεις της V_{s30} από ότι η περίπτωση των δύο στρωμάτων με γραμμικά αυξανόμενες ταχύτητες με το βάθος (LL).



Σχ. 3.19. Εκτιμώμενες τιμές της V_{s30} σε συνάρτηση με τις πραγματικές, για τη περίπτωση δύο ομογενών στρωμάτων (UU) πάνω από ημιχώρο. Με κόκκινους κύκλους παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των εκτιμώμενων τιμών της V_{s30} , από τις δύο αντιστροφές (run1 και run2). Με μαύρους κύκλους συμβολίζονται οι τιμές V_{s30} , που προκύπτουν από την ημι-εμπειρική σχέση των Stewart et al. (2014). Στο πάνω δεξιά μέρος του σχήματος δίνονται τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα (RMS) μεταξύ των εκτιμώμενων και πραγματικών τιμών της V_{s30} .



Σχ. 3.20. Οι εκτιμώμενες τιμές της V_{s30} σε συνάρτηση με τις πραγματικές, για τη περίπτωση ενός ομογενούς και ενός με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα στρώματος (UL) πάνω από ημιχώρο. Με κόκκινους κύκλους παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των εκτιμώμενων τιμών της V_{s30} , από τις δύο αντιστροφές (run1 και run2). Με μαύρους κύκλους συμβολίζονται οι τιμές V_{s30} , που προκύπτουν από την εμπειρική σχέση των Stewart et al. (2014). Στο πάνω δεξιά μέρος του κάθε σχήματος, δίνονται τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα (RMS) μεταξύ των εκτιμώμενων και πραγματικών τιμών της V_{s30} .



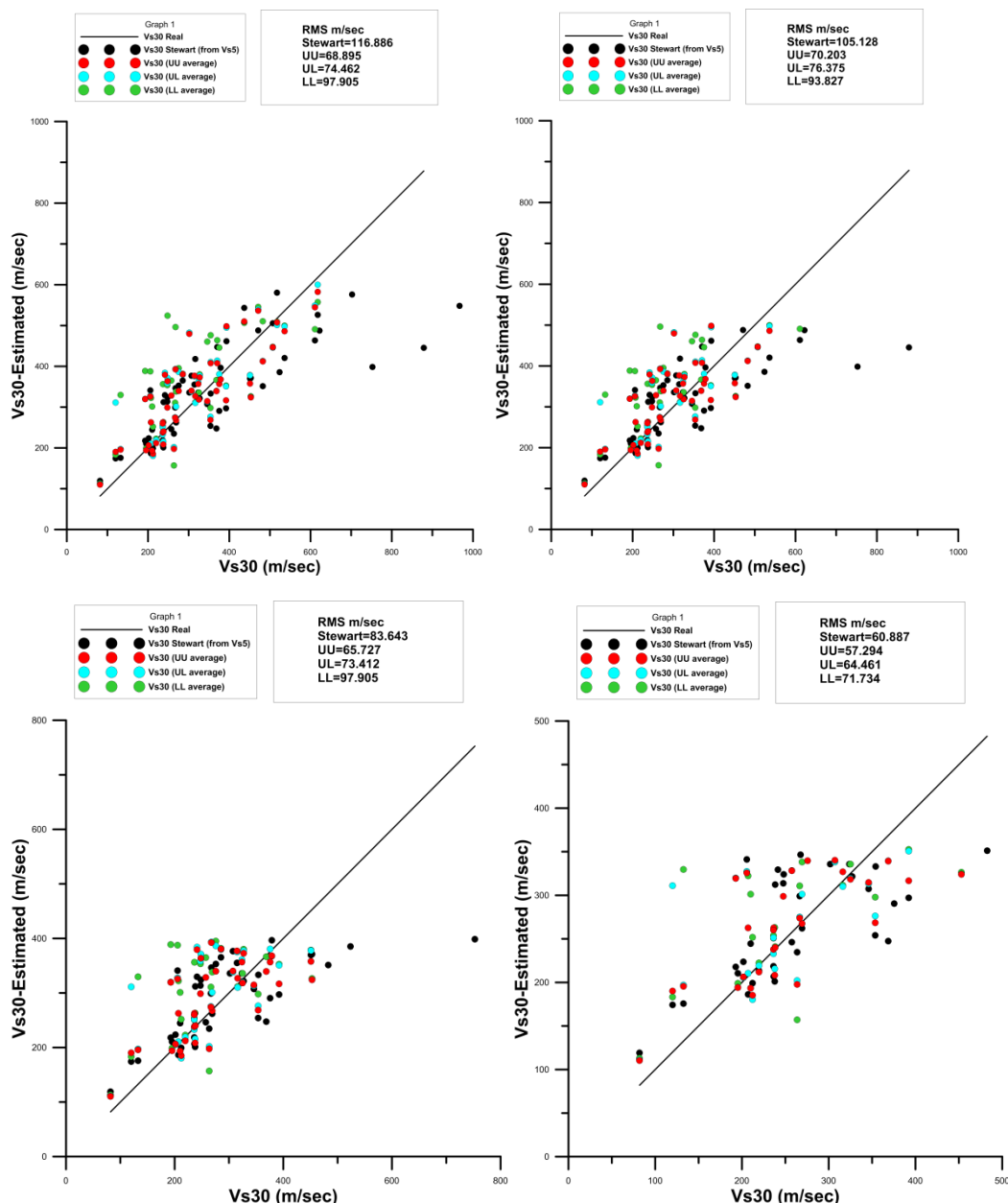
Σχ. 3.21. Όπως το σχήμα 3.20 για τη περίπτωση δύο στρωμάτων με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα (LL) πάνω από ημιχώρο.

Πίνακας 3.10. Τα σφάλματα (RMS) των εκτιμώμενων τιμών της V_{s30} , με τις πραγματικές, τιμές (όπως αυτές περιέχονται στη βάση δεδομένων της διατριβής), για τη κάθε περίπτωση εκτίμησης.

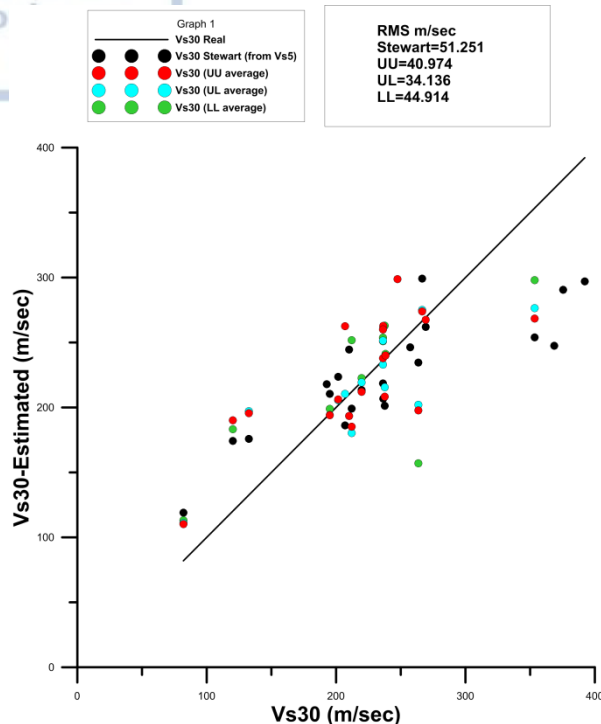
Μέθοδος	RMS m/sec
UU- aver	77
UL- aver	86
LL- aver	126
Stewart et al. (2014)	117

Στο σχήμα 3.22α παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις εκτιμήσεις των τιμών της V_{s30} σε σχέση με τις πραγματικές, για εκτιμώμενες τιμές <600 m/sec (πάνω αριστερά), για <500 m/sec (πάνω δεξιά), για <400 m/sec (κάτω αριστερά) και για <350 m/sec (κάτω δεξιά). Στο 3.22β δίνονται οι εκτιμώμενες τιμές των $V_{s30}<300$ m/sec. Ισχύει η ίδια επεξήγηση με τα σχήματα 3.19, 3.20 και 3.21. Με κόκκινους κύκλους δίνεται ο μέσος όρος των λύσεων UU, με γαλάζιους ο μέσος όρος των λύσεων UL, με πράσινους ο μέσος όρος των λύσεων LL, ενώ με μαύρους οι εκτιμώμενες τιμές V_{s30} από την ημι-εμπειρική σχέση 1.18 των **Stewart et al. (2014)** με χρήση της V_{s5} . Τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν είναι ότι η μέθοδος της

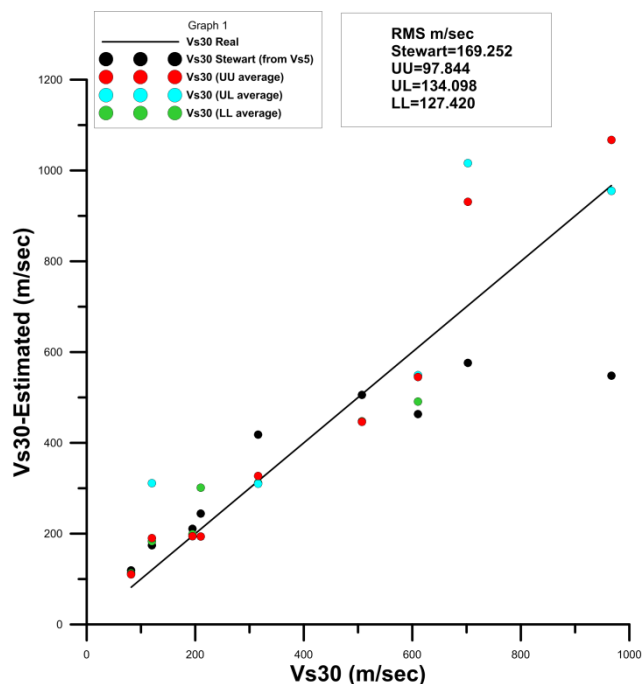
αντιστροφής για τις περιπτώσεις UU και UL παρέχει καλύτερες εκτιμήσεις της V_{s30} για μεγάλο εύρος ταχυτήτων, ενώ για ταχυτήτων μικρότερες από 400 m/sec ($V_{s30} < 400$ m/sec), η μέθοδος της αντιστροφής και η χρήση της ημι-εμπειρικής σχέσης 1.18 δίνει αποτελέσματα με παρόμοιες αβεβαιότητες.



Σχ. 3.22α. Εκτιμώμενες τιμές της V_{s30} σε συνάρτηση με τις πραγματικές, για εκτιμώμενες τιμές < 600 m/sec (πάνω αριστερά), για < 500 m/sec (πάνω δεξιά), για < 400 m/sec (κάτω αριστερά) και για < 350 m/sec (κάτω δεξιά). Με κύκλους παρουσιάζονται οι εκτιμώμενες V_{s30} οι οποίες προκύπτουν από το μέσο όρο των V_{s30} , των δύο αντιστροφών (run1 και run2), για τη περίπτωση δύο ομογενών στρωμάτων (UU, κόκκινους), για ένα ομογενές και ένα με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα στρώμα (γαλάζιους, UL), καθώς και για δύο στρώματα με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα (πράσινους, LL) πάνω από ημιχώρο, ενώ με μαύρους κύκλους δίνονται οι V_{s30} , οι οποίες προκύπτουν από την ημι-εμπειρική σχέση των Stewart et al. (2014). Στο πάνω δεξιά μέρος του κάθε σχήματος δίνονται τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα (RMS) μεταξύ των εκτιμώμενων και πραγματικών V_{s30} .



Σχ. 3.22β. Εκτιμώμενες τιμές της V_{s30} σε συνάρτηση με τις πραγματικές, για εκτιμώμενες τιμές <300 m/sec. Ισχύει η ίδια επεξήγηση με το σχήμα 3.22α.



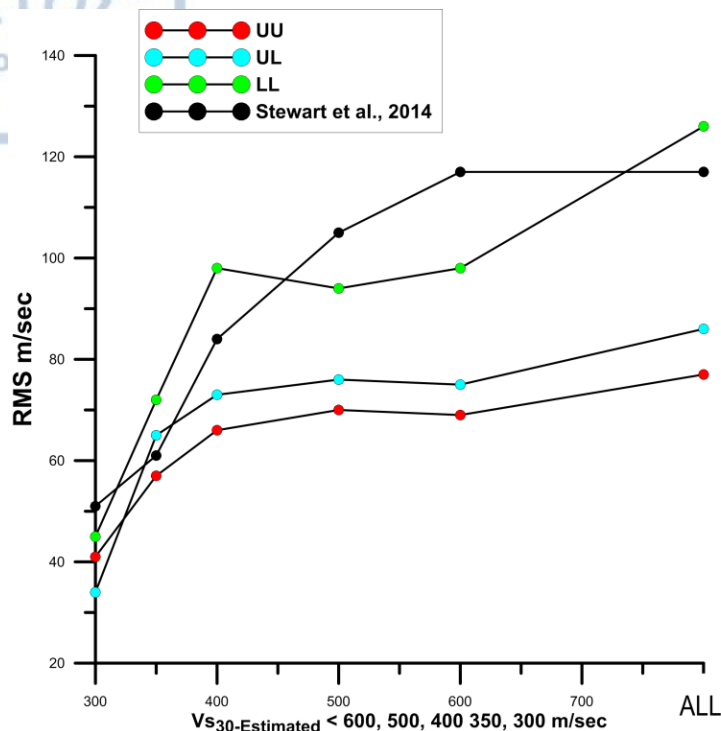
Σχ. 3.23. Εκτιμώμενες τιμές της V_{s30} σε συνάρτηση με τις πραγματικές, από θέσεις της βάσης δεδομένων του Α.Π.Θ. Ισχύει η ίδια επεξήγηση με το σχήμα 3.22α.

Στο σχήμα 3.23 (ισχύει η ίδια επεξήγηση με το σχήμα 3.20) δίνονται οι εκτιμώμενες τιμές V_{s30} σε σχέση με τις πραγματικές, για τις θέσεις από τη βάση δεδομένων του Εργ. Γεωφυσικής του Α.Π.Θ που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα

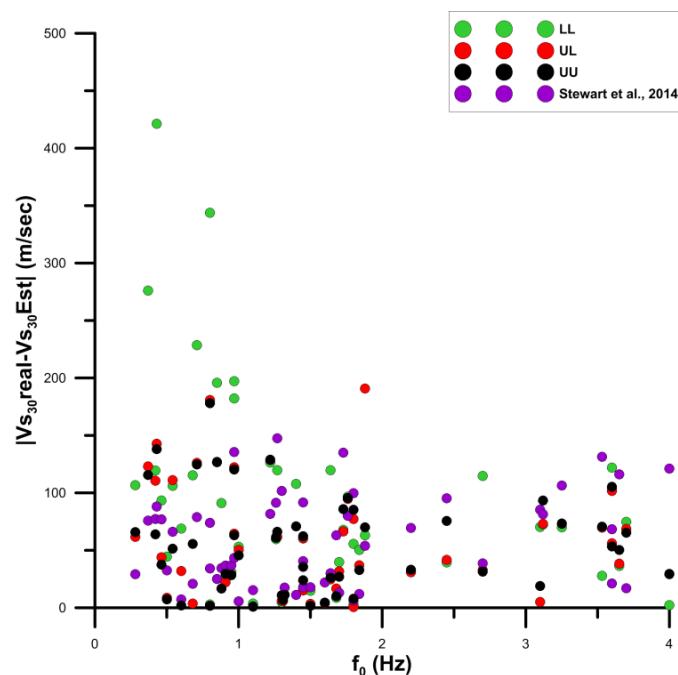
διατριβή. Αξίζει να σημειωθεί ότι, αυτές οι θέσεις δε περιλαμβάνονται στην βάση δεδομένων των **Stewart et al. (2014)**, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ημι-εμπειρικής σχέσης V_{s5} - V_{s30} . Για τον λόγο αυτό, στο υπόψη σχήμα αξιολογείται η σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων εκτίμησης των τιμών της V_{s30} (από την αντιστροφή των καμπυλών HVSR και από την τιμή V_{s5} μέσω ημι-εμπειρικών σχέσεων) με τη χρήση ανεξάρτητων δεδομένων. Όπως προκύπτει από το σχήμα αυτό, η μέθοδος της αντιστροφής των καμπυλών HVSR παρέχει πιο ακριβή αποτελέσματα στα ανεξάρτητα αυτά δεδομένα.

Στο σχήμα 3.24, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα (RMS) μεταξύ των εκτιμώμενων (από την αντιστροφή των καμπυλών HVSR) και των πραγματικών τιμών της V_{s30} . Με κύκλους σημειώνονται τα σφάλματα τα οποία προκύπτουν από την αντιστροφή για την περίπτωση της UU (κόκκινοι), της UL (γαλάζιοι), και της LL (πράσινοι), ενώ με μαύρους κύκλους δίνονται τα σφάλματα για εκτίμηση του V_{s30} από τη V_{s5} με τη χρήση της ημι-εμπειρικής σχέσης 1.18 των **Stewart et al. (2014)**. Στον οριζόντιο άξονα του σχήματος (από τα αριστερά προς τα δεξιά) δίνονται τα σφάλματα από όλες τις θέσεις (ALL) και για εκτιμώμενες τιμές μικρότερες των 600, 500, 400, 350 και 300 m/sec ($V_{s30} < 600, 500, 400, 350$ και 300 m/sec). Βλέπουμε ότι τα σφάλματα της αντιστροφής για τις μεθόδους UU και UL είναι μικρότερα από τις σχέσεις των **Stewart et al. (2014)** για εκτιμώμενες τιμές του $V_{s30} \geq 400$ m/sec, σε συμφωνία με όσα αναφέρθηκαν προηγούμενως στα σχήματα 3.22α και 3.22β.

Στο σχήμα 3.25, δίνονται τα απόλυτα σφάλματα μεταξύ πραγματικών και εκτιμώμενων τιμών της V_{s30} σε σχέση με την ιδιοσυχνότητα της κάθε θέσης. Σε αυτό το σχήμα δίνονται με κύκλους οι τιμές V_{s30} για την περίπτωση UU (μαύροι), την UL (κόκκινοι), LL (πράσινοι) και από την ημι-εμπειρική σχέση 1.18 των **Stewart et al. (2014)** (μοβ). Όπως γίνεται αντιληπτό, το σφάλμα αυξάνεται για χαμηλές τιμές ιδιοσυχνοτήτων (< 2 Hz), εκτός από την περίπτωση της ημι-εμπειρικής σχέσης των **Stewart et al. (2014)**.

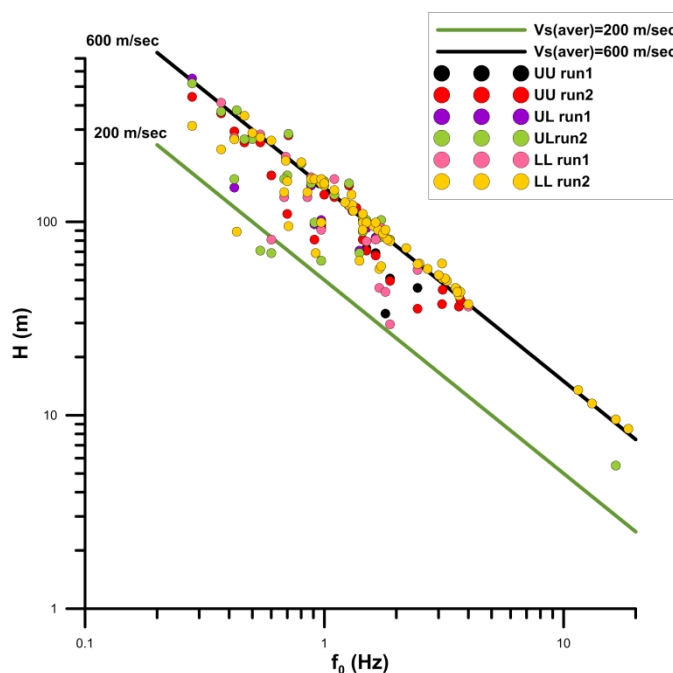


Σχ. 3.24. Συγκεντρωτικά σφάλματα (RMS) μεταξύ εκτιμώμενων και πραγματικών τιμών της V_{s30} . Με κύκλους παρουσιάζονται τα σφάλματα τα οποία προκύπτουν από την αντιστροφή για την περίπτωση της UU (κόκκινοι), της UL (γαλάζιοι), και της LL (πράσινοι), ενώ με μαύρους κύκλους δίνονται τα σφάλματα από την χρήση της ημι-εμπειρικής σχέσης 1.18 των **Stewart et al. (2014)**. Στον οριζόντιο άξονα (από τα αριστερά προς τα δεξιά) δίνονται τα σφάλματα από όλες τις θέσεις (ALL) και για εκτιμώμενες τιμές της V_{s30} μικρότερες των 600, 500, 400, 350 και 300 m/sec.



Σχ. 3.25. Απόλυτο σφάλμα, μεταξύ πραγματικής και εκτιμώμενης V_{s30} , σε συνάρτηση με την ιδιοσυχνότητα, για τις περιπτώσεις UU (μαύροι κύκλοι), την UL (κόκκινοι κύκλοι), LL (πράσινοι κύκλοι), καθώς και από την εμπειρική σχέση 1.18 των **Stewart et al. (2014)**, μωβ κύκλοι).

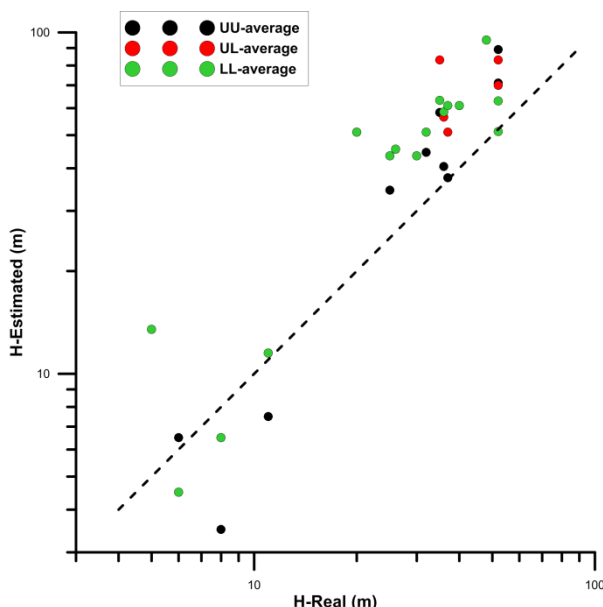
Στο σχήμα 3.26, παρουσιάζονται τα βάθη, τα οποία εκτιμήθηκαν για κάθε περίπτωση αντιστροφής (UU run1, UU run2, UL run1, UL run2, LL run1 και LL run2). Στο πάνω δεξί μέρος του σχήματος, δίνεται το υπόμνημα για την χρωματική επεξήγηση των σημείων, για τη κάθε περίπτωση αντιστροφής. Με πράσινη συνεχόμενη γραμμή δίνονται τα θεωρητικά βάθη του υποβάθρου, για διάστημα συχνοτήτων από 0.2 Hz μέχρι 20 Hz, με χρήση της μέσης ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων των 200 m/sec ($V_{s(aver)}=200$ m/sec) των επιφανειακών σχηματισμών μέχρι το υπόβαθρο, ενώ με μαύρη συνεχόμενη γραμμή δίνονται τα βάθη του υποβάθρου, με χρήση της μέσης ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων των 600 m/sec ($V_{s(aver)}=600$ m/sec), για το ίδιο εύρος συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας τη σχέση 1.2.



Σχ. 3.26. Εκτιμώμενα βάθη για τις περιπτώσεις αντιστροφών UU run1, UU run2, UL run1, UL run2, LL run1 και LL run2, σε σχέση με την ιδιοσυχνότητα της κάθε θέσης. Με μαύρη και πράσινη συνεχόμενη γραμμή δίνονται τα θεωρητικά βάθη, με χρήση μέσης ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων των 600 m/sec και 200 m/sec, αντίστοιχα, των επιφανειακών σχηματισμών μέχρι το υπόβαθρο, για εύρος συχνοτήτων 0.2 Hz μέχρι 20 Hz. Στο πάνω δεξί μέρος του σχήματος δίνεται το υπόμνημα με τη χρωματική επεξήγηση των συμβόλων.

Συμπερασματικά, τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα των λύσεων, για τη περίπτωση δύο ομογενών στρωμάτων (UU) και ενός ομογενούς και ενός στρώματος με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα με το βάθος (UL) πάνω από ημιχώρου, είναι αρκετά μικρότερα από ότι της περίπτωσης των δύο στρωμάτων με γραμμικά

αυξανόμενη ταχύτητα με το βάθος (LL). Για την περίπτωση εδαφών κατηγορίας A και B κατά EC8 (πίνακας 1.1), η μέθοδος της αντιστροφής των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSr για την εκτίμηση των τιμών της V_{s30} , παρέχει πιο ακριβή αποτελέσματα απ' ότι η ημι-εμπειρική σχέση 1.18 των **Stewart et al. (2014)**, με χρήση της V_{s5} (Σχ. 3.22 και 3.24). Επίσης, από τα σχήματα 3.22 και 3.24 γίνεται σαφές ότι τα σφάλματα (RMS) των λύσεων της κάθε περίπτωσης εκτίμησης, για εδάφη με EC8=C και D είναι παρόμοια με αυτά των ημι-εμπειρικών σχέσεων (εκτός για την περίπτωση των λύσεων LL). Για την περίπτωση που έγινε η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων από την μέθοδο της αντιστροφής και της ημι-εμπειρικής σχέσης 1.18 των **Stewart et al. (2014)** με ανεξάρτητα δεδομένα από τη βάση δεδομένων του Εργ. Γεωφυσικής του ΑΠΘ, η μέθοδος της αντιστροφής των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSr παρείχε πιο ακριβή αποτελέσματα για την εκτίμηση των τιμών της V_{s30} (Σχ. 3.23). Το συμπέρασμα το οποίο προκύπτει από το σχήμα 3.25 είναι ότι για χαμηλές ιδιοσυχνότητες (< 2 Hz), το σφάλμα μεταξύ εκτιμώμενων και πραγματικών V_{s30} αυξάνεται, εκτός από την περίπτωση της ημι-εμπειρικής σχέσης 1.18 των **Stewart et al. (2014)**, το οποίο παρουσιάζει παρόμοιες τιμές σε όλο το εύρος συχνοτήτων (0.2 Hz – 4 Hz).



Σχ. 3.27. Εκτιμώμενα βάθη υποβάθρου σε σχέση με τα πραγματικά σε λογαριθμική κλίμακα, για τις περιπτώσεις UU (μαύροι κύκλοι), την UL (κόκκινοι κύκλοι) και LL (πράσινοι κύκλοι).

Από το σχήμα 3.26 προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα εκτιμώμενα βάθη του υποβάθρου, τα οποία υπολογίστηκαν από την μέθοδο της αντιστροφής των καμπυλών HVSR, παρουσιάζουν συστηματική συγκέντρωση κατά μήκος κυρίως της μαύρης συνεχόμενης γραμμής ($V_s=600$ m/sec) και λιγότερες τιμές μέχρι την ευθεία που αντιστοιχεί σε $V_s=200$ m/sec. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, η τιμή αυτή της μέσης ταχύτητας πάνω από το υπόβαθρο, αντιστοιχεί πρακτικά στο μέγιστο πιθανό βάθος του υποβάθρου που θα μπορούσε να υπολογιστεί για κάθε θέση, κάτι που παρατηρείται για μεγάλο εύρος συχνοτήτων (από 0.2 Hz μέχρι τα 20 Hz). Κατά συνέπεια, είναι πιθανό η διαδικασία να οδηγεί σε μεγαλύτερα βάθη του υποβάθρου από τα πραγματικά. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται και στο σχήμα 3.27, όπου παρουσιάζονται τα εκτιμώμενα βάθη του υποβάθρου από την αντιστροφή των καμπυλών HVSR σε σχέση με τα πραγματικά βάθη σε λογαριθμική κλίμακα, για τις θέσεις που αυτά ήταν διαθέσιμα. Με κύκλους δίνεται ο μέσος όρος για τα εκτιμώμενα βάθη από τις δύο αντιστροφές (run1 και run2) για την περίπτωση των δύο ομογενών στρωμάτων (UU-average, μαύρους), ενός ομογενούς και ενός στρώματος με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα με το βάθος (UL-average, κόκκινους) και για την περίπτωση των δύο στρωμάτων με γραμμικά αυξανόμενες ταχύτητες με το βάθος (LL-average), ενώ με μαύρη συνεχόμενη γραμμή δίνεται η διχοτόμος του σχήματος. Αν και τα αποτελέσματα από τις δοκιμές UU και UL είναι καλύτερα, το σχήμα δείχνει ότι τα εκτιμώμενα βάθη συχνά είναι μεγαλύτερα από τα πραγματικά (όταν το βάθος είναι μεγαλύτερο από 20m), με μία μέση υπερεκτίμηση της τάξης του 50%.

3.3. Αποτελέσματα Εξαγωγής Κυμάτων Rayleigh από Καταγραφές Εδαφικού Θορύβου.

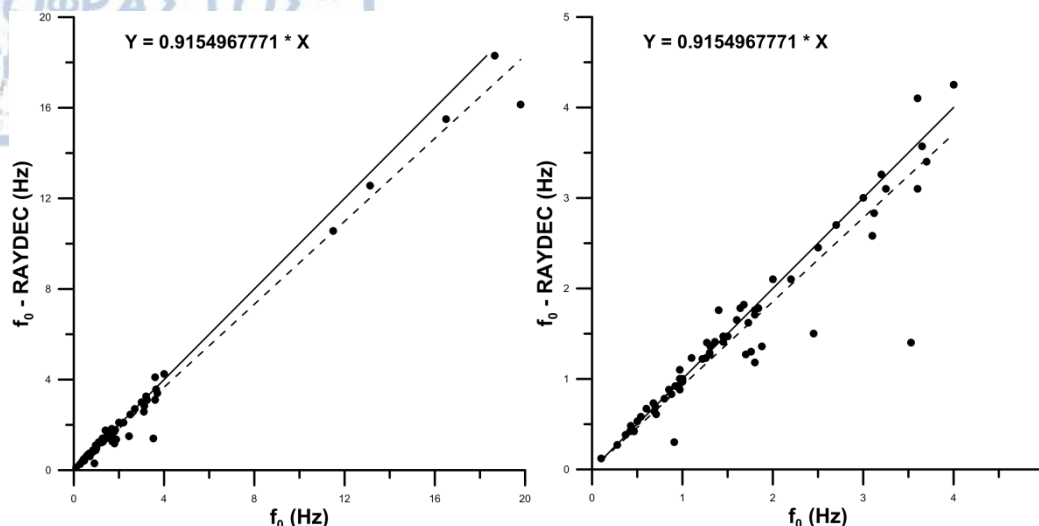
Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 2.3, η καμπύλη, η οποία προκύπτει από τον φασματικό λόγο της οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας (HVSR) στηρίζεται στην υπόθεση ότι απεικονίζει κυρίως την ελλειπτικότητα των Rayleigh κυμάτων, δηλαδή τον λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφης συνιστώσας των κυμάτων Rayleigh, αν και οι σχετικές αναλογίες των κυμάτων χώρου (επιμήκη και εγκάρσια κύματα) και των επιφανειακών κυμάτων (Love και Rayleigh κύματα) στον εδαφικό

θόρυβο ποικίλουν ανάλογα με το είδος της πηγής και με τις τοπικές εδαφικές συνθήκες (βλέπε και παράγραφο 1.2.2).

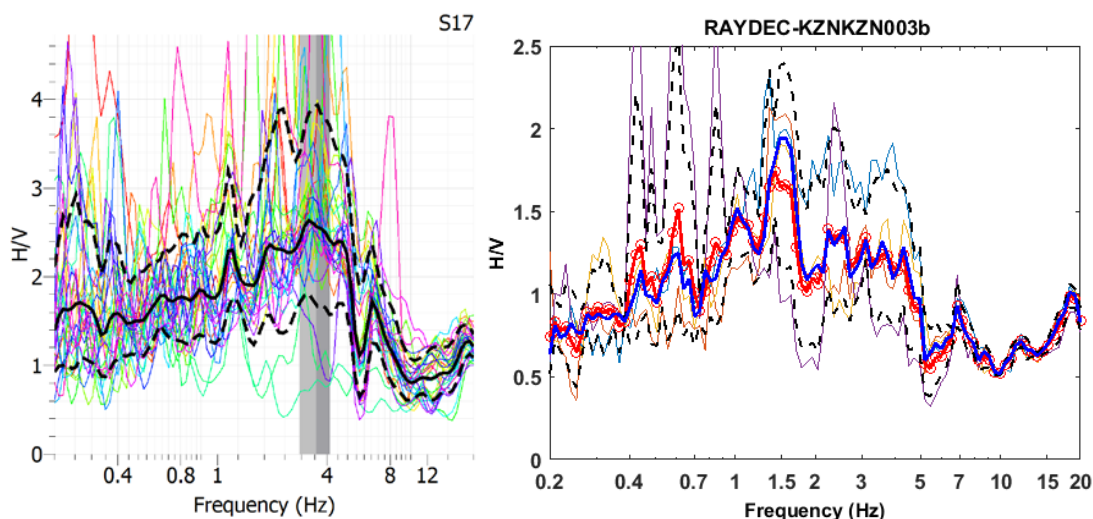
Όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 2.2.3. για να εξεταστεί η αξιοπιστία των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR δημιουργήθηκε η ανάγκη της διάκρισης (εξαγωγής) των κυμάτων Rayleigh από τον εδαφικό θόρυβο. Στη παρούσα διατριβή η εξαγωγή των Rayleigh κυμάτων από τον εδαφικό θόρυβο επιτεύχθηκε με την χρήση του κώδικα RAYDEC (**Hobiger et al., 2009**). Λεπτομέρειες για την εφαρμογή της μεθόδου παρουσιάζονται στην παράγραφο 2.2.3.

Στο σχήμα 3.28 παρουσιάζονται οι ιδιοσυχνότητες οι οποίες καθορίστηκαν από τις καμπύλες ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh, όπως αυτές προέκυψαν με την χρήση του κώδικα RAYDEC, σε συνάρτηση με τις ιδιοσυχνότητες οι οποίες προκύπτουν απευθείας από τις καμπύλες ελλειπτικότητας HVSR, για όλες τις ιδιοσυχνότητες στο οριζόντιο άξονα (μέχρι τα 20 Hz, αριστερό σχήμα) και για επιλεγμένες ιδιοσυχνότητες μέχρι τα 4 Hz (δεξί σχήμα), όπου έχουμε και τη μεγαλύτερη συγκέντρωση σημείων,

Από το δεξί μέρος του σχήματος 3.28 γίνεται αντιληπτό ότι κάποια μεμονωμένα σημεία δεν παρουσιάζουν καλή συσχέτιση μεταξύ των δύο εκτιμήσεων της ελλειπτικότητας. Αυτό οφείλεται κυρίως στην έλλειψη αντίθεσης εμπέδησης μεταξύ υποβάθρου και επιφανειακών σχηματισμών, το οποίο οδηγεί σε καμπύλες HVSR με έλλειψη κάποιας κυρίαρχης κορυφής. Στο σχήμα 3.29 παρουσιάζεται η θέση KZNKZN003b, ως παράδειγμα θέσης με χαμηλή τιμή αντίθεσης εμπέδησης και καμπύλη HVSR με μεγάλο εύρος συχνοτήτων που έχουν χαμηλή τιμή του λόγου HVSR (~ 2). Αριστερά το σχήμα δίνεται η καμπύλη ελλειπτικότητας HVSR με ιδιοσυχνότητα περίπου στα 3.5 Hz (αν και όχι έντονη) και δεξιά η καμπύλη ελλειπτικότητας των Rayleigh κυμάτων με ιδιοσυχνότητα στα 1.4 Hz, με επίσης όχι σημαντικά πλάτη. Σε κάθε περίπτωση, οι διαφορές στο σχήμα 3.28 οφείλεται στη μη διάκριση της κύριας και της πρώτης ή δεύτερης δευτερεύουσας κορυφής της καμπύλης ελλειπτικότητας (Rayleigh ή HVSR).



Σχ. 3.28. Ιδιοσυχνότητες, από τις καμπύλες ελλειπτικότητας των Rayleigh κυμάτων, όπως αυτά εξάχθηκαν από τις καταγραφές θορύβου με χρήση του κώδικα RAYDEC (Hobiger et al., 2009), σε σχέση με τις ιδιοσυχνότητες από τις καμπύλες ελλειπτικότητας HVSr, για εύρος συχνοτήτων στον οριζόντιο άξονα από 0.2 Hz μέχρι 20 Hz (αριστερά) και για εύρος συχνοτήτων από 0.2 Hz μέχρι 4 Hz (δεξιά).



Σχ. 3.29. Καμπύλη ελλειπτικότητας HVSr (αριστερά) και η καμπύλη ελλειπτικότητας των Rayleigh κυμάτων (δεξιά), για τη θέση KZNKZN003b, ως παράδειγμα θέσης με χαμηλή τιμή αντίθεσης εμπέδησης.

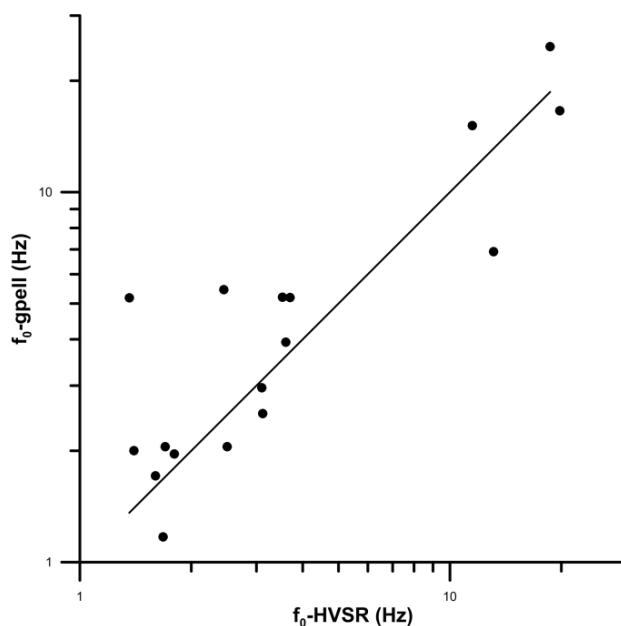
3.4. Αποτελέσματα Θεωρητικών Καμπυλών Ελλειπτικότητας των Κυμάτων Rayleigh.

Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.2, για κάθε τελικό μοντέλο δομής που προσδιορίστηκε σε κάθε θέση μελέτης της παρούσας διατριβής, πραγματοποιήθηκε και ο υπολογισμός των θεωρητικών καμπυλών ελλειπτικότητας των Rayleigh κυμάτων. Απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η γνώση της μεταβολής

των εγκαρσίων ταχυτήτων μέχρι το βάθος του υποβάθρου και για αυτό τον λόγο, η εκτέλεση της συγκεκριμένης μεθόδου πραγματοποιήθηκε μόνο στις θέσεις για τις οποίες προσδιορίστηκαν τελικά μοντέλα. Στην ουσία, η διαδικασία αυτή αποτελεί τη λύση του ευθέως προβλήματος, ώστε από το προφίλ (δομή) σεισμικών ταχυτήτων με το βάθος να προκύψει η θεωρητική καμπύλη ελλειπτικότητας των Rayleigh κυμάτων.

Οι θεωρητικές καμπύλες ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh υπολογίστηκαν με τη χρήση του υποπρογράμματος *gpell* του πακέτου προγραμμάτων GEOPSY (<http://www.geopsy.org>). Στο λογισμικό *gpell* εισάγεται η απλοποιημένη/ομογενής γεωφυσική δομή του υπεδάφους (πάχη στρωμάτων, μέσες τιμές ταχυτήτων των επιμηκών και των εγκαρσίων κυμάτων, των πυκνοτήτων και των ελαστικών σταθερών του κάθε στρώματος και του υποβάθρου) και το λογισμικό αυτό υπολογίζει για κάθε συχνότητα την καμπύλη ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh.

Στο σχήμα 3.30 παρουσιάζονται οι ιδιοσυχνότητες, οι οποίες προκύπτουν από τις θεωρητικές καμπύλες ελλειπτικότητας, σε συνάρτηση με τις ιδιοσυχνότητες οι οποίες προκύπτουν από τις καμπύλες ελλειπτικότητας HVSr. Σε αυτό το σχήμα, γίνεται εμφανής η μεγάλη διασπορά των δεδομένων, ιδίως για μεγάλες συχνότητες.



Σχ. 3.30. Ιδιοσυχνότητες οι οποίες προκύπτουν από τις θεωρητικές καμπύλες ελλειπτικότητας, σε σχέση με τις ιδιοσυχνότητες οι οποίες προκύπτουν από τις καμπύλες ελλειπτικότητας HVSr.

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ – Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από την μέθοδο της αντιστροφής των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR ποικίλουν, ανάλογα με την κάθε περίπτωση εκτέλεσης της μεθόδου και την ιδιαιτερότητα της κάθε εξεταζόμενης θέσης. Για τον περιορισμό της μη-μοναδικότητας των λύσεων της αντιστροφής χρησιμοποιήθηκε η μέση ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων (διατμητικών) κυμάτων των πρώτων 5 μέτρων (V_{s5}) και το βάθος του υποβάθρου ορίστηκε ώστε να μπορεί να αποκτήσει τιμές μεταξύ του διαστήματος $H/2$ μέχρι $H*2$ από την αντιστροφή (όπου H το βάθος του υποβάθρου της σχέσης 2.4). Το παραγόμενο μοντέλο δομής από την αντιστροφή θεωρήθηκε ότι αποτελείται από δύο στρώματα πάνω από ημιχώρο, για την περίπτωση που τα δύο αυτά στρώματα είναι ομογενή (UU), που το ένα είναι ομογενές και το δεύτερο στρώμα η ταχύτητα του αυξάνεται γραμμικά με το βάθος (UL) και για την περίπτωση που η ταχύτητα των δύο στρωμάτων αυξάνεται γραμμικά με το βάθος (LL).

Στην περίπτωση πολύπλοκων γεωλογικών/γεωτεχνικών δομών δοκιμάστηκαν διαφορετικές στρατηγικές επεξεργασίας, όπως η δοκιμή τριών στρωμάτων ή ενός στρώματος πάνω από ημιχώρο και μεγαλύτερο διάστημα τιμών του βάθους του υποβάθρου. Τέτοιες θέσεις αποτελούν ιζηματογενές λεκάνες μεγάλου βάθους με χαμηλή τιμή ιδιοσυχνότητα (<1 Hz), θέσεις με πολύ υψηλή τιμή ιδιοσυχνότητας (>15 Hz) λόγω της ύπαρξης του υποβάθρου σε μικρά βάθη, θέσεις που παρουσιάζουν καμπύλες ελλειπτικότητας με διπλή κορυφή λόγω δεύτερης ισχυρής αντίθεσης εμπέδησης εντός των επιφανειακών ιζηματογενών λεκανών, θέσεις με πολύ σκληρά εδάφη (π.χ. περιοχή Ξάνθης) και θέσεις με παρουσία αντιστροφών σεισμικών ταχυτήτων με το βάθος.

Από τα αποτελέσματα των μονοδιάστατων μοντέλων της δομής των εγκαρσίων ταχυτήτων με βάθος, πραγματοποιήθηκε η εκτίμηση της μέσης ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 30 μέτρων (V_{s30}), για την κάθε θέση της βάσης δεδομένων της παρούσας διατριβής. Επίσης, από την ημι-εμπειρική σχέση των **Stewart et al. (2014)** πραγματοποιήθηκε η εκτίμηση των τιμών

της V_{s30} με χρήση των τιμών της V_{s5} . Τα δεδομένα των γεωφυσικών προφίλ των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων με το βάθος της παρούσας διατρίβης προέρχονται κυρίως από την βάση δεδομένων των **Stewart et al. (2014)**, βάση την οποία οι ίδιοι ερευνητές υπολόγισαν την ημι-εμπειρική σχέση V_{s5} - V_{s30} που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατρίβη, και από την βάση δεδομένων του Εργ. Γεωφυσικής του ΑΠΘ.

Τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από την σύγκριση των εκτιμώμενων τιμών της V_{s30} μεταξύ της μεθόδου της αντιστροφής και με των εκτιμώμενων τιμών της V_{s30} από την χρήση ημι-εμπειρικής σχέσης 1.18 (**Stewart et al., 2014**), σε σχέση με τις πραγματικές τιμές της V_{s30} της κάθε θέσης, είναι τα ακόλουθα:

- Οι εκτιμώμενες τιμές της V_{s30} από τα παραγόμενα μοντέλα ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων των αντιστροφών, παρουσιάζουν μικρότερα μέσα τετραγωνικά σφάλματα (RMS) για τις περιπτώσεις των UU και UL, οπότε και αυτές οι περιπτώσεις στρατηγικής επεξεργασίας είναι οι προτεινόμενες.
- Η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων από τις αντιστροφές, και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από της χρήσης της ημι-εμπειρικής σχέσης των **Stewart et al. (2014)** έδειξε ότι η μέθοδος της αντιστροφής για τις περιπτώσεις των UU και UL υπολογίζει λύσεις με μικρότερες αβεβαιότητες στις τιμές της V_{s30} , για ταχύτητες > 400 m/sec, δηλαδή για τις περιπτώσεις εδαφών κατηγορίας A και B κατά EC8 (πίνακας 1.1). Για εκτιμώμενες τιμές της $V_{s30} < 400$ m/sec, η μέθοδος της αντιστροφής και η χρήση της ημι-εμπειρικής σχέσης υπολογίζουν λύσεις με παρόμοια μέσα τετραγωνικά σφάλματα (RMS).
- Η δοκιμή που πραγματοποιήθηκε σε ανεξάρτητα δεδομένα από την βάση δεδομένων του Εργ. Γεωφυσικής του ΑΠΘ, έδειξε ότι η μέθοδος της αντιστροφής υπολογίζει λύσεις με εκτιμώμενες τιμές της V_{s30} οι οποίες παρουσιάζουν μικρότερα μέσα τετραγωνικά σφάλματα (RMS) σε σχέση με τις εκτιμήσεις των τιμών της V_{s30} από την χρήση της ημι-εμπειρικής των **Stewart et al. (2014)**.

- Για χαμηλές ιδιοσυχνότητες (<2 Hz), το σφάλμα μεταξύ εκτιμώμενων και πραγματικών V_{s30} αυξάνεται, εκτός από τη περίπτωση της ημι-εμπειρικής σχέσης 1.18 των **Stewart et al. (2014)**, το οποίο παρουσιάζει παρόμοιες αβεβαιότητες σε όλο το εύρος συχνοτήτων (0.2 Hz – 4 Hz). Άρα η προτεινόμενη τεχνική δεν ενδείκνυται για τον υπολογισμό του V_{s30} για θέσεις με ιδιοσυχνότητα <2 Hz.
- Τα εκτιμώμενα βάθη του υποβάθρου, τα οποία υπολογίζονται από τις αντιστροφές των καμπυλών HVSR, παρουσιάζουν μεγαλύτερη κατανομή στις υψηλές τιμές στο διάστημα τιμών των βαθών (μεγαλύτερη κατανομή παρουσιάζεται στο μέγιστο όριο του διαστήματος από $H/2$ μέχρι H^*2 , όπου H η εκτίμηση του βάθους του υποβάθρου από την σχέση 2.4).

Τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν για τις/ θέσεις με πολύπλοκα ή ιδιαίτερα γεωλογικά/γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, είναι τα ακόλουθα:

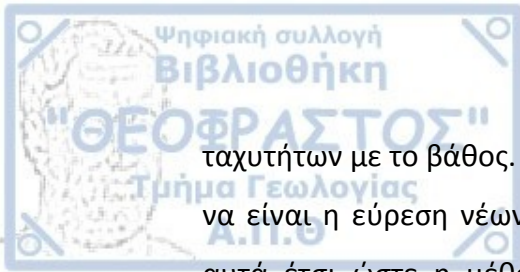
- Στις θέσεις με χαμηλή τιμή ιδιοσυχνότητας (<1 Hz) προτείνεται η χρήση τριών στρωμάτων πάνω από ημιχώρο στα μοντέλα δομής της αντιστροφής, αν και η διαδικασία αυτή έχει εφαρμογή μάλλον στη μελέτη του σεισμικού υποβάθρου και όχι στον προσδιορισμό της ταχύτητας V_{s30} .
- Στις θέσεις που η καμπύλη ελλειπτικότητας HVSR παρουσιάζει διπλή κορυφή και η αντιστροφή δεν μπορεί να υπολογίσει μοντέλα λύσεων με βάθος υποβάθρου που να αντιστοιχεί στην κύρια κορυφή προτείνεται η χρήση μεγαλύτερου διαστήματος βάθος υποβάθρου (από $H/2$ μέχρι H^*3 ή από H μέχρι H^*2 αντί για $H/2$ μέχρι H^*2), ανάλογα με την εξεταζόμενη περίπτωση.
- Στις θέσεις με πολύ υψηλή τιμή ιδιοσυχνότητας (>15 Hz) προτείνεται η χρήση ενός στρώματος πάνω ημιχώρο, ως αρχικό στο μοντέλο δομής για την αντιστροφή.
- Σε περιοχές με πολύ σκληρά εδάφη κατηγορίας B κατά EC8 (πίνακας 1.1) προτείνεται η χρήση μεγαλύτερου διαστήματος αρχικών βαθών υποβάθρου (από H μέχρι H^*3 αντί για $H/2$ μέχρι H^*2).

- Σε θέσεις με αντιστροφές σεισμικών ταχυτήτων με το βάθος η μέθοδος της αντιστροφής των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSr δεν μπόρεσε να υπολογίσει αποδεκτά μοντέλα μεταβολής σεισμικών ταχυτήτων με βάθος.

Για την αξιολόγηση των μορφών και των τιμών των ιδοσυχνοτήτων από τις καμπύλες ελλειπτικότητας HVSr, πραγματοποιήθηκε η διάκριση των κυμάτων Rayleigh από τις καταγραφές του εδαφικού θορύβου. Η διάκριση αυτών των κυμάτων έγινε μέσω της χρήσης του κώδικα RAYDEC (**Hobiger et al., 2009**) πραγματοποιώντας τον υπολογισμό των καμπυλών ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh. Η σύγκριση μεταξύ των καμπυλών από την μέθοδο HVSr και των καμπυλών από την χρήση του κώδικα RAYDEC έδειξε πολύ καλή συμφωνία για τις περιπτώσεις των θέσεων με μέτρια έως ισχυρή αντίθεση εμπέδησης και με ευδιάκριτες και εμφανείς κορυφές στις καμπύλες ελλειπτικότητας HVSr. Οι περιπτώσεις των θέσεων που παρουσίασαν διαφορές στις καμπύλες HVSr με τις καμπύλες των Rayleigh κυμάτων μπορεί να οφείλονται σε χαμηλή αντίθεση εμπέδησης του υποβάθρου με τους ανώτερους επιφανειακούς σχηματισμούς.

Η μέθοδος της αντιστροφής των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSr, με χρήση της μέσης ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 5 μέτρων (V_{s5}) ως περιορισμό της μη-μοναδικότητας των λύσεων της αντιστροφής, παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την εκτίμηση της μέσης εγκάρσιας ταχύτητας των πρώτων 30 μέτρων (V_{s30}) και μπορεί να χρησιμοποιείται συνδυαστικά με τις αναδρομικές/ημι-εμπειρικές σχέσεις V_{s5} - V_{s30} . Ωστόσο, η μέθοδος της αντιστροφής των καμπυλών HVSr βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο ώστε να αντικαταστήσει άμεσα πιο δαπανηρές και χρονοβόρες μεθόδους για τον υπολογισμό της μεταβολής της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων με το βάθος.

Ως κύρια ιδέα για παιρεταίρω διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας και των ορίων της μεθόδου της αντιστροφής, προτείνεται η μελέτη της εφαρμογής της σε συγκεκριμένες περιοχές με γεωλογικές/γεωτεχνικές ιδιαιτερότητες, όπως σε περιοχές με πολύ σκληρά εδάφη κατηγορίας B κατά EC8 (Eurocode 8, πίνακας 1.1, π.χ. η περιοχή της Δράμας και της Ξάνθης), σε βαθιές ιζηματογενείς λεκάνες με πολύ μεγάλα βάθη υποβάθρου και σε περιοχές με αντιστροφές σεισμικών



ταχυτήτων με το βάθος. Σκοπός της παιρεταίρω διερεύνηση της μεθόδου μπορεί να είναι η εύρεση νέων μεθόδων στρατηγική επεξεργασίας στα περιβάλλοντα αυτά έτσι ώστε η μέθοδος της αντιστροφής των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR να μπορέσει να θεωρηθεί ένα αξιόπιστο γεωφυσικό/γεωτεχνικό εργαλείο για την εκτίμηση της V_{s30} .



Βιβλιογραφία

- Akamatsu, J., Fujita M. and Nishimura K., 1992.** Vibrational characteristics of microseisms and their applicability to microzoning. *Journal of Physics of the Earth* 40, 137–150.
- Aki, K., 1957.** Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bull. Earthquake Res. Inst.* 35, 415–457.
- Al Yuncha, Z. and Luzon, F., 2000.** On the Horizontal to Vertical Spectral ratio in Sedimentary Basins. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 1101–1106.
- Albarelo, D. and Lunedei, E., 2010.** Alternative interpretations of horizontal to vertical spectral ratios of ambient vibrations: new insights from theoretical modeling. *Bull. Earthq. Eng.*, 8, 519–534.
- Ansary, M. A., Fuse, M., Yamazaki, F. and Katayama, T., 1995.** Use of Microtremors for the Estimation of Ground Vibration Characteristics. *3rd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics (Saint-Louis, USA)*, 571–574p.
- Arai, H. and Tokimatsu, K., 1998.** Evaluation of local site effects based on microtremor H/V spectra. *Proceeding of the Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion. Yokohama, Japan*, pp. 673–680.
- Arai, H. and Tokimatsu K., 2000.** Effects of Rayleigh and love waves on microtremor H/V spectra. *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand*, No. 2232.
- Asmussen, J. C., 1997.** Modal analysis based on the random decrement technique. *Ph.D. thesis, Univ. of Aalborg, Aalborg, Denmark.*
- Asten, W. M., 1978.** Geological Control on the Three-Component Spectra of Rayleigh-Wave Microseism. *Bulletin of the Seismological Society of America (Vol.68)*, 1623–1636p.
- Asten, M. W., 2004.** Comment on “Microtremor observations of deep sediment resonance in metropolitan Memphis, Tennessee” by Paul Bodin, Kevin Smith, Steve Horton and Howard Hwang. *Engineering Geology* 72, 334–343.
- Asten, W. M. and Henstridge, D. J., 1984.** Array Estimators and Use of Microseisms for Reconnaissance of Sedimentary Basins. *Geophysics (49)*, 1828–1837p.
- Asten, M. W. and Dhu, T., 2002.** Enhanced interpretation of microtremor spectral ratios using multimode Rayleigh-wave particle-motion computations. *Proceedings of Total Risk Management in the Privatised Era, Australian Earthquake Engineering Society Conference, Adelaide, Australia*, Vol. 8.
- Ανθουμίδης, Μ., 2008.** Συμβολή στη μελέτη της γεωφυσικής δομής και της απόκρισης των επιφανειακών στρωμάτων της Γης με τη χρήση δεδομένων δικτύων μικροθορύβου και σεισμικών καταγραφών, *Διατριβή, Τμ. Γεωλογίας ΑΠΘ*, 262 σελ.
- Bard, P.-Y., 1999.** Microtremor Measurement: A Tool for Site Effect Estimation?. *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, 1251–1279p.
- Bard P.-Y., Cadet, H., Endrun, B., Hobiger, M., Renalier, F., Theodulidis, N., Ohrnberger, M., Fäh, D., Sabetta, F., Teves-Costa, P., Duval, A.M.,**

- Cornou, C., Guillier, B., Wathelet, M., Savvaidis, A., Köhler, A., Burjanek, J., Poggi, V., Gassner-Stamm, G., Havenith, H. B., Hailemikaël, S., Almeida, J., Rodrigues, I., Veludo, I., Lacave, C., Thomassin, S. and Kristekova, M., 2010.** From Non-invasive Site Characterization to Site Amplification: Recent Advances in the Use of Ambient Vibration Measurements. *Geotechnical, Geological, and Earthquake Engineering Earthquake Engineering in Europe*, 105-23.
- Berger, J. and Davis, P., 2004.** Ambient earth noise: a survey of the global seismographic network. *Journal of Geophysical Research* 109 (B11307).
- Bernard, P., 1941a.** Etude sur l'agitation microséismique. *Presses Universitaires de France*. (In French).
- Bernard, P., 1941b.** Etude sur l'agitation microséismique et ses variations. *Annales de l'Institut de Physique du Globe de Paris* 19, 77. (In French).
- Bindi, D., Parolai, S., Spallarossa, D. and Cattaneo, M., 2000.** Site effects by H/V ratio: Comparison of two different procedures, *J. Earthq. Eng.*, 4, 97-113.
- Bromirski, P. D. and Duennebier, F. K., 2002.** The near-coastal microseism spectrum: spatial and temporal wave climate relationships. *Journal of Geophysical Research* 107 (B8), 5.1–5.20.
- Bodin, P., Smith, K., Horton, S. and Hwang, H., 2001.** Microtremor observations of deep sediment resonance in metropolitan Memphis. *Tennessee. Engineering Geology* 2, 159–168.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Kristek, J., Ohrnberger, M., Wathelet, M., Bard, P.-Y., Fah, D., Moczo, P. and Cotton, F., 2004.** Simulation of Seismic Ambient Noise: I. H/V and Array Techniques on Canonical Models. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering* (Vancouver, Canada), Paper No. 1120.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Cotton, F. and Bard P.-Y., 2006b.** The Nature of Noise Wavefield and its Applications for Site Effects Studies. A Literature Review. *Earth-Science Reviews* (79), 205-227p.
- Bonnefoy-Claudet, S., Köhler, A., Cornou, C., Wathelet, M. and Bard, P.-Y., 2008.** Effects of Love waves on microtremor H/V ratio. *Bull. seism. Soc. Am.*, 98, 288–300.
- Boore, D. M., 2015.** Determining Generic Velocity and Density Models for Crustal Amplification Calculations, with an Update of the Generic Site Amplification for. *Bulletin of the Seismological Society of America* 106.1, 313-17.
- Bowen, S. P., Richard, J. C., Mancini, J. D., Fessatidis, V. and Crooker, B., 2003.** Microseism and infrasound generation by cyclones. *Journal of the Acoustical Society of America* 113 (5), 2562–2573.
- Bour, M., Fouissac, D., Dominique, P. and Martin, C., 1998.** On the use of microtremor recordings in seismic microzonation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17, 465-474.
- Bromirski, P. D., 2001.** Vibrations from the “perfect storm”. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 2.
- Capon, J., Greenfield, R. J. and Kolker, R. J., 1967.** Multidimensional maximum-likelihood processing of a large-aperture seismic array. *IEEE* 192–211.

- Capon, J., 1969.** High Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis. *Proceedings of the IEEE* (Vol.57), 1408-1418p.
- Carneil, R., Barazaa, F. and Pascolo, P., 2006.** Improvement of Nakamura Technique by Singular Spectrum Analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (26), 55-63p.
- CEN., Eurocode 8, 2004.** Design of Structures for Earthquake Resistance—Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. *EN 1998-1: 2004.* Comite Europeen de Normalisation, Brussels,.
- Chávez-García, F. J., Pedoti, G., Hatzfeld, D., and Bard, P-Y., 1990.** An experimental study near Thessaloniki (Northern Greece). *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 4, 784–800.
- Chouet, B., De Luca, G., Milana, G., Dawson, P., Martini, M. and Scarpa, R., 1998.** Shallow velocity of Stromboli volcano, Italy, derived from small-aperture array measurements of Strombolian tremor. *Bulletin of the Seismological Society of America* 88 (3), 653–666.
- Cornou, C., 2002.** Traitement d'antenne et imagerie sismique dans l'agglomération grenobloise (Alpes françaises): implications pour les effets de site. *Ph.D. Thesis, University Joseph Fourier, Grenoble, France.* (In French with English abstract).
- Cornou, C., Bard, P.-Y. and Dietrich, M., 2003a.** Contribution of dense array analysis to identification and quantification of basin-edge induced waves. Part I: methodology. *Bulletin of the Seismological Society of America* 93 (6), 2604–2623.
- Cornou, C., Bard, P.-Y. and Dietrich, M., 2003b.** Contribution of dense array analysis to identification and quantification of basin-edge induced waves. Part II: application to Grenoble basin (French Alps). *Bulletin of the Seismological Society of America* 93 (6), 2624–2648.
- Cornou, C., Kristek, J., Bonnefoy-Claudet, S., Fäh, D., Bard, P.-Y., Moczo, P., Ohrnberger, M. and Wathelet, M., 2004.** Simulation of seismic ambient vibrations: II. H/V and array techniques for real sites. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August 2004, Paper # 1130.*
- Dravinski, M., Ding, G. and Wen, K.-L., 1996.** Analysis of spectral ratios for estimating ground motion in deep basins, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 3, 646–654.
- Dobry, R., Martin, G. R., Parra, E. and Bhattacharyya, A., 1994.** Development of site dependent ratios of elastic response spectra (RRS) and site categories for building seismic codes. *Proceedings of 1992 NCEER/SEAOC/BSSC Workshop on Site Response During*. p. 18-20.
- Dolenc, D. and Dreger, D., 2005.** Microseisms observations in the Santa Clara Valley, California. *Bulletin of the Seismological Society of America* 95 (3), 1137–1149.
- Douze, E. J., 1964.** Rayleigh waves in short-period seismic noise. *Bulletin of the Seismological Society of America* 54 (4), 1197–1212.
- Douze, E.J., 1967.** Short-period seismic noise. *Bulletin of the Seismological Society of America* 57 (1), 55–81.
- Duval, A.-M., Bard, P.-Y., Mèneroud, J.-P. and Vidal S., 1994.** Mapping site effects with microtremors. *Proc. of 5th Intern. Confer. on Seismic Zonation, October 1995, (Nice, France) vol. 2, pp. 1522-1529.*

- Duval, A.-M., Vidal, S., Meneroud, J.-P., Singer, A., DeSantis, F., Ramos, C., Romero, G., Rodriguez, R., Pernia, A., Reyes, N. and Griman, C., 2001.** Caracas, Venezuela, Site effect determination with Microtremors. *Pure Appl. Geophys.*, 158, 2513-2523.
- Endrun, B., 2011.** Love wave contribution to the ambient vibration H/V amplitude peak observed with array measurements. *J. Seismol.*, 15, 443– 472.
- Essen, H.-H., Kruger, F., Dahm, T. and Grevemeyer, I., 2003.** On the generation of secondary microseisms observed in northern and central Europe. *Journal of Geophysical Research* 108 (B10), 2506–2521.
- Fäh D., Kind F. and Giardini D., 2001.** A theoretical investigation of average H/V ratios. *Geophys. J. Int.*, 145, 535-549.
- Fäh, D., Kind, F. and Giardini, D., 2003.** Inversion of local S-wave velocity structures from average H/V ratios, and their use for the estimation of site-effects. *J. Seismol.*, 7, 449–467.
- Field E. and Jacob K., 1993.** The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise. *Geophys. Res. Lett.*, 20-24, 2925–2928.
- Field, E., Hough, S. E. and Jacob, K., 1990.** Using microtremors to access potential earthquake response: A case study in Flushing Meadows, New York city. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 80, 1456–1480.
- Fowler, C. M. R., 2005.** The Solid Earth: An Introduction to Global Geophysics, Cambridge University Press, 685.
- Frantti, G., 1963.** The Nature of High-Frequency Earth Noise Spectra. *Geophysics* (Vol. 28), 547-562p.
- Frantti, G., Willis, D. E. and Wilson, J. T., 1962.** The Spectrum of Seismic Noise. *Bulletin of the Seismological Society of America* (Vol.52), 113-121p.
- Friedrich, A., Krüger, F. and Klinge, K., 1998.** Ocean-generated microseismic noise located with the Gräfenberg array. *Journal of Seismology* 2 (1), 47–64.
- Gardner, G. H. F., Gardner, L. W. and Gregory, A. R., 1974.** Formation Velocity And Density—The Diagnostic Basics For Stratigraphic Traps. *Geophysics* 39.6, 770-80.
- Gorbatikov, A.V., Kalinina, A.V., Volkov, V.A., Arnoso, J., Vieira, R. and Velez, E., 2004.** Results of analysis of the data of microseismic survey at Lanzarote Island, Canary, Spain. *Pure and Applied Geophysics* 161 (7), 1561–1578.
- Grevemeyer, I., Herber, R. and Essen, H.-H., 2000.** Microseismological evidence for a changing wave climate in the northeast Atlantic Ocean. *Nature* 408 (6810), 349–352.
- Guillier, B., Cornou, C., Kristek, J., Moczo, P., Bonnefoy-Claudet, S., Bard, P.-Y., and Fäh, D., 2006.** Simulation of seismic ambient vibrations: Does the H/V provides quantitative information in 2D-3D structures?. *Proc. of the 3ESG Symposium, Paper Number 185.*
- Gutenberg, B., 1958.** "Microseisms", *Advanced Geophysics* (5), 53-92p.
- Haubrich, R. A., Munk, W. H. and Snodgrass, F. E., 1963.** Comparative spectra of microseisms and swell. *Bulletin of the Seismological Society of America* 53 (1), 27–37.
- Haghshenas, E., Bard, P.-Y. and Theodulidis, N., 2008.** Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio. *Bulletin of Earthquake Engineering* 6.1: 75-108.
- Hobiger, M., Bard, P.-Y., Cornou, C. and Le Bihan, N., 2009.** Single station determination of Rayleigh wave ellipticity by using the random

- decrement technique (RayDec). *Geophys. Res. Lett.*, 36, L14303, doi:10.1029/2009GL038863.
- Hobiger, M., C. Cornou, M. Wathelet, G. D. Giulio, B. Knapmeyer-Endrun, F. Renalier, P.-Y. Bard, A. Savvaidis, S. Hailemichael, B. N. Le, M. Ohrnberger, and N. Theodoulidis, 2012.** Ground structure imaging by inversions of Rayleigh wave ellipticity: sensitivity analysis and application to European strong-motion sites. *Geophysical Journal International* 192.1: 207-29.
- Horike, M., 1985.** Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas. *Journal of Physics of the Earth* 33, 59–96.
- Horike, M., 1996.** Geophysical Exploration Using Microtremor Measurements, *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering (Acapulco, Mexico)*, Paper No. 2033.
- Horike, M., Zhao, B. and Kawase, H., 2001.** Comparison of site response characteristics inferred from microtremor and earthquake shear waves. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 1526–1536.
- Kanai, K. and Tanaka, T., 1961.** On microtremors VIII. *Bulletin of the Earthquake Research Institute* 39, 97–114.
- Konno, K. and Ohmachi, T., 1998.** Ground Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio Between Horizontal and Vertical Components of Microtremor. *Bulletin of Seismological Society of America (Vol.88)*, 228- 241p.
- Kudo K., 1995.** Practical Estimates of Site Response: State of Art Report. *Society of 5th International Conference on Seismic Zonation*, 1878 1907p.
- Lachet, C., and Bard, P.-Y., 1994.** Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique, *J. Phys. Earth.*, 42, 377–397.
- Lacoss, R. T., Kelly, E. J. and Toksoz, M. N., 1969.** Estimation of Seismic Noise Structure Using Arrays. *Geophysics* (34), 21-38p.
- Lermo, J. and Chavez-Garcia, F. J., 1994.** Are microtremors useful in site response evaluation?. *Bulletin of the Seismological Society of America* 84 (5), 1350–1364.
- Lermo, J. and Chavez-Garcia, F. J., 1994-b.** Site effect evaluation at Mexico City: Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 13, 413-423.
- Li, T. M. C., Ferguson, J. F., Herrin, E. and Durham, H. B., 1984.** Highfrequency seismic noise at Lajitas, Texas. *Bulletin of the Seismological Society of America* 74 (5), 2015–2033.
- Longuet-Higgins, M. S., 1950.** A theory of the origin of microseisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. A 243 (a), 1–35.
- Maresca, R., Castellano, M., DeMatteis, R., Saccorotti, G. and Vaccariello, P., 2003.** Local Site Effects in the town of Benevento (Italy) from Noise Measurements. *Pure Appl. Geophys.*, 160, 1745–1764.
- Martin, G. R., 1994.** Earthquakes and Seismic Code Provisions. *University of Southern California, National Center for Earthquake Engineering Research Special Publication NCEER-94-SP01, Buffalo, NY.*
- McNamara, D. and Buland, R., 2004.** Ambient noise levels in the continental United States. *Bulletin of the Seismological Society of America* 94 (4) 1517-15-27.

- Mucciarelli, M., 1998.** Reliability and applicability of Nakamura's technique using microtremors: an experimental approach. *Journal of Earthquake Engineering* 2 (4), 1–14.
- Μουντράκης, Δ., 1985.** Γεωλογία της Ελλάδος, Θεσσαλονίκη, 207.
- Nakamura, Y., 1989.** A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, (Vol. 30), 25-33p.
- Nakamura, Y., 1996.** Real-Time information systems for hazards mitigation. *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering* (Acapulco, Mexico).
- Nakamura, Y., 2000.** Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and its Applications. *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering* (Auckland, New Zealand), 8p.
- Nguyen, F., Van Rompaey, G., Teerlynck, H., Van Camp, M., Jongmans, D. and Camelbeeck, T., 2004.** Use of microtremor measurement for assessing site effects in Northern Belgium – interpretation of the observed intensity during the M = 5.0 June 11 1938 earthquake. *J. Earthq. Eng.*, 8, 41-56.
- Nogoshi, M. and Igarashi, T., 1971.** On the Amplitude Characteristics of Microtremor (Part 2) (in Japanese with English Abstract). *Journal of Seismological Society of Japan* (Vol. 24), 24-40p.
- Ohmachi, T. and Umezono, T., 1998.** Rate of Rayleigh waves in microtremors. Proceeding of the Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion. Yokohama. Japan, pp. 587–592.
- Okada, H., 2003.** The Microtremor Survey Method. *Society of Exploration Geophysics (SEG)*, 135p.
- Okeke, E. and Asor, V., 2000.** On the microseisms associated with coastal sea waves. *Geophysical Journal International* 141 (3), 672–678.
- Peterson, J., 1983.** Observations and Modeling of Seismic Background Noise. *US Geological Survey, Open File Report* (Vol. 93), 42p.
- Πάνου, Α., 2007.** Ανάλυση μετρήσεων μικροθορύβου και συσχέτιση με μακροσεισμικά αποτελέσματα της περιοχής της Θεσσαλονίκης. Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- Παπαδόπουλος, Η., 2013.** Πειραματική και θεωρητική μελέτη της τοπικής εδαφικής ενίσχυσης με τη χρήση δεδομένων μικροθορύβου και γεωφυσικών μετρήσεων πεδίου, Διδακτορική Διατριβή, Τμ. Γεωλογίας ΑΠΘ, 416 σελ.
- Raptakis, D., Theodulidis, N. and Pitilakis, K., 1998.** Data analysis of the Euroseistest strong motion array in Volvi (Greece): standard and horizontal to vertical spectral ratio techniques. *Earthq. Spectra*, 14, 203–224.
- Ridder, S. D. and Dellinger, J., 2011.** Ambient seismic noise eikonal tomography for near-surface imaging at Valhall. *The Leading Edge* 30.5, 506-12.
- Riepl, J., Bard, P.-Y., Hatzfeld, D., Papaioannou, Ch. and Nechtschein, S., 1998.** Detailed evaluation of site-response estimation methods across and along the sedimentary valley of Volvi (EURO-SEISTEST). *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 488–502.
- Rodriguez, V. H. S. and Midorikawa, S., 2002.** Applicability of the H/V spectral ratio of microtremors in assessing site effects on seismic motion. *Earthq. Eng. and Structural Dynamics*, 31, 261-279.

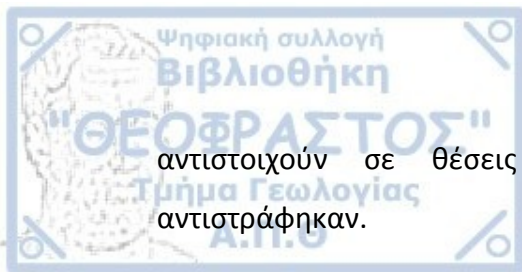
- Satoh, T., Kawase, H. and Shin'Ichi, M., 2001.** Estimation of S-wave velocity structures in and around the Sendai Basin, Japan, using arrays records of microtremors. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2), 206-218.
- Schmidt, R.O., 1981.** A signal subspace approach to multiple emitter location and spectral estimation. *Ph.D, thesis, Stanford University, California, USA, Society of America* 91 (2), 206–218.
- Seekins, L.C., Wennerberg, L., Marghereti, L. and Liu, H.-P., 1996.** Site amplification at five locations in San Francisco, California: a comparison of S waves, codas, and microtremors. *Bulletin of the Seismological Society of America* 86 (3), 627–635.
- Semblat, J.-F., Duval, A.-M. and Dangla, P., 2000.** Numerical analysis of seismic wave amplification in Nice (France) and comparisons with experiments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, 347-362.
- Seo, K., 1997.** Comparison of measured microtremors with damage distribution. *JICA. Research and Development Project on Earthquake Disaster Prevention*, 306-320.
- Stephenson, W. R., 2003.** Factors bounding prograde Rayleigh-wave particle motion in a soft-soil layer. *Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 13.
- Stewart, J. P., Klimis, N., Savvaidis, A., Theodoulidis, N., Zargli, E., Athanasopoulos, G., Pelekis, P., Mylonakis, G. and Margaris, B., 2014.** Compilation of a Local VS Profile Database and Its Application for Inference of VS30 from Geologic- and Terrain-Based Proxies. *Bulletin of the Seismological Society of America* 104.6, 2827-841.
- Stutzmann, E., Roult, G. and Astiz, L., 2000.** GEOSCOPE station noise levels. *Bulletin of the Seismological Society of America* 90 (3), 690–701.
- Teves-Costa, P., Matias, L. and Bard, P.-Y., 1996.** Seismic behavior estimation of thin alluvium layers using microtremor recordings. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 15, 201-209.
- Tindle, C. T. and Murphy, M. J., 1999.** Microseisms and ocean wave measurements. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 24 (1), 112–115.
- Tokimatsu, K., 1997.** Geotechnical site characterization using surface waves. *Proceedings of the First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, vol. 3, pp. 1333–1368.
- Tokimatsu, K., Aarai H. and Asaka, Y., 1996.** Three-Dimensional Soil Profiling in Kobe Area Using Microtremors. *10th World Conference of Earthquake Engineering (Acapulco, Mexico)*, Paper No. 1764.
- Toksöz, M. N., Lacoss and R. T., 1968.** Microseisms: mode structure and sources. *Science* 159, 872–873.
- Τσελέντης, Α., 1997.** Σύγχρονη Σεισμολογία, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1997.
- Yamanaka, H., Takemura, M., Ishida, H. and Niwa, M., 1994.** Characteristics of long-period microtremors and their applicability in exploration of deep sedimentary layers. *Bulletin of the Seismological Society of America* 84 (6), 1831–1841.
- Yamanaka, H., Dravinski, M. and Kagami, H., 1996.** Continuous Measurements of Microtremor on Sediments and Basement in Los Angeles, California. *Bulletin of the Seismological Society of America* (Vol.63), 1227-1253p.

- Yamamoto, H., 2000.** Estimation of shallow S-wave velocity structures from phase velocities of Love- and Rayleigh-waves in microtremors. *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand.
- Wakamatsu, K., and Yasui, Y., 1996.** Possibility of estimation for amplification characteristics of soil deposits based on ratio of horizontal to vertical spectra of microtremors. *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*. Acapulco.
- Wathelet, M., 2005.** Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion. *PhD Diss., Liège University*, 161.
- Wathelet, M., 2008.** An improved neighborhood algorithm: Parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters* 35.9.
- Zaslavsky, Y., Shapira and A. Arzi A., 2000.** Amplification effects from earthquakes and ambient noise in the Dead Sea rift (Israel). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20, 187-207.

Παράρτημα

Στο παράρτημα παρουσιάζονται αναλυτικοί πίνακες με τα τελικά αποτελέσματα των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR, των καμπυλών ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh και των θεωρητικών καμπυλών ελλειπτικότητας για κάθε θέση μέτρησης. Επίσης δίνονται τα τελικά αποτελέσματα των μέσων ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 30 m (V_{s30}), τα οποία προκύπτουν από τις εκτιμήσεις της μεθόδου της αντιστροφής και από την χρήση της ημι-εμπειρικής σχέσης 1.18 των **Stewart et al. (2014)**, με τη χρήση της τιμής V_{s5} .

Στον πίνακα A1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των καμπυλών ελλειπτικότητας (HVSR, Rayleigh, θεωρητικές καμπύλες Rayleigh), καθώς και τις διαθέσιμες γεωφυσικές και γεωλογικές πληροφορίες για την κάθε θέση. Στην πρώτη στήλη δίνεται ο κωδικός της κάθε θέσης. Στην δεύτερη και τρίτη στήλη δίνονται οι συχνότητες του πρώτου και δεύτερου μεγίστου (όπου υπάρχει) των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR, αντίστοιχα, ενώ στην τέταρτη και πέμπτη αναφέρονται τα αντίστοιχα πλάτη αυτών των μεγίστων. Στην έκτη στήλη δίνεται η ιδιοσυχνότητα η οποία προκύπτει από τις δοκιμές διάκρισης των καμπυλών ελλειπτικότητας των Rayleigh κυμάτων με χρήση του κώδικα Raydec (**Hobiger et al., 2009**) και στην έβδομη στήλη το αντίστοιχο πλάτος της κάθε ιδιοσυχνότητας. Στην όγδοη στήλη αναφέρεται η ιδιοσυχνότητα από τις θεωρητικές καμπύλες ελλειπτικότητας των Rayleigh κυμάτων για τις θέσεις με γνωστό το βάθος του υποβάθρου από την χρήση του λογισμικού *gpell* του πακέτου προγραμμάτων *GEOPSY*. Στην ένατη στήλη δίνεται το βάθος του υποβάθρου, για όποιες θέσεις αυτό ήταν διαθέσιμο. Στην δέκατη στήλη δίνεται η οριζόντια απόσταση της κάθε θέσης από την κοντινότερη επιφανειακή εμφάνιση του υποβάθρου. Στην ενδέκατη στήλη αναφέρεται η ιδιοπερίοδος της κάθε θέσης, η οποία προκύπτει από τις καμπύλες ελλειπτικότητας HVSR. Τέλος, στην 12^η και 13^η στήλη παρουσιάζεται η μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 5 m (V_{s5}) και η μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 30 m (V_{s30}), αντίστοιχα. Οι τιμές με κόκκινο χρώμα σε αυτόν τον πίνακα αντιστοιχούν σε μη αξιόπιστα δεδομένα ενώ οι θέσεις με κόκκινο χρώμα



αντιστοιχούν σε θέσεις που χαρακτηρίστηκαν προβληματικές και δεν αντιστράφηκαν.

Στον πίνακα A2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αντιστροφών των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR. Αυτά τα αποτελέσματα αφορούν τις εκτιμώμενες τιμές της μέσης ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 30 m (V_{s30}) και τις εκτιμήσεις των βαθών του υποβάθρου για την κάθε θέση. Στην πρώτη και δεύτερη στήλη δίνεται ο κωδικός και η ιδιοσυχνότητα της κάθε θέσης. Στην τρίτη στήλη αναφέρεται το πραγματικό βάθος του υποβάθρου (όπου ήταν διαθέσιμο) και στην τέταρτη η μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 5 m (V_{s5}). Στην πέμπτη στήλη παρουσιάζεται η εκτίμηση του βάθους του υποβάθρου από την σχέση 2.4. Στην έκτη δίνεται η εκτίμηση της μέσης ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων των πρώτων 30 m (V_{s30}), από την ημι-εμπειρική σχέση 1.18 των **Stewart et al. (2014)**, με χρήση της V_{s5} και στην έβδομη στήλη η πραγματική V_{s30} της κάθε θέσης. Στην όγδοη, ένατη και δέκατη στήλη αναφέρονται οι εκτιμώμενες τιμές V_{s30} και στην 11^η, 12^η και 13^η στήλη τα εκτιμώμενα βάθη του υποβάθρου, τα οποία προκύπτουν από τις αντιστροφές των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR, για την περίπτωση δύο ομοιόμορφων στρωμάτων πάνω σε ημιχώρο (UU, 8^η και 11^η στήλη), ενός ομοιόμορφου και ενός στρώματος με γραμμικά αυξανόμενη ταχύτητα με το βάθος (UL, 10^η και 12^η στήλη) και για δύο στρώματα με γραμμικά αυξανόμενες ταχύτητες με το βάθος (LL, 10^η και 13^η στήλη). Σε κάθε στήλη (από την 8^η μέχρι την 13^η) δίνεται η υπολογιζόμενη τιμή, η οποία αντιστοιχεί στην πρώτη (Run1, αριστερά κάθε στήλης) και δεύτερη (Run2, δεξιά κάθε στήλης) αντιστροφή. Με κίτρινη υπογράμμιση παρουσιάζονται οι θέσεις, στις οποίες εφαρμόστηκε διαφορετική στρατηγική επεξεργασίας αντιστροφής ενώ με κόκκινη υπογράμμιση οι θέσεις, οι οποίες αξιολογήθηκαν ως προβληματικές και οι λύσεις τους δεν περιλαμβάνονται στην τελική αξιολόγηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας Α1. Αναλυτικές γεωφυσικές και γεωλογικές πληροφορίες από τα αποτελέσματα της αντιστροφής των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSr, για όλες τις θέσεις μέτρησης εδαφικού θορύβου της παρούσας διατριβής.

Site_code	f_0 (Hz)	f_1 (Hz)	A_0	A_1	f_0 -RAYDEC (Hz)	A_0 -Raydec	f_0 -qpell (Hz)	Seismic Bedrock Depth (m)	Distance from basin edge (m)	T_0 (sec)	V_{S_5} (m/sec)	$V_{S_{30}}$ (m/sec)
NESXAN00 1a	1.4		6.27		1.76	6.00	2.00	52	760	0.71	166	257.4
NESXAN00 2a	1.7		8.99		1.27	10.00	2.05	52	565	0.59	129	212.1
NESXAN00 4a	1.6		9.50		1.65	8.80	1.71	48	456	0.63	148	201.6
NESXAN00 5a	1.8		11.8		1.71	8.00	1.96	35	194	0.56	140	219.7
DRADRA00 1d	0.7	34.50	4.00	4.76	0.69	2.50			1726	1.43	277.2	368.2
DRADRA00 2d	2.5	20.00	6.70	3.30	2.45	5.00	2.05	40	500	0.40	327	346.5
DRADRA00 5d	1.68		14.5		1.82	19.00	1.17	40	768	0.60	459.7	517.6
DRADRA00 6d	1.45	4.80	4.50	2.00	1.41	6.30			1610	0.69	409.1	617.8
XANTHlg1	1.26	3.00	4.00	2.20	1.23	6.00			492	0.79	476.7	507.3
XANTHlg2	1.27		2.50		1.40	2.00			367	0.79	351.7	610.7
KAVALAG1	0.88		5.90		0.83	4.20			625	1.14	164.5	210
KAVALAG 2	2.00		3.80		2.10	2.50			72	0.50	61	54
KAVALAG3	1.1		5.90		1.23	4.00			280	0.91	137.7	195.1
KAVALAG4	1.3		8.30		1.27	11.50			193	0.77	311	316.1
TENAGH01	1.88		6.20		1.36	5.70			1910	0.53	110	120.13
TENAGH02	0.95		9.00		0.92	5.50			1609	1.05	70	81.982323

SARSTH001 e	4		4.80		4.25	3.00			108	0.25	167	368.602
KNTXER001 e	16.5	37.00	5.30	4.30	15.50	4.80			1	0.06	350	702.2526
VLVZAG008 a	0.68	8.00	5.90	1.80	0.73	3.20			2280	1.47	119.0	206.99613 64
VLVZAG009 e-W003	0.37		6.20		0.38	4.90			2840	2.70	230	248.1
VLVZAG01 0e-E001	0.8		4.60		0.78	3.00			2240	1.25	240	301.6252
VLVZAG01 1e-E003	0.69		6.10		0.64	3.00			2180	1.45	220	238.1955
VLVZAG01 2a	0.709	1.90	2.30	1.90	0.61	1.50			1110	1.41	248.9	267.42596 98
THETHE003 a	1		2.87		1.00	2.39			1720	1.00	227.97927 46	327.10141 52
THETHE005 b	0.97		3.70		0.88	2.90			1310	1.03	244.39072 36	205.45642 97
THETHE006 a	1.84		4.30		1.78	3.80		37	640	0.54	240	323.87918 1
THETHE007 a	13.13		5.30		12.56	3.80	6.9	11.5	1	0.08	282.60869 57	523.84332 3
THETHE008 a-9a	3.65		4.10		3.57	2.20			283	0.27	313.17	536.20186 88
THETHE010 h	1.31	3.00	4.20	1.70	1.36	2.70			660	0.76	240	325.1613
THETHE013 b	19.8		2.70		16.14	2.30	16.6	6	0	0.05	335.29544 48	878.87575 47
THETHE014 b	2.7		4.80		2.7	2.60			409	0.37	216.02500 16	346
THETHE015 a	1.76		3.70		1.30	3.90			594	0.57	265.15151 52	285.16937 3
THETHE016 a	0.91		4.00		0.30	1.20			1305	1.10	130.57954 85	237.696

THETHE017 a-18a	1.22		5.40		1.22	6.00			1388	0.82	270.25076 27	452.86517 64
THETHE019 a	1.3		5.90		1.29	5.90			1114	0.77	292.30769 23	379
THETHE020 e	0.6	2.70	3.80	2.10	0.67	3.90			2231	1.67	178.7234	269.2507
THETHE021 a	0.54	2.37	3.90	2.40	0.58	2.41			2412	1.85	221.27329 19	247.53300 5
THETHE023 a	0.5		3.90		0.53	2.70			4541	2.00	209.1624	266.5733
THETHE024 a	0.43	2.60	4.10	2.60	0.48	2.70			4168	2.33	234.56029 01	241.372
THETHE025 a	0.42		3.40		0.42	2.18			3210	2.38	254.58333 33	275.649
THETHE026 b	0.464	3.50	3.00	1.40	0.42	2.10			3745	2.16	337.29608 44	370.40147 35
THETHE027 a	0.10	6.50	24.7	2.50	0.12	24.20			6041	10.00		330
THETHESEI SM	18.66		3.50		18.30	2.60	24.71	6	0	0.05	429.2453	966.8079
THETRM02 8a	0.85		3.10		0.88	1.69			1300	1.18	143.54881 29	192.78878 8
FYSTHE001 a	1.64		7.00		1.78	6.10			10732	0.61	134.79	236.503
AXIPLA001 a	3.6		2.80		3.10	2.40			14560	0.28	350	393
FYSPLA001 a	0.97		3.10		1.10	2.10			17377	1.03	414.1769	466.947
PLAPLA001 a	1		5.00		0.97	3.30			29861	1.00	155.058	192.962
LOUALE001 a	0.97		4.00		1.00	2.40			17548	1.03	111.2167	132.552
EDEEDE001	1.8	21.20	10.5	2.50	1.76	7.56			572	0.56	172.1739	353.5381

c												
KZNKZN00 3b	3.53		2.50		1.40	1.70	5.20	26	0	0.28	253.1046	482.5741
KZNKZN00 4b	3.7		2.80		3.40	1.80	5.19	25	0	0.27	374.0773	471.0921
KZNKZN00 5b	11.5		4.49		10.56	3.20	15.13	4	0	0.09	294	752.60151
KZNKZN00 6b	3.12		4.00		2.83	1.90	2.52	32	0	0.32	269.0046	450.9616
KZNKZN00 7b	2.45		2.40		1.50	1.70	5.45	36	0	0.41	207.443	392.216
KZNKZN00 8b	3.1		3.40		2.58	2.10	2.96	37	0	0.32	201.9806	375.5678
KZNKZN00 9b	3.25		7.00		3.10	3.90			210	0.31	424.7484	436.6344
KZNKZN01 0b	1.45		4.70		1.41	3.18			60	0.69	256.4961	314.5728
KZNKZN01 2b	1.73		6.30		1.62	3.00			225	0.58	373.4738	622.384
KZNKZN01 3b	3.6		3.90		4.10	3.70	3.93	30	350	0.28	237.5486	354.1358
KZNKZN01 6b	1.36		3.00		1.41	2.50	5.18	10	845	0.74	220	670.582
RYMLIV001 a	0.28	0.7	4.30	2	0.27	2.90			1171	3.57	156.7164	263.598
AIALIV001a	3.2		5.10		3.26	3.20			3000	0.31	207.7348	345.157
CHRNIO01 b	0.92		2.80		0.92	1.70			800	1.09	350	528.767
KNIKNIO0 1c	1.80	18.00	3.40	2.50	1.18	1.77			1230	0.56		578
KENKNIO01 a	2.2		4.00		2.10	2.26			5587	0.45	275	307.1809
KLXKNIO01 a	3		4.60		3.00	2.80			4062	0.33	350	391.913

ARGOKEA1 6	1.5		5.00		1.47	3.50			100	0.67	143.9953	236.2309
ARGOKESO 8	1.45		5.30		1.47	4.00			100	0.69	143.99536 29	236.23097 47

Πίνακας Α2. Αναλυτικά αποτελέσματα από τις αντιστροφές των καμπυλών ελλειπτικότητας HVSR.

Site code	f ₀ (Hz)	H-real (m)	Vs ₅ (m/sec)	H=81.9 *T ₀ (2.4)	Vs ₃₀ (m/sec) (from Vs5 - Stewart et al. 2014)	Vs ₃₀ - real (m/sec)	U-U (m/sec)		U-L (m/sec)		L-L (m/sec)		U-U (m)		U-L (m)		L-L (m)	
							Run1	Run2	Run1	Run2	Run1	Run2	Run1	Run2	Run1	Run2	Run1	Run2
NESXAN001a	1.4	52	166.0	58.5	246.2	257.4	328.3	328.3	329.3	327.3	364.0	366.6	71	71	71	69	63	63
NESXAN002a	1.7	42	129.0	48.2	199.1	212.2	184.4	185.5	181.0	180.4	223.9	279.6	89	89	83	83	45.5	57
NESXAN004a	1.6	48	148.0	51.2	223.5	201.6	206.0	206.4	206.2	205.0	206.2	206.0	95	95	95	95	95	95
NESXAN005a	1.8	35	140.0	45.5	213.3	219.7	202.1	221.7	220.1	218.3	220.5	224.5	33.5	83	83	83	43.5	83
DRADRA001d	0.7	?	277.2	117.1	379.2	368.2	452.8	452.8	557.1	557.4	513.8	514.3	110	110	174	174	162	162
DRADRA002d	2.5	40	327.0	32.8	435.8	346.5	661.0	661.0	535.8	535.8	577.3	570.5	61	61	61	61	61	61
DRADRA005d	1.68	40??	459.7	48.8	580.5	517.6	507.7	508.0	501.0	501.0	508.9	509.0	91	91	99	99	91	91
DRADRA006d	1.45	8??	409.1	56.5	526.2	617.8	582.3	582.3	606.8	593.6	557.6	557.6	106	106	106	106	99	99
XANTHlg1	1.26	??	390.0	65.0	505.4	507.3	446.5	446.5	446.0	446.0	447.6	447.6	122	122	122	122	122	122
XANTHlg2	1.27	??	351.7	64.5	463.4	610.7	544.7	544.7	548.2	549.7	485.6	496.4	154	154	158	158	122	122
KAVALAG1	0.88	??	164.6	93.1	244.4	210.0	193.2	193.5	193.4	193.5	195.4	406.9	154	158	154	158	170	166
KAVALAG3	1.1	??	137.7	74.5	210.4	195.2	194.2	193.7	193.8	194.7	197.9	199.9	138	134	138	138	166	146

KAVALAG4	1.3	??	311.0	63.1	417.7	316.1	327.0	327.0	310.0	310.0	311.5	311.4	118	118	138	138	138	138
TENAGH01	1.88	??	110.0	43.6	174.1	120.1	186.9	193.2	391.4	230.6	179.2	187.2	51	49.5	81	81	29.5	79.5
TENAGH02	0.95	??	70.0	86.3	119.0	82.0	110.1	110.3	110.9	110.9	112.1	114.0	158	162	162	162	162	162
SARSTH001e	4	??	167.0	20.5	247.5	368.6	339.3	339.3	339.5	339.5	363.2	369.4	37.5	37.5	37.5	37.5	36.5	37.5
KNTXER001e	16.5	12	455.3	5.0	575.8	702.2	1269.2	1269.1	1230.3	1230.3	1065.7	1056.2	5.5	5.5	5.5	5.5	9.5	9.5
VLVZAG008a	0.68	187	119.0	120.5	186.1	207.0	262.6	262.6	265.8	155.3	315.4	329.1	134	134	134	166	134	142
VLVZAG009e-W003	0.37	??	230.0	221.5	324.0	248.1	439.3	230.0	230.0	463.9	518.8	529.4	363.6	363.6	371.14	371.14	413	237
VLVZAG010e-E001	0.8	??	240.0	102.4	335.8	301.6	479.7	479.7	482.3	482.3	611.5	645.4	200	200	200	200	203	203
VLVZAG011e-E003	0.69	??	220.0	118.8	312.1	238.2	240.0	240.0	240.0	240.0	241.1	241.1	217	207	217	217	217	207
VLVZAG012a	0.709	122	249.0	115.6	346.4	267.4	392.2	392.2	393.4	393.4	497.4	494.6	282	280	285	285	95	95
THETHE003a	1	??	228.0	82.0	321.6	327.1	372.7	372.7	377.6	377.4	380.2	380.2	138	138	154	154	154	154
THETHE005b	0.97	??	244.4	84.5	341.0	205.4	325.9	325.4	327.5	327.5	386.3	388.9	96	93	102	158	158	158
THETHE006a	1.84	??	240.0	44.5	335.8	323.9	356.8	356.8	360.1	361.7	371.5	376.9	81	81	81	81	81	81
THETHE007a	13.13	11	282.6	6.2	385.4	523.8	643.1	643.1	643.6	643.6	677.0	685.4	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
THETHE008a-9a	3.65	??	313.2	22.5	421.0	536.2	485.5	486.6	497.8	497.8	499.9	499.9	36.5	36.5	41.5	41.5	41.5	41.5
THETHE010h	1.31	??	240.0	62.6	335.8	325.1	318.3	318.3	319.3	319.4	332.3	339.2	114	114	122	122	122	122
THETHE013b	19.8	6	335.3	4.1	445.0	878.9	958.0	957.9	987.5	987.5	987.5	987.5	3.5	3.5	6.5	6.5	6.5	6.5
THETHE014b	2.7	??	216.0	30.4	307.4	346	314.7	314.7	313.1	313.1	464.8	456.6	57	57	57	57	57	57
THETHE015a	1.76	??	265.1	46.6	365.2	285.2	380.7	380.7	379.9	379.9	381.1	382.5	87	87	87	87	87	87
THETHE016a	0.91	??	130.6	90.1	201.2	237.7	208.2	208.2	217.4	213.7	262.9	263.0	81	81	97	99	166	166
THETHE017a-18a	1.22	??	270.2	67.2	371.2	452.9	324.1	324.1	324.3	324.3	326.6	326.6	126	126	126	126	126	126

THETHE019a	1.32	??	292.3	62.1	396.5	379.0	367.9	367.9	367.2	368.3	367.3	368.4	114	114	114	114	114	114
THETHE020e	0.6	??	178.7	136.6	262.0	269.3	267.3	267.3	301.2	301.2	361.3	314.9	174	174	69	69	81	263
THETHE021a	0.54	??	221.3	151.6	313.6	247.5	298.8	298.8	358.7	358.7	351.8 9	355.4	257	257	71	71	283	273
THETHE023a	0.5	??	209.2	163.9	299.1	266.6	273.9	273.9	275.8	274.5	310.8	310.9	268	268	278	268	288	288
THETHE024a	0.43	??	234.6	190.6	329.4	241.3	379.6	379.0	384.0	384.0	662.7	662.7	377	377	377	377	89	89
THETHE025a	0.42	??	254.6	195.1	353.0	275.7	340.0	339.3	389.1	383.4	396.2	394.1	293	293	150	166	273	267
THETHE026b	0.46 4	??	337.3	176.6	447.3	370.4	407.8	407.8	414.2	414.2	463.8	463.8	257	257	267	267	353	353
THETHESEIS M	18.6 6	6	429.2	4.4	548.0	966.8	1103.1	1103.1	1101.6	1085.9	1076.3	1086.1	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
THETRM028a	0.85	??	143.6	96.4	217.9	192.8	319.5	319.5	318.9	320.7	383.9	393.2	134	134	134	134	134	142
FYSTHE001a	1.64	??	134.8	50.0	206.6	236.5	264.8	260.5	258.6	263.8	348.7	363.6	69	67	83	99	81	99
AXIPLA001a	3.6	??	350.0	22.8	461.4	393.0	493.4	502.9	494.6	494.6	495.4	495.4	44.5	44.5	44.5	44.5	44.5	44.5
FYSPLA001a	0.97	??	414.2	84.5	531.7	467.0	604.8	604.7	605.2	597.5	598.5	610.0	166	166	166	166	166	166
PLAPLA001a	1	??	155.1	82.0	232.9	193.0	321.0	321.0	331.3	331.0	489.1	487.0	162	162	162	162	158	158
LOUALE001a	0.97	??	111.2	85.0	175.7	132.5	195.5	195.5	197.0	197.0	318.9	340.5	63	63	63	63	91	99
EDEEDE001c	1.8	18.5	172.2	45.5	253.9	353.5	268.7	268.1	275.6	277.1	317.5	278.2	91	91	91	91	91	91
KZKNZN003b	3.53	26	253.1	23.2	351.2	482.5	411.9	411.9	412.8	412.8	511.9	508.9	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5
KZKNZN004b	3.7	25	374.1	22.2	488.0	471.1	536.3	536.3	539.8	539.8	551.1	540.5	39.5	39.5	43.5	43.5	43.5	43.5
KZKNZN005b	11.5	4	294.0	7.1	398.4	752.6	667.5	647.9	648.9	648.9	775.6	785.6	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
KZKNZN006b	3.12	32	269.0	26.3	369.7	451.0	357.6	357.6	377.9	377.9	378.9	377.9	44.5	44.5	51	51	51	51
KZKNZN007b	2.45	36	207.4	33.5	297.0	392.2	312.4	321.0	351.7	349.7	352.9	352.6	45.5	35.5	56.5	56.5	56.5	60.5
KZKNZN008b	3.1	37	202.0	26.4	290.4	375.6	356.9	356.2	380.6	380.6	448.7	443.1	37.5	37.5	51	51	61	61
KZKNZN009b	3.25	??	424.8	25.2	543.1	436.6	510.1	510.1	509.7	509.7	506.6	506.6	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5



KZKNZN010b	1.45	??	256.5	56.5	355.2	314.6	376.5	377.2	375.1	375.1	377.4	376.3	99	102	110	110	110	110
KZKNZN012b	1.73	??	373.5	47.4	487.3	622.3	707.9	708.3	688.7	688.7	690.1	690.1	93	93	102	102	93	59
KZKNZN013b	3.6	??	237.5	22.8	332.9	354.1	444.6	448.4	414.5	406.2	475.9	475.9	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5
RYMLIV001a	0.28	??	156.7 164	292.7	234.6	263.6	197.9	197.5	202.5	201.4	157.0	157.0	443	443	550	520	313	313
AIALIV001a	3.2	??	207.7 348	25.6	297.4	345.2	487.1	487.1	485.5	485.5	531.2	537.8	51	51	51	51	51	51
CHRNKI001b	0.92	??	350	89.1	461.4	528.8	669.1	669.1	667.6	667.6	668.9	668.9	69	69	69	69	69	69
KENKNI001a	2.2	??	275	37.3	376.6	307.1	336.6	343.7	338.1	338.0	339.0	340.5	73	73	73	73	73	73
KLXKNI001a	3	??	350	27.3	461.4	392.0	586.5	586.5	584.6	572.8	585.4	589.4	53	53	53	53	53	53
ARGOKEA16	1.5	??	144.0	54.6	218.4	236.2	239.6	235.9	232.3	233.4	238.1	263.7	73	71	93	102	79	99
ARGOKES08	1.45	??	144.0	56.5	218.4	236.2	260.0	260.0	253.2	249.6	257.9	249.7	81	81	110	89	99	91